

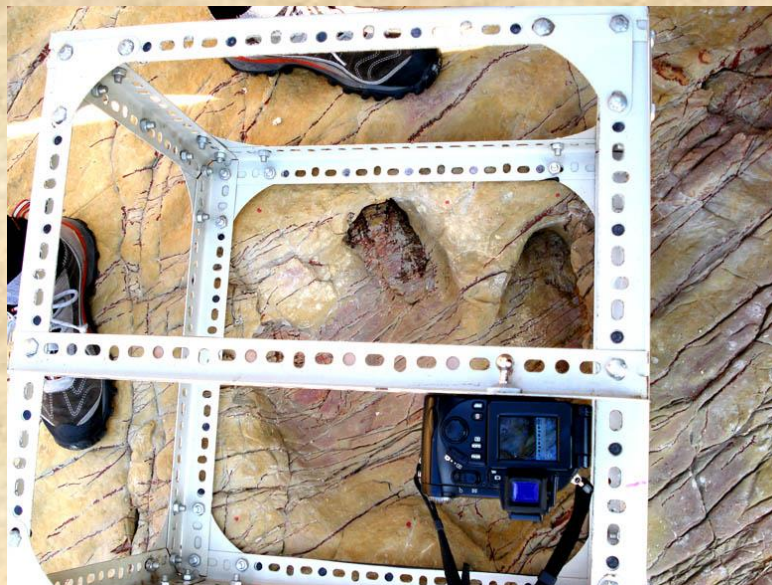
MUSEU DE TOPOGRAFIA PROF. LAUREANO IBRAHIM CHAFFE
DEPARTAMENTO DE GEODÉSIA – UFRGS

HISTÓRIA DA FOTOGRAMETRIA

Textos originais de: João Matos – Instituto Superior Técnico
Daniel Santos – UFPR

Ampliação de texto e figuras: Iran Carlos Stalliviere Corrêa - UFRGS

A **fotogrametria** pode ser definida como a arte, ciência e tecnologia de obtenção de informações de confiança sobre os objetos e do meio ambiente físicos, por meio de processos de registro, medições e interpretações de imagens fotográficas tomadas com câmeras métricas convencionais ou câmeras não métricas, além de modelos de energia eletromagnética radiante. A definição ainda inclui análise de modelos de energia acústica radiante e fenômenos magnéticos.



Aplicação de Fotogrametria de pegadas de dinossauros para a obtenção de um modelo estereográfico

A **fotogrametria** pode ser usada nos estudos e nas explorações do espaço. Vestígios de furações e outros distúrbios da natureza, que se movem pela terra, podem ser observados e estudados. O intervalo de tempo de exposições feitas na câmera fotográfica transportada pelo avião é ajustado de tal maneira que cada ponto da superfície da terra é fotografado mais de uma vez de diferentes posições.

A ciência do processo consiste na **análise das fotografias**, tal como a interpretação dos dados, além do desenvolvimento de modelos

matemáticos que cumprem a função do relacionamento entre os espaços imagem e objetos envolvidos nas medidas dos dados com o uso da tecnologia ao qual se refere.

Atualmente, a arte do procedimento se resvala na automação dos processos fotogramétricos. No entanto, auxilia a reconstrução dos processos analógicos para o ambiente digital.

A tecnologia engloba todas as etapas no que tange os processos de automação e desenvolvimento de aplicativos, equipamentos, entre outros.

Nos dias atuais as **fotografias analógicas**, tomadas com câmeras métricas convencionais, estão sendo substituídas por imagens digitais tomadas com câmeras métricas digitais (ADS-40) e câmeras não métricas digitais, tais como as câmeras digitais da Sony F717 com resolução de 5.4 μm .



Câmera Aérea Métrica Digital

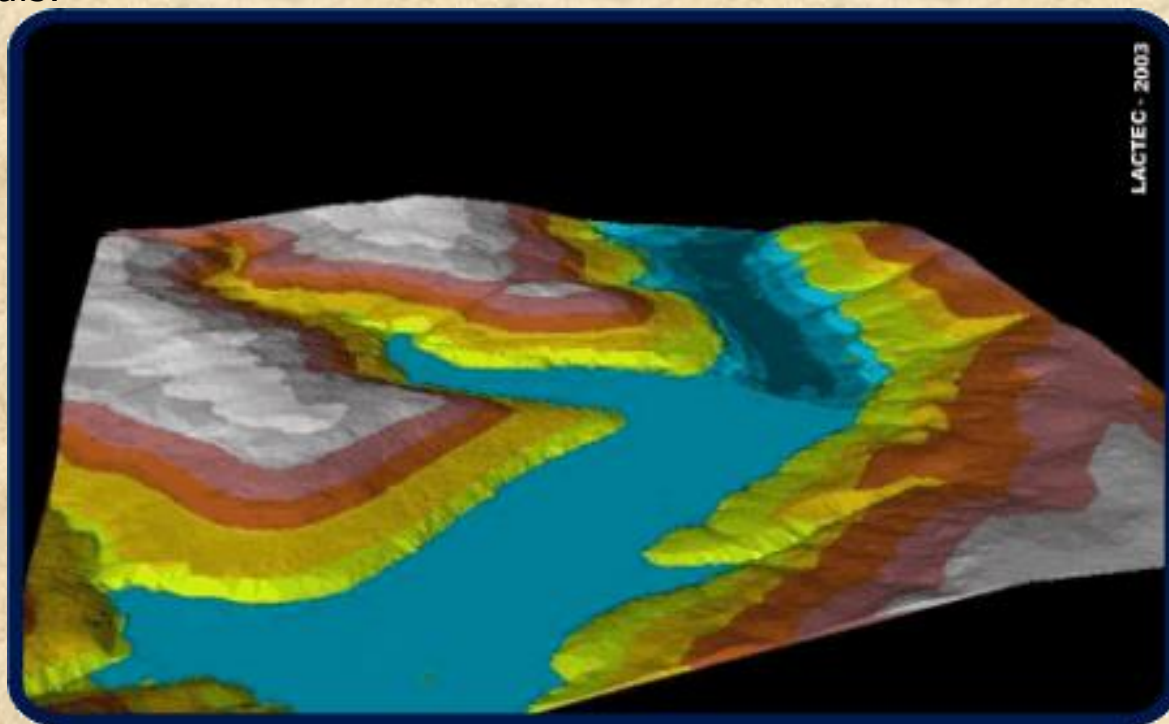


Câmeras fotográficas instaladas em uma aeronave

Outro aspecto interessante é o desenvolvimento das lentes dos satélites artificiais projetados para fins de aquisição de informação eletromagnética, no qual os dados adquiridos são transformados em imagens com resolução melhor que 60 cm.

A **Fotogrametria** é uma subárea das Ciências Geodésicas e abrange grande parte de todo o processo de compilação de mapas. Atualmente, a **Fotogrametria** é dividida em: analógica, analítica e digital. Em tempos remotos (fase analógica), a compilação de mapas era realizada de forma árdua e morosa, e necessitava de operadores devidamente treinados.

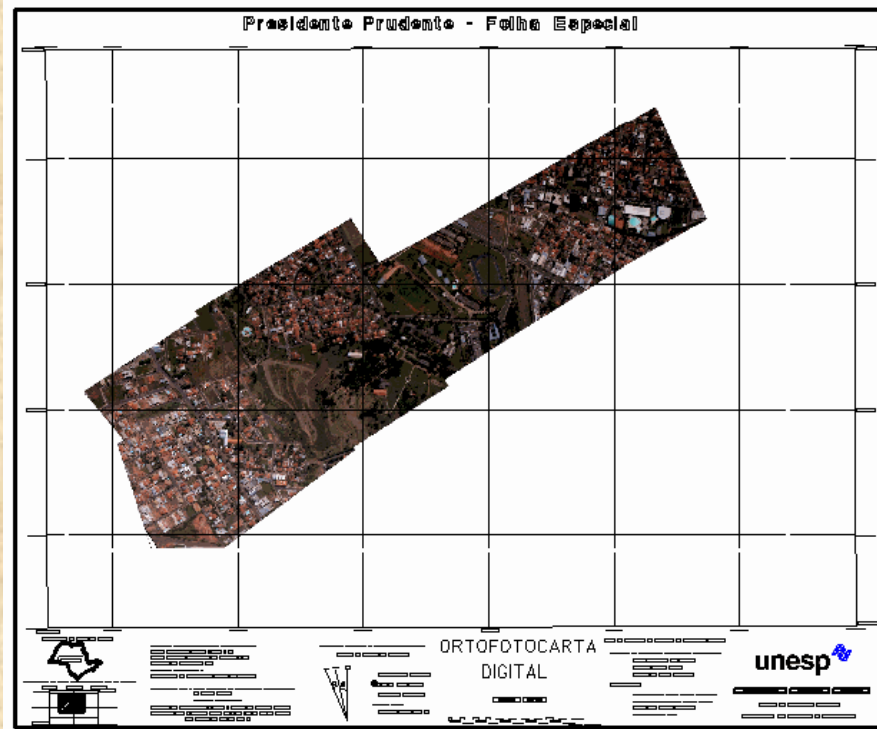
O rápido avanço da tecnologia projetou a **Fotogrametria** na era digital e possibilitou a cooptação com outras áreas do conhecimento, tais como: o Processamento Digital de Imagens (PDI), a Inteligência Artificial e a Visão Computacional. A integração de conhecimentos tornou possível a automação de algumas etapas fotogramétricas, no qual se destacam: orientação interior e relativa, foto triangulação, a geração de MDT (Modelo Digital do Terreno) e a geração de ortofotos digitais.



Modelo Digital do Terreno

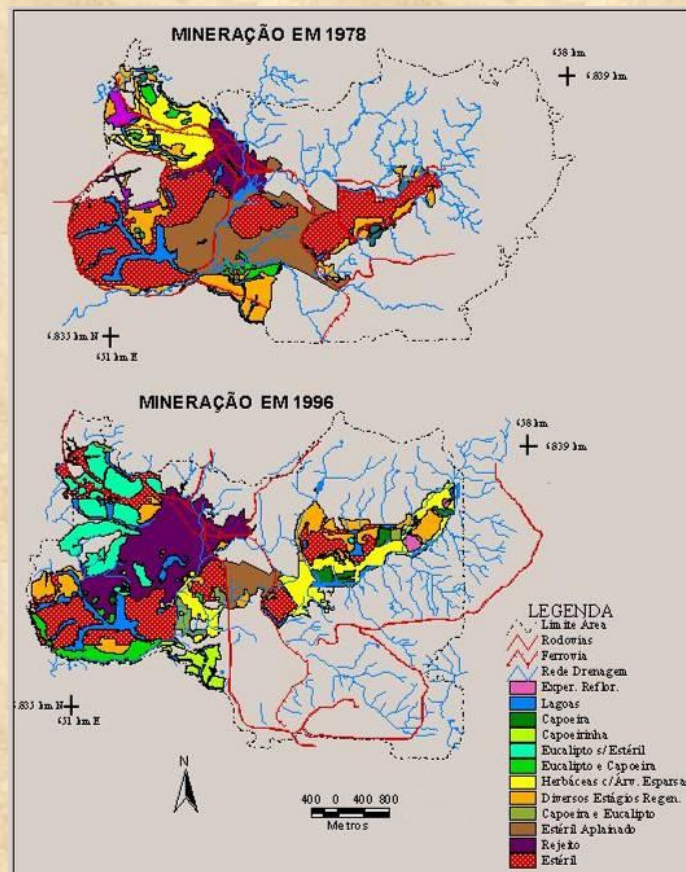
Sem a intenção de esgotar o assunto, pode-se dizer que, apesar de muitos usuários da **Fotogrametria** afirmar que com o uso das imagens de satélite a Fotogrametria será extinta, deve-se reflexionar que o **Sensoriamento Remoto** é uma tecnologia derivada da Fotogrametria, criada com a finalidade de apresentar uma terminologia para a técnica de interpretação qualitativa das fotografias, já que a Fotogrametria é dividida em duas áreas distintas, sendo elas:

- **Fotogrametria métrica;**
- **Fotogrametria interpretativa.**



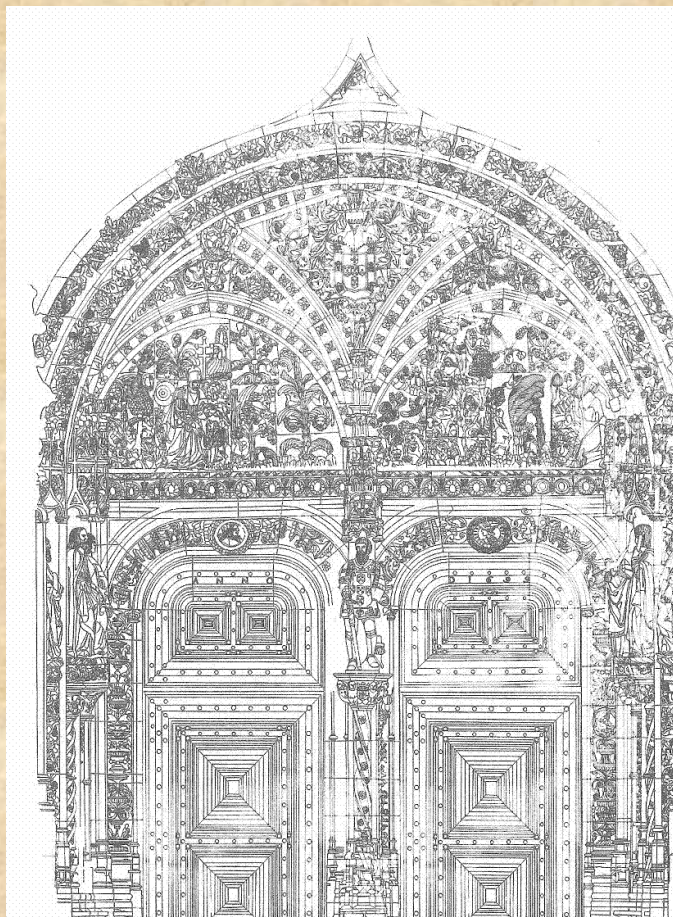
Ortofotocarta Digital

A primeira envolve medidas precisas e cálculos para determinar o tamanho, a área, o perímetro e as formas das feições cartográficas presentes em uma fotografia ou imagem. A segunda destina-se a medidas qualitativas, bem como da interpretação das feições na imagem, como por exemplo, a identificação de uma cultura de soja, tipo de solo etc.



Resultado da Fotointerpretação de uma Área de Mineração

A **Fotogrametria métrica** tem como função básica para a Cartografia, a compilação de mapas planialtimétricos e topográficos. Porém, com a popularização de suas aplicações também tange medidas para automação industrial, medidas arquitetônicas, reconhecimento de objetos no espaço físico a curta e longa distância, entre outras aplicações.



Reconstituição do Portal da Igreja de Santa Maria de Belém – Portugal

A partir da **Fotogrametria interpretativa** surge o Sensoriamento Remoto, onde as imagens são produtos derivados de um conjunto de informações da energia eletromagnética radiante, emitidas por uma fonte de luz natural ou artificial.

As imagens ou fotografias podem ser adquiridas com uso de veículos aerotransportados, de navegação terrestre, espacial ou simplesmente acoplada em um suporte, tal como o teodolito.

Tanto a **Fotogrametria** como o **Sensoriamento Remoto** são técnicas de medida indireta dos objetos físicos, ou seja, não é necessário o contacto direto do operador humano com as feições cartográficas, tal como acontece no caso de medidas realizadas com a técnica da topografia, por exemplo.

Ambas as tecnologias tiveram um grande avanço no que tange as lentes e sensores para a aquisição das imagens e os mesmos serão descritos nos capítulos subseqüentes.



Imagem de Satélite

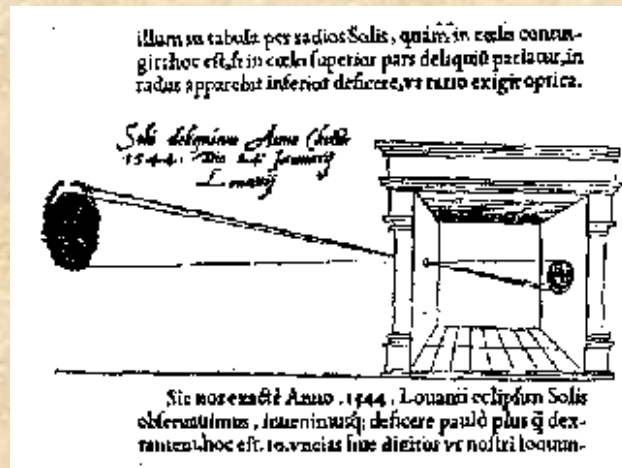
Histórico da Fotogrametria

A primeira descoberta importante para a fotografia foi a **Câmera Escura**. O conhecimento do seu princípio ótico é atribuído, por alguns historiadores, ao chinês **Mo Tzu** no século V a.C., outros indicam o filósofo grego **Aristóteles** (384-322 a.C.) como o responsável pelos primeiros comentários esquemáticos da Câmera Escura.

Sentado sob uma árvore, **Aristóteles** observou a imagem do sol, em um eclipse parcial, projetando-se no solo em forma de meia lua ao passar seus raios por um pequeno orifício entre as folhas de um plátano. Observou também que quanto menor fosse o orifício, mais nítida era a imagem.

Séculos de ignorância e superstição ocuparam a Europa, sendo os conhecimentos gregos resguardados no oriente. Um erudito árabe, **Ibn al Haitam** (965-1038), o **Alhazem**, observa um eclipse solar com a câmara escura, na Corte de Constantinopla, em princípios do século XI.

Nos séculos seguintes a **Câmera Escura** se torna comum entre os sábios europeus, para a observação de eclipses solares, sem prejudicar os olhos. Entre eles o inglês **Roger Bacon** (1214-1294) e o erudito hebreu **Levi ben Gershon** (1288-1344). Em 1521, **Cesare Cesariano**, discípulo de Leonardo da Vinci, descreve a Câmera Escura em uma anotação e em 1544, surge a primeira ilustração da Câmera Escura, na obra de **Reiner Gemma Frisius**, físico e matemático holandês.



Primeira ilustração publicada da Câmera Escura, 1544

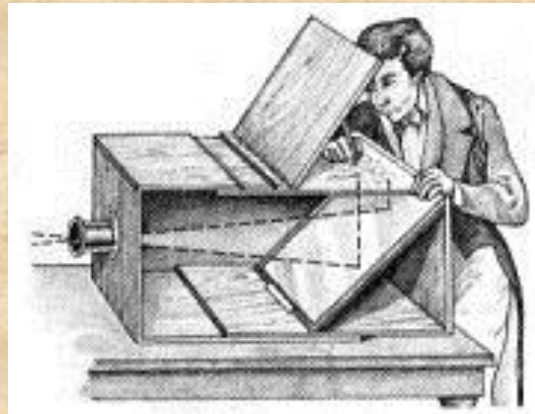
No século XIV já se aconselhava o uso da **câmera escura** como auxílio ao desenho e à pintura. **Leonardo da Vinci** (1452-1519) fez uma descrição da câmara escura em seu livro de notas sobre os espelhos, mas não foi publicado até 1797. **Giovanni Battista della Porta** (1541-1615), cientista napolitano, em 1558 publicou uma descrição detalhada sobre a câmara e seus usos no livro "*Magia Naturalis sive de Miraculis Rerum Naturalium*". Esta câmara era um quarto estanque à luz, possuía um orifício de um lado e a parede à sua frente pintada de branco. Quando um objeto era posto diante do orifício, do lado de fora do compartimento, a sua imagem era projetada invertida sobre a parede branca.

Em 1620, o astrônomo **Johannes Kepler** utilizou uma Câmera Escura para desenhos topográficos. O jesuíta **Athanasius Kircher**, erudito professor de Roma, descreveu e ilustrou uma Câmera Escura em 1646, que possibilitava ao artista desenhar em vários locais, transportada como uma liteira e em 1685, **Johan Zahn** descreve a utilização de um espelho, para redirecionar a imagem ao plano horizontal, facilitando assim o desenho nas câmeras portáteis.



Câmera Escura em forma de liteira, construída em 1646 por Athanasius Kircher

No início do século XVIII o Dr. **Brook Taylor** publicou um tratado sobre a perspectiva linear e mais tarde **J. H. Lambert** sugeriu que o princípio de perspectiva poderia ser utilizado na compilação de mapas.



Câmara Escura tipo caixão e reflex, usada por cerca de 150 anos, antes do aparecimento da Fotografia

A prática atual da **Fotogrametria** não poderia ocorrer até o desenvolvimento do processo fotográfico. O fato ocorreu em 1839, quando **Louis Daguerre** de Paris anunciou o processo fotográfico direto. Neste processo a exposição foi realizada em uma placa de metal sensibilizada pela luz, com uma porção de iodeto de prata, dando origem ao processo fotográfico dos dias atuais.

Um ano depois da invenção de **Daguerre**, um geodesta da Academia Francesa, demonstrou que o uso de fotografias era viável no mapeamento topográfico, ocorrido em 1849 sob o comando do Coronel **Aimé Laussedat** do Corpo de Engenheiros do exército francês. Durante vários anos o Coronel **Laussedat** investiu seu conhecimento e sua persistência para o desenvolvimento da prática da fotogrametria aérea, com o uso de balões para a tomada das fotografias. Porém, devido às dificuldades encontradas para obter fotografias aéreas, migrou seus estudos para a prática da **Fotogrametria Terrestre**. Já em 1859 o Coronel **Laussedat** apresentou os resultados de seu trabalho e foi considerado o Pai da Fotogrametria.

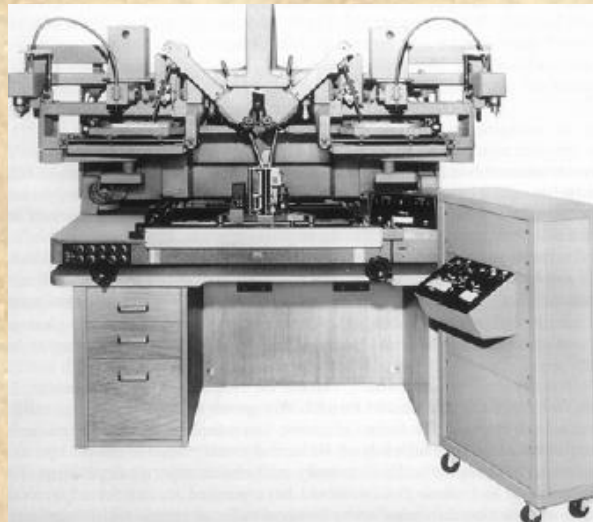
No início do século XX o Dr. **Carl Pulfrich** iniciou experimentos com pares estereoscópicos de fotografias. A partir de seu trabalho foram desenvolvidos vários dos equipamentos restituidores.

Após a invenção da aeronave em 1902, a **Fotogrametria aérea** ganhou campo no desenvolvimento dos trabalhos de mapeamento, reconhecimento, inteligência e estratégia bélica etc. E nos dias atuais, devido ao grande desenvolvimento tecnológico, a Fotogrametria tornou-se uma ciência que busca a automação dos processos com a

finalidade de aumento da linha de produção, diminuição do esforço operacional, crescimento tecnológico etc.



a



b

(a) Coronel Laussedat, o Pai da Fotogrametria; (b) Restituídor fotogramétrico



Fotografia aérea – 1ª Guerra Mundial

Tipos de Fotografias

As fotografias utilizadas na Fotogrametria são de dois tipos basicamente, são elas:

- **Terrestre;**
- **Aérea.**

As fotografias do primeiro tipo são tomadas com Câmeras acopladas em algum tipo de suporte, tal como um tripé, aos quais a posição (X,Y,Z) e a orientação (ω , φ , κ) da câmara são usualmente conhecidas. O **Foto teodolito** é uma combinação de câmera com teodolito montados sobre um tripé, com a finalidade de obter fotografias terrestres. Esses tipos de fotografias possuem aplicações na automação industrial, no reconhecimento de objetos à curta-distância, para restituição arquitetônica, para reconstrução tridimensional de máquinas, navios, barcos, estruturas de grandes construções, entre outras.

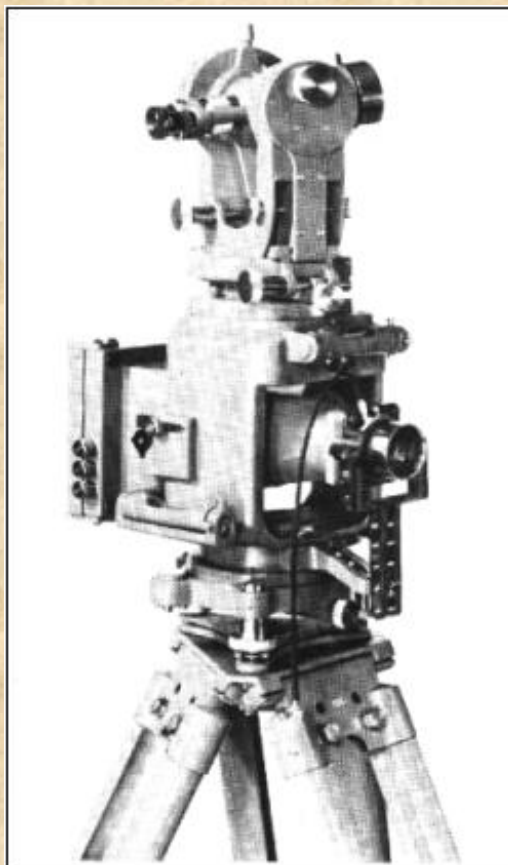


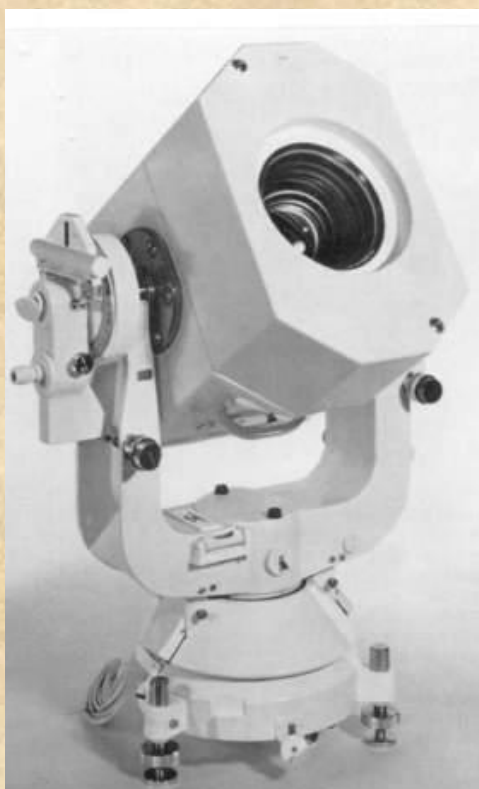
Foto teodolito desenvolvido pela Wild.

O teodolito facilita o alinhamento da câmera por meio de um azimute conhecido. A figura abaixo apresenta uma fotografia terrestre tomada com uma câmera digital não métrica de pequeno formato.



Fotografia terrestre tomada com câmera digital não métrica de pequeno formato

Outro tipo de câmera terrestre é a chamada **câmera balística**. Estas são câmeras grandes montadas em terreno selecionado, com a finalidade de adquirir fotografias da órbita de satélites artificiais, de forma que se tenha como apoio de campo para a orientação da câmera, as estrelas que compõem a abóbada celeste.



Câmera Balística

As fotografias são utilizadas para o cálculo da trajetória dos satélites, bem como para determinar o tamanho, a forma e a gravidade da Terra, além da posição da câmera com elevada precisão. Portanto, é necessário o conhecimento dos parâmetros internos da câmera (f , K_1 , k_2 , k_3 , P_1 , P_2 , A , B). Na década de 70 este tipo de câmera foi utilizado com a finalidade de se estabelecer uma rede de trabalho mundial de

pontos de controle e para determinar com precisão a posição relativa dos continentes, ilhas oceânicas remotas etc.

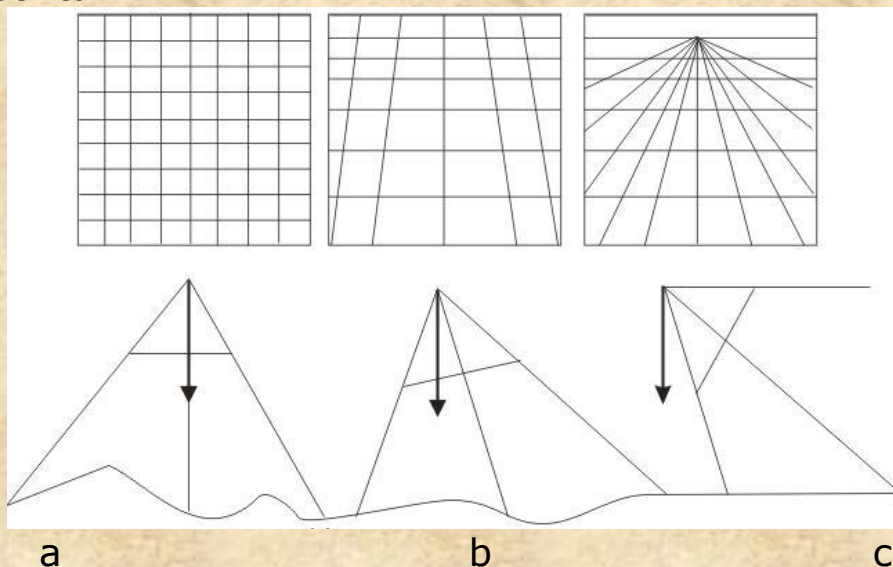
Já as fotografias aéreas são usualmente classificadas como vertical ou oblíqua. **Fotografias verticais** não são factíveis na prática devido à instabilidade da aeronave (inclinação da câmera, rajada de vento, entre outras), impedindo que o eixo da câmera esteja apontado diretamente para o nadir, ou seja, o eixo da câmera não é perfeitamente vertical no momento da tomada da fotografia, de forma que o plano da fotografia não seja paralelo ao datum.

No entanto, na prática quando o eixo da câmera é levemente inclinado da vertical, as fotografias são denominadas de inclinadas. Porém, para fins práticos fotografias com inclinação menores que 3° são consideradas verticais. Em alguns casos as fotografias levemente inclinadas são tratadas como perfeitamente verticais sem sérias conseqüências.

Fotografias com inclinação superior à 3° podem ser denominadas de:

- **Fotografia aérea baixo oblíqua;**
- **Fotografia aérea alto oblíqua; e**
- **Fotografias espaciais.**

A **fotografia oblíqua** é tomada com o eixo da câmera inclinado com um ângulo acima de 3° , onde nos casos em que se encontra o horizonte são denominadas de alto oblíqua e em casos que não se encontra o horizonte, são denominadas baixo oblíqua. A figura abaixo ilustra as orientações do eixo de uma câmera na vertical, alto oblíqua e baixo oblíqua, bem como um perfil de linhas do terreno para cada situação descrita.



(a) Fotografia vertical; (b) Fotografia baixo oblíqua; (c) Fotografia alto oblíqua



Foto aérea oblíqua

Podem-se considerar também as fotografias chamadas **espaciais**, utilizadas para exploração espacial. Estas fotografias são tomadas por câmeras acopladas em aeronaves espaciais e satélites artificiais. O planeta Marte, por exemplo, tem sido grande alvo de pesquisa e mapeamento dos órgãos de mapeamento espacial da Europa e dos Estados Unidos da América.

Instrumentos de precisão foram desenvolvidos e fabricados para o tratamento adequado deste tipo de situação sem perda de precisão nas medidas efetuadas. Abaixo uma câmera aérea métrica convencional com mecanismo de controle elétrico e seus acessórios para montagem em aeronaves específicas para levantamentos aéreos.

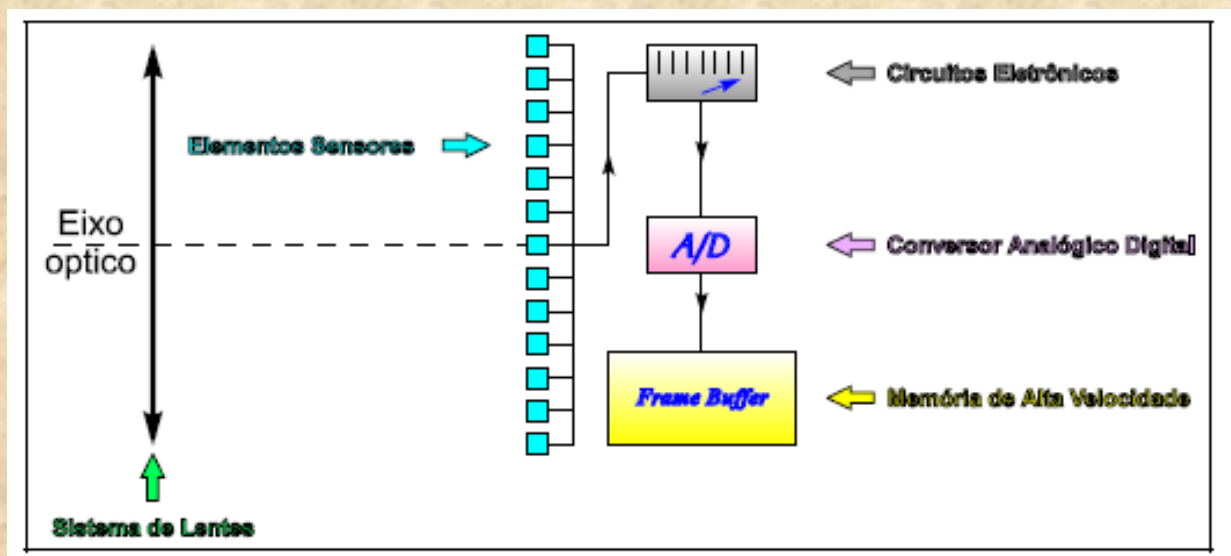


Câmera métrica convencional RMK-Top 15 da Zeiss

Fotografia e Imagem Digital

Atualmente, na **Fotogrametria**, uma fotografia pode ser considerada como métrica e não métrica. As fotografias métricas são adquiridas com câmeras métricas convencionais específicas para trabalhos que exigem precisão cartográfica.

Uma imagem digital é um conjunto de elementos de imagem espacialmente ordenados em um arranjo matricial, cuja posição é dada por (x,y) , sendo que a cada elemento de imagem (pixel) é associado um tom de cinza, expresso genericamente por $g(x,y)$, que são valores inteiros armazenados em "palavras" de n bits, sendo que o número máximo de tons de cinza que podem ocorrer na imagem é 2^n bits (Galo, 1993).



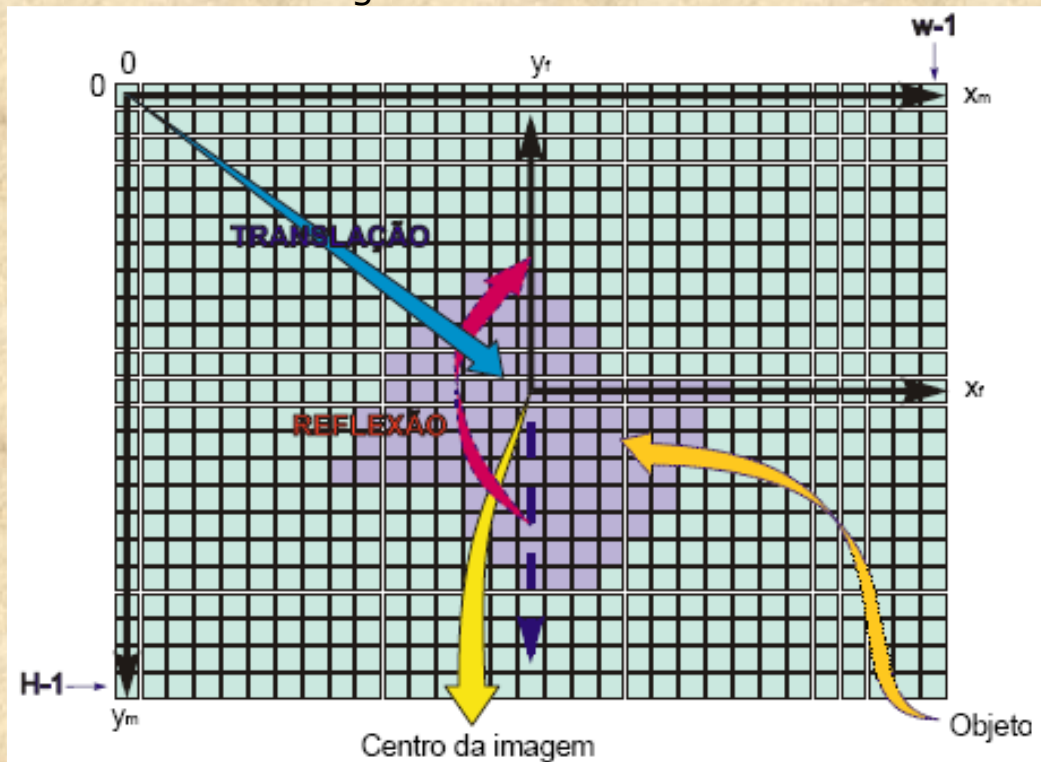
Princípio de formação da imagem (adaptado de Galo, 1993)

Considerando o esquema acima, têm-se as seguintes fases de formação da imagem:

- A formação da imagem inicia-se no momento em que a radiação eletromagnética emitida pelos alvos atravessa o eixo ótico da câmera;
- A partir deste instante o feixe luminoso é desviado e projetado sobre os elementos sensores, que produzem um sinal proporcional à intensidade luminosa;
- Os sinais são recebidos pelos circuitos eletrônicos que os convertem para uma voltagem;
- Em seguida, o sinal analógico é discretizado em um conversor A/D (analógico/digital);

- Por fim, o sinal discretizado em tons de cinza é armazenado em uma memória de alta velocidade (*frame buffer*), para posteriores processamentos digitais.

O sistema de coordenadas de uma imagem digital, também chamado de sistema de coordenadas de máquina, é um sistema plano-retangular com origem no canto superior esquerdo, sendo o eixo **x** coincidente com a primeira linha e o eixo **y** com a primeira coluna, formando um sistema levógiro.



Representação da mudança do referencial de máquina para o de imagem

Para a realização de processos fotogramétricos com imagens digitais, faz-se necessário transformar coordenadas de um ponto qualquer do sistema de imagem para o sistema com origem no centro da imagem. Para isto basta que sejam feitas uma translação e uma reflexão no eixo **y**, tornando-se assim um sistema dextrógiro.

Posteriormente, um fator de escala que corresponde ao tamanho do pixel (*picture element*) deve ser multiplicado pelas coordenadas para convertê-las ao sistema de medidas utilizado.

As coordenadas reduzidas são obtidas através das expressões:

$$x_f = \left(x_m - \frac{W-1}{2} \right) \times p_x \quad y_f = - \left(y_m - \frac{H-1}{2} \right) \times p_y$$

onde:

x_m e y_m são as coordenadas de máquina;

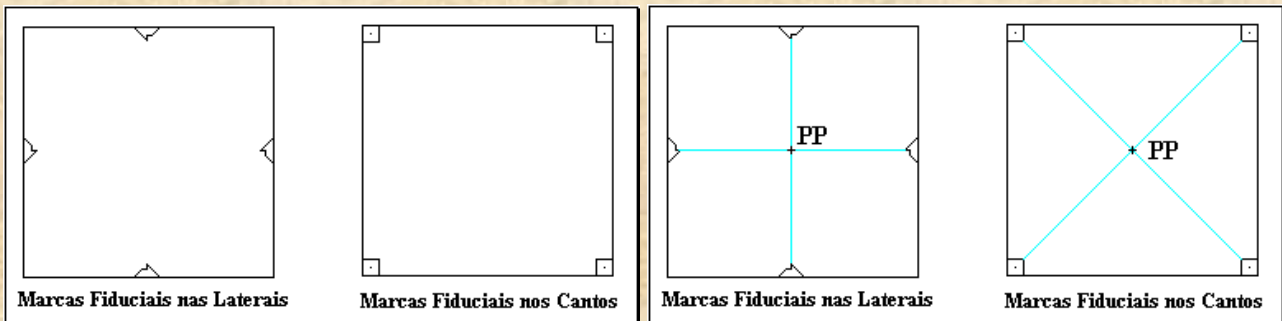
x_f e y_f são as coordenadas reduzidas ao referencial da imagem;

W número de colunas (largura);

H número de linhas (altura);

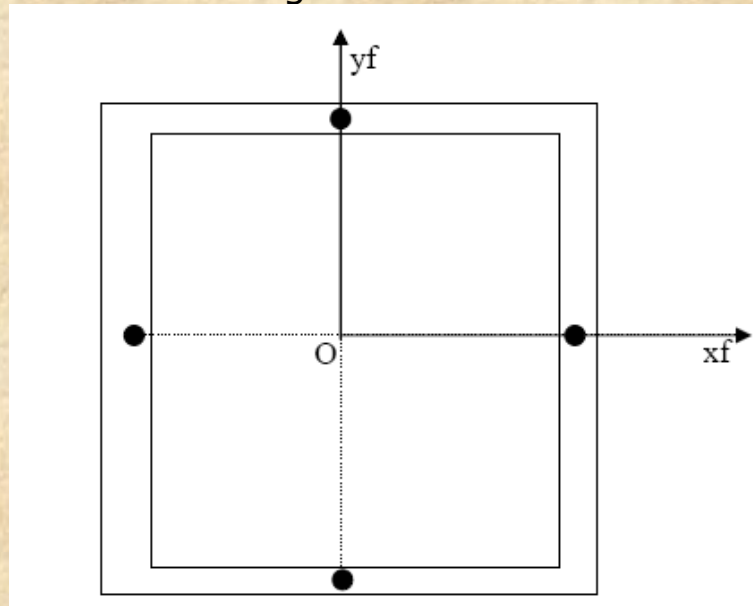
p_x e p_y são as dimensões do pixel nas suas componentes x e y , respectivamente.

As fotografias tomadas com câmeras métricas convencionais, possuem marcas fiduciais que são sinais gravados nas bordas das fotografias com a finalidade de materializar o sistema de coordenadas da fotografia (sistema fiducial). As marcas fiduciais são de vários tipos e variam de acordo com o tipo de câmera métrica.



Marcas Fiduciais em Fotografias Aéreas

Com a interseção das marcas fiduciais opostas pode-se determinar a origem do sistema fiducial e definir o sistema de coordenadas fotográfico com uso de um sistema bidimensional. Maiores detalhes serão apresentados em capítulos subseqüentes. A figura abaixo mostra o sistema de coordenadas fotográfico definido com descrito acima.



Sistema de coordenadas fotográfico

Onde,

- x_f, y_f : coordenadas do sistema fotográfico;
- O : origem do sistema fiducial.

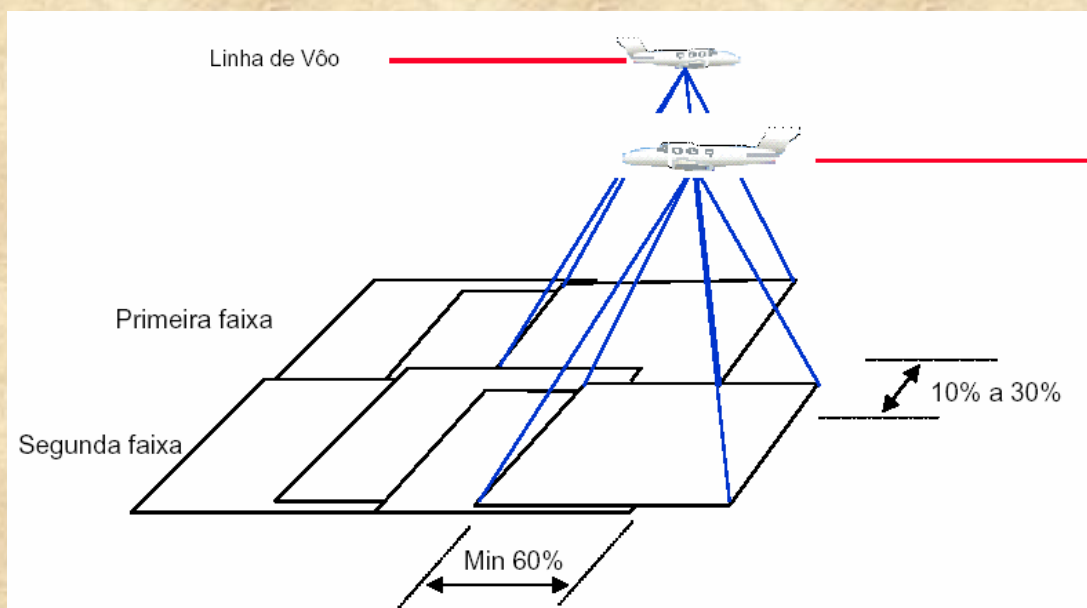
Sobreposição longitudinal e lateral

Uma das grandes funções da **Fotogrametria** é medir **coordenadas tridimensionais** (X, Y, Z , ou qualquer outro tipo de sistema de coordenadas), com precisão e acuracidade. No entanto, para que isto ocorra é necessário considerar o princípio da visão ocular do ser humano, no qual utiliza um sistema binocular para visualizar a profundidade dos objetos no espaço físico com precisão.

Os olhos humanos estão separados por um comprimento de aproximadamente 10 cm, permitindo desta forma que os olhos da esquerda e direita enviem mensagens dos objetos, armazenados pela retina, para o cérebro.

Sendo assim, o mesmo realiza um processo de fusão das informações e das imagens armazenadas na retina e faz com que o ser humano visualize tridimensionalmente o objeto em questão.

Da mesma forma funciona o **princípio da Fotogrametria** para tomada de fotografias ou imagens verticais, ou seja, as fotografias são obtidas ao longo de uma faixa de vôo com uma série de fotos. Cada fotografia possui uma sobreposição em relação à sua fotografia sucessiva tanto no sentido longitudinal como no sentido lateral.

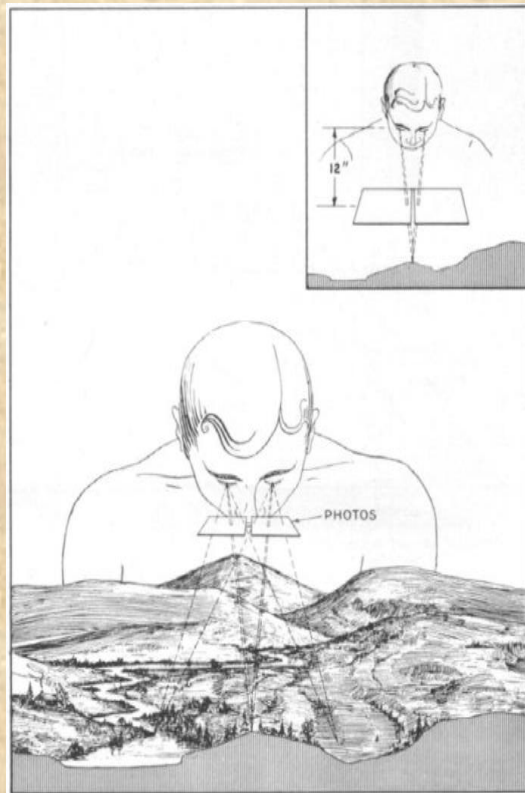


a



b

(A) Sobreposição longitudinal e lateral; (B) Fotografias sobrepostas longitudinalmente



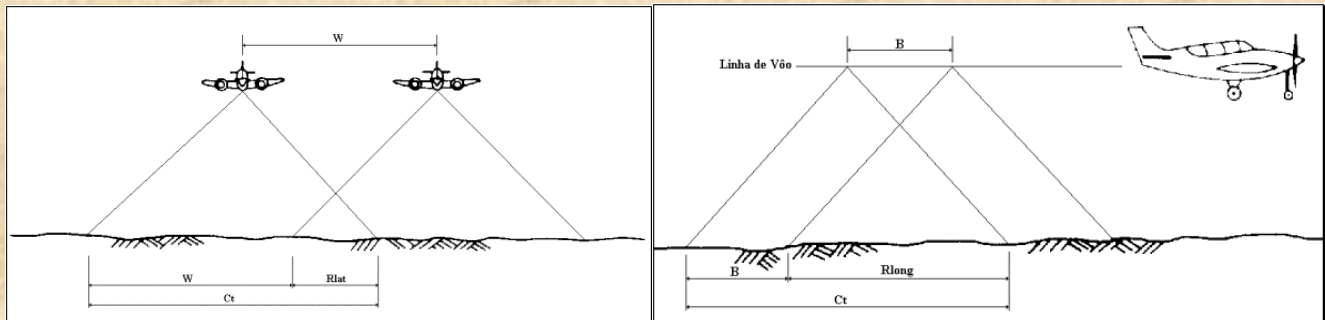
Simulação de visão estereoscópica com pares de fotografias aéreas

Com isto as fotografias são recobertas longitudinalmente e lateralmente para que seja possível a reconstrução tridimensional dos objetos ou medir suas posições **planimétrica** e **altimétrica**. Deste princípio tem-se a denominação de recobrimento estereoscópico entre as fotografias. O par de fotografias é chamado de par estereoscópico ou estéreo par de fotografias.

Usualmente, o recobrimento longitudinal, entre duas fotografias, é entre 60% e 65%, para fotografias tomadas com câmeras métricas

convencionais e de 80% para fotografias tomadas com câmeras digitais não métricas de pequeno formato. A razão para tais números deve-se ao fato da rigidez geométrica em função da distância focal e tamanho do quadro focal das câmeras.

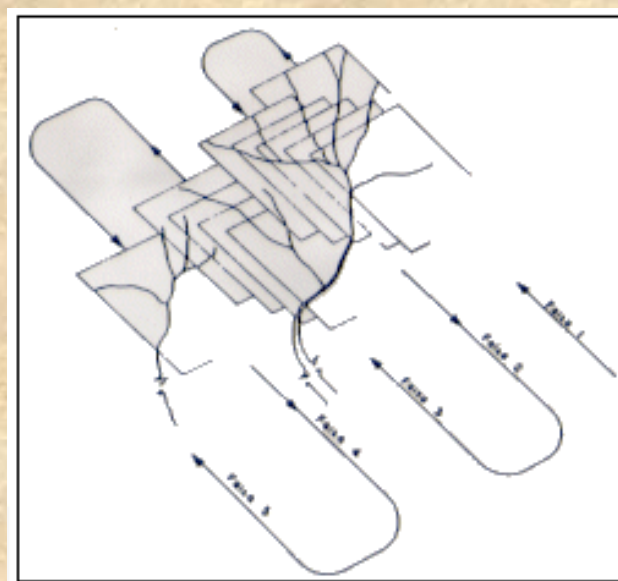
No caso do recobrimento lateral entre as fotografias das faixas adjacentes deve-se considerar um recobrimento entre 30% e 40%.



Superposição lateral

Superposição longitudinal

Uma seqüência de fotografias tomadas ao longo de várias faixas de vôo é denominada de bloco de fotos.



Perspectiva de um Bloco de Fotos

Paralaxe de Imagens

A visualização em 3D de um par de fotografias consecutivas, só é possível, através do efeito que a paralaxe de pontos, que aparecem em ambas as fotos, provoca.

A **paralaxe absoluta de um ponto**, portanto, é o deslocamento aparente que este ponto sofre, ao ser fotografado consecutivamente, de posições distintas no espaço.

A **paralaxe absoluta** (px_i) pontos na fotografia, é dada por:

$$px_i = x_i - x_i'$$

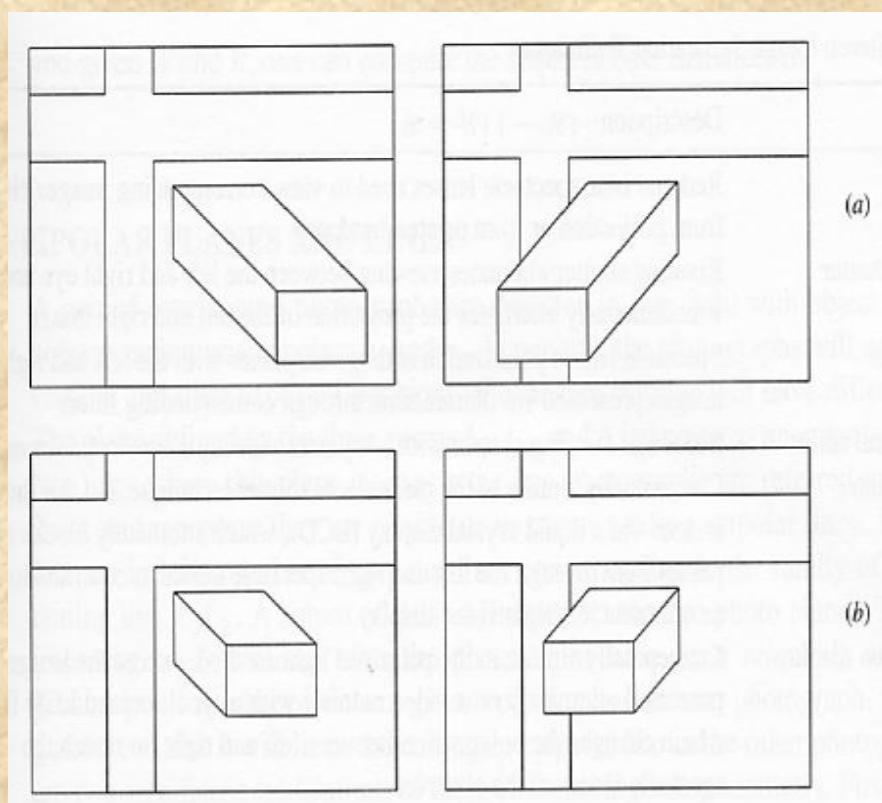
onde

x_i é o deslocamento sobre o eixo x, medido na foto esquerda.

x_i' é o deslocamento sobre o eixo x, medido na foto direita.

A paralaxe em **x** existirá sempre que houver variações de altitude na superfície fotografada.

A paralaxe em **y**, pelo contrário, não deve existir, pois, prejudica sensivelmente a visão estereoscópica. Para evitar a paralaxe em **x**, é necessário que as retas que unem os pontos homólogos de um par estereoscópico, sejam paralelas à linha de vôo. Desta forma, as ordenadas de pontos medidas na foto esquerda, devem ser iguais às ordenadas de seus homólogos, na foto direita.



Paralaxe de pontos conjugados varia com a altitude

A **diferença de paralaxe** (Δpx) entre dois pontos quaisquer (**a** e **b**) será dada por:

$$\Delta px = px_a - px_b$$

A **diferença de nível** (Δh) entre estes mesmos dois pontos, para terrenos relativamente planos, é obtida em função da diferença de paralaxe, através da relação:

$$\Delta h = \frac{H \times \Delta px}{b}$$

A **diferença de nível** (Δh) entre os dois pontos já referidos anteriormente, levando em consideração que o terreno é acidentado, também é obtida em função da diferença de paralaxe, através da relação:

$$\Delta h = \frac{H \times \Delta px}{(b + \Delta px)}$$

Estas leituras de paralaxe, podem ser obtidas através de uso do escalímetro ou de um instrumento denominado *barra de paralaxe*. A precisão das leituras deve ser de 1/100mm.

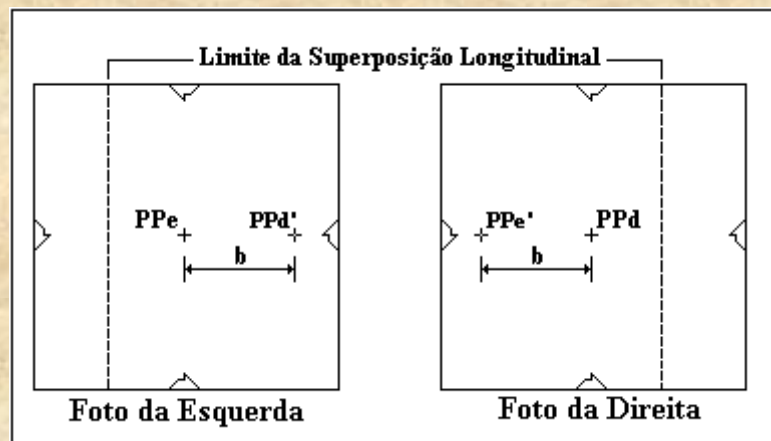
A **foto base** (b) (figura abaixo), pode, ao invés de ser medida com escalímetro, ser determinada pela seguinte relação:

$$b = l \times (1 - R_{long})$$

onde

l é o lado da fotografia, em mm.

R_{long} é o recobrimento longitudinal da fotografia, *não* expresso em %.



A **altitude** (h_p) de um ponto, em função da paralaxe, pode ser obtida através da relação:

$$h_p = H_0 - \frac{B \times f}{px_p}$$

A **altitude** de um ponto (h_B) pode ainda ser determinada, conhecendo-se a altitude de um segundo ponto (h_A), através da relação:

$$h_B = h_A \pm \left(\frac{H_0 h_A}{px_b} \right) \times \Delta px$$

pois

$$\Delta h = h_B - h_A$$

Escala vertical de uma fotografia

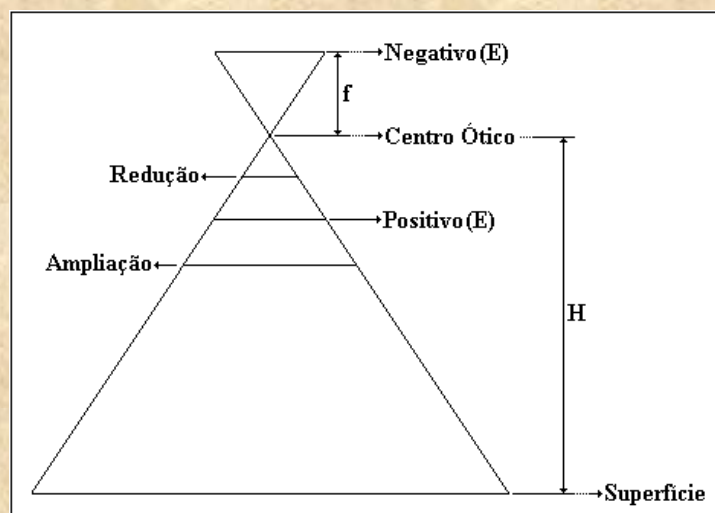
A escala é a razão de uma distância medida em um mapa e sua correspondente no terreno. A escala de um mapa é geralmente expressa como uma fração, com numerador e denominador na mesma unidade. Isto mostra que uma escala não possui dimensão e quanto maior seu denominador menor é a escala.

A escala (E) de um conjunto de fotografias aéreas verticais, normalmente, é determinada antes do vôo, durante o planejamento do mesmo, e é o resultado da relação entre a distância focal da câmera utilizada e a altura de vôo:

$$E = \frac{f}{H}$$

A escala (E) de uma fotografia pode ainda ser determinada pelas relações entre: a) uma distância no terreno e sua correspondente na fotografia; b) a base aérea e a base fotográfica.

$$E = \frac{d_{AB}}{D_{AB}} \quad \text{OU} \quad E = \frac{b}{B}$$



Já, a **escala de pontos** (E_p) distintos de uma única fotografia, é função da altitude do ponto (h_p), que é dada pela relação:

$$E_p = \frac{f}{H_0 - h_p}$$

Portanto, a **escala média** (E_m) de um conjunto de pontos de uma mesma foto, é função da média das altitudes (h_m) destes pontos, que é dada por:

$$E_m = \frac{f}{H_0 - h_m}$$

Coordenadas Terrestres e Aero base

As coordenadas de um ponto **P** qualquer no terreno, podem ser obtidas em função das coordenadas fotográficas deste mesmo ponto, medidas sobre uma fotografia. A relação entre o sistema de coordenadas terrestre e o fotográfico é a seguinte:

$$X_p = x_p(H_0 - h_p) \quad \text{ou} \quad X_p = x_p \times E \quad \text{ou ainda} \quad X_p = B \frac{x_p}{px_p}$$

e

$$Y_p = y_p(H_0 - h_p) \quad \text{ou} \quad Y_p = y_p \times E \quad \text{ou ainda} \quad Y_p = B \frac{y_p}{py_p}$$

A **aero base** (**B**) ou base aérea, pode ser calculada em função das coordenadas fotográficas de dois pontos, conhecendo-se a distância horizontal terrestre entre eles:

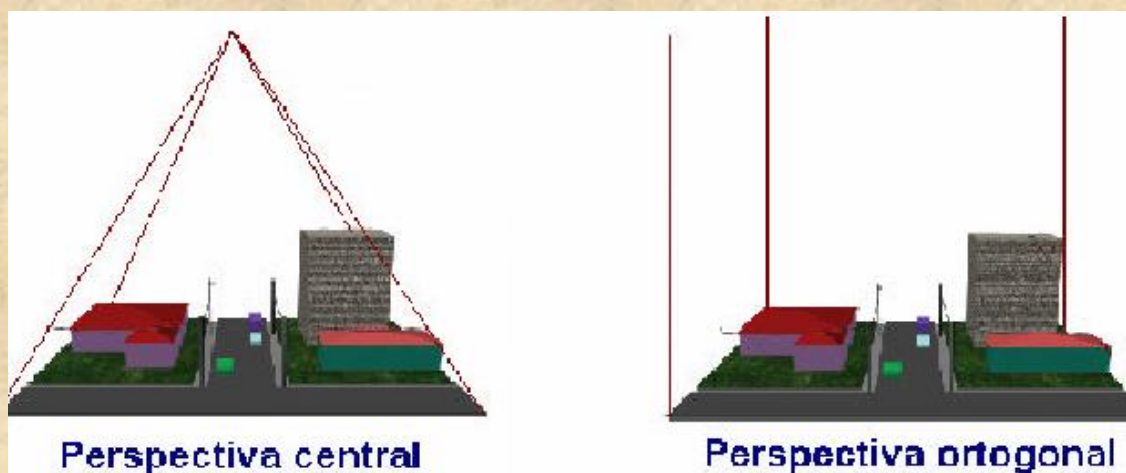
$$B = \sqrt{\frac{(D_{AB})^2}{\left[\frac{x_b}{px_b} - \frac{x_a}{px_a}\right]^2 + \left[\frac{y_b}{py_b} - \frac{y_a}{py_a}\right]^2}}$$

onde

$$D_{AB} = \sqrt{(X_B - X_A)^2 + (Y_B - Y_A)^2}$$

Um mapa é uma projeção ortográfica da superfície física do terreno. Entretanto, todos os pontos em um mapa estão em suas posições horizontais verdadeiras relativas. Conseqüentemente, a escala

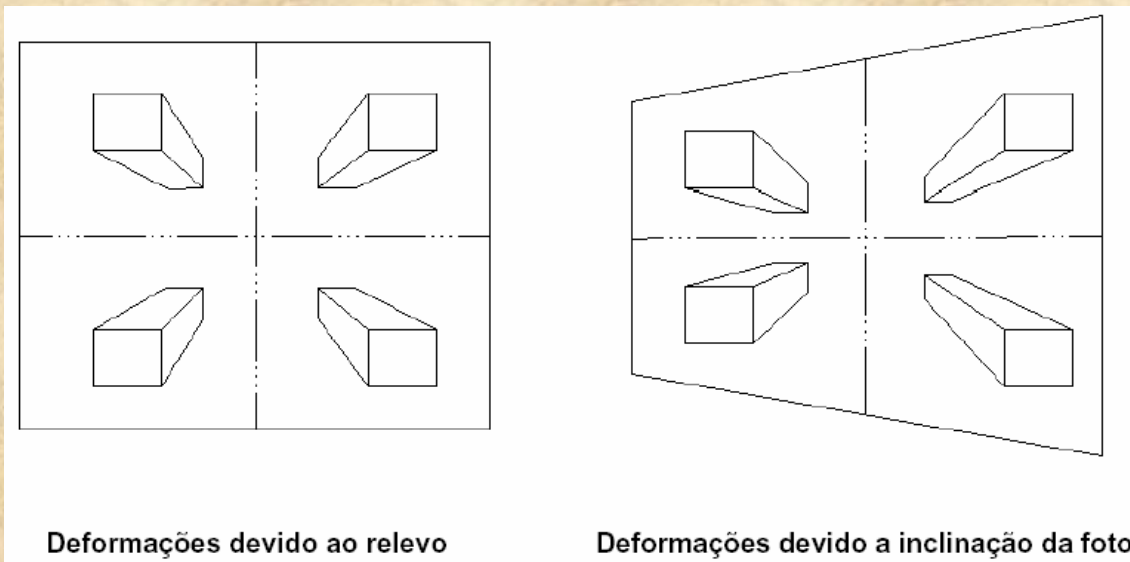
de um mapa é uniforme ponto a ponto. Uma visualização da ilustração abaixo permite dizer que, uma fotografia não apresenta escala constante e sua projeção é perspectiva central, no qual as distorções são maiores radialmente em relação ao centro da imagem.



Fotografia aérea e efeito perspectivo

Sendo assim, quanto mais próximo o objeto está da estação de exposição da câmera maior o mesmo se apresentará em relação aos objetos mais afastados. Esta aparente movimentação dos objetos é denominada de deslocamento do relevo, sendo outra característica da projeção perspectiva.

Na ilustração abaixo, as linhas tracejadas representam a imagem de um reticulado em um terreno plano, para uma foto perfeitamente vertical. As linhas cheias representam o mesmo reticulado, mas em uma foto inclinada, em direção à parte superior da ilustração. A escala da foto só é a mesma, em ambas as fotos, no eixo de inclinação. A escala da foto inclinada é maior na parte inferior e menor na parte superior da ilustração.



Variação de escala em uma fotografia inclinada

Distorção Radial

Todos os pontos de uma fotografia aérea vertical, com exceção do ponto central desta, estão sujeitos a vários tipos de deformações ou distorções. Entre estas distorções, destaca-se como relevante o deslocamento que a imagem de um ponto da fotografia sofre, devido à sua altitude. Este deslocamento é denominado **distorção radial** (d) do ponto, é ocorre sempre no sentido radial, ou seja, do centro da foto para fora. A distorção radial de um ponto pode ser determinada pela seguinte relação:

$$d = \frac{r \times h_p}{H_0} = r - r'$$

onde

r é a distância do ponto principal à imagem do *topo* de P.

r' é a distância do ponto principal à imagem da *base* de P.

Aplicações e produtos da Fotogrametria

Mapas topográficos modernos são invariavelmente produzidos por Fotogrametria. Somente após o início da Fotogrametria foi possível a compilação de mapas topográficos em pequenas escalas. Quase todas as fases de projetos, locação, construção e gerenciamento são conduzidos, se não totalmente, em grande parte, pelos fotogrametristas.

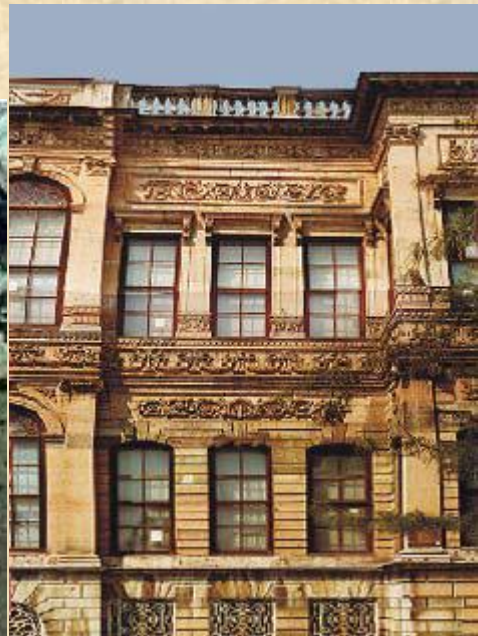
As principais aplicações da Fotogrametria são:

- Locação de estradas;
- Arqueologia;
- Automação de processos industriais;
- Mapeamento;
- Geração de Modelos Digitais de Terreno e Elevação;
- Planejamento de superfícies;
- Realidade aumentada;
- Identificação de objetos presentes na superfície física;
- Robótica;
- Etc.

Os produtos gerados pela Fotogrametria são:



a



b



c

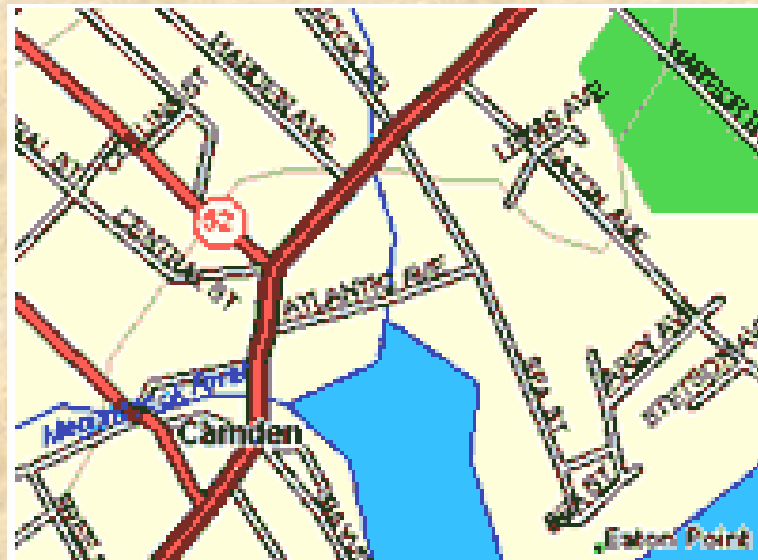
(a) Fotografia aérea; (b) Fotografia terrestre; (c) Fotografia espacial



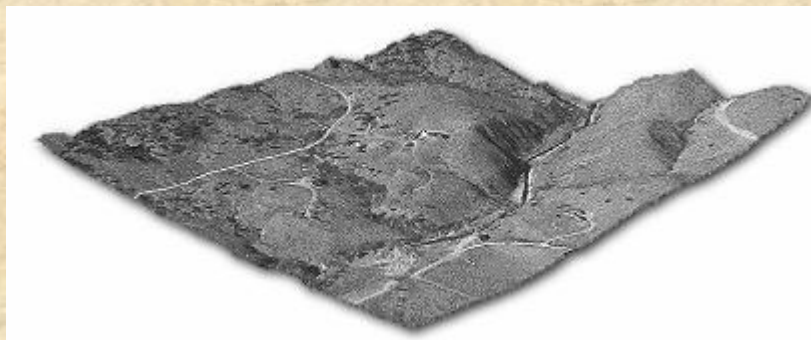
Mosaico



Ortofotocarta



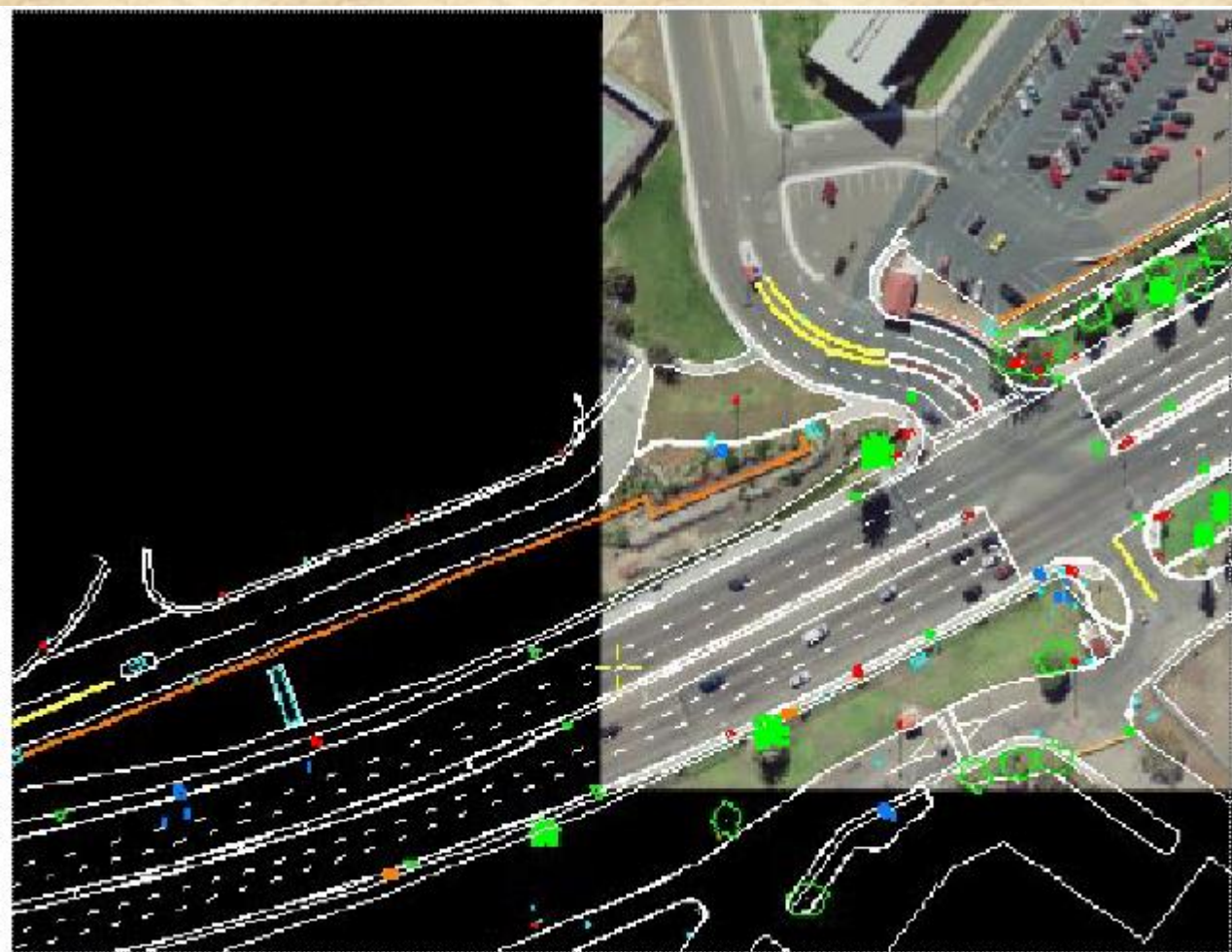
Mapas topográficos



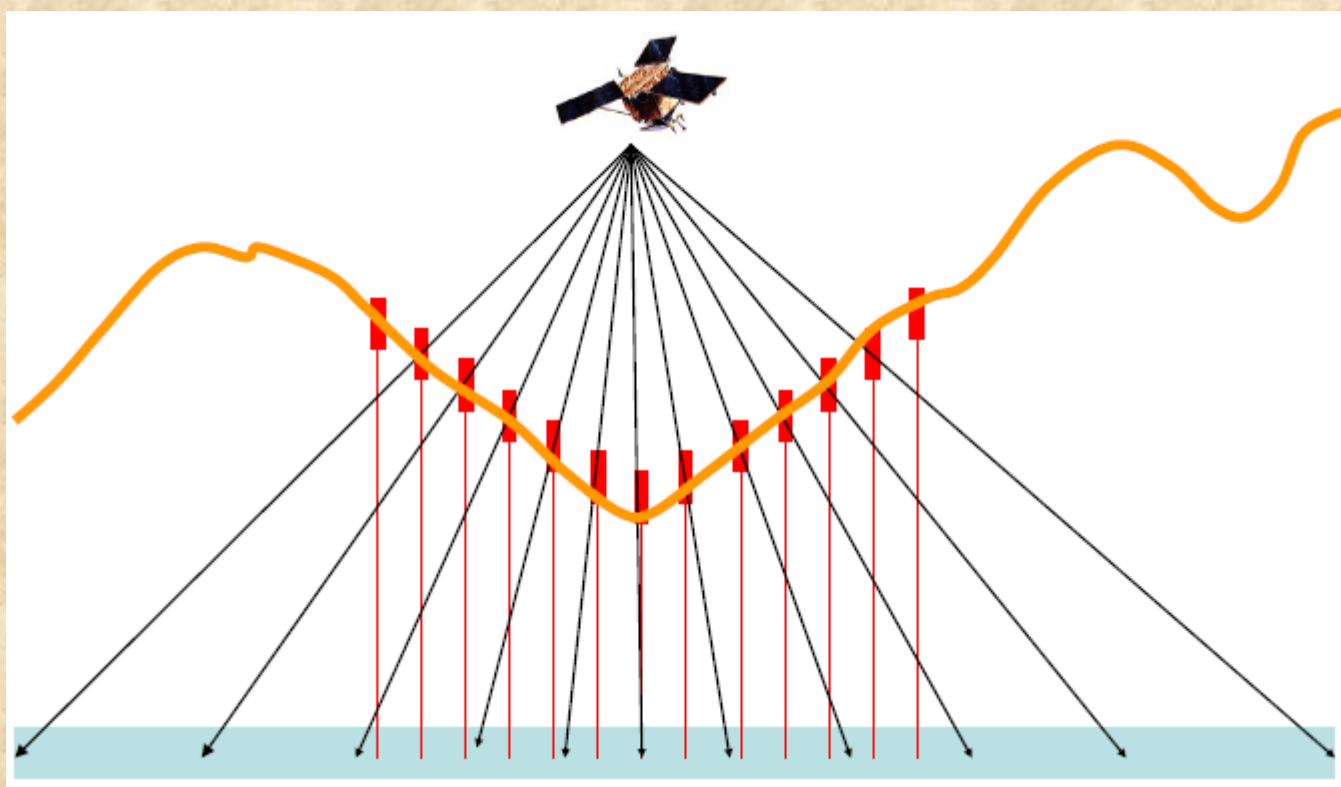
Modelo Digital do Terreno



Equipamento de Restituição Fotogramétrica



Resultado da Restituição Fotogramétrica e imagem ortorretificada em fundo



Correção da Distorção da Câmera e do relevo



Fotografia aérea ortorretificada (com efeito visível na margem)



Utilização da Fotogrametria na Restauração de Prédios Históricos