



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-5363-PUD/049

**ESTEREOSCOPIA E PARALAXE NA DETERMINAÇÃO DE DISTÂNCIAS
VERTICAIS MEDIANTE O USO DE FOTOGRAFIAS AÉREAS**

Flávio Jorge Ponzoni
Attilio Antonio Disperati(1)

(1) Escola Superior de Florestas
Universidade Federal do Paraná

INPE
São José dos Campos
Fevereiro de 1992

SECRETARIA DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-5363-PUD/049

ESTEREOSCOPIA E PARALAXE NA DETERMINAÇÃO DE DISTÂNCIAS
VERTICAIS MEDIANTE O USO DE FOTOGRAFIAS AÉREAS

Flávio Jorge Ponzoni
Atílio Antonio Disperati(1)

(1) Escola Superior de Florestas
Universidade Federal do Paraná

INPE
São José dos Campos
Fevereiro de 1992

INPE-5363-PUD/049

**ESTEREOSCOPIA E PARALAXE NA DETERMINAÇÃO DE DISTÂNCIAS
VERTICAIS MEDIANTE O USO DE FOTOGRAFIAS AÉREAS**

**Flávio Jorge Ponzoni
Attilio Antonio Disperati**

**INPE
São José dos Campos
Fevereiro de 1992**

528.711.7

Ponzoni, F.J.; Disperati, A.A.

Estereoscopia e paralaxe na determinação de distâncias verticais mediante o uso de fotografias aéreas. / F.J. Ponzoni; A. A. Disperati. --- São José dos Campos: INPE, 1992. 63p. -- (INPE-5363-PUD/049)

1. Fotogrametria. 2. Paralaxe. 3. Estereoscopia. 4. Título

RESUMO

Este trabalho é dedicado a estudantes e/ou profissionais que atuarão e/ou atuam no levantamento de recursos naturais no qual a fotogrametria tem sido uma poderosa ferramenta. São apresentados os principais aspectos relacionados com a obtenção da visão estereoscópica e as relações entre paralaxe e a determinação de distâncias verticais mediante o uso de fotografias aéreas verticais. Ainda são apresentadas algumas informações relacionadas com as possibilidades de obtenção da visão estereoscópica através dos produtos orbitais do sensor HRV do satélite SPOT.

STEREOSCOPY AND PARALAX IN THE VERTICAL DISTANCES
DETERMINATION USING AERIAL PHOTOGRAPHS

ABSTRACT

This paper is dedicated to students or professionals which have been involved with natural resources survey in which photogrammetry has been a power tool. The main stereoscopic vision aspects and the paralax-vertical measurements relationship considering vertical aerial photographs are presented. The orbital stereoscopic vision possibilities are still presented considering HRV-SPOT imagery.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS.....	ix
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 ESTEREOSCOPIA.....	1
2.1 - O processo da visão.....	2
2.2 - A percepção de profundidade.....	3
2.3 - A visão estereoscópica e o par estereoscópico de fotografias.....	8
2.3.1 - A visão estereoscópica indireta.....	10
2.3.2 - Visão estereoscópica pelo processo anaglifo	12
2.3.3 - Visão estereoscópica por polarização.....	13
2.3.4 - Visão estereoscópica por cintilamento.....	14
2.3.5 - Visão estereoscópica por holografia.....	14
2.4 - Orientação de um par de fotografias para a visão estereoscópica considerando o uso de estereoscópios.....	16
2.4.1 - Fatores que afetam a visão estereoscópica de um par estereoscópico de fotografias....	19
2.5 - Exagero vertical na imagem visualizada estereoscopicamente.....	22
Questões - Estereoscopia.....	27
3 Medindo alturas por diferença de paralaxe.....	28
3.1 - Medindo a paralaxe e diferenças de paralaxe..	41
3.2 - Procedimento prático para a determinação de diferença de paralaxe mediante o uso de Barra de paralaxe.....	47
Questões - Paralaxe.....	49
4 Estereoscopia e as imagens orbitais.....	52
4.1 - Fotografia x Imagem orbital.....	52
4.2 - O sensor HRV dos satélites da série SPOT.....	53
4.3 - A visada "off-nadir" e a estereoscopia.....	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	58

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1 - Arranjo interno do olho humano.....	3
2 - Conversão relativa entre os eixos visuais.....	4
3 - A visão binocular segundo Hering.....	5
4 - Tomada de fotografias visando visão estereoscópica..	9
5 - Estereoscópio de Wheatstone.....	10
6 - Os estereoscópios de lentes e de espelho.....	12
7 - Processo de obtenção de um holograma.....	15
8 - Tomada de fotografias aéreas verticais e o recobri- mento ao longo do deslocamento da aeronave.....	17
9 - Orientação de fotografias aéreas para observação estereoscópica.....	19
10- Variação na altura de vôo e seu efeito sobre o re- gistro de imagens.....	20
11- Efeito da inclinação da fotografia.....	21
12- Desalinhamento de linha de vôo.....	22
13- Exagero vertical quando $B/H=0.60$	23
14- Fatores que afetam o exagero vertical.....	24
15- Sistema de coordenadas sobre as fotografias.....	29
16- Parâmetros para a estimativa de b	33
17- Paralaxe do ponto principal.....	34
18- Ilustração de E	36
19- Ilustração do exemplo numérico.....	38
20- Paralaxe dos pontos A e B.....	41
21- Altitude x paralaxe.....	43
22- Princípio do ponto flutuante.....	45
23- Barras de paralaxe.....	46
24- Cunha de paralaxe.....	46
25- Configuração do sensor HRV.....	53
26- Frequência de aquisição de dados.....	54
27- Geometria de aquisição de pares estereoscópios.....	55

1 INTRODUÇÃO

Técnicos ligados aos mais variados campos do conhecimento humano têm utilizado fotografias aéreas como ferramenta útil à solução de seus problemas.

Para os profissionais ligados ao setor florestal as fotografias aéreas podem revelar características qualitativas e quantitativas de árvores e/ou povoamentos florestais, tais como : espécie ou grupo de espécies, altura de árvores, diâmetro e número de copas, porcentagem de cobertura, área de plantios ou comunidades vegetais, etc. Outras informações como diâmetro a altura do peito (DAP), área basal, volume de uma árvore ou de povoamentos, qualidade de sítio, etc; podem ser obtidas através da correlação com as anteriores.

As determinações qualitativas são geralmente feitas através da chamada fotointerpretação. Aqui o fotointérprete observa a aparência assumida por objetos no filme fotográfico, cuja sensibilidade espectral é conhecida, e desta conclui sobre a existência de um certo tipo de comunidade vegetal, sobre a área de ocorrência de um determinado dano presente em um plantio, etc. As determinações quantitativas normalmente exigem o uso de equipamentos auxiliares e é através delas que mapas planialtimétricos são elaborados, áreas e alturas de objetos são determinadas com exatidão.

Este trabalho foi dividido em três Capítulos, sendo o primeiro dedicado a apresentação de conceitos sobre estereoscopia e visão estereoscópica. No segundo são discutidos os conceitos de paralaxe e sua importância na determinação de distâncias verticais mediante o uso de fotografias aéreas verticais e, finalmente, no terceiro Capítulo são apresentadas algumas características e possibilidades da observação estereoscópica mediante o uso de imagens orbitais do sensor HRV, dos satélites da série SPOT.

Uma vez que se trata de um trabalho voltado para estudantes de cursos de graduação, procurou-se tornar sua redação o mais didática possível, tendo sido incluídas ao final de cada Capítulo, perguntas referentes aos assuntos discutidos. Optou-se ainda em relacionar a literatura consultada ao final de cada Capítulo, citando-a no texto quando estritamente necessário.

2 ESTEREOSCOPIA

Intimamente ligada ao campo da fotogrametria, a estereoscopia é a ciência ou arte que trata de efeitos estereoscópios e dos métodos através

dos quais estes efeitos são produzidos. Existem três principais aplicações da estereoscopia na fotogrametria e fotointerpretação. Uma se refere a ajuda fornecida no reconhecimento da forma tridimensional de objetos, outra a estimativa de declividades ou alturas relativas, e finalmente a terceira aplicação referente a sua utilização em dispositivos e equipamentos designados a medir, com precisão, diferenças de alturas.

O termo "Estereoscopia" não deve ser confundido com o termo "Visão estereoscópica", o qual se refere a capacidade de observar tridimensionalmente um objeto ou cena. A Estereoscopia se vale desta capacidade para, através de métodos e/ou instrumentos, permitir a percepção tridimensional quando da observação de pares de fotografias, ou desenhos analogamente concebidos.

Mas para que a estereoscopia cumpra seu objetivo, seja por qualquer método ou procedimento, o processo de visão é imprescindível. Neste processo estão envolvidos aspectos de ordem anatômica e fisiológica, inerentes do ser humano, os quais serão discutidos a seguir.

2.1 - O PROCESSO DA VISÃO

A capacidade da visão é tão natural e costumeira que os intrincados e complexos processos envolvidos são inconscientes. Três importantes elementos estão intimamente ligados ao processo de visão: o globo ocular, o nervo ótico e os centros visuais do cérebro. O globo ocular contém um sistema dióptrico (lentes) e um sistema nervoso o qual é sensível a estímulos luminosos. Os impulsos visuais produzidos pelo impacto da luz são então transmitidos ao cérebro através do nervo ótico, onde a sensação da visão torna-se consciente. A Figura 1 ilustra o arranjo interno do olho humano.

O sistema dióptrico é constituído por uma membrana transparente denominada córnea; por uma lente biconvexa, o cristalino, que tem a capacidade de modificar sua distância focal através da ação de músculos ciliares; por uma membrana circular denominada íris, que se localiza entre a córnea e o cristalino (vide Figura 1) e que regula a quantidade de luz que deve penetrar no olho. O eixo ótico do olho é definido pela reta que passa pelo centro ótico num ângulo de 90° em relação a tangente da curvatura do cristalino; e o eixo visual é também definido por uma reta que passa por este mesmo centro ótico, mas a diferentes ângulos em relação a essa tangente. Esta reta descreve a trajetória dos raios luminosos incidentes.

O sistema nervoso é constituído por uma rede nervosa, situada nas paredes posteriores do globo ocular, denominada retina, que é o primeiro elemento da percepção visual. Os impulsos luminosos incidentes sobre a retina são enviados através do nervo ótico aos centros visuais do cérebro, que os interpretam permitindo a sensação da imagem.

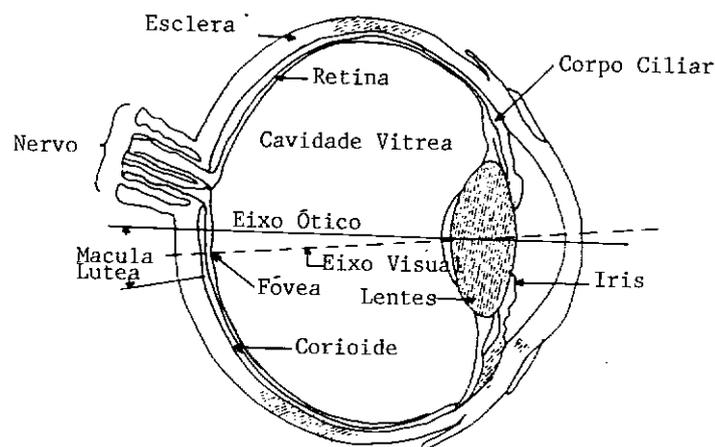


Fig. 1 - Arranjo interno do olho humano.

FONTE: Nowicki(1975)

A imagem de uma dada cena ou objeto pode ser sentida segundo diferentes aspectos. Dependendo da natureza dos raios luminosos incidentes que darão origem a tal imagem, os centros visuais do cérebro serão capazes de interpretar formas, tamanhos, texturas, cores e distâncias relativas. Este último aspecto se refere a percepção de profundidade, que será discutida a seguir.

2.2 - A PERCEPÇÃO DE PROFUNDIDADE

O processo descrito acima se refere a visão conduzida por um único olho, que é também conhecida por visão monocular. Considerando que os objetos ou elementos constituintes do ambiente posicionam-se a diferentes distâncias entre si e o observador, seria este capaz de perceber estas diferenças observando monoscópicamente tal ambiente? A resposta a essa pergunta é positiva pelos seguintes aspectos: através da ação de músculos do cristalino a distância focal é ajustada no sentido de tornar nítida a imagem de cada objeto observado. Este processo é também conhecido como acomodação ou poder de acomodação. A sensação das diferentes tensões destes músculos permite ao observador a sensação das distâncias relativas entre os objetos. Além desta possibilidade o observador poderia se valer de outras evidências não participantes diretamente do processo de visão. São elas: perspectiva (linhas

paralelas, como margens de estradas parecem convergir no horizonte), movimento aparente (um observador movendo sua cabeça de lado a lado percebe que os objetos situados mais proximamente parece que se deslocam mais do que os mais distantes), tamanho relativo de objetos conhecidos, superposição de objetos, luz e sombra, e finalmente, pela atuação da atmosfera, normalmente dificultando a observação de detalhes para o caso de objetos situados a grandes distâncias. Qualquer uma destas possibilidades não permite um alto nível de exatidão na quantificação destas distâncias, o que é só conseguido através da visão binocular, que é aquela conduzida através de dois olhos. Aqui o processo de visão descrito anteriormente está presente em cada olho isoladamente, contudo outros fenômenos estão ainda implícitos. O mais importante se refere a chamada convergência que é advindo do movimento conjugado dos olhos. A Figura 2 ilustra esquematicamente este fenômeno para o caso da visualização conjunta de dois pontos, A e B.

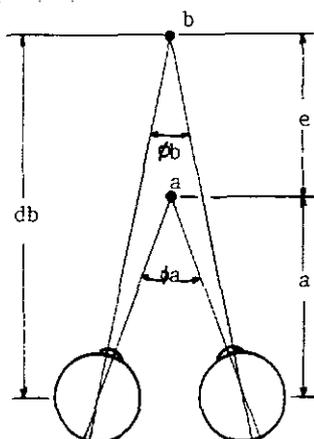


Fig. 2 - Convergência relativa entre os eixos visuais.

FONTE: Moffitt(1967)

Vê-se que o ângulo de convergência entre os eixos visuais dos olhos quando fixos num ponto A é ϕ_a e quando fixos em B é ϕ_b . Por conseguinte o ângulo ϕ_a proporciona a sensação de uma distância da e ϕ_b uma distância db , e a distância entre estes dois ângulos ($\phi_a - \phi_b$), a sensação da distância e , entre os pontos A e B. O limite máximo para o ângulo ϕ é de aproximadamente 16° , o que representa uma distância média de um objeto ao observador de 25 cm; enquanto que mínimo é de aproximadamente 10 a 20 segundos de arco, representando uma distância de 510 a 720m; ou seja, a percepção de profundidade não é possível a distâncias menores do que 25cm (para a maioria das pessoas dotadas de visão normal) sem que os olhos sejam auxiliados por lentes apropriadas, isto porque o olho humano não focaliza

confortavelmente a distâncias muito pequenas devido a suas limitações anatômicas. Da mesma forma, a percepção de profundidade também não é atingida a distâncias muito grandes, uma vez que θ torna-se muito pequeno.

O ângulo θ é portanto fundamental para a percepção tridimensional, contudo o mecanismo desta percepção pode melhor ser explicado pela teoria de Hering (Paredes, 1967). A Figura 3 mostra um esquema aonde encontram-se representados os olhos com seus eixos visuais convergindo para um ponto A, denominado ponto de fixação. Este ponto é projetado como imagem no centro de uma região do fundo do globo ocular, denominada "fóvea centralis" (vide Figura 1), que pode ser considerada, para efeito didático, como um ponto de referência.

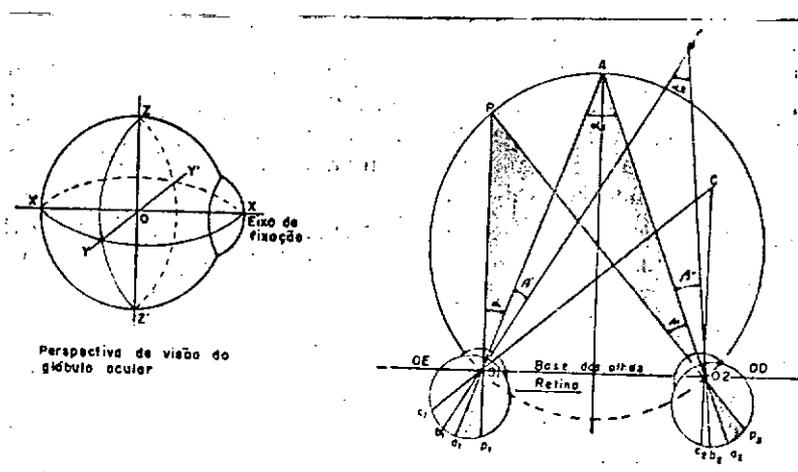


Fig. 3 - A visão binocular segundo Hering.

FONTE: Paredes(1987)

O plano que contém os dois eixos visuais convergentes sobre A é chamado de plano de visão. Cada ponto projetado na retina tem seu próprio eixo visual e todos se interceptam no centro ótico do cristalino de cada olho.

A distância entre os dois centros óticos ($\overline{O_1O_2}$) chama-se distância interpupilar (base dos olhos na Figura 3).

Quando o objeto (P), o ponto de fixação A e os centros óticos (O_1 e O_2) estão localizados numa mesma circunferência, chamada Horóptero, os ângulos $\widehat{PO_1A}$ e $\widehat{PO_2A}$ para ambos os olhos são iguais. Isso implica que as imagens do objeto são projetadas em locais idênticos das duas retinas e, nesse caso, a fusão das duas imagens é efetuada nos centros visuais do cérebro.

Objetos situados fora do Horóptero, como B e C, são projetados em locais diferentes da retina, pois os ângulos PO_1B e PO_2B são diferentes e o observador vai notar duas imagens do mesmo objeto. O mesmo é válido para o ponto C. Portanto mudando o ângulo de convergência, o Horóptero também muda e conseqüentemente todos os objetos podem ser localizados no seu Horóptero particular e a fusão é realizada.

O que foi exposto anteriormente pode ser melhor compreendido através de uma experimentação simples conhecida como fenômeno da imagem dupla. Se um lápis for colocado, na vertical, diante dos olhos de um observador a uma distância de 25 a 30cm, e este mantiver seu olhar fixo num ponto demarcado sobre uma parede situada além do lápis, o observador terá a percepção de duas imagens do lápis. A imagem esquerda será tomada pelo olho direito e vice-versa. Se agora o observador mantiver seu olhar fixo no lápis, duas imagens do ponto situado na parede serão sentidas; contudo a imagem direita será formada pelo olho direito e a esquerda pelo esquerdo. No primeiro momento o observador manteve seu olhar fixo no ponto situado na parede; aqui o Horóptero passava sobre este e o lápis estava contido em seu interior. No segundo momento o observador manteve seu olhar fixo no lápis fazendo com que o Horóptero "diminuísse" de diâmetro e o ponto situado na parede ficasse fora de seu interior.

A Teoria de Hering foi explicada considerando a observação de pontos isoladamente. Na prática cada olho observa uma região do espaço ou do ambiente no qual existem infinitos pontos. Desta forma, objetos e demais elementos integrantes deste espaço ou ambiente são visualizados tridimensionalmente ou estereoscópicamente. Através da visão binocular, então, se consegue a chamada visão estereoscópica.

Apesar de todo o conhecimento científico e tecnológico existente, a ciência ainda não conseguiu explicar como ocorre a fusão das imagens, advindas de cada olho, nos centros visuais do cérebro, ou seja, como se forma a imagem tridimensional mental.

Cada pessoa tem seu particular nível de percepção de profundidade, o qual é conhecido como acuidade estereoscópica. Uma pessoa que trabalha a muito tempo com restituição fotogramétrica, isto é, elaboração de mapas plani-altimétricos, geralmente possui uma melhor acuidade estereoscópica do que a maioria das pessoas. Isto porque a experiência prática do trabalho de observar constantemente as fotografias aéreas em três dimensões faz com que esta pessoa desenvolva a capacidade de detectar pequenas alterações do ângulo paralático e assim, ela se torna capaz

de melhor determinar as distâncias entre objetos. Uma acuidade estereoscópica normal é possível quando as imagens recebidas pela retina apresentam certas características. Os dois olhos devem perceber duas imagens as quais se diferenciam ligeiramente no ângulo de visão, orientação, cor, brilho, forma e tamanho. Se estas imagens forem muito diferentes quanto a qualquer um destes aspectos, uma delas será rejeitada pelos centros visuais do cérebro, ou parte ou mesmo toda uma imagem poderá ser "fundida" erroneamente; ainda o observador poderá ver duas imagens. A semelhança das imagens é afetada por defeitos dos olhos do observador, assim como pelas propriedades das imagens em si. Os principais defeitos que influem na acuidade estereoscopicamente são:

a) Relação acomodação/convergência: a relação da acomodação (mudança da distância focal) e a convergência dos eixos visuais é de grande importância na observação estereoscópica. Assim como os olhos focalizam um objeto, eles também convergem seus eixos visuais sobre este objeto e essa ação é concomitante. Quando essa relação não se encontra ajustada convenientemente, surgem problemas na interpretação das imagens formadas nas retinas e a percepção de profundidade é comprometida;

b) Percepção de cor: a luz proveniente dos objetos é recebida pelos olhos que indicam a direção dos raios luminosos, sua energia, composição espectral e polaridade. Cada ponto de um objeto é percebido individualmente. A ação do binômio olho-centros visuais do cérebro, recria uma réplica da superfície radiante com todas as suas características óticas. Uma imagem tridimensional correta é sentida quando o cérebro recebe informações coerentes a respeito destas características;

c) Focalização: trata-se de um dos defeitos mais comuns do olho humano e pode ser corrigido através do uso de óculos. Seu efeito sobre a percepção em profundidade é óbvio. Imagens focalizadas diferentemente pelos dois olhos acarretarão a rejeição de uma das imagens por parte dos centros visuais do cérebro. Focalização imperfeita influe na nitidez da imagem observada tridimensionalmente, ocultando detalhes ou até mesmo inviabilizando sua observação;

d) Coordenação visual: normalmente os dois olhos movem-se de forma coordenada. Caso haja algum problema desse movimento sincronizado, as imagens não serão projetadas na mesma região da retina de cada olho e os centros visuais do cérebro não poderão interpretá-las no sentido de permitir ao observador a visão estereoscópica.

2.3 - A VISÃO ESTEREOSCÓPICA E O PAR ESTEREOSCÓPICO DE FOTOGRAFIAS

Pela Teoria de Hering fica claro que para que um ponto seja observado estereoscópicamente ele deve ser visualizado concomitantemente pelos dois olhos do observador. Foi mencionado ainda que na realidade os pontos não são visualizados isoladamente pelos olhos, mas sim pequenas regiões em torno destes pontos. Assim, para que regiões sejam observadas estereoscópicamente é necessário que estas sejam também visualizadas concomitantemente pelos dois olhos, ou seja, uma dada região visualizada por um olho deve ser a mesma visualizada pelo outro olho. Diz-se que deve haver uma superposição entre as regiões visualizadas pelos olhos.

Imaginando o processo de tomada de uma fotografia de uma cena qualquer, assim como de uma família passeando num parque; segundos antes de acionar a máquina fotográfica, o fotógrafo observa a cena com seus dois olhos e constata que nem todos os integrantes desta estão situados a uma mesma distância entre si e da máquina fotográfica; ainda percebe que ao fundo da cena existem algumas árvores, ou seja, observa a cena estereoscópicamente. Uma vez revelado e copiado o filme fotográfico, não é possível obter plenamente a mesma sensação tridimensional, apesar da fotografia estar sendo observada com dois olhos. A razão disto é explicada pelo fato de que a câmera fotográfica registrou a cena sobre o filme analogamente como esta seria visualizada através da visão monocular, ou seja, não há como reconstituir a geometria do trajeto das infinitas imagens dos pontos constituintes da cena. Para que a visão estereoscópica desta cena fotografada fosse possível, considerando a observação de fotografias, seria necessário que o fotógrafo tomasse duas fotografias da mesma cena, sob ângulos diferentes, assim como acontece com seus olhos. Duas câmeras fotográficas poderiam ser usadas ou uma fotografia seria tomada de uma posição, em seguida o fotógrafo se deslocaria alguns passos a direita ou a esquerda em relação a primeira posição, e uma segunda fotografia seria tomada. Em ambos os casos as fotografias resultantes deveriam ter uma área em comum, somente na qual a visão estereoscópica seria possível. A visão estereoscópica da cena seria conseguida fazendo com que cada olho do observador fosse capaz de visualizar a mesma parte que aparece nas duas fotografias, respectivamente. A Figura 4 ilustra como se daria este procedimento, considerando a cena composta por uma parede sobre a qual encontram-se demarcados dois pontos A e B.

Primeiramente o fotógrafo posicionou-se em COd, que representa o centro ótico da câmera fotográfica cujo eixo ótico ficou orientado perpendicularmente ao plano da parede. O plano 1 representa o plano do filme fotográfico no instante da tomada da fotografia direita. Os pontos A1 e B1 representam as imagens dos pontos A e B respectivamente, os quais foram registrados na fotografia direita. Posteriormente o fotógrafo deslocou-se para COe, mantendo a máquina fotográfica na mesma orientação adotada em COd. Analogamente, 2 representa o plano do filme fotográfico e A2 e B2 representam as imagens dos pontos A e B registrados na fotografia esquerda.

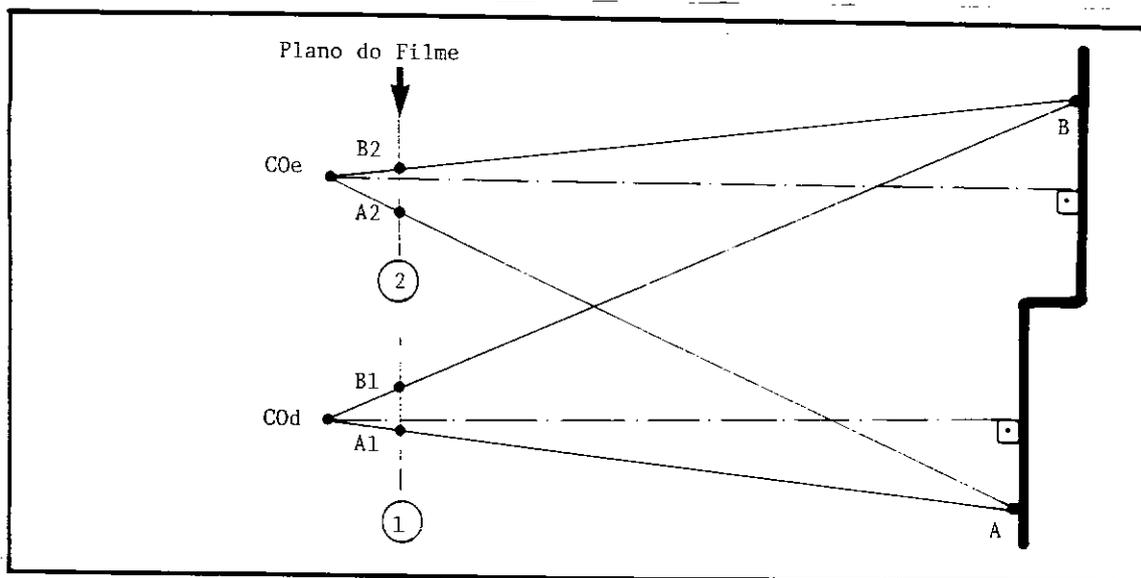


Fig. 4 - Tomada de fotografias visando visão estereoscópica.

Nota-se, portanto, que os pontos A e B foram fotografados de duas posições diferentes e que as fotografias apresentam uma área em comum, ou seja, uma área de superposição. Convém salientar que o deslocamento empregado de COd para COe foi paralelo ao plano da parede.

Para que a cena fotografada na Figura 4 seja observada estereoscópicamente utilizando-se as duas fotografias em questão, bastaria que o olho direito de um observador visualizasse a porção comum às duas fotografias registrada na fotografia direita, e o olho esquerdo a porção análoga na fotografia esquerda, concomitantemente. Pessoas treinadas conseguem fazê-lo até mesmo sem a ajuda de instrumentos, é a chamada visão estereoscópica direta, porém a estereoscopia tem desenvolvido e aprimorado métodos e procedimentos para facilitar essa observação. Alguns destes serão discutidos a seguir.

2.3.1 - A VISÃO ESTEREOSCÓPICA INDIRETA

Aqui a visão estereoscópica é conseguida com instrumentos auxiliares. A utilização de um instrumento caracteriza um processo ótico. Usam-se duas lentes e as fotografias são colocadas nos focos para produzir imagens no infinito. Neste caso os olhos não precisam de acomodação e os eixos óticos ficam paralelos. Os instrumentos que se fundamentam neste princípio são denominados estereoscópios. O primeiro destes instrumentos que se tem conhecimento foi desenvolvido por Robert Wheatstone em 1838. Este era constituído por dois espelhos os quais refletiam diretamente para os olhos as imagens de um par estereoscópico de desenhos e/ou fotografias, uma vez que somente em 1839 a Academia de Ciências da França anunciou ao mundo o nascimento da fotografia.

A Figura 5 ilustra esquematicamente o instrumento de Wheatstone.

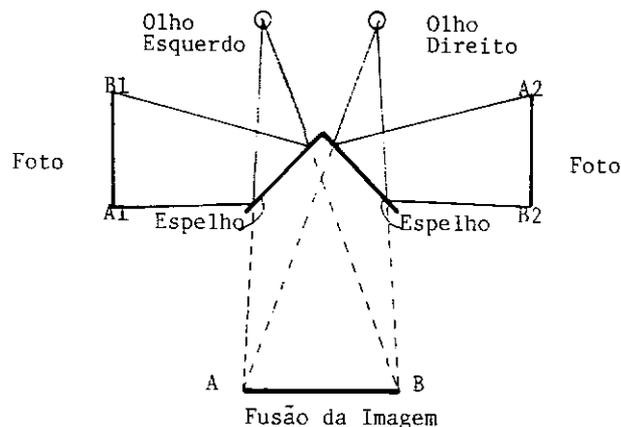


Fig. 5 - Estereoscópio de Wheatstone.

FONTE: LaPrade et al. (1980)

Alguns anos após Wheatstone ter desenvolvido seu estereoscópio, Sir David Brewster propôs, em 1849, um estereoscópio de lentes que era constituído por duas lentes convexas, que deu origem ao estereoscópio de bolso.

Estas concepções, idealizadas a mais de 100 anos atrás, representam os instrumentos mais simples para a observação estereoscópica de imagens bidimensionais. Atualmente os estereoscópios podem estar incluídos em três diferentes categorias: lentes, espelho e microscópicos.

O estereoscópio de lentes ou de bolso, como também é conhecido, é o mais amplamente usado, dado seu relativo baixo custo, facilidade de manuseio e grande generalização de utilização; apesar de apresentar limitações na amplitude de aumento, no registro de informações sobre as fotografias observadas e no campo de visão, que geralmente é pequeno. Algumas destas limitações são superadas quando da utilização do estereoscópio de espelho. Este permite que o par de fotografias, comumente denominado par estereoscópico, fique mais separado de forma a permitir uma visão mais abrangente da área onde é possível a visão estereoscópica (área de superposição), em condições de observação normal, ou seja sem a utilização de binoculares de aumento (ampliadores). Como desvantagens tem-se a relativa perda de iluminação causada pelo número de superfícies espelhadas envolvidas e pela distância que os raios luminosos tem que percorrer; são geralmente mais caros que os estereoscópios de lentes, especialmente quando há a necessidade de serem adquiridos com ampliadores, são menos portáteis e são susceptíveis a maiores e constantes períodos de manutenção dadas as superfícies espelhadas que requerem cuidados especiais, não suportando o manuseio, umidade e demais condições ambientais desfavoráveis a sua conservação. A Figura 6 mostra os esquemas dos dois estereoscópios discutidos.

A distância A representa a distância compreendida entre uma linha imaginária que passa pelo centro dos globos oculares e um plano, também imaginário, que atravessa medianamente a imagem observada. Essa distância é a mesma que a soma das distâncias de EC , CB e BD . Vale salientar que a sensação do observador é que a imagem se forma num plano localizado abaixo daquele no qual as fotografias se encontram fixas, ou seja, abaixo da mesa de trabalho.

Os microscópios estereoscópios permitem elevados graus de ampliação das imagens (comumente acima de 100X), rotação de 360° nas imagens e possuem ainda dispositivos como retículas que permitem efetuar medições e interpretações muito mais precisas do que com os demais. Estes estereoscópios operam melhor com transparências (em filme ou vidro; positivo ou negativo), podendo ser usados também sobre fotografias copiadas em papel opaco.

Em termos práticos os estereoscópios de espelhos e os de lentes (ou de bolso) são os mais utilizados. Em trabalhos que requerem maior precisão e há maior disponibilidade de tempo, aconselha-se o uso do estereoscópio de espelhos. Em condições de campo, o

de lentes é mais apropriado. Existem inúmeros fabricantes deste tipo de equipamentos, cada um com seus modelos específicos, dotados de diversos acessórios opcionais. A adoção destes é função das necessidades e limitações do trabalho e disponibilidade de equipamentos, bem como de recursos financeiros.

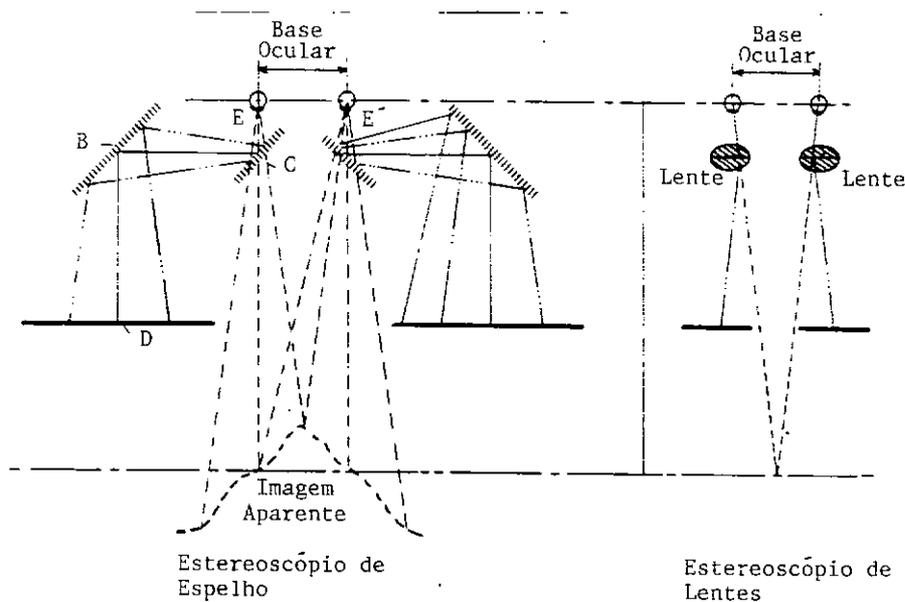


Fig. 6 - Os estereoscópios de lentes e de espelho.

FONTE: LaPrade et al. (1980)

2.3.2 - VISÃO ESTEREOSCÓPICA PELO PROCESSO ANAGLIFO

Aqui a estereoscopia se vale de um princípio denominado princípio da projeção anaglífica dicromática que foi demonstrado por I. Ch. d'Almeida em 1858, em Paris. A aplicação deste princípio na observação estereoscópica de cenas ou objetos fotografados foi viabilizada por Gasser que utilizou filtros coloridos com cores primárias, que são aquelas que não podem ser formadas através do uso de outras cores, tanto na projeção do par estereoscópico quanto diante dos olhos dos observadores.

Atualmente esta técnica pode ser aplicada sobre imagens projetadas em anteparos convenientemente posicionados, ou sobre imagens impressas em papel. Em qualquer um dos casos cada imagem ou fotografia do par estereoscópico é projetada ou "tingida" com cores primárias, usualmente vermelho e azul. O observador deve se munir de um óculos cujas "lentes" são filtros coloridos com as mesmas cores as quais foram usadas na projeção ou impressão do par estereoscópico, de forma que diante de cada olho seja disposto um filtro diferente. Assim, o

olho cujo filtro disposto seja o ciano, será capaz de visualizar a fotografia ou imagem projetada ou impressa nesta mesma cor. Análogamente, o outro olho visualizará a outra fotografia projetada ou impressa em vermelho. Nota-se portanto que cada olho será capaz de observar uma fotografia distinta, resultando a formação da imagem tridimensional, como descrito na seção 1. 3. As grandes vantagens deste método se verificam na facilidade que proporcionam para a fusão binocular em relação a convergência e acomodação, assim como no material empregado que é de relativo baixo custo. Em contrapartida, na elaboração de serviços cartográficos a nível operacional, é pouco usado devido a baixa precisão oferecida. Todavia, existem inúmeros restituidores fotogramétricos que utilizam este processo anaglifo em projeção de imagens, que apesar de serem em menor número que os demais processos, não devem ser desprezados por terem grande importância para o ensino e treinamento em restituição.

2.3.3 - VISÃO ESTEREOSCÓPICA POR POLARIZAÇÃO

Este processo se baseia nas propriedades da luz polarizada. Quando a luz incidente, que é composta por milhões de impulsos por segundo, atravessa um polarizador, ele passa a vibrar paralelamente ao plano de polarização. As fotografias são então projetadas de forma que a luz passe através de filtros polarizadores com planos ortogonais de polarização, ou seja, cada fotografia terá sua luz polarizada de forma distinta, ortogonalmente uma em relação a outra. O observador também deverá estar munido de filtros polarizadores diante dos olhos, em correspondência aos usados nas fotografias projetadas. Desta forma, cada olho será capaz de observar uma única fotografia, conseguindo assim a visão estereoscópica.

Significante aplicação deste processo tem sido relatada por pesquisadores (Erb e Philipson, 1982; Kieffer, 1977) envolvidos com o ensino de fotogrametria e fotointerpretação. Normalmente as disciplinas voltadas a esses assuntos são frequentadas por um número elevado de estudantes, o que dificulta procedimentos individuais de observação, surgindo a necessidade de torná-las coletivas. O mesmo fato se repete em seminários, palestras e apresentações técnicas, quando o número de participantes é igualmente grande e existe a necessidade da mesma observação estereoscópica para um perfeito entendimento de metodologias adotadas, ou para uma completa ilustração de problemas e/ou soluções.

Motivados para superar esta limitação, estes pesquisadores desenvolveram uma técnica

simples e barata que faz uso de fotografias 35mm e/ou 70mm (tomadas de forma a permitir a observação estereoscópica) projetadas por projetores comuns de slides, munidos de filtros polarizadores, sobre uma tela convenientemente posicionada de forma a permitir a observação de todos os presentes numa sala de aulas ou similar. As pessoas presentes a projeção recebem óculos, cujas "lentes" são também filtros polarizadores.

Semelhante procedimento tem sido adotado pela indústria cinematográfica quando na produção de filmes em terceira dimensão. As filmagens são conduzidas por câmeras munidas de filtros polarizadores, e durante as projeções, são distribuídos os tais óculos à platéia quando da entrada ao cinema.

2.3.4 - VISÃO ESTEREOSCÓPICA POR CINTILAMENTO

Sabe-se que uma imagem permanece no olho humano cerca de $1/20$ a $1/80$ de segundo, ou melhor, a imagem fica no cérebro durante esse tempo. A visão estereoscópica por cintilamento ou por luz intermitente, como também é conhecida, fundamenta-se nesta "inércia" do olho humano para possibilitar a visão estereoscópica. As imagens contidas nas fotografias são apresentadas alternadamente a cada olho, sendo cada uma projetada durante $1/60$ de segundo ou outro intervalo de tempo menor do que $1/20$ de segundo, e vedada durante o mesmo período de tempo, de modo que cada olho só possa ver a imagem correspondente até que a outra imagem seja projetada novamente.

A grande vantagem deste processo sobre o anaglifo se verifica numa melhor nitidez do modelo estereoscópico, o que implica numa observação menos cansativa. Apesar disso é uma técnica que praticamente não tem sido utilizada em fotogrametria.

2.3.5 - VISÃO ESTEREOSCÓPICA POR HOLOGRAFIA

Enquanto o filme fotográfico registra apenas a intensidade das ondas de luz, a holografia, com o auxílio do laser, pode registrar também os "picos" e "vales" destas ondas, possibilitando reproduzir uma imagem em três dimensões.

Esta técnica foi inicialmente idealizada pelo físico húngaro Denis Gabor em 1948, quando pesquisava uma forma de aumentar a nitidez do microscópio eletrônico. Não pode aplicá-la na prática porque necessitava de um tipo de luz coerente, cujas ondas não se difundissem em todas as direções e que tivesse apenas uma

cor. Tais características só poderiam ser atendidas pelo laser que só foi descoberto em 1960.

Em síntese, um holograma é criado pela interceptação de raios laser. A Figura 7 ilustra o processo de obtenção de um holograma.

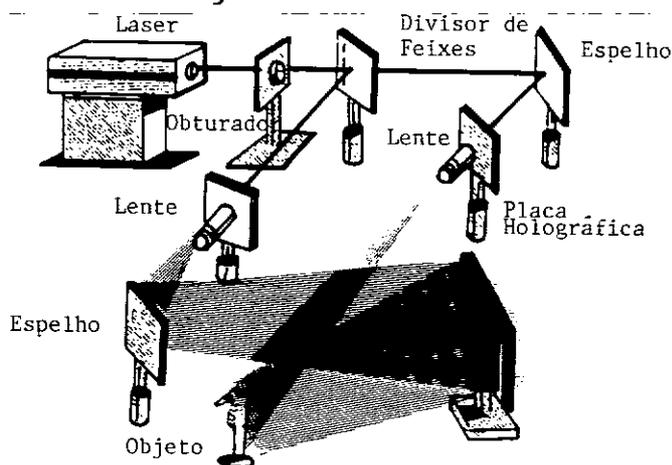


Fig. 7 - Processo de obtenção de um holograma.

FONTE: França(1988)

A luz emanada de um emissor laser é dividida no sentido de gerar dois feixes de luz, sendo um denominado feixe-objeto e outro feixe-referência. Através de um sistema de lentes o feixe-objeto é refletido por um espelho em direção a um objeto que se pretende holografar. Ondas de luz originadas pela interceptação deste feixe com o objeto são refletidas em direção a um filme fotográfico. Simultaneamente o feixe-referência é também propagado através de lentes diretamente sobre o filme fotográfico, sem antes interceptar o objeto. Como as ondas do mar que chegam à praia, os dois feixes interceptam-se mutuamente criando um novo padrão de ondas. Quando depressões e cristas se encontram, uma onda mais forte é criada- interferência construtiva. Quando cristas de uma onda encontram-se com depressões de outra onda e vice-versa, estas tendem a anularem-se mutuamente- interferência destrutiva. As ondas resultantes, ou padrões de interferência, atingem a emulsão fotográfica do filme. Ondas de luz provenientes de todos os pontos do objeto interagem com o feixe-referência e são registradas no filme fotográfico. Quando o filme é revelado, o padrão de interferência- agora um holograma-torna-se um registro permanente e tridimensional do objeto. Iluminado por laser (apesar de poder ser iluminado com luz comum), o holograma difracta a luz para recriar as ondas originais. Como as ondas se "espalham" em várias direções, um observador as perceberá exatamente como vieram do objeto e assim este será observado tridimensionalmente.

Percebe-se, portanto, que esta técnica não se fundamenta no uso de um par estereoscópico para a obtenção da visão estereoscópica.

Esta é uma técnica relativamente recente e de custos elevados, exigindo equipamento adequado e só podendo ser aplicada em condições de laboratório; fatores estes que dificultam sua aplicação na fotogrametria e conseqüentemente na fointerpretação. Tem sido usada com frequência em capas de revistas, adorno de objetos de uso pessoal e em artigos de promoção comercial.

Como um dos trabalhos pioneiros da aplicação desta técnica em fotogrametria podem ser citados aqueles de Agnard(1972) e Agnard(1976). Este autor esteve envolvido no aprimoramento de métodos visando compreender a extração de medidas mediante o uso de hologramas em aparelhos restituidores, especialmente modificados para a tarefa.

2.4 - ORIENTAÇÃO DE UM PAR DE FOTOGRAFIAS PARA A VISÃO ESTEREOSCÓPICA CONSIDERANDO O USO DE ESTEREOSCÓPIOS

A situação representada na seção 1.3 é análoga as missões de aerolevanteamento nas quais são tomadas as chamadas fotografias aéreas verticais. Nestas missões a aeronave se desloca a velocidade e altitude o mais constantes possível durante a tomada das fotografias. A máquina fotográfica é acionada a intervalos de tempo pré-estabelecidos de forma síncrona com a velocidade da aeronave para que uma determinada porcentagem de superposição de terreno fotografado ocorra entre fotografias subseqüentes. Esta superposição é denominada recobrimento e normalmente é da ordem de 60%, ou seja, 60% da área fotografada está contida em duas fotografias subseqüentes. Vale salientar que este recobrimento mencionado se dá ao longo da trajetória da aeronave.

Assim como ilustrado na Figura 4, quando o fotógrafo deslocou-se de COd para COe, paralelamente ao plano da parede que continha os pontos A e B, a aeronave, uma vez mantendo-se a uma altitude constante, desloca-se paralelamente ao plano do terreno durante as tomadas das fotografias, portanto as fotografias aéreas verticais tomadas, segundo este procedimento, são passíveis de serem observadas estereoscópicamente. A Figura 8a mostra a tomada de duas fotografias aéreas verticais. As posições O1 e O2, assumidas pela aeronave no instante da tomada das fotografias, são análogas as posições COd e COe, assumidas pelo fotógrafo na situação ilustrada na Figura 4. A visão estereoscópica

somente é possível na região comum as duas fotografias (região de recobrimento). A Figura 8b representa as duas fotografias sobrepostas exatamente na região de recobrimento. Nota-se que houve deslocamentos ao longo da linha de vôo e perpendicularmente a esta. Isto se deve ao fato de que a aeronave nem sempre, ou raramente, consegue manter um deslocamento perfeitamente retilíneo.

Os pares de fotografias apresentados na Figura 4 e na Figura 8, são denominados pares estereoscópicos de fotografias, ou simplesmente, pares estereoscópicos.

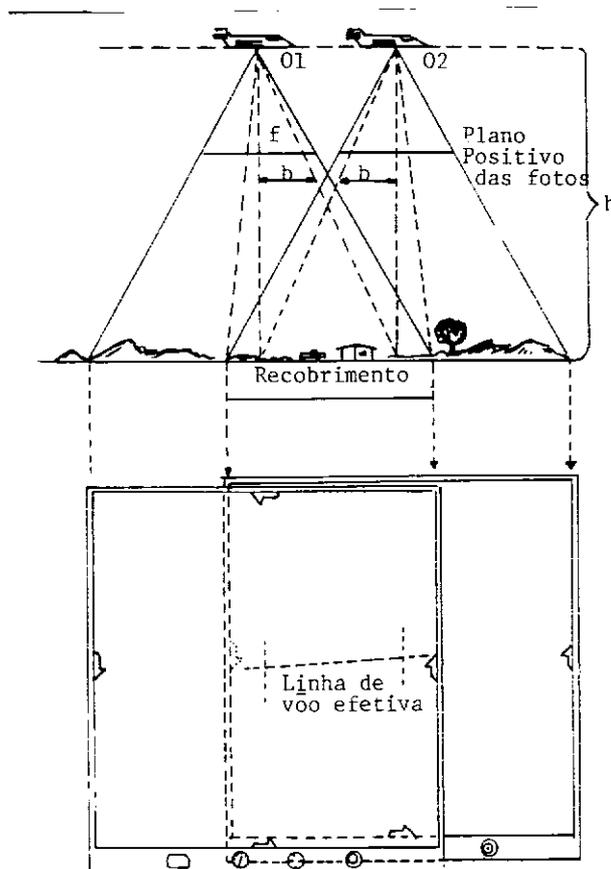


Fig. 8 - Tomada de fotografias aéreas verticais e o recobrimento ao longo do deslocamento da aeronave.

FONTE: Anderson(1982)

Em missões de aerolevanteamento, quando os negativos das fotografias são processados para se obter a fotografia, recebem uma numeração que identifica o número de vôo e da sequência na qual foram tomadas. Esta numeração permite que sejam identificados os pares de fotografias subsequentes, ou seja, pares estereoscópicos. Uma vez identificados os pares estereoscópicos, deve-se observar qual a sequência da tomada das fotografias para que estas sejam orientadas convenientemente, pois a inversão de suas

posições (fotografia a ser observada pelo olho esquerdo sendo observada pelo olho direito) acarreta a chamada pseudoscopia, na qual os pontos elevados do terreno aparecem mais baixos e vice-versa durante a observação estereoscópica. A pseudoscopia não tem muita utilidade prática, a não ser por geólogos que se valem deste fenômeno para acentuar a drenagem, contudo ela é contrária a visão normal e tende a confundir o fotointérprete.

O procedimento descrito a seguir se refere a orientação de fotografias aéreas verticais para a observação estereoscópica mediante o uso de estereoscópios, uma vez que são os mais amplamente utilizados em fotointerpretação. São as seguintes as principais etapas deste procedimento, as quais encontram-se ilustradas na Figura 9.

1 - Colocar uma fotografia sobre a outra de forma a fazer coincidir a área de superposição, assim como mostrado na Figura 9b;

2 - Observar a direção na qual as sombras aparecem. Geralmente as sombras se projetam para o lado do observador (Figura 9b); caso isto não esteja ocorrendo, um giro de 180° deve ser dado no par de fotografias para que seja revertido o sentido da direção de vôo;

3 - Quando o estereoscópio de lentes estiver sendo usado, as duas fotografias devem ser separadas segundo a linha de vôo (direção de vôo), numa distância (1) aproximadamente igual àquela dos centros das lentes, ou seja, os pontos ditos conjugados (estão contidos na área de superposição - em ambas as fotografias) é que devem estar separados a essa distância (Figura 9c). Quando o estereoscópio de espelho estiver sendo usado, os pontos conjugados devem estar mais afastados uns dos outros, segundo a mesma linha de vôo, aproximadamente sob os centros dos espelhos refletoras (distância m-Figura 9d);

4 - Enquanto estiver sendo feita a observação com os estereoscópios, ajustes poderão ser feitos no sentido de permitir uma visão estereoscópica confortável. Estes ajustes se referem ao afastamento e aproximação das fotografias e ligeira rotação do instrumento e/ou das fotografias.

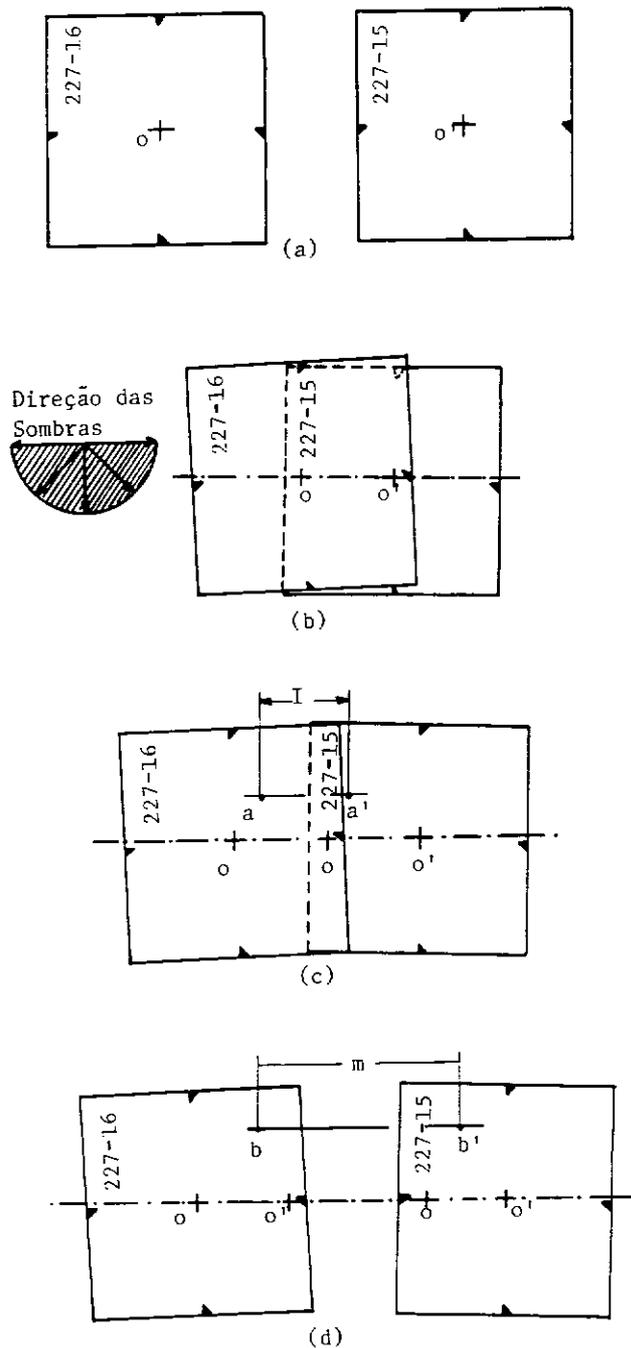


Fig. 9 - Orientação de fotografias aéreas para observação estereoscópica.

FONTE: Moffitt(1967)

2.4.1 - FATORES QUE AFETAM A VISÃO ESTEREOSCÓPICA DE UM PAR ESTEREOSCÓPICO DE FOTOGRAFIAS

Em termos práticos, existem alguns fatores intrínsecos aos processos de tomada de fotografias aéreas

verticais e de orientação destas, que tendem a dificultar a visão estereoscópica ou até mesmo a inviabilizá-la. Estes fatores são:

a) diferença na altura de vôo entre as fotografias subsequentes;

b) diferença na verticalidade do eixo ótico da câmera fotográfica aérea no instante da tomada destas fotografias;

c) desalinhamento da linha de vôo na orientação das fotografias;

d) desalinhamento do estereoscópio durante a observação das fotografias;

e) grandes diferenças nos deslocamentos entre imagens adjacentes;

Estes fatores podem acontecer isoladamente ou concomitantemente.

O fator a) causa uma diferença entre as escalas das fotografias subsequentes, que por sua vez acarretará diferenças na distância entre uma imagem contida numa das fotografias e sua correspondente linha de vôo e a mesma imagem (imagem conjugada) contida na outra fotografia e sua correspondente linha de vôo. Esta diferença está mostrada na Figura 10.

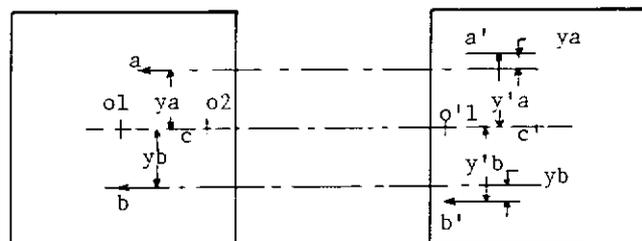


Fig. 10 - Variação na altura de vôo e seu efeito sobre o registro de imagens.

FONTE: Moffitt(1967)

A fotografia esquerda apresenta uma escala menor do que a da fotografia direita, uma vez que foi tomada a uma altura de vôo maior. Considerando que a linha de vôo seja o eixo x de um sistema de eixos cartesianos, a coordenada y_a da imagem a é menor do que a coordenada $y_{a'}$, da imagem a'. Δy_a representa a diferença entre as duas coordenadas y das imagens a e a'. Similarmente, y_b é menor do que $y_{b'}$ e a diferença entre ambas é representada por Δy_b . A imagem c, a qual "repousa" sobre o eixo x (linha de vôo) não apresenta

deslocamentos paralelamente ao eixo y, como aconteceu com as imagens a e b.

Na visão normal, o eixo ótico dos olhos definem um plano, de forma que qualquer tentativa de observar pontos fora deste plano, como aconteceria na observação das fotografias ilustradas na Figura 10, causaria sérios transtornos e desconfortos para o observador. Para corrigir esta situação, uma fotografia deveria ser movimentada ligeiramente numa direção perpendicular a linha de vôo, ou pequenos movimentos no sentido de "rodar" o estereoscópio deveriam ser promovidos em diferentes porções da área de superposição das fotografias.

O fator b) se refere a diferença relativa entre as inclinações do eixo ótico da câmera fotográfica aérea no instante da tomada de fotografias subsequentes, o que pode acarretar a obtenção de fotografias inclinadas que apresentam, por aspectos geométricos, acentuadas variações de escala, de acordo com o ângulo de inclinação. A Figura 11 ilustra o efeito deste fator sobre 4 pontos de mesma altitude igualmente distanciados no terreno. Na fotografia esquerda, obtida com o eixo ótico da câmera vertical, os 4 pontos aparecem formando um quadrado, porém na fotografia direita, obtida com uma certa inclinação deste eixo, as imagens dos pontos aparecem deslocadas de sua real posição. A observação estereoscópica destas fotografias fica dificultada quanto maior for essa inclinação. O exemplo mostra apenas uma fotografia inclinada, mas na prática ambas as fotografias podem estar inclinadas.

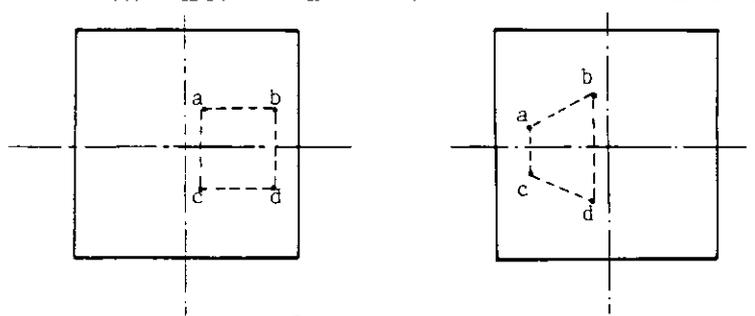


Fig. 11 - Efeito da inclinação da fotografia.

A Figura 12 ilustra o efeito do fator c), referente ao desalinhamento da linha de vôo durante o procedimento de orientação das fotografias.

Na Figura 12 as fotografias são assumidas perfeitamente verticais e tomadas numa mesma altura de vôo (mesma escala). Aqui $y_a = y_a'$, contudo existe um certo deslocamento paralelamente ao eixo

y, ou seja, existe y_a . Similarmente, $y_b = y_b'$, mas y_b também está presente. Neste caso a maior dificuldade da visão estereoscópica se verifica ao longo da linha de vôo e em torno do centro da fotografia direita.

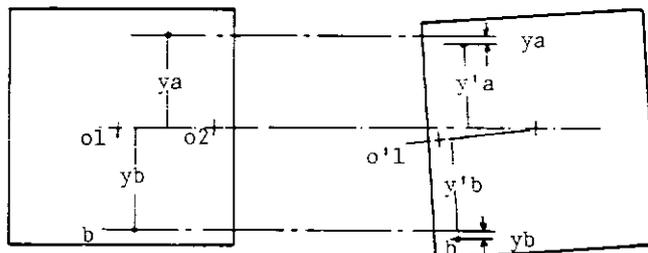


Fig. 12 - Desalinhamento da linha de vôo.

FONTE: Moffitt(1967)

O desalinhamento do estereoscópio (fator d) ocorre quando o plano definido entre os eixos óticos das lentes do instrumento não está posicionado paralelamente a linha de vôo. O efeito na visão estereoscópica é semelhante ao causado pelo desalinhamento da linha de vôo (fator c)).

O fator e) se refere ao caso quando o terreno fotografado apresenta grandes variações topográficas (terreno muito montanhoso) e a escala adotada também é grande. O observador sentirá uma certa dificuldade em manter a visão estereoscópica porque os deslocamentos verificados nas fotografias serão muito grandes.

2.5 - EXAGERO VERTICAL NA IMAGEM VISUALIZADA ESTEREOSCÓPICAMENTE

Quando uma pessoa examina estereoscópicamente um par estereoscópico de fotografias normalmente sente um certo exagero nas proporções de relevo observadas, ou seja, ela percebe uma disparidade entre as escalas horizontal e vertical, mesmo que esta pessoa não esteja familiarizada com observações do gênero.

Antes que sejam apresentadas as causas deste fenômeno, é necessária a apresentação de alguns parâmetros. O primeiro deles se refere a chamada aerobase, geralmente representada por B, que é a distância, no terreno, entre o centro ótico da câmera fotográfica aérea entre duas exposições. O segundo é a altura de vôo sobre a base de um dado objeto, representada por H. Quando da observação de fotografias aéreas verticais por meio de estereoscópios, estes dois parâmetros passam a ser representados por seus análogos; a aerobase B é representada por b que se refere a chamada distância interpupilar e a altura de vôo H é representada por h, que

é a distância entre o centro ótico das lentes do estereoscópio e a base do objeto visualizado.

O exagero vertical é decorrente da diferença entre as razões B/H e b/h , que por sua vez é decorrente da distância focal das lentes do estereoscópio adotado, da distância fixada entre as fotografias observadas durante a orientação do par estereoscópico e da distância interpupilar do observador.

Na Figura 13a encontra-se ilustrada uma situação na qual duas fotografias aéreas foram tomadas com uma câmera fotográfica com distância focal $f=152,0\text{mm}$ e o recobrimento adotado foi da ordem de 60%; a razão B/H foi estimada em 0,60. As imagens de um prédio (esquemáticamente representado) aparecem nas duas fotografias.

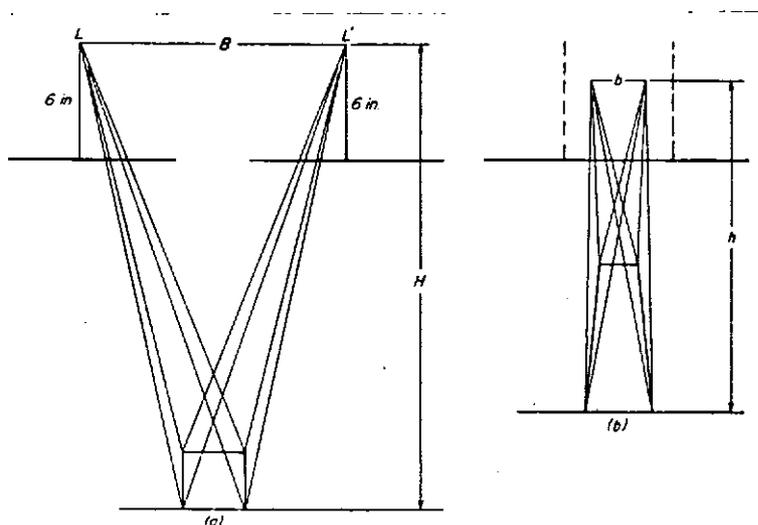


Fig. 13 - Exagero vertical quando $B/H=0,60$.

FONTE: Moffitt(1967)

Na Figura 13b estas duas fotografias foram colocadas sob um estereoscópio de lentes e foram sobrepostas de tal forma que a separação média das imagens conjugadas foi adotada aproximadamente igual a distância interpupilar dos olhos de um observador. A razão entre essa distância interpupilar b e a altura h , acima da imagem, é muito menor do que a razão B/H . Se houvesse uma forma de tornar a razão b/h igual a razão B/H , o exagero vertical não seria observado.

O método mais seguro e preciso de se obter esse valor era através da comparação do ângulo medido por meio de um estereocomparador de declives com o mesmo declive determinado no campo, entretanto diversos autores propuseram fórmulas para determinar o exagero vertical,

dentre eles Andrade(1970) propôs um método para se obter o valor do exagero vertical sem que fosse necessário o auxílio de medições de campo. O autor cita dois importantes fatores que afetam o exagero vertical:

a) a diferença de distância focal entre o estereoscópio e a câmera fotográfica aérea;

b) a base aérea ou aerobase b , na escala da fotografia.

Ambos os fatores estão ilustrados na Figura 14.

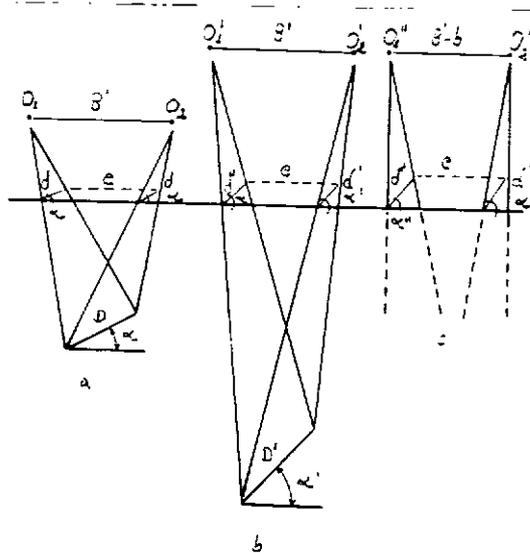


Fig. 14 - Fatores que afetam o exagero vertical.

FONTE: Andrade(1970)

A Figura 14a é uma representação da imagem observada estereoscópicamente, também chamada de estereomodelo, assinalada como d , que corresponde a distância real D ; e é a distância entre dois raios visuais correlatos. Na Figura 14b um estereoscópio foi usado com uma base imaginária igual na base fotográfica B , e uma distância focal que é maior que a da câmera fotográfica que tomou a fotografia. A interseção dos raios visuais correlatos mostra um incremento do ângulo da rampa de maneira que, para manter a condição de que os valores de d sejam iguais entre si, a rampa de ângulo tem que ser incrementada para .

Na Figura 14c, a observação é feita diretamente de cima das duas imagens como é o caso quando as fotografias são colocadas sob um estereoscópio para observação. Neste caso a direção de observação é perpendicular ao plano da fotografia, o que implica no deslocamento dos dois pontos de observação $O'1'$ e $O'2'$ igual a b . Para ter ambas as distâncias d' iguais entre si, será

necessário incrementar novamente para .

A fórmula proposta por Andrade(1970) é a seguinte:

$$E = \frac{f'(b + f)}{f^3}$$

Onde f' é a distância focal do estereoscópio, f é a distância focal da câmera fotográfica e b a base estereoscópica na escala das fotografias onde as variações na altura de vôo estão dentro das normas estabelecidas em missões de aerolevanteamento.

Supondo uma situação em que $f'=340\text{mm}$, $f=153\text{mm}$ e $b=90\text{mm}$. O exagero vertical seria:

$$E = \frac{f'(b+f)}{f^3} = \frac{340\text{mm}(90\text{mm}+153\text{mm})}{153\text{mm}^3} = 2,99$$

Outra forma simples e prática de se determinar o exagero vertical é através da relação entre as tangentes do ângulo de inclinação de um dado declive medido no terreno e seu correspondente ângulo de inclinação medido sobre as fotografias. Desta forma:

$$E = \frac{\tan \alpha}{\tan \alpha'}$$

onde: E=exagero vertical;

α =ângulo de inclinação medido sobre as fotografias;

α' =ângulo de inclinação medido no terreno.

Supondo que através de um estereocomparador de declives, foi determinado o ângulo de inclinação do terreno como sendo igual a 45° . Qual seria a real inclinação do terreno se o exagero vertical fosse igual aquele determinado pela fórmula anteriormente apresentada? Então tem-se:

$$E = \frac{\tan \alpha}{\tan \alpha'} \implies 2,99 = \frac{\tan 45^\circ}{\tan \alpha'} \implies \tan \alpha' = 0,3344 \implies \alpha' = 18^\circ 29' 33''$$

Caso o ângulo medido na fotografia fosse menor do que o apresentado, isto é 25° , o ângulo real no terreno seria:

$$2,99 = \frac{\tan \alpha}{\tan \alpha'} \implies \tan \alpha' = 0,1559 \implies \alpha' = 8^\circ 51' 51''$$

O exemplo reforça o aspecto de que entre o ângulo "exagerado" na fotografia e o real no terreno, não existe uma relação linear e sim uma relação de tangentes.

Forero(1974) apresenta alguns métodos para a determinação de declividades mediante o uso de fotografias aéreas observadas estereoscópicamente. O leitor poderá recorrer a estes, caso haja interesse.

Questões - Estereoscopia

- 1- Diferencie Estereoscopia de visão estereoscópica.
- 2- Comente a importância da estereoscopia na Fotogrametria e Fotointerpretação.
- 3- A percepção da distância relativa entre objetos pode também ser conseguida pela visão monocular. Explique como isso é possível.
- 4- O que explica a Teoria de Hering?
- 5- Porque a visão estereoscópica, feita sobre fotografias, só é possível considerando pares de fotografias?
- 6- Quais os processos de visão estereoscópica mais utilizados em fotogrametria e fotointerpretação? Explique porque os demais são pouco usados na prática.
- 7- O estereoscópio é um aparelho que permite a um observador ver tridimensionalmente um par estereoscópico de fotografias. Quais os princípios nos quais este aparelho foi idealizado? Apresente um esquema.
- 8- Qual a função dos filtros coloridos na estereoscopia de anaglifo?
- 9- Qual a finalidade dos óculos na estereoscopia por polarização?
- 10- Através de um esquema, indique a obtenção de um holograma.
- 11- Cite e descreva as etapas da orientação de um par estereoscópico de fotografias para a observação estereoscópica feita através de estereoscópios.
- 12- Explique o que é o exagero vertical e cite os principais fatores que o afetam.
- 13- Quais as principais limitações do emprego da holografia na fotointerpretação de recursos naturais?
- 14- Qual a variação de distância de percepção de profundidade para o ser humano em geral?
- 15- Analise detalhadamente os fatores que afetam a visão estereoscópica de um par de fotografias (par estereoscópico).

3 MEDINDO ALTURAS POR DIFERENÇA DE PARALAXE

No Capítulo anterior (Estereoscopia) foram apresentados alguns aspectos envolvidos na observação estereoscópica de fotografias aéreas verticais. Essa observação estereoscópica é possível pelo simples fato de que mudanças na elevação do terreno provocam mudanças na escala, e estas, por sua vez, produzem mensuráveis deslocamentos nas imagens de pontos registrados sobre as fotografias. Outros fatores indesejáveis, tais como, inclinação do eixo ótico da câmera fotográfica aérea, diferença na altura de vôo entre exposições subsequentes (inclinação da aerobase B), distorções das lentes, diferença na distância focal de uma fotografia para outra ou outras, produzem também alterações na escala e conseqüentemente provocam deslocamentos.

Existem procedimentos que atenuam e/ou eliminam tais fatores. Assim correlações precisas entre os deslocamentos e as alturas de objetos podem ser determinadas.

Considerando a situação ideal na qual todos os fatores indesejáveis citados estejam ausentes, os deslocamentos presentes se devem única e exclusivamente as mudanças da elevação do terreno. Neste caso as duas fotografias consideradas seriam perfeitamente verticais, tomadas a uma mesma altura de vôo e a distância focal f seria a mesma para as fotografias. Na prática somente esta última condição é atendida, uma vez que duas fotografias subsequentes são tomadas pela mesma câmera fotográfica. Contudo, para um perfeito relacionamento entre os deslocamentos e diferenças de alturas no terreno, essas condições deveriam ser atendidas. A Figura 15 ilustra uma situação ideal na qual as fotografias são perfeitamente verticais, tomadas a uma mesma altura de vôo e a uma mesma distância focal f .

Para efeito didático o centro ótico da câmera fotográfica aérea coincide com a origem de um sistema de eixos cartesianos (X, Y, Z) . O ponto A, no terreno, que possui as coordenadas (EA, NA, HA) , de acordo com um sistema geográfico qualquer de referência, produz a imagem a' na fotografia esquerda, a qual pode ser expressa em termos de coordenadas do sistema de eixos cartesianos associado a essa fotografia. Similarmente a'' é a imagem do ponto A, cujas coordenadas podem ser expressas de acordo com o semelhante sistema associado a fotografia direita. Os sistemas mencionados são independentes e podem ser combinados de tal forma que uma situação comum a todos prevaleça. Para que isto aconteça convencionam-se os seguintes aspectos:

a) as origens dos sistemas associados as fotografias devem coincidir perfeitamente com o centro ótico da câmera fotográfica;

b) as origens destes mesmos sistemas devem também coincidir com o ponto principal p de cada fotografia, respectivamente;

c) a direção de vôo, que é o vetor $\overline{O1O2}$, é tomada como o eixo X nos dois casos. As coordenadas da origem do sistema associado a fotografia direita (O2) é portanto $(B, 0, 0)$, se a aerobase é B;

d) todos os sistemas de coordenadas crescem (são positivos) para a direita e o eixo Z é positivo para baixo, a partir da origem do sistema.

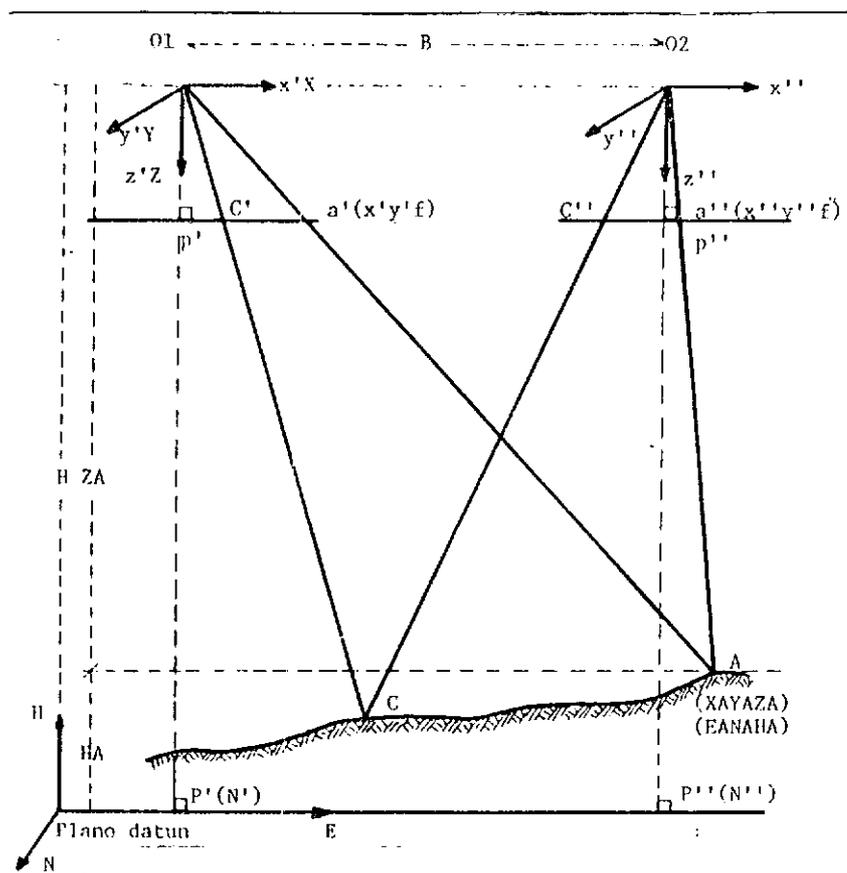


Fig. 15 - Sistema de coordenadas sobre as fotografias.

FONTE: Burnside(1979)

Considerando os dois pontos A e C, apresentados na Figura 15, tem-se as seguintes fórmulas para as coordenadas referentes a fotografia esquerda:

$$\begin{aligned} x'a &= \frac{f}{Z_A} XA & : & & x'c &= \frac{f}{Z_C} XC \\ y'a &= \frac{f}{Z_A} YA & : & & y'c &= \frac{f}{Z_C} YC \\ z'a &= \frac{f}{Z_A} ZA = f & : & & z'c &= \frac{f}{Z_C} ZC = f \end{aligned}$$

Para a fotografia direita:

$$\begin{aligned} x''a &= \frac{f}{Z_A} (XA - B) & : & & x''c &= \frac{f}{Z_C} (XC - B) \\ y''a &= \frac{f}{Z_A} YA & : & & y''c &= \frac{f}{Z_C} YC \\ z''a &= \frac{f}{Z_A} ZA = f & : & & z''c &= \frac{f}{Z_C} ZC = f \end{aligned}$$

Uma análise rápida destas duas séries de equações permite concluir que somente ocorrem mudanças nas coordenadas relacionadas ao eixo X. Isto é explicado devido ao fato de que na situação ilustrada pela Figura 15, a única diferença entre as tomadas das fotografias ocorreu na direção positiva do eixo X (x' para x''). Este deslocamento das imagens do ponto A, ou de qualquer outro ponto, ocorrido ao longo ou paralelamente ao eixo X é denominado paralaxe-x ou paralaxe estereoscópica absoluta ou ainda, como será tratada daqui por diante, simplesmente paralaxe, e é utilizado na determinação da altura de objetos ou de diferença de alturas de pontos localizados no terreno. O termo paralaxe se refere ao deslocamento aparente de um objeto em relação ao outro. Em fotogrametria ele é aplicado em vários sentidos, sendo o principal deles relacionado as coordenadas retangulares, como estas apresentadas na situação anterior. A paralaxe é sempre expressa em termos da diferença entre coordenadas retangulares de imagens homologas.. Assim, se o interesse é determinar a paralaxe ocorrida ao longo ou paralelamente ao eixo y (paralaxe-y) dos pontos A e C apresentados na Figura 15, ter-se-ia:

$$\begin{aligned} (Py)A &= y'a - y''a = 0 \\ (Py)C &= y'c - y''c = 0 \end{aligned}$$

onde: (Py)A= paralaxe-y de A;
 (Py)C= paralaxe-y de C;
 y'a e y'c= coordenadas y de A e C, em relação ao sistema associado a fotografia esquerda;
 y''a e y''c= coordenadas y de A e C, em relação ao sistema associado a fotografia direita.

Os valores encontrados de (Py)A e (Py)C são nulos, uma vez que na situação proposta não houveram deslocamentos paralelamente ao eixo Y. A paralaxe-y normalmente prejudica a observação estereoscópica, chegando, em casos extremos, a inviabilizá-la (ver seção 2. 4. 1. Figuras 10, 11, 12) . Suas causas principais residem nos fatores indesejáveis citados, principalmente na inclinação do eixo ótico da câmera fotográfica aérea e/ou acentuada diferença entre as escalas das fotografias do par estereoscópico. Sua utilidade se verifica na orientação inicial do par de fotografias nos chamados restituidores, que são equipamentos responsáveis pela elaboração de mapas planialtimétricos mediante processos fotogramétricos, e que para tal se faz necessária a na eliminação da paralaxe-y. Deste modo, como visto nos parágrafos anteriores a paralaxe em x é associada a diferenças de alturas no terreno e a paralaxe em y ou paralaxe-y teoricamente não deve ocorrer e se ocorrer não estará relacionada com diferenças de alturas entre pontos no terreno.

As paralaxes dos pontos A e C, ilustrados na Figura 15 ficam então:

$$(Px)A = x'a - x''a = \frac{f}{Z_A} [(X_A - (X_A - B))] = \frac{fB}{Z_A} \quad (1)$$

$$(Px)C = x'c - x''c = \frac{f}{Z_C} [(X_C - (X_C - B))] = \frac{fB}{Z_C} \quad (2)$$

onde: B= distância entre os pontos principais das fotografias aéreas consideradas.

Neste caso portanto, é fácil concluir que a diferença nas paralaxes de ambos os pontos é função da diferença entre Z_A e Z_C, ou seja, da diferença entre as elevações destes pontos. A diferença de paralaxe destes pontos fica então:

$$(\Delta Px)_{AC} = (Px)A - (Px)C = f \cdot B \left[\frac{1}{Z_A} - \frac{1}{Z_C} \right] = \frac{f \cdot B \cdot \Delta Z_{AC}}{Z_A Z_C} \quad (3)$$

Se dois pontos no terreno apresentarem a mesma altitude, conclui-se pela análise das fórmulas anteriores que a diferença de paralaxe entre estes dois pontos será nula, ou seja, eles apresentarão paralaxes iguais.

A diferença de paralaxe é importante, porém na prática é obtida através de medidas realizadas nas fotografias como será comentado mais adiante. Entretanto, o que interessa é a diferença de altura entre os dois pontos assinalados, isto é, o ponto A (o mais alto) e o ponto C (o mais baixo). Simplificando a notação da última fórmula apresentada, tem-se:

$$(\Delta Px)_{AC} = \text{diferença de paralaxe entre os pontos A e C} = \Delta p;$$

$$\Delta Z_{AC} = \text{diferença de altura entre os pontos A e C} = \Delta h(A-C) = h_A - h_C;$$

Z_A = altura de vôo sobre o ponto A = H (altura de vôo em relação ao nível médio dos mares) - h_A (altitude do ponto A);

$$Z_C = H - h_C.$$

Deste modo a fórmula (3) passa a ser:

$$\Delta p = f \cdot b \frac{(h_A - h_C)}{(H - h_A)(H - h_C)} \quad (4)$$

Das equações (1) e (2) pode-se obter:

$$PA Z_A = f \cdot B \implies PA (H - h_A) = f \cdot B \therefore (H - h_A) = \frac{f \cdot B}{PA}$$

E sua substituição em (4) resulta:

$$\Delta p = \frac{f \cdot B (h_A - h_C)}{f \cdot B (H - h_C) PA} \quad \text{ou} \quad \Delta p = \frac{PA (h_A - h_C)}{(H - h_C) PA}$$

Mas o que interessa é a diferença de altura entre os pontos A e C; assim:

$$\Delta p (H - h_C) = PA (h_A - h_C) \quad \text{e} \quad h_A - h_C = \frac{(H - h_C) \Delta p}{PA} \quad \text{ou} \quad h_A = h_C + \frac{(H - h_C) \Delta p}{PA} \quad (5)$$

A fórmula (5) fornece a expressão para o cálculo da diferença de altura entre os dois pontos em função da diferença de paralaxe.

A mesma fórmula (5) pode ser escrita das seguintes maneiras:

$$\Delta h_{A-C} = \frac{H-hC}{PA} dp \quad \text{ou;} \quad (6)$$

$$\Delta h_{A-C} = \frac{ZC \cdot dp(A-C)}{PC + dp(A-C)} \quad \text{ou então ;} \quad (7)$$

$$\Delta h = \frac{H \cdot dp}{P + dp} \quad (8)$$

onde: ZC=altura de vôo sobre o ponto C (que é o mais baixo);
 PC=paralaxe do ponto C;
 H= neste caso significando o mesmo que ZC;
 P=neste caso significando o mesmo que PC.

Qualquer uma das fórmulas (6), (7) ou (8) pode ser usada no lugar da fórmula (5), tomando o devido cuidado no significado dos termos.

Na prática é muito difícil determinar com precisão o valor de H (altura de vôo sobre o ponto especificado na fórmula), sendo adotada, com frequência, uma simplificação no numerador da fórmula, substituindo-se seu valor por Hm, que é a altura de vôo média em relação ao terreno fotografado.

Uma segunda simplificação se refere ao parâmetro P que comumente é substituído por b (base aérea estereoscópica, considerada sobre as fotografias). A Figura 16 ilustra os parâmetros considerados para a estimativa de b.

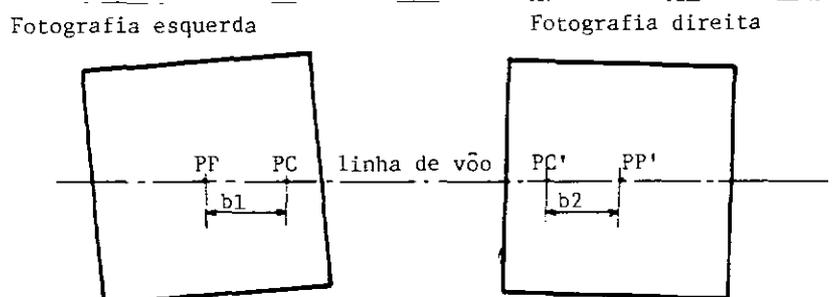


Fig. 16 - Parâmetros para a estimativa de b.

O valor de b fica então:

$$b = \frac{b_1 + b_2}{2}$$

Essa simplificação apresentada na Figura 16 considera que o ponto mais baixo a ser analisado é o ponto principal da fotografia esquerda, conforme ilustrado na Figura 17. Isto também equivale a dizer que a altura de vôo é sobre o ponto principal da foto esquerda, ou sobre qualquer ponto no terreno que tenha a mesma altitude do ponto principal considerado, já que todos estes pontos têm a mesma altitude.

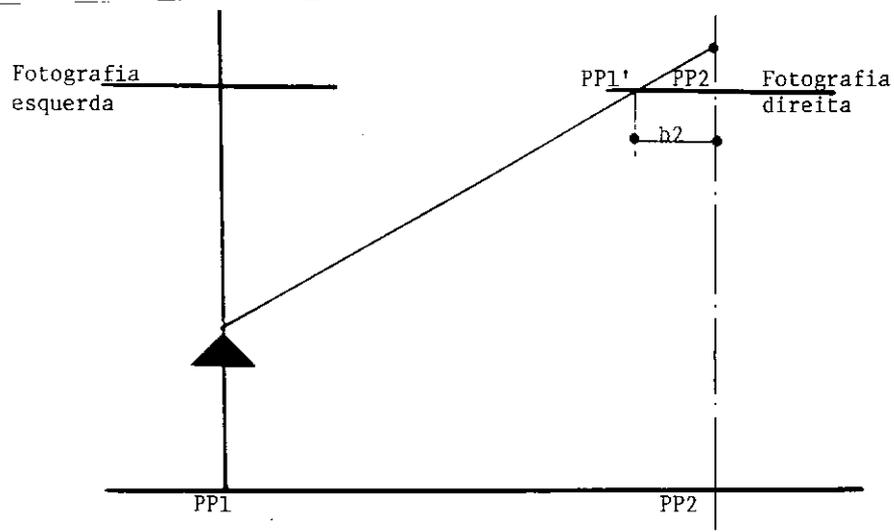


Fig. 17 - Paralaxe do ponto principal

Neste caso a paralaxe do ponto mais baixo corresponde a distância PP_1PP_2 , medida na fotografia direita que é exatamente o valor de b_2 .

Adicional a isso, o valor da paralaxe do ponto principal da fotografia esquerda pode ser medida na fotografia da direita e seu valor b_1 é diferente de b_2 , pois os pontos têm altitudes diferentes.

A paralaxe de um ponto principal é em realidade a base aérea estereoscópica medida sobre a fotografia anterior ou subsequente.

As duas simplificações introduzidas na fórmula acarretam erros no valor final da diferença de altura entre dois pontos. Devido as dificuldades da correta determinação de H e P , os erros são admissíveis e muitas vezes aumentados, reduzidos ou eliminados, dependendo da posição dos pontos em questão e do valor considerado de Hm .

Assim, admitindo-se estas simplificações, a expressão geral para o cálculo da diferença de altura entre dois pontos genéricos é dada por:

$$\Delta h = \frac{Hm}{b+dp} dp$$

onde: Δh = diferença de altura entre dois pontos;
 Hm = altura de vôo média;
 b = base aérea estereoscópica medida sobre as fotografias;
 dp = diferença de paralaxe entre os dois pontos considerados.

Havendo a necessidade de se estimar a diferença de altura para mais pontos, procede-se de maneira similar desde que atenção seja dada para a ordem de entrada dos pontos na fórmula acima.

Paine(1979), ao analisar o cálculo de distâncias verticais, apresenta a equação paralaxe-altura adaptada para 3 situações seguintes:

- 1) quando o terreno é montanhoso;
- 2) quando o terreno é plano;
- 3) equação simplificada.

Para a situação 1) a expressão fica:

$$\Delta h = \frac{H dp}{P + dp} = \frac{H dp}{b + \left[\frac{b(+\Delta E)}{H} \right] + dp}$$

onde: Δh = diferença de altura entre dois pontos;
 H = altura de vôo sobre o ponto mais baixo;
 dp = diferença de paralaxe entre os dois pontos;
 P = paralaxe do ponto mais baixo medida como a distância entre os pontos principais das duas fotografias, menos a diferença de distância entre as imagens do ponto mais baixo nas duas fotografias, quando estes estiverem corretamente alinhados para a medição de dp ;
 b = base aérea estereoscópica medida sobre as fotografias;
 ΔE = diferença de altura entre o ponto mais baixo e a altitude média dos pontos principais. Se este ponto se localizar acima da altitude dos pontos principais, considerar-se-á ΔE positivo, caso contrário ΔE será negativo.

Para que as duas equações acima sejam iguais:

$$P = b + \left[\frac{(b + \Delta E)}{H} \right]$$

A primeira equação foi comentada anteriormente, enquanto que a segunda será comentada a seguir:

A Figura 18 ilustra uma situação na qual a altitude média dos pontos principais é intermediária a altitude das bases de duas árvores. Se a intenção fosse determinar a altura da árvore localizada acima da altitude média dos pontos principais, a diferença ΔE seria positiva. Caso o interesse fosse determinar a altura da outra árvore, ΔE seria negativa.

O autor menciona que a razão para apresentar duas equações para o cálculo de diferenças de alturas quando o terreno é acidentado, reside no fato de que em certas ocasiões uma equação pode ser aplicada mais convenientemente do que a outra. Uma medida precisa de P é difícil de ser conseguida se o ponto mais baixo a ser considerado não for claramente visível, como acontece em áreas de vegetação densa. Em contrapartida, $\pm \Delta E$ é frequentemente desconhecido e é difícil de ser determinado. Na situação onde ambos $\pm \Delta E$ e P_b são difíceis de se obter, é preferível estimar seus valores do que considerar que o terreno é plano e adotar a fórmula correspondente.

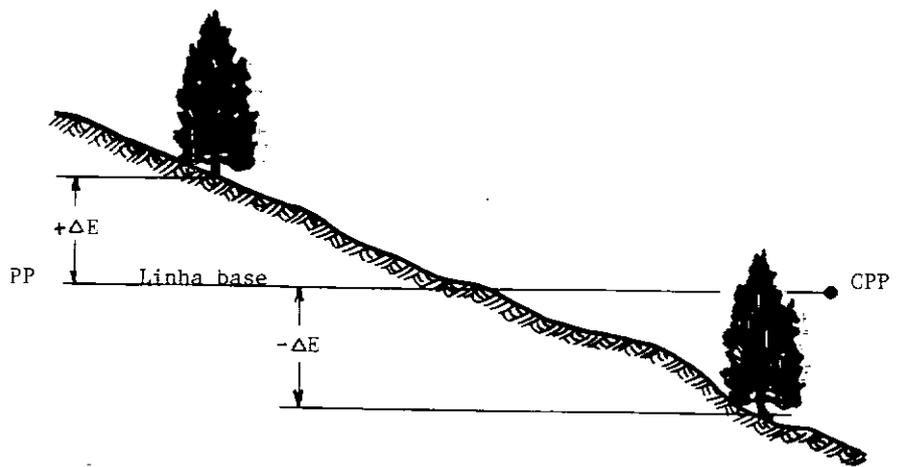


Fig. 18 - Ilustração de ΔE .

FONTE: Paine(1981)

Para a situação 2), quando o terreno é plano, a equação fica:

$$\Delta h = \frac{H \cdot dp}{b + dp}$$

onde os termos foram expressos anteriormente.

Esta equação deve ser usada quando a diferença em altitude entre o ponto mais baixo e os pontos principais das fotografias não exceder a 5% da altura de vôo sobre este ponto mais baixo. Para essa condição, o erro na determinação de diferenças de alturas é geralmente menor do que o erro cometido pelo fotointérprete ao medir dp.

Na situação 3), equação simplificada, h pode ser estimado por:

$$\Delta h = \frac{H \cdot dp}{P} = \frac{H \cdot dp}{b}$$

O autor comenta que a equação acima não é exata porque não utiliza dp no denominador, mas o erro é pequeno se dp for igualmente pequena, proporcionalmente aos valores de b ou P. Esta simplificação da fórmula facilita a elaboração de tabelas, que por sua vez, facilitam a determinação de diferenças de alturas.

Com o intuito de melhor exemplificar o uso destas fórmulas, Paine(1981) apresenta um exemplo numérico no qual são apresentadas três árvores de mesmas alturas, porém situadas a diferentes altitudes no terreno, como apresentado na Figura 19.

Uma destas árvores se encontra numa mesma altitude da altitude média dos pontos principais, enquanto as demais, uma se encontra 330m acima desta altitude, e a outra 330m abaixo desta. Uma vez que as árvores possuem a mesma altura, mas posicionam-se distintamente sob o ponto de vista topográfico, a diferença de paralaxe entre seus topos e bases diferem entre si, pois são "visualizados" por ângulos diferentes (vide Figura 19). Por isso suas medidas nas fotografias aéreas serão diferentes. Assumindo ainda que:

Altitude média dos pontos principais=660m

Altura de vôo H=1980m

*Distância média entre os pontos principais (P)=7,62cm

*Diferença na paralaxe entre os topos e bases:

* medidas nas fotografias aéreas.

Situação 1==> dp=0,254cm

Situação 2==> dp=0,368cm

Situação 3==> dp=0,185cm

Solução: Situação 1

Na Situação 1 a equação válida para terreno plano pode ser usada, pois a árvore encontra-se a uma mesma altitude dos pontos principais. Portanto:

$$\Delta h = \frac{H \cdot dp}{b + dp} = \frac{1980 \cdot 0,00254}{0,0762 + 0,00254} = 63,8\text{m}$$

Neste caso foi utilizada a equação que considera que a base do objeto, no caso a árvore, se encontra na mesma elevação média dos pontos principais, que é exatamente a situação proposta.

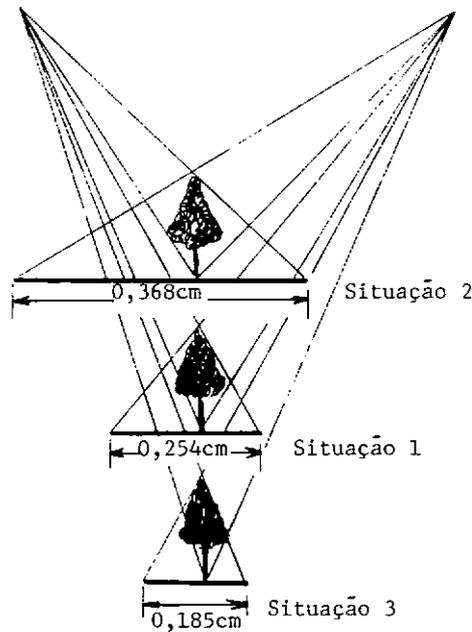
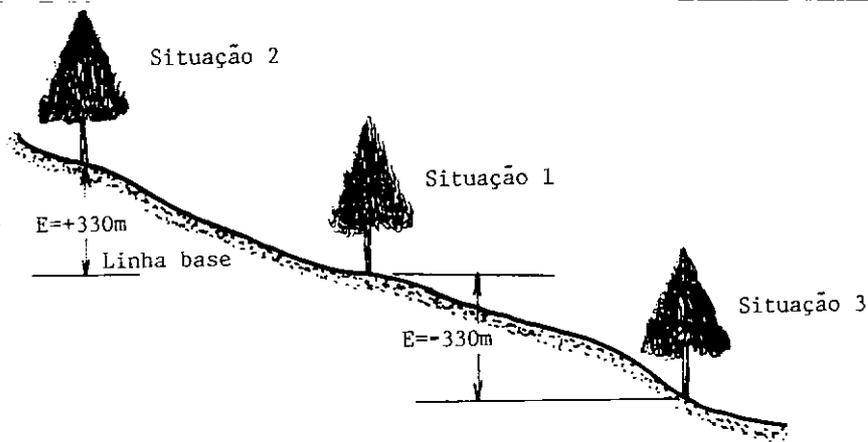


Fig. 19 - Ilustração do exemplo numérico.

FONTE: Paine(1981)

Para os demais situações se faz necessário averiguar se a diferença das altitudes das bases das árvores excede os 5% permitidos. Portanto:

$$\frac{+\Delta E}{H} = \frac{+330}{1980 - 330} \cdot 100 = 20\% \Rightarrow \text{Situação 2}$$

$$\frac{-\Delta E}{H} = \frac{-330}{1980 + 330} \cdot 100 = 14,2\% \Rightarrow \text{Situação 3}$$

Para ambas as situações acima os valores calculados excedem o valor de 5% permitido, justificando-se assim o uso da fórmula que considera o terreno montanhoso. Assim, tem-se:

Solução: Situação 2

$$\Delta h = \frac{H \cdot dp}{P + \left[\frac{P \cdot (+\Delta E)}{H} \right] + dp}$$

$$\Delta h = \frac{(1980 - 330) \cdot 0,00368}{0,0762 + \left[\frac{0,0762 \cdot (330)}{(1980 - 330)} \right] + 0,00368} = 63,8\text{m}$$

Solução: Situação 3

$$\Delta h = \frac{(1980 + 330) \cdot 0,00185}{0,0762 + \left[\frac{0,0762 \cdot (-330)}{(1980 + 330)} \right] + 0,00185} = 63,6\text{m}$$

A não consideração de ΔE , que é a diferença de altitude entre o ponto mais baixo e a altitude média dos pontos principais, nas Situações 2 e 3 acarretaria os seguintes valores de Δh :

Situação 2 $\Rightarrow h = 76,0\text{m}$

Situação 3 $\Rightarrow h = 54,8\text{m}$

Estar-se-ia então cometendo um erro de 19,1% para a Situação 2 e um erro de 13,9% para a Situação 3. Estes exemplos ilustram casos extremos onde ΔE é muito grande com o objetivo de enfatizar a importância da consideração

desta diferença na determinação da altura de objetos. Supondo que ΔE seja +99m (4,5% de H) no Situação 2. Nestas condições dp assumiria o valor 0,0282cm. Usando a equação que não considera ΔE , ter-se-ia:

$$\Delta h = \frac{H \cdot dp}{b + dp} \Rightarrow \Delta h = \frac{1980 \cdot 0,00282}{0,0762 + 0,00282} \Rightarrow \Delta h = 70,7m$$

Considerando agora a fórmula que considera ΔE :

$$\Delta h = \frac{(1980 - 99) \cdot 0,00282}{0,0762 + \left[\frac{(99 \cdot 0,00282)}{(1980 - 99)} \right] + 0,00282} = 67,0m$$

A diferença entre ambos os valores acima é de 3,7m, o que representa em termos percentuais um erro de 5,5%. Erros dessa magnitude não são considerados grandes porque aqueles implícitos na determinação de dp frequentemente acarretam erros ainda maiores.

Importante salientar que quando há a necessidade de se conhecer a altitude dos pontos principais das fotografias, mapas planialtimétricos referentes a área aerofotografada podem ser usados.

Ainda, quando for solicitada uma maior precisão na determinação de diferenças de alturas entre pontos, valendo-se das fórmulas discutidas, Moffitt(1967) apresenta um procedimento no qual os valores de paralaxe medidos são corrigidos. Para tanto, cinco pontos de controle localizados na área de superposição do par estereoscópico são escolhidos de forma que quatro destes devem ser localizados próximo aos vértices desta área e o quinto ponto deve ser localizado na parte central desta área. A altura de vôo sobre cada um destes cinco pontos e suas altitudes são determinadas a partir da seguinte equação:

$$h = H - \frac{B}{p} \cdot f$$

onde: H= altura de vôo média;
h= altitude do ponto;
B= aerobase medida no terreno;
p= paralaxe do ponto;
f= distância focal.

A altura média de vôo H é usada para o cálculo das cinco paralaxes teóricas esperadas para os pontos. Então a diferença entre essa paralaxe e aquela paralaxe medida deve ser utilizada para corrigir os valores de paralaxes medidas para outros pontos. Maiores detalhes sobre este procedimento poderão ser conseguidos em Moffitt(1967) e também Kilford(1979).

3.1 - MEDINDO A PARALAXE E DIFERENÇAS DE PARALAXE

Uma vez que a paralaxe é definida como deslocamentos ocorridos paralelamente ao eixo X , ou a linha de vôo, ela é sempre medida paralelamente a esse eixo. A Figura 20 ilustra uma situação na qual dois pontos, A e B , no terreno foram registrados num par de fotografias subseqüentes.

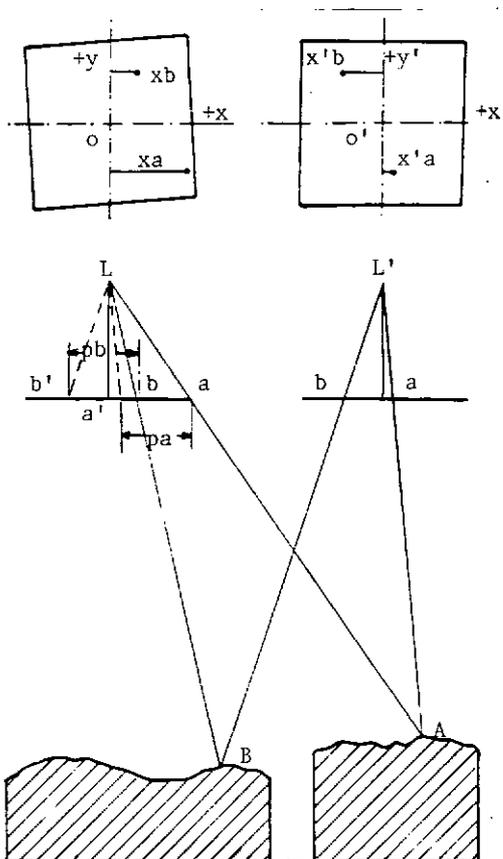


Fig. 20 - Paralaxe dos pontos A e B.

FONTE: Moffitt(1967)

Os pontos L e L' representam o centro ótico da câmara fotográfica no instante da tomada das fotografias esquerda e direita, respectivamente; e estes são coincidentes com as origens O e O' de dois sistemas de eixos cartesianos particulares de cada fotografia, semelhantemente a situação ilustrada pela

Figura 15, tendo aqui sido excluído o eixo Z. As coordenadas x_a e x_b representam as coordenadas das imagens dos pontos A e B, em relação ao sistema associado a fotografia esquerda, e analogamente, x'_a e x'_b , as mesmas coordenadas em relação ao sistema associado a fotografia direita. A paralaxe destes pontos é dada por:

$$(Px)A = x_a - x'_a \text{ e } (Px)B = x_b - (-x'_b) \implies (Px)B = x_b + x'_b$$

Convém salientar que se deve levar em consideração o sinal da coordenada (+ ou -) dependendo do quadrante do sistema no qual a imagem de um dado ponto foi registrada. Na situação apresentada, x'_b assumiu valor negativo por se encontrar no segundo quadrante do sistema de eixos cartesianos.

Se, através de um procedimento qualquer, as coordenadas x'_b e x'_a fossem transferidas para o sistema associado a fotografia esquerda, ter-se-ia a forma mais simples de visualização da paralaxe dos pontos A e B. Na Figura 20 este procedimento foi adotado de forma que b e b' representam as imagens de B, tendo a primeira sido registrada na fotografia esquerda, e a segunda foi transferida da fotografia direita para a esquerda. O mesmo aconteceu para a e a' . Neste caso P_b e P_a representam as paralaxes de B e A, respectivamente.

Para se medir a paralaxe de um ponto, basta que as fotografias do par estereoscópico sejam cuidadosamente orientadas, de forma que os pontos principais e conjugados definam corretamente a linha de vôo (eixo X). Normalmente a paralaxe é medida através da observação estereoscópica uma vez que o uso de instrumentos permite uma maior nitidez na localização de pontos, o que implica em medições mais precisas. Contudo este não é um procedimento indispensável. Régua de graduações convenientes podem ser usadas diretamente sobre as fotografias, sem o auxílio da visão estereoscópica. Considerando a situação ilustrada na Figura 20, x_a , x'_a , x_b e x'_b poderiam ser determinados através de uma régua milimetrada, por exemplo. Para tanto, os sistemas de eixos cartesianos poderiam ser desenhados sobre um papel transparente, o qual seria colocado sobre as fotografias. Com a régua, seriam determinadas as distâncias entre o eixo Y do sistema associado a fotografia esquerda, e a imagem a do ponto A (x_a). O mesmo procedimento seria repetido para a imagem b do ponto B (x_b). Em seguida estas distâncias seriam determinadas para as imagens a' e b' , agora considerando o sistema associado a fotografia direita (x'_a e x'_b). Os valores encontrados seriam substituídos nas fórmulas correspondentes para a determinação da paralaxe destes pontos.

Outro procedimento igualmente válido para a determinação da paralaxe destes pontos A e B da Figura 20 seria, ainda utilizando a régua ou instrumento similar, determinar a distância entre imagens homologas, ou seja, as distâncias entre a e a' e b e b'. A diferença entre cada uma destas distâncias e a distância entre os pontos principais das fotografias representam as paralaxes destes pontos.

Conforme já mencionado anteriormente, pontos situados a uma mesma altitude no terreno apresentarão valores idênticos de paralaxes. Quanto mais alto um ponto se localizar no terreno, maior será o valor de sua paralaxe e vice-versa. A Figura 21 ilustra o que foi mencionado.

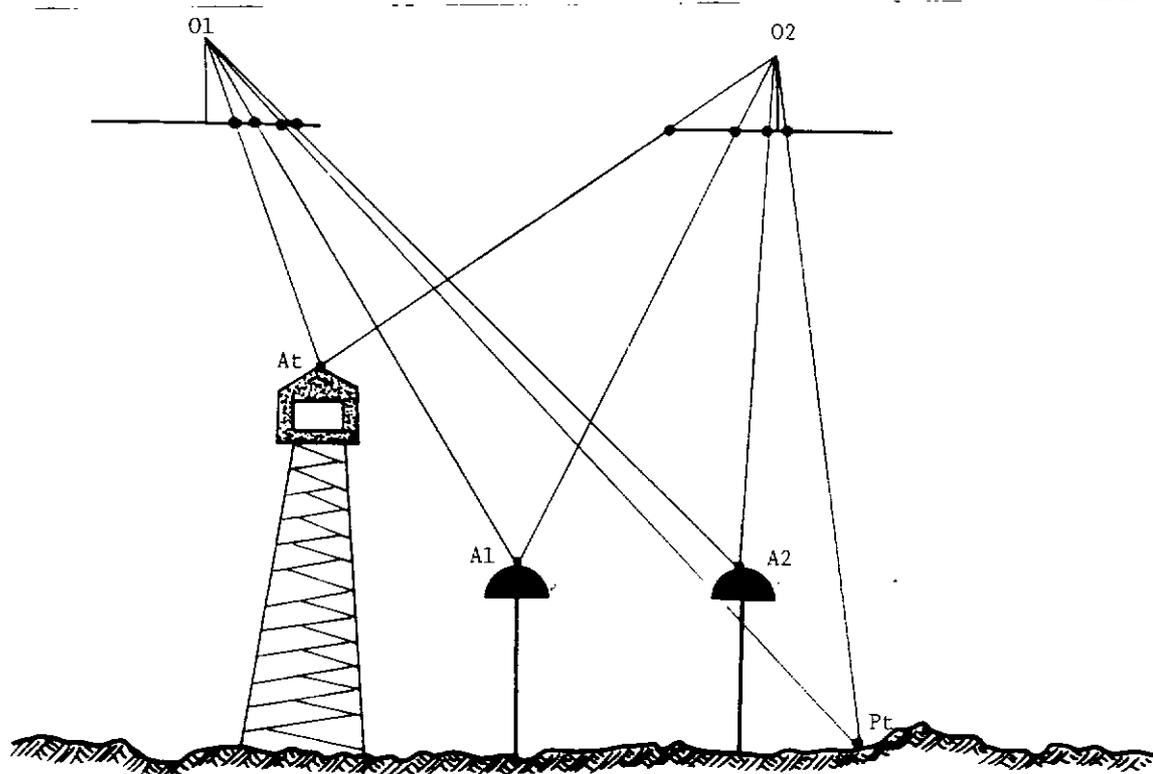


Fig. 21 - Altitude x paralaxes.

Os ápices das árvores, representados por A1 e A2, respectivamente, estão localizados a uma mesma altitude. O ápice da torre (At) está localizado a uma altitude maior que todos os demais pontos sobre o terreno e o ponto Pt está localizado a uma altitude inferior a todas as demais. Estes pontos foram registrados em duas fotografias subsequentes e suas imagens encontram-se representadas nos planos dos filmes fotográficos, na mesma Figura 21. Com o auxílio de uma régua o leitor poderá determinar o valor das paralaxes de cada um destes pontos e constatará a afirmação anterior.

De acordo com o exposto, é fácil compreender que uma vez fixado o valor de uma dada paralaxe, podem ser encontrados todos os pontos no terreno situados a uma mesma altitude. Através deste fato são traçadas as chamadas curvas de nível, as quais representam os pontos, no terreno, situados a uma mesma altitude.

Apesar de ser perfeitamente possível determinar a paralaxe sem a ajuda da visão estereoscópica, na prática, maior precisão e rapidez poderão ser conseguidas através do uso de estereoscópios. Aliados a estes, outros instrumentos, baseados no princípio da convergência do olho humano, têm sido desenvolvidos para medir a paralaxe estereoscópicamente. Supondo que um pequeno ponto seja colocado sobre a imagem do ápice de uma árvore, registrada na fotografia direita do par estereoscópico, e outro ponto similar seja colocado sobre a mesma imagem registrada na fotografia esquerda. Uma vez que estes pontos estão separados entre si a mesma distância das imagens do ápice da árvore, observados estereoscópicamente, estes pontos se fundirão numa única imagem, a qual deverá estar a uma mesma altitude no terreno daquela apresentada pelo ápice da árvore. O mesmo procedimento poderá ser adotado para a base da árvore. A diferença na posição dos dois pontos visualizados (ápice e base), medida paralelamente a linha de vôo (eixo X), representa a diferença de paralaxe destes pontos (dp), diferença esta relacionada a altura da árvore.

O procedimento descrito acima se refere ao Princípio do Ponto Flutuante, no qual fundamentam-se a maioria dos instrumentos designados para a determinação de diferenças de paralaxe através da observação estereoscópica.

A Figura 22 ilustra um esquema no qual um par de fotografias foi convenientemente orientado sob um estereoscópio, que não se encontra representado na figura para efeito de simplificação.

Dois pequenos pedaços de acetato ou qualquer outro material transparente, medindo aproximadamente 2cm de lado, foram preparados de forma que no centro de cada um foi desenhada uma marca, que poderia ser um ponto, cruz ou pequeno círculo. Um dos pedaços foi colocado sobre a fotografia esquerda e sua marca será tratada como "marca esquerda". O outro pedaço foi colocado sobre a fotografia direita e sua marca será tratada como "marca direita". Observadas estereoscópicamente as marcas fundem-se numa só, dando a aparente posição 1 sobre o terreno, ilustrada na Figura 22. Se a marca direita for movida

ligeiramente para a direita, a marca visualizada pelo observador parecerá que se move em direção ao terreno, até alcançar a posição 2, também mostrada na Figura 22. O deslocamento para a direita da marca direita pode continuar até que o observador perceba que a marca, por ele observada, "toque" aparentemente o terreno (posição 3 da Figura 22).

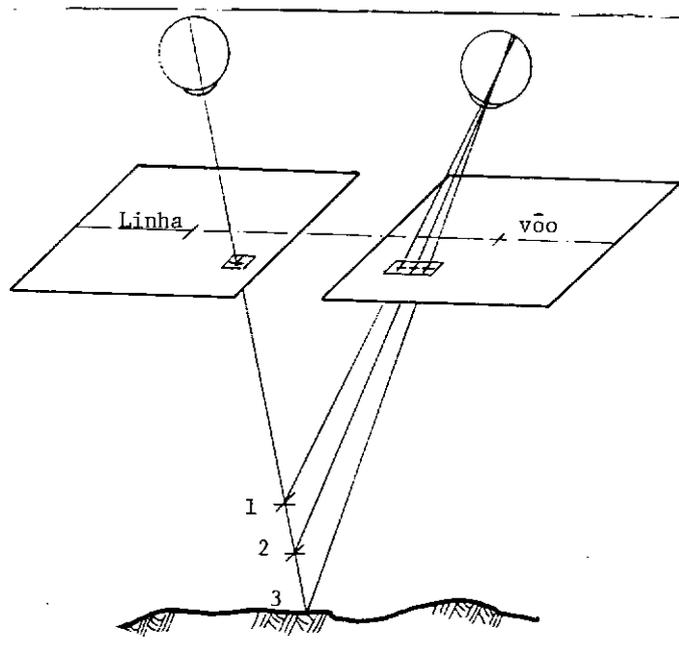


Fig. 22 - Princípio do ponto flutuante.

FONTE: Moffitt(1967)

Essa impressão de movimento vertical é causada pela variação da paralaxe da marca direita, que por sua vez altera a diferença de paralaxe entre ambas as marcas. Existem vários instrumentos que foram concebidos valendo-se deste princípio. Talvez um dos mais conhecidos por aerofotogrametristas seja a Barra de Paralaxe. A Figura 23 mostra dois tipos de Barras de Paralaxe, os quais possuem em comum uma barra na qual encontram-se fixos retângulos feitos de material transparente (vidro ou plástico). No centro destes retângulos encontram-se impressas as marcas de referência.

Através de um parafuso micrométrico estes retângulos são aproximados ou afastados e esse movimento é quantificado através de um goniômetro (Figura 23a) ou relógio comparador (Figura 23b). Assim como ilustrado pela Figura 22 (Princípio do ponto Flutuante), uma vez observadas estereoscópicamente, estas marcas de referência assumem o comportamento de um ponto flutuante.

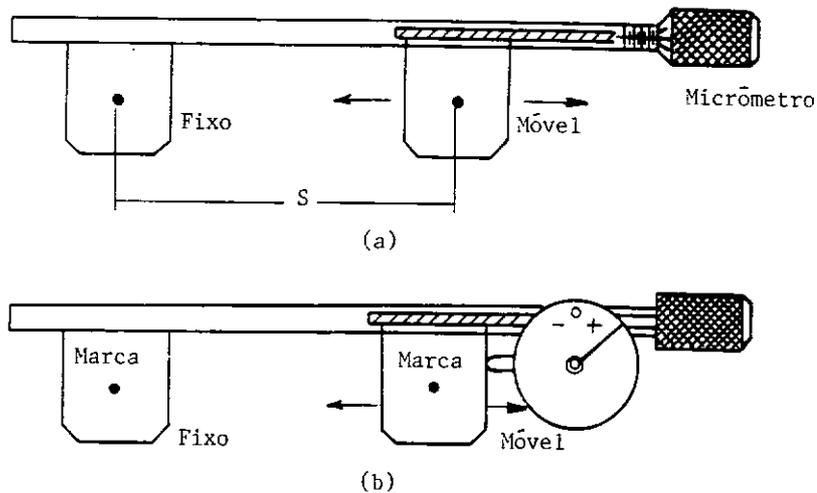


Fig. 23 - Barras de paralaxe .

FONTE: Moffit(1967)

Convém salientar que o valor numérico obtido com a Barra de Paralaxe , referente a paralaxe de cada ponto é relativo e portanto destituído de qualquer significado. O que interessa e que tem realmente significado, é a diferença de paralaxe, sendo esta a verdadeira finalidade da Barra de paralaxe.

Outro instrumento também utilizado na determinação de diferenças de paralaxes é a chamada Cunha de Paralaxe, o qual encontra-se ilustrado na Figura 24, posicionado sobre duas fotografias orientadas para a observação estereoscópica.

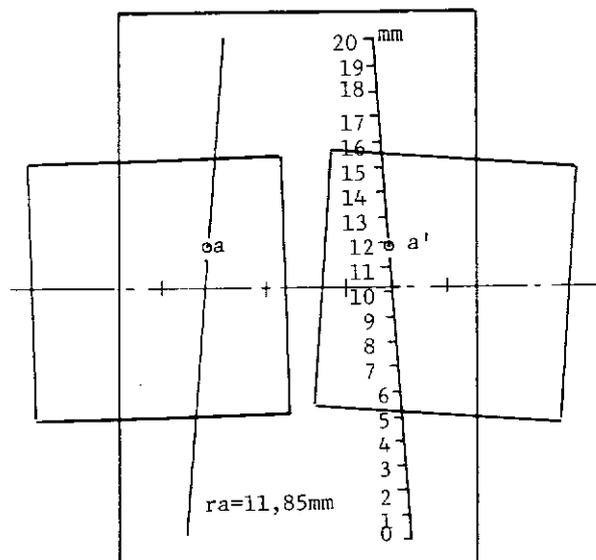


Fig. 24 - Cunha de paralaxe .

FONTE: Moffitt(1967)

Seu uso está intimamente ligado ao tipo de estereoscópio utilizado e ao consequente distanciamento entre as fotografias e ainda ao tamanho da cópia das fotografias a ser adotado.

Segundo Lo(1987), a Barra de Paralaxe é o instrumento mais utilizado nos meios acadêmicos para a determinação de dp, contudo sua utilização em trabalhos de rotina tem sido limitado por duas principais razões. A primeira delas se refere ao fato de que ao contrário dos restituidores, a Barra de Paralaxe permite a determinação de alturas ou da diferença de altitude de pontos isolados, o que nem sempre é o maior interesse de pesquisadores ou pessoas envolvidas em serviços de mapeamento onde o traçado de curvas de nível é um de seus principais objetivos. A segunda razão tem a ver com limitações ainda na precisão das determinações de dp. Sabe-se que, na maioria dos casos, trabalhos de fotogrametria conduzidos sob diapositivos apresentam uma melhor precisão do que aqueles conduzidos sob fotografias copiadas em papel opaco. Trabalhar com a Barra de Paralaxe sob fotografias neste tipo de material é mais fácil do que sob diapositivos, sendo assim perde-se em precisão.

A Cunha de Paralaxe é ainda menos usada na determinação de dp do que a Barra de Paralaxe, tanto no meio acadêmico quanto em serviços de rotina, dada sua especificidade e limitações de precisão.

3.2 - PROCEDIMENTO PRÁTICO PARA A DETERMINAÇÃO DE DIFERENÇA DE PARALAXE MEDIANTE O USO DE BARRA DE PARALAXE

1-Oriente o par de fotografias segundo a linha de vôo, conforme o procedimento já apresentado no Capítulo anterior (Estereoscopia), fixando-as com uma fita adesiva;

2-Observando estereoscópicamente, escolha dois pontos quaisquer situados a altitudes bastantes distintas. Faça um pequeno círculo em volta destes pontos. Para isso, procure utilizar lápis dermatográfico;

3-Determine a paralaxe destes pontos utilizando primeiramente uma régua, ou seja, sem o auxílio da visão estereoscópica;

4-Antes de atuar com a Barra de Paralaxe, gire seu parafuso micrométrico até uma leitura intermediária (geralmente 20mm). Atue sobre o parafuso de fixação da marca esquerda no sentido de fixá-la;

5-Observando estereocópicamente, atue sobre o parafuso micrométrico de forma a fazer com que o ponto

flutuante "pouse" sobre um dos pontos escolhidos. Proceda a leitura da Barra de Paralaxe. Repita essa operação pelo menos cinco vezes para o mesmo ponto. Mais cinco leituras deverão ser feitas para o outro ponto;

6-Calcular as médias destas leituras referentes a cada ponto, ou seja, sob um ponto A, por exemplo, terão sido feitas cinco medidas que originarão uma média; o mesmo acontecerá com um ponto B;

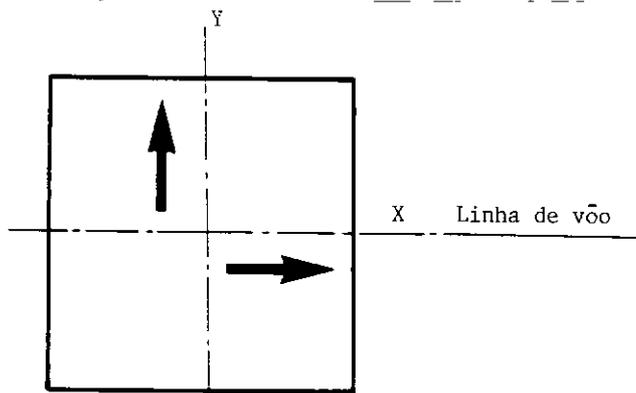
7-Calcular a diferença entre estas médias, que representa a diferença de paralaxe entre os dois pontos escolhidos.

O valor encontrado poderá ser comparado com aquele determinado mediante a diferença algébrica entre as medidas realizadas com a régua. Ainda um mapa planialtimétrico poderá ser usado para, através do conhecimento da altitude dos pontos escolhidos e demais parâmetros do aerolevanteamento realizado (altura de vôo, distância focal e aerobase) avaliar o resultado encontrado. Caso haja interesse os valores encontrados poderão ser aplicados nas fórmulas discutidas para determinação de diferenças de alturas entre os pontos considerados.

Questões - Paralaxe

1- Conceitue o termo paralaxe.

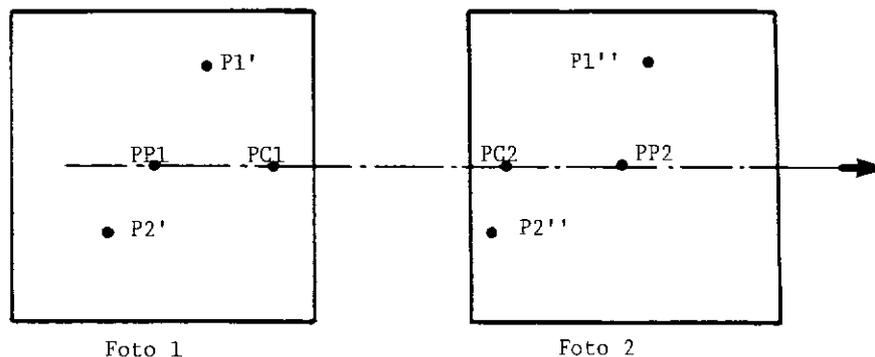
2- No esquema abaixo denomine os deslocamentos indicados :



3- Qual a importância dos deslocamentos ocorridos perpendicularmente a linha de vôo?

4- Considerando o princípio do ponto flutuante, o que explica a sensação de seu movimento vertical quando observado estereoscópicamente?

5- No esquema abaixo, indique quais dos pontos (P1 e P2) encontram-se mais alto no terreno fotografado. Sugestão: use uma régua milimetrada.



6-Quais são as condições essenciais para a aplicação da fórmula da determinação de alturas mediante a paralaxe de pontos fotografados no terreno? E se estas não forem atendidas?

7- Qual a expressão usada para o cálculo de diferenças de alturas? Comente as simplificações que podem ser feitas.

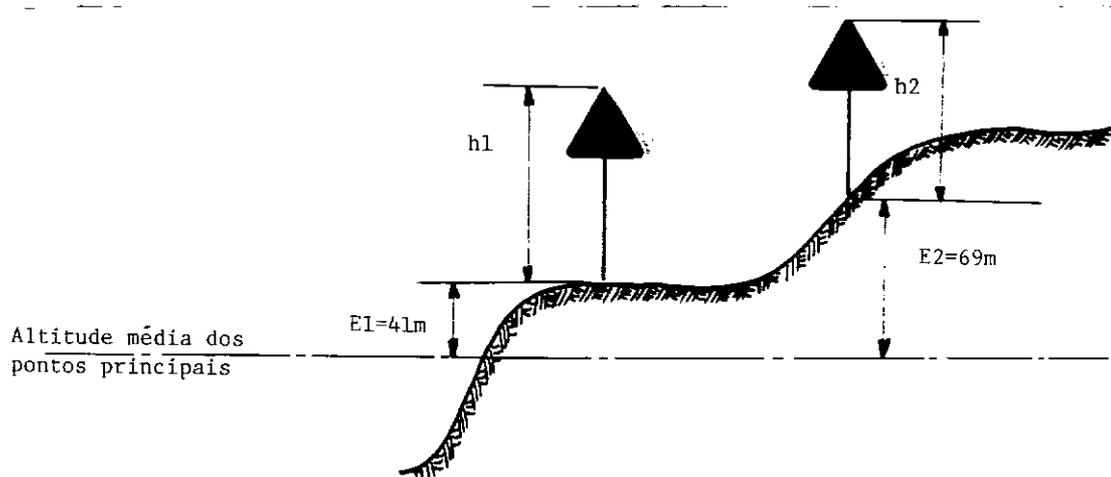
8- Explique o que representa o parâmetro P da fórmula para a determinação de diferenças de alturas entre pontos. Quando $P=b$?

9- Comente as modificações sugeridas por Paine no uso da expressão paralaxe-altura.

10- Um par sequencial de fotografias aéreas de uma determinada faixa de um aerolevante foi orientado para a observação estereoscópica. Foi determinada com precisão a real percentagem de recobrimento entre ambas as fotografias, que foi de 54%. Através do uso de uma Barra de paralaxe foram determinadas as paralaxes do topo de uma árvore (P_t) e de sua base (P_b), sendo $P_t=20,82\text{mm}$ e $P_b=20,43\text{mm}$. A escala média das fotografias era 1:25000 e a câmera fotográfica possuía uma distância focal $f=152\text{mm}$. Calcule a altura desta árvore. OBS.: Considere o relevo plano.

11- No esquema abaixo estão representadas duas árvores de alturas diferentes que foram fotografadas verticalmente. Através dos seguintes dados:

- a) Distância focal da câmera ==> $f=150\text{mm}$
- b) Escala fotográfica =====> 1:10000
- c) d_p para a árvore 1 =====> $d_{p1}=0,128\text{cm}$
- d) d_p para a árvore 2 =====> $d_{p2}=0,141\text{cm}$
- e) diferença ΔE para a árvore 1 > $\Delta E_1=+41\text{m}$
- f) diferença ΔE para a árvore 2 > $\Delta E_2=+69\text{m}$
- g) Distância entre PPs =====> $b=8,68\text{cm}$



Determine as alturas das árvores (h_1 e h_2).

12- Quais os instrumentos mais utilizados para a determinação de diferenças de paralaxe, e quais suas limitações e potencialidades?

13- Qual a importância da acuidade estereoscópica do observador na determinação de diferença de paralaxe de pontos?

14- Explique como proceder para traçar as chamadas curvas de nível a observação estereoscópica e paralaxes.

15- No exemplo numérico apresentado por Paine e apresentado neste trabalho, porque a diferença de paralaxe é maior na Situação 2 do que nas demais?

4 A ESTEREOSCOPIA E AS IMAGENS ORBITAIS

As discussões anteriores levaram em consideração o uso de fotografias aéreas para a observação estereoscópica e medição de alturas de objetos, contudo o mesmo é possível com imagens orbitais adquiridas pelos sensores HRV, colocados a bordo dos satélites da série SPOT.

Esta seção tem como objetivo apresentar resumidamente os princípios nos quais está fundamentada a aquisição e registro de dados coletados por estes sensores visando a observação estereoscópica, e fornecer algumas informações sobre o potencial e limitações do uso de imagens geradas na elaboração de trabalhos de mapeamento topográfico.

4.1 - FOTOGRAFIA X IMAGEM ORBITAL

No processo de tomada de uma fotografia, o filme fotográfico possui uma sensibilidade espectral definida, ou seja, ele é sensível ou é capaz de "registrar" a energia proveniente de uma cena ou objeto numa faixa espectral específica do espectro eletromagnético. Diz-se então que este filme é o elemento sensor. O sistema ótico da câmera fotográfica "direciona" a energia de forma a reproduzir, proporcionalmente, as grandezas contidas na cena, tais como a distância entre objetos, seus tamanhos, etc. O nível de detalhamento no qual a cena será registrada, ou seja, a resolução espacial, é função da granulação da emulsão fotográfica.

O processo de obtenção de uma imagem é análogo, contudo apresenta diferenças substanciais que permitem concluir que seu produto final, a imagem, não pode ser considerado uma fotografia. Os sistemas de imageamento diferem dos fotográficos porque os dados são registrados em forma de sinal elétrico, o que possibilita sua transmissão a distância. Todo sistema de imageamento possui dois componentes básicos: o sistema ótico e o detetor. O primeiro tem função de focalizar a energia proveniente da cena sobre o detetor, assim como acontece com os sistemas fotográficos (sistema ótico e filme). O sinal elétrico produzido pelo detetor é então processado e cada nível é alocado num conjunto de coordenadas no espaço. Ao final tem-se uma matriz bidimensional cujos elementos representam um valor numérico, que por sua vez é representativo do valor de radiância de uma fração da cena, cujas dimensões definem a resolução espacial do sistema imageador. Cada elemento desta matriz é obtido individualmente, seja através de um sistema mecânico, auxiliado por espelhos que através de um movimento sincronizado ao movimento do satélite, "orienta" sua visada de forma a imagear faixas da

superfície terrestre; ou ainda através de uma matriz de detetores, onde cada um de seus elementos é responsável pelo registro da energia proveniente de uma dada área no terreno.

4.2 - O SENSOR HRV DOS SATÉLITES DA SÉRIE SPOT

Em fevereiro de 1986 foi lançado ao espaço o primeiro satélite francês de uma série denominada SPOT, dedicada ao sensoriamento remoto de alta resolução dos recursos naturais terrestres. O termo "alta resolução" se refere especialmente a resolução espacial do sistema de imageamento, que na visada vertical permite a integração da energia proveniente de uma área de 10 x 10m, no modo pancromático e 20 x 20m no modo espectral. Isto significa que na região do espectro eletromagnético correspondente ao visível (modo pancromático), a resolução espacial é de 10m, enquanto nas demais regiões ela é de 20m. A Figura 25 representa a configuração do sensor HRV.

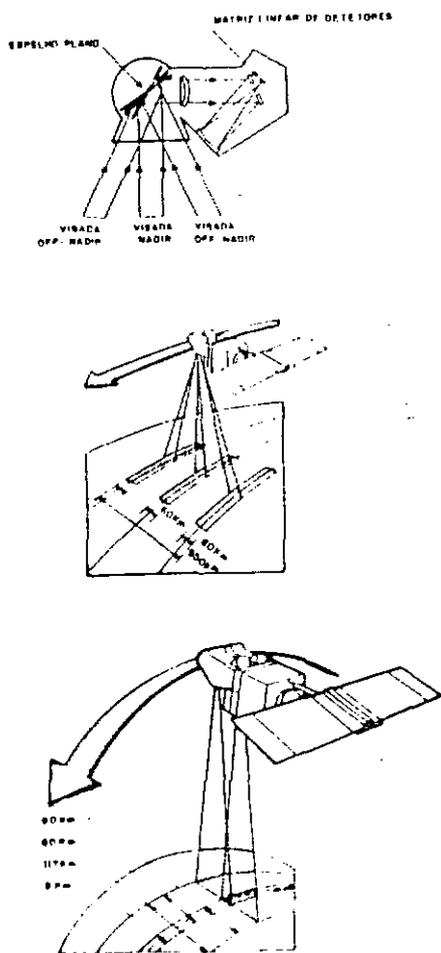


Fig. 25 - Configuração do sensor HRV.

FONTE: SPOT IMAGE (1986)

superfície terrestre; ou ainda através de uma matriz de detetores, onde cada um de seus elementos é responsável pelo registro da energia proveniente de uma dada área no terreno.

4.2 - O SENSOR HRV DOS SATÉLITES DA SÉRIE SPOT

Em fevereiro de 1986 foi lançado ao espaço o primeiro satélite francês de uma série denominada SPOT, dedicada ao sensoriamento remoto de alta resolução dos recursos naturais terrestres. O termo "alta resolução" se refere especialmente a resolução espacial do sistema de imageamento, que na visada vertical permite a integração da energia proveniente de uma área de 10 x 10m, no modo pancromático e 20 x 20m no modo espectral. Isto significa que na região do espectro eletromagnético correspondente ao visível (modo pancromático), a resolução espacial é de 10m, enquanto nas demais regiões ela é de 20m. A Figura 25 representa a configuração do sensor HRV.

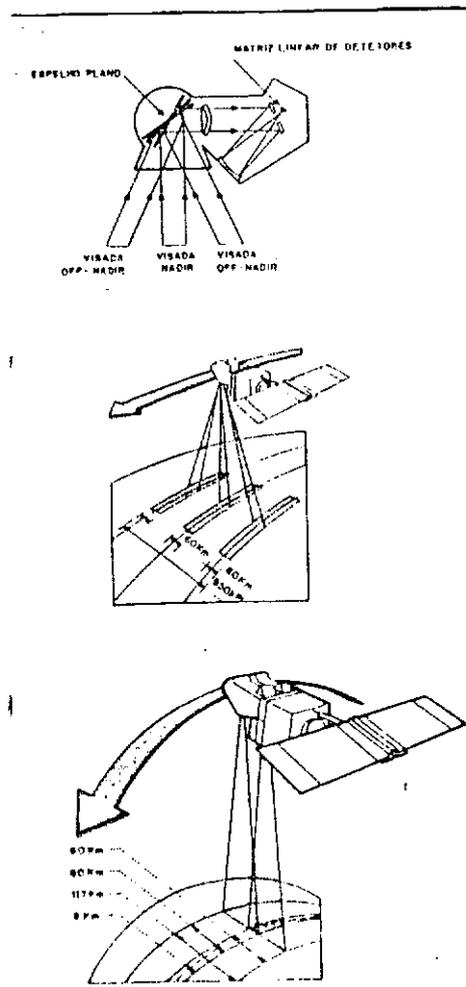


Fig. 25 - Configuração do sensor HRV.

FONTE: SPOT IMAGE (1986)

A energia proveniente de uma cena atinge um espelho plano que pode ser controlado a partir de estações terrenas. O eixo de visada deste espelho pode ser orientado em direções perpendiculares a órbita (visada "off-nadir"), em ângulos que podem variar de $+0^\circ$ até $+27^\circ$ em relação ao eixo vertical. Com essa possibilidade, o sistema pode imagear qualquer porção do terreno compreendida por uma faixa distante de até 475Km, em cada um dos lados da órbita em que se encontra o satélite (Figura 25b). Devido a curvatura da Terra, o ângulo de 27° "off-nadir" determina que o ângulo efetivo de visada no terreno seja de 33° em relação a vertical.

A energia que atinge o espelho plano é focalizada sobre uma matriz de detetores (6000 detetores), formando o chamado sistema de varredura eletrônica. Este sistema permite o imageamento instantâneo de uma faixa completa do terreno, perpendicularmente a direção do deslocamento do satélite em sua órbita. Como pode ser observado na Figura 25c, o sistema imageador dos satélites SPOT consiste de duas câmeras HRV, de modo que a largura da faixa imageada na visada vertical é de 117Km, descontando-se a superposição de seus campos de visada, que é da ordem de 3Km. A largura da faixa imageada varia com o ângulo de visada, como pode ser observado na Figura 25b. Na visada vertical a largura desta faixa imageada por uma das câmeras é de 60Km, enquanto na visada a 27° , esta largura atinge 80Km.

Através da visada "off-nadir", durante o período de 26 dias que separa duas passagens sucessivas sobre uma mesma área, esta poderá ser observada de órbitas adjacentes em 7 diferentes passagens, se estiver localizada no Equador. Se a área de interesse estiver localizada nas latitudes médias (45), a possibilidade de aquisição de dados aumenta para 11 diferentes passagens. A Figura 26 ilustra a maior frequência de aquisição de dados oferecida pela visada "off-nadir".

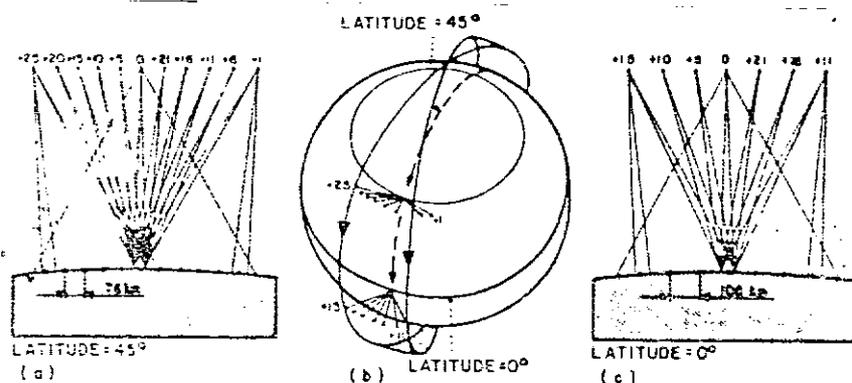


Fig. 26 - Frequência de aquisição de dados.

FONTE: SPOT IMAGE (1986)

Na Figura 26a encontra-se ilustrada a situação para a latitude de 45. Considerando D o dia em que o satélite passa verticalmente sobre a área de interesse, tem-se a possibilidade de observá-la novamente nos dias D+11, D+6, D+16, D+21 (visada oeste) e nos dias D+5, D+10, D+20 e D+25 (visada leste). Na Figura 26c encontra-se ilustrada a possibilidade de imageamento reduzida para a latitude 0. Os dias favoráveis ao imageamento são : D+11, D+16, D+21 (visada oeste) e D+5, D+10 e D+15 (visada leste). Na Figura 26b encontram-se representadas as diferenças na possibilidade de aquisição de dados em função da latitude.

4.3 - A VISADA "OFF NADIR" E A ESTEREOSCOPIA

A visada "off-nadir" não foi porém concebida apenas para aumentar a frequência de aquisição de dados. Outra importante possibilidade de sua utilização é a aquisição de pares estereoscópios. A Figura 27 mostra a geometria de imageamento necessária para tal aquisição.

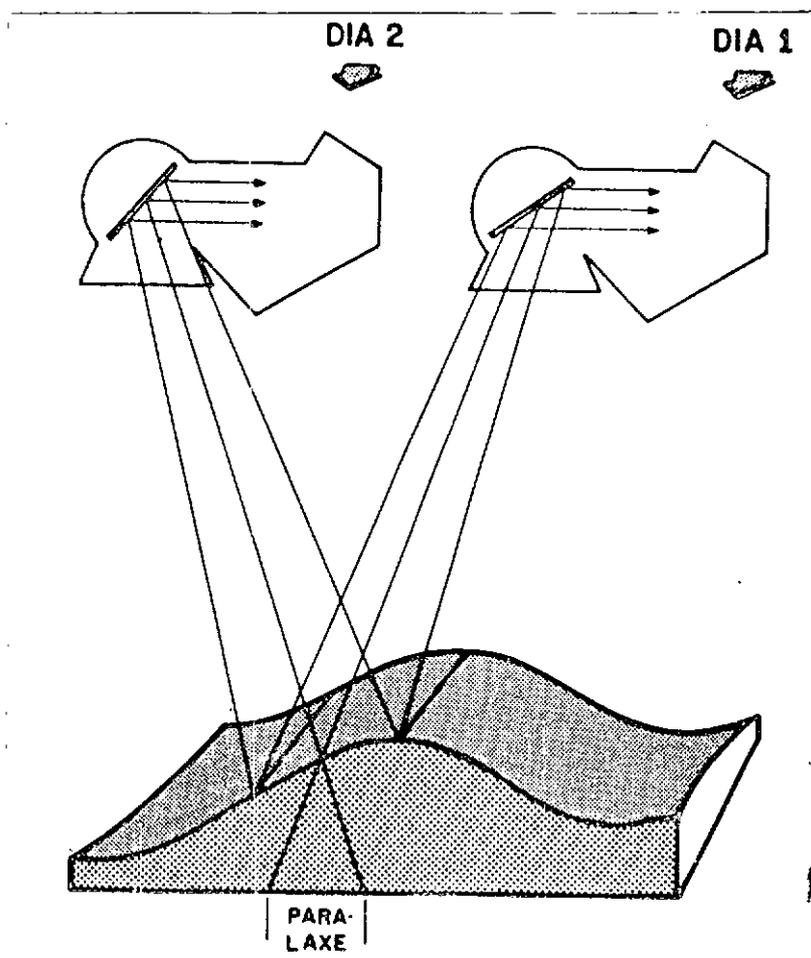


Fig. 27 - Geometria de aquisição de pares estereoscópios.

FONTE: SPOT IMAGE (1986)

Comparando os pares estereoscópios adquiridos a nível orbital com aqueles adquiridos por fotografias aéreas, tem-se os seguintes aspectos a serem considerados:

- . tamanho da cena ==> as imagens geradas pelo sensor HRV abrangem uma área de 60 x 60 Km, independentemente da escala na qual são apresentadas;

- . escalas usuais ==> as imagens geradas podem ser apresentadas em escalas compreendidas entre 1:400000 a 1:25000;

- . resolução espacial ==> aproximadamente 10m no modo pancromático e 20m no espectral;

- . superposição ==> para o estereopar adquirido pode alcançar até 100% de superposição, comparado a 60% normalmente considerado em missões de aerolavantamento.

Poucos foram os estudos já realizados (até Janeiro de 1989) para avaliar as possibilidades e limitações do uso de pares estereoscópios orbitais de imagens do sensor HRV em estudos quantitativos e qualitativos de recursos naturais. Levando em consideração a percepção do relevo, a avaliação da qualidade dos dados tem se baseado em alguns estudos teóricos, simulações e mais recentemente algumas avaliações estão sendo conduzidas em trabalhos de mapeamento. São as seguintes as características esperadas em trabalhos de restituição altimétrica:

- . cenas de 60x 60Km, após o registro de pontos de controle, a exatidão altimétrica deverá ser de aproximadamente 10m;

- . as distâncias entre pontos no terreno poderão ser determinadas com até 5m de variação;

- . através da observação estereoscópica, mapas topográficos poderão ser confeccionados tendo suas curvas de nível separadas entre 20 a 50m;

- . modelos digitais de terreno poderão ser elaborados diretamente sobre as imagens.

Alguns destes tópicos estão sendo elaborados em trabalhos de pesquisa como por exemplo aquele desenvolvido por Hartley (1988), na Inglaterra. Dados do sensor HRV foram usados no mapeamento topográfico na escala 1:100000. O autor concluiu que para atingir uma precisão aceitável trabalhando com esta escala, as curvas de nível tiveram de ser distanciadas de 40m, sendo que a extração de detalhes do terreno foi considerada incompleta. Ainda o autor constatou serem necessários mais trabalhos de campo quando

do uso das referidas imagens, comparando com trabalhos realizados com fotografias aéreas convencionais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- LO, C.P. Parallax bar height measurements from large format camera photography. Photogrammetric Record, 12(70):485-491, 1987.
- MOFFITT, F.H. Photogrametry. USA, International Textbooks, 1967. p.540.
- NG, K.W.; WALKERZA, S. An investigation of the accuracy of parallax bar heighting by means of numerical simulation. Photogrammetric Record, 12(69):323-331, 1987.
- PAINE, D.P. Aerial photography and image interpretation for resource management. John Wiley, 1981. p. 571.
- PAREDES, E. A. Introdução à aerofotogrametria para engenheiros. Maringá, Pr. Ministério de Educação e Cultura. Conselho Estadual de Ciência e Tecnologia, 1987. p. 492.
- SPURR, S.H. Photogrammetry and Photointerpretation USA. The Ronald Press. 1960. p. 472.
- LUGNANY, J.B. Aerofotogrametria. Notas de Aulas dadas na Universidade Federal do Paraná. 1981. 75p.
- BURNSIDE, C.D. Mapping from aerial photographs. Granada. New Zealand, 1979. p. 301.
- FORERO, J.A.M. Ejercicios practicos de fotogrametria elemental. Bogotá, Colômbia, Centro Interamericano de Fotointerpretação (ITC). 1974. p. 154.
- KILFORD, W.K. Elementary air survey. 4 ed. London, Pitman Publishing Limited. 1979. p. 345.
- AGNARD, J.P. Canadian contribution to holography. Photogrammetric Eng. and Remote Sensing, 42(3):343-344pp, 1976.
- AGNARD, J.P.; BRANDENBERGER, A.J. ; BOIVIN, A. Tolerances in holography. Photogrammetric Engineering, 38(1):51-53, 1972.
- ANDERSON, P.S. Fundamentos para fotointerpretação. Rio de Janeiro. Sociedade Brasileira de Cartografia. 136p., 1982.

- ANDRADE, J.B, de. Exagero de estereoscopia: uma nova fórmula para seu cálculo. Revista Floresta, (2):61-67, 1970.
- CAUFIELD, J.H. The wonder of holography. National Geography. (1):364-377, 1984.
- ERB, T.L.; PHILIPSON, W.R. Producing stereo teaching aids from aerial photographs. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, (48):1859-62, 1982.
- FRANÇA, M.S.J. Esculturas de luz. Super Interessante, (06): 18-23, 1988.
- HALLERT, B. Photogrammetry-Basic principles and general survey. New York. McGraw-hill Book Company, Inc., 1960 340p.
- KIEFFER, R.W. Classroom 3-D projection of landform photography. Photogrammetric and Remote Sensing, 43:293-97, 1977.
- LaPRADE, G.L.; BRIGGS, S.J.; FARRELL, R.J.; LEONARDO, E.S. Stereoscopia. In: American Society of Photogrammetry, Manual of photogrammetry. Falls Church, USA, 1980. p. 519-544.
- NOWICKI, A.L. Stereoscopia. In: American Society of Photogrammetry. Manual of photogrammetry, Falls Church, USA, 1975. p. 515-536.
- SMITH, J.T.Jr. Manual of color photogrammetry. Falls Church, USA. American Society of Photogrammetry. 1968. 550p.
- CURTOIS, M.; TRAISET, M. The SPOT Satellites : From SPOT1 to SPOT4. Geocarto International (3):4-14. , 1986.
- HARTLEY, W.S. Topographic mapping with SPOT1 data: a practical approach by ordinance survey. Photogrammetric Record, 12(72):833-846, 1988.
- SPOT IMAGE. Stereoscopic viewing capabilities with SPOT. Paris, French. SPOT IMAGE, 1986.