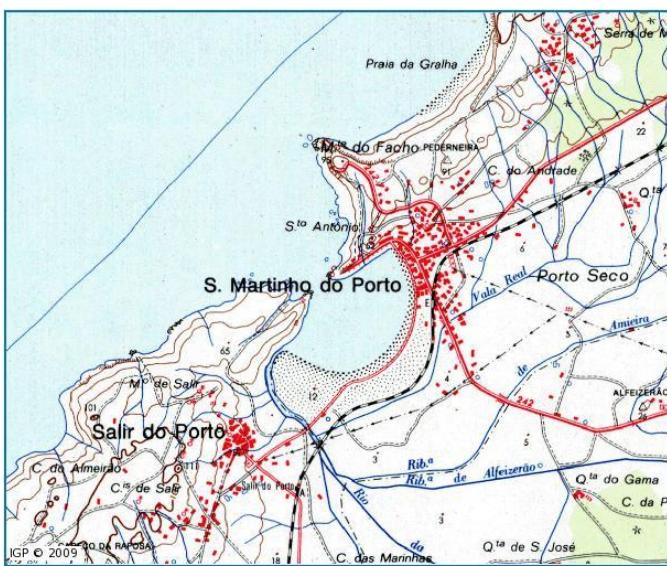
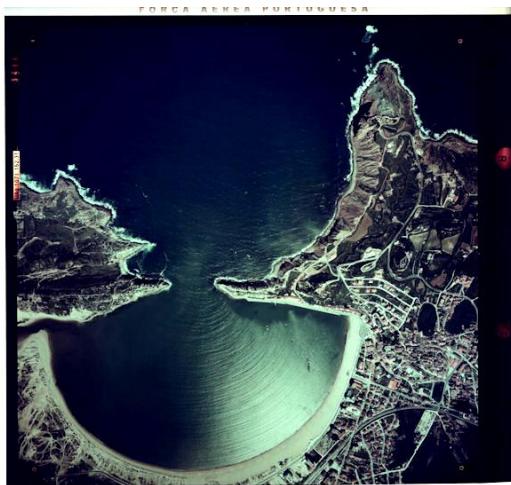


2020

PRODUÇÃO CARTOGRÁFICA



Prof. Dra Paula Redweik

DEGGE - FCUL

1 - Projecto de produção cartográfica

1.1 Passos de um projecto de produção cartográfica por fotogrametria

A Fotogrametria aérea implantou-se na Produção Cartográfica no início dos anos trinta do século XX. Exceptuando as plantas de grandes escalas de zonas de dimensões reduzidas, para as quais não seria rentável um levantamento fotogramétrico recorrendo-se ao topográfico, o levantamento fotogramétrico está actualmente na base de qualquer carta topográfica. Isto deveu-se a vários factores de carácter intrínseco, como por exemplo:

- a afinidade entre o conteúdo de uma fotografia aérea e a informação que se convencionou representar numa carta topográfica;
- a densidade de informação do terreno contida numa fotografia;
- a possibilidade de restituir diversos tipos de informação em variadas épocas.

Também factores externos levaram à adopção da Fotogrametria em detrimento de outras técnicas, os quais se foram alterando ao longo da evolução tecnológica. Por exemplo:

- a possibilidade de mecanizar o processo de produção fotogramétrica (da década de 30 à década de 70);
- a possibilidade de associar o processamento electrónico de dados e a computação gráfica à restituição fotogramétrica (da década de 70 à década de 90);
- a possibilidade de automatizar o processo de restituição, utilizando o processamento digital de imagens e modelos analíticos (a partir da década de 90).

A carta, até há poucos anos considerada como o produto final da Fotogrametria, consiste actualmente no conjunto de dados que constitui a base geográfica de qualquer sistema de informação geográfica (SIG), sobre a qual se combinam dados de natureza não geográfica quer para obtenção de novas cartas temáticas, quer para permitir análise espacial de variadas situações. Deste ponto de vista, a fotogrametria é uma das mais importantes técnicas de aquisição de dados para um SIG.

Para a produção cartográfica é utilizada primordialmente a fotogrametria aérea podendo esta ser complementada por outras técnicas, como levantamentos LIDAR, levantamentos topográficos pontuais e ainda recolha de dados não espaciais em campo. Os métodos de restituição utilizados são a estereorrestituição, dando origem a representações de traço e a cartas, e a rectificação fotográfica, dando origem a ortofotos e a ortofotomapas.

A base de todos os processos fotogramétricos para produção cartográfica, após terem sido definidos os objectivos concretos do projecto, é composta por duas grandes fases que são o voo fotográfico, incluindo todas as suas componentes desde o planeamento até à análise da cobertura fotográfica obtida, e a determinação da orientação espacial das fotografias, também denominada georreferenciação. Só após estas operações é que se pode passar à restituição do pormenor (extracção de informação das fotografias), por estereorrestituição ou por rectificação.

O esquema geral de um projecto é o seguinte:

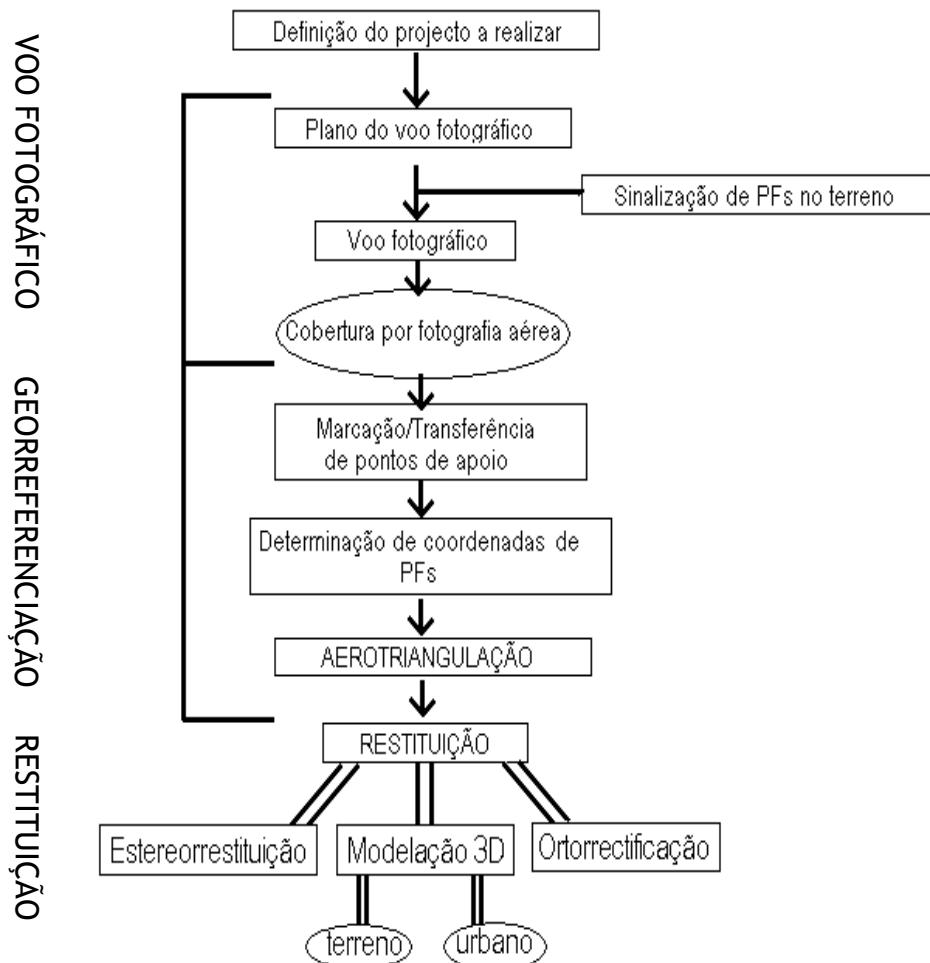


Figura 1.1.1. Passos de um projecto fotogramétrico

1.2. Produção de cartas de traço

A informação adquirida por estereorrestituição de fotografias aéreas é tridimensional (3D) e pode ser utilizada para vários objectivos. Um dos objectivos principais é a produção de cartas, que são projecções 2D da informação restituída sobre um plano XY horizontal de referência respeitando as especificações de representação cartográfica de base. Normalmente o nível de detalhe (NdD) da representação cartográfica condiciona *a priori* a informação que se deve extrair, como esta deve ser simbolizada e quais os atributos a associar a essa informação. Ou seja, quando se vai estereorrestituir já se sabe qual vai ser a escala de

representação que vai ser utilizada e só se recolhem do modelo estereoscópico os elementos representáveis cartograficamente nesse nível de detalhe. Caso não se saiba *a priori* qual a escala de representação final, dever-se-á estereorrestituir para o maior detalhe que a qualidade das imagens e da georreferenciação permitam. A informação estereorrestituída é guardada numa base de dados depois de se terem associado os respetivos valores dos atributos. A partir dessa informação, poderão posteriormente ser geradas representações cartográficas a várias escalas e eventualmente cartas temáticas, resultantes de operações na base de dados. O passo de associação de atributos aos objetos estereorrestituídos pode ser realizado simultaneamente à estereorrestituição (diretamente na base de dados) ou posteriormente a esta, importando a informação para a base de dados e completando-a. Esta operação designa-se geralmente por edição cartográfica.

A carta produzida poderá representar uma zona particular (um concelho, uma cidade, uma zona portuária, etc.), caso em que não terá obrigatoriamente que obedecer a um enquadramento nacional rigoroso, ou então fará parte da cartografia sistemática de um país, pelo que as dimensões e os limites das suas folhas estão integradas num enquadramento cartográfico geral. O enquadramento cartográfico das cartas das várias escalas é definido pela autoridade nacional de cartografia de cada país ou pela agência produtora de cartografia, caso a área a cartografar o justifique.

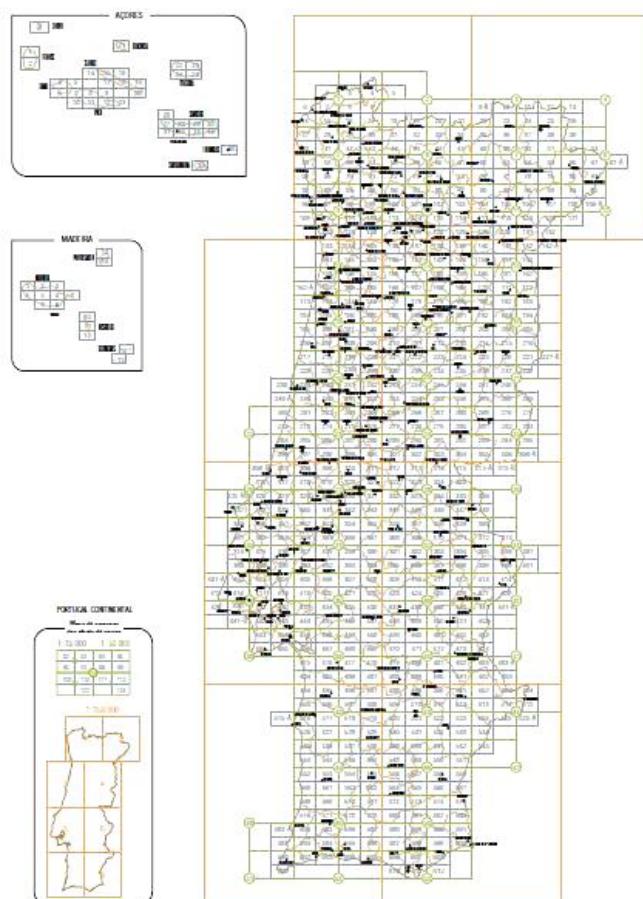


Figura 1.2.1. Cartograma oficial do IGP para escalas 1:250 000, 1:100 000, 1:50000 e 1:25 000

Em Portugal, o papel de autoridade nacional de cartografia é desempenhado pela Direção Geral do Território, que publica as normas de produção cartográfica e é

responsável pelo controlo da qualidade da cartografia oficial produzida. As atuais normas de produção cartográfica, em vigor desde Janeiro de 2020, não estipulam qualquer seccionamento obrigatório para as cartas de traço. O Centro de Informação GeoEspacial do Exército, produtor da carta 1/25000, continua a organizar a sua informação por folhas de dimensões e coordenadas dos cantos fixas.

1.3. Produção de ortofotomaps

Tanto as ortofotos como os ortofotomaps são produtos fotogramétricos obtidos por rectificação a partir de fotografias aéreas, nos quais o terreno e os objectos que sobre ele se encontram são representados pela sua radiometria em cores naturais. Tal como para as cartas, podem representar zonas isoladas ou fazer parte da cobertura sistemática do país, obedecendo os seus limites, dimensões e informação adicional a normas de produção publicadas pela autoridade nacional de cartografia. O seccionamento do país continua a existir para as ortofotos nas novas normas de produção cartográfica.

A rectificação fotográfica de fotografia aérea exige o conhecimento prévio do relevo da zona fotografada em forma de modelo digital de elevação.

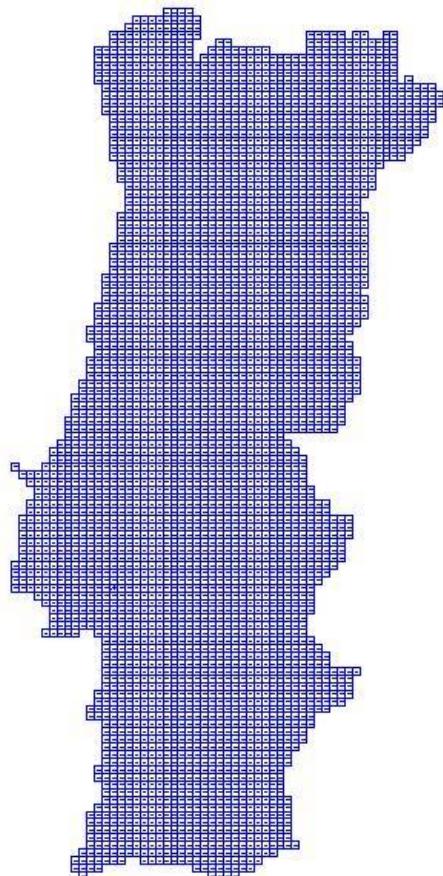


Figura 1.3.1. Seccionamento oficial do IGP para ortofotomaps à escala 1:10000

1.4. Produção de modelos de elevação

A geração de modelos digitais de elevação surgiu como um subproduto da estereorrestituição utilizado para obter curvas de nível para as cartas de traço de modo indireto e para ser utilizado na rectificação para ortofotos. Com o

surgimento dos SIGs, os MDEs passaram a ser gerados (e a ser vendidos) como produto independente. Actualmente a fotogrametria aérea pode ser utilizada na aquisição de dados 3D tanto para modelos digitais de terreno como para a elaboração de modelos urbanos. Também outras técnicas, como a fotogrametria terrestre e o LIDAR aéreo e terrestre são utilizadas em complementaridade na produção de MDEs e modelos urbanos. Modelos 3D virtuais destinados sobretudo à visualização dinâmica são produzidos em geral a partir de modelos de elevação e de fotografias projectadas fotogrametricamente sobre eles de modo a obter uma textura realista. Modelos urbanos são utilizados em SIG 3D para análise espacial complexa em que a terceira dimensão é relevante.

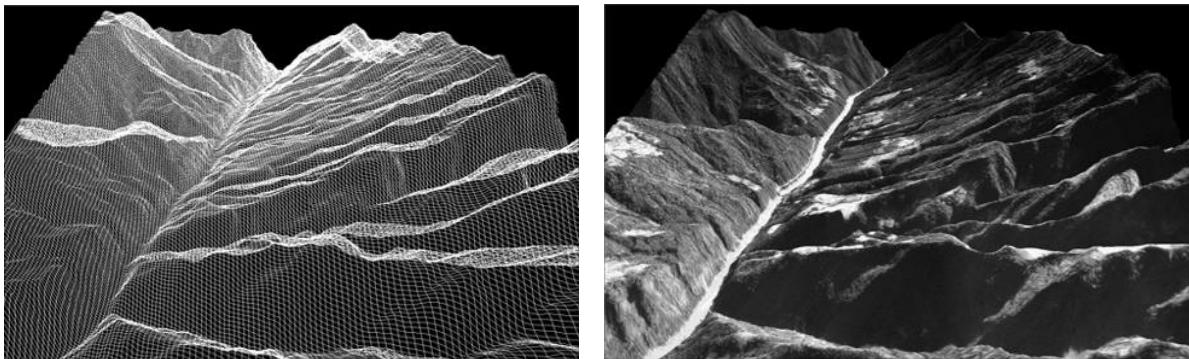


Figura 1.4.1. Modelo digital do terreno (esq.) e modelo 3D realista
(<http://supresoft.com>)



Figura 1.4.2. Modelo Urbano 3D (<http://www.citygml.org>)

2- Produção de cartas de traço por estereorrestituição

Uma carta é uma representação projetada no plano XY, generalizada e reduzida à escala, de uma zona da superfície terrestre, contendo primitivas geométricas (ponto, linha, polígono), símbolos e atributos para a descrição das entidades do mundo real por objetos. Os objetos de uma carta são guardados numa Base de Dados Espacial, organizados por vários temas. Cada tema agrega classes de objetos que se podem descrever com os mesmos atributos. Cada atributo toma um valor para o objeto em particular. Um dos atributos dos objetos de uma carta é a geometria (ponto, linha ou polígono) havendo objetos que não têm o atributo geometria (por ex. uma via rodoviária tem limites, eixo e classificação. A classificação da via não tem geometria). A carta pode ser impressa ou não, existindo de forma digital. Quando impressa, tem associada uma determinada escala que relaciona as dimensões lineares medidas na carta com as correspondentes no terreno. Quando não impressa, a carta tem associado um determinado Nível de Detalhe (NdD). Uma carta impressa, para além da informação geoespacial projetada no plano, deve incluir um conjunto de elementos gráficos básicos que a transformam numa ferramenta para localização e orientação. Esses elementos incluem uma quadricula coordenada (grelha), o respetivo datum (sistema de referência - elipsoide e projeção cartográfica), a escala, uma legenda da simbologia, a data da informação, a orientação (quando não seja redundante e apenas para áreas limitadas) e um título.

As cartas podem-se dividir em dois grandes grupos: cartas topo-geográficas e cartas temáticas. Dentro destes grupos há ainda vários critérios segundo os quais se podem dividir as cartas, como por exemplo, segundo a área territorial abrangida (de conselho, de país, de continente, etc.), a especificidade do conteúdo (carta viária, hipsométrica, de declives, etc.) ou a escala (de grande, média ou pequena escala).

Nas cartas topo-geográficas são representadas as entidades existentes à superfície da terra incluindo os pormenores e formas do relevo. Todos os temas de objetos são representados com o mesmo nível de importância, sendo o grau de generalização dependente da escala ou do Nível de Detalhe. Esses temas coincidem geralmente com os que a seguir se apresentam:

- Hidrografia
- Altimetria
- Ocupação do solo
- Construções
- Transportes
- Infraestruturas
- Mobiliário urbano
- Unidades administrativas
- Toponímia

Nas cartas temáticas são representados determinados fenómenos ou comportamentos da natureza e da sociedade, com a sua distribuição geográfica ou apenas a sua indexação a determinados locais geográficos, sendo a informação

temática realçada em relação aos restantes níveis de elementos. Uma classificação das cartas temáticas compreende os seguintes tipos:

- cartas físico-geográficas (ex. cartas geológicas, botânicas, zoo-geográficas)
 - cartas sócio-económicas (ex. cartas económicas, de recursos, populacionais, culturais, históricas)
 - cartas técnicas (cartas náuticas, aeronáuticas, cartas para determinados projectos)
- (Focke, 1985)

As cartas topo-geográficas são geralmente elaboradas e atualizadas sistematicamente a nível nacional ou regional e destinam-se a satisfazer as necessidades da população e de órgãos administrativos locais e centrais, bem como da defesa do território a nível militar e da protecção civil. A sua elaboração segue normas estabelecidas para cada escala ou NdD pela autoridade de cartografia, que não só define o catálogo de objectos a restituir e respetivos atributos, como também estipula as precisões geométricas exigidas, a consistência com o catálogo e a completude. Em geral é escolhida uma escala de base que é elaborada de raiz (por exemplo 1:10 000 ou 1:25 000) e as escalas menores serão obtidas a partir do pormenor da **escala base** por operações cartográficas de generalização. Normalmente as escalas base para cartas topográficas vão de 1:10 000 até 1:1 000 000 dependendo das dimensões e particularidades do país em questão. As recentes normas de produção cartográfica, inspiradas nas normativas europeias INSPIRE, substituem a noção de escala pelo NdD, com um catálogo de objetos único, mas indicando se o objeto é de representação obrigatória em cada NdD. Apenas considera 2 níveis, o NdD1 que corresponderá a produtos da classe dos mapas à escala 1:1000 e 1:2000, e o NdD2 que corresponderá a produtos para escala igual e inferior a 1:5000.

A estereorrestituição fotogramétrica é aplicada na aquisição em 3D dos elementos para cartas topográficas de base.

Os elementos cartográficos correspondentes aos temas acima discriminados caracterizam-se do seguinte modo:

Hidrografia - A hidrografia de uma carta representa todos os cursos de água naturais ou artificiais à superfície, incluindo obras de arte hidráulicas (represas, aquedutos, estações elevatórias, etc.). A linha de costa e as superfícies aquáticas (água lênticas) estão incluídas neste tema. Todos os elementos deste tema podem ser estereorrestituídos.

Altimetria - A altimetria é constituída pela morfologia da superfície terrestre. Na sua representação cartográfica, há que respeitar certos requisitos. Por exemplo, é exigida a reprodução precisa da posição, dimensões e formas do relevo e que a representação utilizada possibilite a determinação de cotas em qualquer área da carta bem como de desniveis relativos.

Para além disso, a representação deve facilitar a apreensão visual de vários tipos de relevo (relevo montanhoso, pouco acidentado, plano). A altimetria de uma carta topográfica pode ser representada de forma vetorial ou matricial.

Em forma vetorial, o relevo é representado convencionalmente por curvas de nível, linhas que unem pontos de igual cota (distância na vertical entre o ponto e a superfície de referência ou datum altimétrico), sendo a diferença de cotas entre

duas curvas de nível vizinhas denominada **equidistância natural**. O valor da equidistância natural está padronizado para cada escala ou NdD. O conjunto das curvas de nível deve garantir uma densidade tal que descreva a forma da superfície terrestre, sem, no entanto, prejudicar a legibilidade da outra informação.

Tabela 2.1 - Equidistâncias naturais mais usuais para as diferentes escalas

Escala da carta	Equidistância natural
1:500	0.5 m
1:1000	1 m
1:2000	1 m ou 2 m
1:5000	2.5 m ou 5 m
1:10000	5 m ou 10 m
1:25000	10 m ou 25 m
1:50000	25 m ou 50 m

Tabela 2.2 - Equidistância natural para os NdD das normas DGT de 2020.

NdD	Equidistância natural
1	2m
2	5m

Em zonas do terreno extensas que se encontrem entre curvas de nível ou onde a tendência do declive se altera (por ex. um colo), há necessidade de incluir pontos isolados com a informação da respetiva cota, os pontos cotados, para que toda a área da carta contenha informação altimétrica suficiente. Por vezes, em terrenos quase planos, incluem-se localmente curvas de nível intermédias com equidistância natural menor que a estipulada para a escala da carta (geralmente metade). Na impressão de uma carta, são também representadas por símbolos zonas do terreno cujo declive seja tal que as projecções ortogonais das curvas de nível à equidistância natural estabelecida se toquem ou sobreponham, dificultando a legibilidade (aterros, desaterros, falésias). As curvas de nível e os pontos cotados podem ser estereorrestituídos directamente.



Figura 2.1 - Curvas de nível e pontos cotados

Em forma matricial, o relevo é representado por um Modelo Digital do Terreno com determinada resolução espacial (dimensão de célula). A geração de modelos digitais de elevação será tratada num capítulo posterior.

Ocupação do solo - Na carta impressa são representadas por manchas coloridas e símbolos as áreas cobertas por vegetação e por culturas homogéneas (pinhal, souto, eucaliptal, olival, trigo, milho, arroz, etc.) bem como as áreas artificializadas. Na carta não impressa, apenas são guardados os polígonos definidores dessas áreas com os respetivos atributos. Os limites das áreas podem ser estereorrestituídos e a sua classificação provir de fotointerpretação sendo confirmada por reconhecimento prévio ou completagem no local.

Construções - Este nível inclui todo o edificado (edifícios, muros, tanques, piscinas, etc.), definido pelos seus contornos projectados no plano XY. Em escalas maiores, cada edifício é representado individualmente, passando-se à representação simbólica do conjunto edificado nas escalas menores. Edifícios e objectos cujo significado seja relevante e que assumam o papel de pontos de referência, como igrejas, fontanários, etc. são adicionalmente representados por símbolos na carta impressa

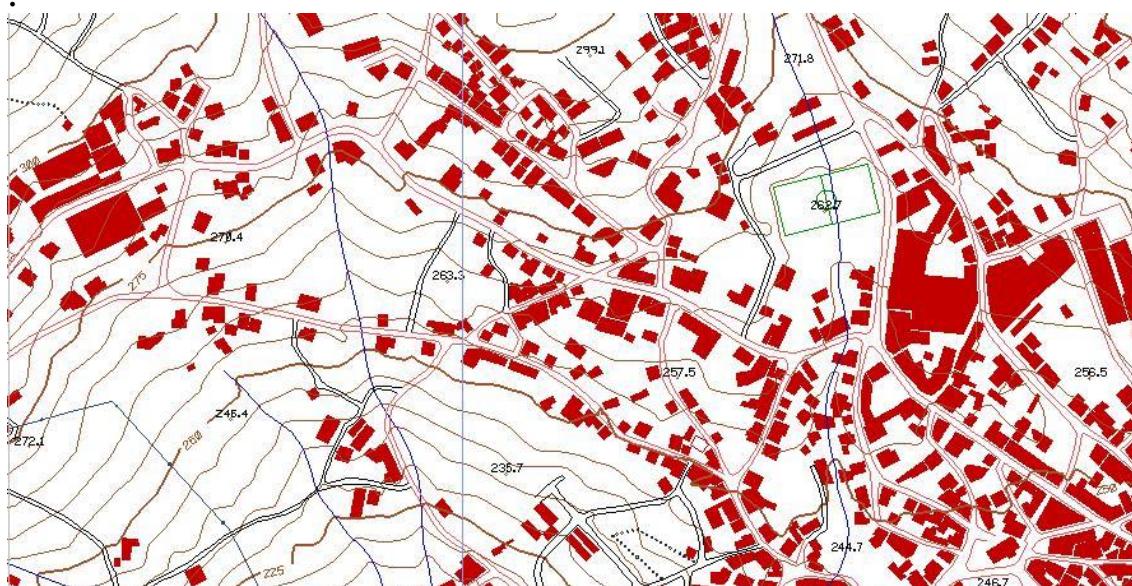


Figura 2.2. Aglomerado populacional numa restituição à escala 1:10 000

Este conjunto de elementos pode ser estereorrestituído. As casas são geralmente restituídas fotogrametricamente pelo contorno dos telhados. Para escalas maiores, caso a distância horizontal entre o limite do telhado e a parede de uma casa seja significativa (o que é apurado durante a completagem no local), os limites da casa terão de ser recuados de um valor correspondente para que a representação cartográfica corresponda à planta da casa no plano X,Y e não num plano à cota do telhado. Por essa razão, um dos atributos a preencher para os Edifícios é precisamente a indicação de como foi obtida a geometria do contorno do edifício e a que parte do edifício corresponde a cota do polígono (por ex. ponto mais alto do telhado, beira do telhado, soleira, etc.). A operação de correção é eventualmente feita durante a edição dos dados estereorrestituídos.

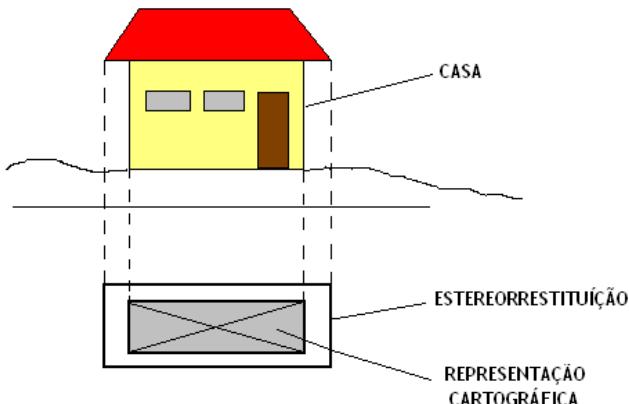


Figura 2.3. Diferença entre elemento estereorrestituído e cartografado

Transportes - Caminhos, ruas, estradas e auto-estradas, caminhos de ferro e estruturas associadas, como estações e marcos quilométricos, são representados em cartas topográficas. Nas grandes escalas, as vias são representadas com a verdadeira largura reduzida à escala, ou seja, com dois limites, e em escalas menores, por uma linha cujos atributos correspondem a uma classificação da via, não estando a espessura da linha diretamente relacionada com a largura da via. Estes elementos podem ser estereorrestituídos, provindo a classificação de reconhecimento prévio no local ou de completagem.

Infraestruturas - Instalações e redes de distribuição de água, gás, eletricidade, telecomunicações, etc. Desde que sub-aéreas, estas entidades podem ser estereorrestituídas. Se forem subterrâneas, não podem ser extraídas das fotografias aéreas.

Mobiliário Urbano - Os objetos deste tema normalmente só aparecem em grandes escalas. São constituídos por elementos tipicamente urbanos, como paragens de autocarro, bancos de jardim, contentores do lixo, ecopontos, estacionamento de bicicletas, semáforos, painéis publicitários, etc. Estes elementos são estereorrestituíveis.

Unidades administrativas - As linhas limite das unidades administrativas, a não ser que coincidam com acidentes naturais (rios, linhas de festo) ou objectos no terreno (estradas, marcos) não podem ser estereorrestituídas, provindo de outras fontes. Na cartografia topográfica consideram-se apenas as unidades administrativas oficiais: país, distrito, concelho e freguesia.

Toponímia - este tema agrupa os nomes que identificam os locais, acidentes geográficos (monte, serra, outeiro, vale) e rios. Cada nome está associado a um ponto com coordenadas (X,Y) junto do local nomeado. A toponímia não pode ser estereorrestituída.

Embora, pelo que foi apresentado em cima, a estereorrestituição fotogramétrica seja um método eficaz e preciso de aquisição de dados para uma carta topográfica de base, o objectivo de uma estereorrestituição poderá ser outro que não a carta de base. Nesse caso, haverá que estabelecer as normas de restituição para a aplicação em causa e elaborar um catálogo de objectos particular com a definição dos objectos a restituir e a descrição dos atributos respetivos.

2.1 Estereorrestituidores

A aquisição de informação tridimensional do objecto a partir do modelo estereoscópico (par de fotografias aéreas) orientado absolutamente denomina-se estereorrestituição. Os instrumentos desenvolvidos com o propósito de facilitar a estereorrestituição denominam-se estereorrestituidores. Basicamente todos eles incluem uma componente que permite importar as duas imagens, uma componente que permite reconstruir as orientações do par estereoscópico, uma componente que proporciona a visualização em 3D, uma componente que se destina à medição em 3D (marca flutuante) e uma componente para registo dos dados restituídos.

A evolução dos estereorrestituidores teve várias fases que simultaneamente caracterizaram a própria fotogrametria aérea.

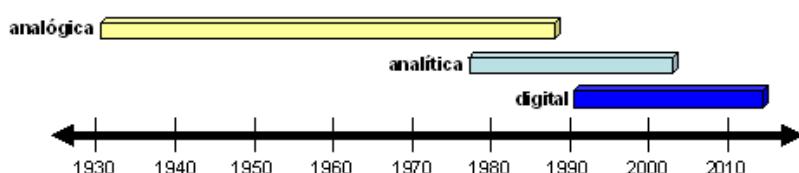


Figura 2.1.1 - Fases temporais da restituição fotogramétrica (adaptado de K.Jacobsen)

A fase analógica que se iniciou nos anos 30 e durou até aos fins dos anos 80 do século XX, caracterizou-se pela construção dos restituidores ópticos e mecânicos, nos quais o modelo estereoscópico era formado por projecção ótica directa ou indirecta (por circuitos ópticos), sendo a ligação da marca flutuante com os dispositivos registadores de dados (lápis e folha de papel) realizada primeiramente de forma mecânica, com diferentes graus de complexidade, e mais tarde de forma electrónica. Característico deste tipo de estereorrestituidores era a possibilidade de realizar rotações físicas das fotografias a fim de recuperar as orientações entre as duas fotografias e entre o modelo estereoscópico e o terreno. A sua construção integrava soluções mecânicas e ópticas de alta precisão que tornavam o valor do equipamento avultado. Poucas eram as empresas que podiam financiar tais aparelhos.

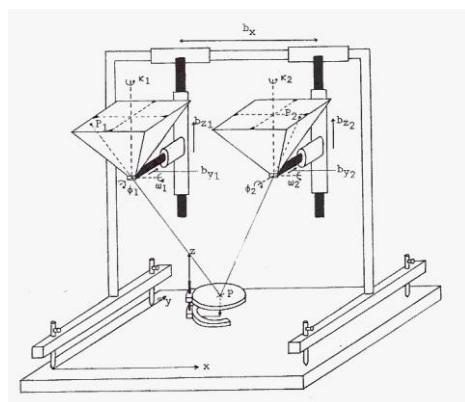


Figura 2.1.2 - Esquema geral de estereorrestituidor analógico óptico (K. Kraus)

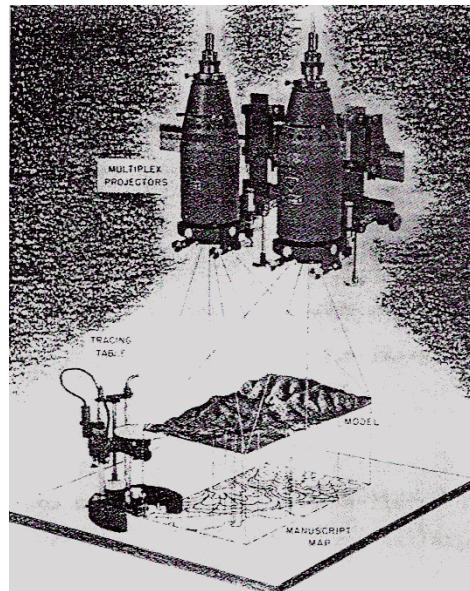


Figura 2.1.3 - Formação do modelo 3D no estereorrestituidor analógico ótico Multiplex pelo método anaglífico

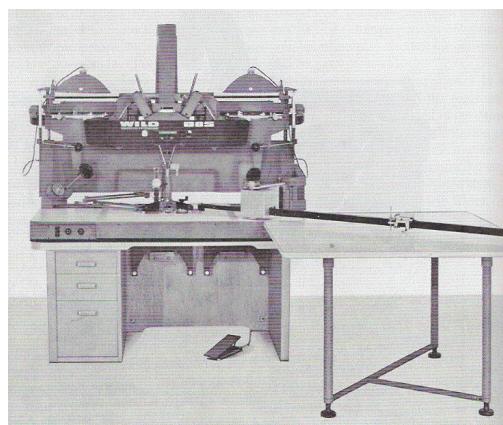


Figura 2.1.4 - Exemplo de estereorrestituidor analógico mecânico: Wild B8

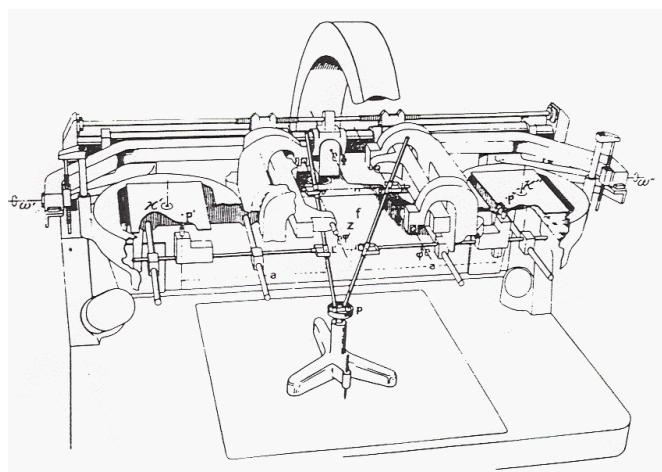


Figura 2.1.5 - Esquema do Wild B8

A fase analítica, que teve o seu modesto início nos anos 70 do sec. XX, caracterizou-se pelo aproveitamento do desenvolvimento tecnológico da computação automática, recuperando as equações fotogramétricas já desenvolvidas teoricamente desde os inícios do século, mas não integradas na prática da estereorrestituição devido ao grande volume e complexidade do cálculo. Os modelos matemáticos foram aperfeiçoados e os estereorrestituidores passaram a integrar computadores cada vez mais potentes, dispensando soluções mecânicas e reduzindo a parte ótica ao mínimo indispensável para a observação estereoscópica.

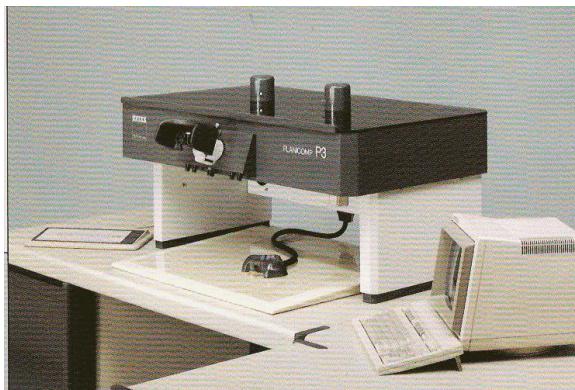


Figura 2.1.6 - Estereorrestituidor analítico Zeiss P3-Planicomp

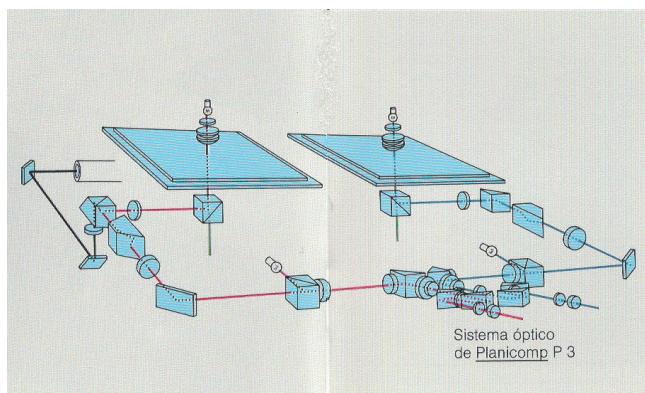


Figura 2.1.7 - Sistema óptico do Zeiss P3- Planicomp



Figura 2.1.8 - Estereorrestituidor analítico Kern DSR11 com mesa desenhadora

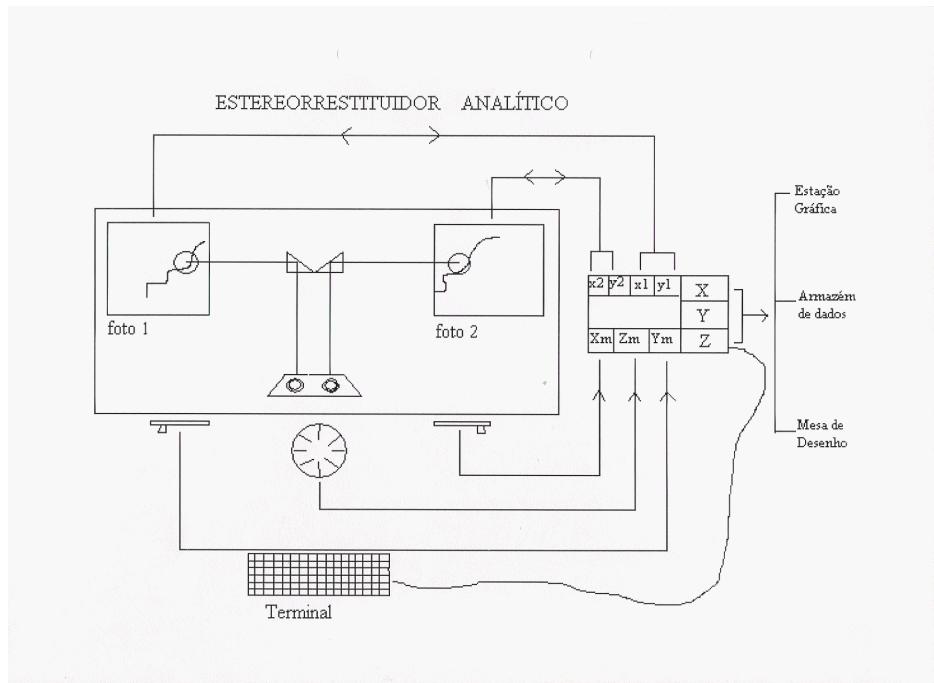


Figura 2.1.9 - Esquema geral de um estereorrestituidor analítico

Nos restituidores analíticos, todo o controlo dos porta-fotos (placas onde se colocavam as fotografias aéreas originais em formato de diapositivo) é realizado via computador em tempo real utilizando sucessivas transformações de coordenadas. As coordenadas nos porta-fotos do ponto visado pelo operador humano, são calculadas a partir dos movimentos que o operador aparentemente induz à marca flutuante. O processo permite ao operador uma visualização do modelo estereoscópico sem paralaxe na zona vizinha da marca flutuante, dispensando quer as rotações espaciais dos porta-fotos (essenciais nos instrumentos analógicos) quer a manutenção de uma base fixa (distância entre os centros dos porta-fotos). De facto, a posição relativa dos porta-fotos deixa de ser relevante (no P3 encontram-se ao mesmo nível, no DSR encontram-se sobrepostos em planos paralelos), visto as coordenadas terreno de cada ponto serem analiticamente calculadas a partir das coordenadas medidas em cada foto e dos parâmetros de orientação, também eles calculados analiticamente.

Na década de 80, os estereorrestituidores analíticos tornaram a fotogrametria muito mais flexível, permitindo a restituição de fotografias de qualquer câmara, ou inclusivamente de câmaras diferentes para cada foto. Permitiram ainda restituir imagens de outra geometria, como por exemplo imagens de satélite. Para isso bastava apenas que estivesse implementado no computador o modelo matemático respetivo.

Os últimos modelos deste tipo de restituidores (por ex. o DSR11 da Kern), incluíam câmaras de vídeo que serviam para detectar automaticamente pontos homólogos em pequenas sub-imagens digitalizadas, sendo utilizadas nas primeiras experiências de aquisição automática de pontos cotados para modelos digitais de terreno.

A fase digital surgiu no início dos anos 90 e coexistiu com a analítica durante muitos anos, não havendo nessa altura certezas quanto a qual das duas iria vingar. A dimensão da componente computacional nos estereorrestituidores foi aumentando de tal forma ao longo do tempo, que nessa época se tornou possível conceber estereorrestituidores sem qualquer componente mecânica. Os porta-fotos deixaram de existir, passando as fotografias a ser introduzidas no restituidor em forma digital (ficheiros de dados). Surgiram então as estações fotogramétricas digitais com as mesmas componentes básicas de um estereorrestituidor (para importação das imagens, para orientação, para visualização 3D, para medição em 3D e para registo de informação extraída do modelo), aliando toda a capacidade geométrica das equações da fotogrametria analítica à capacidade do processamento digital de imagem, até então não aplicado à fotogrametria.

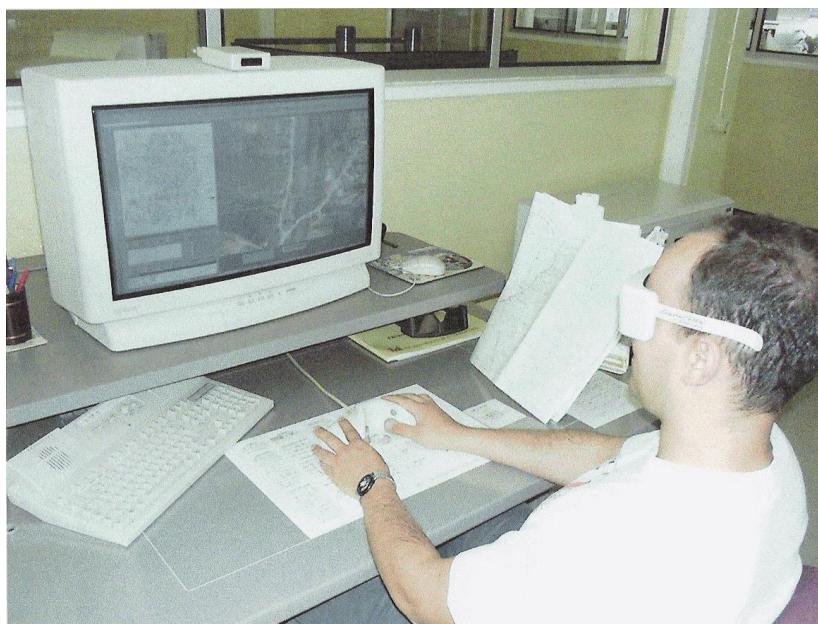


Figura 2.1.10 - Exemplo de Estação Fotogramétrica Digital: Intergraph

Muitas das operações fotogramétricas puderam ser automatizadas ou semi-automatizadas, tornando o trabalho do operador humano menos moroso, traduzindo-se em maior rentabilidade e economia nos projectos. As estações podem ser utilizadas tanto para estereorrestituição, como para ortorrectificação e restituição múltipla, proporcionando, além disso, uma panóplia de ferramentas gráficas de representação vectorial (CAD) que permitem uma classificação dos objectos durante e após a fase de restituição. É ainda possível usufruir das capacidades da computação gráfica para a visualização dos dados em 2.5 D (representações perspectivas). A evolução das estações digitais é veloz, paralelamente à evolução das plataformas computacionais em que assentam e à dos algoritmos processadores de imagem. A sua implantação nas unidades produtoras de fotogrametria pode actualmente considerar-se total.

A utilização das fotografias em formato digital exigiu primeiramente uma operação prévia de scanerização (rasterização) dos originais das fotografias que eram em filme. Simultaneamente às estações digitais fotogramétricas foram, por isso, também desenvolvidos scanners fotogramétricos de alta resolução que permitissem obter imagens digitais de qualidade equivalente à das fotografias analógicas

originais. Mais recentemente, as estações fotogramétricas importam e processam imagens digitais de raiz obtidas pelas câmaras aéreas digitais.

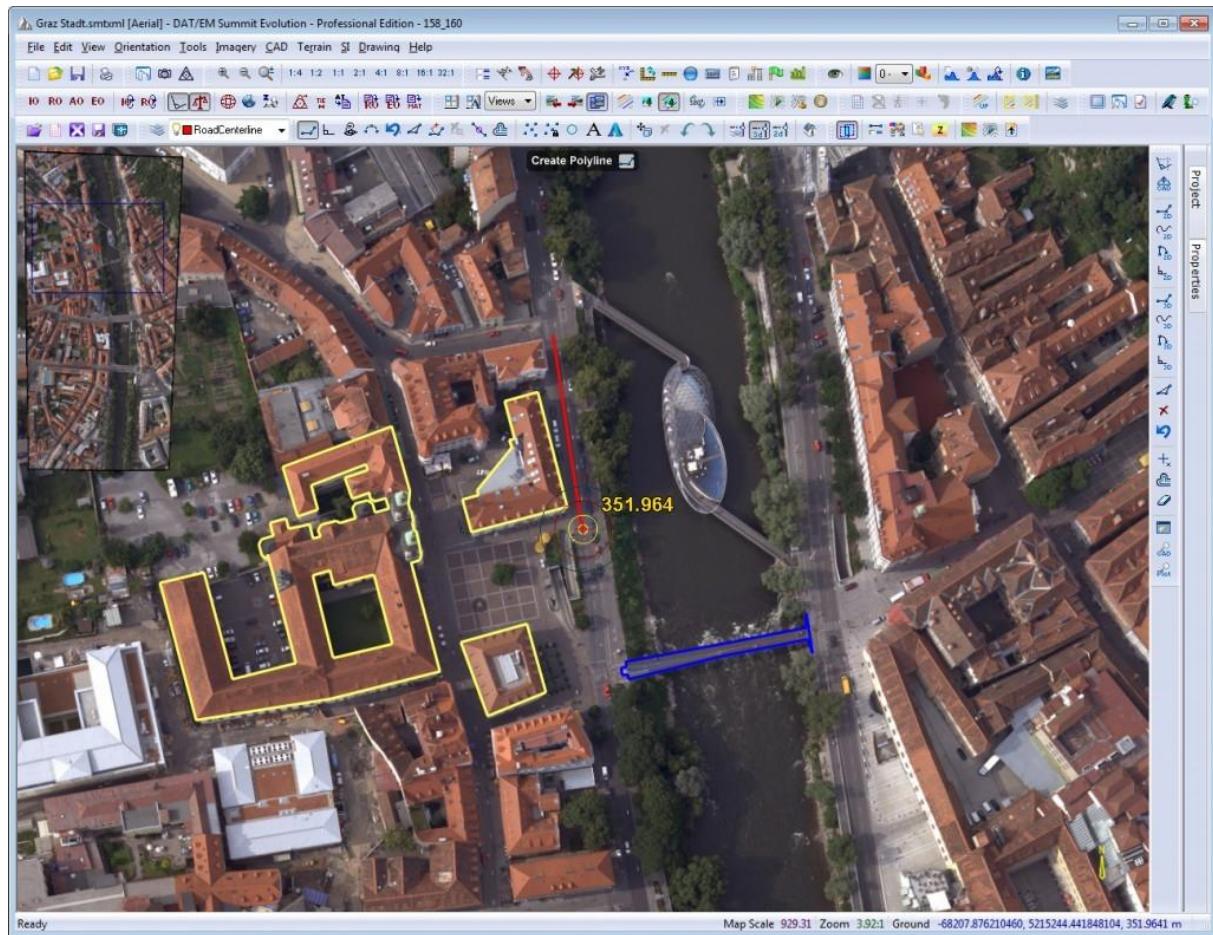


Figura 2.1.11 - Exemplo de ambiente de trabalho de estação fotogramétrica digital com projeção alternada do modelo estereoscópico.

2.2 Modos de estereorrestituição

2.2.1 Estereorrestituição gráfica

Designa-se por estereorrestituição gráfica a operação fotogramétrica que conduz ao desenho direto sobre uma folha - que contenha a quadricula cartográfica à escala e os pontos de apoio implantados pelas suas coordenadas terreno - do pormenor que o operador fotogramétrico vai percorrendo com a marca flutuante no modelo estereoscópico orientado absolutamente. Este modo de restituição era muito comum nos estereorrestituidores analógicos. O processo começava pela reconstrução analógica das orientações internas, relativa e absoluta de um par de fotos, seguindo-se a restituição linear do pormenor, desenhando os contornos de todos os objetos. O operador começava pela restituição da planimetria do modelo (casas, muros, estradas, rios, limites de vegetação) executando em seguida a altimetria (curvas de nível e pontos cotados).

Sendo as curvas de nível uma entidade subjetiva por não estarem materializadas no terreno, exigem do operador um grande treino de coordenação e uma boa percepção do modelo estereoscópico do terreno. Uma curva de nível é gerada

fixando a marca flutuante na cota requerida (à qual corresponde uma determinada paralaxe dos raios homólogos) e fazendo-a deslizar pelo modelo sempre (visualmente) tangente à superfície do terreno percecionada pelo operador, o que corresponderá a unir os pontos do terreno de igual cota. Operadores experientes conseguem gerar curvas de nível com grande precisão.

Após a restituição de todo o modelo, passava-se ao modelo adjacente repetindo as operações indicadas. Todos os modelos que abrangessem a área de uma folha de carta ou a área de um projecto eram restituídos deste modo. O resultado, designado como original da restituição, continha assim todo o pormenor percecionado e interpretado pelo operador humano a partir do modelo estereoscópico de fotografias aéreas. Após verificação no local e completagem de pormenor não visível nas fotos (por exemplo por estar coberto por densa floresta) usando métodos clássicos de topografia, e introdução da toponímia (nomes dos aglomerados populacionais, dos acidentes geográficos e de outra informação textual) obtinha-se o original da carta, no caso de grandes escalas (1:1000, 1:2000, 1:5000), ou o original topográfico da carta para escalas médias e pequenas, o qual era ainda sujeito a tratamento de edição cartográfica antes de servir como original da carta para reprodução.

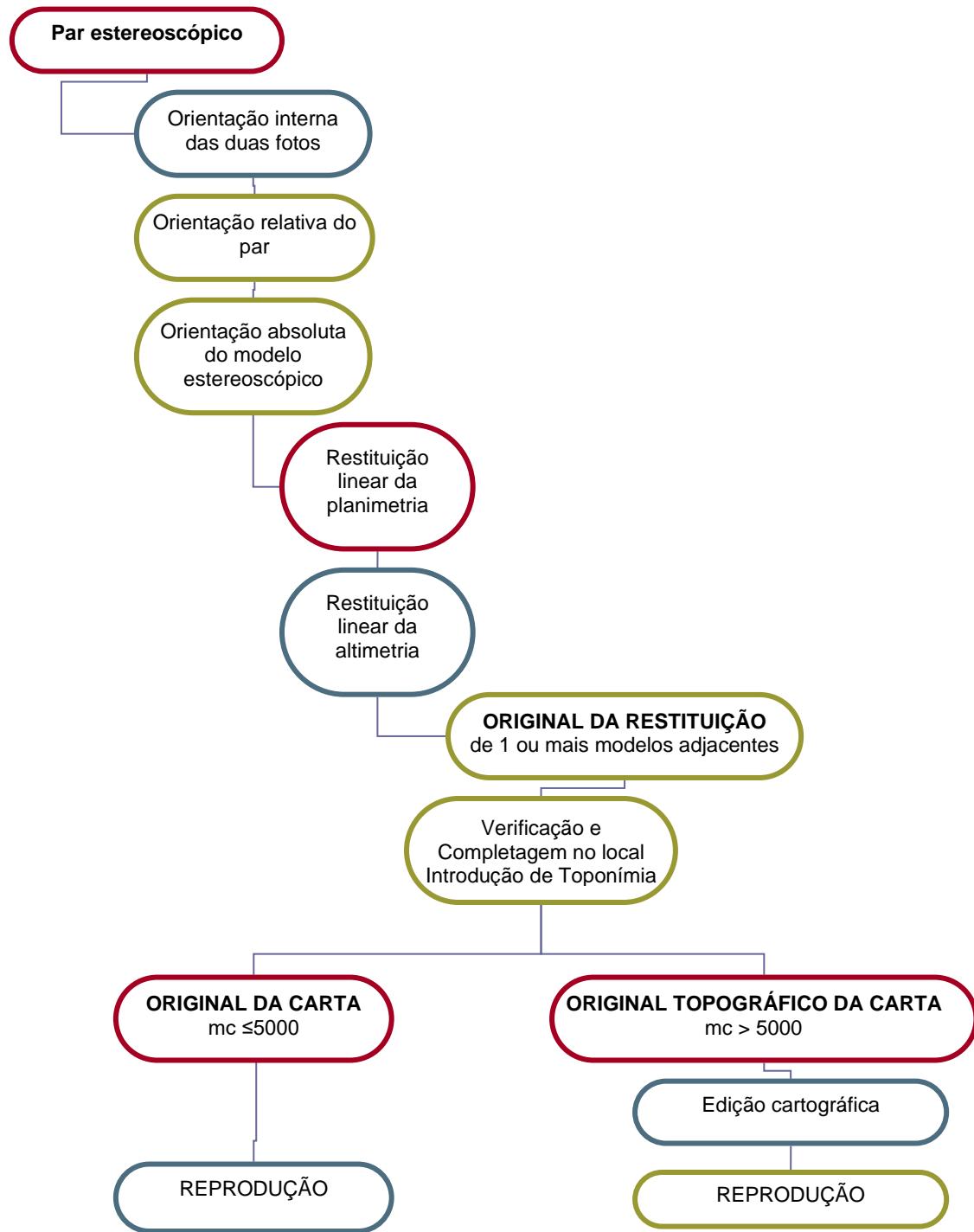


Figura 2.2.1.1 - Esquema de operações para estereorrestituição gráfica

2.2.2 Estereorrestituição numérica

A estereorrestituição numérica distingue-se da gráfica essencialmente pelo facto de o seu produto imediato não ser uma representação gráfica mas sim um ficheiro de dados numéricos. A origem da restituição numérica esteve nas mesas desenhadoras electrónicas que necessitavam de dados em formato numérico para funcionarem off-line, ou seja não simultaneamente à restituição. As operações de edição do desenho, revisão, implantação da completagem e quaisquer correcções eram sempre feitas sobre o original da restituição em papel. O conjunto de dados restituídos em formato numérico possibilitava não só a impressão não simultânea (o que aumentava a rentabilidade das mesas desenhadoras) como também a execução de várias cópias em papel do pormenor restituído. Mais tarde, com o aparecimento das estações gráficas interactivas (terminais de computador com monitor gráfico) e com o seu desenvolvimento, esse conjunto de dados em formato numérico passou a ser considerado o próprio original de restituição (em vez da folha de papel). Revisões, emendas e completagem passaram a ser efetuadas interativamente no monitor (e não no papel) sobre uma representação gráfica dos dados numéricos. Só para fins de documentação é que eram feitas então impressões. Aquilo que se começou por designar por “carta numérica” é actualmente denominado “modelo numérico topográfico”. Embora o modelo numérico não tenha escala, pois é constituído por uma lista de pontos organizada, com a respectiva identificação, as coordenadas terreno e os atributos, tanto a densidade de pormenor como a precisão da restituição só permitem cumprir as normas para determinadas escalas (por exemplo, não será aconselhável imprimir uma carta à escala 1:5000 a partir de uma restituição para a escala 1:25000).

Este é o modo de estereorrestituição nas actuais estações fotogramétricas digitais. A própria maneira de estereorrestituir difere da anterior. Os objectos planimétricos passam a ser definidos pelo operador por meio do registo das coordenadas dos seus vértices ou pontos notáveis (modo pontual) e não pelo seguimento do contorno do objecto (modo linear). O caminho que a marca flutuante descreve entre um vértice e o próximo deixa de ser relevante, interessando apenas a sequência pela qual os vértices são registados e o código que indica a natureza do objecto a que pertencem os vértices (casa, estrada, etc.)

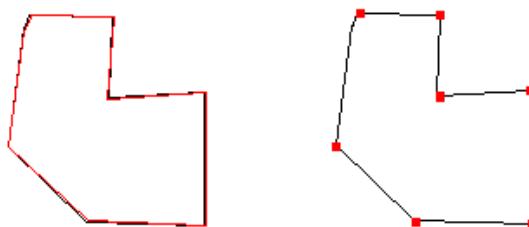


Figura 2.2.2.1 - Modos linear (esq.) e pontual (dir.) de restituição. A vermelho os dados registados para o MNT

Na restituição da altimetria, a estereorrestituição numérica proporciona alternativas à geração directa de curvas de nível. Surge a aquisição de cotas em modo pontual, ou seja distribuídas por toda a área do modelo estereoscópico, obtendo-se um modelo digital altimétrico. Deste pode ser gerado um MDT, do qual se obtém então as curvas de nível para a carta, mas do qual se podem igualmente

obter perfis e derivar representações perspetivas do terreno (2.5 D) para visualização.



Figura 2.2.2.2 - Resultado da estereorrestituição da planimetria sobre papel (original da restituição)

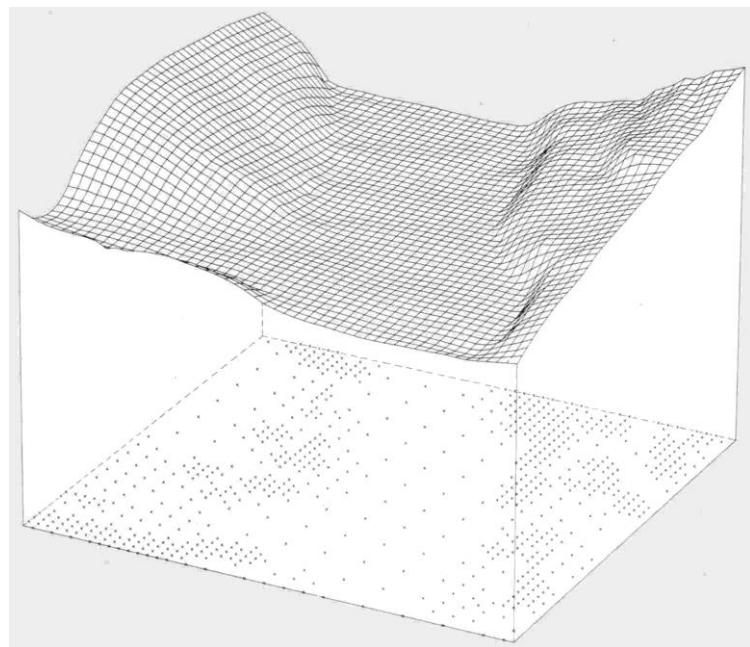


Figura 2.2.2.3 - Representação perspectiva do MDT criado a partir de restituição pontual da altimetria (visível no plano XY em baixo)

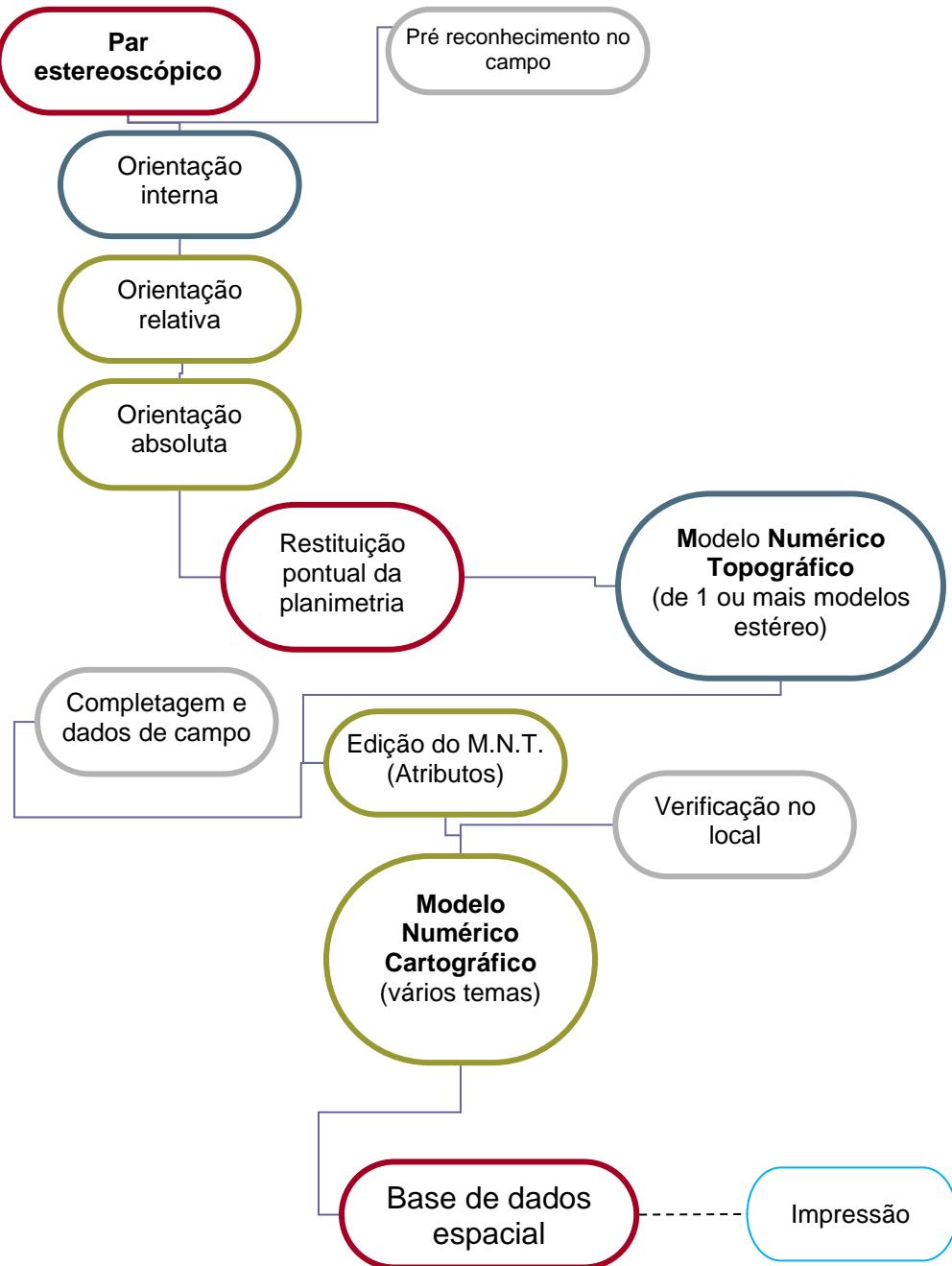


Figura 2.2.2.4 - Esquema das operações para estereorrestituição numérica (planimetria)

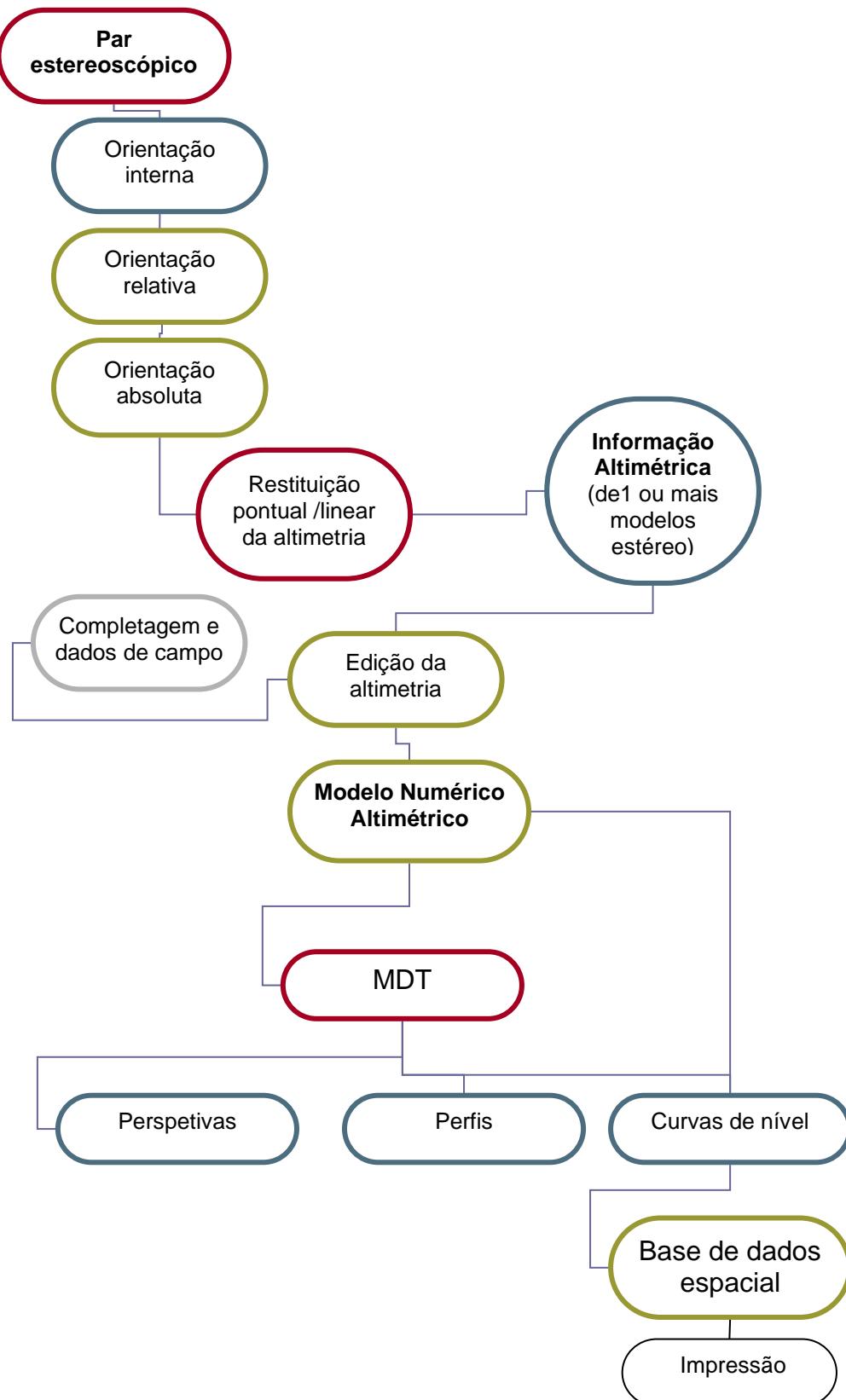


Figura 2.2.2.5 - Esquema das operações para estereorrestituição numérica (altimetria)

2.3. Precisão do pormenor estereorrestituído

As indicações que se seguem baseiam-se em Kraus (1997) e constituem apenas linhas orientadoras para a estimativa da precisão que se pode alcançar com a estereorrestituição. Essa precisão não é constante e depende não só do tipo de objeto restituído e do modo como é restituído (pontual ou linear), mas também:

- dos métodos de orientação utilizados (triangulação, orientação par a par);
- das distorções da imagem;
- da qualidade radiométrica da imagem;
- do apoio fotogramétrico (PFs ou parâmetros de orientação)
- do estereorrestituidor utilizado (ou do software implementado)

2.3.1 Precisão dos objetos da planimetria

Qualquer objecto é restituído tridimensionalmente, quer ele venha a ser posteriormente representado a 2D, quer a 3D. São os seguintes os valores de precisão empíricos para o pormenor planimétrico:

Restituição pontual:

$$\sigma_{xy}(\sin) = \pm 6 \mu m \dots \dots \text{na..fotografia}$$

$$\text{Pontos sinalizados (sin): } \sigma_z(\sin) = \pm 0.06\% \cdot H \dots \text{até..grande.angular}$$

$$\sigma_z(\sin) = \pm 0.08\% \cdot H \dots \text{super..grande.angular}$$

$$\begin{aligned} \text{Pontos naturais (nat): } \sigma_{xy}(nat) &= \sqrt{\sigma_{xy}^2(\sin) + \sigma_{xy}^2(indef)} \\ \sigma_z(nat) &= \sqrt{\sigma_z^2(\sin) + \sigma_z^2(indef)} \end{aligned}$$

H representa a distância ao objecto, aqui aproximado pela altura de voo sobre o solo. Grande angular e super grande angular referem-se aos tipos de objetivas utilizadas nas câmaras aéreas que obtêm as fotografias. Atualmente pode-se considerar que as objetivas das câmaras em utilização são da primeira categoria (ângulo estreito, ângulo normal, grande angular, por ordem crescente dos ângulos de abertura das lentes objetivas).

Os pontos naturais são obtidos com menor precisão que os sinalizados, pois são afetados de uma parcela no radical que representa o quadrado da indefinição no terreno de cada objeto-tipo. Os valores para a indefinição que se encontram na tabela abaixo provêm de estudos empíricos.

Ponto objecto tipo	σ_{XY} (indef)	σ_Z (indef)
Esquinas de casas, muros, vedações	7 - 12 cm	8 - 15 cm
Tampas de canalização	4 - 6 cm	1 - 3 cm
Vértices de campos cultivados	20 - 100 cm	10 - 20 cm
Arbustos, árvores	20 - 100 cm	20 - 100 cm

Tabela 2.3.1.1 - Indefinição no espaço objecto de tipos de pontos naturais

Uma **distância** calculada a partir de coordenadas determinadas fotogrametricamente virá afectada do erro médio:

$$\sigma_s = \sigma_{xy} \sqrt{2}$$

sendo independente do seu comprimento.

Restituição linear:

Erro médio de uma linha de limite de objectos:

$$\sigma_\ell = \pm 45 \mu m$$

A precisão pode ser melhorada através da possibilidade de mover a marca flutuante com grande desmultiplicação de movimentos, ou o seu equivalente digital, aumentando o factor de zoom durante a restituição.

2.3.2 Precisão da altimetria estereorrestituída

Restituição pontual:

Raster ou pontos isolados: $\sigma_H = 0.1.a.0.15\%_0 \cdot H$

Restituição linear:

Curvas de nível: $\sigma_H = 0.25\%_0 \cdot H$

3– Orientações em Fotogrametria

No momento em que uma fotografia é obtida a partir de um ponto do espaço, utilizando uma câmara fotográfica, existe uma relação espacial única entre a imagem que se forma no plano imagem dentro da câmara e o objecto que está a ser fotografado. Essa relação espacial momentânea é característica de cada fotografia e é definida por um conjunto de parâmetros. Esses parâmetros permitem-nos recuperar em qualquer altura a relação espacial foto-objecto que existia no momento da captação da imagem, possibilitando a extração de informação geométrica do objecto (a restituição) apenas a partir de uma ou mais imagens, em qualquer momento posterior. A determinação dos parâmetros e a recuperação da relação espacial primitiva constituem um conjunto de operações denominado orientação fotogramétrica.

Distinguem-se vários tipos de orientação fotogramétrica. Cada fotografia tem uma orientação interna e uma orientação externa. Enquanto a orientação interna se refere à posição do plano imagem dentro da câmara e à definição do feixe perspectivo de raios luminosos que originou a imagem (qual a sua abertura, qual o seu pólo), a orientação externa refere-se à posição da câmara e à orientação do eixo fotográfico no espaço objecto. Uma fotografia com parâmetros de orientação interna e externa conhecidos fica completamente posicionada (todos os seus pontos) no espaço objecto.

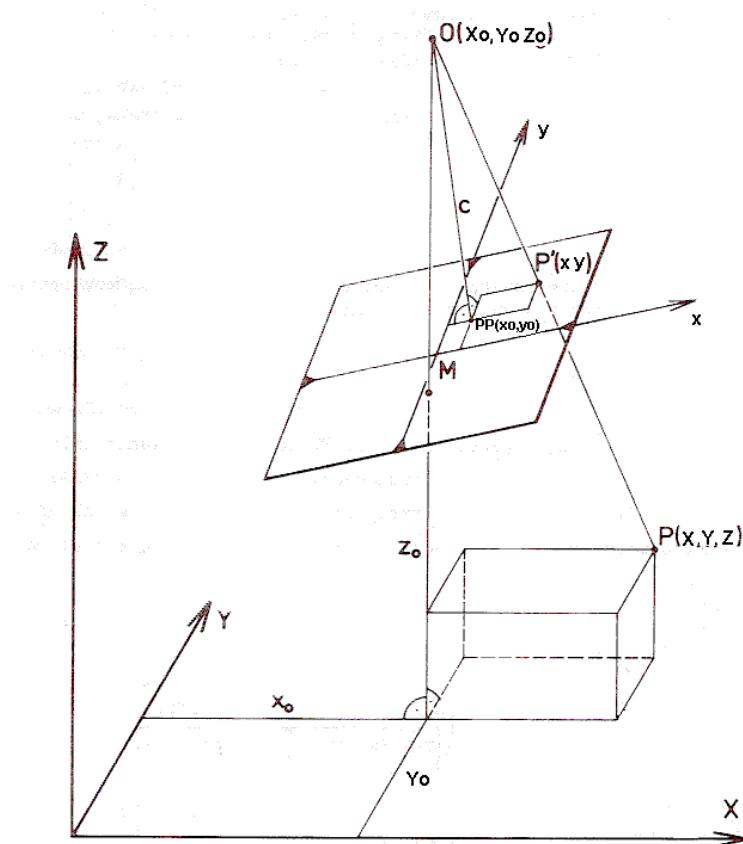


Figura 3.1 - Relação espacial entre fotografia e objecto

A posição relativa de duas (ou várias) fotografias do mesmo objecto em relação a uma(s) à(s) outra(s) quando foram obtidas, é definida pela orientação relativa. No caso de um par de fotografias do objecto ter sido obtido segundo as regras da estereoscopia, ao recuperar a orientação relativa dessas fotografias é possível gerar um modelo estereoscópico que é um modelo virtual do objecto, observável e mensurável em 3D (tridimensionalmente).

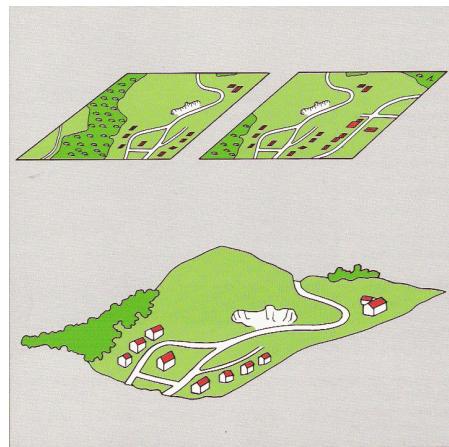


Figura 3.2 - Orientação relativa de um par estereoscópico e modelo estereoscópico gerado (sem relação com o terreno)

O modelo estereoscópico pode ser criado sem ter em conta (ou sem conhecer) a orientação externa das duas fotografias, ou seja, sem conhecer a relação posicional das fotos com o objecto. Neste caso, o modelo tem uma escala arbitrária e uma orientação no espaço não definida. A orientação do modelo estereoscópico no espaço objecto e a sua escala relativamente ao objecto constituem em conjunto a orientação absoluta do modelo.

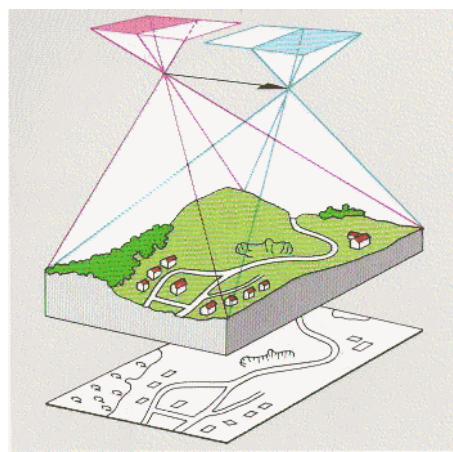


Figura 3.3 - Orientação absoluta de um modelo estereoscópico (no espaço objecto = terreno)

Se entre as duas fotografias de um par não existirem, à partida, as condições propícias à estereoscopia, não é criado nenhum modelo estereoscópico e não é

possível a estereorrestituição. Neste caso, a recuperação da orientação relativa é apenas um estágio para a recuperação da orientação externa de cada fotografia, como sucede nas coberturas fotográficas convergentes para restituição múltipla, sem muita aplicação na produção cartográfica, mas com crescente importância na geração de modelos 3D urbanos.

3.1 Recuperação das orientações

A extracção de informação geométrica do objecto a partir de fotografias aéreas exige a recuperação prévia das suas orientações, ou seja o restabelecimento da relação espacial que existia entre a imagem e o objecto no momento da exposição da camada foto-sensível à luz proveniente do objecto. Desde a invenção do aparelho Estereoplânigrafo, por Bauersfeld (1923), para a estereorrestituição de fotografias aéreas, até à implantação da fotogrametria analítica na cadeia de produção (~1980), a recuperação das orientações era feita de modo analógico, ou seja imitando no aparelho restituidor as condições primitivas. Os negativos ou diapositivos obtidos por contacto das imagens originais (sem ampliação) eram colocados em dois projectores ou em dois porta-fotos planos de modo a ficarem centrados com os eixos ópticos do aparelho. O plano da imagem era colocado a uma distância do sistema óptico do aparelho igual à constante da câmara aérea (ficava assim recuperada ou copiada a **orientação interna**). De seguida os dois planos imagem (nos projectores ou nos porta-fotos) eram rodados um em relação ao outro, seguindo uma determinada estratégia, até o operador de fotogrametria conseguir visualizar estereoscopicamente (pelo método de anaglifos ou de estereoscópios) toda a zona comum às duas fotografias (estava assim recuperada a **orientação relativa**). A posição relativa das duas fotos no aparelho após esta operação era análoga à posição relativa das imagens na altura em que tinham sido obtidas. Seguidamente procedia-se à orientação de uma folha de desenho, sobre a qual se encontrava desenhada uma quadrícula cartográfica à escala de restituição pretendida na qual se encontravam implantados os pontos fotogramétricos pelas suas coordenadas terreno. Um dos pontos fotogramétricos servia para determinar o vector translação existente entre o sistema de coordenadas modelo e o sistema de coordenadas terreno. Na realidade o vector não era determinado explicitamente. Apenas se fazia coincidir a posição da marca flutuante sobre a imagem do PF no modelo estereoscópico, com a posição do lápis traçador sobre o respectivo PF implantado na folha (a ligação da marca flutuante ao lápis traçador era realizada mecânica ou electronicamente). Dois pontos fotogramétricos eram suficientes para determinar a escala do modelo relativamente ao terreno, materializado pelo sistema de coordenadas da folha. Na realidade, a base do modelo, ou seja, a distância entre os centros de projeção associados aos dois porta-fotos era ajustada de modo a que a restituição do pormenor saísse à escala pretendida, a qual estava definida pela quadrícula da folha de desenho. Com três PFs eram determinadas as rotações espaciais necessárias para que o sistema de coordenadas modelo ficasse paralelo ao sistema de coordenadas terreno (**orientação absoluta**). Após este passo encontrava-se restabelecida a relação foto-objecto e podia-se dar início à restituição, extraíndo informação, quer planimétrica, quer altimétrica, do modelo estereoscópico obtendo o resultado (gráfico) em coordenadas terreno, à escala de restituição igual à da quadrícula implantada na folha de desenho.

Com o desenvolvimento da fotogrametria analítica e a sua posterior adaptação às estações digitais fotogramétricas, a recuperação das orientações passou a consistir exclusivamente na determinação analítica dos parâmetros necessários às várias transformações de coordenadas que permitem chegar das coordenadas de um ponto medidas nas fotos às coordenadas terreno do mesmo ponto no objecto. Também a sequência da determinação das orientações deixou de ser tão rígida existindo novos percursos para chegar às coordenadas terreno, envolvendo a determinação das orientações externas das fotografias em vez da orientação absoluta do modelo estereoscópico. Este percurso é mais compatível com os resultados de triangulações fotogramétricas mais precisas e flexíveis utilizadas actualmente. Para além disso a cada fotografia fica associado apenas um conjunto de parâmetros (os da orientação interna e os da orientação externa) em vez de vários conjuntos consoante o modelo estereoscópico do qual ela seja parte integrante (uma foto pode pertencer a vários modelos estereoscópicos).

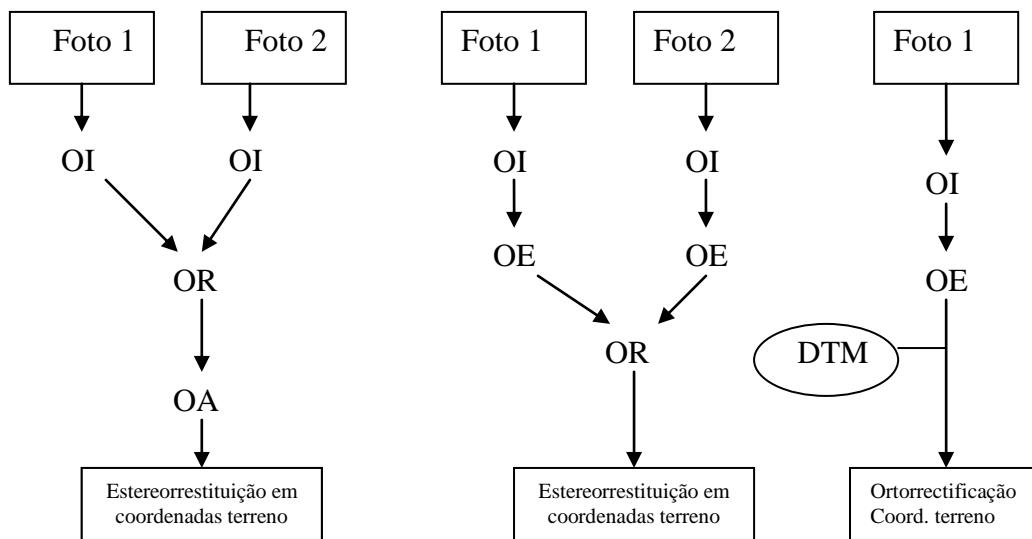


Figura 3.1.1 - Sequências de orientação utilizadas em fotogrametria
(OI-interna, OE-externa, OR-relativa, OA-absoluta)

3.2 Parâmetros de orientação interna

Constituem parâmetros de orientação interna a **constante da câmara** - c , e as coordenadas **foto do ponto principal** - x_o e y_o . Para além destes parâmetros numéricos, incluem-se na orientação interna as funções que descrevem a distorção causada pelo sistema de lentes da objectiva - **distorção radial**, e a distorção causada pela descentragem das diversas lentes - **distorção tangencial**. Outras distorções que afectam a imagem, como por exemplo a falta de planicidade da película nas imagens analógicas ou erros de transformação nas imagens digitais, por serem de difícil modelação, são, em geral, considerados efeitos de parâmetros adicionais na orientação interna, podendo ser determinados analiticamente no âmbito de uma triangulação fotogramétrica que envolva um grande número de fotografias obtidas pela mesma câmara.

Nas câmaras analógicas o sistema de coordenadas foto é definido pelas marcas fiduciais que se encontram no plano imagem (plano de vidro na parte superior do cone da objectiva contra o qual é planificada a película durante a exposição). A origem do sistema de coordenadas foto é a intersecção das rectas que unem as marcas fiduciais diametralmente opostas, denominada ponto médio da foto. Numa câmara ideal de uma só objectiva, o ponto principal, que é a intersecção do eixo óptico da objectiva com o plano da imagem, coincidiria com o ponto médio. Na realidade, isso não acontece, o que origina coordenadas foto do ponto principal diferentes de zero.

A constante da câmara é, por definição, a distância do centro óptico da objectiva ao plano imagem. No entanto, a objectiva das câmaras aéreas é um sistema de lentes compostas que em vez de um centro óptico tem dois nodos, os quais correspondem à intersecção do eixo óptico com os planos nodais (um nodo anterior do lado do objecto e um nodo posterior do lado da imagem). Uma lente composta refracta qualquer raio que incida na lente no nodo anterior, fazendo-o emergir do nodo posterior com uma direcção paralela à do raio incidente. Por isso, nas câmaras aéreas a constante da câmara define-se como a distância do nodo posterior ao plano imagem.

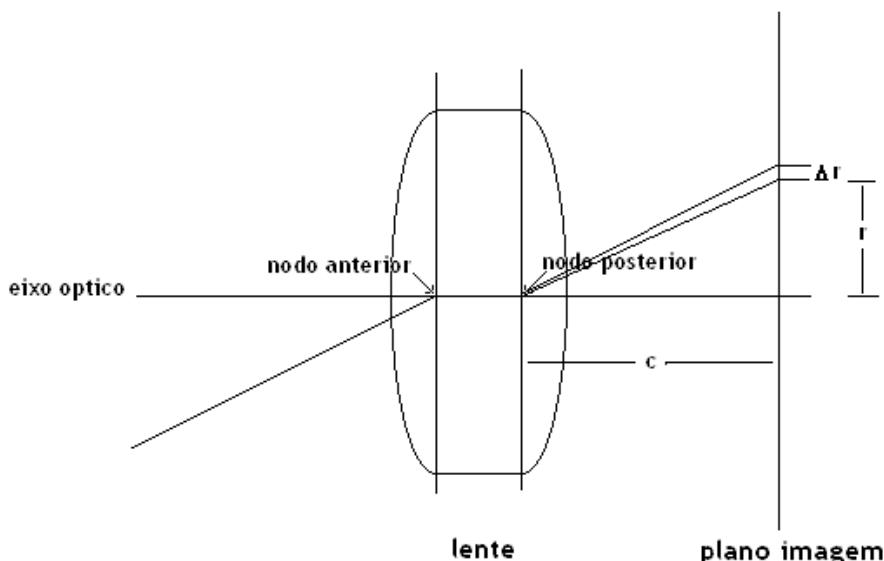


Figura 3.2.1 - Constante da câmara e distorção radial

Os parâmetros de orientação interna de uma câmara aérea de grandes dimensões são geralmente determinados em laboratório, podendo ser reajustados analiticamente após o voo, sobrevoando para esse efeito um campo de calibração onde existam marcas bem definidas de coordenadas terreno conhecidas. Este reajuste justifica-se quando existem grandes diferenças entre as condições de pressão e temperatura existentes no laboratório e no ambiente de trabalho da câmara ou seja, em voo. O reajuste dos parâmetros é feito simultaneamente ao cálculo dos parâmetros adicionais, denominando-se auto-calibração.

Para determinar os elementos de orientação interna de câmaras analógicas em laboratório, são usadas essencialmente duas técnicas: calibração com goniômetro e com multi-colimador. Câmaras aéreas digitais de sensores matriciais são calibradas

analiticamente. Para as câmaras de sensores lineares é feita uma calibração da objectiva única com um goniómetro adaptado.

3.2.1 Calibração de uma câmara aérea com um goniómetro

Um goniómetro mede directamente os ângulos de incidência dos raios luminosos no nodo anterior da objectiva. Numa objectiva ideal, os ângulos de refracção desses raios seriam iguais aos de incidência. O facto de na realidade não serem iguais provoca distorções na imagem. Pretende-se com a calibração determinar essas distorções, juntamente com o valor de c e de x_0 e y_0 .

Utiliza-se uma luneta auto-colimadora fixa (LF) e uma luneta móvel (LM) em torno de um ponto num limbo graduado onde é possível medir os ângulos de rotação da luneta. Primeiro é definida uma direcção zero (referência), alinhando as duas lunetas de modo a cada uma visar o retículo da outra. De seguida é colocado o cone da objectiva da câmara entre as duas lunetas de modo a que o nodo anterior coincida com o centro do limbo. O plano imagem está substituído por uma placa de vidro semi-espelhado com um retículo calibrado. O cone é rodado até à auto-colimação da luneta fixa, posição na qual o plano imagem se encontra perpendicular à direcção zero. O centro do retículo calibrado do plano imagem é então movido paralelamente até coincidir com o retículo da luneta fixa. O retículo da luneta móvel, que ainda se encontra na posição zero, visa neste momento através da objectiva o ponto principal de auto-colimação (PPA) no plano imagem. Este geralmente não coincide com o ponto médio das marcas fiduciais. As suas coordenadas relativamente àquele são x_0 e y_0 e são determinadas por meio de uma fotografia do retículo da luneta móvel, na posição zero, sobre a qual também aparecem as marcas fiduciais.

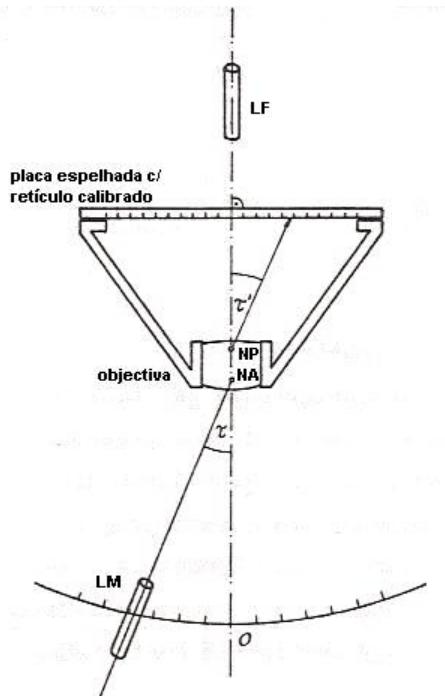


Figura 3.2.1.1 - Calibração de objectiva com goniómetro (adaptado de Kraus 1990)

A partir do PPA começam-se em seguida a medir distâncias radiais ao longo das quatro semi-diagonais com o auxílio do retículo graduado cujos nós vão sendo sucessivamente visados pela luneta móvel. No limbo são feitas as leituras

sucessivas dos respectivos ângulos τ . A partir da distância radial r do primeiro nó a partir do PPA, pode-se calcular a constante da câmara por:

$$c = r / \tan \tau$$

Fazendo este cálculo para o primeiro nó das quatro semi-diagonais, obtém-se quatro valores para c dos quais se pode tomar a média como constante da câmara equivalente c_e . Este valor serve depois para determinar a distorção radial existente nos outros nós das semi-diagonais à distância radial r :

$$\Delta r_i = r_i - c_e \cdot \tan \tau$$

3.2.2 Calibração de uma câmara aérea com um multi-colimador

O princípio deste modo de calibração é semelhante ao anterior. No entanto, em vez de uma luneta móvel sobre um limbo são usadas muitas lunetas em posições angulares fixas. Essas lunetas são colimadores, ou seja, telescópios com retículo iluminado, focados para o infinito. Todas as lunetas estão direcionadas para o ponto que coincidirá com o nodo anterior da objectiva a calibrar. No plano imagem formam-se as imagens dos retículos dos colimadores. Normalmente os colimadores estão alinhados em cruz, de modo a que a suas imagens se alinhem ao longo das duas diagonais do plano imagem. No centro da cruz está o colimador que é colocado em auto-colimação (a centrar a imagem reflectida do próprio retículo) de modo a garantir a perpendicularidade do plano imagem com o eixo óptico do colimador.

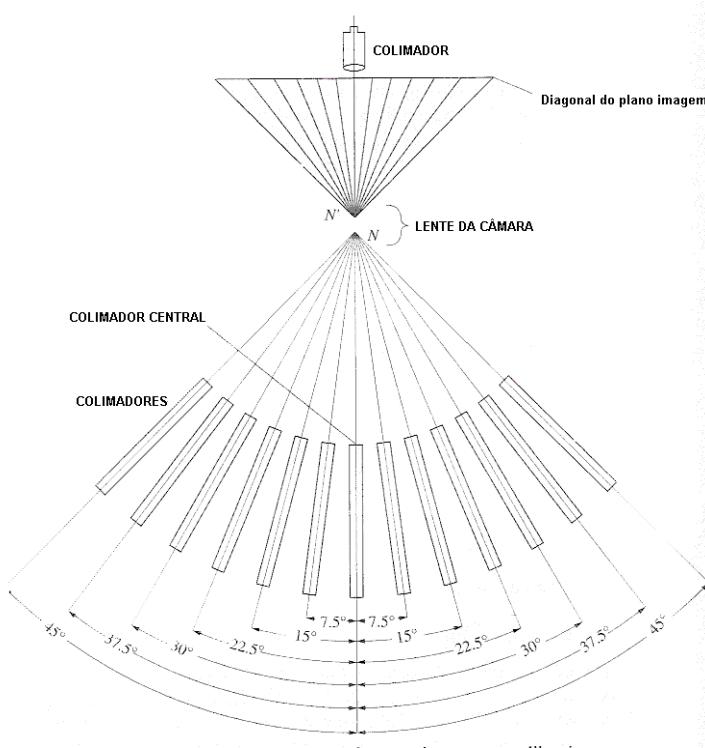


Figura 3.2.2.1 - Calibração de objectiva com multi-colimador. (adaptado de Mikhail 2001)

Depois de a câmara estar devidamente posicionada, é colocada uma chapa fotográfica no plano imagem e feita uma exposição. Na imagem surgem as marcas fiduciais, o PPA materializado pelo centro da imagem do colimador central, e as imagens dos outros colimadores ao longo das diagonais.

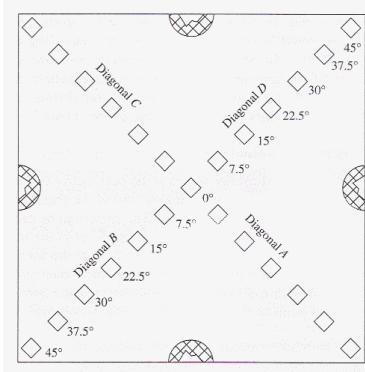


Figura 3.2.2.2 - Esquema da imagem do multi-colimador em cruz (Mikhail 2001)

A partir de medições na fotografia das distâncias radiais ao PPA e sabendo os ângulos em que se encontravam os respectivos colimadores relativamente ao colimador central pode-se determinar a distorção radial existente na imagem originada pela objectiva ao longo das quatro semi-diagonais, bem como a constante da câmara equivalente, pelas mesmas fórmulas utilizadas para a calibração com goniómetro. O Ponto Principal de Simetria (PPS) será o centro (médio) dos círculos de igual distorção radial. Havendo distorção tangencial, as imagens dos colimadores não são colineares.

3.2.3 Calibração analítica

Dada a complexidade da geometria das imagens finais das câmaras digitais de sensores matriciais, que incluem sub-imagens de várias câmaras, a calibração destas em laboratório consiste numa sessão fotográfica de um campo tridimensional com muitas marcas pré-coordenadas, sendo os parâmetros de orientação interna determinados analiticamente, com algoritmos de triangulação fotogramétrica por feixes perspectivos, para cada câmara componente. As distorções determinadas são corrigidas na imagem final, de modo que a imagem que o cliente recebe para processar não contenha distorções radiais.

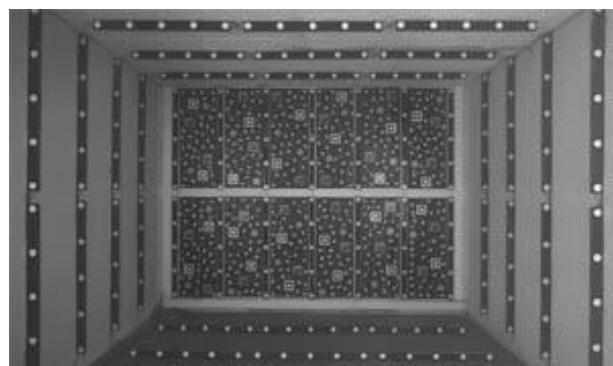


Figura 3.2.3.1 - Campo de calibração em laboratório para as câmaras Vexcel (Microsoft)

3.2.4 Certificado de calibração

Todos os dados de orientação interna de uma câmara são registados num documento denominado *certificado de calibração* identificado com o número de série da câmara e da(s) objectiva(s) submetida(s) a calibração.

Do certificado de calibração constam normalmente os seguintes elementos:

- identificação da câmara: marca, modelo, nº de série
- identificação da objectiva: marca, tipo
- identificação da entidade calibradora
- data de calibração
- método de calibração utilizado
- constante da câmara equivalente (calibrada)
- coordenadas foto do ponto principal de auto-colimação (PPA)
- coordenadas foto do ponto principal de simetria (PPS)
- coordenadas foto das marcas fiduciais
- esquema de identificação das marcas fiduciais
- distorção radial ao longo das quatro semi-diagonais
- distorção radial média

A distorção radial aparece normalmente tabelada em função da distância radial ao PPS e ainda sob a forma de gráfico Δr vs r .

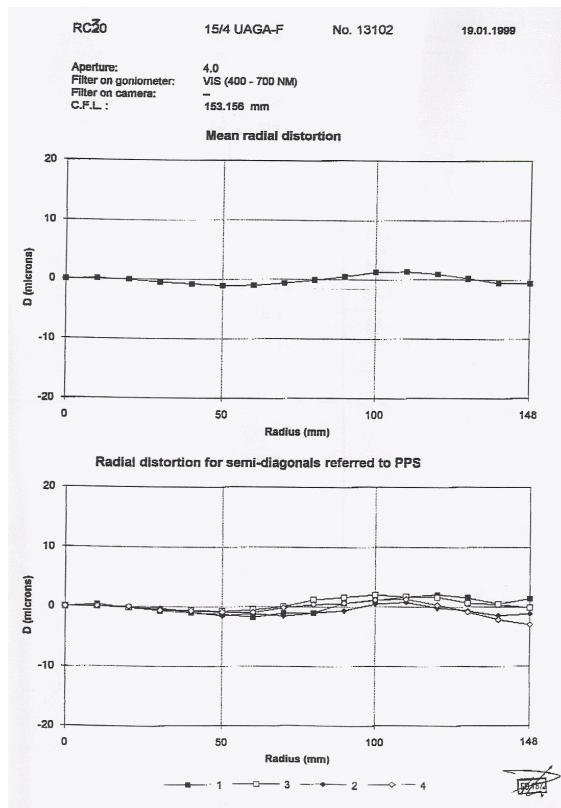


Figura 3.2.4.1 - Exemplo de página de certificado de calibração com gráficos da distorção radial

Normalmente aplica-se o valor da distorção radial média para todos os pontos que se encontram sobre o círculo correspondente a cada distância radial. Para câmaras terrestres é usual ajustar um polinómio de potências ímpares de r aos valores de Δr . A distorção radial fica então definida pelos coeficientes k_i desse polinómio:

$$\Delta r = k_1 r^3 + k_2 r^5 + k_3 r^7 + \dots$$

3.2.5 Correcções às coordenadas foto

O modelo matemático básico utilizado na fotogrametria para relacionar as fotografias com o objecto parte do pressuposto de que a fotografia é uma projecção central do objecto. Na realidade, o facto de entre a foto e o objecto existir uma atmosfera não homogénea, uma objectiva composta por várias lentes que poderão desviar-se ligeiramente da esfericidade, alinhadas sobre o mesmo eixo que poderá também ele desviar-se ligeiramente de uma recta, faz com que os raios luminosos reflectidos pelo objecto e que atravessam a atmosfera e a objectiva antes de atingirem o plano do sensor não sejam rectilíneos. Para além disso, o facto de a imagem ser captada por um suporte físico que poderá não ser plano altera a relação matemática teórica existente entre coordenadas foto e coordenadas objecto (terreno).

Um modelo analítico fotogramétrico deve entrar em linha de conta com todos os efeitos físicos que afastam a fotografia real do modelo matemático ideal. Nem todos esses efeitos são facilmente modeláveis, mas a maior parte deles é satisfatoriamente compensada no âmbito da triangulação fotogramétrica com auto-calibração. Pode-se, no entanto, abordar o problema de outro modo. Há um conjunto de correcções ao modelo matemático da projecção central que se podem aplicar directamente às coordenadas foto de um qualquer ponto, de modo a obter as coordenadas foto ideais que o mesmo ponto teria se a fotografia fosse de facto uma projecção central matemática, sem sofrer as influências perturbadoras.

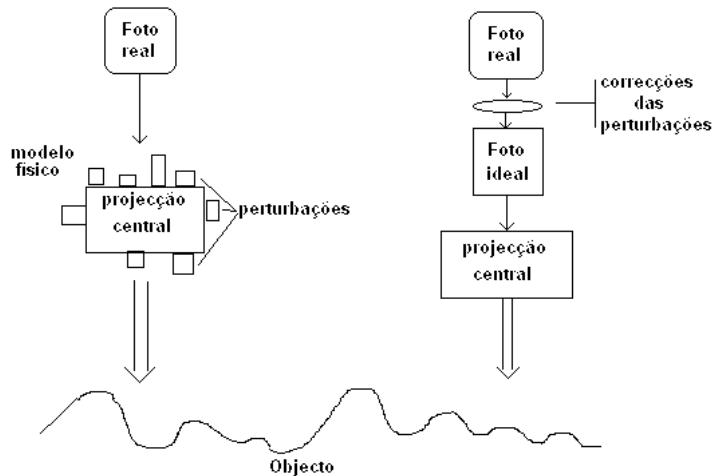


Figura 3.2.5.1 - Abordagens diferentes para passar da fotografia ao objecto: (esq.) medir na foto real e aplicar um modelo complexo, ou (dir.) corrigir as medições feitas na foto real para obter a foto ideal e aplicar-lhe um modelo simples.

As correcções às coordenadas foto de maior importância na fotogrametria aérea são:

- a descentragem do ponto principal
- a distorção radial (positiva ou negativa) da objectiva das câmaras aéreas analógicas
- a distorção radial (positiva) devida à refracção atmosférica
- a distorção radial (negativa) devida à curvatura terrestre

Em fotogrametria terrestre e próxima tem também importância a distorção tangencial provocada pela descentragem das lentes.

O objectivo desta operação de correcção das coordenadas foto é obter coordenadas foto referidas ao PPA, livres destas influências.

Para isso há que atender a que as coordenadas foto medidas se referem ao ponto médio e as distorções radiais constantes no certificado de calibração se referem ao PPS.

A sequência de operações deve ser a seguinte:

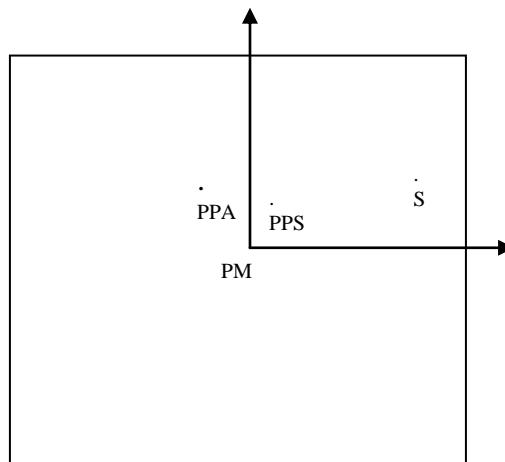


Figura 3.2.5.2. Origens dos diferentes sistemas de coordenadas foto

$$S = (x, y)_{PM}$$

- coordenadas foto medidas do ponto S

$$S' = (x', y')_{PPS}$$

- coordenadas do ponto S referidas ao PPS

$$x' = x - x_{PPS}$$

$$y' = y - y_{PPS}$$

$$r = \sqrt{(x'^2 + y'^2)}$$

- distância radial do ponto S' ao PPS

$$\Delta r = f(r)$$

- distorção radial de S' saída do certificado de calibração

$$\Delta x' = \Delta r * \cos \alpha$$

$$\Delta y' = \Delta r * \sin \alpha$$

$$\alpha = \arctan(y'/x')$$

- componentes da distorção radial em x e y

$$\begin{aligned} S'' = (x'', y'')_{\text{PPS}} & \quad - \text{coordenadas corrigidas da distorção radial} \\ x'' = x' + \Delta x' \\ y'' = y' + \Delta y' \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S''' = (x''', y''') & \quad - \text{coordenadas corrigidas referidas ao PM} \\ x''' = x'' + x_{\text{PPS}} \\ y''' = y'' + y_{\text{PPS}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S^o = (x^o, y^o) & \quad - \text{coordenadas corrigidas referidas ao PPA} \\ x^o = x''' - x_{\text{PPA}} \\ y^o = y''' - y_{\text{PPA}} \end{aligned}$$

Estas coordenadas podem ainda ser corrigidas da influência da refracção atmosférica e da curvatura terrestre. Ambas as correções têm efeitos radiais mas de sentidos contrários. Para a correção da refracção atmosférica é necessário adoptar um modelo de atmosfera. A correção da curvatura terrestre é especialmente importante para pequenas escalas. Uma fórmula aproximada para a correção radial devida à curvatura terrestre é a seguinte (Kraus, 1987) onde Z representa a altura de voo sobre o nadir, R o raio médio da Terra, c a constante da câmara e r a distância radial do ponto:

$$\Delta r_t = (r^3 \cdot Z) / (2 \cdot R \cdot c^2)$$

3.2.6 Transformação de coordenadas imagem para coordenadas foto

Enquanto na era da fotogrametria analítica as coordenadas foto eram medidas directamente (ou indirectamente) sobre a foto em suporte analógico, na era da fotogrametria digital a medição de coordenadas é feita sobre imagens digitais constituídas por um conjunto de pixels de determinadas dimensões. Como os modelos matemáticos fotogramétricos relacionam coordenadas foto (e não pixel) com coordenadas objecto (terreno), há necessidade de transformar as coordenadas pixel que se medem no monitor de um computador em coordenadas foto referidas ao PM (e eventualmente corrigi-las da distorção radial).

3.2.6.1 Caso de imagens digitais

Consideram-se, neste contexto, imagens digitais aquelas obtidas por câmaras digitais. Para a transformação de coordenadas pixel de um ponto em coordenadas foto é necessário conhecer *a priori* quatro parâmetros da imagem:

- dimensão do pixel em x - pix x
- dimensão do pixel em y - pix y
- nº de pixels da imagem em x - npix x
- nº de pixels da imagem em y - npix y

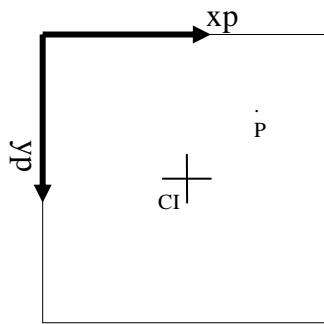


Figura 3.2.6.1.1. Sistema de coordenadas pixel

$P = (x_p, y_p)$ - coordenadas pixel (referidas ao canto superior esquerdo)

$P' = (x_{ci}, y_{ci})$ - coordenadas pixel (referidas ao centro da imagem)

$$x_{ci} = x_p - (npix \cdot x)/2$$

$$y_{ci} = (npix \cdot y)/2 - y_p$$

$P'' = (x, y)$ - coordenadas foto para qualquer ponto

$$x = x_{ci} \cdot \text{pix } x$$

$$y = y_{ci} \cdot \text{pix } y$$

3.2.6.2 Caso de imagens digitalizadas

Consideram-se, neste contexto, imagens digitalizadas as correspondentes a fotografias analógicas transformadas em digitais através de um scanner. Nestas imagens estão presentes as marcas fiduciais, sendo o sistema de coordenadas foto definido por elas.

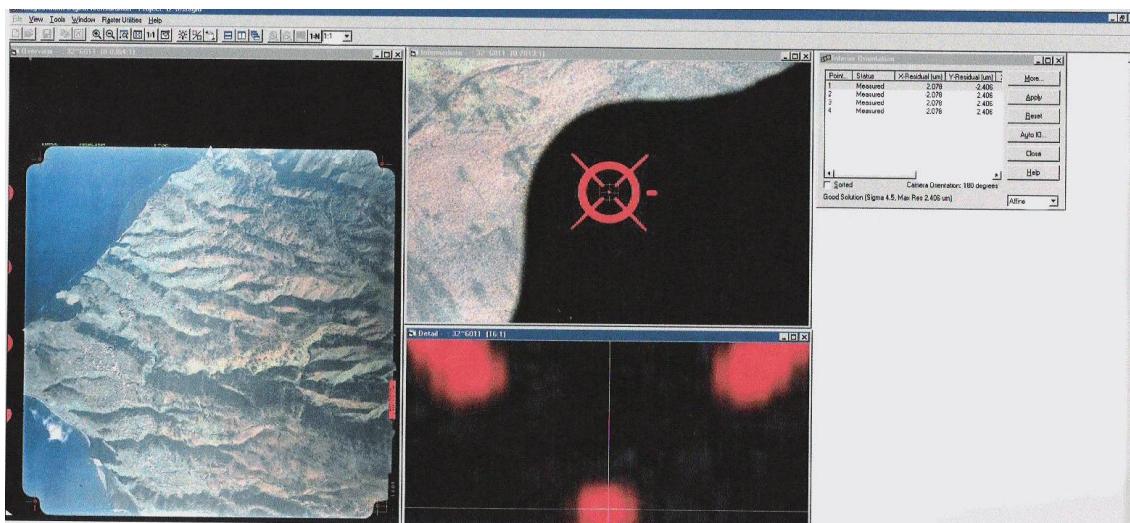


Figura 3.2.6.2.1 - Medição de marca fiducial em estação digital

A passagem de coordenadas pixel a coordenadas foto é realizada por uma transformação geométrica plana entre os dois sistemas de coordenadas. São dadas as coordenadas foto das marcas fiduciais constantes do certificado de calibração e são medidas as suas coordenadas pixel na imagem digitalizada. As marcas fiduciais vão servir assim de pontos idênticos nos dois sistemas para determinar os parâmetros de transformação entre eles. No caso de a imagem possuir apenas 4 marcas fiduciais, calculam-se os parâmetros de uma transformação afim. No caso de a imagem ter 8 marcas podem-se determinar os parâmetros de uma transformação bilinear de oito parâmetros. As equações das duas transformações são as seguintes onde x,y representam coordenadas foto de um ponto e xp,yp representam coordenadas pixel do mesmo ponto.

$$\text{Transformação afim (6 parâmetros): } \begin{cases} x = a_{01} + a_{11}xp + a_{21}yp \\ y = a_{02} + a_{12}xp + a_{22}yp \end{cases}$$

$$\text{Transformação bilinear (8 parâmetros): } \begin{cases} x = a_{01} + a_{11}xp + a_{21}yp + a_{31}xp \cdot yp \\ y = a_{02} + a_{12}xp + a_{22}yp + a_{32}xp \cdot yp \end{cases}$$

Cada marca fiducial medida origina duas equações, pelo que são necessárias no mínimo 3 marcas para determinar os 6 parâmetros da transformação afim. A quarta marca proporciona uma pequena redundância suficiente para calcular resíduos e concluir sobre a qualidade da transformação, mas não suficiente para indicar se houve erros nas medições individuais. No caso de haver 8 marcas e estas forem medidas, a redundância é maior em qualquer dos tipos de transformação, podendo os resíduos indicar neste caso eventuais erros nas medições individuais que deverão ser repetidas. De posse dos parâmetros a_{ij} determinados a partir das marcas fiduciais, qualquer outro ponto medido na imagem digitalizada pode ser automaticamente transformado em coordenadas foto aplicando as fórmulas da transformação escolhida já com os parâmetros conhecidos que se consideram constantes para toda a imagem.

3.3 Parâmetros de orientação externa

Os parâmetros de orientação externa definem, no espaço objecto, a posição e orientação da câmara no momento em que foi obtida a fotografia. Seis parâmetros independentes são suficientes para definir a orientação externa de uma fotografia. São eles as coordenadas objecto do centro de projecção e três ângulos independentes que definem univocamente a orientação do eixo fotográfico (= eixo óptico) no espaço. Analiticamente, estes três ângulos são os parâmetros de uma matriz de rotação espacial que transforma as coordenadas objecto (terreno) de um qualquer ponto em coordenadas foto. Em fotogrametria aérea é usual utilizar os ângulos ω , φ , κ como parâmetros da orientação externa, sendo ω um ângulo de rotação em torno do eixo dos XX, φ um ângulo de rotação em torno do eixo dos YY e κ um ângulo de rotação em torno do eixo dos ZZ do sistema de coordenadas objecto.

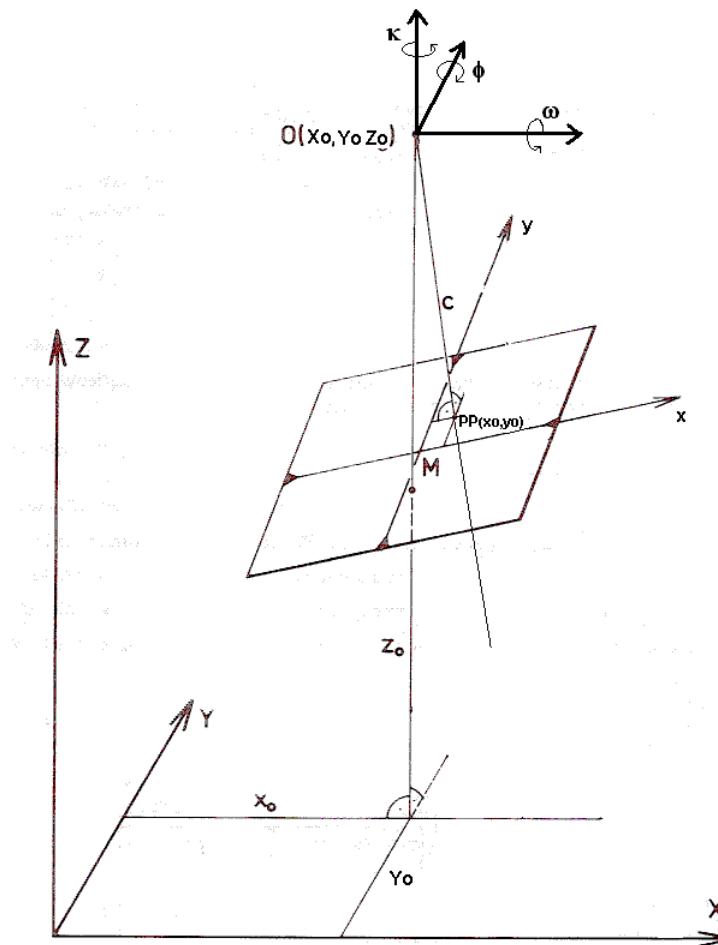


Figura 3.3.1 - Parâmetros de orientação externa

É possível utilizar outro conjunto de 3 ângulos independentes mais convenientes para determinadas aplicações. São também usuais os conjuntos de ângulos de rotação *pitch*, *roll*, *yaw* (ou *heading*) e ainda azimute, inclinação e rotação em torno do eixo óptico.

A determinação destes parâmetros pode ser feita de um modo directo ou de um modo indirecto. O modo indirecto é mais comum e consiste na determinação analítica dos parâmetros a partir de um mínimo de três pontos não colineares de coordenadas objecto conhecidas (pontos fotogramétricos ou triangulados) que apareçam na fotografia. O modo directo consiste na determinação dos parâmetros na fase de aquisição da fotografia. Em fotogrametria aérea a orientação externa pode ser determinada directamente em voo com um sistema GPS/IMU.

3.4 Parâmetros de orientação relativa

Os parâmetros de orientação relativa definem como se posiciona e orienta um plano imagem relativamente a um outro na fase de aquisição das duas fotos em causa. A recuperação desta orientação permite criar o modelo estereoscópico da parte do objecto comum às duas fotografias. A orientação relativa de duas fotografias fica definida num sistema de coordenadas modelo tridimensional (que não tem de coincidir com o sistema de coordenadas terreno) pelo vector que une os dois centros de projecção das fotos - a base do modelo - e pelas rotações espaciais relativas das duas fotografias. Pelo facto de, na fase de aquisição, existir

para cada ponto do objecto, uma complanaridade entre os raios luminosos que formam as imagens de um ponto nas duas fotos e a base do modelo (plano epipolar), apenas cinco dos parâmetros referidos são independentes e por isso suficientes para definir a orientação relativa. O conjunto dos cinco parâmetros escolhidos é variável. Pode-se considerar, por exemplo, a base b como fixa, bem como a rotação ω de uma das fotos, ($bx, by, bz, \omega_1 = \text{constantes}$), ficando por determinar as rotações $\phi_1, \kappa_1, \omega_2, \phi_2, \kappa_2$ no sistema de coordenadas modelo, ou seja, serem estes os 5 parâmetros definidores da orientação relativa das duas fotos.

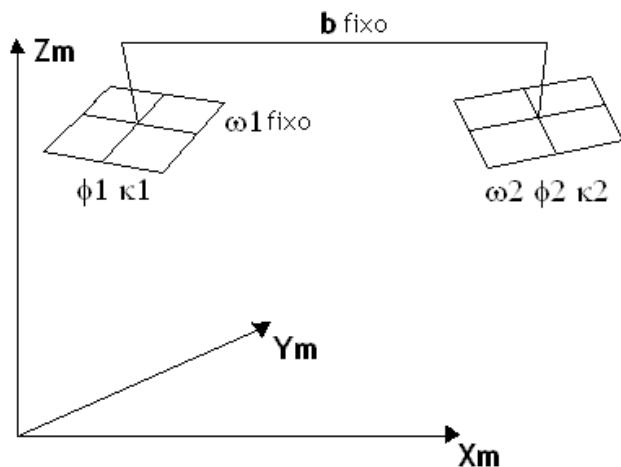


Figura 3.4.1 - Parâmetros de orientação relativa (par independente)

Outra abordagem consistirá em considerar a posição espacial de uma das fotos como fixa, bem como a componente x da base, ($\omega_1, \phi_1, \kappa_1, bx = \text{constantes}$) sendo necessário determinar $\omega_2, \phi_2, \kappa_2, by$ e bz .

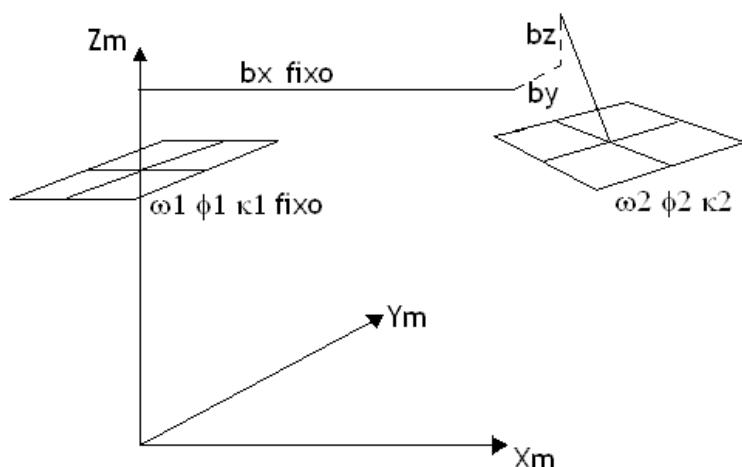


Figura 3.4.2 - Parâmetros de orientação relativa (anexação de segunda foto)

Após o primeiro par de fotografias estar orientado relativamente, esta segunda abordagem pode ser utilizada para determinar a orientação de uma terceira fotografia relativamente à segunda no mesmo espaço modelo, e sucessivamente orientar relativamente todas as outras fotos de uma cobertura fotográfica. A determinação analítica simultânea de todos os parâmetros de orientação relativa de várias fotografias deve ter em atenção que o primeiro par de fotos tem apenas cinco parâmetros independentes, mas para todos os outros pares existem seis parâmetros a determinar, pois a escala, que no primeiro par era arbitrária, deixa de o ser para os restantes sendo necessário determiná-la. Se assim não for, um raio proveniente de um mesmo ponto objecto que forme a imagem na terceira fotografia não intersectará os raios homólogos do primeiro par no mesmo ponto do espaço modelo.

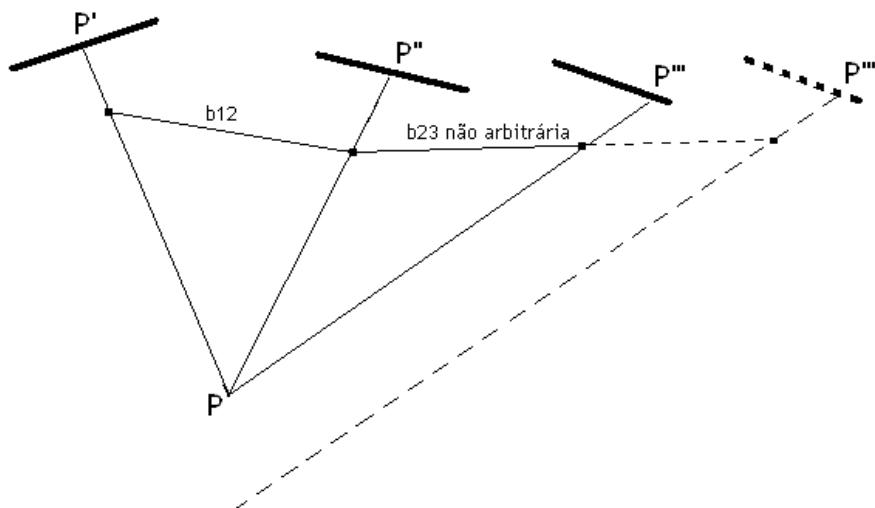


Figura 3.4.3 - Orientação relativa de várias fotos. Ao contrário de b12, a base 23 não pode ser arbitrária.

3.4.1 Métodos de recuperação da orientação relativa de um par estereoscópico

O objectivo da recuperação da orientação relativa de um par estereoscópico é a geração do modelo estereoscópico da zona do objecto que é comum nas duas fotografias. Ao longo dos tempos foram sendo desenvolvidos vários métodos para a orientação relativa de pares, adaptados aos instrumentos estereorrestituidores existentes. Essencialmente estes métodos podem-se dividir em analógicos e numéricos. Os métodos analógicos, utilizados durante décadas nos estereorrestituidores analógicos, baseavam-se nos efeitos dos movimentos incutidos aos porta-fotos na projecção óptica (real ou virtual) das fotografias. Consistiam numa sequência de passos para eliminar a paralaxe em toda a área do modelo. A paralaxe surge quando os pares de raios homólogos (correspondentes às 2 imagens do mesmo ponto objecto) não se intersectam no espaço modelo. Num plano de projecção a uma altura Z_m arbitrária, as projecções dos dois raios homólogos estão, então, separadas de um vector denominado paralaxe. As componentes desse vector paralelamente aos eixos X_m e Y_m são denominadas p_x - paralaxe em X ou paralaxe horizontal e p_y - paralaxe em Y ou paralaxe vertical.

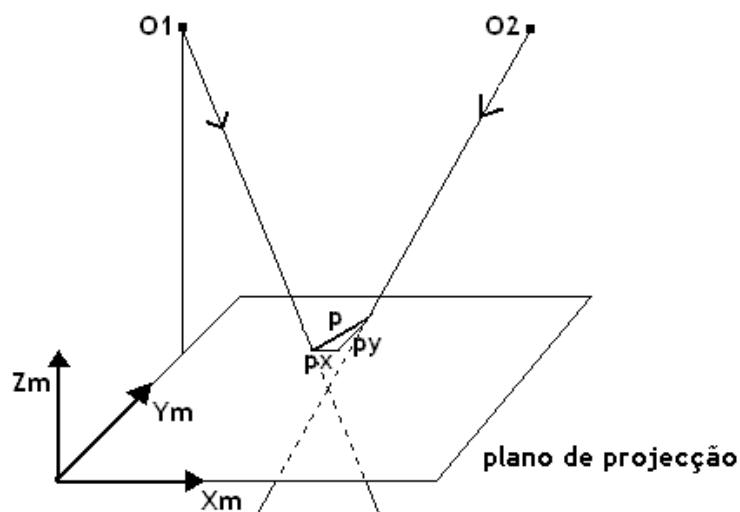


Figura 3.4.1.1 - Paralaxe no plano de projecção

É a componente p_y , a paralaxe vertical, que essencialmente impede a visualização estereoscópica, tendo que ser totalmente eliminada em todos os pontos da zona comum das fotos. Satisfeita essa condição, é percepçãoável um modelo 3D em todas as zonas onde a componente p_x esteja dentro dos limites da percepção estereoscópica humana (ângulo paraláctico ~de 0 a 1.5 graus). O modelo 3D é constituído pelos pontos de intersecção no espaço de todos os pares de raios homólogos dos pontos comuns às duas fotos.

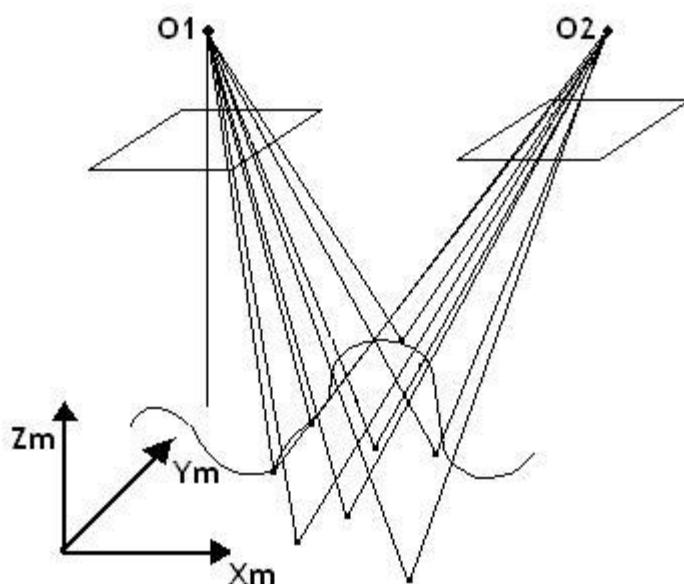


Figura 3.4.1.2. Intersecções espaciais dos pares de raios homólogos dando origem ao modelo estereoscópico

Otto von Gruber, que desenvolveu grande parte das equações diferenciais utilizadas na fotogrametria analítica, concluiu que bastava eliminar a paralaxe vertical em 5 de seis pontos estratégicos da zona comum às duas fotografias para que toda a zona ficasse livre de paralaxe, formando-se o modelo estereoscópico. Baseando-se nos efeitos das rotações espaciais dos porta-fotos na projecção dos referidos pontos, von Gruber desenvolveu um método analógico de reconstrução da orientação relativa de um par de fotos que foi utilizado durante décadas em estereorrestituidores analógicos e serviu de base a muitos outros métodos.

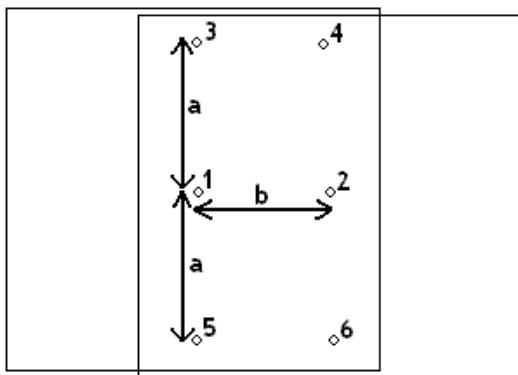


Figura 3.4.1.3 - Os seis pontos de von Gruber: b ~ base fotográfica, a - distância o maior possível

Nos estereorrestituidores analíticos e nas estações digitais a determinação dos parâmetros de orientação relativa é realizada a partir das coordenadas foto de um conjunto de pontos homólogos (coordenados nas duas fotos) num mínimo de cinco pares localizados nas zonas dos pontos de von Gruber. O operador humano apenas tem de medir as coordenadas foto em pontos homólogos no par de fotografias. Em estações digitais é, além disso, possível que operadores automáticos utilizem processos de correlação de imagens para determinar as posições de pares de pontos homólogos através da semelhança existente na distribuição local de valores de cinzento dos pixéis nas duas imagens.

Em processos automáticos, os pares de pontos homólogos determinados para cálculo dos parâmetros da orientação relativa podem localizar-se apenas nas zonas de von Gruber ou estar dispersos por toda a área do modelo. O cálculo dos parâmetros é realizado recorrendo quer a equações de colinearidade aplicadas aos pontos homólogos nas imagens e aos correspondentes pontos do modelo, quer a equações de complanaridade aplicadas aos raios homólogos e à base. Em qualquer dos casos os parâmetros da orientação relativa são estimados pelo método dos mínimos quadrados.

3.4.2 Pares normalizados ou epipolares

Enquanto o modelo estereoscópico nos estereorrestituidores analógicos e analíticos é visualizado por projecção óptica das fotografias ou de zonas homólogas destas respeitando a orientação relativa original (rotações espaciais e translações), nas estações digitais a visualização do modelo é geralmente efectuada em imagens normalizadas, obtidas a partir das originais por um processo analítico denominado

reamostragem epipolar. Este processo consiste em criar duas imagens equivalentes às originais em radiometria mas com a geometria do caso normal da fotogrametria, o que significa terem os dois eixos fotográficos paralelos, os eixos dos xx das duas fotos coincidentes e paralaxe vertical nula em todos os pontos. O processo exige o conhecimento dos 5 parâmetros angulares de orientação relativa do par determinados considerando a base constante e $\omega_1 = 0$. Envolve as equações de colinearidade entre os pontos da imagem original, o centro de projecção e os pontos da imagem normalizada. Esta operação é apenas realizada para permitir a visualização estereoscópica e facilitar a correlação de imagens em operações de feature based matching. Qualquer medição de coordenadas foto realizada é reportada à imagem original, com a respectiva orientação espacial antes de ser utilizada no cálculo de coordenadas terreno.

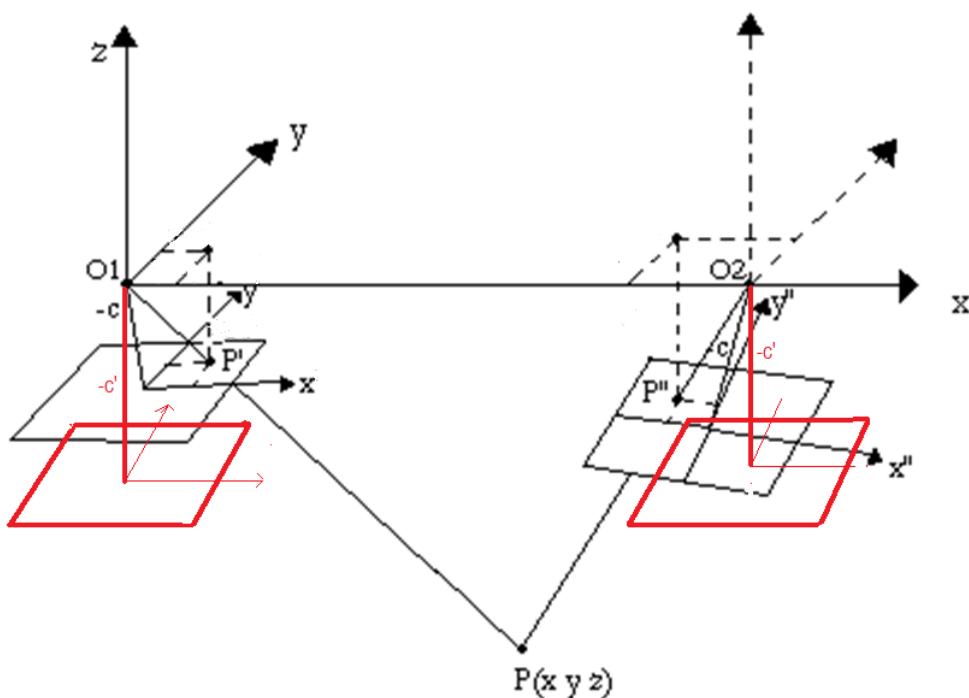


Figura 3.4.1.4 - Relação entre par orientado relativamente e par normalizado.

Para criar a nova imagem normalizada começa-se por determinar a orientação relativa do par. Em seguida formula-se uma matriz de rotação $R_{\omega\varphi k}$ para cada foto com os ângulos da orientação relativa. Assume-se um valor de c' superior à constante da câmara c . Assume-se ainda um sistema de coordenadas modelo definido como na imagem 3.4.1.4. Nestas condições, a relação entre coordenadas foto originais (x, y) e coordenadas na imagem normalizada (x', y') para cada foto é expressa pelas equações:

$$\begin{cases} x = -c \frac{r_{11}x' + r_{21}y' - r_{31}c'}{r_{13}x' + r_{23}y' - r_{33}c'} \\ y = -c \frac{r_{12}x' + r_{22}y' - r_{32}c'}{r_{13}x' + r_{23}y' - r_{33}c'} \end{cases}$$

A relação inversa virá:

$$\begin{cases} x' = -c' \frac{r_{11}x + r_{12}y - r_{13}c}{r_{31}x + r_{32}y - r_{33}c} \\ y' = -c' \frac{r_{21}x + r_{22}y - r_{23}c}{r_{31}x + r_{32}y - r_{33}c} \end{cases}$$

3.5 Parâmetros de orientação absoluta

A orientação absoluta define a posição e orientação espacial do modelo estereoscópico no espaço objecto. O conjunto de 7 parâmetros necessários para definir a orientação absoluta é constituído por um factor de escala entre coordenadas modelo e terreno, m , por três componentes de translação entre as origens dos sistemas de coordenadas modelo e terreno, X_m, Y_m, Z_m , e por três rotações espaciais entre o sistema de coordenadas modelo e o sistema de coordenadas terreno, Ω, Φ, K . Matematicamente os sistemas de coordenadas modelo e terreno são semelhantes (ambos cartesianos e de escala homogénea ao longo dos três eixos) pelo que a relação espacial entre as coordenadas num e outro sistema se pode determinar por uma transformação espacial de semelhança. A determinação dos sete parâmetros dessa transformação é realizada a partir de um conjunto mínimo de três pontos não colineares dos quais se conhecem as coordenadas terreno (pontos de apoio) e se meçam as coordenadas modelo no modelo estereoscópico.

4- Câmaras métricas aéreas

As fotografias aéreas são utilizadas para dois campos genéricos de aplicação:

- fotointerpretação : análise e processamento de informação principalmente qualitativa da foto
- fotogrametria: análise e processamento de informações geométricas, quantitativas, da foto

Para a fotointerpretação é exigida essencialmente uma grande qualidade de reprodução de pormenores e de diferenciabilidade dos objectos, ou seja, a nitidez da imagem, o poder resolvente do filme e o número de cores diferentes são aqui da maior relevância. A precisão da geometria não é primordial.

Para a fotogrametria, no entanto, é não só importante a nitidez e o poder resolvente, como também a precisão da geometria (ausência de distorções e aberrações da objectiva).

Portanto, para realizar fotogrametria aérea só se podem utilizar câmaras métricas aéreas, enquanto que, para a fotointerpretação se podem usar além das câmaras métricas outras câmaras ou sensores de variada geometria de captação.

No presente capítulo, no âmbito da fotogrametria para produção cartográfica, serão analisadas as câmaras métricas aéreas começando pelas analógicas, que dominaram o mercado da fotogrametria aérea durante mais de sessenta anos continuando a ser relevantes, e apresentando seguidamente as câmaras aéreas digitais com maior implantação no mercado actual.

4.1 Câmaras métricas aéreas analógicas

As câmaras aéreas analógicas produzem fotografias em suporte de filme. Estas câmaras são concebidas para serem montadas de um modo permanente numa plataforma aérea (avião, vai-vem espacial, estação orbital). O caso mais frequente é serem instaladas em aviões. Têm, por isso, que ser adequadas ao funcionamento do avião, não podendo, por exemplo, causar interferências electromagnéticas nem perturbar de algum modo o funcionamento normal do aparelho.

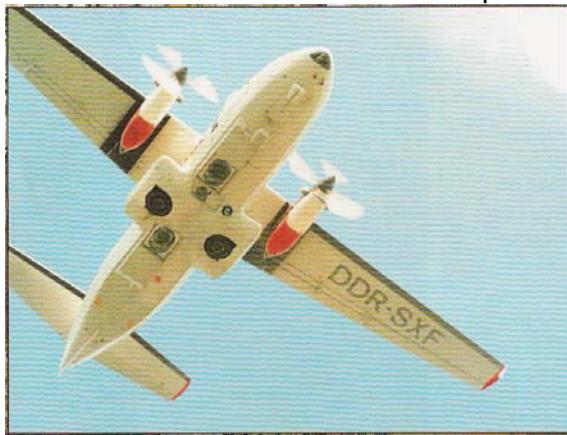


Figura 4.1.1 - Avião fotogramétrico com duas câmaras montadas

Quando se realiza um voo fotográfico, pretende-se normalmente obter uma série de faixas de fotografias que cubram no seu conjunto a porção de superfície

terrestre que se pretende levantar fotogrametricamente. Essa cobertura deve ser feita de tal modo a tornar possível a restituição (por estereoscopia ou ortorrectificação) de toda a zona coberta. Para isso, as fotografias devem ser obtidas com os eixos aproximadamente paralelos e de modo a haver uma determinada sobreposição entre elas (duas a duas), pois só a zona de sobreposição pode ser observada e restituída estereoscopicamente (em 3D). No caso da rectificação a sobreposição destina-se a permitir a utilização apenas da zona central das fotos para a ortofoto final.



Figura 4.1.2 - Interior da cabine com duas câmaras montadas

Normalmente executam-se os voos fotográficos para efeitos cartográficos com uma sobreposição longitudinal (sobreposição das fotos ao longo de cada fiada) de 60% da dimensão da foto. Para evitar lacunas entre fiadas exige-se uma sobreposição lateral de pelo menos 20%.

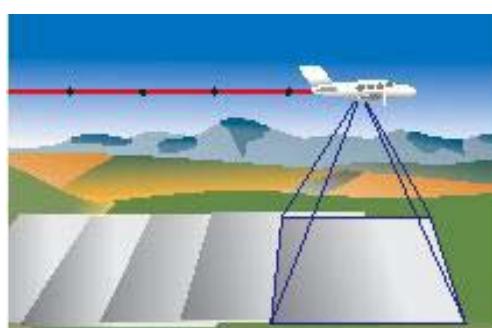


Figura 4.1.3 - Voo fotográfico com câmara analógica

Para garantir a sobreposição longitudinal entre fotos consecutivas, e devido à grande velocidade do avião (aprox. 300 km/h), é necessário que a câmara esteja

equipada com dispositivos que automatizem o processo de obtenção de fotos, ou seja, que permitam disparar consecutivamente, sendo os intervalos de tempo entre disparos uma função da velocidade do avião e do valor da sobreposição longitudinal pretendida.

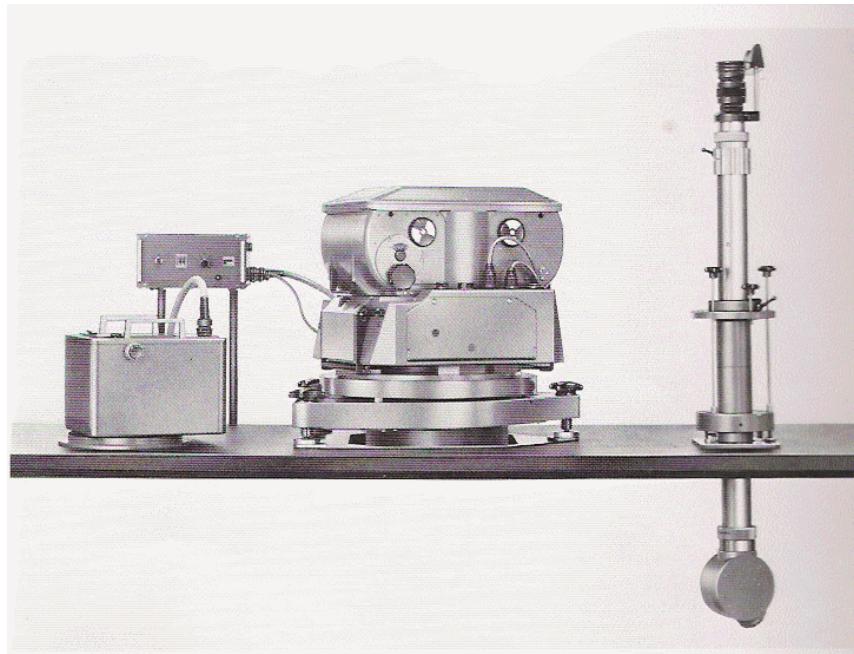


Figura 4.1.4 - Câmara aérea Zeiss RMK e acessórios. Da esquerda para a direita: regulador de sobreposição, motor, corpo da câmara, telescópio de navegação

Uma câmara métrica aérea analógica tem os seguintes componentes:

- Uma base horizontalizável por meio de 3 parafusos, por controle remoto a partir do telescópio de navegação ou automaticamente por um sistema inercial. A base assenta num anel de borracha (para amortecer as vibrações) sobre uma abertura na fuselagem inferior do avião.
- Um bloco com um motor que acciona o processo automático de obtenção das fotos.
- Um cone com a objectiva que assenta no centro do anel da base e contém na sua parte superior um plano de vidro onde se encontram as marcas fiduciais, contra o qual o filme será planificado na altura da exposição.
- Um magazin com o filme que assenta em cima do cone e contém, além das bobinas de filme, um mecanismo de vácuo para planificar o filme.

Exteriormente ao corpo principal da câmara, mas com ela interligados e montados numa abertura da fuselagem estão ainda:

- o regulador de sobreposição,
- o telescópio de navegação cuja objectiva faz um ângulo de 40 a 50 graus de inclinação para baixo do horizonte. Serve para ajudar o navegador a localizar a zona onde se deve iniciar o percurso fotográfico e, na mudança de faixas, onde se deverá recomeçar os disparos.

Nalguns modelos de câmara, o regulador de sobreposição está integrado no telescópio para comodidade do operador de câmara, que assim pode igualmente ocupar-se da navegação.

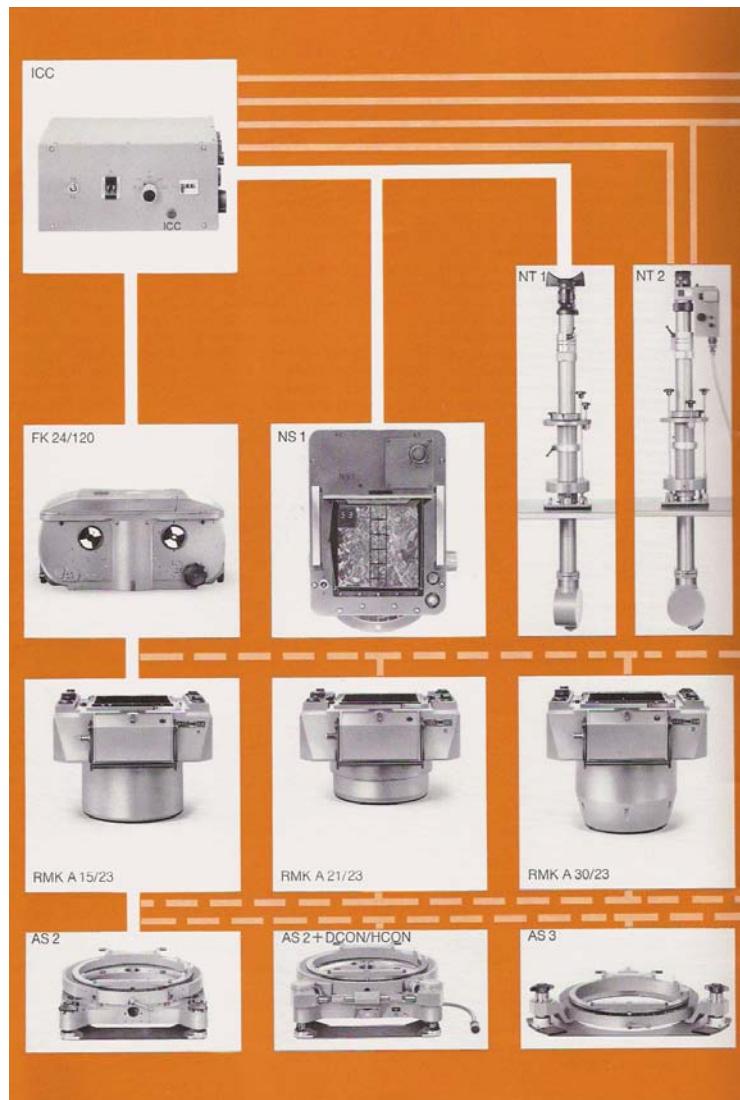


Figura 4.1.5 - Componentes de uma câmara aérea (Zeiss RMK). De cima para baixo: motor, magazin, regulador, telescópio, várias objectivas, várias bases

Uma câmara aérea analógica é essencialmente uma máquina fotográfica de grandes dimensões com os mecanismos adequados ao seu funcionamento automatizado no tipo de plataforma aérea em que está montada. Assim, uma câmara aérea deve:

- estar associada a bons instrumentos de navegação (eventualmente com GNSS) para permitir encontrar o início do percurso do voo fotográfico e depois deste iniciado, manter o percurso , inclusivamente em altitude.

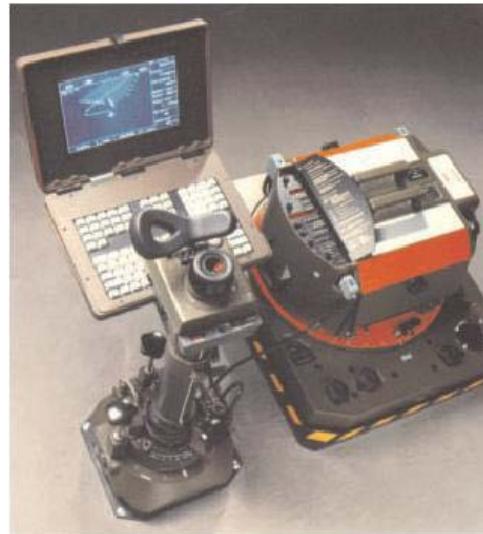


Figura 4.1.6 - Câmara aérea Leica RC30 com periscópio de navegação e sistema de navegação ASCOT por GPS

- ter um controlador de rumo e regulador de sobreposição, para se manter a sobreposição longitudinal ao longo do voo, ainda que a cota do terreno varie bruscamente.

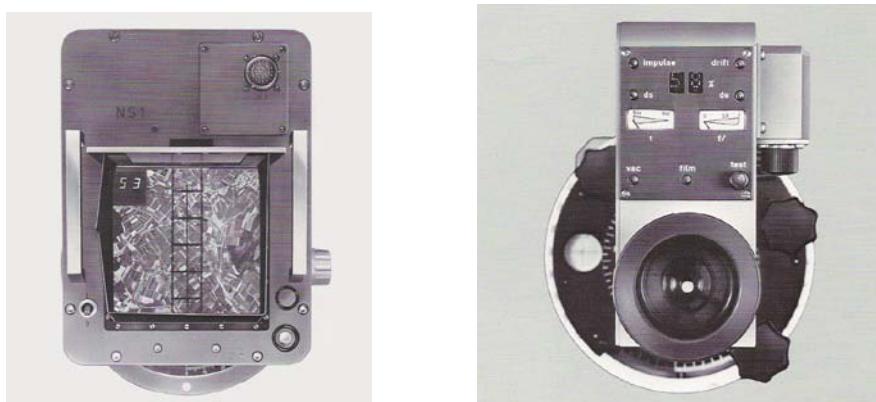


Figura 4.1.7 - reguladores de sobreposição da câmara RMK. À esquerda, unidade individual com cadeia; à direita, unidade integrada no periscópio de navegação.

- possuir um dispositivo que evite o arrastamento da imagem durante a exposição, deslocando o filme no sentido contrário ao do voo e com uma velocidade dependente da do avião. Esse dispositivo denomina-se FMC (Forward Motion Compensation)

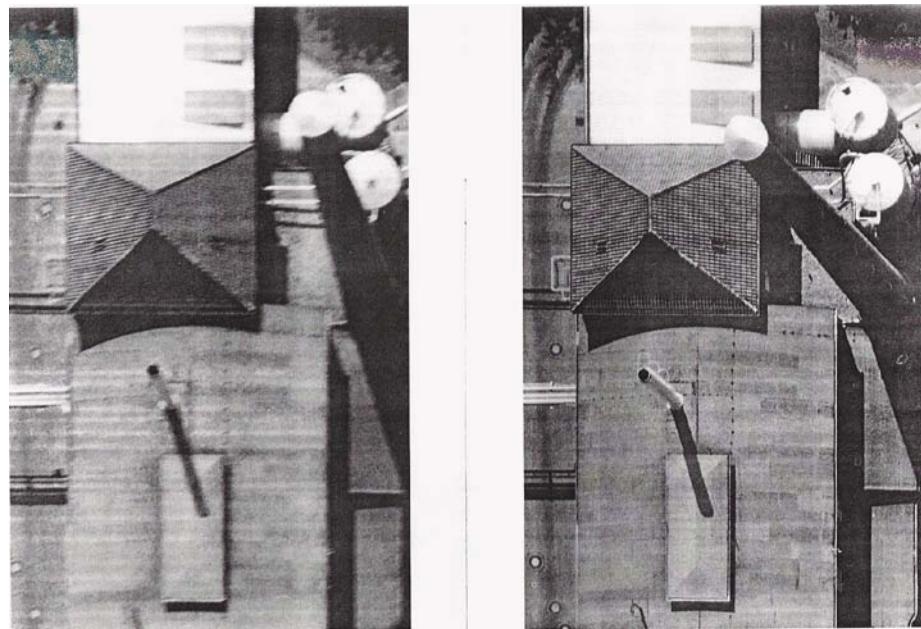


Figura 4.1.8 - Influência do FMC na qualidade da imagem. Esquerda : sem FMC, Direita: com FMC

- ter um obturador central para tempos de exposição curtos (1/150 -1/1000s) e rápido nos momentos de abertura e fecho.

Quanto aos aspectos relacionados com a orientação interna:

- uma câmara poderá ter várias objectivas intermutáveis para poder ser utilizada em missões com diversos objectivos. Em cada missão, normalmente só é utilizada uma determinada objectiva.



Figura 4.1.9 - Objectivas da Leica RC30: grande angular e de ângulo normal

- o formato das fotografias aéreas analógicas mais vulgarizado é quadrado e mede aproximadamente 23 cm x 23 cm (só a imagem do terreno). Para missões fotográficas a partir do "space shuttle" foi desenvolvida e utilizada nos E.U.A. (ITEK) uma câmara aérea de maior formato (LFC-Large Format Camera) com as dimensões aproximadas de 46 cm x 23 cm e uma constante de 30 cm. As câmaras mais antigas tinham um formato de 18cm x18cm. Tais fotografias ainda se encontram em arquivos fotográficos e são utilizadas em estudos de evolução temporal da superfície terrestre.

- devido ao grande formato das fotos, a planificação do filme durante a exposição tem de ser feita por meio de vácuo ou pressão mecânica . O filme é planificado por sucção contra uma chapa plana que se encontra no magazin sobre a parte superior do cone da objectiva.
- as marcas fiduciais encontram-se na margem da parte superior do cone da objectiva. São iluminadas artificialmente, pois a pouca luz que vem do solo não chega para as iluminar de modo a que fiquem bem impressionadas na película juntamente com a imagem do terreno.
- as marcas fiduciais distribuem-se simetricamente pela margem da foto e deverão ser 8: 4 nos cantos (zona de maior distorção) e 4 no meio de cada lado (zona mais estável). As câmaras mais antigas têm geralmente só 4 marcas fiduciais.

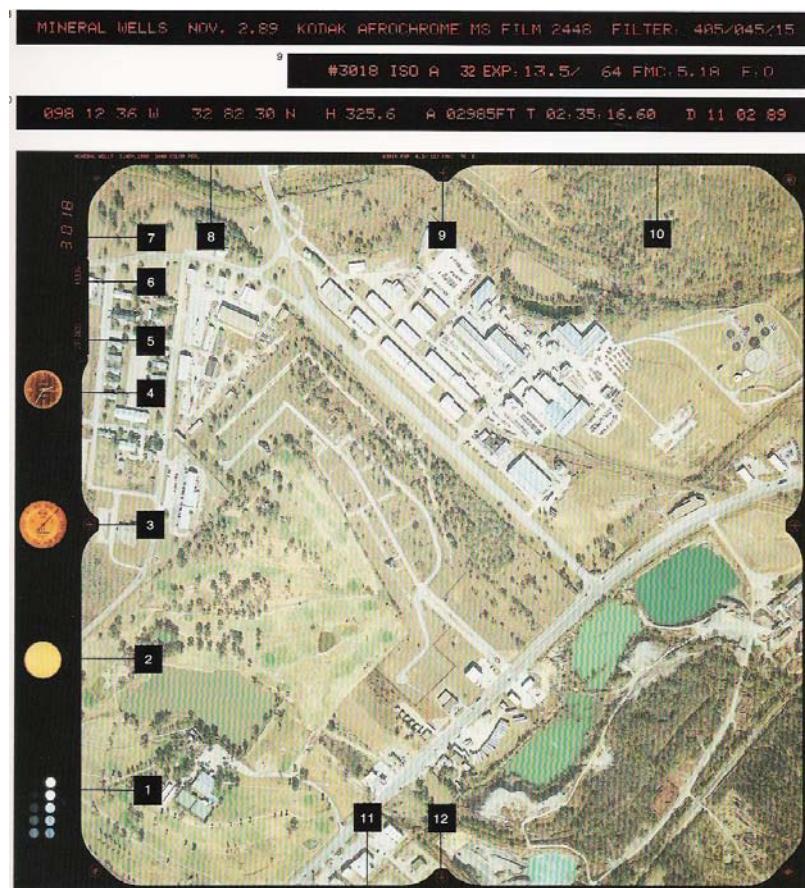


Figura 4.1.10 - Fotografia aérea com 8 marcas fiduciais (câmara LMK- Zeiss)

As informações marginais destinam-se a facilitar o trabalho posterior de organização das fotos e restituição. É, por isso, importante que cada foto tenha bastantes informações, como por exemplo, a imagem de :

- um contador automático de números de foto
- um relógio (para se determinar aproximadamente a orientação da foto a partir das sombras e da hora)
- um altímetro (para determinar a escala aproximada)

- um nível de bolha de ar (para detectar uma falta de horizontalidade da câmara no momento de exposição)
- a data, o número da câmara e o número do filme (para permitir a identificação do certificado de calibração e do protocolo de voo onde estão assentes os filmes que foram utilizados e as suas características)
- o nome do projecto (normalmente o nome da zona sobrevoada)
- a constante da câmara
- os dados da orientação externa (coordenadas geográficas do centro e ângulos da altitude do avião) parciais ou completos, caso a câmara esteja acoplada a um sistema de navegação por GPS ou por GPS/IMU.

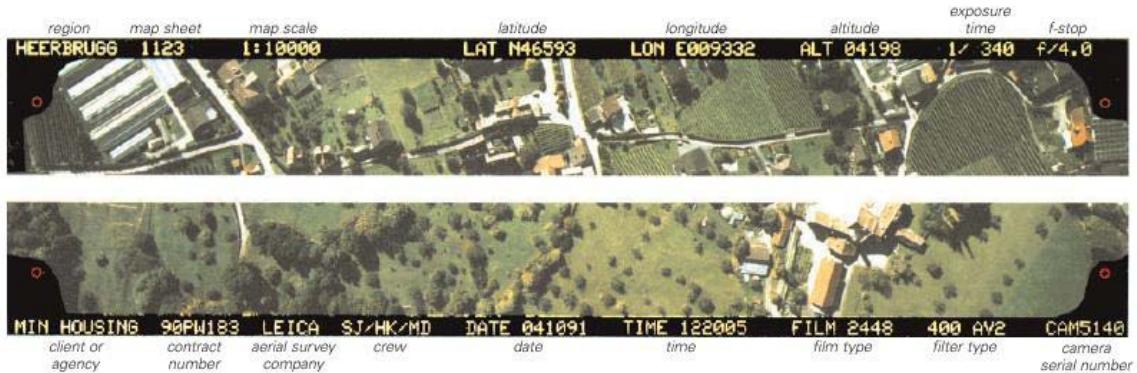


Figura 4.1.11 - Informações marginais em formato textual (Leica RC)

Os principais fabricantes de câmaras aéreas analógicas eram a firma Zeiss, com a RMK e a LMK , e a firma Leica com a RC30. Actualmente (2011) foi descontinuada a produção de câmaras aéreas analógicas.

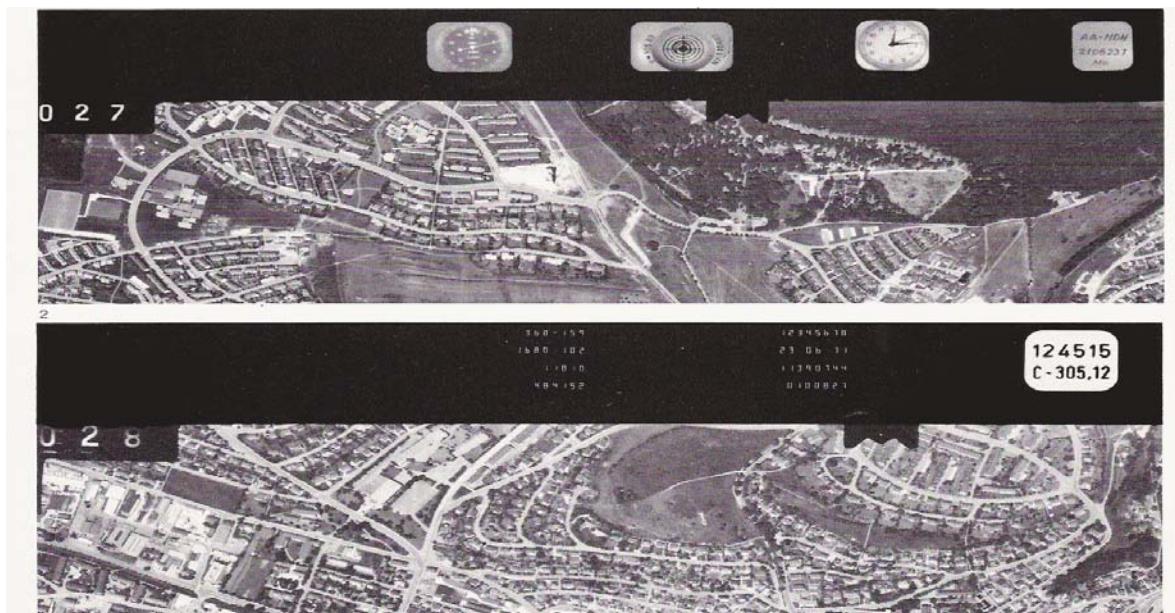


Figura 4.1.12 - Informações marginais em formato de ícones (em cima) e textual (em baixo). (Zeiss RMK)

4.2 Câmaras aéreas digitais

À medida que a utilização de câmaras digitais na Fotogrametria Terrestre se foi impondo, com todas as suas vantagens, sobretudo no respeitante à constância da orientação interna, à flexibilidade proporcionada pelas imagens digitais e à dispensa da morosa operação de scannerização, o anseio de integrar câmaras digitais na Fotogrametria Aérea foi aumentando. De facto, desde o início dos anos 90 do século passado, todo o processo fotogramétrico fluía em formato digital à excepção da aquisição da imagem que era realizada em suporte analógico.

No ano de 2000 surgiram finalmente câmaras aéreas digitais capazes de fornecer imagens comparáveis às fotografias de alta resolução proporcionadas pelas tradicionais câmaras métricas aéreas. Este acontecimento foi precedido de cerca de uma dezena de anos de investigação e criação de protótipos e, embora as câmaras já estivessem disponíveis nessa data, alguns anos se passaram até que os utilizadores as aprovassem. Desde então, a sua implantação no mercado foi rápida e encontra-se em crescente desenvolvimento.

As câmaras aéreas digitais destinam-se a aplicações cuja exigência de resolução geométrica esteja entre cerca de 1 decímetro e 1 metro no terreno. Resoluções melhores continuarão a ser fornecidas pelas câmaras métricas de filme enquanto estiverem operacionais (1 cm a 1 dm) e resoluções a partir de 1m já conseguem hoje em dia ser atingidas em imagens de satélites comerciais (ex. IKONOS 2 e Quickbird), embora a disponibilidade e o custo de tais imagens façam com que elas não sejam um substituto da fotografia aérea para fins fotogramétricos.

Foram desenvolvidos dois tipos distintos de câmaras aéreas digitais baseados em conceitos absolutamente diferentes: câmaras com sensores CCD lineares e câmaras com sensores CCD matriciais.

As componentes gerais de uma câmara digital incluem:

- o módulo do sensor, com a(s) objectiva(s), os sensores e a componente electrónica de controlo do processo de aquisição da imagem
- as unidades de memória de massa, onde fica guardada toda a informação imagem captada, equivalente ao filme das câmaras analógicas, mas de dimensões superiores (tendência decrescente)
- eventualmente um sistema GPS/IMU que debita a posição espacial e os ângulos de atitude do sensor ao longo do voo. Actualmente, seja ou não necessário para a aquisição das imagens aéreas, todos os voos fotogramétricos se realizam com apoio GPS/IMU.

As imagens originais são obtidas por um conjunto de sensores CCD, havendo simultaneamente, ao contrário do que normalmente se passa nos voos com câmara analógica, a captação de radiação pancromática, de três canais com as cores fundamentais e de um canal de radiação infra-vermelha próxima (NIR). Como os sensores CCD são sensíveis a radiação pancromática e NIR, a separação das cores é realizada por meio de filtros ópticos. Em geral, para a mesma resolução, as imagens pancromáticas digitais apresentam melhor definição do que as imagens analógicas digitalizadas, nomeadamente pela ausência do grão da emulsão

fotográfica. Quanto às cores, a separação é muito mais eficiente nas imagens digitais do que nos filmes coloridos.



Figura 4.2.1 - Comparação entre imagem digitalizada (esq.) e imagem digital (dir.). As imagens foram obtidas no mesmo voo utilizando duas câmaras, uma analógica e uma digital.(UltraCamD)

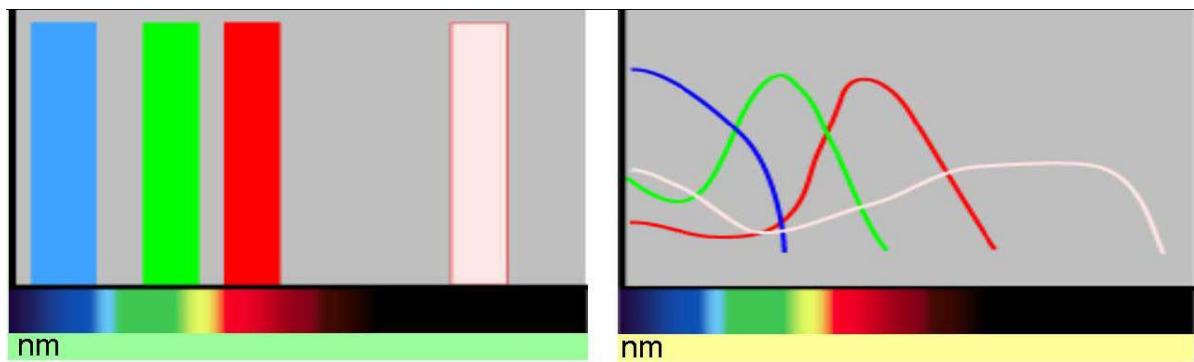


Figura 4.2.2 - Radiação captada pelos canais multispectrais das câmaras digitais (esq.) e radiação captada pelas camadas da emulsão do filme analógico.

4.2.1 Câmaras com CCD linear

O conceito do CCD linear para captar imagens teve a sua origem no sensor de três linhas desenvolvido pela DLR para ser instalado numa sonda espacial para uma missão a Marte, com o objectivo de obter a partir da mesma trajectória três perspectivas diferentes que permitissem determinar um modelo digital da

superfície do planeta e gerar mapas e ortofotos. Adaptado à realidade terrestre, o conceito deu origem a uma câmara com uma só objectiva e um número de vectores de sensores no plano focal (plano imagem) colocados em diferentes posições, mas sempre perpendiculares à linha de voo. As câmaras têm basicamente 3 vectores de sensores CCD, posicionados um no plano vertical do centro de projecção, outro posicionado para a frente no sentido do voo e outro para trás, sendo todos sensíveis no domínio pancromático do espectro electromagnético. Além destes 3 vectores básicos, as câmaras podem ter ainda 3 a 4 vectores multispectrais (R+G+B+NIR) localizados perto do vector nadiral no plano focal. A disposição dos vectores varia com o modelo, segundo o objectivo para o qual a câmara vai ser usada.

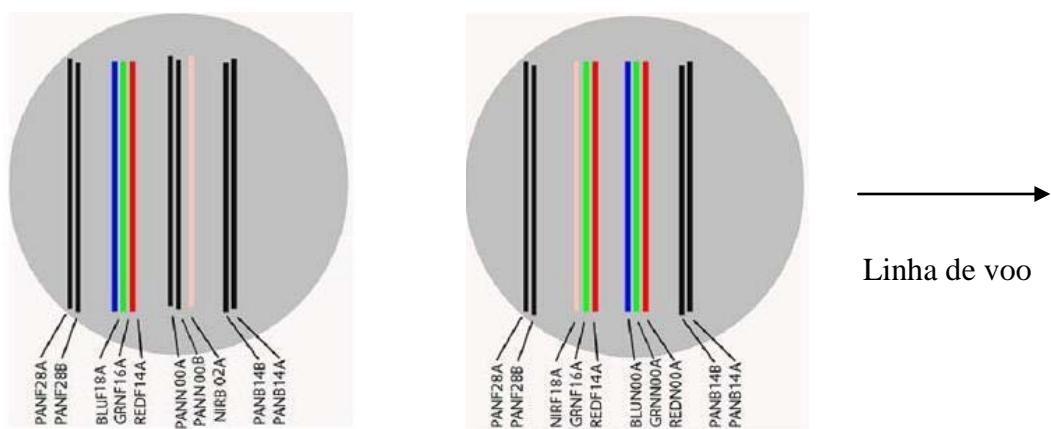


Figura 4.2.1.1 - Variantes da disposição dos vectores CCD ADS80 (Leica Geosystems)

A técnica utilizada para obter as imagens do terreno é conhecida por “push broom”, o que significa que o terreno é varrido continuamente à medida que o avião avança na linha de voo.



Figura 4.2.1.2 - Aquisição da imagem por “push-broom”

A câmara aérea deste tipo que até agora melhor se implantou no mercado da produção cartográfica é a ADS (Airborne Digital Sensor) da firma Leica Geosystems. O primeiro modelo produzido denominava-se ADS40 e actualmente (2011) está no mercado a ADS80. Descrevem-se em seguida as características principais desta câmara em particular, para ilustrar o conceito básico de todos os modelos, chamando a atenção para a rápida evolução que as câmaras digitais estão a sofrer actualmente impedindo uma descrição exaustiva de todas as características. A ADS é uma câmara composta por uma só objectiva cuja constante é de 62mm. Para além do cone da objectiva possui uma cabeça onde se encontra o plano focal com

os vectores de sensores e todas as componentes electrónicas necessárias à aquisição da informação radiométrica.



Figura 4.2.1.3 - Corpo principal da câmara ADS40 da Leica

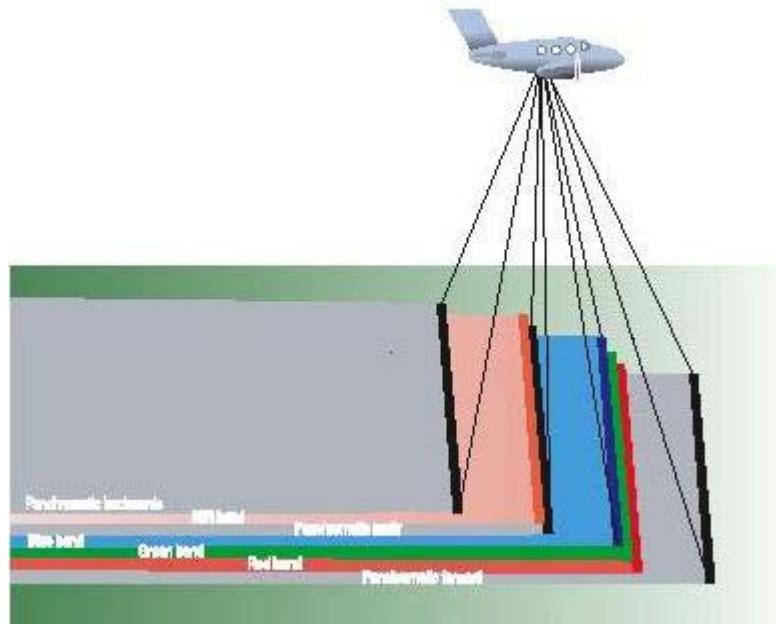


Figura 4.2.1.4 - Captação de linhas-imagem com a câmara ADS40 (Leica)

Em cada momento apenas são captadas 1 linha da imagem do terreno por cada vector. O tempo de captação e registo de cada linha é de 1.2 ms. As imagens que se obtêm após justaposição das linhas captadas são faixas contínuas do terreno fotografado (para 7 vectores: 7 faixas da mesma área do terreno sendo 3 pancromáticas e 4 multispectrais).

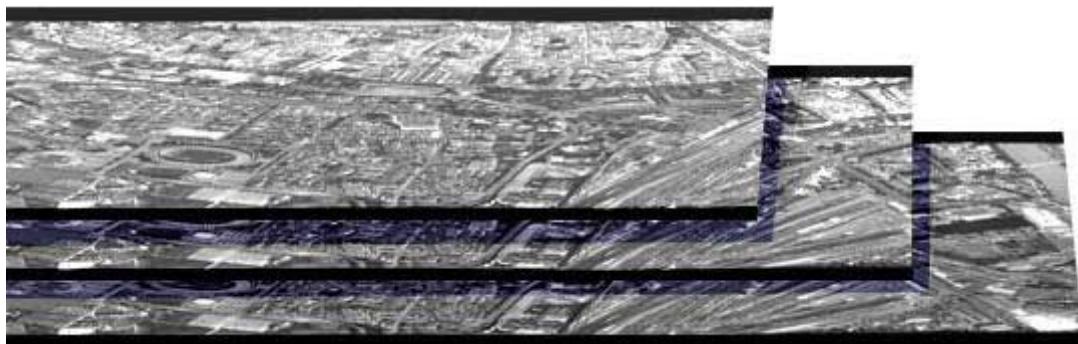


Figura 4.2.1.5 - Faixas pancromáticas obtidas com a câmara ADS (Leica)

Essas imagens originais apresentam distorções devidas ao facto de cada linha ter sido obtida de uma posição espacial diferente e a altitude do avião variar também ao longo da captação das várias linhas. Ou seja, cada linha da imagem original tem de facto uma orientação externa diferente das suas linhas vizinhas. Para essas distorções poderem ser corrigidas, a câmara tem de incluir um sistema GNSS/IMU associado que vai registando a trajectória e a altitude do avião à medida que as linhas vão sendo captadas. Tendo em conta as orientações externas, as imagens são reprocessadas de modo a criar novas imagens isentas de distorções devidas à altitude do avião.



Figura 4.2.1.6 - Extractos de uma imagem ADS: original (esq.) e pós- processada (dir.) corrigida das atitudes do avião.(Lauenroth)

As imagens pancromáticas corrigidas vão ser utilizadas no processamento fotogramétrico. Constituem 3 faixas, uma com as sucessivas perspectivas nadirais, outra com as perspectivas para a frente e outra com as perspectivas para trás na direcção do voo. Cada linha da imagem perpendicular à linha de voo é composta por 12 000 pixels de $6.5 \mu\text{m}$ que correspondem à largura da imagem sendo o comprimento da imagem variável, podendo ser teoricamente tão longo como a faixa voada.

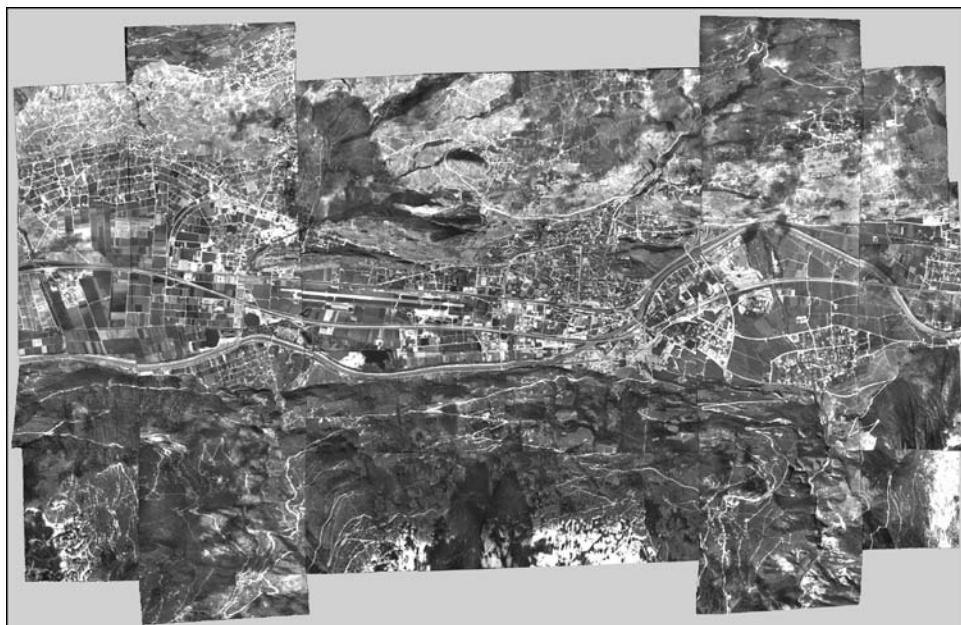


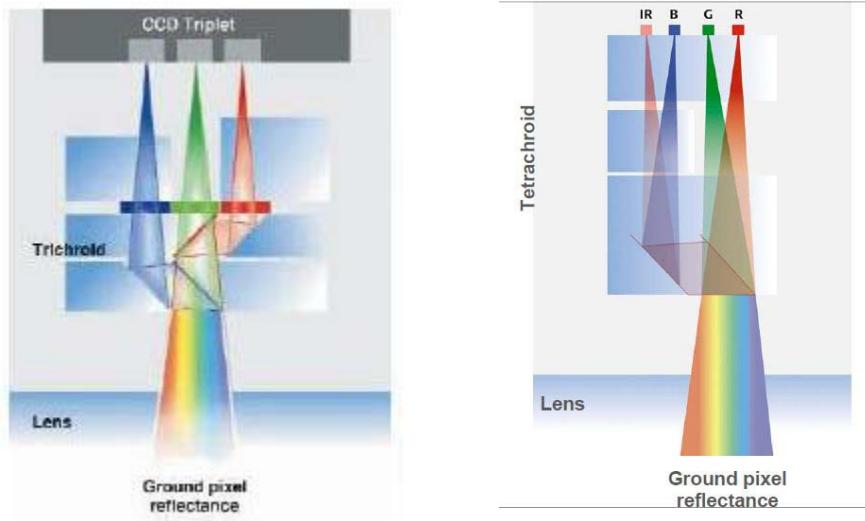
Figura 4.2.1.7 - Bloco Sion - Suíça, voado com a câmara ADS40.
Toda a área é coberta por apenas 6 imagens nadirais (Leica)

Cada linha em si tem a geometria da projecção central de polo no centro óptico da objectiva. As perspectivas para a frente e para trás de pontos correspondentes no objecto, obtidas a partir de pontos de vista diferentes, permitem a determinação automática de um Modelo Digital do Terreno. As perspectivas nadirais, juntamente com os dados do MDT, permitem a elaboração de ortofotos. A visualização estereoscópica é possível utilizando qualquer par de imagens (faixas parciais) de perspectivas diferentes.

A radiação proveniente de cada área elementar do terreno é dividida nas três cores fundamentais (R,G,B) por meio de um filtro tricróide quando passa a objectiva, sendo cada cor conduzida ao respectivo vector de sensores. O modelo mais moderno da câmara ADS inclui já um filtro tetracróide, o qual além de separar as cores fundamentais, também separa a radiação infra-vermelha conduzindo-a ao quarto vector de sensores. Este sistema de filtro garante que a radiação multispectral captada num determinado momento corresponda ao mesmo ponto do terreno. A imagem RGB construída a partir dos vectores multispectrais tem a mesma resolução geométrica que a imagem pancromática visto que os vectores contêm um número igual de sensores CCD de igual dimensão (12000 com 6.5 µm). O facto de cada sensor receber apenas uma parte da radiação total proveniente do objecto (devido ao filtro tricróide/tetracróide) pode no entanto ser problemático em termos de luminosidade da imagem colorida.



Figura 4.2.1.8 -imagem RGB corrigida da atitude do avião



4.2.1.9 - Esquema dos filtros tricróide (esq.) e tetracróide (dir.) (Leica)

As imagens coloridas finais são obtidas após a ortorrectificação, sendo associada a cada posição as respectivas cores. Este processo é necessário porque os vectores CCD para os canais multispectrais estão posicionados no mesmo plano focal mas desfasados espacialmente dos vectores pancromáticos.

Todo o processamento fotogramétrico das imagens digitais obtidas pela ADS40 tem de ser realizado com software próprio, não sendo compatível com o processo tradicional implementado na maior parte das estações digitais. Este problema tem vindo a decrescer de importância, visto a maioria de produtores de software fotogramétrico oferecerem módulos de processamento de imagens ADS para o software tradicional.



Figura 4.2.1.10 - Extracto de imagem ADS colorida -Catedral de Parma, Itália (Leica)



Figura 4.2.1.11 - Extracto de imagem ADS40 mostrando a correcta atribuição da cor ao pixel da ortofoto, inclusivamente em objectos em movimento (ondas).

4.2.2 Câmaras com CCD matricial

O conceito da câmara com CCD matricial baseia-se na exposição simultânea de um conjunto de sensores CCD que se encontram agrupados em forma de matriz (em linhas e colunas sucessivas) no plano imagem, permitindo obter uma imagem instantânea do objecto. A solução ideal para as câmaras aéreas digitais seria constituída por um sensor matricial de dimensões tais que conseguisse captar o mesmo conteúdo de informação contida no formato das fotografias das câmaras aéreas analógicas (23 cm x 23 cm). Esta solução, à época em que se lançaram as câmaras com CCD matricial estava longe de ser concretizada, quer por razões técnicas, quer por razões económicas. Os maiores sensores CCD matriciais de qualidade que eram então comercializados tinham dimensões na ordem de 1dm quadrado. Para se conseguir com tais sensores obter uma imagem aérea que se assemelhe às das câmaras tradicionais, os fabricantes optaram por acoplar vários sensores do mesmo tipo num só módulo.

As câmaras aéreas digitais com sensores matriciais são, na realidade, várias câmaras, cada uma com um sensor (ou vários associados), uma objectiva e um

obturador, as quais estão rigidamente montadas num módulo, nalguns casos intercambiável com outras câmaras aéreas analógicas da mesma marca.

Existem actualmente no mercado várias câmaras digitais de grande formato, sendo as que melhor se implantaram as das firmas Z(I Imaging (Intergraph) e Vexcel Imaging (Microsoft). Entre as várias de pequeno e médio formato são relevantes as das firmas Applanix e Dimac, mas a própria Z(I Imaging (RMK-D), a Vexcel Imaging (UltraCam L) e a Leica Geosystems (RCD105) também desenvolveram câmaras de médio formato. O objectivo de algumas das câmaras de médio formato é serem utilizadas juntamente com sistemas de LiDAR. Várias outras câmaras de pequeno formato se encontram em desenvolvimento.

Se a concepção de câmaras aéreas digitais de pequeno formato é, em si, mais simples do que no caso dos grandes formatos, passando basicamente por um sistema de montagem na plataforma aérea (avião ou helicóptero) que mantenha a objectiva vertical e virada para o solo durante o voo, a aplicação de câmaras de pequeno formato em projectos fotogramétricos só é viável pela sua integração com sistemas GNSS/IMU que permitem a determinação directa da orientação externa das fotografias.



Figura 4.2.2.1 - Câmaras digitais matriciais de pequeno formato: DIMAC e DSS Applanix

A firma Applanix produtora de sistemas GNSS/IMU lançou no mercado a câmara DSS constituída por uma só câmara integrada com o sistema GNSS/IMU. A DIMAC systems lançou a DiMAC, actualmente com vários formatos, que é constituída por um conjunto de câmaras cujo número pode variar de uma a quatro, conforme a missão a que se destina a cobertura fotográfica. Nestas câmaras, as imagens a cores são obtidas através de matrizes de Bayer.

São, no entanto, as duas câmaras de grande formato que actualmente já praticamente substituíram as câmaras métricas analógicas em projectos de grandes dimensões. Por serem de arquitectura e funcionamento distinto, segue-se uma análise em separado.

4.2.2.1 Digital Mapping Camera (Z(I Imaging Intergraph)

A DMC foi a primeira câmara aérea matricial de grande formato que apareceu no mercado, tendo sido apresentada ao público no ano 2000, tal como a ADS40.



Figura 4.2.2.1.1 - DMC- Módulo do Sensor e Unidades de Memória de Massa (SSD)

O módulo do sensor, onde é adquirida a imagem é constituído por quatro câmaras centrais e quatro periféricas. As centrais são as de maior resolução e destinam-se à captação da imagem pancromática. As periféricas destinam-se a captar as 3 cores fundamentais e a radiação infra-vermelha próxima (R+G+B+NIR).

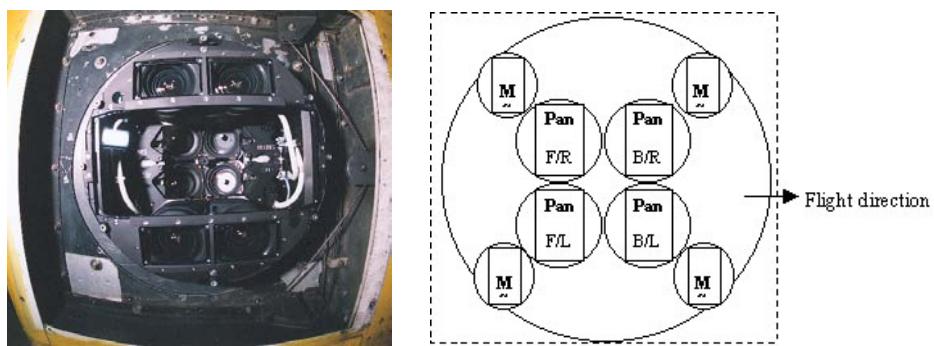


Figura 4.2.2.1.2 - Disposição das câmaras na DMC (Jacobsen)

As quatro câmaras pancromáticas (centrais) estão alinhadas de modo a que os seus eixos sejam ligeiramente convergentes. Assim garante-se que exista uma pequena sobreposição entre as imagens captadas por cada uma das câmaras.

As quatro câmaras multispectrais periféricas têm menor resolução e estão alinhadas de modo a que cada câmara capte toda a área que as câmaras centrais captam em conjunto.

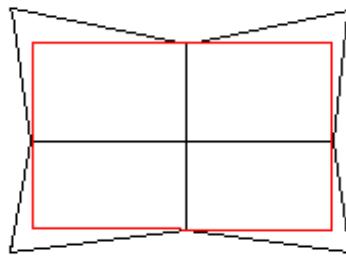


Figura 4.2.2.1.3 - Área abrangida pelas quatro câmaras pancromáticas (a preto) e por cada câmara multispectral na DMC

Todas as câmaras estão sincronizadas para dispararem simultaneamente. As sub-imagens originais obtidas por cada câmara são pós-processadas em terra a fim de se obterem imagens finais. Para gerar uma imagem pancromática, as 4 sub-imagens centrais são orientadas relativamente (3D) a um referencial interno por triangulação de feixes perspectivos com base nos pontos das zonas comuns. Seguidamente cada ponto das 4 imagens é projectado num plano formando-se uma imagem virtual (sintética). A relação existente entre cada sub-imagem e a imagem final é semelhante à que existe entre imagem original e imagem normalizada, vista no capítulo da orientação relativa.

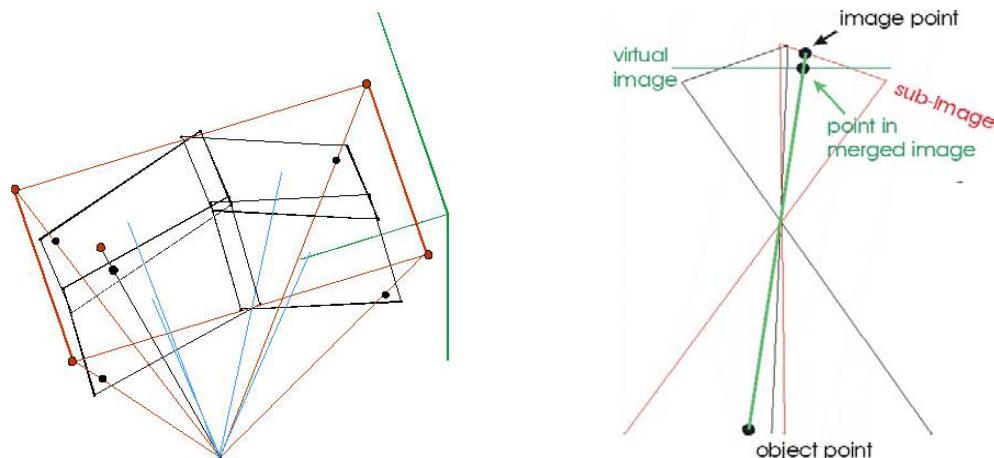


Figura 4.2.2.1.4 - Geração da imagem pancromática na DMC (Jacobsen)

A imagem final resultante é uma projecção central sem distorções cuja constante da câmara é sintética. A imagem final pancromática é um rectângulo com a maior dimensão na direcção perpendicular à do voo.

Quanto às imagens RGB e NIR, primeiramente as imagens de menor resolução das câmaras periféricas são projectadas no mesmo plano virtual e é feita uma composição de canais. A imagem colorida final é obtida por um processo designado por pan-sharpening que consiste em dividir os pixels da imagem colorida (que são de maior dimensão) para ficarem com a mesma dimensão dos da imagem pancromática, realizar em seguida uma transformação entre espaços de cor RGB→IHS, substituir o canal I pela imagem pancromática e realizar a

transformação inversa IHS→ RGB. Obtém-se deste modo uma imagem colorida com a resolução geométrica da imagem pancromática.

A obtenção de imagens digitais com este tipo de câmaras é independente de quaisquer dados de navegação (GNSS/IMU). A utilização de TDI (Time Delay and Integration) que é a realização electrónica do FMC das câmaras analógicas, permite tempos de exposição maiores. Um curto ciclo, que é o tempo necessário para que a informação captada pelos sensores seja guardada e os sensores estejam limpos para receber nova informação imagem, associado ao TDI permite que estas câmaras obtenham imagens nítidas de grande resolução no terreno.



Figura 4.2.2.1.5 - Processo de pan-sharpening: pancromática(esq.), RGB (centro) e imagem colorida final (Lauenroth)



Figura 4.2.2.1.6 - Imagem RGB da DMC , Gent-Bélgica



Figura 4.2.2.1.7 - Imagem NIR da DMC, Sul de Espanha

Recentemente (2010) a Intergraph lançou a série DMC II com uma arquitectura do módulo do sensor totalmente diferente, possível devido à evolução havida na produção dos sensores matriciais. A nova série consiste em apenas 5 câmaras montadas com os eixos paralelos com orientação nadiral (vertical visando para baixo), uma das quais é pancromática e contém apenas um único sensor matricial de maiores dimensões em vez dos quatro sensores da versão anterior da DMC. As restantes quatro câmaras destinam-se aos canais multispectrais (R+G+B+NIR) e têm, tal como na versão anterior, menor resolução. As imagens coloridas continuam a ser obtidas por pan-sharpening. A qualidade geométrica da imagem final supera a de qualquer outra imagem obtida por câmaras digitais.



Figura 4.2.2.1.8 : Sensor DALSA de grandes dimensões e DMC II (5 câmaras)

Modelo	Dimensões (imagem final)	pixel [μm]	c[mm]
DMC	13824 x 7680	12	120
DMC II 140	12096 x 11200	7.2	92
DMC II 230	15542 x 14144	5.6	92
DMC II 250	17216 x 14656	5.6	112

Tabela 4.2.2.1.1 - Características das imagens finais da DMC

4.2.2.2 UltraCam (Vexcel Imaging Microsoft)

Também a câmara digital de sensores matriciais lançada pela Vexcel Imaging em 2003 tem sido sujeita a actualizações constantes surgindo novos modelos. A UltraCamD é uma câmara digital matricial que muito rapidamente se implantou no mercado fotogramétrico. A UltraCamX é um modelo mais moderno com sensores de formato um pouco maiores. UltraCam Xp e UltraCam Xp WA são os mais recentes modelos com algumas inovações quanto aos anteriores, mas de construção e funcionamento básico igual ao do modelo inicial.

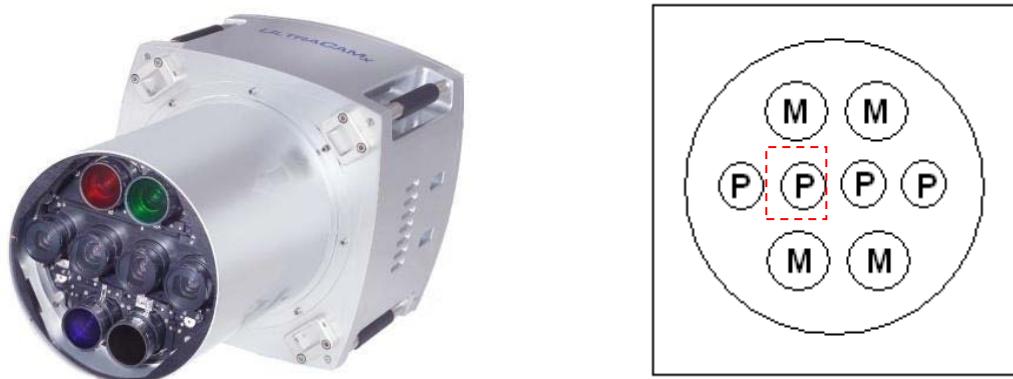


Figura 4.2.2.2.1 - Disposição das câmaras na UltraCam. Rectângulo vermelho - cone master

O módulo do sensor é constituído por oito câmaras. As quatro câmaras centrais são as que irão gerar a imagem pancromática de maior resolução, e as periféricas são de menor resolução e possuem filtros de modo a que captem separadamente as três cores fundamentais e o infra-vermelho próximo.

Todas as câmaras estão montadas com eixos ópticos paralelos, estando as quatro pancromáticas alinhadas segundo a linha de voo. Uma das câmaras pancromáticas é designada por cone master pelo facto de a imagem final ser definida no seu plano focal. Cada câmara ou cone, contem um número diferente de sensores matriciais.

- Cone 1 : 1 matriz CCD
- Cone 2 : 2 matrizes CCD
- Cone 3 : Cone Master - 4 matrizes CCD
- Cone 4 : 2 matrizes CCD

As câmaras podem ou não ser disparadas simultaneamente. Na segunda hipótese, elas vão sendo sucessivamente disparadas quando se encontram na mesma posição no espaço, o que é denominado pelos construtores da câmara como uma exposição

sintópica (= no mesmo local, em oposição a síncrona = no mesmo momento). As quatro câmaras pancromáticas disparam então a intervalos de 1 ms sendo o tempo total necessário para uma imagem completa de 3 ms.

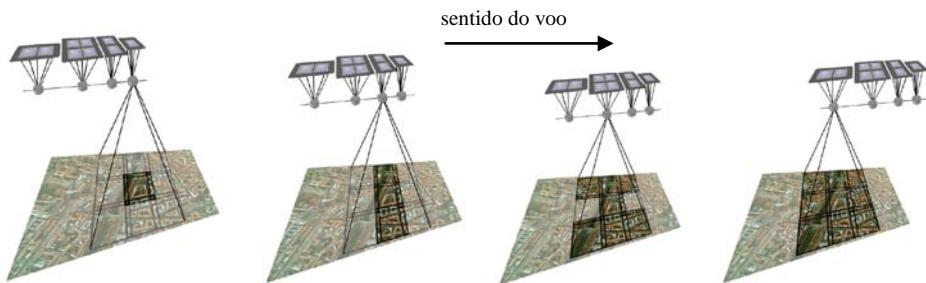


Figura 4.2.2.2.2 - Captação das sub-imagens pancromáticas na UltraCam (Vexcel)

As imagens captadas pelos 9 CCDs das 4 câmaras pancromáticas são rectificadas para o plano definido pelo Cone Master (câmara 3). A orientação relativa é realizada com base em pontos existentes nas zonas comuns entre as sub-imagens. O mosaico final é uma perspectiva central teoricamente sem distorções cuja constante da câmara é sintética. Essa imagem tem dimensões menores na direcção de voo que na perpendicular à direcção de voo. O facto de a imagem final apresentar ainda muitas distorções não toleráveis levou à evidência de que a câmara era muito sensível a vibrações que ocorriam durante a aquisição em modo sintópico, pelo que se preferiu a aquisição em modo simultâneo e a transformação das nove sub-imagens para a imagem verde, homogénea e de menor resolução (monolithic stitching, Ladstätter e tal. 2010) em vez de as ligar umas às outras.

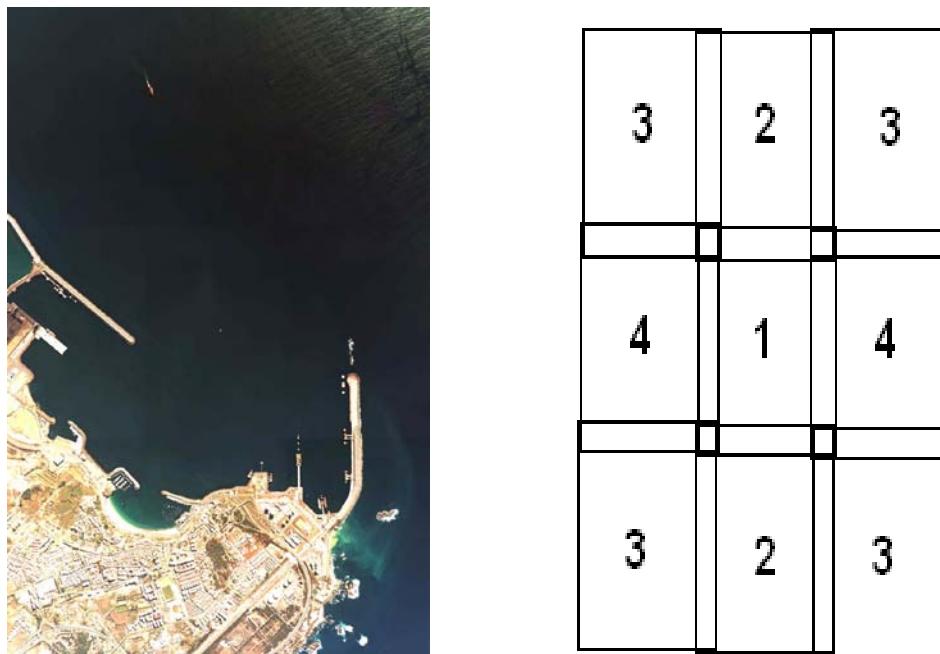


Figura 4.2.2.2.3 - Imagem UltraCamD notando-se os limites das sub-imagens

Tal como na DMC, as quatro câmaras multispectrais de menor resolução, captam cada uma toda a área do mosaico final. A imagem RGB e a imagem NIR finais são obtidas também por pan-sharpening.



Figura 4.2.2.2.4 - Imagens finais da UltraCamD: pancromática, RGB e NIR (Vexcel)

As características das câmaras dos vários modelos UltraCam estão resumidas na tabela que se segue referente às imagens finais.

Câmera	Numero de pixels	Pixel [μm]	distância focal [mm]
UltraCamD	7500 x 11500	9	100
UltraCamX	9420 x 14430	7.2	100
UltraCamXp	11310 x 17310	6	100
UltraCamXp WA	11310 x 17310	6	70

Tabela 4.2.2.2.1 - Características de câmaras UltraCam Vexcel

5 - Modelos digitais de elevação

Os modelos digitais de elevação, quando aplicados à produção cartográfica, descrevem o relevo da superfície terrestre. Várias designações coexistem tanto na literatura como no software, pelo que se impõe referir as mais usadas realçando as diferenças nos respectivos significados:

DTM - Digital Terrain Model, o correspondente na língua inglesa para MDT - Modelo Digital do Terreno

DSM - Digital Surface Model, o correspondente na língua inglesa para MDS - Modelo Digital da Superfície

DHM - Digital Height Model, termo genérico para DSM e DTM

DEM - Digital Elevation Model, igualmente termo genérico para DSM e DTM.

A diferença entre um MDT e um MDS consiste no facto de o primeiro descrever o relevo ao nível do terreno, ignorando o que sobre ele está edificado, ou arborizado, e o segundo descrever precisamente a superfície terrestre com todas as suas edificações e arvoredo.

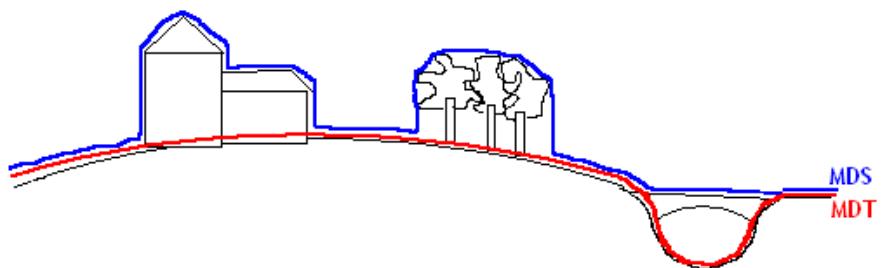


Figura 5.1 - Diferença entre MDT e MDS

Para efeitos de cartografia de traço é importante apenas o MDT enquanto que para ortorrectificação em zonas muito urbanizadas a utilização do MDS proporciona melhores resultados.

5.1 Tipos de modelos digitais de elevação

O relevo do terreno pode ser descrito de várias formas:

- por curvas de nível (linhas de cota constante e orientação variável no plano XY)
- por perfis (linhas de orientação constante no plano XY e de cota variável)
- por conjuntos de pontos cotados de distribuição regular ou irregular no plano XY
- por uma superfície contínua:
 - multifacetada, composta por planos adjacentes de orientação espacial variável (triângulos espaciais)
 - por um conjunto de superfícies de curvatura variável limitadas por figuras geométricas regulares no plano XY (quadrados, rectângulos, hexágonos, etc.)

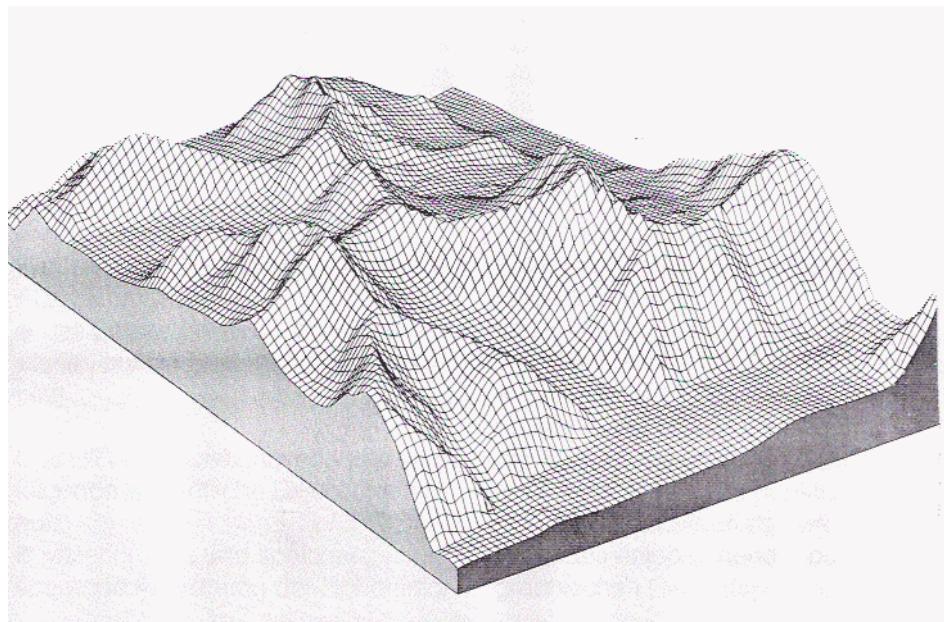


Figura 5.1.1 - Relevo descrito por superfícies curvas de projeção quadrada

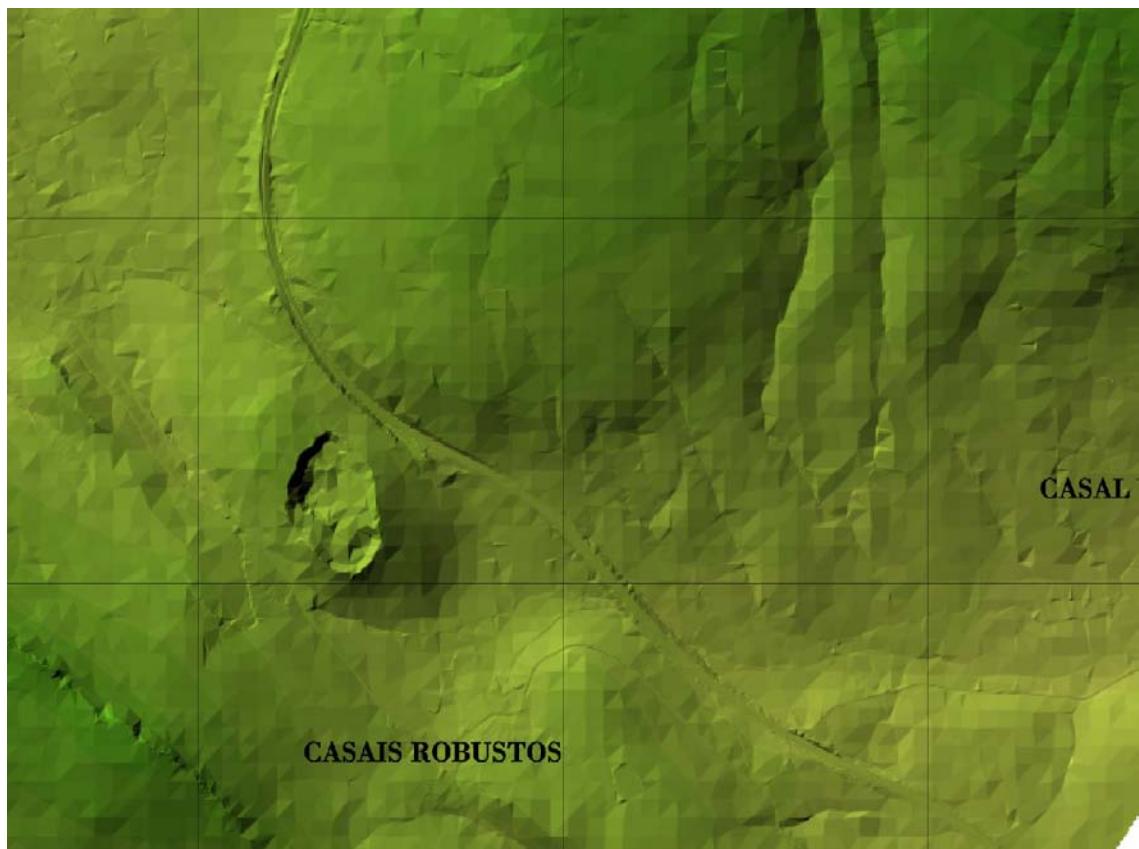


Figura 5.1.2 - Relevo descrito por triângulos espaciais

Geralmente designa-se a superfície contínua que descreve o relevo de uma região por Modelo Digital de Elevação. O MDE é então uma função contínua que fornece um e um só valor de cota para cada ponto de coordenadas planimétricas X,Y :

$$Z=f(X, Y)$$

O Modelo Digital de Elevação representa uma superfície 2D mergulhada num espaço 3D. A forma da função f é em geral bastante complexa e a sua concordância com o terreno real depende da qualidade e densidade da amostra de pontos cotados utilizada na sua derivação.

Existem várias metodologias para a geração de um MDE. Os conceitos mais utilizados na estruturação dos dados de um MDE são o formato TIN e o formato GRID. A construção de um modelo TIN consiste em várias fases:

- aquisição de uma amostra de pontos cotados, a qual pode provir directamente de medições ou indirectamente de curvas de nível ou de perfis restituídos;
- geração de uma rede de triângulos de vértices nos pontos cotados;
- criação de superfícies planas limitadas pelos triângulos

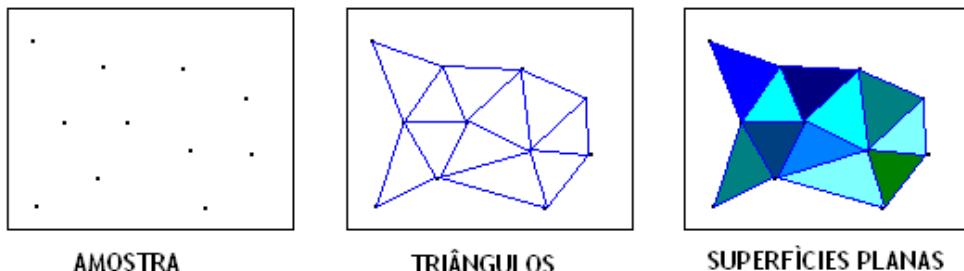


Figura 5.1.3 - Passos para a geração de um modelo TIN

Nesta fase, está-se em presença de um MDE em formato TIN, no qual a cota de qualquer ponto (X, Y) é geralmente interpolada no plano inclinado do triângulo onde o ponto calha.

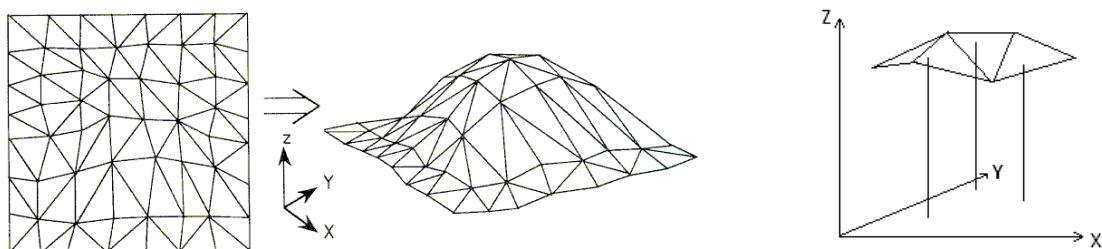


Figura 5.1.4 - Interpolação da cota no TIN

A rede de triângulos criada a partir da amostra tem de seguir determinados critérios para melhor se adaptar à distribuição espacial local e geral dos pontos da amostra. O método mais frequentemente utilizado é o da triangulação de Delaunay

(ou Delone) na qual os triângulos são definidos de tal modo que o círculo que passa pelos três vértices de qualquer um dos triângulos não contém nenhum outro ponto da amostra no seu interior.

Para gerar um modelo GRID é também necessário adquirir uma amostra de pontos cotados (amostra primária). No entanto os procedimentos divergem consoante a distribuição espacial da amostra for regular ou irregular. Caso seja irregular, o processo passa primeiro pela criação de um modelo TIN. A partir deste são interpoladas as cotas de pontos regularmente espaçados, com os quais se cria então o modelo GRID. O conjunto destes pontos denomina-se amostra secundária.

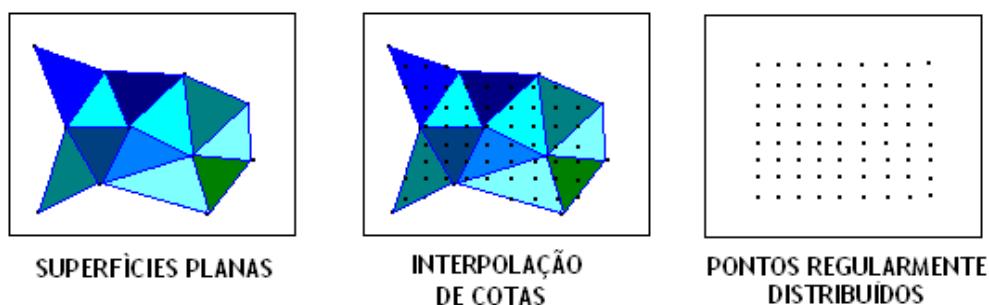


Figura 5.1.5 - Amostra secundária a partir de um modelo TIN criado com a amostra primária

Caso a amostra primária seja regular, poderá ela própria ser utilizada para a geração do modelo GRID. O modelo GRID pode ser composto por células regulares de cota constante no seu interior e igual à do ponto da amostra, ou então por uma malha regular cujos nodos são os pontos da amostra com as respectivas cotas.

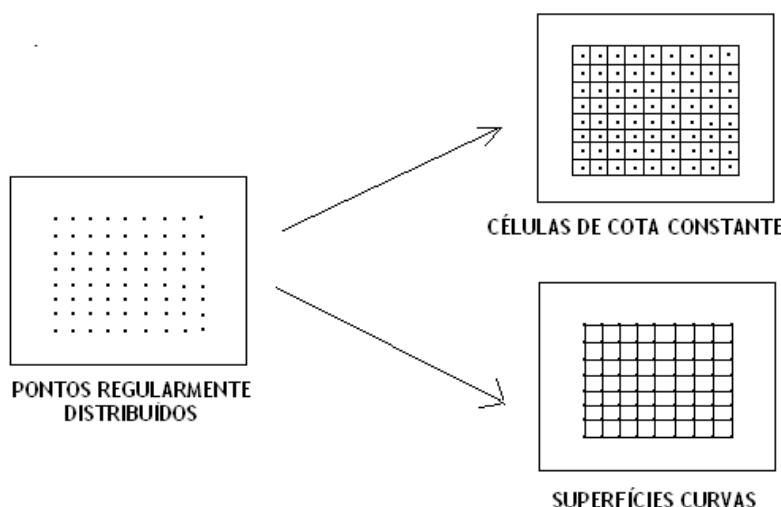


Figura 5.1.6. Obtenção de um modelo GRID

A cota de qualquer ponto de coordenadas X,Y é determinada, no primeiro caso, pela cota da célula onde calha, e no segundo caso por interpolação numa superfície curva que se adapte às cotas dos nodos da malha onde o ponto calha, e por vezes

das malhas vizinhas. Vários métodos de interpolação são aplicados, entre os quais o do vizinho mais próximo (é atribuída ao ponto a cota do nodo mais próximo), o da interpolação bilinear (é atribuída ao ponto uma média ponderada das cotas dos 4 nodos vizinhos sendo a distância a cada nodo o factor de ponderação, equivalente à assumpção de uma superfície curva de segundo grau que passa pelos 4 nodos - parabolóide hiperbólico) e o da interpolação bicúbica (é ajustada uma superfície curva aos 16 nodos mais próximos e calculada a cota do ponto nessa superfície).

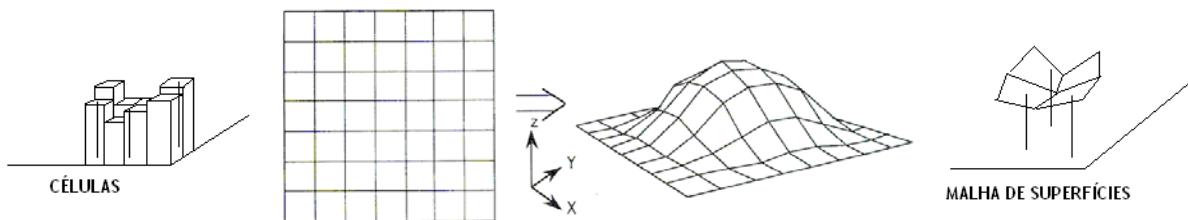


Figura 5.1.7 - Interpolação da cota num GRID

O modelo TIN tem a vantagem de se adaptar muito facilmente a qualquer tipo de amostra primária, tendo no entanto a desvantagem de apresentar uma estrutura muito complexa. Em contrapartida, o modelo GRID apresenta uma estrutura muito simples, mas adapta-se dificilmente a qualquer tipo de amostra primária, obrigando à derivação de uma amostra secundária a partir de um TIN.

5.2 Descontinuidades

Um modelo digital do terreno descreve tanto melhor a superfície terrestre quanto mais densa for a amostra primária de pontos cotados e quanto melhor estiverem descritas as descontinuidades daquela superfície.

As descontinuidades, normalmente denominadas linhas de quebra, representam acidentes do terreno que provocam uma mudança brusca na curvatura da superfície, como por exemplo, linhas de água, taludes, falésias, etc.

Na elaboração de um modelo digital do terreno, deve-se ter em consideração as linhas de quebra, obrigando o algoritmo a integrar os seus pontos como pontos cotados da amostra primária. Em geral é feita a distinção entre linhas de quebra de orientação (soft break lines) e linhas de quebra de profundidade (hard break lines). Enquanto as primeiras, de que são exemplo as linhas de água, apenas indicam um vinco na superfície, devendo o MDT ligar os pontos de um lado e do outro lado da linha aos próprios pontos da linha, as segundas de que são exemplo cristas de falésias, indicam que os pontos de um lado da linha não devem ser ligados aos do outro lado da linha pela mesma superfície.

MDTs que respeitam linhas de quebra são geralmente híbridos, apresentando formato GRID nas zonas de terreno homogéneas e formato TIN nas zonas das linhas de quebra.

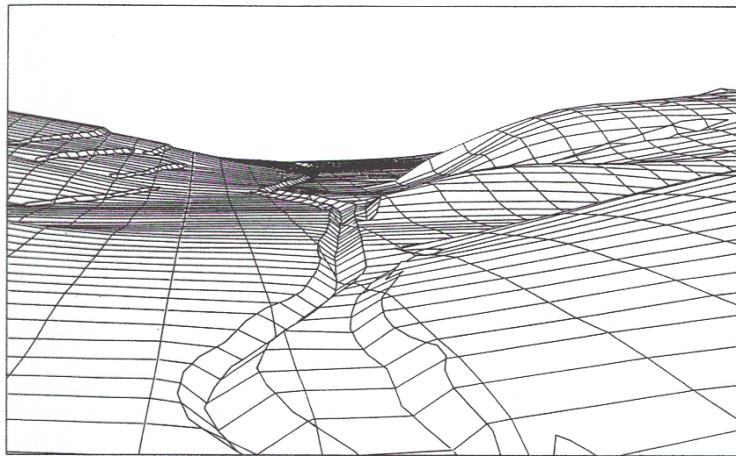


Figura 5.2.1 - MDT com linhas de quebra (Kraus 1987)

Tão importantes quanto as linhas de quebra são as superfícies de máscara que definem polígonos no interior dos quais não é pretendido que haja interpolação, como por exemplo, em lagos.

Curvas de nível e perfis podem igualmente ser obtidos a partir de um modelo digital do terreno. Um dos métodos utilizados para interpolar curvas de nível consiste na determinação de pontos com determinadas cotas, (múltiplos da equidistância natural pretendida), ao longo dos limites das malhas (quer em TIN como em GRID) e ao longo das linhas de quebra, sendo em seguida unidos os pontos de igual cota por segmentos de recta. A linha poligonal assim obtida é posteriormente adoçada graficamente ajustando polinómios e *splines* aos pontos cotados determinados no MDT.

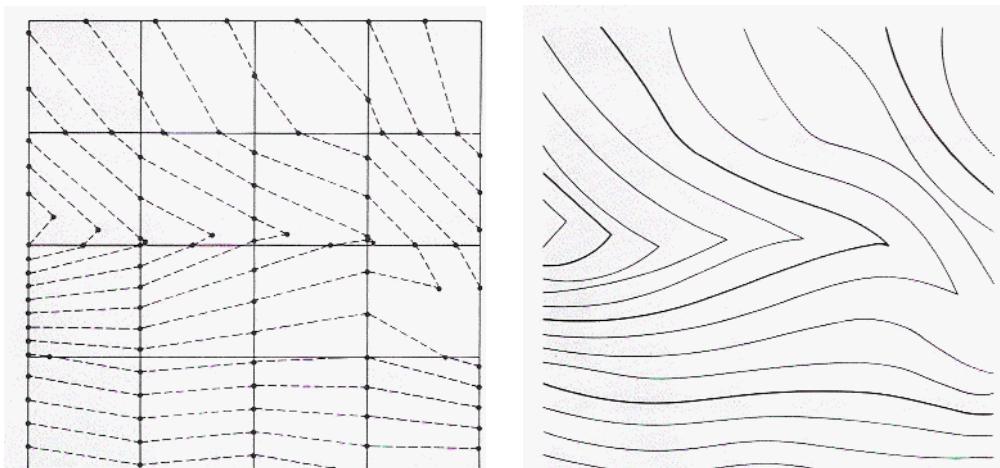


Figura 5.2.2 - Geração de curvas de nível a partir de um MDT de formato GRID

5.3 Métodos de recolha da amostra primária

A amostra primária de pontos cotados necessária para a elaboração dos modelos digitais de elevação pode ser recolhida pelos seguintes métodos:

- estereofotogrametria
- correspondência automática de imagens (processamento digital de imagem)
- Laser-scanning (LiDAR)
- Interferometria de radar (InSAR)

Por estereofotogrametria, o operador humano restitui curvas de nível, perfis ou mede a cota de um conjunto de pontos isolados no modelo estereoscópico do terreno. Tanto é possível recolher uma amostra para um MDT (todos os pontos no chão) como para um MDS (pontos nos cimos das árvores e das casas onde estas existirem).

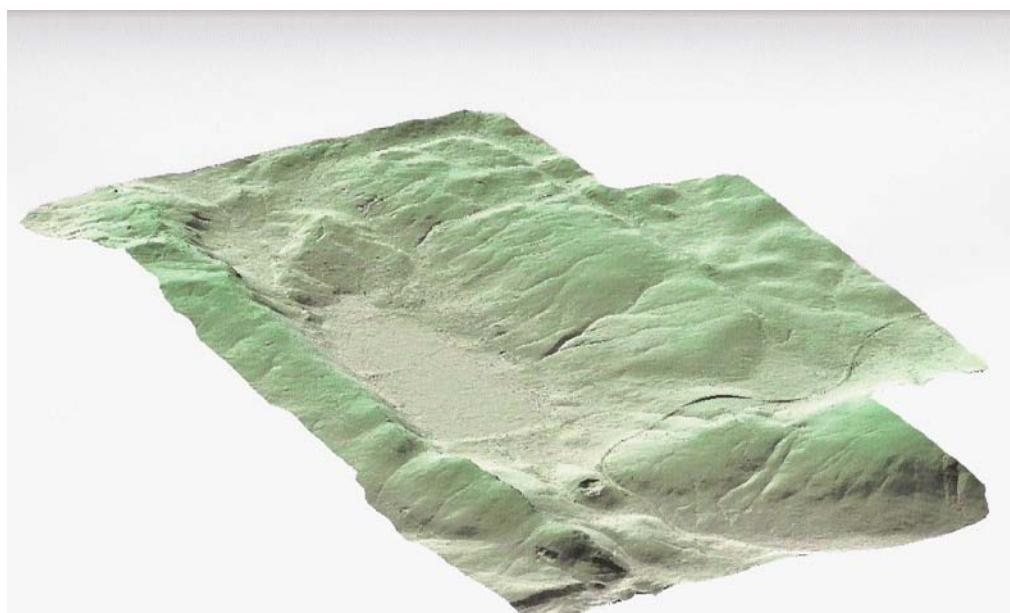


Figura 5.3.1 - MDT do Polje de Minde obtido por estereofotogrametria (Gonçalves e Santos, Relatório de Estágio)

A correspondência automática de imagens é realizada por diversos operadores de processamento digital de imagem cujo objectivo é determinar pontos homólogos em pares estereoscópicos. Como estes operadores se baseiam apenas na informação radiométrica das imagens, a amostra que se obtém poderá apenas gerar um MDS. Amostras obtidas por este método podem ser muito densas.

O laser-scanning aéreo (LIDAR) é um método que se baseia num voo efectuado por um avião equipado com um dispositivo emissor de um feixe de raios laser. À medida que o avião se vai deslocando, o dispositivo vai oscilando e emitindo impulsos laser para a superfície terrestre. Em cada ponto da superfície, o feixe é reflectido e captado pelo mesmo dispositivo. O intervalo de tempo entre emissão e recepção do feixe multiplicado pela velocidade da luz, resulta na dupla distância entre o emissor e o ponto à superfície terrestre. O avião está também equipado

com um sistema GPS/IMU que possibilita determinar para cada momento qual a posição espacial do emissor e qual a orientação do feixe. Assim sendo, podem-se calcular as coordenadas 3D de cada ponto visado à superfície da Terra e daí gerar um MDS.

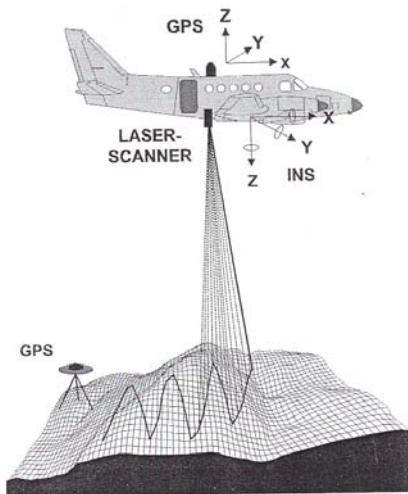
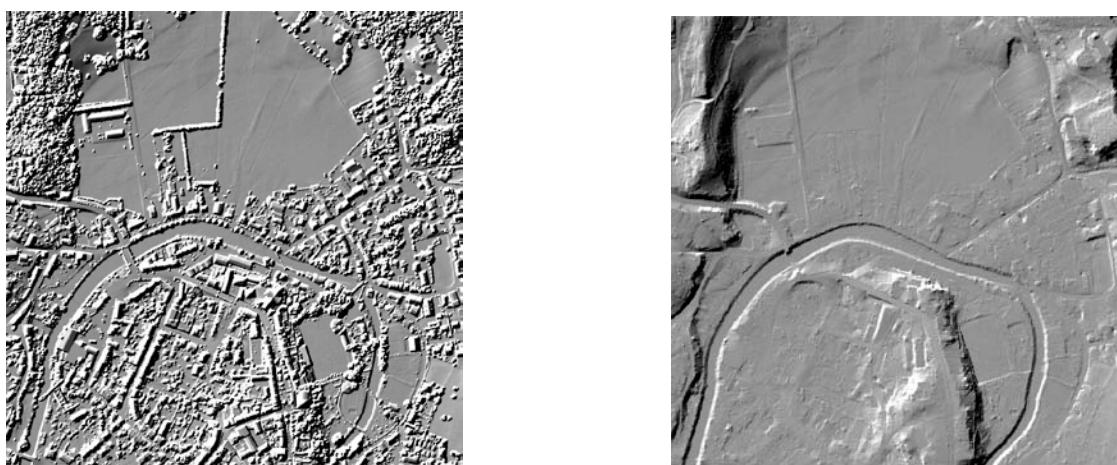


Figura 5.3.2 - Funcionamento do LIDAR

A densidade da amostra pode ser muito alta para voos baixos, representando este método um sério concorrente da estereofotogrametria. Em zonas arborizadas a amostra recolhida contém geralmente pontos no topo das árvores e pontos no chão, permitindo elaborar filtros de modo a ser possível obter não só um MDS como também um MDT da mesma amostra. Em zonas urbanizadas por vezes isso também é possível.



5.3.3. Zona urbanizada. Amostra para MDS (esquerda) e depois de filtrada (direita) para MDT (Sefercik, Master Thesis)



5.3.4. Exemplo de um MDS de zona urbanizada obtido por LIDAR. Cotas transformadas em valores de cinzento. Células de 1m. As zonas a preto representam água
(Cidade Universitária, Lisboa)

A interferometria de radar (InSAR) é um método que foi utilizado na missão SRTM (Shuttle Radar Topography Mapping) do Space-Shuttle, proporcionando amostras para MDS de mais de 80% da superfície da Terra. A densidade dessa amostra é de 30 m em determinadas zonas (consideradas de importância estratégica para os E.U.A) e de 90 m nas restantes zonas.

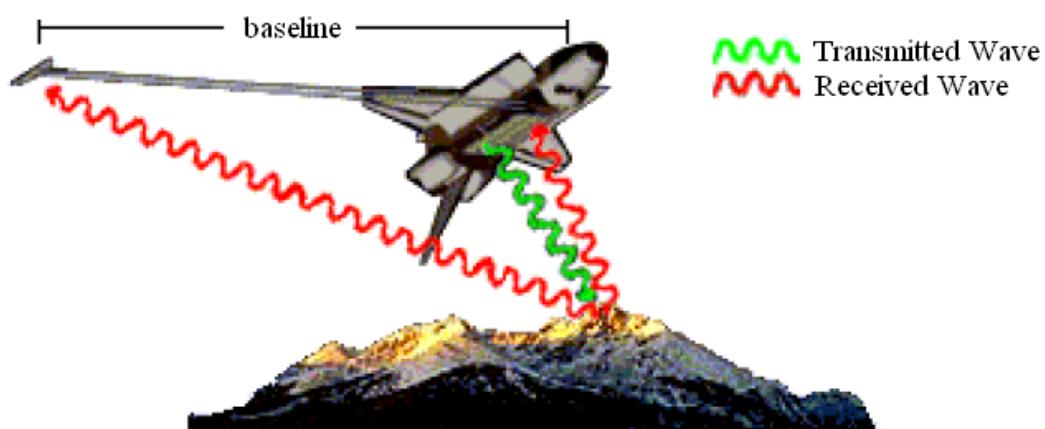


Figura 5.3.5. Configuração das antenas radar durante a SRTM

Mais recentemente a mesma técnica está a ser aplicada a aviões que recolhem amostras de muito maior densidade, chegando a dimensões de malhas de 5 m ou menores. Para este método são necessárias duas antenas e um emissor de impulsos radar. O avião também se encontra equipado com um sistema GPS/IMU tal como no LIDAR. A consideração da geometria de aquisição do radar permite atingir boas precisões nas coordenadas 3D dos pontos visados. O método apenas não resulta bem em zonas densamente urbanizadas devido a problemas de multi-trajecto e fachadas elevadas a ocultar pormenores. A utilização do radar tem a vantagem (teórica) relativamente aos métodos baseados na captação de luz visível (fotogrametria e LIDAR) de poder ser operado mesmo quando existem nuvens na atmosfera.

5.4 Precisão de um MDT

A precisão de um modelo digital do terreno, para além do que já foi dito, depende ainda do tipo de cobertura do solo (zona aberta, zona florestada, zona urbanizada) e do tipo de relevo (plano, com colinas, montanhoso). Enquanto a precisão da cota medida no modelo estereoscópico se pode estimar pela fórmula:

$$\sigma_z = \frac{h}{b} \cdot spx$$

em que h/b representa o inverso da relação base-altura e spx a precisão da paralaxe horizontal que se pode aproximar pelo valor do pixel no terreno (GSD), a precisão da cota num MDT é dada por :

$$\sigma_z = A + B \tan \alpha$$

representando α o declive do terreno, A e B dois parâmetros que são característicos do método utilizado.

5.5 Aplicações dos MDE

Os modelos digitais de elevação, tendo começado por ser um sub-produto da estereorrestituição, constituem actualmente um produto fotogramétrico /cartográfico independente. A sua aplicação no âmbito da produção de cartas de traço é relevante na geração das curvas de nível para a altimetria da carta. Sem MDE não é possível realizar ortorrectificação, como se verá no capítulo respectivo. Para além disso, em aplicações SIG de análise espacial, o MDE é imprescindível para estudos de fenómenos que sejam função do declive, do ângulo de exposição ao sol, da cota, etc. Para planeamento de localização de antenas e de retransmissores de telecomunicações são relevantes não só MDTs como MDSs de cidades com todas as cotas dos edifícios. Uma aplicação muito apelativa dos MDEs consiste na visualização do terreno em 2.5 D em monitores de computador, para simulações de cenários estáticos ou dinâmicos (voos panorâmicos). Apesar de os resultados (sobretudo em simulações de voo) geralmente não terem propriedades

métricas de grande precisão, a sua geração associa operações fotogramétricas (plano de voo, orientação, criação do MDS, ortorrectificação, texturização) a operações de computação e visualização gráfica que só resultam se houver rigor em todos os passos do processo.

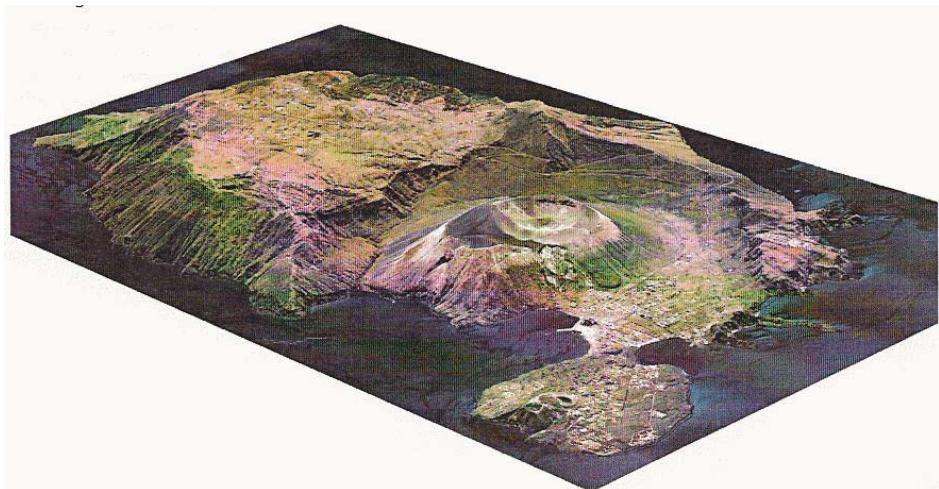


Figura 5.5.1 Modelo 3D da ilha de Vulcano

6 - Ortorrectificação de fotografia aérea

A rectificação de fotografias aéreas é um método económico de produzir cartas e tem como objectivo transformar uma fotografia, a qual é uma projecção central, numa imagem que seja uma projecção ortogonal do terreno (objecto), derivando-se opcionalmente uma carta de traço dessa imagem rectificada. Mais frequentemente, obtém-se, via ortorrectificação, uma representação do pormenor do objecto (terreno) fiel na sua posição planimétrica e com tanta densidade de informação como a fotografia original. Esse produto designa-se por ortofoto.



Figura 6.1 - Exemplo de uma folha de ortofotocarta

Para que o produto final contenha informação altimétrica, esta terá de ser adquirida por outros métodos fotogramétricos (por ex. estereorrestituição ou altimetria de laser) e terá que ser sobreposta à imagem rectificada em forma de curvas de nível ou de pontos cotados. Existem ainda técnicas para adicionar à

ortofoto a possibilidade de percepção do relevo que serão referidas mais adiante. Em regra, são necessárias várias imagens rectificadas para cobrir a área de uma folha de ortofotocarta cujos limites estão condicionados por um enquadramento cartográfico nacional ou regional.

A diferença principal existente entre uma fotografia aérea e uma ortofoto da mesma zona advém das diferentes projecções do terreno (objecto) que dão origem respectivamente a uma foto e a uma ortofoto.

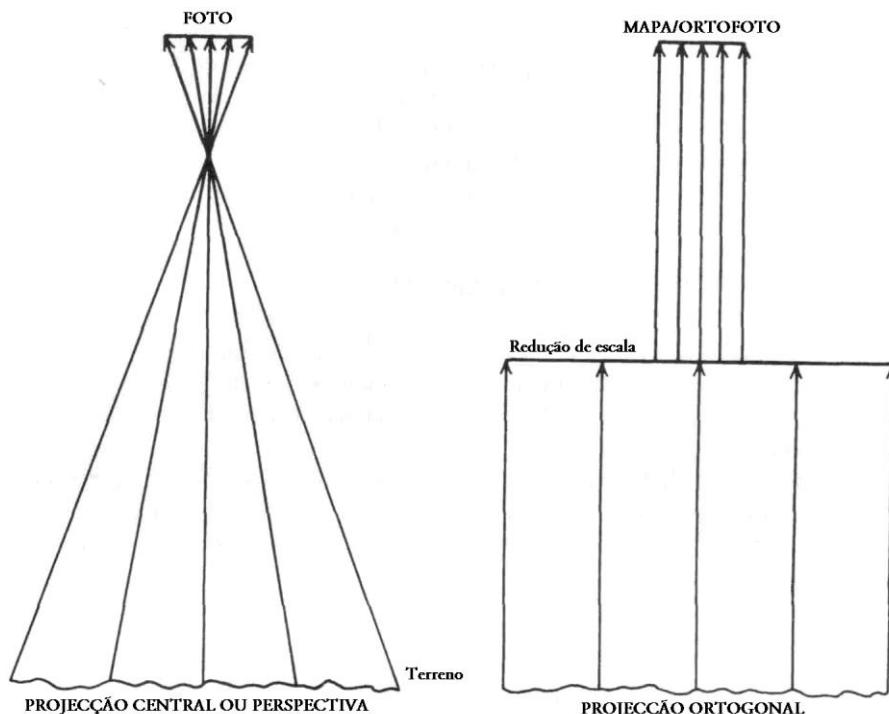


Figura 6.2 - Projecções da fotografia aérea e da ortofotocarta

Como referido no início, enquanto a ortofotocarta, tal como a carta é uma projecção ortogonal do terreno, a fotografia é uma projecção central do mesmo. A ortofoto apresenta uma escala uniforme, tal como a carta, enquanto que a fotografia apresenta distorções projectivas (devidas à inclinação do eixo óptico) e distorções perspectivas (devidas ao relevo do terreno) que fazem com que a escala na área da fotografia varie com uma componente regular e uma componente irregular. Semelhança geométrica entre uma carta e uma fotografia aérea da mesma escala e da mesma zona do terreno, só existe se a foto (o seu eixo) for rigorosamente vertical e o terreno for plano e horizontal. Na geração de uma ortofoto, têm-se, por isso, em vista a eliminação de todas as influências “negativas” da projecção central na representação do terreno, de modo a que no produto final se conjugue “o melhor de dois mundos”: a informação visual densa do

terreno com a geometria rigorosa de escala homogénea que permite utilizar a ortofoto como uma carta para operações métricas.

Do ponto de vista de um sistema de informação geográfica, a ortofotocarta digital é muito útil em operações de interpretação da informação georreferenciada, por ser de interpretação mais imediata para o utilizador comum, pois é a própria imagem do terreno com todos os seus objectos visíveis do ar. Por outro lado, a carta de traço, representa uma informação do terreno já seleccionada, interpretada e classificada (estradas distinguem-se imediatamente de caminhos de ferro, igrejas distinguem-se imediatamente de outras casas, etc.), o que apresenta vantagens do ponto de vista técnico para quem tem de trabalhar com a informação cartográfica.

6.1 Evolução e métodos

Desde os inícios da fotogrametria (segunda metade do séc. XIX) que se desenvolveram métodos para transformar uma fotografia numa carta, de preferência obviando o trabalho moroso da estereorrestituição.

Os métodos de rectificação desenvolvidos ao longo do tempo incluem a rectificação gráfica, a rectificação analítica, a rectificação por projecção subjectiva, a rectificação optico-mecânica, a rectificação diferencial e por último a rectificação digital.

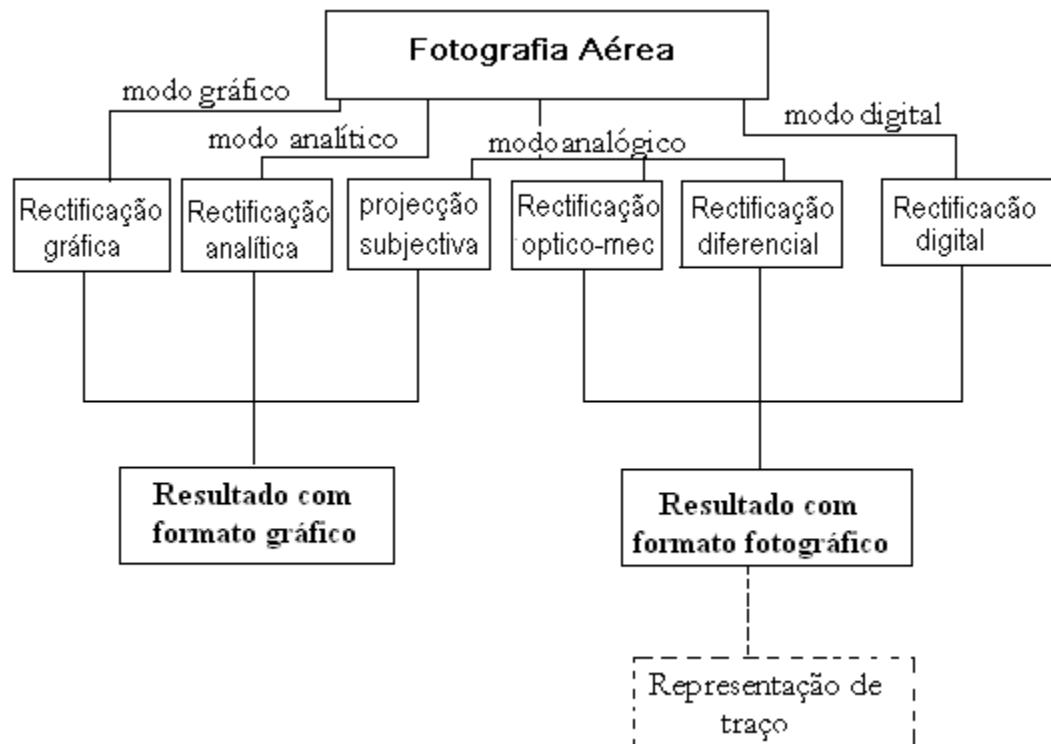


Figura 6.1.1 - Tipos de rectificação fotográfica

A **rectificação gráfica**, conhecida como método da tira de papel, baseia-se na propriedade de feixes perspectivos planos homólogos na foto e na carta terem uma razão dupla invariante. É possível com este método implantar pontos da fotografia num plano cartográfico. O resultado desta operação é um conjunto de pontos na sua posição geometricamente correcta mas sem a informação radiométrica (a cor da imagem).

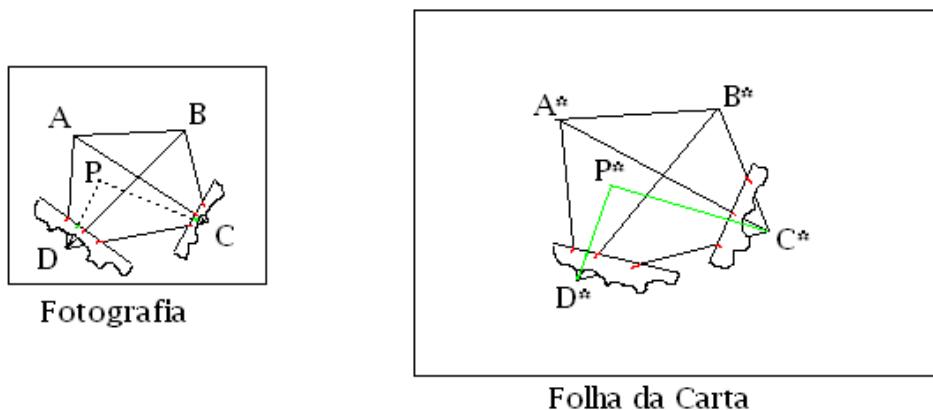


Figura 6.1.2 - Método da tira de papel: implantação do ponto P da foto a partir de 4 pontos homólogos na foto e na carta ($ABCD$ e $A'B'C'D'$) aplicando as propriedades da perspectiva aos feixes homólogos de pólo em C e D. Resulta o ponto P^* na carta

A **rectificação analítica** baseia-se nas condições de colinearidade entre ponto imagem, centro de projecção e ponto objecto, sendo, neste caso, o ponto objecto coincidente com o ponto da carta correspondente assumindo uma determinada cota. As equações utilizadas nesta modalidade são as equações de colinearidade.

$$\begin{aligned} X &= f(Z, c, x_0, y_0, X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa) \\ Y &= g(Z, c, x_0, y_0, X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa) \end{aligned}$$

Para calcular as coordenadas na carta de qualquer ponto da foto, é necessário conhecer os valores dos parâmetros de orientação interna e externa da fotografia. Estes valores poderão provir de uma aerotriangulação prévia ou então, ser determinados por intersecção inversa espacial a partir de 3 pontos idênticos na fotografia e na carta que não sejam colineares.

Se no entanto, dispusermos de quatro pontos idênticos não colineares, poderemos projectar uma superfície plana na outra, portanto, a fotografia na carta, sem conhecer esses parâmetros. As fórmulas a aplicar neste caso são as da transformação perspectiva entre planos.

Os métodos até aqui explicitados eram aplicados ponto a ponto, resultando num conjunto de pontos “rectificados” que se podiam unir de acordo com o respectivo contexto (vértices de uma casa, pontos definidores de uma estrada, vértices de

muros ou vedações, etc.), compondo-se, assim, uma carta de traço da planimetria, resultante da rectificação de uma fotografia. Para além de morosos, estes métodos apresentavam precisões que apenas eram aceitáveis quando se tratava de terrenos planos ou quase planos (Z constante ou de pequena amplitude).

A **rectificação por projecção subjectiva** era um método utilizado frequentemente para completagem de cartas com a informação de fotografias aéreas mais recentes. Funcionava como se ilustra na figura, com o auxílio de um aparelho denominado câmara clara. O operador observava em simultâneo a fotografia aérea e a carta através da ocular, atrás da qual se encontra um prisma que refracta ambas as imagens para o observador. Através da inclinação e da variação da distância da foto à mesa onde se encontra a carta é possível levar pormenores da foto à coincidência com pormenores correspondentes da carta, após o que o operador pode desenhar sobre a carta, à mão livre, os pormenores que nela faltam, tendo a sensação de estar a decalcar a fotografia.

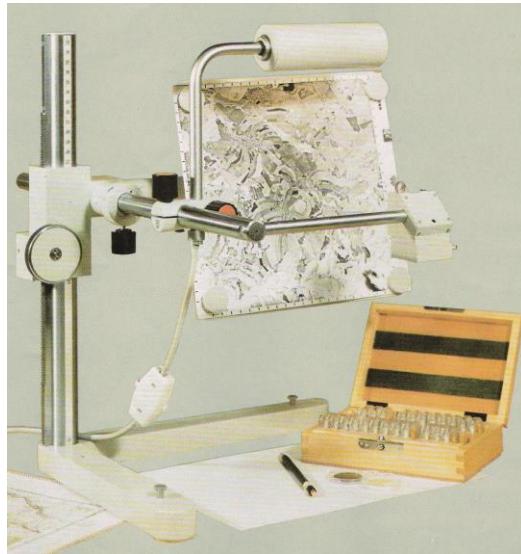


Figura 6.1.3 - Câmara clara (Zeiss-Jena)

A **rectificação óptico-mecânica** foi a primeira a requerer uma componente instrumental de maiores dimensões. Teve, durante várias décadas, grande importância na produção cartográfica e documentação arquitectural, sendo a precisão dos resultados condicionada pelo relevo do terreno (ou objecto) fotografado. Para a realizar era necessário utilizar um rectificador, que era essencialmente um ampliador fotográfico de grandes dimensões cuja mesa de projecção era dotada de dois movimentos de rotação em torno de eixos perpendiculares entre si.

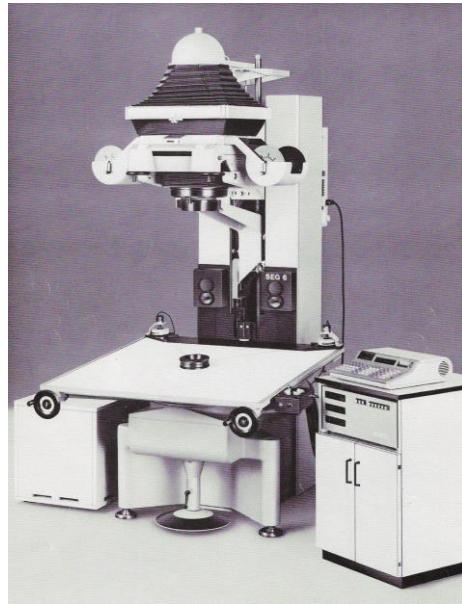


Figura 6.1.4 - Rectificador óptico-mecânico SEG6 da Zeiss

Observando o esquema da figura 6.1.5, o negativo da fotografia (3) era colocado sobre o porta-fotos (4) entre o projector (1) e a objectiva (5). Sobre a mesa (6) era colocada uma folha, com quadricula à escala pretendida para a ortofoto, onde eram implantados por coordenadas pelo menos 4 pontos fotogramétricos. Depois, a fotografia (negativo) era projectada opticamente sobre a folha.

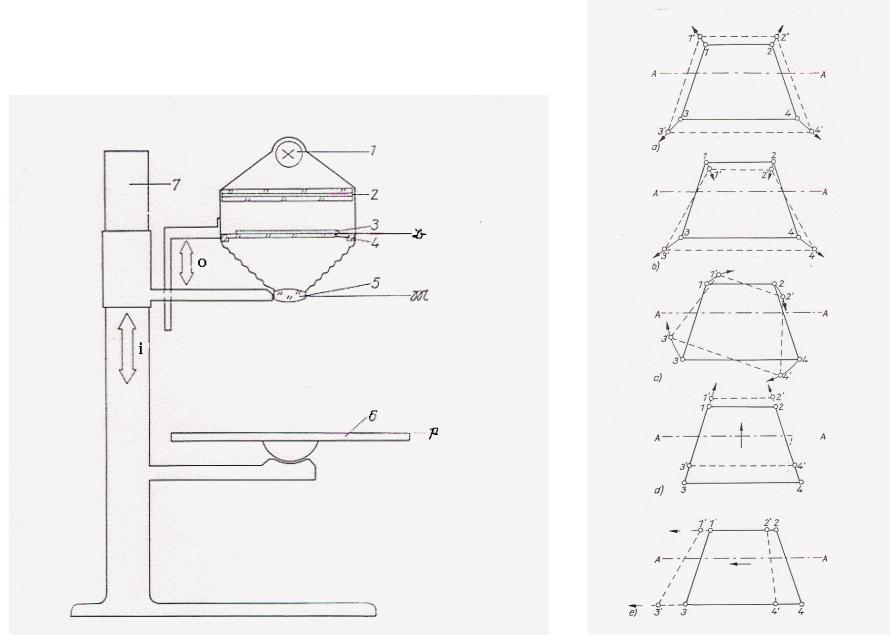


Figura 6.1.5 - Esquema de rectificador óptico-mecânico e método de orientação externa com 4 PFS.

Movendo o projector na vertical, rodando a folha e inclinando a mesa, levavam-se as imagens dos pontos fotogramétricos à coincidência com os pontos implantados. De seguida, em total obscuridade ou apenas com luz vermelha, colocava-se uma folha de papel fotográfico sobre a mesa (retirando a folha com a quadrícula), projectava-se a foto sobre o papel fotográfico durante um intervalo de tempo, sendo aquele de seguida revelado fotograficamente. Cada fotografia era rectificada no seu todo de uma só vez sobre o mesmo plano de projecção. Contrastando com os métodos referidos anteriormente, o produto da rectificação óptico-mecânica era uma imagem fotográfica com toda a informação radiométrica da fotografia original e não apenas um conjunto de pontos na carta.

Para objectos planos (fachadas) ou terreno quase plano, os resultados da rectificação óptica sobre um plano a uma distância (do projector) correspondente a uma cota média, eram aceitáveis. Para terrenos menos planos e escalas maiores, os erros planimétricos tornavam-se intoleráveis. Surgiu então, para estes casos (que eram os mais frequentes), um método que preconizava a ortorrectificação da mesma fotografia por partes, a diferentes distâncias de projecção consoante a cota do terreno da zona a ortorrectificar fosse maior ou menor.

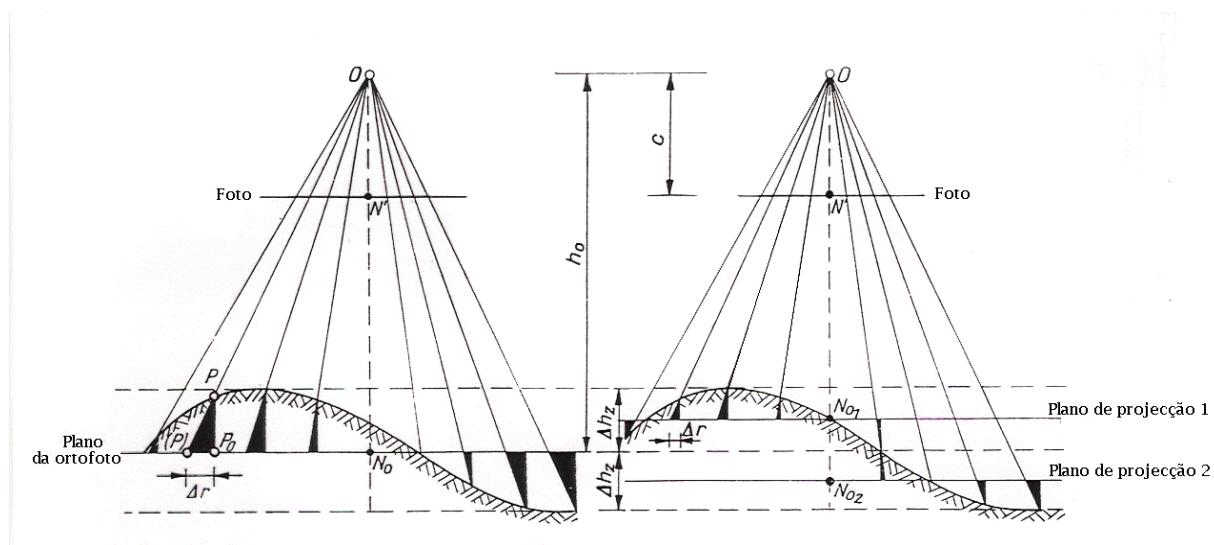


Figura 6.1.6 - Ortorrectificação óptica : um ou mais planos de projecção. Δr - distorção radial na ortofoto. (Kraus, 1987)

A **rectificação diferencial**, veio superar as limitações da rectificação óptica, aplicando o princípio acima referido sistematicamente para cada parte elementar da foto. A fotografia era então rectificada rectângulo a rectângulo ao longo de perfis, sendo cada pequeno rectângulo projectado no papel fotográfico a uma distância de projecção que variava com a cota do terreno correspondente a essa posição da foto.

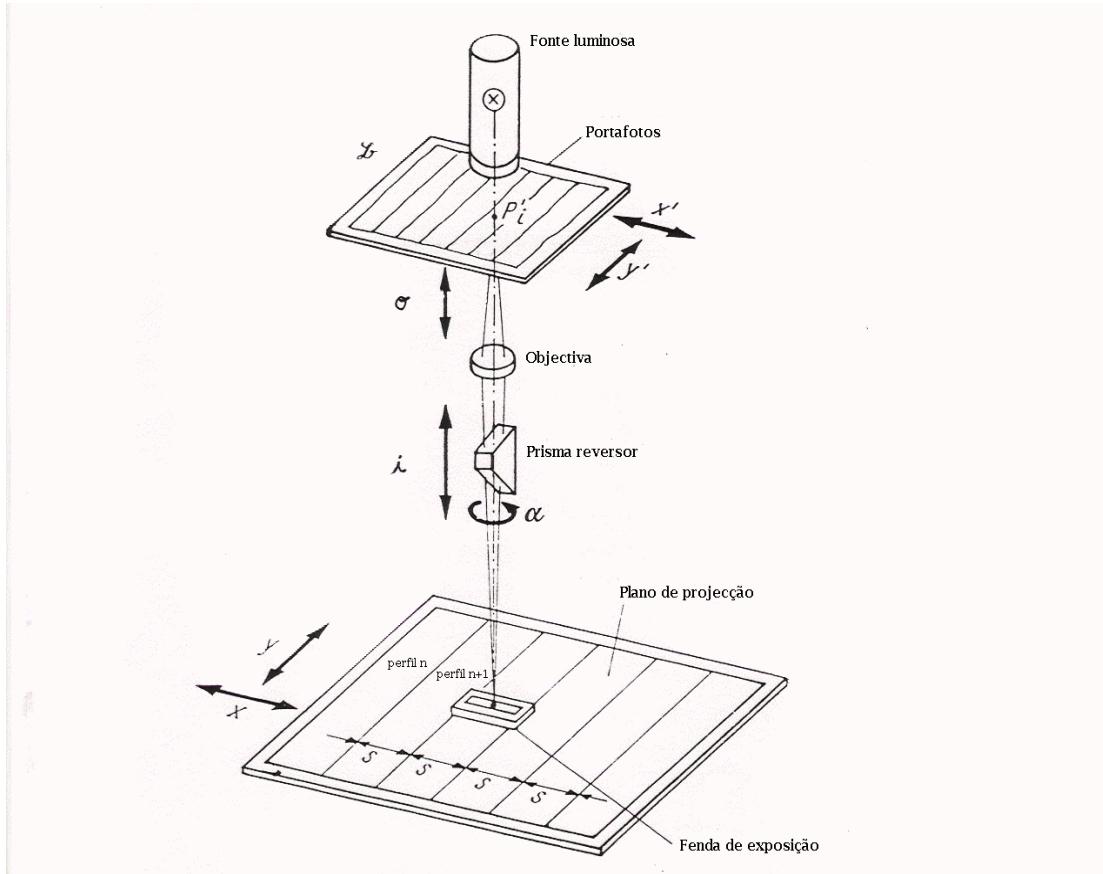


Figura 6.1.7 - Rectificação diferencial (Kraus, 1987)

Por necessitar de informação altimétrica em perfis do terreno fotografado, que tinha que ser obtida previamente por estereorrestituição, este método era muito dispendioso. Os aparelhos utilizados eram os ortorrectificadores diferenciais, no interior dos quais todo o processo de exposição sucessiva se desenrolava durante horas, isolado da luz exterior. No fim de todas as sucessivas exposições adjacentes do papel fotográfico, este era retirado do aparelho e revelado fotograficamente para se obter, por fim, a ortofoto.

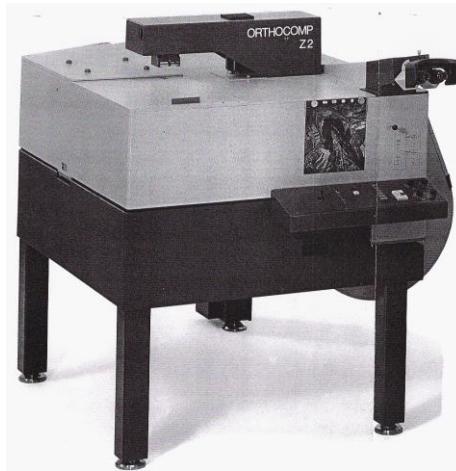


Figura 6.1.8 - Rectificador Diferencial Orthocomp Z2 da Zeiss

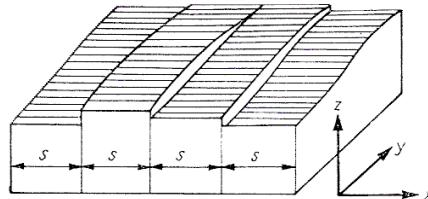


Figura 6.1.9 - Perfis de rectângulos projectados à distância de projecção correspondente à cota do ponto médio do perfil (Kraus, 1987)

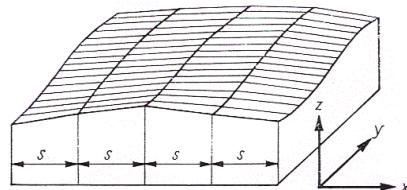


Figura 6.1.10 - Perfis de rectângulos projectados com inclinação correspondente ao declive entre os pontos limite do perfil (Kraus, 1987)

6.2 Ortorrectificação digital

Com o aparecimento das estações fotogramétricas digitais, surgiu finalmente a ortorrectificação digital que é o método utilizado actualmente na produção de ortofotos. Este método consiste em transformar as imagens fotográficas de formato digital em ortofotos digitais, de um modo muito preciso e relativamente rápido, aplicando o modelo matemático da rectificação analítica, já aqui referida (equações de colinearidade), sucessivamente aos pixels da imagem digital.



Figura 6.2.1 - Esquema de produção de uma ortofotocarta

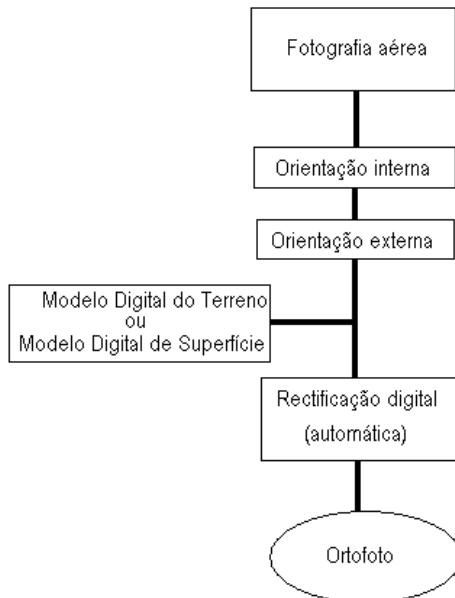


Figura 6.2.2 - Esquema de realização de ortofoto

Para realizar uma rectificação digital é necessário dispor de **fotografias em formato digital**, de um **modelo digital do terreno** fotografado e dos **parâmetros de orientação interna e externa** de cada fotografia a rectificar.

Em alternativa poder-se-ão utilizar pontos fotogramétricos (3 no mínimo em cada foto) para determinar a orientação externa.

Caso as fotografias sejam analógicas haverá a necessidade de utilizar um scanner para as transformar para um formato digital. Uma estação digital fotogramétrica sem visualização 3D é suficiente para a produção de ortofotos digitais. A rectificação digital envolve não só algoritmos de fotogrametria analítica e de interpolação do MDT (ou MDS) como também diversas operações de processamento digital de imagem, não só na ortorrectificação de cada fotografia, como também na elaboração do mosaico e harmonização dos histogramas das várias ortofotos para a obtenção de um produto final com qualidade radiométrica homogénea.

Um plotter-raster de precisão poderá, caso necessário, transformar a informação digital novamente para formato analógico sobre papel (saída gráfica).

Existem dois tipos básicos de procedimento analítico para criar uma ortofoto digital:

- o método directo, no qual se parte de cada pixel da imagem digital da fotografia e se calcula a posição desse pixel no terreno (MDT) e em seguida na imagem rectificada a ser criada, atribuindo a essa posição (X,Y) o valor de cinzento do pixel original.
- o método indirecto, no qual se parte de cada posição na imagem rectificada a ser criada, à qual correspondem determinadas coordenadas terreno (X,Y e Z retirado do modelo digital do terreno), e se calcula a posição correspondente na imagem digitalizada da foto, à qual se vai buscar o valor de cinzento a atribuir à posição XY da imagem rectificada. Este valor de cinzento é normalmente interpolado dos valores dos pixels vizinhos, visto a posição calculada (números reais) geralmente não coincidir com o centro de qualquer pixel (números inteiros).

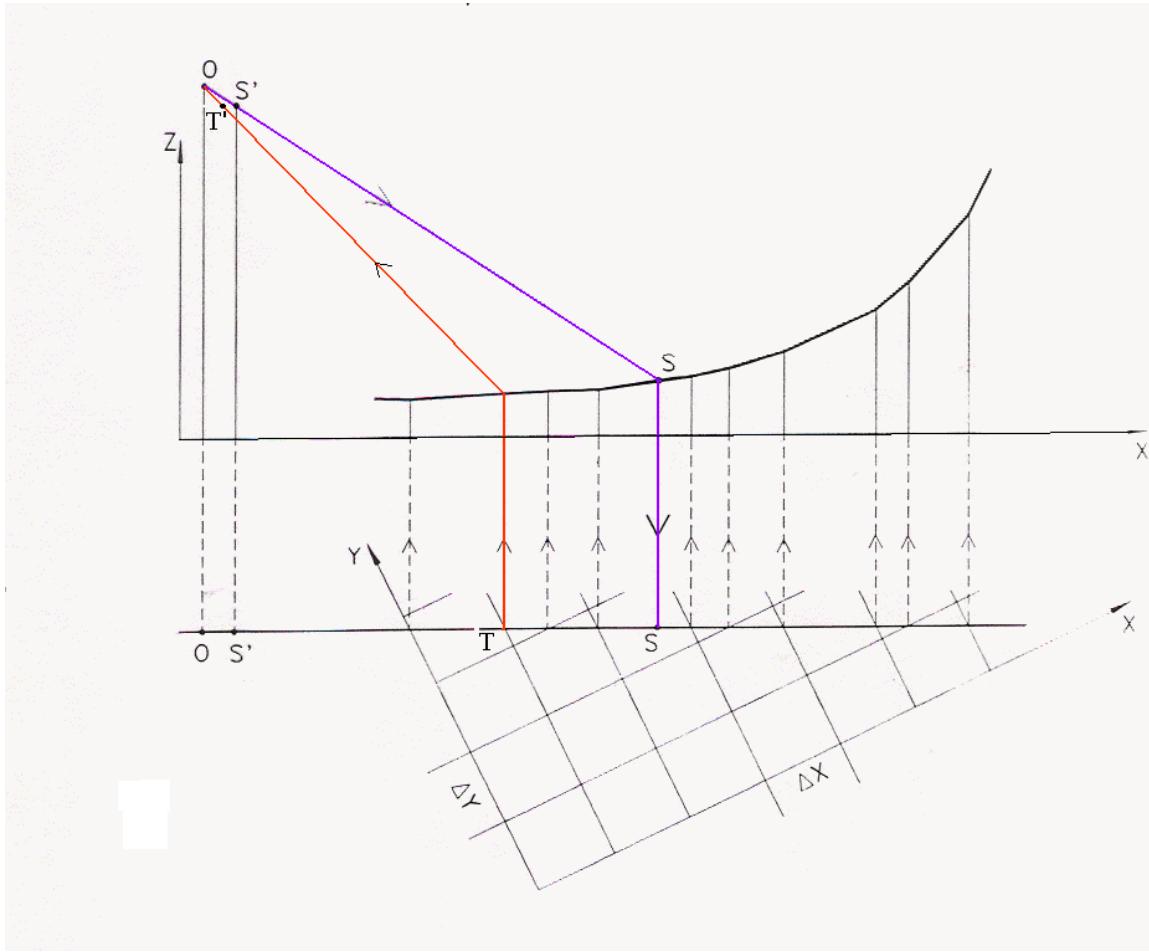


Figura 6.2.3 - Ortorectificação digital: directa (lilás) e indirecta (vermelho).
(adaptado de Kraus)

6.2.1 Método directo

A estratégia seguida na rectificação digital pelo método directo é descrita a seguir:

Pixel da imagem fotográfica digital (x_p, y_p, vdc)

coordenadas imagem (x_p, y_p) — transformação afim → coordenadas foto (x, y)

(x, y) e Z aprox — equações de colinearidade 2 → $(X, Y)_1$

$(X, Y)_1$ — interpolação no DTM → $(X, Y, Z)_1$ coord.terreno

$(X, Y, Z)_1$ — equações de colinearidade 1 → $(x, y)_1$

Se $(x, y)_1 \neq (x, y)$ então:

(x, y) e Z_1 — equações de colinearidade 2 → $(X, Y)_2$

$(X, Y)_2$ — interpolação no DTM → $(X, Y, Z)_2$ coord.terreno

$(X, Y, Z)_2$ — equações de colinearidade 1 → $(x, y)_2$

Repete-se i vezes até $(x,y)_i = (x,y)$

Então:

$(X,Y)_i$ — transformação de Helmert (2D) —> (X_p, Y_p) coordenadas pixel na carta-imagem

Atribui-se por fim o valor de cinzento do pixel da imagem digital ao pixel da carta-imagem final, obtendo-se (X_p, Y_p, vdc) . Procede-se analogamente para todos os pixels da imagem fotográfica digital.

Propriedades do método directo:

- cada pixel da imagem original tem um correspondente na carta-imagem;
- os valores de cinzento da carta-imagem são os originais;
- poderá haver lacunas de informação na carta-imagem devidas a pixels sem correspondentes na imagem original.

A ortofoto será completada interpolando valores de cinzento para os pixels das lacunas a partir dos da vizinhança.

6.2.2 Método indirecto

Pelo método indirecto são exigidos menos cálculos, como se descreve a seguir.

Pixel da carta-imagem digital (X_p, Y_p)

(X_p, Y_p)	— transformação de Helmert (2D) —>	(X, Y)
(X, Y)	— interpolação no DTM —>	(X, Y, Z) coordenadas terreno
(X, Y, Z)	— equações de colinearidade 1 —>	(x, y) coordenadas foto
(x, y)	— transformação afim 2 —>	(x_p, y_p)

Como (x, y) não calha geralmente no centro de (x_p, y_p) , é interpolado um valor de cinzento (vdc_i) a partir dos da vizinhança deste pixel.

Esse valor é atribuído ao pixel da carta-imagem digital, obtendo-se (X_p, Y_p, vdc_i) . Procede-se analogamente para todos os pixels da carta-imagem digital.

Propriedades do método indirecto:

- cada pixel da carta-imagem tem um correspondente na imagem original;
- os valores de cinzento da carta-imagem são interpolados dos originais;
- não há lacunas de informação na carta-imagem.

Qualquer que seja o método usado, a qualidade geométrica da ortofoto depende directamente da densidade e qualidade do modelo digital do terreno utilizado.



Figura 6.2.2.1 - Extracto de ortofoto realizada com DTM deficiente
(FCUL- trabalho prático de alunos)

6.3 Ortofoto real

A utilização de um modelo digital do terreno preciso elimina a influência do relevo do terreno na escala da imagem. No entanto, todos os objectos que sobressaem do terreno, como é o caso das árvores e da maior parte das construções humanas, aparecem na imagem rectificada em posições que não correspondem à sua projecção ortogonal, dando origem ao efeito muito comum dos prédios “deitados” e dos deslocamentos nas pontes, etc.



Figura 6.3.1 - Erros em ortofotos provocados pela utilização de um MDT em zona urbanizada com deficientes linhas de quebra

Este erro pode ser eliminado se, em vez de se considerar um modelo digital do terreno (DTM) na rectificação, se considerar um modelo digital da superfície (DSM)

contendo toda a altimetria da superfície construída, incluindo prédios, pontes, etc. Os DSM para este efeito podem ser adquiridos por estereofotogrametria ou por altimetria de laser.

As ortofotos assim produzidas designam-se **ortofotos reais** (true orthophoto), pois nelas todos os objectos estão representados apenas pela sua projecção ortogonal no plano horizontal, tal como numa carta, não aparecendo quaisquer planos verticais rebatidos (fachadas de casas, etc.).

A utilização de um DSM para criar uma ortofoto gera, no entanto, lacunas em todas as zonas que na imagem original estavam encobertas pelos objectos elevados distorcidos radialmente. Como a direcção da distorção desses objectos varia de foto para foto, a zona encoberta pelo mesmo objecto elevado também varia. Assim, para obviar essa situação de lacunas de informação na ortofoto, é necessário gerar várias ortofotos reais da mesma zona a partir de diferentes fotografias mas usando o mesmo DSM. As zonas de lacuna de umas correspondem a zonas de não-lacuna em outras. A ortofoto final será composta pela informação rectificada proveniente de várias ortofotos, como exemplificam as figuras que se seguem.

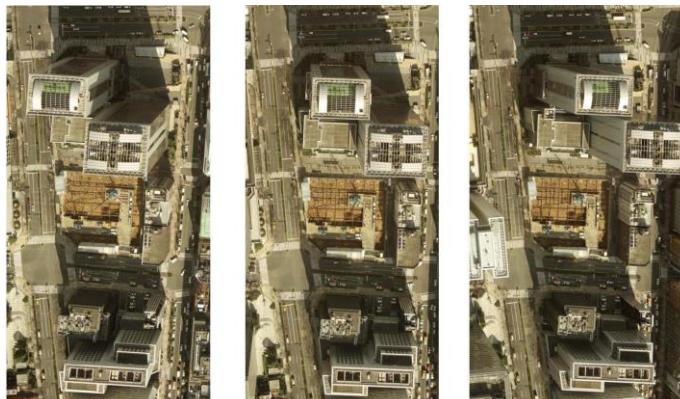


Figura 6.3.2 - Imagens originais com distorção radial devida à altura dos objectos
(Oda,K.2004)



Figura 6.3.3 - Ortofotos produzidas com DSM. Lacunas a preto. Telhados na sua posição ortogonal correcta. (Oda,K.2004)



Figura 6.3.4 - Ortofoto real final sem lacunas obtida por composição das anteriores
(Oda,K.2004)

6.4 Ortofotos sem DSM

A aquisição de um modelo digital de superfície capaz é morosa e dispendiosa, pelo que frequentemente se produzem ortofotos a partir de DTMs. Sobretudo em zonas de elevada concentração de construções humanas há que limitar o efeito, na ortofoto final, da distorção perspectiva devida ao relevo.

Caso não se disponha de DSM, o efeito do relevo artificial (casas, pontes e outras construções) pode ser atenuado se for ortorrectificada apenas a parte central da fotografia onde a distorção é menor. A distorção perspectiva é particularmente notável em voos de baixa altitude e aumenta radialmente do centro para as margens da foto, como é bem traduzido pela fórmula :

$$\Delta r = \frac{r}{h_0} * \Delta h = \frac{r}{c.m_f} * \Delta h$$

r = distância radial do ponto ao centro da foto

Δr = distorção radial

Δh = diferença de cota entre o ponto e o ponto médio da foto

h_0 = altura de voo sobre o ponto médio da foto

c = constante da câmara

m_f = módulo da escala da foto

Para não haver lacunas de informação quando se utiliza a parte central de cada foto, no caso mais usual de se utilizar um mosaico de várias fotos adjacentes para elaborar uma ortofoto, as coberturas fotográficas devem ser planeadas e executadas com sobreposições longitudinais superiores a 60%, sendo estas calculadas pela fórmula :

$$\ell = \frac{S - B}{S} * 100$$

tomando B (Base real) o valor da dimensão central da foto (lado do quadrado) que se pretende aproveitar para ortorrectificar multiplicado pelo módulo da escala da fotografia. S é a dimensão do lado da fotografia no terreno na direcção do voo. Neste tipo de voos exige-se igualmente que a distância entre eixos de fiadas (A), seja igual à base real. A condicionante de todo o planeamento é a distorção Δr aceitável na ortofoto. ($lq = r \sqrt{2}$)

6.4.1 Método alternativo

A geração de ortofotos reais de zonas urbanas de um modo eficaz e económico tem sido alvo de várias abordagens. Um método alternativo que dispensa qualquer modelo digital de elevação (DTM ou DSM) é apresentado por Albertz e Wolf (Albertz, Wolf 2003). Condição necessária para a sua aplicação é que exista um voo digital da zona, realizado por uma câmara digital linear do tipo de sensor de 3 linhas (por ex., ADS40). O voo deve ser realizado em duas direcções perpendiculares. Nas imagens deste tipo de câmara, só existe distorção radial devida ao relevo ao longo de cada linha de sensores, ou seja na direcção perpendicular à do voo.

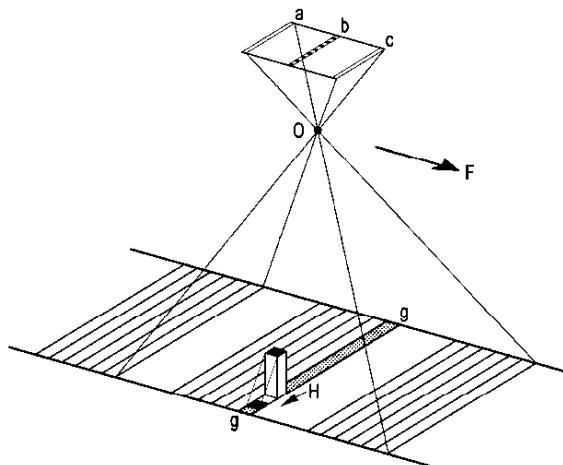


Figura 6.4.1.1 - Distorção devida ao relevo num scanner de três linhas

Ao ser fotografado um mesmo objecto elevado a partir de duas direcções de voo perpendiculares, ele sofrerá nas duas imagens distorções perspectivas em direcções

também perpendiculares. Assim sendo, após terem sido detectados pontos correspondentes nas duas imagens é possível deduzir duas coordenadas objecto do ponto a partir das colunas onde o ponto se encontra em cada imagem.

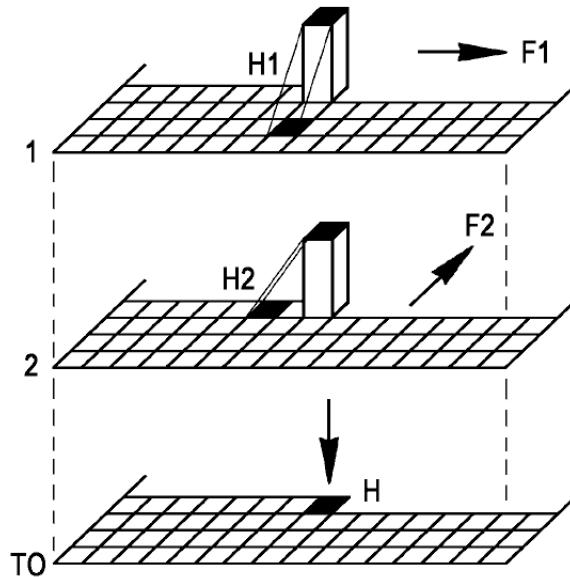


Figura 6.4.1.2 - Princípio das imagens perpendiculares

Como esquematiza a figura, a posição ortogonal do pixel H advém da coluna H_1 e da coluna H_2 nas imagens F_1 e F_2 voadas perpendicularmente. Por exemplo, se $H_1=23$ e $H_2 = 18$ as coordenadas de H serão $(23,18)$. Para estas coordenadas serem de facto as coordenadas terreno do edifício esquematizado será necessário que as imagens estejam devidamente georreferenciadas (por GPS/IMU). Deste modo, poder-se-á, em teoria, obter uma ortofoto real sem ter utilizado a informação de qualquer DTM ou DSM.

6.5 Informação altimétrica adicional

Uma ortofoto, como já foi referido, é uma representação do terreno fiel na sua posição geométrica (ortogonal) e com a densidade de informação equivalente à da fotografia original. No entanto, ao invés do que se passa com um par de fotografias estereoscópicas, a observação de uma ortofoto simples não proporciona informação altimétrica sobre o terreno fotografado. Esta, ou é sobreposta à imagem em forma de curvas de nível, cuja representação é rigorosa mas pouco sugestiva, ou é introduzida por complementação da ortofoto com elementos que permitam ao utilizador uma percepção do relevo. As técnicas mais usadas para tal são:

- o anaglifo suplementar,
- a estéreo-ortofoto,
- a hipsoimagem.

O **anaglifo suplementar** é normalmente executado a uma escala menor do que a ortofoto e é apresentado na margem desta ou como folha adicional. Consiste em projectar duas imagens adjacentes de um voo (não rectificadas), sobre uma mesma área, com cores complementares (uma em vermelho e outra em ciano) e desfasadas de uma determinada paralaxe, normalmente exagerada em relação à realidade, de modo a que, por observação com óculos de filtros anaglíficos se tenha a percepção do relevo da zona.

A **estéreo-ortofoto** consiste em realizar uma ortofoto e dois estereossóios, um para cada metade (direita e esquerda) da ortofoto. O estereossócio é criado digitalmente, tal como a ortofoto, considerando uma projecção da foto original paralela mas não ortogonal.

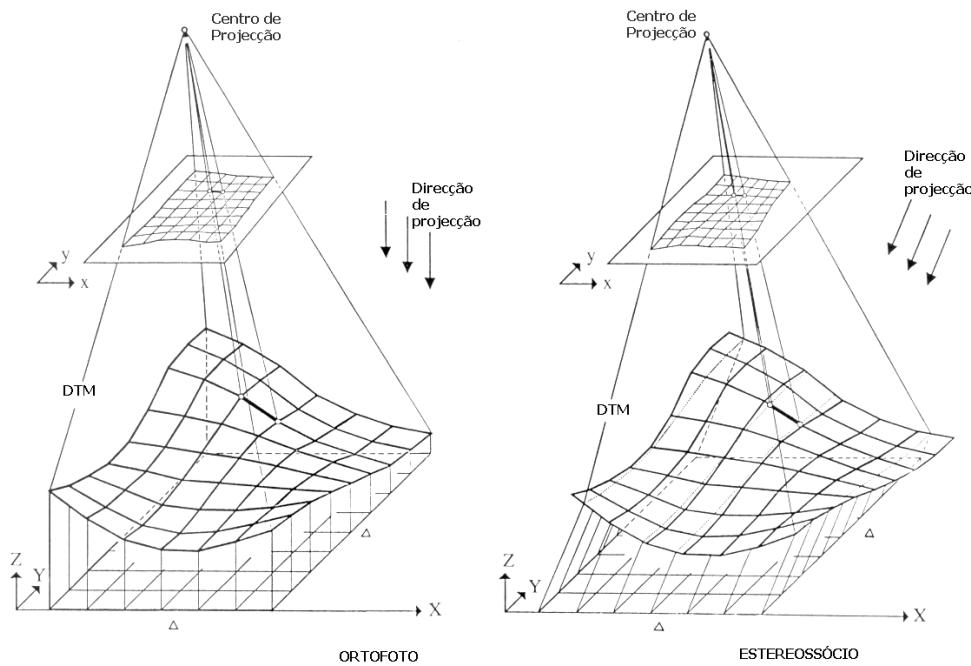


Figura 6.5.1 - Criação de um estereossócio da ortofoto (Kraus)

A imagem assim criada tem paralaxe horizontal dependente da sua cota e, tal como no modelo estereoscópico, não tem paralaxe vertical.

$$Px = k \cdot Z$$

onde Px é a paralaxe horizontal, k é a tangente do ângulo Zenital da direcção de projecção e Z a diferença de cotas entre o plano de projecção e o ponto do terreno a projectar.

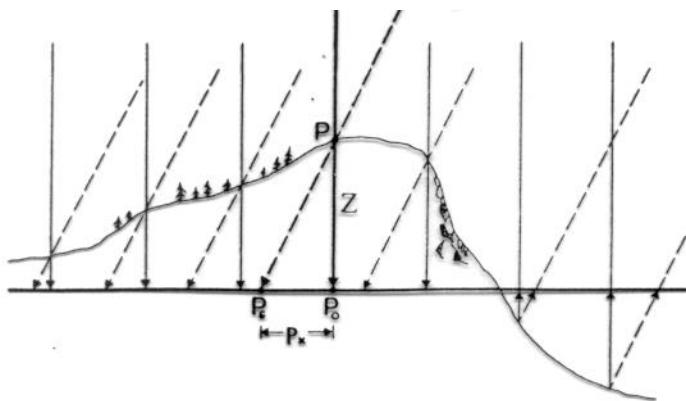


Figura 6.5.2 - Paralaxe entre ortofoto e estereossócio (Kraus)

A ortofoto e cada um dos seus estereossócios devem ser observados por um estereoscópio de espelhos para ser possível percepcionar o relevo da região. Os estereossócios podem ser criados a partir das fotografias adjacentes à utilizada para elaborar a ortofoto (caso seja uma única).



Figura 6.5.3 - Estereoortofoto

As **hipsoimagens** são basicamente ortofotos reais cujos pixels, em vez de reflectirem a radiometria original da imagem fotográfica, são modificados de modo a apresentarem a intensidade original mas uma cor falsa. A cor de cada pixel indica a sua informação altimétrica, à qual corresponde uma escala de cores compreendendo o espectro da luz visível (extremo vermelho para as cotas mais elevadas e extremo azul para as mais baixas). Enquanto a imagem “a olho nu”

satisfaz todas as condições de uma ortofoto (de falsa cor) sem distorções perspectivas, a observação da imagem com uns óculos especiais de prismas (que dão a sensação de cada cor estar a uma distância do observador diferente das outras cores) proporciona a sensação do relevo (cromostereoscopia). A sensação nas hipsoimagens é tanto mais intensa quanto mais abruptas forem as variações de cota no terreno, como acontece, por exemplo, em cidades com prédios muito altos em que a cota da superfície pode variar de 20, 50 ou 100m de um ponto para o ponto vizinho e manter-se quase constante ao longo das ruas e ao longo dos telhados dos prédios. A codificação do relevo em cores pode ser feita em várias classes da escala cromática, ou de um modo contínuo, do azul ao vermelho passando por todas as cores e gradações intermédias, originando assim uma sensação de relevo muito próxima do real (Toutin).



Figura 6.5.4 - Hipsoimagem de Buenos Aires com o relevo representado por quatro classes (azul, verde, laranja e vermelho). A observar com óculos cromadepth.

6.6 Ortomosaicos

Na maior parte dos casos, as ortofotos não são usadas individualmente, mas sim utilizadas para produzir ortomosaicos, ou seja uma composição de ortofotos individuais para cobrirem uma área maior. Como cada ortofoto herda as características radiométricas da fotografia que lhe deu origem, ocorre muito

frequentemente, que ao juntar ortofotos num mosaico se note a transição de umas para as outras por diferenças de tom ou de luminosidade, obtendo-se um produto final de boa precisão geométrica mas de fraca qualidade radiométrica. Para evitar isso, há que realizar processamento digital de imagem sobre as ortofotos que vão compor o mosaico. Estas operações não vão afetar a geometria.

Começa-se por ajustar a luminosidade global das ortofotos de modo a que a média dos valores de cinzento (ou de intensidade) de cada canal R, G e B de todas as imagens seja a cor cinzenta. Esta operação denomina-se Normalização da luminosidade. Segue-se o tratamento de zonas comuns a cada par de ortofotos na vizinhança da linha de separação entre elas no mosaico, a que se chama costura. A costura pode ser uma linha reta ou uma linha curva. Para localizar a costura existem vários métodos, dos quais vamos referir o seam-carving que resulta em costuras globalmente ótimas na zona de sobreposição de duas ortofotos. Um método de suavizar a transição entre duas ortofotos é a mistura dos seus valores de cinzento (blending ou feathering) numa faixa adjacente à costura.

6.6.1. Normalização da luminosidade

Para normalizar a luminosidade das ortofotos, cada canal R, G e B é tratado separadamente. Primeiro é calculada a média dos valores de cinzento de cada canal, R', G' e B'. Depois é criada uma imagem média L que é a média das 3 médias:

$$L = (R' + G' + B') / 3$$

Seguidamente formam-se novos canais aplicando as fórmulas:

$$R1 \rightarrow L * R / R' \quad G1 \rightarrow L * G / G' \quad B1 \rightarrow L * B / B'$$

Por fim, faz-se a composição dos novos canais e obtém-se a imagem compensada. Esta operação faz-se para todas as ortofotos que entrem no mosaico de modo a ficarem todas com luminosidades semelhantes.

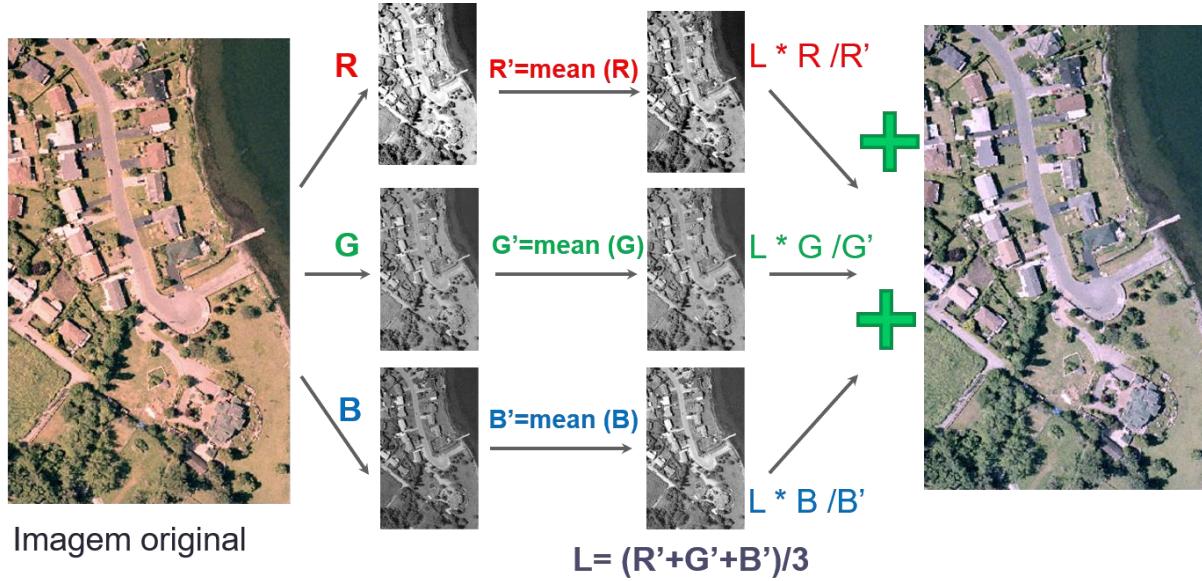


Figura 6.6.1.1. Normalização de ortofoto.(Fonte: Cyrill Schniss, Photogrammetry 02)

6.6.2. Determinação das costuras

A maneira mais simples de definir as costuras de um mosaico é considerá-las retilíneas a meia distância entre os limites da zona de sobreposição de cada par de ortofotos, como mostra a figura 6.6.2.1., tanto na direção vertical como na horizontal.

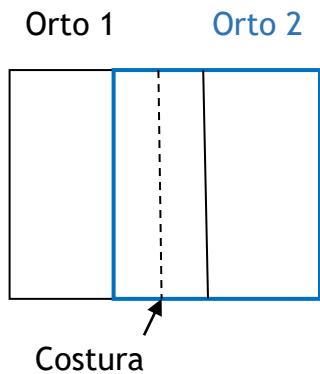


Figura 6.6.2.1. Costura retilínea entre ortofotos.

Pode, no entanto, acontecer, que, apesar de as ortofotos estarem normalizadas radiometricamente, se notem as transições, sobretudo quando as costuras passam sobre edifícios ou estradas de textura homogénea como se vê na figura 6.2.2.2..



Figura 6.6.2.2. Mosaico com costuras retilíneas. (Dir.) Pormenor do mosaico na costura, notando-se a transição entre ortos.

Para evitar isso, existem vários métodos para determinar o percurso das costuras entre ortofotos de modo a que as transições se façam ao longo de limites (por ex. um lado de uma estrada, a borda de uma floresta, o contorno de um edifício) não se notando no mosaico final. Um desses métodos é o ‘seam-carving’ (sulcar as costuras) que consiste num método automático aplicado a uma faixa da zona de sobreposição de duas ortos de cada vez. Nessa faixa é calculada para cada pixel uma função e com a seguinte fórmula:

$$e = \sqrt{(I-J)^2}$$

onde I e J são os valores de cinzento (intensidades) da orto I e da orto J na mesma posição (x,y). A figura 6.6.2.3. mostra a representação da função e para as duas ortos apresentadas:

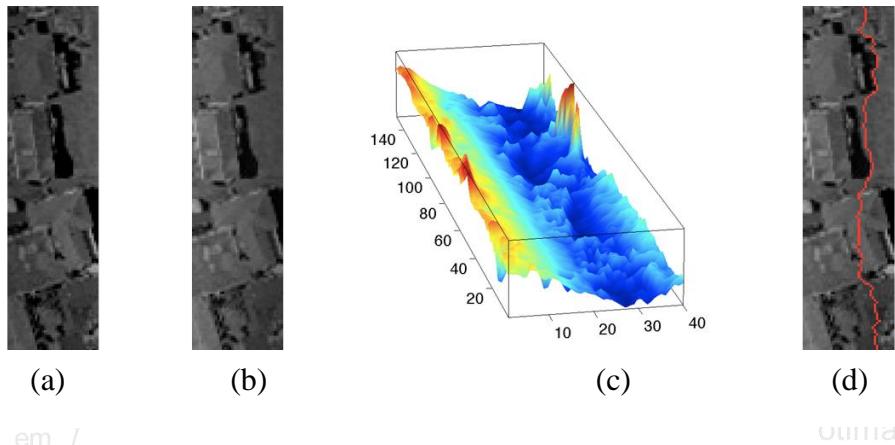


Figura 6.6.2.3. (a) zona de sobreposição da ortofoto I ; (b) zona de sobreposição da ortofoto J ; (c) função e da zona de sobreposição; (d) costura ótima a vermelho. (Fonte Cyrill Sackniss, Photogrammetry 02)

A partir da função e , vai-se procurar o caminho que minimize a soma dos valores de e no seu percurso e que ligue o limite de cima ao limite de baixo da zona de sobreposição, caso estejamos à procura de uma costura na vertical. Se a costura procurada for na horizontal, o caminho ótimo deverá ligar o limite esquerdo ao limite direito da zona de sobreposição nas mesmas condições. O caminho ótimo corresponderá à costura ótima entre as duas ortofotos.



Figura 6.6.2.4. Costuras ótimas sobre um mosaico

6.6.3. Blending

A operação de blending tem como objetivo misturar os valores de cinzento das duas ortofotos na zona de transição (uma faixa para os dois lados da costura, seja ela retilínea ou curva) calculando uma média ponderada das intensidades das duas ortofotos, em que o peso diminui em função da distância à costura. Em cada posição, a soma dos pesos atribuídos a cada uma das duas ortos em questão tem de ser igual a 1.

Começa-se por produzir uma máscara não binária com as dimensões de cada ortofoto. Fora da zona de transição a máscara tem o valor 1. Dentro da zona de transição, o valor vai diminuindo linearmente na direção da costura, tomando o valor zero no limite da zona de transição assim como em toda a área para além desta zona. Sobre a costura tomará o valor 0.5. Ao multiplicar as ortos pelas respetivas máscaras, obtém-se, na zona de transição, imagens que se vão esbatendo até desaparecerem. A progressão do esbatimento é feita em sentido contrário nas duas ortos. Quando se somam as duas, a imagem resultante não apresenta qualquer transição na costura como demonstrado nas figuras 6.6.3.1., para costuras retilíneas, e 6.6.3.2., para costuras curvas.

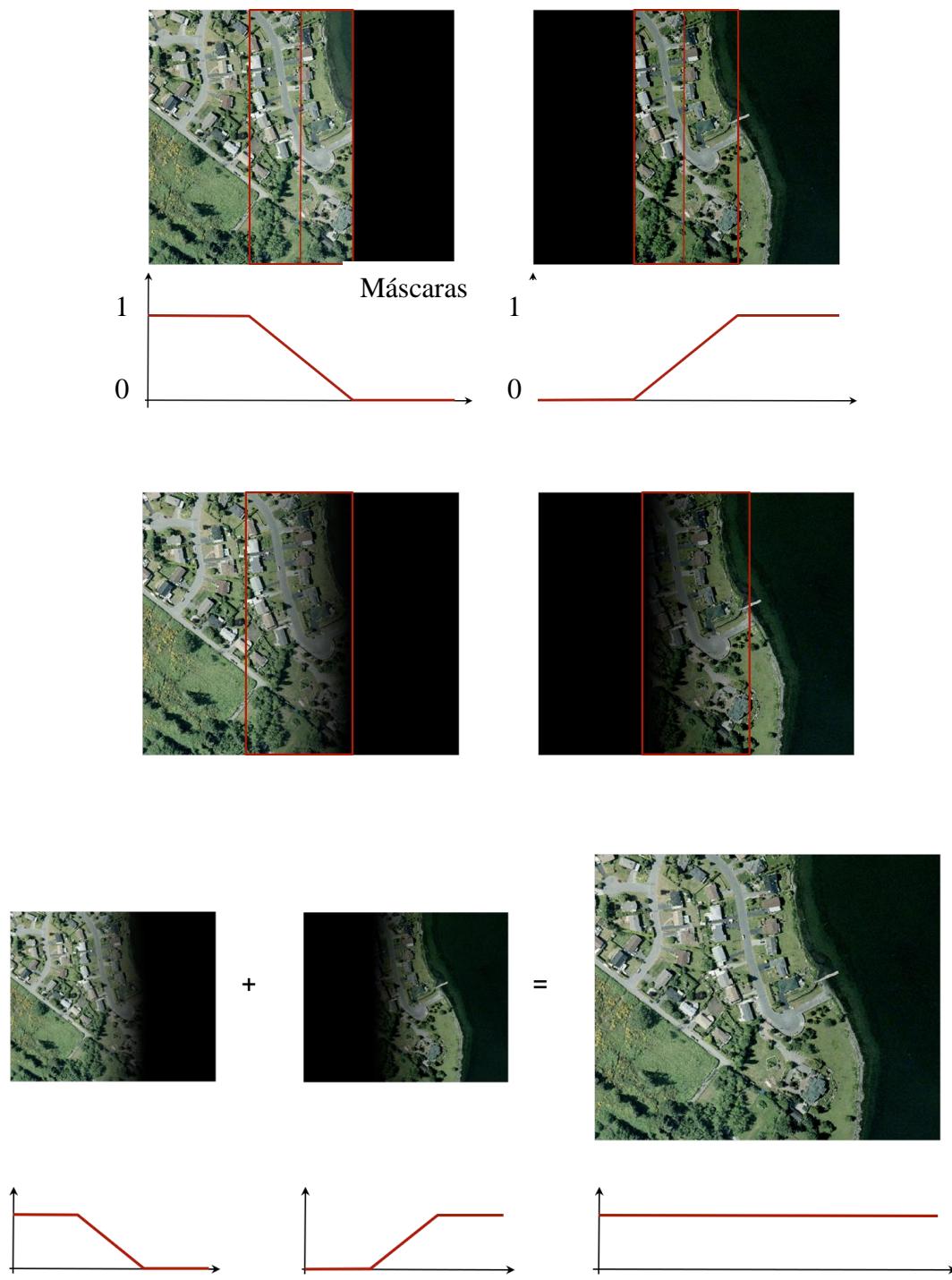


Figura 6.6.3.1 Sequência de operações do Blending (exemplo com costuras retilíneas)

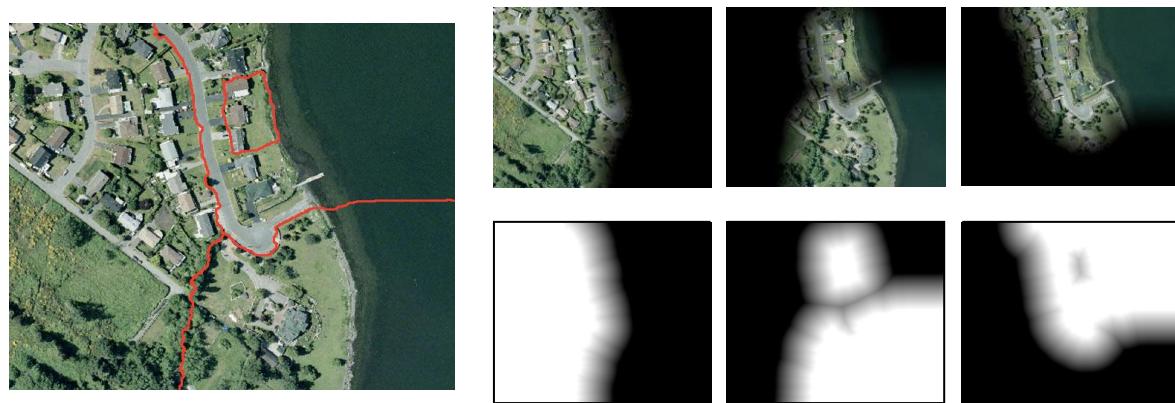


Figura 6.6.3.2. Blending para costuras curvas

6.7. Ortofotocartas ou ortofotomaps

Um ortomosaico transforma-se num ortofotomapa ou numa folha de uma ortofotocarta quando este é enquadrado numa quadricula cartográfica à sua escala e lhe são adicionados todos os elementos gráficos necessários a uma carta gráfica. Se se tratar de uma cobertura ortofotográfica oficial, a sua designação, as dimensões e os limites do ortomosaico terão de obedecer ao seccionamento oficial do país estabelecido pela autoridade de cartografia (atualmente a Direção Geral do Território). Se não for esse o caso, se o ortomosaico se referir apenas a uma cobertura da área de um projeto particular, não há necessidade de respeitar o seccionamento.

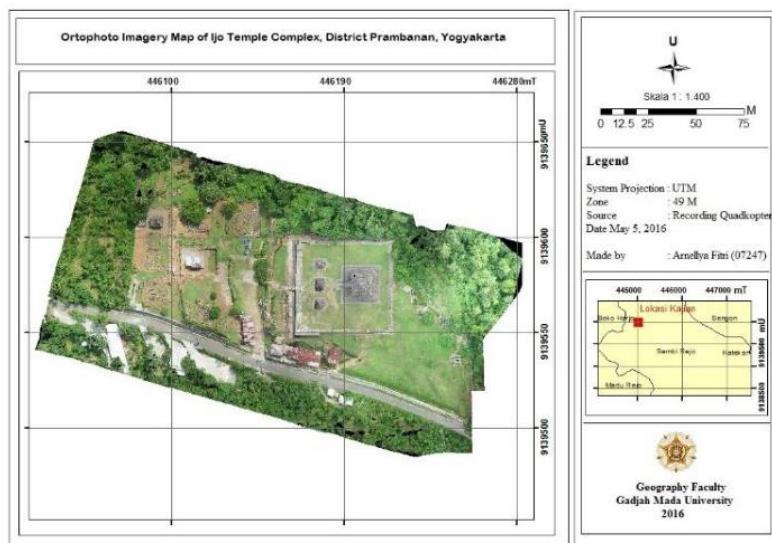


Figura 6.7.1. Ortofotomapa não oficial

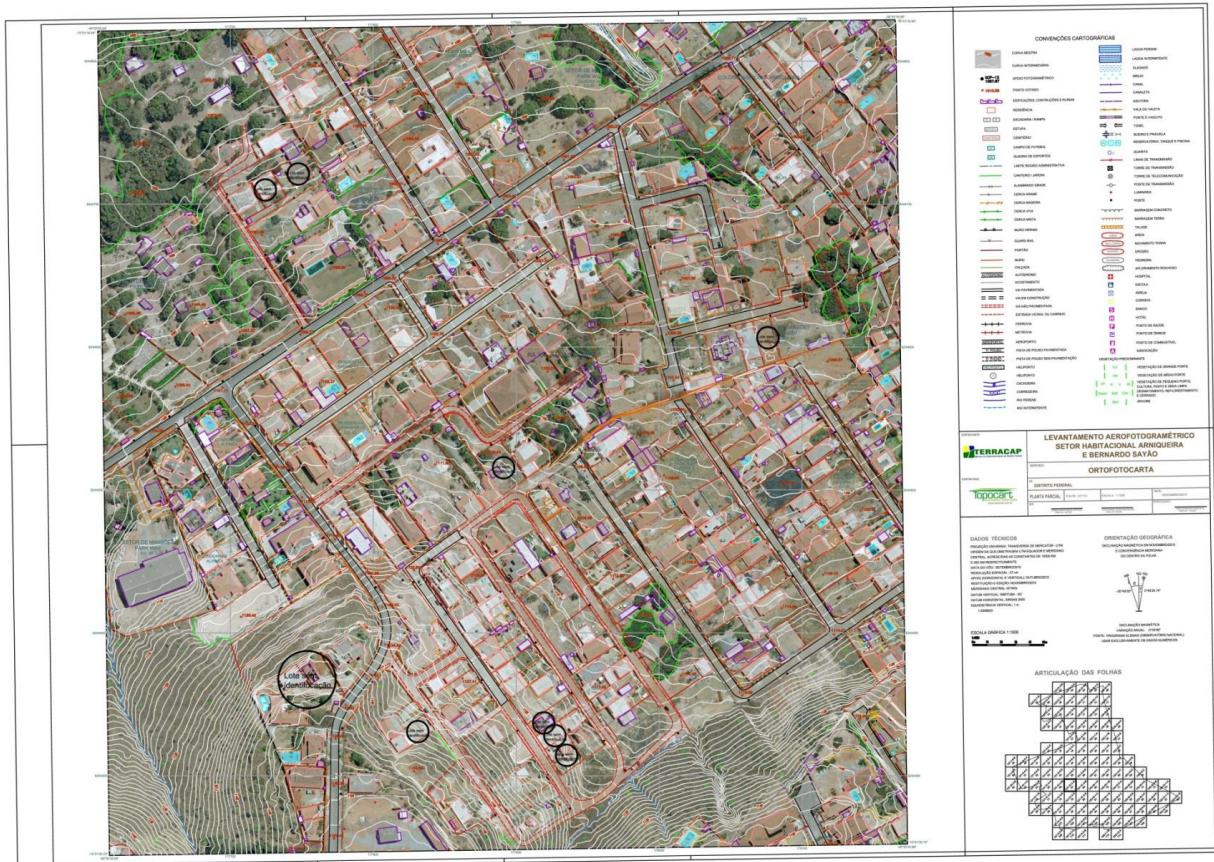


Figura 6.7.2. Folha de Ortofotocarta oficial

7 - LiDAR Aéreo (ALS)

O LiDAR (Light Detection And Ranging) ou Laser-Scanning é um método de medição de distâncias baseado na emissão e recepção de um feixe Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). A sua aplicação na produção cartográfica provem da capacidade de varrimento de áreas extensas e tem tido grande impacto na última década sobretudo na determinação da altimetria do terreno. Também nos campos de aplicação da Fotogrametria Terrestre, o LiDAR implantou-se de uma forma autónoma ou complementar à fotogrametria na restituição de objectos.

A característica fundamental de um levantamento LiDAR é o facto de este fornecer rapidamente, de um modo directo, grandes e densas quantidades de pontos tridimensionais do objecto, a partir das quais, em pós-processamento se podem derivar superfícies, planas ou não, e outros elementos descritivos do objecto. O funcionamento do LiDAR assenta numa conjugação de tecnologias de ponta cujas características principais serão brevemente referidas.

Embora o funcionamento básico para a detecção das distâncias seja semelhante, fazem-se distinções dos instrumentos LiDAR quanto à sua aplicação, pelo que aparecem na literatura técnica várias designações. A classificação mais genérica distingue apenas ALS (Airborne Laser Scanning) de TLS (Terrestrial Laser Scanning), referindo-se o primeiro a LiDAR aéreo e o segundo a LiDAR terrestre. Dentro do ALS distingue-se o LiDAR topográfico do LiDAR batimétrico (ALB). Dentro do TLS considera-se ainda o LiDAR de longa e de curta distância, o fixo e o móvel. Este capítulo focar-se-á no ALS topográfico

7.1 ALS Equipamento e funcionamento

O equipamento de um laser-scanner utilizado para ALS é composto genericamente por um emissor de feixe laser (contínuo ou por impulsos), um deflector óptico ou electrónico que desvia o feixe para direcções diferentes da de saída do emissor, um codificador de ângulo de saída do feixe associado ao deflector, um receptor do sinal reflectido e um sistema IMU (Inertial Measuring Unit) de alta precisão (100Hz) para fornecer dados de altitude (3 ângulos) da plataforma.

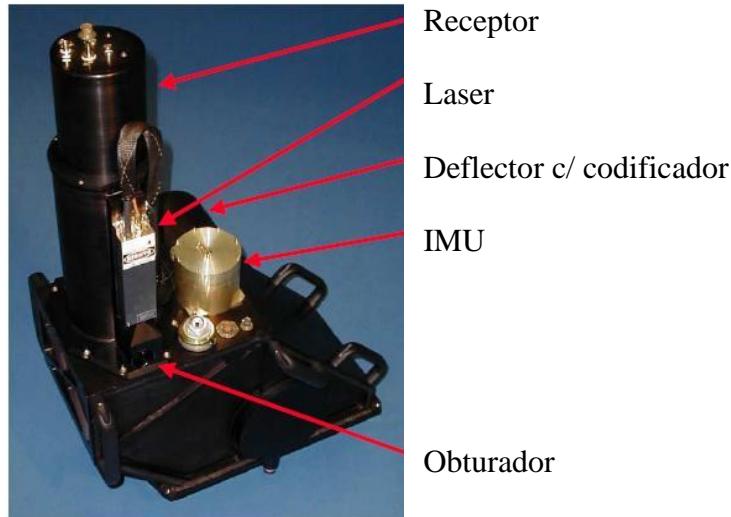


Figura 7.1.1. Componentes de um ALS

O equipamento é instalado numa plataforma móvel aérea em contacto directo com o exterior, com o equipamento laser direcionado para o nadir. A plataforma é normalmente um avião do tipo utilizado para câmaras aéreas ou um helicóptero.

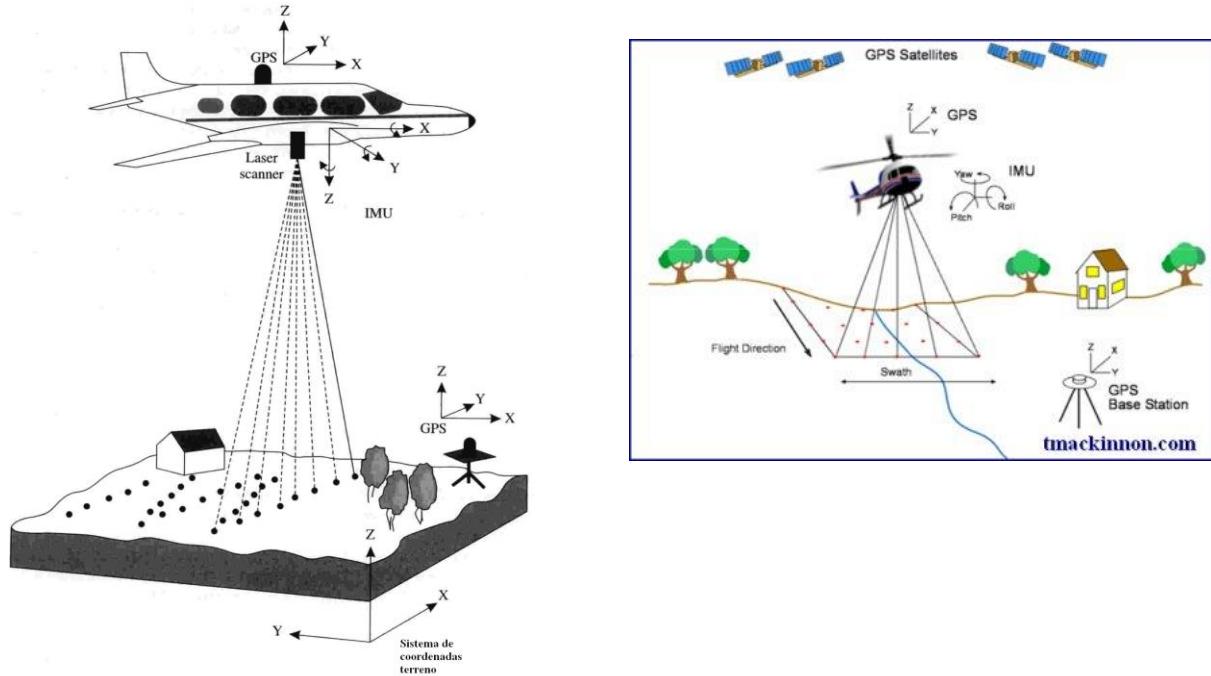


Figura 7.1.2. Plataformas para ALS e funcionamento básico

À plataforma (avião, helicóptero) tem de estar associado um receptor GNSS com alta taxa de aquisição (10 Hz). Durante o levantamento é ainda necessário colocar um segundo receptor GNSS em terra na zona do levantamento sobre um ponto de

coordenadas conhecidas para permitir a coordenação da trajectória da plataforma por posicionamento diferencial e a ligação ao datum em que se pretendem os resultados.

O funcionamento do laser scanning ocorre do seguinte modo:

- 1- a unidade laser (solid state Nd:YAG ou semi-condutores GaAs) emite impulsos de radiação laser com uma determinada duração (~10 ns) num feixe com uma determinada direcção.
- 2- o deflector desvia esse feixe em direcção à superfície terrestre. Em geral o deflector é um dispositivo (espelho, prisma ou galvanómetro) que desvia os sucessivos impulsos segundo ângulos diferentes num plano perpendicular à direcção de voo. O ângulo de saída de cada impulso em direcção a terra é registado pelo codificador de ângulo (o tipo e comportamento do deflector dependem do modo de construção do equipamento).
- 3- o feixe/impulso laser é reflectido pelo solo/objecto e parte desse reflexo é captada pelo receptor.
- 4- a distância percorrida pelo impulso laser é calculada, segundo o equipamento :
 - a. pelo tempo de voo (time of flight) para impulsos
 - b. pela diferença de fase (phase shift) para feixe contínuo
- 5- à medida que o deflector vai desviando o feixe, vão sendo atingidos pelo feixe vários pontos no solo distribuídos transversalmente à linha de voo
- 6- à medida que o avião vai avançando esses pontos cobrem, no solo, uma faixa cuja largura depende da altura de voo e do ângulo máximo de deflecção (scan angle).

7.2. Resultados do ALS

A maioria dos ALS com aplicação na produção cartográfica trabalha com impulsos laser. O receptor detecta com grande precisão (por meio de osciladores de quartzo estabilizados) o intervalo de tempo Δt ocorrido entre a emissão e a recepção de um impulso. Sabendo a velocidade da radiação electromagnética emitida (~velocidade da luz) pode-se calcular a distância do deflector ao ponto no solo que reflectiu o impulso por:

$$s = c \cdot \Delta t / 2 \quad c = 300\,000 \text{ km/s}$$

A precisão deste valor depende da resolução temporal do dispositivo que determina o intervalo de tempo. A orientação espacial do feixe é feita por georreferenciação directa como a seguir se descreve. O codificador de ângulo, juntamente com o IMU permitem determinar para cada impulso qual a sua orientação no espaço. O GNSS permite determinar para o momento de cada impulso quais as coordenadas do ponto origem do impulso. Todos estes dados, obtidos dos diversos dispositivos e sincronizados para o instante t do impulso, fornecem as coordenadas polares do ponto no solo que reflectiu o impulso, ou seja, uma origem, uma direcção e uma distância. As coordenadas cartesianas do ponto referido podem ser calculadas da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0(t) \\ Y_0(t) \\ Z_0(t) \end{bmatrix} + R_{\omega(t)\varphi(t)k(t)} \begin{bmatrix} 0 \\ s(t)\sin\alpha(t) \\ s(t)\cos\alpha(t) \end{bmatrix}$$

Nesta fórmula, α corresponde a um ângulo fornecido pelo codificador de ângulo mas com origem na vertical da plataforma. A fórmula só é válida após terem sido considerados :

- as translações das origens (offset) do IMU e do GNSS relativamente à origem dos impulsos laser
- o desalinhamento (misalignment) dos sistemas de eixos do IMU, do codificador de ângulo e do sistema de coordenadas objecto X,Y,Z.

Estas quantidades consideram-se constantes ao longo de um levantamento e são determinadas por calibração do sistema, realizada de modo semelhante à necessária para sistemas GPS/IMU, adaptada às características dos dados LiDAR. Um impulso laser é constituído por um feixe cónico de radiação electromagnética cuja abertura se denomina divergência. A largura do feixe na zona junto ao solo é tanto maior quanto maior for a altura de voo. Isso tem como consequência que um impulso atinja não um ponto, mas uma área (pegada) e que possa ser reflectido por vários pontos a alturas diferentes e portanto a distâncias ao emissor diferentes, originando vários ecos.

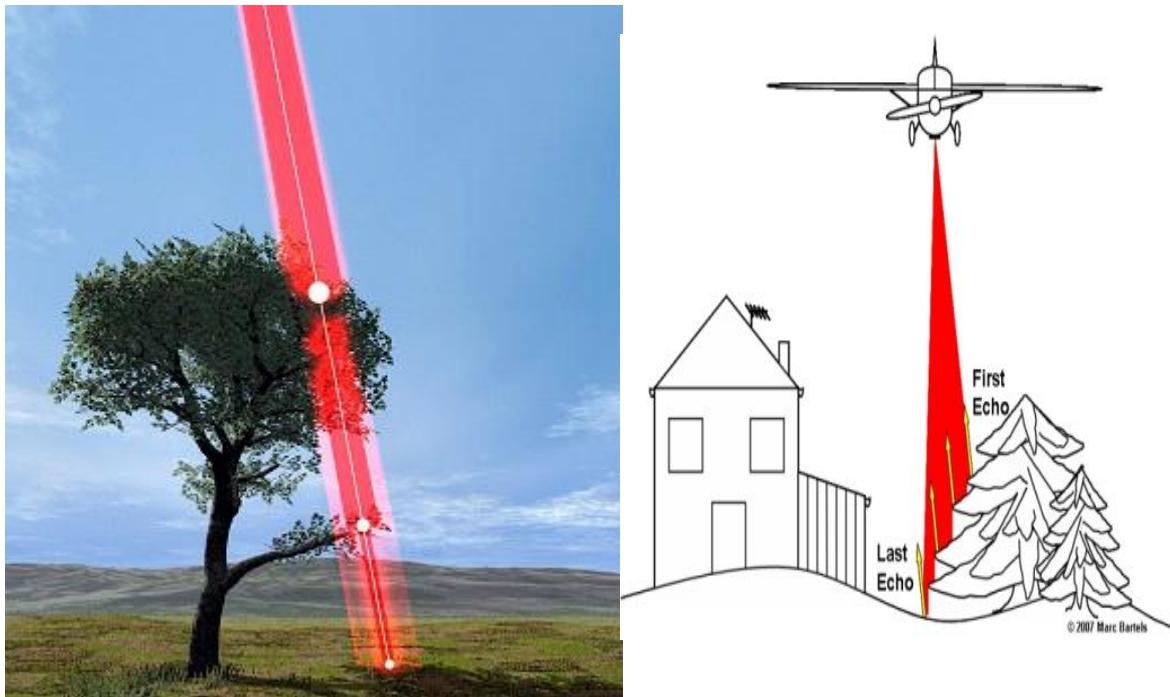


Figura 7.2.1. Múltiplos ecos do mesmo impulso

Os equipamentos mais recentes são capazes de registar os múltiplos ecos de cada impulso, tornando possível uma classificação dos dados na fase de processamento separando objectos em classes (por ex. vegetação arbórea, cabos de transporte de energia e solo)

Também a intensidade do eco pode ser registada em formato de imagem. Devido à radiação emitida ser infra-vermelha, a imagem gerada é IV em tons de cinzento com baixa resolução.

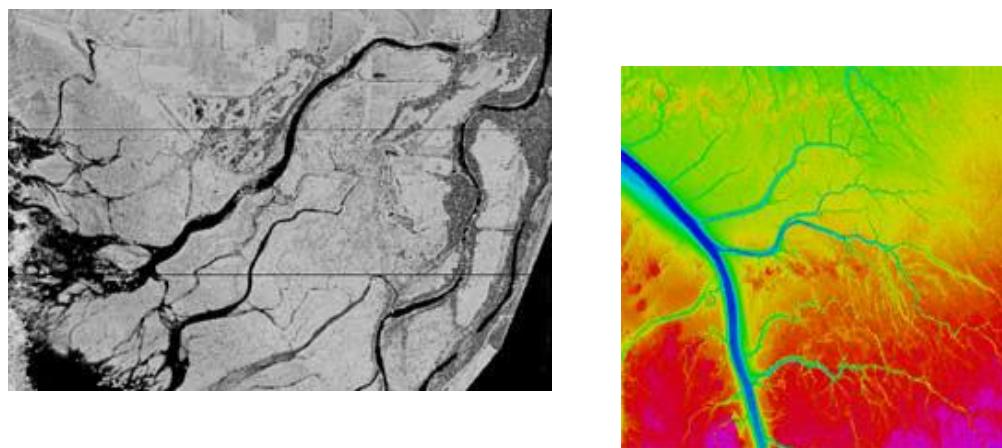


Figura 7.2.2 Imagens de intensidade. À esquerda, original. À direita, classificada.

7.3. Características Técnicas de um ALS

Todos os sistemas de ALS topográficos actuais funcionam com radiação laser no domínio do infra-vermelho próximo, invisível, em comprimentos de onda que variam segundo os fabricantes ($\lambda=1047, 1064, 1540\text{ nm}$).

A taxa de emissão, expressa em Hz, indica quantos impulsos por segundo a unidade laser emite, e vai normalmente de centenas a dezenas de milhar.

A taxa de scannerização, também expressa em Hz ou por minuto, indica quantos perfis transversais à linha de voo são cobertos por unidade de tempo. (Estes perfis poderão não ser rectilíneos).

A máxima abertura de scannerização (FOV- Field of View) indica o ângulo total de abertura entre os limites do leque das direcções que o deflector induz aos impulsos.

A divergência do feixe (IFOV-Instantaneous Field of View) indica o ângulo de abertura do feixe em cada impulso medido próximo da origem.

A máxima distância inclinada (Max. Slant Range) indica a distância inclinada máxima a que o ALS pode funcionar com um ratio sinal/ruído aceitável.

O levantamento com LiDAR topográfico, por ser realizado por um sensor activo, ou seja, que emite a radiação que recebe, pode ser realizado de dia ou de noite, pois não depende da luz solar. As condições climatéricas favoráveis a estes levantamentos são quando não há nuvens abaixo do sensor, tal como para levantamentos fotogramétricos.

7.4. Projecto de modelação por ALS topográfico

Um projecto de modelação por ALS inclui várias etapas que se esquematizam a seguir:

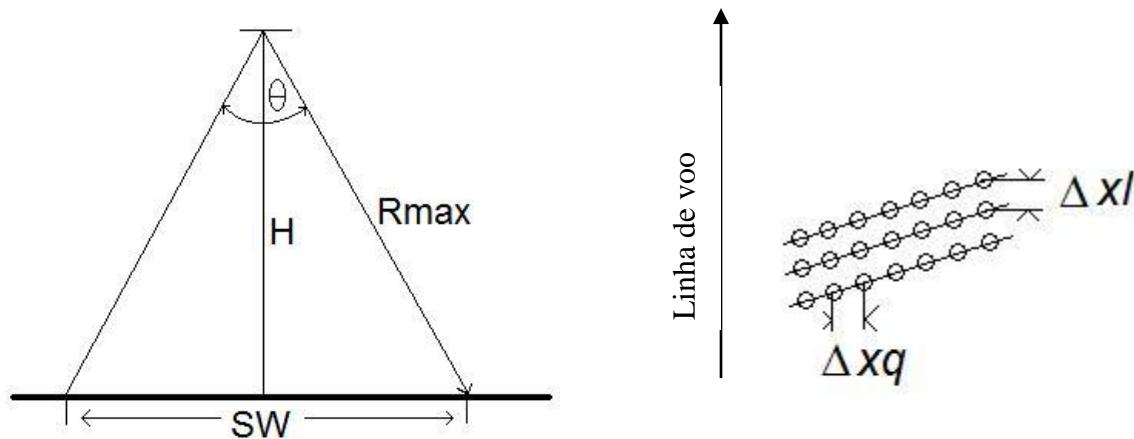
- Planeamento do levantamento
- Execução do levantamento = aquisição de dados em nuvens (dados brutos)
- Georreferenciação das nuvens de pontos => XYZ
- Ajustamento de faixas
- (opcional) Interpolação para grid regular
- Geração de produtos derivados/extracção de informação
 - MDS, MDT, MDO
 - Curvas de nível
 - Perfis
 - Ortofotos, imagens volumétricas (associado a imagem)
 - Outra informação 3D

7.4.1. Planeamento do levantamento

A nível do planeamento do levantamento vários aspectos se devem considerar, nos quais, tanto as características do equipamento a usar como o tipo de objecto a levantar e os requisitos para o produto a derivar são condicionantes interdependentes. Regra geral, uma determinada área é coberta por faixas paralelas de largura SW (swath width) cujos eixos estão afastados de uma distância A. As faixas adjacentes deverão ser planeadas de modo a terem uma sobreposição de 20% da sua largura tal como nos levantamentos fotogramétricos. A densidade de pontos no terreno a levantar é geralmente um dado condicionante do planeamento e depende do relevo do objecto, do produto final e da precisão que se pretende nesse produto. Para poder reproduzir um relevo cujo menor enrugamento tenha um comprimento de onda Lmin será necessária uma amostra com espaçamento mínimo entre os pontos igual a

$$\Delta = L_{\min}/3$$

No quadro que se segue estão compiladas as variáveis chave do planeamento e como se calculam em função das características do equipamento ALS. De um modo geral, os perfis na direcção transversal à linha de voo não são perpendiculares a esta.



Rmax - Maximal Slant Range: Máxima distância inclinada

H - altura de voo acima do solo

SW- Swath Width : largura da faixa

Θ - FOV- Field of View : ângulo máximo de scannerização

Δxl - espaçamento entre pontos ao longo da linha de voo

Δxq - espaçamento entre pontos na perpendicular à linha de voo

Altura de voo acima do solo	$H = R_{\text{max}} \cdot \cos(\Theta/2)$		
Largura de faixa	$SW = 2.H.\tan(\Theta/2)$		
Espaçamento de pontos	tranversal	$\Delta xq = (\Theta/N).(H/\cos^2(\Theta/2))$	N- número de pontos num perfil
	longitudinal	$\Delta xl = v/fsc$	v- velocidade do avião fsc-taxa de scannerização
Densidade de pontos	$d_{\text{min}} = 1 / (\Delta xq \cdot \Delta xl)$		d_{min} - pontos por m^2
Sobreposição lateral	$q = 1 - A/SW$		
Distância entre eixos de faixa	$A = SW \cdot (1-q)$		
Número de fiadas numa área retangular	$nfx = \text{int}(Q/A + 1)$		Q - largura da área retangular

Tabela 7.4.1.1. Fórmulas para planeamento de cobertura LiDAR

As fórmulas apresentadas para o espaçamento entre pontos são simplificadas e destinam-se apenas a planeamento. Na realidade os valores do espaçamento dependem também de outras variáveis além das apresentadas. O declive da zona a levantar influencia igualmente todas as variáveis de planeamento pelo que este tem de ser considerado, de modo a evitar lacunas de informação.

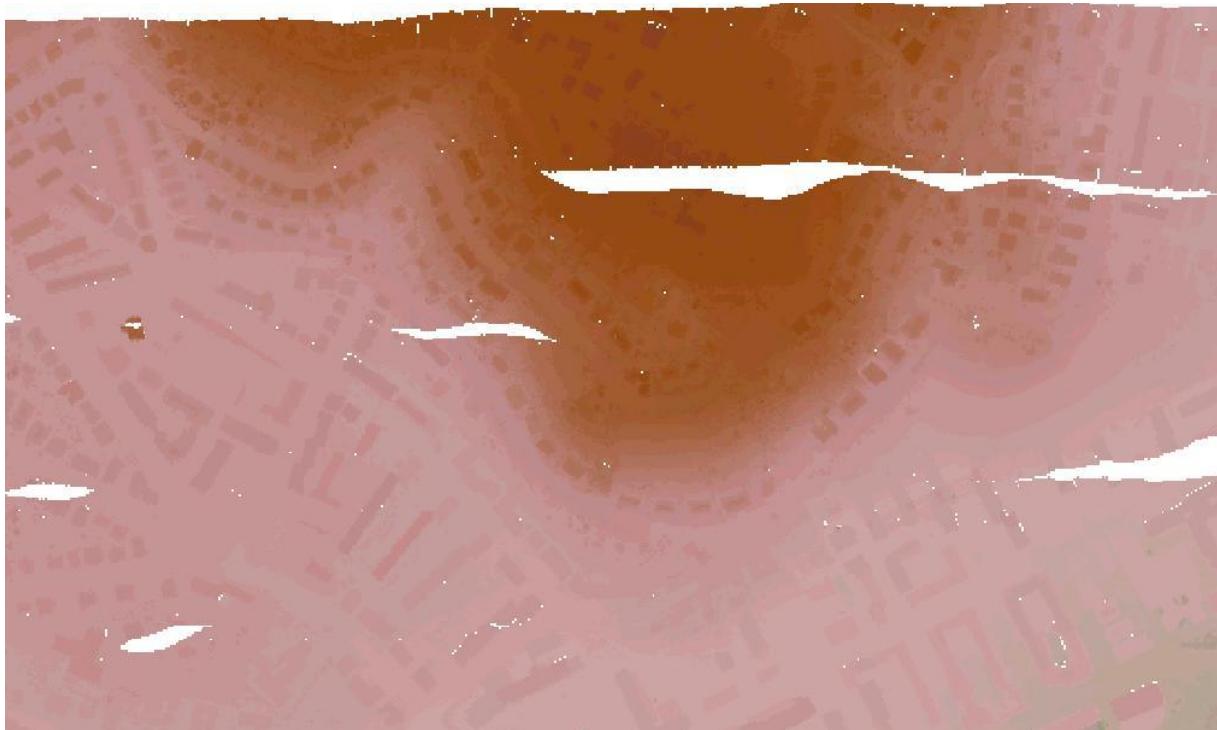


Figura 7.4.1.2. Exemplo de levantamento LiDAR com lacunas

7.4.2. Georreferenciação das nuvens e ajuste de faixas

Como a orientação espacial dos pontos levantados é realizada por georreferenciação directa, ou seja, sem recorrer a qualquer informação do terreno, ela depende da qualidade dos dados IMU, dos dados GNSS, do codificador de ângulo, do dispositivo medidor do intervalo de tempo e da sincronização entre os diversos dispositivos. Todos estes dispositivos podem introduzir erros na georreferenciação, geralmente difíceis de corrigir nos dados finais e que devem ser eliminados na fase de calibração do sistema face aos dados em bruto. Geralmente, após a calibração, ainda pode subsistir alguma discrepância entre a nuvem e o terreno, devidas a erros de datum, e entre faixas adjacentes. Para corrigir os desvios existentes nos dados XYZ da nuvem relativamente ao terreno, não se pode recorrer a pontos fotogramétricos pois estes não são identificáveis na nuvem de pontos. Por isso, para o controlo ou a correcção da georreferenciação da nuvem recorre-se aos chamados elementos fotogramétricos (EFs) localizados em zonas estratégicas da cobertura. Os EFs são conjuntos de pontos 3D medidos no terreno (no mínimo 3) por técnicas topográficas, que se encontram num mesmo plano horizontal ou inclinado. Os planos conseguem-se identificar bem em nuvens LiDAR. Estes planos podem ser telhados de casas, campos de jogos ou outras superfícies planas conspícuas na nuvem.

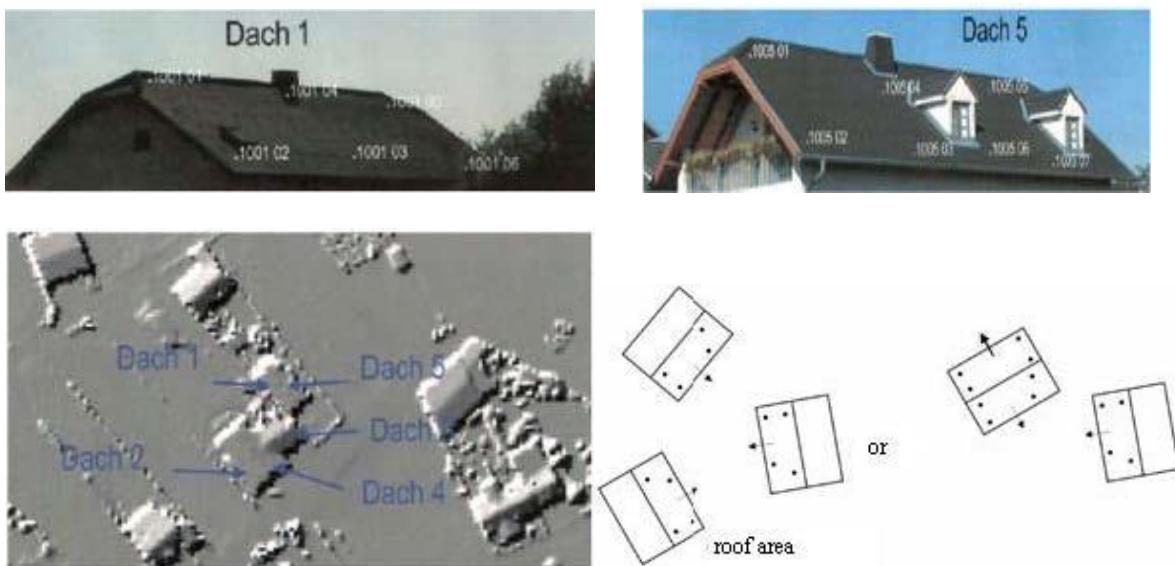


Figura 7.4.2.1. EFs no terreno (telhados) e na nuvem LiDAR. Em baixo à direita: disposição de EFs triplos para definição de pontos (de intersecção)

Enquanto em fotogrametria na referenciamento da cobertura fotográfica com o terreno se parte do ponto, se definem depois linhas por dois pontos e depois planos por três pontos, quando processamos nuvens LiDAR o caminho tem de ser o inverso. Na nuvem detectamos primeiramente planos (conjuntos de pontos complanares). Uma linha será definida como a intersecção de dois planos. Um ponto será definido pela intersecção de três planos. Tanto a linha como o ponto podem não estar materializados por pontos existentes na nuvem (pontos da amostra), mas podem sempre ser calculados. A um EF no terreno corresponde um plano na nuvem. Partindo do princípio anterior, o ajuste da georreferenciação da nuvem pode ser feito do seguinte modo:

Em altimetria:

1. Um EF constituído por pontos 3D num plano horizontal (p.ex. campo de jogos)
2. Com os pontos 3D define-se um plano de referência:

$$Z_{ref} = a_0 + a_1 X + a_2 Y$$

calculando os parâmetros a_0, a_1, a_2 pelo m.m.q.
3. Na nuvem medem-se X_{med} e Y_{med} de alguns pontos no plano correspondente ao EF
4. Calcula-se Z_{ref} para esses pontos pela fórmula em 2. e calcula-se a diferença ($Z_{ref}-Z_{med}$)
5. Faz-se uma média das diferenças
6. Repete-se o procedimento para outros EFs horizontais
7. Ajusta-se as cotas de toda a nuvem de um valor médio das diferenças de cota determinadas.

Em planimetria, considerando-se a altimetria já ajustada, o ajuste poderá ser feito por uma transformação plana da nuvem (de semelhança ou afim). Para isso será necessário definir pontos idênticos na nuvem e no terreno. O procedimento poderá ser o seguinte:

1. Os EFs devem ser em planos inclinados (p.ex. telhados não horizontais) e próximos uns dos outros.
2. Um conjunto de 3 EFs deste tipo define um ponto no terreno (intersecção de três planos)
3. Na nuvem, os três planos correspondentes aos EFs também se intersectam num ponto que é o correspondente ao anterior.
4. Cada conjunto de 3 EFs define um ponto idêntico a um na nuvem LiDAR. Os parâmetros da transformação plana para X e Y entre a nuvem e o terreno podem ser calculados pelos pontos idênticos (min. 2 pontos para transformação de semelhança, 3 pontos para a transformação afim).
5. Toda a nuvem é reposicionada pela transformação plana ajustando em X e Y.

O ajustamento também pode ser realizado tridimensionalmente (altimetria e planimetria de uma vez só) por uma transformação espacial de semelhança aplicada a um mínimo de 3 pontos idênticos. A utilização de coordenadas homogéneas facilita o cálculo da transformação espacial da nuvem.

Havendo várias faixas, o ajuste da georreferenciação de todas as faixas deveria seguir uma estratégia semelhante à do ajustamento em bloco de faixas aerotrianguladas, começando o ajuste na primeira e usando EFs nas zonas de sobreposição para ajustar a segunda e assim sucessivamente. Deste modo garante-se minimizar as discrepâncias nas zonas de transição entre faixas.

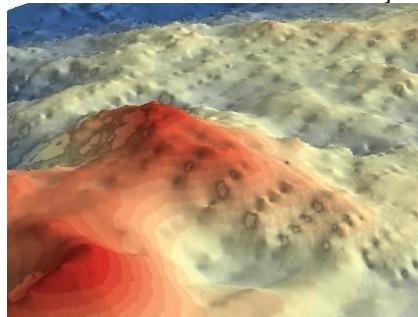


Figura 7.4.2.2. Efeitos gerados por faixas adjacentes não ajustadas

7.4.3. Precisão das coordenadas obtidas por LiDAR topográfico

A precisão absoluta dos dados LiDAR em bruto é superior em altimetria do que em planimetria. Ela depende principalmente da qualidade da calibração do sensor com o GNSS e o IMU, do conhecimento do geoide e da consideração do datum local e das condições de operação dos sistemas em conjunto. O IFOV tem grande importância na precisão sobretudo se se tratar de terreno com declive acentuado. A intersecção do cone de um impulso laser com a superfície do solo denomina-se pegada

(footprint) e terá uma área circular se o impulso for vertical e o terreno for horizontal. O diâmetro da pegada pode ser calculado por:

$$d = 2 \cdot s \cdot \tan(IFOV/2)$$

onde s designa a distância do sensor ao centro da pegada no solo. Para o caso de impulsos não verticais e terrenos não horizontais, a pegada passa a ser elíptica e o seu diâmetro (ou eixo maior) pode ser aproximado por:

$$d = 2 \cdot s \cdot \tan(IFOV/2) / \cos(\beta - \alpha)$$

onde β designa o ângulo de scannerização instantâneo e α designa o ângulo entre a normal à superfície no solo e a vertical. Para um mesmo IFOV, quanto maior a distância ao solo maior a pegada, o que vai aumentar não só a incerteza planimétrica como, em terreno de grande declive, a incerteza altimétrica, pois dentro da área da pegada o impulso pode ter sido reflectido pela zona mais alta ou pela zona mais baixa.

Em geral tendo em conta todos os erros referidos, consegue-se uma precisão absoluta para os pontos LiDAR em bruto :

- Em altimetria: de ± 15 cm, sendo a precisão relativa de ± 5 cm. A precisão absoluta melhora com o ajustamento a EFs para cerca de ± 5 cm.
- Em planimetria: entre 30 cm a 1m podendo também ser melhorada com recurso a EFs.

7.5 Processamento dos dados

O processamento dos dados LiDAR consiste em várias fases. A primeira fase consiste em eliminar o ruído, ou seja pontos da amostra que não pertencem ao objecto levantado. Numa segunda fase é feita normalmente a rarefacção ou a homogenização da nuvem de modo a obter uma amostra de pontos com espaçamento regular. Esta amostra poderá ser considerada um DSM. Por fim os pontos são contextualizados, ou seja é-lhes atribuído um atributo para além da posição XYZ que representam. Para tal são utilizadas variadíssimas estratégias incluindo filtros tridimensionais, interpolação, técnicas de segmentação, de classificação de imagem ou da nuvem com o objectivo de extrair a informação relevante para as diversas aplicações. A própria nuvem ou a amostra regular obtida por interpolação a partir dela, pode geralmente ser classificada em duas classes com base na distribuição espacial regional dos pontos 3D: terreno e não terreno(cotas mais elevadas). A classe não terreno pode ainda ser classificada em duas outras classes atendendo ao padrão de variabilidade das cotas: edificado e vegetação. Após esta classificação a amostra poderá ser filtrada de vários modos a fim de ser gerado um DTM, serem extraídos edifícios para modelação3D ou ser extraída a vegetação, por exemplo, para análise de características morfométricas. A maioria das aplicações das amostras LiDAR necessita da complementação da informação com a provinda de outros sensores. A fotogrametria aérea é a técnica que melhor complementa o LiDAR, visto fornecer informação radiométrica densa do objecto no domínio da luz visível e permitir maior precisão planimétrica que o

LiDAR. Em termos altimétricos, o LiDAR é em geral mais preciso. Os dois principais produtores de sistemas LiDAR, Leica e Optech, oferecem sistemas combinados em que o levantamento fotográfico e LiDAR é realizado em paralelo numa mesma plataforma. Existe actualmente uma intenção a nível dos produtores de hardware de aquisição de imagens de desenvolverem câmaras aéreas digitais que integrem no seu centro uma unidade de LiDAR. Tais câmaras permitirão um levantamento fotográfico e LiDAR simultâneo o que trará grandes vantagens em termos de aplicações.



Figura 5.5.1. Sistema combinado (Leica): ALS 50 + Câmara Digital RCD105

7.6 LiDAR Batimétrico (ALB)

A tecnologia LiDAR apresentada até aqui pode ser também aplicada, após determinadas adaptações que se apresentam de seguida, para obtenção da batimetria de corpos aquáticos, como por exemplo, rios e lagos, e de zonas próximas da linha de costa.

Para LiDAR batimétrico existem actualmente (2012) três sistemas implantados no mercado : SHOALS, desenvolvido nos Estados Unidos da América, LADS, desenvolvido na Austrália e HawkEye, desenvolvido na Suécia. Os primeiros dois sistemas são actualmente comercializados pela FUGRO (Holanda) e o terceiro pela AHAB sueca. O funcionamento do HawkEye é em tudo semelhante ao do SHOALS. Os equipamentos são instalados em aviões e utilizam o mesmo princípio para a obtenção da altura de coluna de água numa determinada posição(X,Y): é produzido um feixe laser de comprimento de onda $\lambda_1= 1064$ nm (infra-vermelho) cuja frequência é duplicada dando origem a outro feixe de comprimento de onda $\lambda= 532$ nm (radiação verde). Enquanto a radiação infra-vermelha é completamente absorvida em águas calmas e é em parte reflectida na superfície de águas em movimento, a radiação verde penetra em águas pouco profundas atingindo o fundo. Os dois feixes podem ser emitidos em direcção à água colimados um com o outro ou, alternativamente, o feixe infra-vermelho é emitido sempre numa direcção nadiral e o varrimento da faixa é feito com o feixe verde.

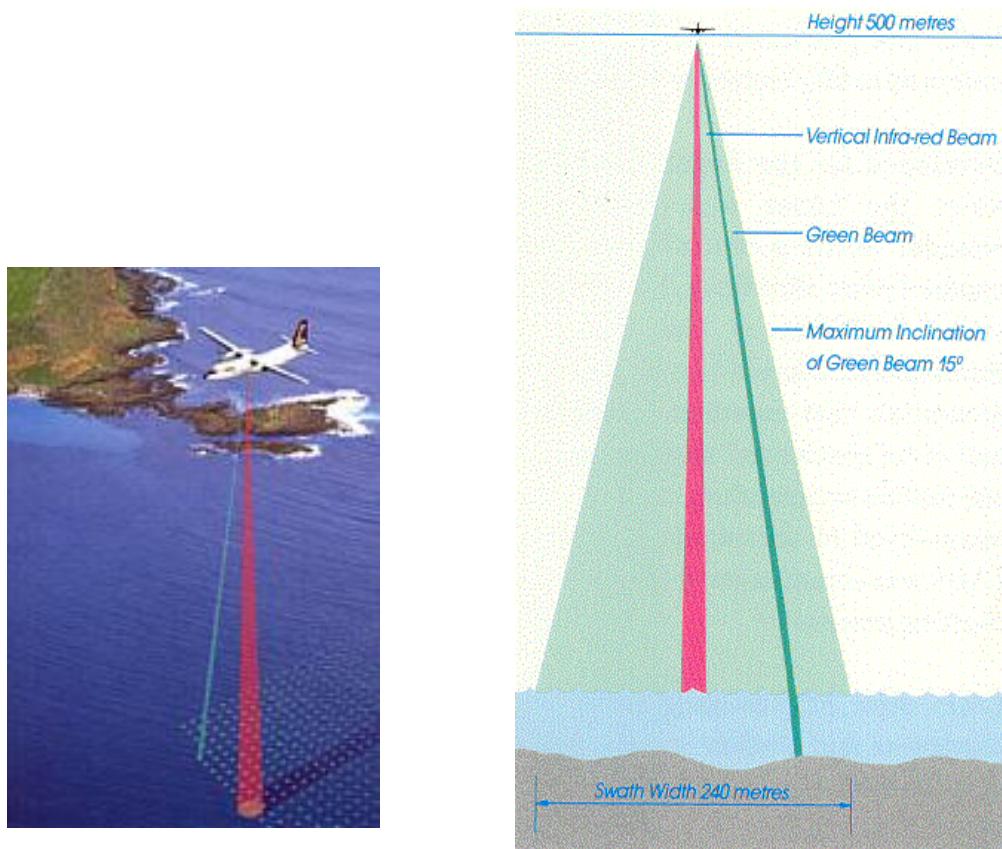


Figura 7.6.1. Funcionamento do LADS- Laser Airborne Depth Sounding

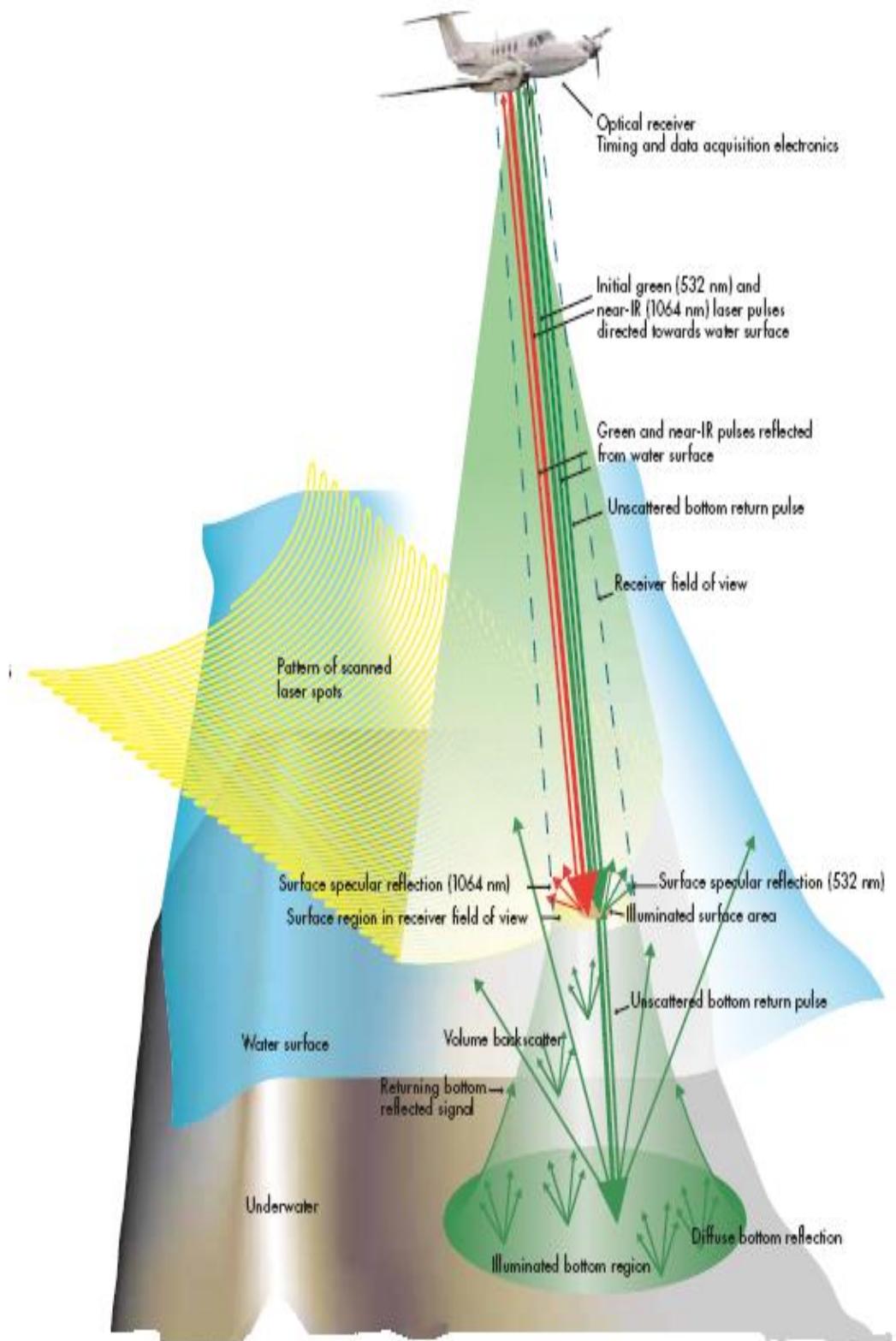


Figura 7.6.2. Princípio de detecção da profundidade com o sistema SHOALS-Scanning Hydrographic Operational Airborne LIDAR Survey system

A altura da coluna de água, para uma localização (X, Y) à superfície, é determinada a partir do intervalo de tempo entre a recepção da parte do impulso que é reflectida na superfície e a recepção da parte do impulso que é reflectida pelo fundo. Esse intervalo de tempo multiplicado pela velocidade da luz em água salgada (aproximadamente 225 000 km/s) corresponderá à distância percorrida pelo feixe entre a superfície e o fundo e de novo entre o fundo e a superfície. A metade dessa distância será a distância inclinada B entre a superfície e o fundo. Como o feixe é refractado na água, para obter a distância vertical da superfície ao fundo há que considerar ainda o ângulo de incidência do feixe na interface e o índice de refracção da água (doce ou salgada). A distância vertical D , que corresponde à altura da coluna de água, é obtida por $D=B \cos \Phi$ em que Φ é o ângulo de refracção. Para se obterem profundidades, terá que ser reduzida ainda a altura da maré, à época do levantamento, à altura da coluna de água.

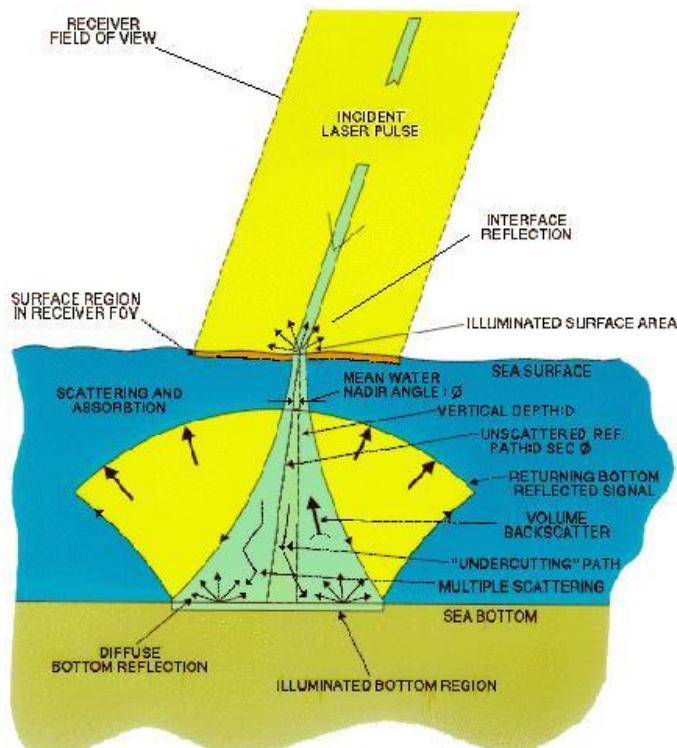


Figura 7.6.3. Feixe reflectido e altura da coluna de água

Como o feixe que atravessa a coluna de água é reflectido difusamente pelas partículas em suspensão, por vezes é difícil distinguir na onda reflectida a parte do impulso que foi reflectida pela superfície da parte do impulso que é reflectida ao longo da coluna de água. Por essa razão, a distância à superfície da água é adicionalmente detectada com o feixe infra-vermelho, cuja absorção pela água, pela bruma ou reflexão por pássaros pode, no entanto, ser problemática. Uma terceira via utilizada para a determinação da distância à superfície é a detecção da radiação de Raman, emitida no domínio do vermelho do espectro electromagnético, e que tem origem nas próprias moléculas de água quando são excitadas com a

radiação verde emitida pelo laser. Esta radiação não é afectada pela bruma pois provem mesmo do corpo de água. Ela pode ser utilizada para determinação da superfície até uma altura de voo de cerca de 400m.

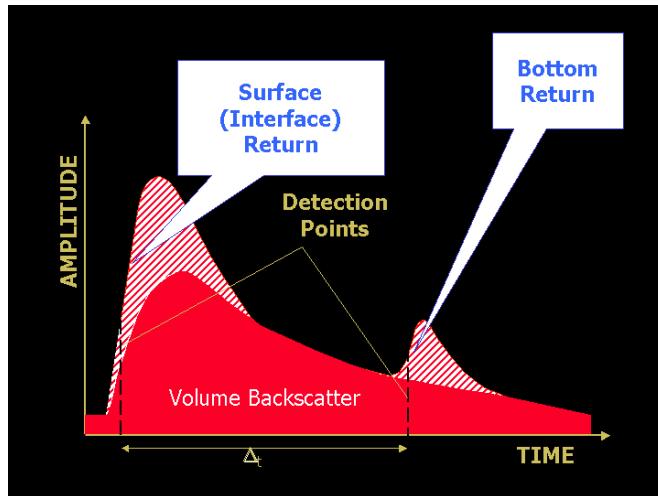


Figura 7.6.4. Forma da onda verde reflectida como é detectada pelo receptor a bordo.

Os ângulos máximos de scannerização para a ALB são menores do que no ALS topográfico. O LADS apresenta um varrimento em perfis rectilíneos perpendiculares à linha de voo com uma abertura máxima de 15°, enquanto no SHOALS, o ângulo com o nadir em que o feixe é emitido é fixo nos 20° e o feixe oscila ao longo de um semi-cone com vértice no emissor laser. O padrão dos pontos levantados sobre a superfície é constituído por arcos paralelos de 180° de amplitude como se ilustra nas figuras 6.2. e 6.5. Também a taxa de emissão é menor do que no ALS topográfico, sendo normalmente entre 400 a 1000 Hz, visto que o afastamento

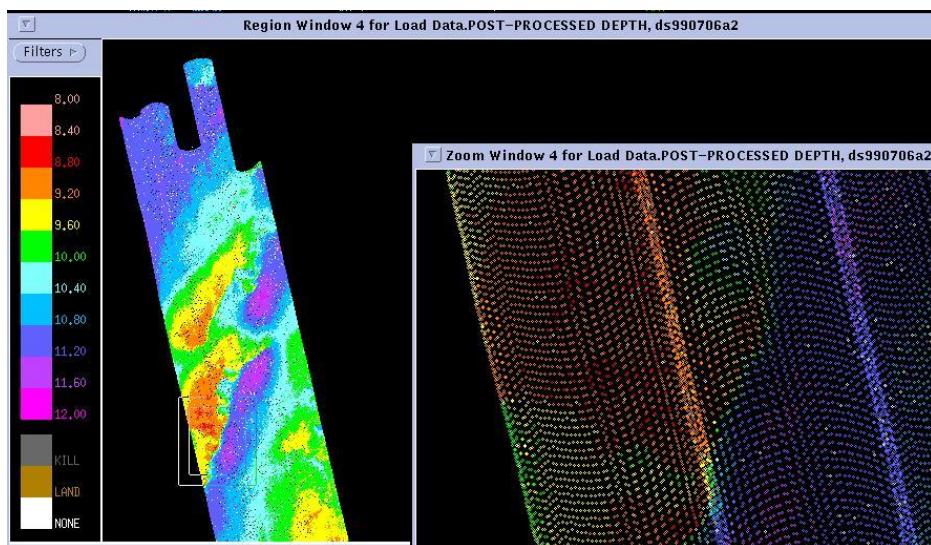


Figura 7.6.5. Fiadas levantadas pelo SHOALS

entre os pontos levantados tem de ser o suficiente para que se consigam individualizar (a reflexão difusa na coluna de água alarga o feixe reflectido). As profundidades máximas típicas atingidas pelo SHOALS vão de 30 a 50 m enquanto o LADS atinge 70 m. Os factores que mais influenciam o facto de um impulso laser atingir ou não o fundo são, para além da profundidade, a turbidez da água e a sua transparência. As zonas de rebentação próximas das praias não se conseguem levantar, apesar de as profundidades em causa estarem dentro do domínio do que é normalmente viável.

Uma vantagem do SHOALS é que permite, na mesma missão, executar o levantamento das superfícies emersa e submersa, podendo por isso ser aplicado não apenas sobre a água mas em toda a zona costeira e em levantamentos de cursos de água e respectivas margens. O levantamento sobre terra é realizado só com o feixe infra-vermelho e normalmente com uma taxa de emissão superior.

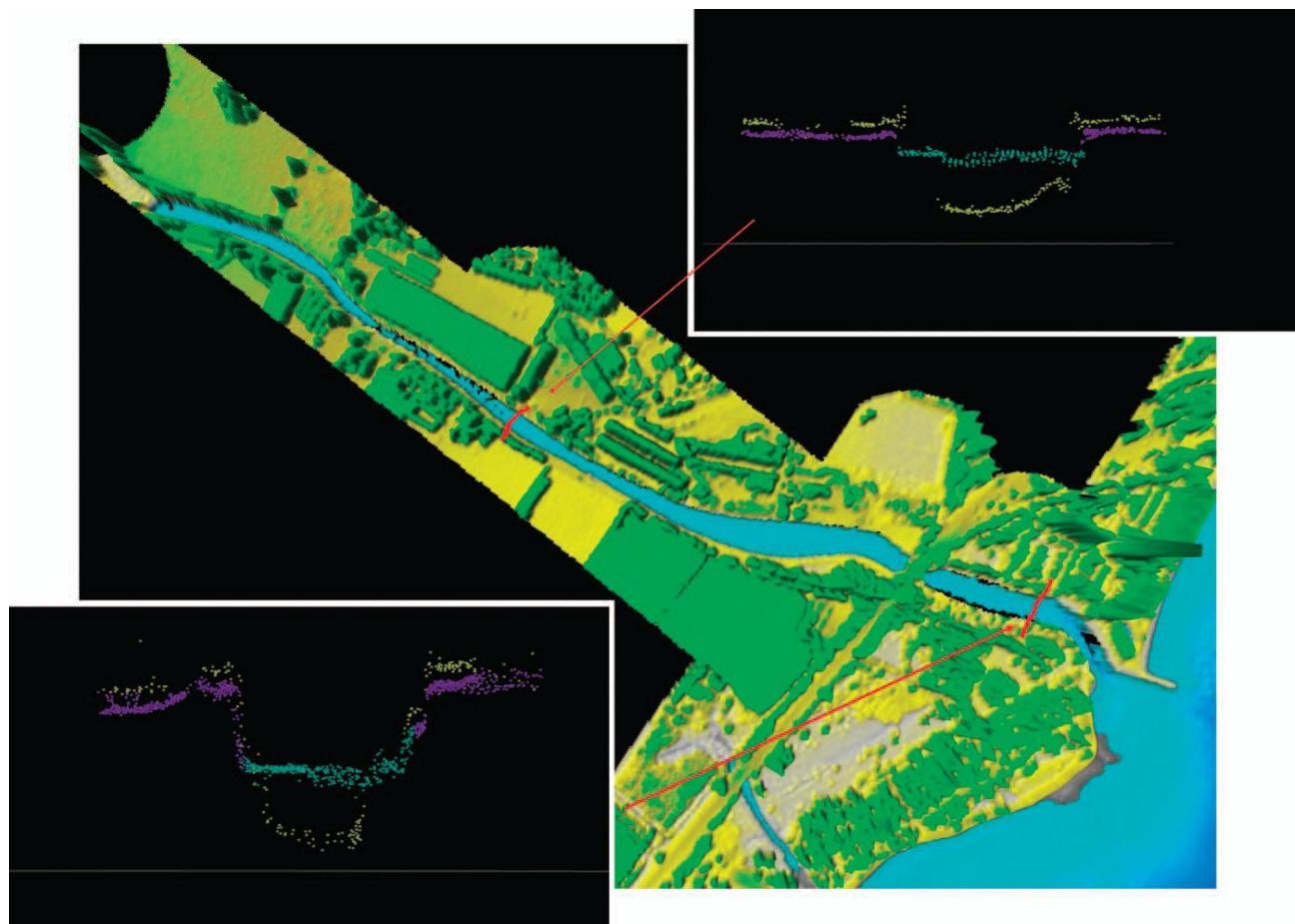


Figura 7.6.6. Levantamento fluvial realizado com o sistema SHOALS

Embora de noite, na ausência das reflexões solares, a determinação da superfície da água e do fundo fossem mais fáceis, por questões de segurança e de orientação

geral do piloto, o levantamento com LiDAR batimétrico é normalmente realizado de dia.

7.6.1 Aplicações da ALB

As técnicas batimétricas por LiDAR podem-se considerar complementares das técnicas batimétricas acústicas na determinação da batimetria costeira. A precisão altimétrica da superfície gerada a partir dos pontos levantados atinge $\pm 25\text{cm}$, pelo que cumpre os requisitos da IHO para a precisão vertical em águas pouco profundas. Para além de, ao contrário do que acontece nos levantamentos acústicos, a largura de faixa a levantar não depender da profundidade das águas, as vantagens da ALB revelam-se em várias situações como por exemplo as mencionadas por Guenther et al (2000) ¹:

- no levantamento rápido e eficiente de grandes áreas;
- no levantamento de zonas difíceis, perigosas ou impossíveis de levantar por técnicas baseadas em embarcações;
- na capacidade de levantar simultaneamente o fundo do mar, a praia adjacente e estruturas de engenharia costeira acima ou abaixo de água;
- na flexibilidade para rapidamente detectar alterações sazonais ou danos causados por tempestades na zona costeira;
- no levantamento, durante curtas janelas temporais de condições climatéricas favoráveis, de áreas normalmente não acessíveis por outras técnicas por longos períodos de tempo, devido às condições climatéricas (por exemplo por gelo).



Figura 7.6.1.1. Zonas de aplicação das técnicas batimétricas acústicas e por LiDAR (esq.). Comparação de larguras de faixas levantadas (dir.)

¹ MEETING THE ACCURACY CHALLENGE IN AIRBORNE LIDAR BATHYMETRY, Guenther et al.(2000) ,Proceedings of EARSeL-SIG-Workshop LIDAR, Dresden/FRG,