**Fotogrametria Digital**

A base de todos os processos fotogramétricos para produção de informação geográfica é composta por duas grandes fases que são o voo fotográfico e a georreferenciação. Só apos estas operações é que se pode passar à restituição do pormenor.

**Definição do Projeto**

**Voo Fotográfico – Plano de Voo**

Escala da fotografia: ponderar dois aspetos opostos

Ground sampling distance – GSD.

O GSD corresponde à distância entre os centros de dois pixels adjacentes no terreno.  
A relação entre o GSD e a escala da imagem é

1 GSD = px métrico x mf

Sobreposições:

Os voos fotogramétricos são planeados de modo a que se venha a obter uma cobertura da região a levantar constituída por fotografias verticais na qual as fotografias sucessivas apresentem uma zona de sobreposição. A sobreposição mede-se em percentagem da dimensão da fotografia, na direção de voo (sobreposição longitudinal l) e na direção perpendicular à do voo (sobreposição lateral q)

Objetivo:

* Sobreposição longitudinal: permite a visualização tridimensional e a restituição estereoscópica na zona comum a duas fotografias.
* Sobreposição lateral: margem de segurança para evitar lacunas entre fiadas.

O relevo do terreno influencia as sobreposições. Se o terreno sobe o valor da sobreposição desce. Solução: alterar no mapa de voo um de dois parâmetros:

Sendo tecnicamente mais exequível que o avião mantenha a altura absoluta ao longo da fiada, opta-se preferencialmente pela primeira solução.

Caso o relevo varie ao longo da direção da fiada de modo crítico – na fase de planeamento realizar uma partição de fiadas. O avião realizará primeiro as fiadas à mesma altura e numa segunda fase as restantes fiadas a alturas diferentes.

Camaras e objetivas a utilizar

As camaras dependem da dimensão do projeto

Projetos de maior dimensão – camaras métricas aéreas digitais de grande formato de imagem

Projetos de menor dimensão (ou UAV) – camaras de medio formato e de pequeno formato.

Cartografia de media/pq escala, produção de ortoimagens de grandes zonas - Imagens satélite de alta resolução

Existem camaras com objetivas de diferentes distancias focais. Em algumas camaras existe a possibilidade de intermutar as objetivas mantendo o mesmo corpo da camara. Variando a objetiva numa mesma camara ‘e possível variar a escala da foto mantendo a altura de voo ou então variar a altura de voo mantendo a escala da foto.

Existem vários critérios para a escolha da objetiva certa, há uma tendência para usar distancias focais maiores (cone de maior abertura -> menores distorções perspetivas) quando o objeto da missão fotográfica ‘e:

- Fotointerpretação

-Produzir ortofotocartas

-Cartografar terreno com altas montanhas e vales profundos

- Cartografar cidades com prédios mt altos

A tendência ‘e para usar distancias focais menores quando o objetivo ‘e:

- A aerotriangulacao

- Reduzir custos de voo

- Realizar voos panorâmicos

- Aumentar a precisão altimétrica dos resultados (aumentando a relação base-altura)

Na maioria das camaras digitais que associam varias camaras numa só, não existe a possibilidade de alterar a constante da camara.

Traçado de voo

O traçado de voo que vai determinar a rota a seguir pelo avião, depende diretamente da forma dos limites e extensão do terreno a levantar fotogrametricamente.

- Se o terreno a levantar for uma área aproximadamente retangular, o avião devera sobrevoa-la em traçados paralelos, varrendo toda a área.

- Se a área a levantar apresentar um formato irregular, normalmente ‘e subdividido em vários retângulos

- Se a área a levantar for apenas uma faixa estreita coberta em largura por apenas uma fiada de fotografias (ex. rio, linha da costa, estrada), o voo terá de ser constituído por vários trocos retilíneos, mas de direções variáveis.

Época do voo

Depende:

- Condições climatéricas

- Cobertura vegetal

Não deve haver nuvens nem copas de arvores a cobrir o terreno

A melhor época do ano para realizar um voo fotogramétrico ‘as nossas latitudes ‘e o principio da primavera.

Para cartografia de traço e’ exigida uma altura mínima do sol de 30º, para ortofotomapas poderá ser exigida uma altura mínima superior. Para fotointerpretação, sobretudo em zonas de pouco contraste, as sombras podem ser uteis na identificação de objetos. Há situações que obrigam a voar sob um teto de nuvens para obter luminosidade homogénea. As imagens “sem sombra” assim obtidas permitem a restituição de zonas que estão permanentemente em sombra (vales, falésias).

Tipo de imagens

Imagens pancromáticas, coloridas ou de infravermelhos

As imagens pancromáticas proporcionam melhor resolução geométrica, as imagens coloridas apresentam informação radiométrica mais diferenciada.

As camaras digitais atuais são capazes de fornecer num voo imagens de todos os tipos referidos.

Avião fotogramétrico/ plataforma aérea

Avião que apresente poucas vibrações durante o voo

Pequeno porte

Considerar na escolha

Velocidade mínima

Altura máxima de voo

Alcance máximo

Autonomia de voo

Mapa do voo

Pertence ao plano de voo um esquema de navegação, ou mapa de voo, elaborado sobre uma carta topográfica da região a levantar, de escala menor do que a cobertura fotográfica pretendida. Devera conter o traçado planeado para a rota do avião ao longo de cada fiada, na mudança da fiada e por vezes no inicio e no fim do voo fotográfico. Apenas o traçado dentro da área a levantar ‘e da responsabilidade de quem pretende a cobertura. Em cada fiada podem estar assinalados os pontos de tomada de foto (todos ou apenas o primeiro, ultimo e indicação da sobreposição). No inicio de cada fiada esta ainda indicado o rumo a tomar pelo avião e a altura absoluta a garantir na entrada da fiada. Juntamente com o mapa de voo, deve ser elaborada uma folha ou ficheiro de informações adicionais de onde constem os seguintes elementos:

-Nome do projeto

- Data pretendida para a realização do voo

- Escala das fotos

- Constante da camara a utilizar

- Altura absoluta do avião

- Sobreposições longitudinal e lateral

- Tipo de imagem

Orçamento

O orçamento de um projeto fotogramétrico envolve os custos na aquisição das imagens, na georreferenciação e na restituição. As velocidades do avião estão normalmente expressas em nos.

Especificidades para voos para ortofotomapas:

O ortofotomapa final pode ser produzido a partir apenas das zonas centrais das varias fotografias aéreas as quais vão formar um mosaico fotográfico. As zonas centrais são onde as distorções radiais devidas ao relevo e ‘a altura dos objetos são menores. Normalmente ‘e adotada no plano de voo para este caso uma distancia entre eixos de fiadas A igual ‘a base aérea B

O valor da sobreposição longitudinal l, depende da dimensão do lado do quadrado central das fotografias, lq, que se pretende aproveitar para a ortofoto final. A dimensão de lq na foto multiplicada pelo modulo da escala media da foto mf:

B=lqxmf

A dimensão do quadrado central depende da distorção radial admissível na ortofoto final, delta r, que depende diretamente da variabilidade (amplitude) delta h do relevo na zona coberta pela fotografia aérea.

Analise do voo fotográfico

Qualidade controlada por eng geoespaciais

Analisar:

-Qualidade da fotografia em si (luminosidade homogénea, ausência de nuvens, sombras profundas, arrastamento nos limites de foto, contrastes, nitidez)

- Verticalidade da foto, caso se trate de um voo vertical

- Linhas de voo (eixos das fiadas)

- Sobreposições entre fotos e fiadas

- Homogeneidade da escala ao longo do bloco

Tanto a presença de nuvens como a de sombras profundas impossibilita a restituição das zonas ocultas. Nuvens -pode acontecer que a zona oculta numa vaixá já não esteja oculta na faixa seguinte. Enquanto a estereorrestituicao dessas zonas poderá em grande parte ser realizada, a ortorretificacao dessas imagens ‘e impossível pois não deve constar qualquer nuvem numa ortofoto. Quanto ‘as sombras profundas, elas impossibilitam qualquer tipo de restituição na zona oculta. Nas imagens de camaras aéreas digitais que apresentam uma resolução radiométrica muito superior ‘à do filme analógico. E’ possível restringir as sombras profundas a zonas muito menores por alteração da luminosidade e contraste.

Se a linha de voo apresentar grandes desvios em relação ao planeado, pode acontecer que haja lacunas entre fiadas ou que todo o bloco se apresente rodado em relação ao que foi planeado.

análise das sobreposições e da escala é geralmente feita por amostragem representativa das fotografias, de três em três fotografias, A mesma regra se aplica para a determinação de sobreposições longitudinais e laterais.

Finda a análise do voo é elaborado um relatório, e consoante a gravidade das falhas encontradas, poderá o voo ter que ser repetido no seu todo ou em parte

Satisfazendo o voo fotográfico as condições exigidas no planeamento, dentro das tolerâncias do RTCAP (Regulamento Técnico para as Coberturas Aerofotográficas em Portugal), está-se em posição de encomendar as imagens digitais que interessam ao projeto e passar à fase seguinte. Normalmente é elaborado um mapa índice constituído pela implantação sobre uma base cartográfica (em formato digital) de todas as fotografias do projeto enquadradas pelo centro ou pela mancha (limites), com a respetiva identificação e data de voo.

1.5. Georreferenciação

A georreferenciação constitui a segunda fase das operações preliminares da cadeia de produção cartográfica. Nesta fase é determinada a relação entre fotografia e terreno, a qual é descrita pelos parâmetros de orientação externa de cada fotografia da cobertura (X0, Y0, Z0, ómega, fi, kappa)

Essa operação pode ser realizada de um modo direto, semi-direto ou indireto. O modo direto, também denominado georreferenciação direta, exige a utilização de um instrumento GNSS-IMU a bordo do avião associado à câmara durante o voo fotográfico. O modo semi-direto apenas utiliza GNSS a bordo durante o voo fotográfico e denomina-se geralmente por aerotriangulação com GNSS. O modo indireto, normalmente denominado aerotriangulação, não exige nenhuns instrumentos a bordo para além da câmara fotográfica aérea, mas necessita do chamado apoio geodésico. O apoio geodésico é constituído por um conjunto de pontos do terreno bem visíveis na cobertura fotográfica e que vai ser utilizado para calcular os parâmetros de orientação externa das fotografias do bloco.

1.5.1 Escolha de pontos de apoio nas fotografias. Os pontos de apoio (geodésico) devem ser pontos bem identificáveis em mais do que uma fotografia. Às diferentes imagens do mesmo ponto do terreno em fotografias distintas chama-se pontos homólogos, normalmente, por causa da cobertura fotográfica ser realizada com sobreposições longitudinal e lateral, a maioria dos pontos numa fotografia tem pontos homólogos em fotografias vizinhas.

Os pontos de apoio dividem-se geralmente em

-Pontos triangulados (PT ou TP)

-Pontos fotogramétricos (PF)

1.5.1.1. Pontos Triangulados

os pontos triangulados verão as suas coordenadas objeto determinadas indiretamente por aerotriangulação

destinam-se a ser medidos nas fotos, e não no terreno

a sua escolha deve recair sobre pontos bem visíveis, mas não necessariamente acessíveis no terreno como é exigido para os PFs

duas classes: os pontos que servem para ligação entre modelos numa mesma fiada designam-se por pontos de passagem (em inglês: Passpoints); os pontos que servem de ligação entre fiadas adjacentes designam-se por pontos de ligação (em inglês: Tiepoints).

mais recentemente adoptou-se a designação de ‘tiepoints’ – TP, para todos os pontos homólogos

O mínimo teórico de pontos de apoio para orientar uma fotografia espacialmente é: três pontos não colineares. A orientação espacial de um modelo estereoscópico é também conseguida à custa de um mínimo de três pontos não colineares.

1. Combinando os critérios apresentados para a foto e para o modelo numa só solução, chegou-se à conclusão que o número mínimo de pontos de apoio, do ponto de vista técnico será de seis por modelo, o que corresponde a nove por foto

com a localização que coincide com as posições denominadas tradicionalmente como pontos de Von Gruber.

A distribuição de pontos de apoio num bloco deve ser tal, que cada ponto apoie o maior número possível de fotografias simultaneamente

As características visuais destes pontos de apoio têm de ser tais que os tornem conspícuos em todas as fotos onde aparecem,

1.5.1.2. Pontos Fotogramétricos

Utilizando a aerotriangulação para coordenar os pontos de apoio de um bloco de fotografias, só haverá necessidade de coordenar um número reduzido desses pontos diretamente no campo, os tais Pontos Fotogramétricos ou PFs. Regra geral para a escolha da localização desses pontos num bloco de forma retangular é a seguinte: localiza-se um PF duplo em cada canto do bloco, um PF de 3 em 3 modelos ao longo da primeira e da última fiada, e um PF de 3 em 3 modelos em todas as zonas de sobreposição lateral. Os PFs do interior do bloco só necessitam de ter a cota determinada (PFs altimétricos) enquanto os da periferia necessitam de ter as três coordenadas determinadas (PFs completos). Os pontos fotogramétricos podem ser pré-sinalizados, como se descreverá a seguir ou naturais

1.5.2. Sinalização de PFs no terreno A sinalização aqui referida realiza-se antes do voo pelo que é também conhecida por pré-sinalização.

O objetivo dos PFs pré-sinalizados é proporcionar medições mais precisas de coordenadas foto, pelo facto de ser inequivocamente identificável na foto o ponto cujas coordenadas terreno foram determinadas pelo topógrafo.

A operação de pré-sinalização deve ter em conta os seguintes aspetos:

- Localização das marcas

- Forma das marcas

- Dimensão das marcas

- Material de marcação –

cor utilizada

1.5.2.1 Localização

A localização das marcas deverá

planeada com base no mapa de voo

satisfazer os requisitos para a distribuição geral

Cada marca deverá localizar-se em terreno plano horizontal

boa visibilidade para cima

longe de objetos altos

Locais privilegiados para as marcas de PFs pré-sinalizados são as faixas de socorro de autoestradas, passeios largos, parques de estacionamento, clareiras em florestas e prados

1.5.2.2 Forma As marcas são constituídas por:

- Uma figura geométrica regular cujo centro geométrico constitui o ponto fotogramétrico propriamente dito

- De uma a quatro faixas retangulares irradiando da marca central cujo objetivo é facilitar a localização das marcas na fotografia aérea

Apenas o espaço disponível no terreno para a sinalização de cada marca é determinante para a utilização de uma ou de mais faixas identificadoras.

marca central = o círculo proporciona leituras mais precisas

1.5.2.3 Dimensões

As dimensões das marcas dependem da escala da cobertura fotográfica que será realizada.

d igual ao diâmetro do círculo central

d igual a um múltiplo ímpar da dimensão do pixel no terreno (normalmente de 3 a 5 vezes o GSD).

1.5.2.4 Material

As marcas são geralmente materializadas com tinta ou telas plásticas fixas ao chão.

Do ponto de vista fotogramétrico, será desejável que as marcas sejam o mais permanentes possível,

cor a utilizar

contraste com o meio envolvente seja grande

Para imagens pancromáticas, cores claras como o branco e o amarelo são muito utilizadas,

Para imagens RGB e IV usa-se frequentemente a cor vermelha que é bem captada pelos sensores.

1.5.3 Escolha de PFs Naturais

Caso não se pretenda ou não seja possível realizar aerotriangulação, todos os pontos de apoio referidos acima (de passagem e de ligação) têm de ser fotogramétricos

as zonas onde se devem situar os PFs

“zonagem” digital

com apoio do computador, são elaboradas fichas provisórias com ampliações das zonas de localização preferencial do ponto de apoio obtidas a partir da imagem digital

Enquanto a escolha da localização dos PFs pré-sinalizados se faz com base no mapa de voo

as zonas de localização dos pontos fotogramétricos naturais a determinar no terreno devem obedecer a vários critérios

Bons pontos fotogramétricos são, em geral, pormenores no solo ou junto ao solo que apresentem uma forma geometricamente bem definida

como por exemplo:

-Cruzamento de eixos de vias

-Intersecção de eixos de valas de irrigação

-Esquinas de propriedades

-Objetos isolados

Exemplos de maus pontos fotogramétricos consistem em pormenores por vezes bem definidos na foto, mas pouco definidos no terreno ou vice-versa ou ainda de carácter não permanente:

-Esquinas arredondadas

-Cruzamentos com ângulos pequenos

-Pontos altos, árvores

-Cantos de florestas

-Pontos em aterros ou desaterros

-Pontos em margens de cursos de água.

1.5.4 Determinação de PFs no terreno

A escolha definitiva dos PFs é feita pelo topógrafo no campo após verificação das condições in loco.

é gravado definitivamente numa ficha definitiva

um desenho (ou ampliação de fotografia aérea digital) que esclareça a localização do ponto

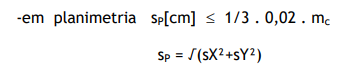
a descrição textual do mesmo

a sua identificação inequívoca, as coordenadas M, P e cota determinadas bem como o método de coordenação utilizado para se poder avaliar da precisão das coordenadas obtidas.

Atualmente, sempre que é possível, utilizam-se métodos de coordenação por GNSS.

A precisão exigida para a determinação das coordenadas dos PFs, depende da escala a que se destina a restituição

Um dos indicadores numéricos para a precisão exigida baseia-se no erro de graficíssimo

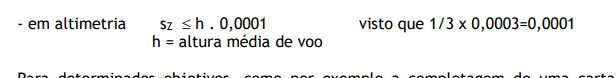
incerteza devida ao graficíssimo (0.2 mm) e uma propagação igual do erro pelas três fases principais da cadeia de produção cartográfica (determinação de PFs no campo - determinação de pontos de apoio por aerotriangulação - restituição) exige-se que o erro cometido na determinação das coordenadas dos pontos no terreno (na primeira fase) seja: 

onde mc é o módulo da escala da carta a restituir sendo 0.02 [cm] o erro de graficismo.

Outro indicador baseia-se na resolução geométrica da foto, o critério tolera uma incerteza em planimetria menor que o valor da resolução geométrica da imagem no terreno (o GSD em imagens digitais



Para a altimetria, toma-se como valor limite da incerteza da cota determinada por estereorrestituição o chamado erro de cota que se considera igual a 0.3 ‰ da altura média de voo.



2. Aerotriangulação

conjunto de operações matemáticas e estatísticas que permite obter a orientação espacial da cobertura fotográfica de um objeto usando o mínimo de apoio geodésico (Pfs) possível. A partir de coordenadas objeto de alguns dos pontos que aparecem fotografados e considerando quer a geometria da fotografia individual, quer a do modelo estereoscópico e a da configuração geral da cobertura é possível determinar quer as orientações externas de cada foto, quer as orientações absolutas de cada modelo estereoscópico, ou seja, os conjuntos de parâmetros que relacionam analiticamente as imagens com o objeto. O método permite igualmente determinar coordenadas de pontos objeto com grande precisão.

A aerotriangulação pode ser realizada:

- Em faixa

- Em bloco.

A aerotriangulação em faixa pode ser feita

- Por ligação instrumental de modelos (só em restituidores analógicos)

- Por modelos independentes (em restituidores mecânicos e analíticos)

A aerotriangulação em bloco pode, por sua vez, ser executada:

- Por modelos independentes (em restituidores mecânicos com computador, analíticos e estações digitais)

- Por feixes perspetivos (em restituidores analíticos e estações digitais)

2.1. Aerotriangulação em faixa

2.1.1. Por ligação instrumental de modelos

uma só fiada

Começava-se por orientar o primeiro modelo parcial, resolvendo analogicamente a orientação relativa. Se este modelo possuísse apoio geodésico completo (pelo menos 3 pfs), poder-se-ia orientar absolutamente com recurso a esses Pfs. O passo que se seguia era anexar uma terceira fotografia, orientando-a relativamente a uma das do modelo anterior sem alterar a orientação espacial deste

Procedendo sucessivamente deste modo instrumental, adicionando fotos aos dois modelos anteriores por orientação relativa via anexação, poder-se-ia orientar absolutamente todos os modelos parciais da fiada, à custa apenas dos três Pfs do primeiro modelo

devido à configuração geometricamente desfavorável da fiada, existe uma propagação complexa dos erros de orientação relativa e de transmissão de escala,

Para minorar ou controlar a influência desses erros, utilizavam-se mais Pfs ao longo da fiada (no meio e no fim da fiada ou, caso ela seja longa, de três em três modelos) os quais “prendem” o modelo total ao terreno.

2.1.2. Por modelos independentes

A ligação entre modelos é feita analiticamente,

Cada par estereoscópico é primeiramente orientado relativamente, criando-se o modelo parcial. Cada modelo parcial tem associado um sistema de coordenadas cartesiano tridimensional de origem arbitrária que constitui o sistema de coordenadas modelo.

a são medidas em cada modelo parcial, as coordenadas modelo de:

- Pfs que eventualmente apareçam no modelo,

- Pontos de apoio à restituição dos quais pretendemos obter as coordenadas terreno (6 pontos de passagem),

- Centros de projeção das duas fotos que formam o modelo (mais modernamente, estes são calculados e não medidos diretamente).

Após esta operação ter sido realizada para todos os modelos da faixa, realiza-se em seguida a ligação analítica dos modelos da fiada.

transformação espacial de semelhança

1.calcula-se os 7 parâmetros de transformação entre o último modelo e o penúltimo, com base em quatro pontos comuns (3 pontos não colineares eram suficientes). Geralmente usam-se 3 pontos na zona de sobreposição entre modelos e o quarto é o centro de projeção da foto comum aos dois modelos.

2.transforma-se com esses parâmetros, as coordenadas modelo dos restantes pontos medidos no último modelo, em coordenadas modelo do modelo anterior. Os sistemas de coordenadas modelo são independentes uns dos outros. Cada modelo foi medido no seu próprio sistema.

3.calcula-se os 7 parâmetros de transformação entre o modelo seguinte e os dois que já estão num só sistema de coordenadas pelos pontos comuns existentes entre o modelos atual e os anteriores

5.repetem-se os passos 1 e 2 para cada par de modelos até chegar ao primeiro

A orientação absoluta do modelo total obtido pelas operações anteriores, é efetuada por uma única transformação espacial de semelhança entre o sistema de coordenadas modelo e o sistema de coordenadas objeto (terreno), cujos parâmetros são calculados a partir dos pontos fotogramétricos que se encontram espalhados pela faixa. Após o cálculo desses 7 parâmetros, os parâmetros da orientação absoluta (escala, 3 translações da origem, 3 rotações dos eixos)

2.1.3. Compensação polinomial de uma faixa

a aerotriangulação em faixa

dá lugar a uma acumulação de erros sistemáticos e acidentais que se propaga de uns modelos parciais para os outros de um modo complexo.

O modelo matemático utilizado na compensação de faixa é o polinómio de vários

graus para cada coordenada X, Y e Z.

Procede-se então do seguinte modo:

-Após a medição ou o cálculo das coordenadas dos pontos de apoio através da transformação espacial de semelhança, obtemos coordenadas supostamente geodésicas, eivadas de erros.

-através Dos Pfs e dos pontos de controlo espalhados pela faixa, conseguimos determinar as diferenças entre as coordenadas calculadas e as reais nesses pontos.

-Usando agora um modelo polinomial que descreva a propagação dos erros em cada coordenada ao longo da faixa, determinam-se primeiro os seus coeficientes, formulando tantas equações com os Pfs quantas as necessárias

-De posse dos coeficientes das equações do modelo polinomial, pode-se então calcular as correções às coordenadas obtidas por aerotriangulação para obter coordenadas terreno compensadas.

2.1.4 Compensação em bloco de várias faixas

Quando as coberturas fotográficas para trabalhos fotogramétricos têm uma extensão bidimensional homogénea, como é normalmente o caso, especialmente quando o seu objetivo final é a cartografia de uma região, essa cobertura constitui um bloco formado por várias fiadas que têm uma determinada sobreposição entre si, no mínimo 20 %.

e a compensação dos resultados obtidos por aerotriangulação tenha como critério regente a seguinte premissa: um mesmo ponto (do objeto/terreno) tem que ter as mesmas coordenadas objeto, qualquer que seja a faixa em que se encontra a sua imagem. Uma compensação deste tipo no contexto da aerotriangulação em faixa, designa-se por compensação em bloco de várias faixas

depois de todas as faixas estarem aerotrianguladas, compensa-se a primeira pelo processo polinomial. Determinam-se as coordenadas objeto de todos os pontos de ligação entre faixas. Estes pontos e os Pfs que eventualmente existirem na segunda faixa, vão ser usados para calcular os coeficientes do polinómio a aplicar para compensação da segunda faixa

E assim sucessivamente até à última faixa. Por fim, para compensar possíveis rotações do bloco, é feito ainda um ajustamento às coordenadas por meio de uma transformação plana de Helmert

2.2. Aerotriangulação em bloco

Generalizemos a premissa de que cada ponto objeto só pode ter umas coordenadas objeto qualquer que seja a faixa onde aparecem as suas imagens, aos modelos e às fotografias, ou seja qualquer que seja o modelo e qualquer que seja a fotografia onde apareçam as suas imagens, cada ponto objeto tem apenas umas coordenadas objeto (X, Y, Z). Assim, deixa de haver necessidade de formar faixas, bastando apenas adquirir as coordenadas dos pontos de apoio em todos os modelos ou fotos do bloco e transformá-las, por um modelo matemático que traduza a condição referida, em coordenadas objeto compensadas. A este processo chama-se aerotriangulação em bloco, ou apenas triangulação em bloco.

A triangulação em bloco pode então ser realizada:

- Por modelos independentes

- Por feixes perspetivos

2.2.1. Por modelos independentes

Os dados primários para a aerotriangulação em bloco por modelos independentes são as coordenadas modelo de todos os pontos de apoio, de todos os Pfs e eventualmente de todos os centros de projeção do bloco.

coordenadas terreno de todos os Pfs, medidas em campo

modelo matemático subjacente a este algoritmo é o da transformação espacial de semelhança em cadeia entre modelos e objeto.

São necessários valores iniciais para todas as incógnitas (parâmetros de orientação absoluta de cada modelo e coordenadas objeto/terreno de cada ponto novo)

• cada ponto observado/medido dá origem a três equações de observação

O sistema de equações normais tem tantas equações quantas as incógnitas

• estes valores são compensados pelo algoritmo de aerotriangulação, de modo a que as discordâncias entre pontos homólogos nos vários modelos sejam mínimas e as discordâncias nos pontos fotogramétricos sejam também mínimas (MMQ).

Os resultados da aerotriangulação em bloco por modelos independentes são: -para cada modelo, 7 parâmetros de orientação absoluta (escala, Ω, Φ, Κ, Xt, Yt, Zt)

-para cada ponto i de concatenação entre modelos, incluindo o centro de projecção, 3 coordenadas objeto (X,Y,Z)i.

2.2.2. Por feixes perspetivos

Na triangulação por feixes perspetivos parte-se da informação na foto para se chegar a informação no objeto, sem haver a necessidade de operações intermédias como no método descrito anteriormente

A denominação de feixes perspetivos revela que neste tipo de triangulação se consideram os vários raios perspetivos com origem num ponto objeto genérico, que passam por vários centros de projecção e intersectam vários planos imagem nos pontos imagem respectivos em cada uma das fotos onde esse ponto objeto aparece fotografado.

Os dados primários para este método de aerotriangulação são as coordenadas foto de todos os pontos de apoio e de todos os Pfs em todas as fotos onde aparecem (no mínimo duas). Se a triangulação tiver como objectivo final a coordenação de pontos para outras operações posteriores, as coordenadas foto dos pontos a coordenar também têm de constituir dados de entrada

É necessário também conhecer as coordenadas objeto de todos os Pfs do bloco.

• São necessários os parâmetros de orientação interna das câmaras que obtiveram as fotografias do bloco

• O modelo matemático utlizado no algoritmo de aerotriangulação é o da projecção central, traduzida pelas equações de colinearidade entre ponto imagem, centro de projecção e ponto objeto (ver capítulo das EC).

• São necessários valores iniciais para todas as incógnitas (parâmetros de orientação externa de todas as fotos do bloco e coordenadas objeto de todos os pontos medidos)

Os resultados deste método são : -para cada foto do bloco, 6 parâmetros de orientação externa (Xo,Yo, Zo, ω, ϕ, κ) -para cada ponto medido, 3 coordenadas objeto.

-parâmetros de calibração (parâmetros adicionais) Estes valores são determinados iterativamente de modo a que as discordâncias nos pontos homólogos das várias fotografias e nos Pfs sejam mínimas (MMQ).

2.2.2.1. Parâmetros adicionais. Auto-calibração

a precisão obtida nas coordenadas objeto finais ficava aquém da esperada, e que dependia muito da quantidade de Pfs.

Chegou-se à conclusão de que as habituais correcções de deformação da película, distorção da objectiva, refracção e curvatura terrestre aplicadas às coordenadas medidas no aparelho restituidor, não eram suficientes

parâmetros adicionais

algoritmo que considera os parâmetros adicionais passou a denominar-se triangulação em bloco por feixes perspetivos com parâmetros adicionais ou auto-calibração

A consideração dos parâmetros adicionais implica a formação de mais um conjunto de equações de observação e aumenta também o número de incógnitas. Mas a precisão conseguida nas coordenadas objeto finais torna este método no mais preciso.

A precisão referida depende, no entanto, de:

-quantidade de fotos em que o mesmo ponto é medido

-precisão dos dados primários

-distribuição dos Pfs no bloco

-quantidade de Pfs.

Como desvantagens da triangulação por feixes perspetivos poder-se-á referir o seguinte:

é um problema não linear que exige o fornecimento de valores aproximados para todas as incógnitas

é o método de aerotriangulação que mais cálculos envolve

para a aquisição dos dados primários são necessários restituidores analíticos, digitais ou outros aparelhos medidores de coordenadas foto

não se pode separar o cálculo da planimetria do da altimetria. É sempre um problema tridimensional.

Como vantagens do método pode-se referir que:

• é o método mais preciso da aerotriangulação.

• é fácil de aperfeiçoar o modelo matemático, por exemplo, aumentando o número de parâmetros adicionais.

• é fácil introduzir no cálculo observações adicionais, por exemplo, distâncias entre pontos, ângulos, condições de paralelismo, de perpendicularidade, etc.

• é possível triangular blocos não convencionais, onde nem sequer há pares estereoscópicos (restituição múltipla).

• é possível triangular fotografias não métricas, usando parâmetros adicionais para a orientação interna e é possível triangular blocos obtidos com várias câmaras fotográficas.

• é possível determinar coordenadas de pontos em projectos de alta precisão (monitorização)

• os elementos da orientação externa , que saem do cálculo, podem ser introduzidos directamente nas estações digitais quer para restituição, quer para rectificação de fotografias

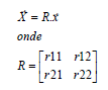
3.Fundamentos matemáticos da Fotogrametria

3.1.Rotação no plano Sejam dadas as coordenadas de um ponto P num sistema de coordenadas plano x,y. Pretende-se saber como obter as coordenadas desse ponto P noutro sistema de coordenadas X,Y que tem a mesma origem que o primeiro sistema mas está rodado em relação a ele de um determinado ângulo α.



Matriz de Rotação e as suas Propriedades

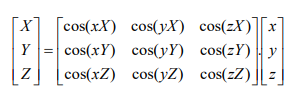
Reduzindo a forma de escrever o sistema anterior temos:



R é a matriz de rotação entre os dois sistemas de coordenadas planos e os seus elementos são os co-senos dos ângulos existentes entre os eixos de coordenadas do 1º e 2º sistema. Ou os produtos internos dos vetores unitários dos dois sistemas pela mesma ordem. A matriz de rotação é quadrada, mas não é simétrica. Além disso a matriz de rotação tem que ser ortonormada. Isto significa que o produto interno de cada coluna por si própria é igual a 1 (normalidade) e o produto interno de colunas diferentes é igual a 0 (ortogonalidade). Deste modo a matriz de rotação tem apenas 1 grau de liberdade que é no caso o valor de α. Sendo o determinante de uma matriz de rotação igual a 1, a inversa da matriz é igual à sua transposta pelo que so precisamos de calcular os elementos da matriz de rotação entre dois sistemas uma vez para podermos facilmente transformar coordenadas num sentido e no sentido inverso.

Rotação no Espaço

Para exprimir coordenadas de um ponto P (X, Y, Z) num determinado sistema em função das coordenadas x, y e z do mesmo ponto noutro sistema, tendo ambos os sistemas a mesma origem e os eixos Xx Yy e Zz estão rodados segundo ângulos em relação aos eixos do 1º sistema. Analogamente temos a rotação dada por:

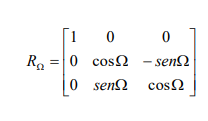
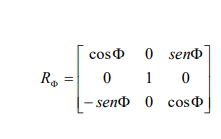
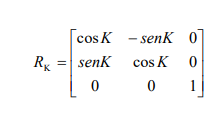


Deste modo e estando inserido no espaço 3D, a matriz de rotação irá ter 3 graus de liberdade em função dos 3 parâmetros independentes.

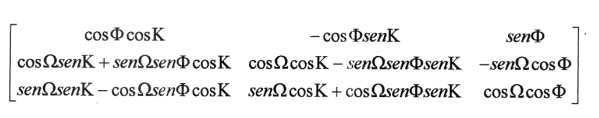
3.4.Matriz de rotação RΩΦΚ

Na Fotogrametria consideram-se normalmente como parâmetros independentes da matriz de rotação espacial os ângulos omega, fi e kapa em torno dos eixos coordenados (omega = rotação em torno do eixo x, fi em torno do eixo y, kapa em torno do eixo z).

Os ângulos consideram-se positivos quando crescem no sentido anti-horário, observando o sistema de coordenadas do lado positivo de cada eixo de rotação em direcção à origem do sistema.

A multiplicação sucessiva das três matrizes de rotação resulta na matriz RΩΦΚ que tem a seguinte forma, se a sequência for a indicada (omega após fi após kapa):



A multiplicação de matrizes não é comutativa pelo que há que ter atenção à ordem pela qual é executada a rotação. O resultado é uma matriz de rotação com todas as respectivas propriedades.

3.5. Matriz de rotação com funções algébricas

A matriz de rotação espacial pode ser parametrizada de várias formas. A utilização dos 3 ângulos de Euler (ωφκ) é uma dessas formas. Outra passa pela definição de um angulo θ de rotação em torno de um só eixo espacial definido pelos seus 3 cosenos directores αβλ. Uma terceira parametrização da matriz de rotação espacial surge no contexto da teoria dos quaterniões. Com esta parametrização, desaparecem da matriz as funções trigonométricas passando a ser substituídas por funções algébricas que não apresentam valores críticos para a singularidade da matriz. Esta é a grande vantagem desta forma de apresentar a matriz de rotação espacial. Um quaternião é composto por um escalar e um vector em 3D com três componentes complexas:

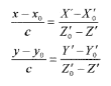


Qualquer ponto P de coordenadas X, Y, Z pode ser descrito como um quaternião z

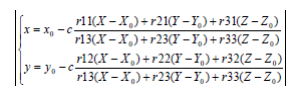
Nesta matriz, como é evidente, não há funções trigonométricas nem ângulos a definir a rotação. Apenas funções algébricas de números reais. A matriz em si depende de quatro parâmetros, q0,q1,q2,q3 que não são independentes. A condição de m ser igual a 1 tem, por isso, de ser incluída no cálculo dos parâmetros de rotação quando é utilizada esta forma da matriz de rotação espacial. Embora a interpretação geométrica dos parâmetros não seja possível, uma comparação de elementos com os da matriz de rotação RΩΦK permite-nos relacionar os qi com os parâmetros de orientação externa da fotografia

4. Equações de colinearidade e sua linearização - Relação entre coordenadas foto e coordenadas objeto.

Na altura em que a fotografia é obtida, existia colinearidade entre o centro de projeção O, o ponto no Terreno (Ponto Objeto) P e a sua imagem P’ na Fotografia. Essa colinearidade advém de assumirmos que a luza se propaga em linha reta e que no momento da captação da imagem houve um raio luminoso retilíneo que partiu do ponto no terreno P, passando pelo centro ótico da lente da camara fotográfica (assume-se como centro de projeção O) e atingiu a película ou sensor digital sobre um suporte que se assume como plano foto no ponto P’, gerando a imagem fotográfica do Ponto P.

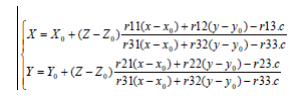
Considerando um sistema de coordenadas tridimensional X’,Y’,Z’, paralelo ao sistema de coordenadas foto e com a mesma origem do sistema de coordenadas objeto, encontrando-se rodado espacialmente em relação a este último, poderemos exprimir a condição de colinearidade referida do seguinte modo: 

A relação entre coordenadas foto e coordenadas objeto é dada por:



Estão as equações de colinearidade entre o centro de projeção (Xo, Yo, Zo), o ponto imagem (x, y, 0) e o ponto objeto (X, Y, Z).

As equações de colinearidade podem também ser expressas em ordem às coordenadas objeto,



Comparação entre as soluções de equações de colinearidade

No 1º conjunto de equações indica que a cada ponto objeto de coordenadas (X, Y, Z) corresponde nesta projeção (central ou perspetiva central), um e só um ponto imagem de coordenadas (x, y, 0) O

2º conjunto de quações por outro lado, mostra-nos que as coordenadas objeto X, Y de um ponto cuja imagem é (x, y, 0) são dependentes da coordenada altimétrica Z objeto do próprio ponto, sendo esta indeterminada pelo sistema de equações.

Por esta razão, para determinarmos as coordenadas objeto X, Y e Z de um ponto necessitamos mais do que uma fotografia onde apareça esse mesmo ponto.

Linearização das Equações de Colinearidade. Determinação dos Parâmetros As equações de colinearidade não são lineares. Para determinar os seus parâmetros quando não conhecidos, há que:

• Obter redundância de observações (medir coordenadas foto de pontos)

• Formular um sistema de equações de observação

• Estimar os parâmetros pelo método de mínimos quadrados

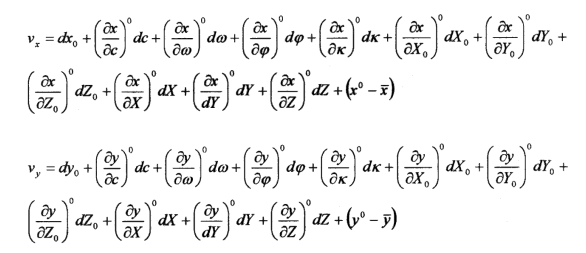
Numa fase inicial é necessário determinar valores aproximados dos parâmetros e depois linearizar as equações. Os parâmetros em causa são:

• c , xo , yo , ɯ, ϕ, κ, Xo, Yo, Zo

Exprimindo as equações de colinearidade originais (coord foto em função objeto) de forma simplificada em que Nx representa o numerador da eq X e Ny da eq Y e D como denominador igual nas duas.



Cada ponto medido numa foto dará origem a 2 equações de observação para cada fotografia onde aparece. Este conjunto de equações dizem-se linearizadas das equações de colinearidade. Uma vez composto as equações de observação para todos os pontos medidos em todas as fotos, obtemos um sistema de equações de observação cujas incógnitas serão as correções aos valores aproximados ou seja:



Com estes valores corrigidos, formulam-se novas equações de observação e assim sucessivamente até se obterem valores não significativos de correções aos parâmetros.

4.3 Aplicações das equações linearizadas

4.3.1. Determinação da orientação externa de uma foto (intersecção inversa espacial)

Esta operação pode ser efectuada a partir de, no mínimo, 3 Pfs cujas imagens apareçam numa fotografia.

Formam-se as equações de observação vx e vy para cada um dos pontos (após terem sido medidas as respectivas coordenadas foto) e resolve-se o sistema assim obtido de 6 equações a 6 incógnitas, sendo estas as correcções aos parâmetros da orientação externa da foto, ou seja, dXo, dYo, dZo, dω,dϕ,dκ.

Os valores iniciais aproximados destes parâmetros, necessários para calcular as derivadas parciais podem ser obtidos do plano de voo (ou do plano de missão fotogramétrica) ou calculados a partir dos PFs.

4.3.2. Determinação das orientações externa e interna de uma foto

Caso a orientação interna da foto também não seja conhecida, o problema pode ser resolvido com 5 Pfs, aumentando o sistema descrito na alínea anterior de mais três incógnitas (dc,dxo,dyo) e de mais 4 equações (10 eq a 9 incog.).

4.3.3. Determinação das orientações externas de um par de fotografias Fotogrametria Digital

Este método consiste em determinar simultaneamente os parâmetros de orientação externa de um par de fotografias (6 parâmetros por foto) e os respectivos parâmetros de orientação interna, a partir de pontos fotogramétricos e de pontos novos, dos quais não se conhecem as coordenadas terreno e que são medidos apenas nas duas fotografias.

As incógnitas deste problema são 12 parâmetros de orientação externa e de zero até 6 parâmetros de orientação interna consoante:

1. a(s) câmara(s) utilizada(s) estejam calibradas -> 0 parâmetros
2. 2- tenha sido usada a mesma câmara para as duas fotos-> 3 parâmetros: (c,x0,y0)
3. 3- tenham sido usadas duas câmaras diferentes -> 6 parâmetros: (c,x0,y0)1 e (c,x0,y0)2.

Cada PF dá origem a duas equações de observação para cada foto onde aparece, o mesmo acontecendo a cada ponto novo. Os pontos novos são sempre medidos nas duas fotos. A diferença que existe entre as equações dos Pfs e as dos pontos novos é que estas últimas incluem mais três incógnitas por ponto novo, dX, dY e dZ, aumentando o número total de incógnitas do problema. Portanto, é necessário ponderar o número de pontos necessário, Pfs e novos, para conseguir determinar o total de parâmetros que se pretende. Apresentam-se a seguir algumas soluções:

Caso 1: orientação interna conhecida

Solução mínima: 3 Pfs medidos nas duas fotos: 3 x 2 + 3 x 2 = 12 eq. de observação 6 parâmetros de or. externa a determinar: 12 incógnitas

Caso 2: três parâmetros de orientação interna a determinar

Solução mínima: 3 Pfs medidos nas duas fotos: 3 x 2 + 3 x 2

3 Pontos novos nas duas fotos: 3 x 2 + 3 x 2 = 24 eq. de observação

6 parâmetros de or. externa por foto: 6 x 2

3 parâmetros de or. interna a determinar : 3

3 coord. objeto por ponto novo : 3 x 3 = 24 incógnitas

Caso 3: seis parâmetros de orientação Interna a determinar

3 Pfs medidos nas duas fotos: 3 x 2 + 3 x 2

3 Pontos novos nas duas fotos: 3 x 2 + 3 x 2 = 24 eq. de observação

6 parâmetros de or. externa por foto: 6 x 2

3 parâmetros de or. interna por foto : 3 x 2

3 coord. objeto por ponto novo : 3 x 3 = 27 incógnitas

Sistema subdeterminado (insolúvel). Para se chegar a uma solução é necessário medir mais PFs ou mais pontos novos em ambas as fotos. Mais 1 PF -> 28 eq. a 27 inc. -> solúvel

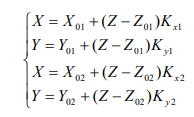
Mais 3 Pn -> 36 eq. a 36 inc. -> solúvel não controlável

Deve-se evitar escolher os pontos todos no mesmo plano objeto, pois isso poderá causar singularidades na matriz das equações normais.

4.3.4. Determinação das coordenadas objeto de um ponto novo. Intersecção directa espacial.

Este método consiste em determinar as coordenadas objeto X,Y,Z de um ponto cujas coordenadas foto são medidas em duas fotos de um par, (x1,y1),(x2,y2), sendo conhecidos os parâmetros de orientação interna e externa das duas fotos.

Em primeira aproximação, as coordenadas objeto podem ser calculadas a partir das seguintes equações, deduzidas a partir das equações de colinearidade expressas em ordem às coordenadas objeto:



Normalmente obtém-se dois valores diferentes, tomando-se a média aritmética como valor para Y.

Os valores assim calculados para X,Y e Z entram apenas como valores iniciais para uma determinação mais rigorosa por meio de uma compensação pelo método dos mínimos quadrados

5. Transformação espacial de semelhança - Relação entre coordenadas modelo e coordenadas terreno.

A transformação espacial de semelhança visa determinar qual a relação Existente entre as coordenadas (X, Y e Z) e as coordenadas do modelo (xm, ym, zm) de um mesmo ponto P. Para isso são decorridas 3 etapas

1ª Etapa - Multiplicam-se as componentes de P (xm, ym, zm) pela escala existente entre os sistemas de coordenadas do modelo, m, obtendo P’ = mP

2ª Etapa – Considerando um sistema intermediário, com a sua origem a coincidir com Om (origem do sistema de coordenadas modelo) e com a mesma escala e os eixos paralelo aos do Terreno. P’ terá coordenadas (X’, Y’, Z’) que se relacionam com a translação:

Xom, Yom, Zom coordenadas Terreno Om



3ª Etapa é feita a relação da rotação espacial dos eixos entre os sistemas e«pelos 3 eixos, pela expressão dos vetores unitários de um dos sitemas em função dos vetores unitários do outro sistema.

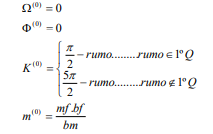
Uma vez combinadas as etapas fica determinada a relação espacial entre o modelo obtido e mundo real,

Linearização da Equação de Transformação Espacial de Semelhança

Como se viu outrora, as relações entre coordenadas modelo e coordenadas terreno não são lineares, dependem de funções trigonométricas para a sua determinação. Assim sendo é fundamental linearizar as equações por forma a desenvolver o método de ajustamento por mínimos quadrados. Neste caso e atendendo às 7 ‘movimentações necessárias a fazer, existem 7 parâmetros de orientação absoluta por determinar (1 fator de escala, 3 rotações, 3 translações).

Valores Aproximados e Linearização

Comumente denominados por a priori, são calculados a partir de pontos fotogramétricos dos quais são conhecidas as coordenadas modelo e tereno. Nas fotografias aéreas, podemos tomar como valores aproximados



Sendo mf o modulo da escala da foto e bf a base fotográfica e bm essa base medida no modelo

Os valores iniciais para as coordenadas da origem do sistema de coordenadas modelo podem-se obter a partir de um ponto fotogramétrico. Em alternativa a estes valores conhecidos a priori, existem métodos de calcular os valores aproximados dos parâmetros a partir dos pontos fotogramétricos

O passo seguinte na linearização é calcular coordenadas terreno aproximadas a partir das coordenadas modelo de que dispomos, aplicando os valores iniciais aproximados dos parâmetros às equações originais da T.E.S. Às coordenadas assim obtidas chamaremos coordenadas pseudo-terreno e designá-las-emos por xp,yp,zp.

5.2.2. Equação linearizada

Feito isto, ficaremos nas condições que nos permitem linearizar o problema, ou seja, as coordenadas terreno são pouco diferentes das coordenadas pseudo-terreno. As diferenças que existem entre os dois conjuntos de coordenadas são:

pequenas rotações:

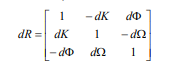
Ω = dΩ, Φ = dΦ, K = dK

Pequena correcção de escala (escala aproximadamente igual): m = 1+dm

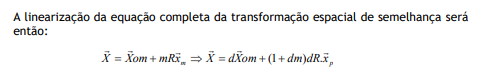
pequenas translações:

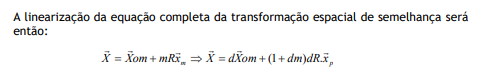


Considerando que os ângulos de rotação são muito pequenos, teremos que: sen dΩ = dΩ cos dΩ = 1 dΩ.dΩ → 0 e analogamente para dΦ e dK, pelo que a matriz de rotação RΩΦΚ com estes pequenos ângulos virá muito simplificada



A linearização do produto mR da T.E.S. nas condições atrás referidas, m =1+dm e R = dR , virá então:





Enquanto a equação da esquerda traduz a relação entre coordenadas terreno e coordenadas modelo, a da direita estabelece a relação entre coordenadas terreno e coordenadas pseudo-terreno, já definidas atrás.

Tes pode depois ser usado para determinar coords absolutas do modelo ou determinação de coords de um ponto novo

Condição de Complanaridade –

Relação entre coordenadas foto e modelo

A relação entre coordenadas foto e modelo é relevante no contexto da orientação relativa analítica. A determinação analítica dos 5 parâmetros de orientação relativa de um par estereoscópico baseia-se na condicao de complanaridade dos raios homólogos, ou seja, dois raios projetivos em cada uma das fotos.

Para que estes raios homólogos se intersectarem no espaço, as suas retas e a base O1, O2 têm que se situar num mesmo plano, ou seja, têm que ser complanares. Caso esta condição seja satisfeita, cada par das três retas define o plano epipolar. Como a cada ponto do modelo corresponde um par de raios homólogos, deduz-se que para todos os pontos do modelo tem de existir complanaridade entre os seus raios homólogos e a base. Esta condição geométrica para que se forme um modelo (estereoscópico) pode ser expressa por equações em que entrem os parâmetros da orientação relativa das duas fotos. O plano epipolar de cada ponto modelo intersecta os planos das duas fotografias sobre uma recta denominada recta epipolar. A condição de complanaridade dos raios homólogos verifica-se também em fotografias convergentes de um mesmo objeto (por exemplo na restituição múltipla) e está na base de muitos operadores para determinação automática de pontos homólogos em várias fotografias de orientação relativa conhecida. Os parâmetros omega1 e omega2 que representam as rotações das fotos em torno do eixo do xx, não são, neste caso, independentes. Portanto pode-se considerar um deles igual a zero e determinar o outro, ficando por determinar os 5 graus de liberdade.

Etapas de Cálculo: 1) Estipulam-se valores iniciais aproximados para

2)Para 5 pares de Pts homólogos cujas coordenada foto se medem em ambas fotos, calculam coordenadas nos modelos iniciais, introduzindo só valores das matrizes de Rot,1 e 2.

3) Formulam-se as equações de erro desses 5 pares de pontos homólogos

4) Configura se o sistema em v = AX-l

5) Corrigem-se os parâmetros aproximados, processo iterado até as correções não terem diferenças significativas.

Coordenadas Homogéneas

Qualquer ponto de um espaço 3D se pode descrever em termos de um vetor de coordenadas homogéneas. Este contém quatro elementos reais, representando o último o fator de escala homogéneo.

A representação em coordenadas homogéneas é muito utilizada em programas de visualização de objectos 3D definidos por um conjunto de pontos. O factor de escala homogéneo pode ser interpretado como um factor de zoom aplicado ao conjunto de pontos. As coordenadas cartesianas de cada ponto do objeto mantêm-se inalteradas, mas aplicando vários factores de zoom, elas vão-se alterando e o ponto aparece noutras posições

Transformação Linear Directa

Com a Transformação Linear Directa (DLT) consegue-se determinar a orientação interna e externa de uma fotografia através de equações lineares aplicadas a pontos fotogramétricos, eliminando a necessidade de determinar valores iniciais. É muito útil em situações em que a orientação interna da câmara não é conhecida ou não é estável (caso de imagens de câmaras desconhecidas, ou das imagens de câmaras de vídeo). A relação entre coordenadas objeto (X,Y,Z) e coordenadas foto (x,y) é a seguinte:

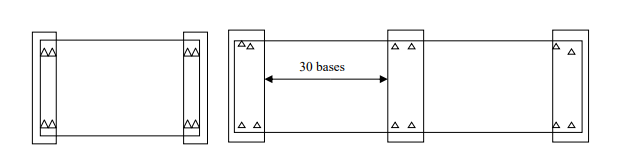
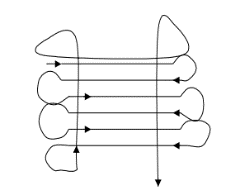
Para determinar os 11 parâmetros da DLT são necessários no mínimo 6 PFs na fotografia (cada PF origina duas equações), o que na prática nem sempre é fácil ter disponível.

Para além da desvantagem do elevado número de PFs necessário por fotografia para a determinação dos parâmetros da DLT, estes não podem estar todos situados num só plano no espaço objeto, e além disso há que evitar configurações em que o denominador das equações seja quase nulo, o que provoca singularidades no sistema

**Georreferenciação semidirecta: Aerotriangulação com apoio GNSS**

* Desenvolvido de forma a minimizar custos
* Surge com o aparecimento da técnica de posicionamento cinemático por GPS
* Centros de projeção coordenados no sistema de coordenadas objeto podem desempenhar o papel de PFs espaciais onde as coordenadas terreno são conhecidas.
* As rotações entrariam no programa de aerotriangulação com valores aproximados (omega e fi iguais a zero e kapa em função do rumo de voo) e seriam por fim determinadas pelo próprio ajustamento.
* Não haveria teoricamente necessidade de determinar PFs no campo, o que era o objetivo inicial.
* Pelo facto de o GNSS ter um referencial próprio que nem sempre é o mesmo referencial em que se pretendem as coordenadas objeto, há frequentemente necessidade de transformar as coordenadas entre sistemas referenciais.

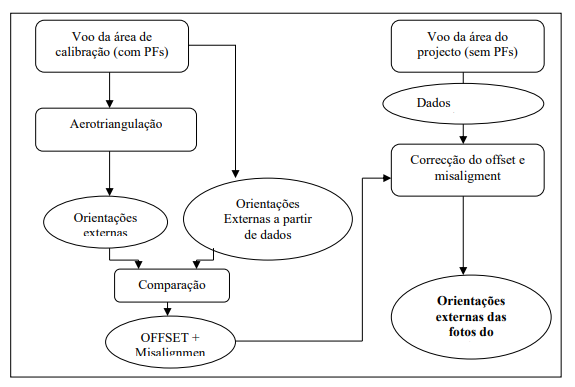
Aerotriangulação com apoio GNSS



**Georreferenciação direta: Voo fotográfico com apoio GNSS/IMU**

* Combina as técnicas de posicionamento inercial e de posicionamento por GNSS.
* O Inertial Measuring System é constituído por:
  + três acelerómetros que detetam acelerações lineares
  + três giroscópios que detetam acelerações (ou velocidades) angulares
  + três eixos perpendiculares de um corpo a que estão ligados
  + O sistema baseia-se nas leis de movimento de Newton e na de conservação do momento angular.
* Se o sistema estiver solidário com a câmara métrica que obtém a cobertura fotográfica de uma região durante um voo, o IMU fornece em cada momento do voo as acelerações sofridas a partir de uma posição inicial, o que permite calcular valores de posição X,Y,Z e de atitude ω, ϕ, κ do corpo nesse momento, relativas a um momento inicial.
* O IMU é muito preciso momentaneamente, mas a sua deriva é muito grande ao longo do tempo
* O GNSS é mais estável no tempo, mas a receção do sinal dos satélites é por vezes interrompida, tendo o sistema que ser reinicializado quando recupera o sinal
* A integração dos dois sistemas permite que:
  + O IMU seja reinicializado constantemente, à taxa de receção do GNSS, com os valores de posição fornecidos por este, o que reduz significativamente a deriva dos resultados;
  + Caso o GNSS falhe, durante a sua ausência existem os dados posicionais do IMU para as fotos realizadas nesse intervalo de tempo. Além disso, quando se recupera o sinal dos satélites, o sistema é reinicializado com os últimos dados do IMU.
* Teoricamente, um voo fotográfico realizado com GNSS/IMU:
  + dispensa pontos fotogramétricos
  + dispensa a etapa da aerotriangulação, (o sistema fornece Xo, Yo, Zo do centro de projeção e ω, ϕ, κ da câmara em cada momento)
* A determinação da orientação externa das fotografias sem aerotriangulação usando dados GNSS/IMU denomina-se georreferenciação direta.
* Os sistemas GNSS/IMU para fotogrametria devem ser regularmente calibrados

Calibração GNSS/IMU



* Os voos devem ter a mesma escala M
* A área de calibração deve ter cobertura por PFs semelhante à existente em blocos aerotriangulados sem apoio GNSS.
* O voo de calibração inclui duas fiadas voadas em sentidos opostos.
* Voa-se depois o bloco completo à mesma escala M. Nesta área não há necessidade de existirem mais PFs.

**Aerotriangulação automática (ATA)**

* Aquisição automática de pontos homólogos através da utilização de software de processamento digital de imagem.
  + Pontos de passagem (entre fotos da mesma fiada)
  + Pontos de ligação (entre fotos de fiadas adjacentes)
* Fases do processamento (por PDI):
  + Simplificação da imagem
  + Localização de pontos conspícuos (pontos de interesse)
  + Correspondência de pontos de interesse em duas ou mais fotos
  + Refinamento ao nível do sub-pixel
  + Transformação de coordenadas pixel para coordenadas foto
  + Medição das coordenadas foto dos PFs
  + Adição de um ficheiro com as coordenadas terreno dos PFs
  + Cálculo da aerotriangulação por feixes perspetivos.

As rotinas de ATA podem detetar pontos homólogos em zonas prioritárias das fotos (zonas de Von Gruber) ou indiferenciadamente em toda a área da foto

**Operadores aplicados na ATA**

* Interest Operator   
  Deteta automaticamente e sem informação adicional, pontos conspícuos numa imagem que sejam passíveis de ser identificados em outra imagem do mesmo objeto. Privilegia zonas em que haja uma variação abrupta de valores de cinzento (arestas) ou que apresentem uma certa regularidade geométrica, mas não radiométrica.
* Correspondência de áreas (área based matching ou template matching)  
  Apos aplicação de um interest operator a duas imagens de um par obtém-se uma lista de pontos conspícuos nas duas imagens cuja correspondência tem ainda de ser averiguada. Essa correspondência pode ser geralmente testada por operadores de correspondência ou correlação de áreas.
* Least squares matching  
  Correspondência por mínimos quadrados (LSM). Pode ser aplicado após uma correspondência por áreas. Aplica correções devido as imagens terem diferentes escalas, uma pequena translação (em x e y) e um fator de contraste e de luminosidade. O objetivo é minimizar os quadrados das diferenças entre os valores de cinzento das duas matrizes.
* Correspondência por características (feature based matching)   
  No caso em que as duas imagens de um par de fotografias aéreas cobrem terreno de grande amplitude de cotas os métodos de correspondência por áreas não resultam. Nesse caso, os pontos são testados quanto à sua correspondência nas duas imagens por outros métodos.  
  A correspondência de características numa pirâmide das duas imagens é um método frequentemente implementado em estações digitais. A pirâmide é um conjunto de imagens com vários níveis de resolução. A correspondência de pontos de interesse é feita primeiro nas imagens de mais baixa resolução. Os pontos que se corresponderam nesse nível são transferidos para o nível imediatamente inferior. Aqui, volta a ser testada a sua correspondência, face ao aumento de informação, e são procurados novos pontos de interesse e testada a sua correspondência