

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE FILOSOFIA, LETRAS E CIÊNCIAS HUMANAS
DEPTO. DE GEOGRAFIA

JORGE GUSTAVO DA GRAÇA RAFFO

Orientador: Prof. Dr. FLÁVIO SAMMARCO ROSA

Tese apresentada ao Departamento de Geografia da FFLCH da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Doutor em Geografia. Área de Concentração: Geografia Humana.

SÃO PAULO
Setembro – 2000

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE FILOSOFIA, LETRAS E CIÊNCIAS HUMANAS
DEPTO. DE GEOGRAFIA

TÍTULO DA PESQUISA

**RETIFICAÇÃO VIRTUAL DE FOTOGRAFIAS DE PEQUENO FORMATO
E SUA APLICAÇÃO PARA VÔOS AEROFOTOGRAFÍCOS**

Curso de Pós-Graduação em: GEOGRAFIA HUMANA

Nível: DOUTORADO

Aluno: JORGE GUSTAVO DA GRAÇA RAFFO

Orientador: Prof. Dr. FLÁVIO SAMMARCO ROSA

SÃO PAULO
Setembro – 2000

ERRATA

Página 1, parágrafo 1, linha 9: onde se lê "(Gordura & Alar, 1994)"; ler (Goudriaan & Laar, 1994).

Página 1, parágrafo 2, linha 8: onde se lê "(Gordura & Alar, 1994)"; ler (Goudriaan & Laar, 1994).

Página 1, parágrafo 3, linha 2: onde se lê "fitamos"; ler fitomassa.

Página 1, parágrafo 3, linha 3: onde se lê "enologico"; ler fenológico.

Página 57, parágrafo 3, linha 7: onde se lê "parcelas"; ler subparcelas.

Página 92, parágrafo 2, linha 4: onde se lê "ter"; ler terem.

Página 106, parágrafo 4, linha 1: onde se lê "campanas", ler campanhas.

COMISSÃO EXAMINADORA

São Paulo, de de 2000

*Dedicado à Beatriz Riverón Acosta, minha companheira de caminhada,
e a esta terra generosa, abençoada por Deus
e bonita por natureza !*

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi possível de realizar-se, devido à colaboração de muitas pessoas.

Nosso agradecimento a todas elas e, particularmente, a: Carlos de Gois Bertolino, Júlio César de Menezes, Clotilde Maria Batochio, Vanda Macedo Zambello e Fernando Fabrini.

Em especial, nosso agradecimento aos Professores Dr. Flávio Sammarco Rosa e Dr. Mário de Biasi, orientador e co-orientador, respectivamente, que nos conduziram ao longo do desenvolvimento deste trabalho, dando constante apoio, sugestões e estímulo para atingir a meta proposta.

S U M Á R I O

RESUMO	x
SUMMARY	xi
1 INTRODUÇÃO	1
1 TEMA DA PESQUISA.....	1
2 OBJETIVOS.....	4
II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
1 METODOLOGIA DE LEVANTAMENTO.....	6
1.1 Fotogrametria e sensoriamento remoto.....	6
1.2 Vôo fotogramétrico e fotográfico.....	10
2 PRINCÍPIOS GEOMÉTRICOS DA FOTOGAMETRIA MONOSCÓPICA.....	11
2.1 Geometria da fotografia.....	12
2.2 Fotografia vertical.....	12
2.2.1 Escala de fotografia.....	13
2.2.1.1 Conceito de Escala.....	13
2.2.1.2 Escala da fotografia vertical.....	13
2.2.2 Efeito do relevo topográfico na fotografia.....	14
2.2.2.1 Escala média.....	15
2.3 Fotografia oblíqua.....	16
2.3.1 Elementos de fotografia oblíqua.....	17
2.3.2 Efeitos da inclinação da fotografia.....	18
2.3.2.1 Deslocamento da posição dos pontos.....	18
2.3.2.2 Escala de foto inclinada.....	20
2.3.3 Efeitos combinados da inclinação e do relevo topográfico.....	20

2.3.3.1	Efeito na escala.....	20
2.3.3.2	Efeito no deslocamento dos pontos na imagem.....	21
2.4	Orientação de câmara fotográfica.....	22
2.4.1	Sistemas de coordenadas.....	22
2.4.2	Sistemas de coordenadas com origem no centro fiducial.....	22
2.4.3	Sistemas de coordenadas com origem no centro da lente.....	24
2.4.4	Sistemas de coordenadas de terreno.....	24
2.4.5	Orientação externa.....	25
2.4.5.1	Ângulos de rotação.....	25
2.4.5.2	Deformação da imagem provocada pelos ângulos de rotação.....	27
2.4.5.3	Deformação da imagem provocada pela inclinação e pelo relevo do terreno.....	28
2.4.6	Modelos matemáticos.....	29
2.4.6.1	Equações de colinearidade.....	30
2.4.6.2	Equações de projetividade.....	31
3	O SISTEMA FOTOGRÁFICO.....	36
3.1	Câmaras fotográficas.....	36
3.2	Lentes.....	38
3.3	Filmes.....	39
3.4	Filtros.....	42
4	RECOBRIMENTO AEROFOTOGRAFICO.....	43
4.1	Planejamento do recobrimento fotográfico.....	43
4.2	Fotografia aérea oblíqua.....	45
4.3	Geometria de fotografia aérea inclinada.....	49
5	IMAGENS DIGITAIS.....	52
5.1	Definição.....	52
5.2	Resolução espacial de uma imagem.....	52

5.3	Resolução radiométrica de uma imagem.....	52
5.4	Arquivos de imagem.....	53
5.5	Captação de imagens digitais.....	54
5.6	Resolução de digitalização.....	55
6	RETIFICAÇÃO DE IMAGENS.....	56
6.1	Retificação diferencial.....	58
6.2	Retificação projetiva.....	61
6.2.1	Princípio da retificação projetiva.....	61
6.2.2	Retificação projetiva parcial.....	64
6.2.3	Mosaico aéreo.....	66
6.2.3.1	Uso dos mosaicos.....	66
6.2.3.2	Espécies de mosaicos.....	67
6.3	Retificação diferencial.....	68
6.3.1	Processo para a obtenção de ortofotos digitais.....	68
III	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	71
1	PROCESSO CRONOLÓGICO DO DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA E DO USO DOS DIFERENTES EQUIPAMENTOS.....	71
1.1	Fase um: avaliação de modelos matemáticos.....	72
1.2	Fase dois: escolha do meio de apresentação.....	74
1.3	Fase três: retificação projetiva.....	77
1.4	Fase quatro: análise de outros recursos de imageamento.....	81
1.5	Fase cinco: desenvolvimento do software básico e complementar.....	83
IV	RESULTADOS OBTIDOS E ESTUDO DOS ERROS.....	86
1	ESTUDO DOS ERROS NA FOTOGRAFIA COM RETIFICAÇÃO VIRTUAL.....	86
1.1	Tipos de erros de medida.....	86

1.1.1 Erros acidentais.....	87
1.1.2 Erros sistemáticos.....	88
1.1.3 Erros grosseiros.....	88
.2 TIPOS DE ERROS OBSERVADOS NA METODOLOGIA PROPOSTA.....	89
2.1 Erro sistemático em deslocamento dos pontos da imagem, provocado pelo relevo do terreno.....	89
2.1.1 Efeito na fotografia vertical.....	89
2.1.2 Efeito na fotografia oblíqua.....	90
2.2 Estimativa da altura de vôo com relação ao erro de relevo.....	92
2.2.1 Erro residual na escala provocado pelo relevo do terreno.....	94
2.3 Erro sistemático provocado pela inclinação da fotografia.....	96
2.4 Critério para escolha das faces do modelo do terreno.....	98
2.5 Erro de modelagem nas regiões de fronteira das faces.....	101
2.6 Erro de refração atmosférica.....	104
2.7 Erro de curvatura terrestre.....	106
2.8 Erros de orientação interna.....	108
2.9 Erros de distorção.....	109
2.10 Erros provocados por deformações do filme.....	111
2.11 Erros provocados pelo scanner.....	112
2.12 Erros nas coordenadas dos pontos de apoio.....	113
2.13 Relação entre altura do vôo, escala da fotografia e incerteza dos pontos de apoio.....	115
2.14 Erros vinculados com o nível de resolução da imagem.....	120
2.14.1 Resolução da ampliação fotográfica original.....	121
2.14.2 Resolução radiométrica do scanner.....	122
2.14.3 Resolução geométrica.....	124
2.15 Erros na altimetria.....	129

2.16 Erros na determinação da altura de objetos verticais.....	129
2.17 Erros e correções na medida de distâncias e áreas.....	131
3 ESTUDO DE CASOS.....	134
3.1 Fotografia métrica.....	136
3.2 Fotografia de formato 70 mm.....	141
3.3 Fotografia vertical de formato 35 mm.....	145
3.4 Fotografia baixa oblíqua, formato 35 mm.....	150
3.5 Fotografia alta oblíqua, formato 35 mm.....	154
3.6 Imagem de satélite.....	159
3.7 Imagem de vídeo.....	162
3.8 Planta topográfica rasterizada.....	165
V CONCLUSÕES.....	168
1 CONCLUSÕES REFERENTES À ACURACIDADE DA RETIFICAÇÃO VIRTUAL.....	168
2 CONCLUSÕES RELATIVAS À PRATICIDADE OPERACIONAL DA METODOLOGIA PROPOSTA.....	173
3 CONCLUSÕES CONCERNENTES AOS CUSTOS DA METODOLOGIA PROPOSTA.....	175
VI SUGESTÕES.....	180
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	182

RETIFICAÇÃO VIRTUAL DE FOTOGRAFIAS DE PEQUENO FORMATO E SUA APLICAÇÃO PARA VÔOS AEROFOTOGRAFICOS

Autor: JORGE GUSTAVO DA GRAÇA RAFFO

Orientador: Prof. Dr. FLÁVIO SAMMARCO ROSA

RESUMO:

O presente trabalho de pesquisa apresenta uma metodologia de baixo custo e de simples operacionalidade para o uso de fotografias aéreas de pequeno formato (35mm) destinadas a Fotogrametria do tipo expedita. As referidas fotografias são rasterizadas, através do uso de Scanner e, posteriormente, processadas com um software desenvolvido para esse objetivo e fundamentado nas equações de projetividade entre superfícies planas. Como resultado deste processamento, podem ser obtidas as coordenadas dos pontos da fotografia no sistema do terreno (UTM, STL, XY). O referido procedimento foi denominado neste trabalho de "Retificação Virtual da Imagem", por sua semelhança com os métodos de retificação não diferencial ou "endereçamento" de fotografias, utilizados na Fotogrametria. Os resultados obtidos são particularmente interessantes, quando são utilizadas fotografias do tipo "alto oblíquas", obtidas desde as janelas do avião. A facilidade operacional da metodologia, assim como seus menores custos com relação aos métodos tradicionais poderão contribuir significativamente com diferentes atividades que requerem de uso de imagens georeferenciadas e a obtenção de medidas com acuidade expedita.

VIRTUAL RETIFICATION OF SMALL FORMAT PHOTOGRAPHIES AND ITS APPLICATION IN AEROPHOTOGRAPHIC FLIGHTS

Author: JORGE GUSTAVO DA GRAÇA RAFFO

Adviser: Prof. Dr. FLÁVIO SAMMARCO ROSA

SUMMARY:

The present research shows a low cost and simple-to-use method for the use of small format aerial photographs (35 mm) destined for a expeditions photogrammetry. These pictures are rasterized with the aid of a scanner and later processed with software using the fundamentals of plane surface projectivity equations designed to achieve this goal. As a result, it is possible to obtain the coordinate of the points on the picture in the system (UTM, STL, XY). This process is referred to in this research as “virtual retification of the image” because it resembles other methods of non-differential rectification as rectification of a single photograph using in Photogrammetry, know as “image adressing”. The results are quite interesting when pictures are of the type high oblique photograph. The easy characteristics of the method as well as its low cost in relation to traditional methods could significantly help many activities which require the use of images geo-referencing and doing measurements without hight accurate.

I INTRODUÇÃO

1 TEMA DA PESQUISA

Em todas as ciências e atividades humanas que envolvam o espaço físico, faz-se necessário contar com instrumental e metodologias apropriadas para levantar e representar os objetos do espaço geográfico. Desde a antigüidade, percebeu-se que a forma mais inteligível de descrição do espaço era a representação gráfica e é assim que nascem as cartas e os mapas. A mente pode imaginar mais facilmente o espaço geográfico a partir da sua imagem, seja na forma mais abstrata e simbólica como são nas cartas, numa forma mais realista e concreta como nas fotografias, ou numa representação mais sensível ainda como nas maquetes. Atualmente, existem outros recursos tecnológicos como os Modelos Digitais do Terreno, os Sistemas de Informações Geográficas, as Ortofotografias, as Imagens de Sensoriamento Remoto, etc. onde as informações são tratadas sob a forma numérica através do uso de complicados modelos lógico-matemáticos; embora assim, o resultado final continua sendo uma imagem do terreno.

A Geografia, que de acordo com a definição de Oliveira (1987), “é a ciência que estuda a distribuição dos fenômenos físicos, biológicos e humanos na superfície da Terra, as causas desta distribuição e as relações locais de tais fenômenos”, tem

intrinsecamente uma natural preocupação referente aos métodos de levantamento e representação de seu tema de estudo, o espaço no Macromundo. O espaço no Micromundo (átomo) e no Megamundo (universo) são temas de outras ciências e são elas que estudam a forma de sua “visualização” ou representação.

Freqüentemente, os administradores e técnicos, que têm como objeto de trabalho o espaço topográfico, sentem a necessidade de obter dados sobre localização e distribuição dos fatos e fenômenos da natureza espacial. Para isso, as técnicas usualmente disponíveis compreendem os serviços de levantamento topográfico em campo, a fotogrametria tradicional e o sensoriamento remoto, de onde derivam mapas, cartas, plantas cadastrais e uma série de imagens, desde as fotografias aéreas convencionais até as imagens orbitais.

A opção pela técnica mais adequada depende de uma série de fatores, entre os quais:

- o objetivo do trabalho;
- a definição do tipo de informação necessária;
- as características da área a ser levantada;
- a exatidão no posicionamento dos dados em nível de detalhamento;
- a disponibilidade técnica;
- o custo dos serviços;
- o prazo de execução.... etc, etc.

Atualmente, as opções de levantamentos mais comuns por meio de métodos indiretos, têm sido as imagens orbitais, quando se trabalha com escalas menores, com maior nível de generalização e de caráter mais qualitativo, e a fotogrametria quando se

requer maior detalhamento e exatidão dos dados, embora nem sempre seja este o fator de maior relevância.

Analisadas as condições anteriores, muitas vezes a fotogrametria tradicional se torna uma metodologia inviável, em função de seu custo elevado.

Destinando-se a aprimorar a resolução destas situações, este trabalho parte do princípio de que, para grande parte das aplicações nas quais a alta acurácia dos dados não é uma condição essencial, é possível a adoção de técnicas mais simples e econômicas, baseadas nos mesmos princípios aerofotogramétricos, porém, com a utilização de equipamentos de menor precisão e mais baixo custo. Propõe uma metodologia para obtenção de dados do espaço geográfico que, utilizando os atuais recursos da informática, apresente menores custos que a fotogrametria tradicional, seja operacionalmente prática e suas informações métricas possuam uma acuracidade compatível com aplicações como: estudos ambientais, análise do uso de terra, subsídios para o planejamento de obras de engenharia civil e de urbanismo, cadastro municipal, avaliação de efeitos meteorológicos, de incêndios, de pragas na agricultura, inventário florestal, geologia e mineração, estudo de locais históricos e arqueológicos, atualização da cartografia temática em geral, e da sistemática, após um planejamento criterioso do levantamento, a fim atingir a coerência de exatidão entre a planta original e os dados coletados a serem incorporados.

2 OBJETIVOS

Considerando a necessidade de manter dados cartográficos atualizados referentes a um espaço físico em constante mudança, sejam estes no tradicional formato em papel, na forma de bases de dados digitais ou nos Sistemas de Informações Geográficas, esta pesquisa tem por objetivos:

- Propor uma metodologia para a obtenção de dados cartográficos centrada no uso de fotografias de pequeno formato, que seja de simples operacionalidade, de baixo custo e de forma que a acuracidade obtida permita efetuar medições com os dados recolhidos, apresentando um erro em distâncias e áreas que não ultrapasse 5% das referidas grandezas.

- Desenvolver um software para informações geográficas que permita:
 - a) Visualizar imagens oriundas da rasterização de fotografias aéreas, imagens de satélite ou cartas topográficas.
 - b) Realizar cálculos com o fim de mensurar áreas, distâncias e ângulos, tanto em imagens originadas por projeção ortogonal, como em cartas topográficas ou originadas por projeção perspectiva, como em fotografias aéreas verticais ou inclinadas.
 - c) Apresentar um banco de dados onde possam ser incluídas informações qualitativas das imagens apresentadas.

- d) Comunicar-se com outros softwares de uso comum como, por exemplo, Paintbrush, Access, Excel, Word, etc.
- e) Permitir apresentação na forma de arquivo raster, de produtos originários de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) ou sistemas CAD.
- f) Efetuar gerenciamento das imagens arquivadas em CD-ROM para efeitos de poupar memória do computador.
- g) Utilizar plataforma IBM-PC ou equivalente, nas versões 486 ou mais avançadas.
- h) Ser de fácil utilização pelo usuário.

- Testar e discutir a operabilidade prática e produtiva da metodologia proposta, assim como comparar seus custos com outras metodologias.

- Analisar a magnitude dos erros apresentados pela metodologia proposta e sugerir limites de aplicabilidade da mesma.

De acordo com o que foi indicado, a pesquisa objetiva a obtenção de uma metodologia de levantamento cartográfico, que seja prática e econômica e cujo produto final seja de aplicabilidade a diversas atividades que admitam resultados de nível expedito nas magnitudes medidas.

II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1 METODOLOGIAS DE LEVANTAMENTO

Para a obtenção de dados destinados a representar a superfície da Terra, existem basicamente duas metodologias: a medição do próprio espaço in-situ e a medição do espaço em forma indireta, através de imagens dele. No primeiro grupo incluem ciências como a Topografia e a Geodesia; no segundo, a Fotogrametria e o Sensoriamento Remoto. Este trabalho está preocupado com o levantamento indireto da superfície terrestre através do método fotogramétrico.

1.1. Fotogrametria e Sensoriamento Remoto

Uma forma indireta de estudar a forma e dimensões da Terra é a partir da utilização de imagens da mesma. Estas imagens são resultantes da ação de algum tipo de energia (eletromagnética, mecânica, gravitacional, etc), refletidas ou emitidas pela Terra, sobre um instrumento sensível a elas. Os diferentes tipos de energia utilizados e/ou o sistema sensor empregado tem dado lugar ao desenvolvimento de ciências e técnicas

especializadas como por exemplo: a Fotogrametria, o Sensoriamento Remoto, a Gravimetria etc. Este trabalho e a metodologia nele proposta devem ser incluídos dentro da Fotogrametria já que o mesmo utiliza fotografias aéreas com o objetivo de obter medidas referentes à superfície da Terra.

A Fotogrametria apresenta diferentes métodos para o tratamento e o processamento das fotografias, sendo indicadas a seguir, algumas delas em forma resumida.

Fotogrametria Analógica: tem como finalidade produzir uma carta do objeto em questão, que geralmente é o terreno. Com tal fim utiliza aparelhos conhecidos como “Restituidores”, que operam criando um modelo ótico, e tridimensional, do terreno; formado pelo cruzamento dos raios de luz provenientes de dois projetores onde foram instaladas as placas fotográficas obtidas desde dois pontos de vista distintos e consecutivos do espaço. A utilização adequada do instrumento obriga efetuar um longo processo prévio de orientação de seus projetores, de forma de adotarem o mesmo posicionamento espacial que tinha a câmara fotográfica no momento da tomada das fotos.

Fotogrametria Analítica: tem a mesma finalidade da anterior, construir uma carta do terreno. A principal diferença consiste em que o desenho da carta é efetuado a partir do conhecimento das coordenadas (x, y, z) dos pontos do objeto em questão, e que são obtidas por cálculo. A orientação espacial é feita através de cálculo, evitando-se a trabalhosa e demorada tarefa manual da orientação analógica. O instrumento utilizado na Fotogrametria Analítica consta de uma parte ótico-mecânica bem mais simples que a dos

equipamentos analógicos, mas complementada por um computador e software específico para o objetivo proposto. Estes equipamentos são chamados “Restituídores Analíticos”.

Fotogrametria Digital: com o avanço da informática e o desenvolvimento dos softwares, foi possível operar com imagens transformadas em arquivos numéricos e visualizadas na tela do computador. Esta nova tecnologia passou a ser usada pela Fotogrametria com as adaptações próprias a suas necessidades e foi chamada de Fotogrametria Digital. Nela, às vantagens já apresentadas na Fotogrametria Analítica, soma-se a possibilidade de modificar as características visuais da fotografia original, processo conhecido como Tratamento da Imagem. Os instrumentos utilizados na Fotogrametria Digital são chamados de “Restituídores Digitais”. Estes instrumentos são constituídos, basicamente, por software e hardware, incluindo computador e alguns periféricos como “Scanner” e um sistema de óculos estereoscópios. O produto final obtido, geralmente é um “Mapa de Linha”, que pode ser visualizado no monitor do computador, impresso numa folha de papel ou guardado num meio eletrônico como um disquete, CD ROM, etc.

Ortofotografia: Uma fotografia é a uma projeção perspectiva do objeto num plano de projeção; enquanto que as plantas ou cartas são projeções ortogonais do objeto num plano. As projeções perspectivas apresentam um conjunto de deformações com relação às plantas e cartas e, conseqüentemente, não podem substituí-las. Este fato levou ao desenvolvimento das diferentes tecnologias com o fim de obter projeções ortogonais a partir das fotografias surgindo a Fotogrametria Analógica, a Fotogrametria Analítica e

depois a Fotogrametria Digital. Paralelamente aos métodos indicados foram desenvolvidas também metodologias com o objetivo de obter novas imagens a partir das originais, mas de forma que as novas apresentassem as características geométricas de projeções ortogonais. Este processo é conhecido como “retificação” e as novas imagens são chamadas de ortofotos segundo indica Novak (1992). Com este objetivo, existem diferentes técnicas: retificação ou endereçamento, retificação diferencial analógica e retificação diferencial digital.

No capítulo referente à revisão da literatura será analisado detidamente cada um destes processos, por estarem diretamente vinculados ao projeto em questão, mas brevemente pode indicar-se que:

A retificação (conhecida também como ‘endereçamento da foto’) consiste na produção de uma nova imagem utilizando um método ótico-mecânico de projeção, de forma a eliminar o deslocamento dos objetos, provocado pela inclinação da câmara fotográfica com relação à vertical.

A retificação diferencial analógica, em forma similar ao “endereçamento” consiste em produzir uma nova imagem impressionando-se uma placa fotográfica a partir da luz proveniente da fotografia original modificada em trajetória e intensidade mediante um complicado instrumental ótico-mecânico, mas sua diferença com relação a anterior é que o tratamento não efetua-se na imagem como um único objeto, e sim a partir de pequenas unidades da fotografia. Na nova imagem procura-se corrigir os mesmos efeitos da retificação comum, incluindo-se o deslocamento provocado pelo desnível entre os diferentes pontos do terreno. Com o desenvolvimento da Fotogrametria

Analítica parte do processo anterior foi substituído por cálculo, mas a imagem obtida continua sendo produzida mediante a impressão de um raio de luz num filme fotográfico.

Na retificação diferencial digital aparece uma mudança profunda na confecção da ortofoto. A nova imagem não é mais formada por um processo ótico-mecânico, e sim obtida em forma digital a partir do cálculo da posição, assim como da cor ou tom de cinza que cada elemento da mesma chamado pixel, de forma a cumprir as condições geométricas da ortofotografia.

Os produtos obtidos nestes processos são conhecidos no meio fotogramétrico como: foto retificada, ortofoto e ortofoto digital.

Sensoriamento Remoto: De forma geral, sensoriamento remoto é qualquer metodologia de percepção das características de um determinado alvo sem contato direto com o mesmo; no entanto, o mais comum é chamar desta forma à obtenção de informações a partir da utilização de imagens de satélite.

1.2 Vôo Fotogramétrico e Vôo Fotográfico

O método indireto de levantamento utilizando-se fotografias pode ser efetuado com a câmara situada sobre o terreno ou sendo transportada no ar por alguma aeronave. Por razões praticidade e economia, o segundo método sempre teve bem mais sucesso que o primeiro e, neste trabalho de pesquisa, também são utilizadas fotografias

aéreas pelas mesmas razões antes indicadas, embora a tecnologia pesquisada também possa ser utilizada com fotos terrestres.

A questão referente à forma de efetuar o vôo para a obtenção das fotografias será vista com mais detalhe na revisão bibliográfica; no entanto, cabe indicar aqui que por coerência com a proposta da pesquisa procurar-se-á uma metodologia de levantamento aéreo operacionalmente mais simples e de menor custo que a destinada aos levantamentos fotogramétricos tradicionais. O professor Disperati (1991) classifica os vôos destinados à obtenção de fotografias em dois tipos: fotogramétricos, os que utilizam câmaras métricas e fotográficos, os que utilizam câmaras de pequeno formato. De acordo com este critério, o tipo de vôo utilizado neste trabalho será chamado de fotográfico, utilizando-se câmara fotográfica não métrica e efetuando-se desde um avião comum, sem modificação estrutural da aeronave.

2 PRINCÍPIOS GEOMÉTRICOS DA FOTOGRAMETRIA MONOSCÓPICA

Os princípios geométricos que aqui são apresentados, correspondem exclusivamente ao tratamento monoscópico da Fotogrametria. Um capítulo muito importante da Fotogrametria refere-se à estereoscopia, que consiste no estudo da geometria de pares de fotografias de um mesmo objeto, tomadas de posições espaciais diferentes. Esta questão não é tratada neste trabalho porque foge aos objetivos e às necessidades desta pesquisa. Os princípios aqui apresentados foram extraídos do: Manual of Photogrammetry (4ª edição, 1980); M. Chueca Pazos (1982); K. Rube (1987); J. Carre (1975); S. Ghosh (1988).

2.1 Geometria da Fotografia

A fotografia deve ser pensada, numa primeira instancia, como uma projeção perspectiva do objeto imageado sobre um plano.

Na prática, o centro de perspectiva é substituído pela lente da câmara fotográfica e o plano de projeção pelo filme. Estes fatos provocam diferenças entre o modelo matemático básico e o modelo físico real. Por outro lado, as câmaras fotográficas podem ser divididas em dois tipos: métricas e não métricas. As primeiras são construídas com o objetivo de obter as fotografias como documento que permita efetuar medidas confiáveis. Possuem um chassis com orifícios chamados “marcas fiduciais”, distância focal fixa e, periodicamente, são calibradas, através da determinação de seus parâmetros geométricos (ponto principal, distância focal e distorções da lente).

As não métricas objetivam a fotografia com fins artisticos, não têm marcas fiduciais, sua focal pode ser fixa ou variável e, normalmente, não são submetidas à calibração em laboratório. De acordo com o que já foi indicado na introdução, neste trabalho são utilizadas câmaras não métricas, com o objetivo de reduzir custos e simplificar as operações de tomadas das fotografias.

2.2 Fotografia Vertical

Segundo o Manual of Photogrammetry (1980) chama-se foto vertical a fotografia aérea, tomada de forma que o eixo ótico da câmara coincida com a vertical. A vertical é a linha definida pela força da gravidade em cada ponto da Terra e

materializada pelo fio de prumo. O modelo matemático básico da Fotogrametria é desenvolvido a partir da hipótese de que o eixo ótico da câmara é perpendicular ao plano objeto e ao plano imagem.

2.2.1 Escala da fotografia

2.2.1.1 Conceito de Escala

Entre dois objetos homotéticos ou semelhantes, sempre é possível determinar um número fixo chamado escala, que indica a proporcionalidade entre os comprimentos de ambos objetos. Quando se trabalha com mapas ou fotografias, o conceito de escala continua sendo o mesmo, e a relação a ser considerada é a existente entre o objeto no terreno e sua imagem, seja esta, fotografia ou mapa de linha. Nesta situação, surge a falta de semelhança entre o objeto fotografado, que geralmente não é plano, e a fotografia que está numa superfície plana.

2.2.1.2 Escala da fotografia vertical

Considerando-se a fotografia vertical, como foi definida no 2.2. e o terreno plano e horizontal, é possível aplicar a definição de escala do 2.2.1.1.e seu valor numérico resulta da aplicação do teorema de Tales, segundo as expressões (2.1.) ou (2.2.).

$$E = \frac{1}{(H / f)} \quad (2.1.)$$

$$E = \frac{1}{(AB / ab)} \quad (2.2.)$$

Nas expressões 2.1. e 2.2., o E corresponde ao valor de escala, H à altura da câmara com relação ao plano objeto, f à focal da câmara, AB à distância entre dois pontos A e B do plano objeto, ab à distância entre os pontos correspondentes a e b da fotografia.

2.2.2 Efeito do relevo topográfico na fotografia

O terreno dificilmente é um plano horizontal. Este fato provoca mudança de escala e do posicionamento relativo nos diferentes pontos da fotografia, como consequência da diferença de altura dos pontos no terreno. A Figura 1 mostra o referido efeito.

O deslocamento da imagem, provocado pelas diferentes alturas (d_e), pode ser determinado pela fórmula 2.3. e a diferença de escalas (dE) pela fórmula 2.4. O h , que aparece nas fórmulas, corresponde à altura do objeto em relação ao plano de referência e o r à distância entre o ponto nadir (que nesta situação coincide com o ponto principal) e o ponto em questão.

$$d_e = \frac{rh}{H} \quad (2.3.)$$

$$dE = \frac{(-h)}{fH(H-h)} \quad (2.4.)$$

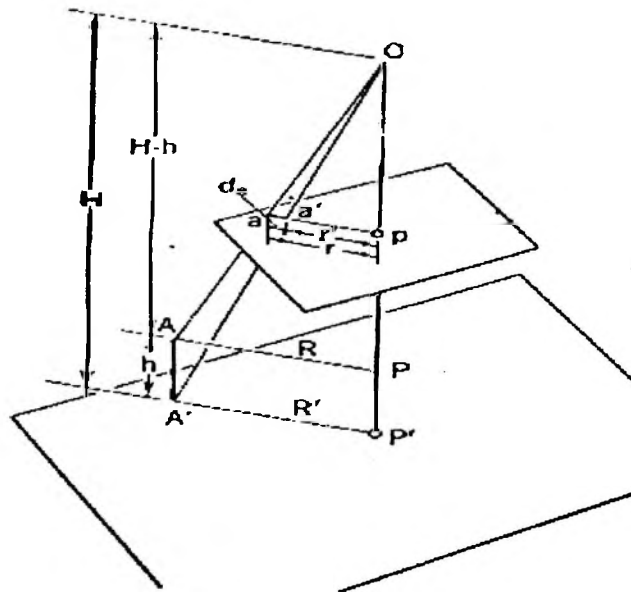


Figura 1 – Efeito do relevo na fotografia vertical.
(Fonte: M.P. – 4º Edit.)

2.2.2.1 Escala Média

Como foi indicado no 2.2.2., uma fotografia, embora sendo do tipo vertical, dificilmente terá uma escala constante, como consequência das diferentes altitudes dos pontos do terreno. Muitas vezes, o usuário da fotografia precisa conhecer um valor, embora aproximado, da escala da imagem e, com este objetivo, definir a escala média. Este valor é o resultante da média de várias escalas em diferentes regiões da fotografia. A escala média é conhecida normalmente pelos usuários como “escala da foto” e, geralmente, aparece indicada num dos cantos nas fotografias aéreas obtidas com câmara métrica.

2.3 Fotografia Oblíqua

O Manual of Photogrammetry (1980), referindo-se especificamente a levantamentos fotogramétricos tradicionais, indica que, em boas condições de operação, aproximadamente 50% das fotografias não são verticais e para poder construir um mosaico devem ser previamente retificadas. Neste trabalho, que se propõe a utilizar fotografias obtidas com câmaras de formato 35 mm, tomadas da janela do avião, certamente as fotografias não são verticais, sendo necessário, então, analisar este tipo de fotografias aéreas classificadas como inclinadas ou oblíquas. As fotografias oblíquas podem conter a imagem do horizonte e, nesse caso, chamam-se “oblíquas altas”, ou não a contendo, chamam-se “oblíquas baixas”. Os diferentes tipos de fotografias são indicadas na Figura 2.

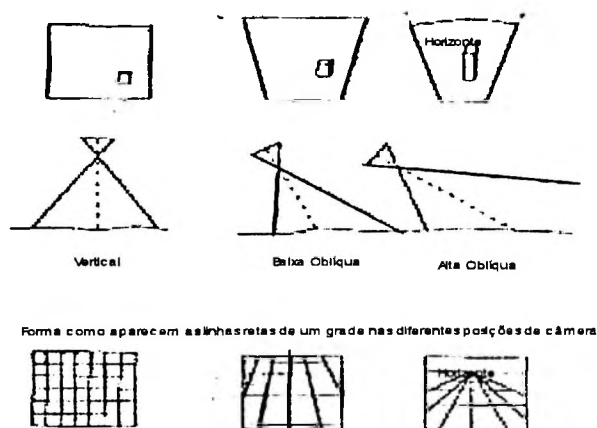


Figura 2 – Classificação da fotografia aérea dependendo da inclinação do eixo óptico da câmara.

(Fonte: W.S. Warner, 1996).

2.3.1 Elementos da fotografia oblíqua

Na Figura 3, são mostrados os elementos da fotografia inclinada.

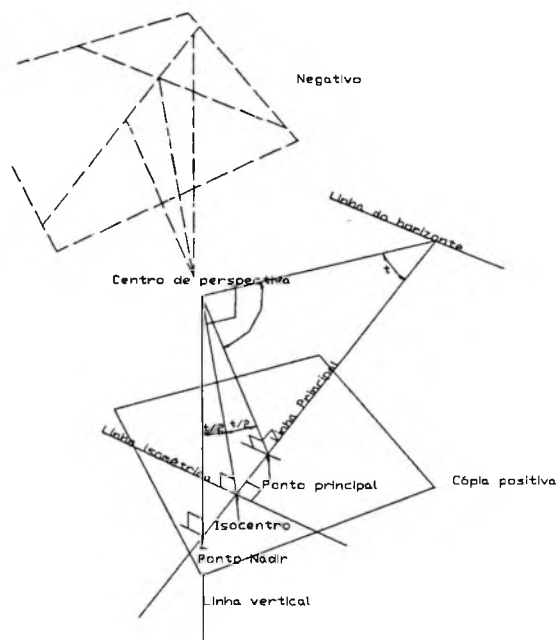


Figura 3 – Elementos da fotografia inclinada.
(Fonte: Adaptado por J. Raffo de M.P. 4º Edit.)

O ponto principal é a intercessão do eixo ótico com o plano do filme, o ponto nadir é a intercessão da vertical com o plano do filme, o f é a focal da câmara. O ângulo (t) formado pela vertical e o eixo ótico é o ângulo de inclinação. O ponto principal e o ponto nadir definem uma reta chamada linha principal. Esta linha corresponde à reta de intercessão do plano do filme com o plano vertical, que passa pelo centro ótico da câmara e contém a vertical. Esta reta está orientada na direção da

máxima inclinação da fotografia e o sentido descendente vai do ponto principal para o ponto nadir. A bissetriz do ângulo de inclinação (t) corta ao plano do filme num ponto chamado isocentro (I). O plano horizontal que passa pelo centro ótico corta o plano do filme numa reta horizontal chamada linha do horizonte. Todas as retas perpendiculares à linha principal são retas horizontais. Entre todos estes elementos verificam-se as seguintes relações:

$$ni = f [\tan (t) - \tan (t/2)] \quad (2.5.)$$

$$pn = f \tan (t) \quad (2.6.)$$

$$pi = f \tan (t/2) \quad (2.7.)$$

$$ph = f \cot (t) \quad (2.8.)$$

$$On = f \sec (t) \quad (2.9.)$$

onde: ni = distância nadir – isocentro

Pn = distância ponto principal – nadir

Pi = distância ponto principal – isocentro

Ph = distância ponto principal – linha do horizonte

On = distância centro de perspectiva – nadir

Todos estes elementos constam da Figura 3.

2.3.2 Efeitos da inclinação da fotografia

2.3.2.1 Deslocamento da posição dos pontos

A Figura 4 mostra, em perfil, o deslocamento das imagens dos pontos do terreno na foto oblíqua, com relação à posição que teriam se a fotografia fosse vertical.

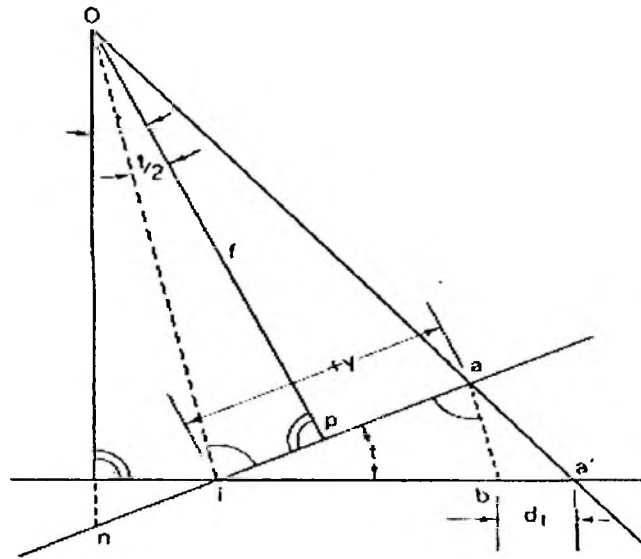


Figura 4 – Perfil correspondente à fotografia inclinada.
(Fonte: M.P. 4ª Edit.)

O deslocamento ocorre em sentido radial, desde o isocentro (I). A linha isométrica (reta perpendicular à linha principal que passa pelo isocentro) divide a fotografia em duas partes: a que contém o ponto principal que é chamada “parte superior” da fotografia e onde o deslocamento é centrípeto, e a que contém o ponto nadir chamada “parte inferior” onde o deslocamento é centrífugo. Não existe deslocamento na linha isométrica. O módulo do deslocamento de cada ponto pode ser calculado pela fórmula (2.10.).

$$d_t = \frac{y^2}{[f \sin(t) - y]} \quad (2.10.)$$

onde:

d_t é o módulo do deslocamento

y é a ordenada do ponto em questão medida sobre a linha principal.

2.3.2.2 Escala na foto inclinada

Na foto vertical, quando o terreno for um plano horizontal, a escala é constante em toda a fotografia e está dada pela fórmula 2.1. que também pode ser escrita na forma 2.11.

$$E = f/H \quad (2.11.)$$

Quando a foto for inclinada, embora o objeto fotografado seja um plano horizontal, a escala da fotografia é variável. Seu valor coincide com a escala da foto vertical na linha isométrica, é menor nos pontos da foto situados na região que contém o ponto principal e maior nos pontos da região que contém o ponto nadir. A fórmula (2.12.) calcula a escala pontual da foto inclinada:

$$E = \frac{f - y.\sin(t)}{H} \quad (2.12.)$$

Na 2.12. pode-se observar, deixando y constante, que o valor da escala continua o mesmo ao longo de cada reta paralela à linha isométrica

2.3.3 Efeitos combinados da inclinação e do relevo topográfico

2.3.3.1 Efeito na escala

A escala pontual do terreno afetado pelas irregularidades topográficas, numa fotografia inclinada, fica determinada pela fórmula (2.13.).

$$E = \frac{f - y \cdot \sin(t)}{H - h} \quad (2.13.)$$

2.3.3.2 Efeito no deslocamento dos pontos da imagem

As Figuras 5 e 6 comparam a posição das imagens de um ponto do terreno, na fotografia oblíqua e na fotografia vertical, obtidas desde o mesmo ponto de vista. As deformações provocadas pela inclinação e pelo relevo são indicadas por dois vetores diferentes que se dirigem ao isocentro e ao ponto nadir, respectivamente. O vetor provocado pelo relevo é proporcional ao afastamento do ponto com relação ao nadir é centrífugo. O vetor referente à inclinação é centrípeto, desde o isocentro na parte superior da imagem e centrífugo na parte inferior.

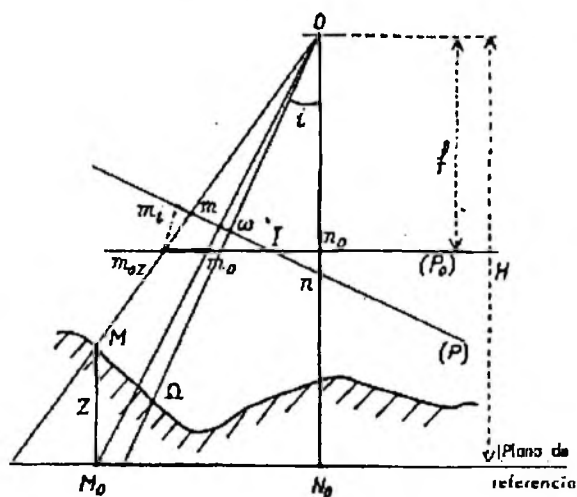


Figura 5 - Efeito combinado do relevo e foto inclinada (perfil).

Fonte: Carre, F. (1975)

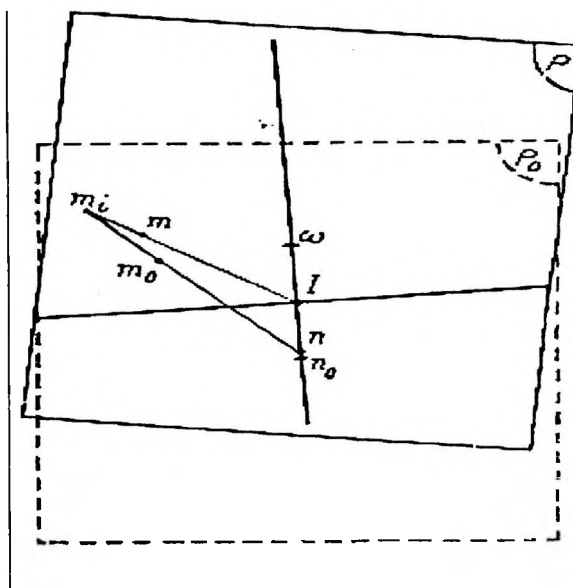


Figura 6 – Efeito combinado do relevo e foto inclinada (planta).

Fonte: Carre, F. (1975)

Das observações anteriores, conclui-se que a posição relativa e a escala dos pontos de uma fotografia oblíqua são um problema complexo e sua correção resulta difícil, já que nela intervém variáveis de difícil determinação, como o ângulo de inclinação e as altitudes dos diferentes pontos do terreno.

2.4 Orientação da câmara fotográfica

2.4.1 Sistemas de coordenadas

Para poder utilizar a fotografia de formato 230 mm com fins de medida, são definidos 3 sistemas de coordenadas cartesianas retangulares: a) Sistema de coordenadas com origem no centro fiducial da fotografia, b) Sistema de coordenadas com origem no centro da lente e c) Sistema de coordenadas do terreno.

2.4.2 Sistema de coordenadas com origem no centro fiducial

As câmaras fotogramétricas possuem um chassis na frente do filme de forma que, no momento da tomada da fotografia, esta é impressionada com quatro marcas, chamadas “marcas fiduciais”. As marcas fiduciais determinam um sistema de eixos ortogonais X e Y, como é mostrado na Figura 7. O eixo ótico da câmara corta o plano do filme num ponto, chamado ponto principal, que coincide com a intersecção das linhas que unem as marcas fiduciais.

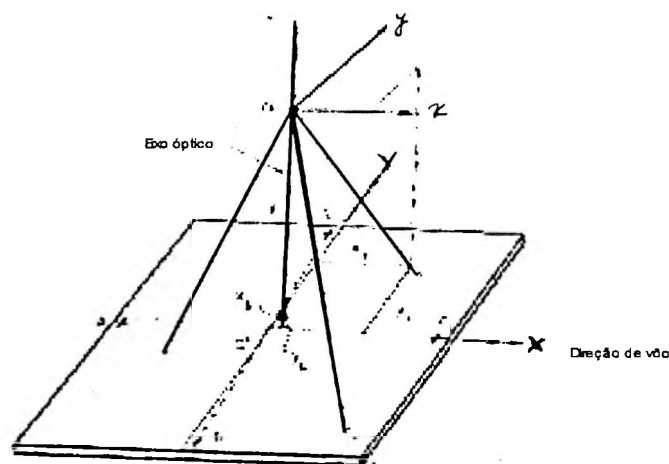


Figura 7 – Orientação interna.

(Fonte: Adaptado por J. Raffo de M.P. 4ª Edit)

Em condições teóricas, o eixo ótico da câmara deveria ser perpendicular ao plano do filme. Geralmente, esta condição não se cumpre estritamente na prática. Feita a observação, podem ser escritas as equações (2.14) que indicam o deslocamento do ponto principal com relação ao centro fiducial, assim como a distância desde o centro da lente ao plano da imagem. As câmaras fotogramétricas estão construídas de forma que este valor coincida com a distância focal da lente e, por esta razão, a referida distância é conhecida como “focal da câmara”.

$$\begin{aligned}
 x_i &= x_i - x_p \\
 y_i &= y_i - y_p \\
 z_i &= -f
 \end{aligned}
 \tag{2.14}$$

O processo de determinação de: f , x_i , y_i e das distorções óticas das lentes é conhecido como orientação interna da câmara fotográfica.

As câmaras de pequeno formato, como as utilizadas neste trabalho, não possuem marcas fiduciais, dificultando a calibração. Este foi um dos motivos que levaram a escolher, para esta pesquisa, um modelo matemático que foi independente da calibração da lente e de orientação interna da câmara fotográfica.

2.4.3 Sistema de coordenadas com origem no centro da lente

No centro de perspectiva da câmara fotográfica é definido um outro sistema de eixos coordenados, que permite vincular as coordenadas de fotografia com as coordenadas do terreno, através da projetividade existente entre o objeto e a imagem correspondente. Este sistema de coordenadas têm como origem o centro ótico da câmara. Os eixos X e Y são definidos paralelos aos eixos determinados pelas marcas fiduciais, e o eixo Z coincide com o eixo ótico da câmara..

2.4.4 Sistema de coordenadas de terreno.

Para vincular a posição dos pontos do terreno e de suas imagens na fotografia, estabelece-se um sistema de coordenadas topográfico ou de terreno. Geralmente este sistema é adotado de forma que o eixo Z coincida com a vertical num ponto do terreno. Os eixos X e Y pertencem a um plano horizontal que passa pelo referido ponto, e o eixo Y é orientado para o Norte geográfico. Também, pode ser adotado o “Sistema Topográfico Local”, usado na norma 13133 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), ou o Sistema “UTM”, utilizado na cartografia sistemática oficial do Brasil.

2.4.5 Orientação Externa

Os sistemas de coordenadas do terreno e da câmara fotográfica são independentes e, geralmente, existe entre eles deslocamento entre as origens e rotação entre os eixos.

O processo fotogramétrico de determinação da posição do centro de perspectiva (X_i^c, Y_i^c, Z_i^c), assim como a determinação dos ângulos de rotação (ϕ, κ, ω) entre os sistemas de eixos, é chamado: orientação externa.

2.4.5.1 Ângulos de rotação

Na metodologia pesquisada neste trabalho, as fotografias são tomadas desde a janela do avião, como mostra a Figura 8. Os ângulos de rotação são analisados a seguir.

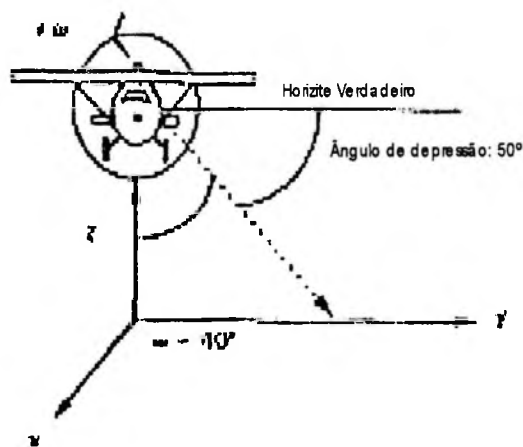


Figura 8 – Ângulo de depressão da foto aérea inclinada.
(Fonte: Adaptado por J. Raffo de W.S. Warner, 1996)

O ângulo ω é o formado pela vertical e o eixo ótico da câmara. Segundo seu valor, será a possibilidade fotografar a linha do horizonte, e as fotografias serão classificadas em alta ou baixa oblíqua. Este ângulo é o fator de maior influência na variação de escala nas fotografias inclinadas.

O ângulo ϕ é provocado pela falta de perpendicularidade do eixo ótico da câmara fotográfica com o sentido do vôo. Seu efeito consiste numa diferença de escala, entre as bordas esquerda e direita da fotografia (Figura 9).

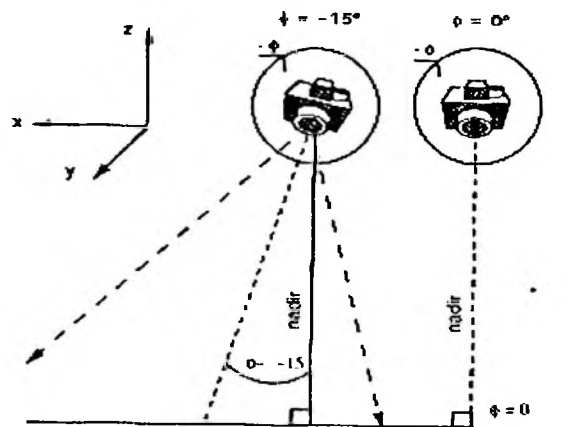


Figura 9 – Efeito do ângulo ϕ na fotografia aérea.
(Fonte: W.S. Warner, 1996)

O ângulo κ corresponde a uma rotação da fotografia ao redor de seu eixo ótico. O efeito deste ângulo consiste numa falta de paralelismo entre a direção do vôo e os lados da fotografia (Figura 10).

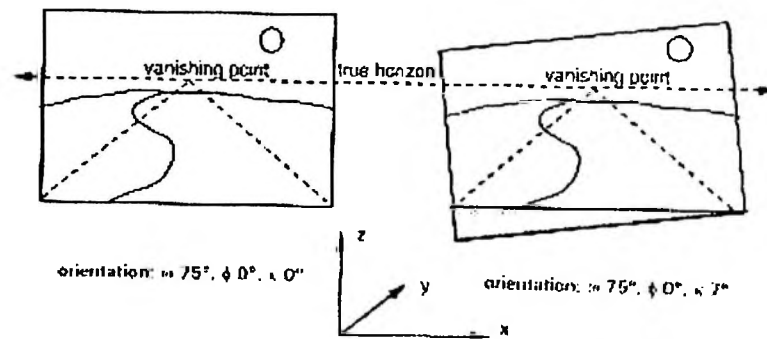


Figura 10 – Efeito do ângulo κ na fotografia inclinada.
(Fonte: W.S. Warner, 1996)

2.4.5.2 Deformação da imagem provocada pelos ângulos de rotação

Com intenção de entender as deformações das imagens fotográficas, são mostrados, a seguir, os diferentes efeitos provocados pelos ângulos de rotação sobre a imagem de uma retícula plana e horizontal.

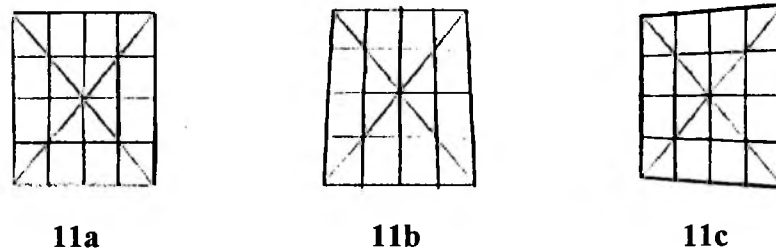


Figura 11a – Imagem de grade plana e horizontal obtida por uma câmara com seu três eixos paralelos aos eixos do sistema terrestre, $\omega = 0$, $\phi = 0$, $\kappa = 0$.

Figura 11b - Imagem da grade anterior com $\omega \neq 0$, $\phi = 0$, $\kappa = 0$.

Figura 11c – Imagem da grade com $\omega = 0$, $\phi \neq 0$, $\kappa = 0$.

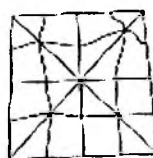
Fonte: Warner, W. et al. (1996).

2.4.5.3 Deformação da imagem provocada pela inclinação e pelo relevo do terreno

Nos gráficos a seguir, mostra-se o efeito conjunto provocado pelo relevo do terreno, e pela inclinação da fotografia .



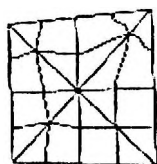
12a



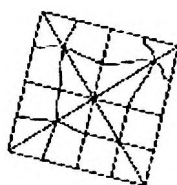
12b

Figura 12a – Imagem de uma grade plana, onde existem pontos isolados com altitudes diferenciadas. Os eixos da câmara são paralelos aos eixos do sistema terrestre, $\omega = 0$, $\phi = 0$, $\kappa = 0$. A imagem mostra um deslocamento dos nós da quadricula com maior altitude, em relação ao centro da fotografia.

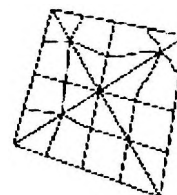
Figura 12b – Imagem com efeito do relevo e $\omega \neq 0$, $\phi = 0$, $\kappa = 0$.



12c



12d



12e

Figura 12c – Imagem com efeito do relevo e $\omega = 0$, $\phi \neq 0$, $\kappa = 0$.

Figura 12d – Imagem com efeito do relevo e $\omega = 0$, $\phi = 0$, $\kappa \neq 0$.

Figura 12e – Imagem com efeito do relevo e $\omega \neq 0$, $\phi = 0$, $\kappa \neq 0$.

Fonte: Warner et al. (1996).

A deformação causada pelo relevo efetua-se em forma radial a partir do ponto nadir, aumentando de valor na medida que os objetos se afastam dele. No nadir, a deformação provocada pelo relevo é nula.

Os efeitos anteriores combinados aparecem nas figuras 13a e 13b.

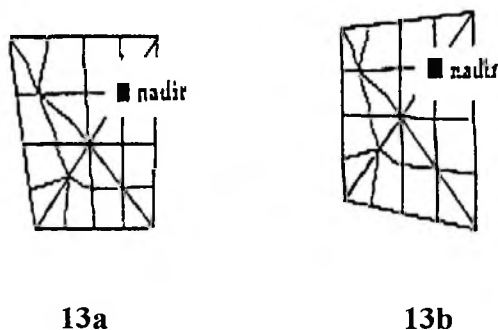


Figura 13a – Efeito combinado da foto inclinada ($\omega \neq 0$), deformação pelo relevo do terreno e deslocamento do nadir, do centro da fotografia.

Figura 13b – Efeito combinado da foto inclinada ($\phi \neq 0$, $\omega \neq 0$), deformação pelo relevo do terreno e deslocamento do nadir, do centro da fotografia.

Fonte: Warner et al. (1996).

2.4.6 Modelos Matemáticos

Com o objetivo de expressar analiticamente a relação existente entre pontos do terreno e suas imagens na fotografia, foram desenvolvidos, ao longo do tempo, diferentes modelos matemáticos, sendo os mais usados os chamados “das equações de colinearidade” e “das equações de projetividade” (Manual of Photogrammetry, 1980).

2.4.6.1 Equações de Colinearidade

O modelo conhecido como das equações de colinearidade, fundamenta-se nas equações da reta, da geometria analítica do espaço, e aplica-se ao alinhamento do conjunto de pontos, formado pelo centro da lente da câmara fotográfica, pelo ponto do terreno e sua imagem na fotografia. As referidas equações são indicadas a seguir (2.15.).

$$x = -f \frac{(X_p - X_o) m_{11} + (Y_p - Y_o) m_{12} + (Z_p - Z_o) m_{13}}{(X_p - X_o) m_{31} + (Y_p - Y_o) m_{32} + (Z_p - Z_o) m_{33}} \quad (2.15.)$$

$$y = -f \frac{(X_p - X_o) m_{21} + (Y_p - Y_o) m_{22} + (Z_p - Z_o) m_{23}}{(X_p - X_o) m_{31} + (Y_p - Y_o) m_{32} + (Z_p - Z_o) m_{33}}$$

Nestas equações x, y são as coordenadas dos pontos da imagem no sistema da câmara fotográfica, f é a distância focal da câmara.

X_p, Y_p, Z_p são as coordenadas dos pontos do objeto no sistema de coordenadas do terreno.

X_o, Y_o, Z_o são as coordenadas do centro de perspectiva no sistema de coordenadas do terreno.

Os m_{ij} são coeficientes numéricos obtidos de funções trigonométricas dos ângulos ϕ, κ, ω .

A interpretação gráfica da fórmula (2.15.) aparece na Figura 14.

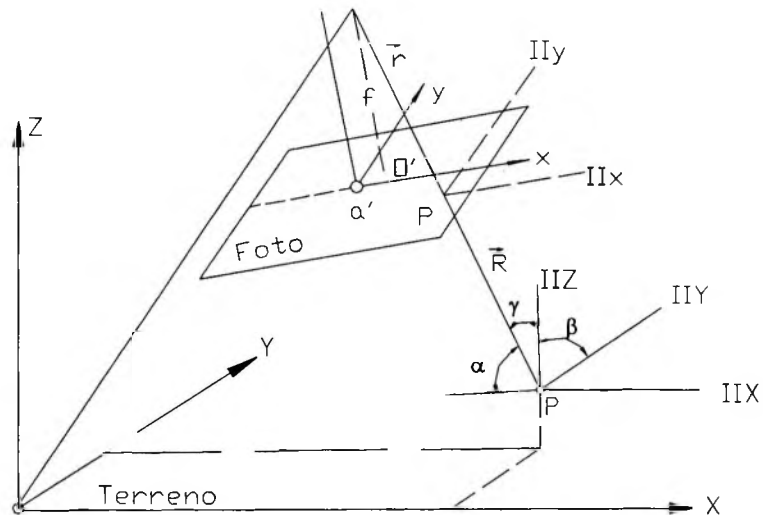


Figura 14 – Relação entre os sistemas de coordenadas da câmera fotográfica e do terreno.

(Fonte: Adaptado por J. Raffo de Ghosh, 2ª Edit)

2.4.6.2 Equações de projetividade

O modelo das equações de projetividade fundamenta-se nas relações projetivas existente entre duas superfícies planas, que, no caso, são a placa fotográfica e o terreno.

Na Figura 15 são indicadas as duas superfícies: o plano da fotografia e plano do terreno.

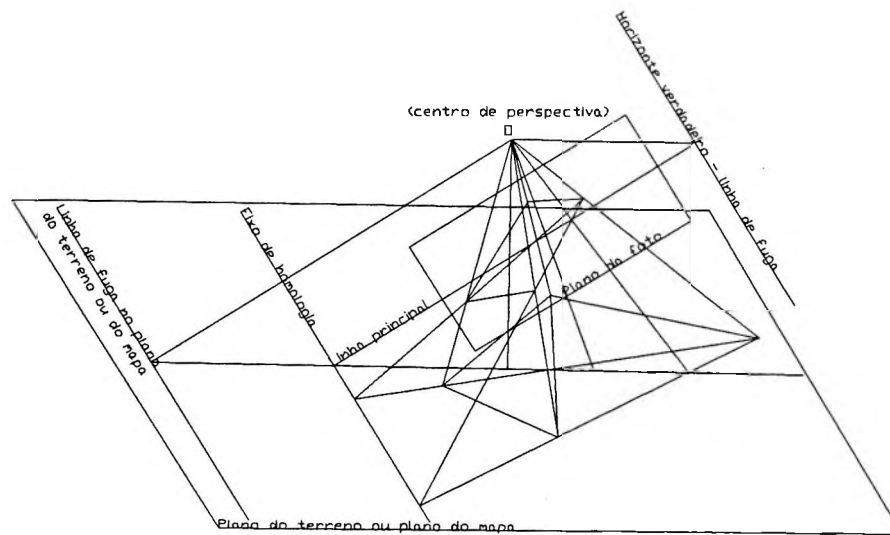


Figura 15 – Relação projetiva entre fotografia e terreno ou mapa.

Fonte: Adaptado por J. Raffo de Edit. American Society of Photogrammetry, 1980.

Na Figura 16 mostra-se em detalhe o “plano principal” e as relações existentes entre os elementos do plano principal na foto e no plano do terreno.

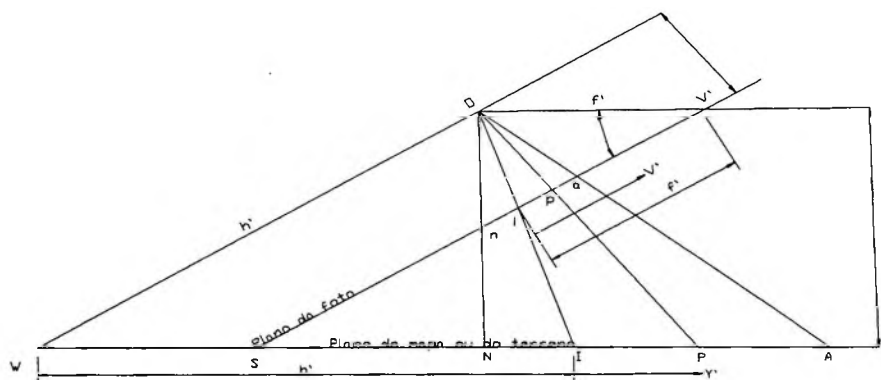


Figura 16 – Plano principal da fotografia aérea inclinada.

Fonte: Adaptado por J. Raffo de Edit. American Society of Photogrammetry, 1980.

Elementos indicados na Figura 16:

- n – nadir da foto
- p – ponto principal da foto
- i – incentro da foto
- a – imagem de um ponto do terreno
- f – focal da câmara
- N – projeção do nadir no terreno
- P – projeção do ponto principal no terreno
- I – projeção do incentro no terreno
- A – objeto do terreno
- h – altura do centro ótico da câmara \approx (altura de vôo)

Na Figura 17 estão indicados o sistema de coordenadas da fotografia e o sistema de coordenadas do objeto, correspondente na projeção. Este sistema pode estar no terreno ou no mapa já elaborado.

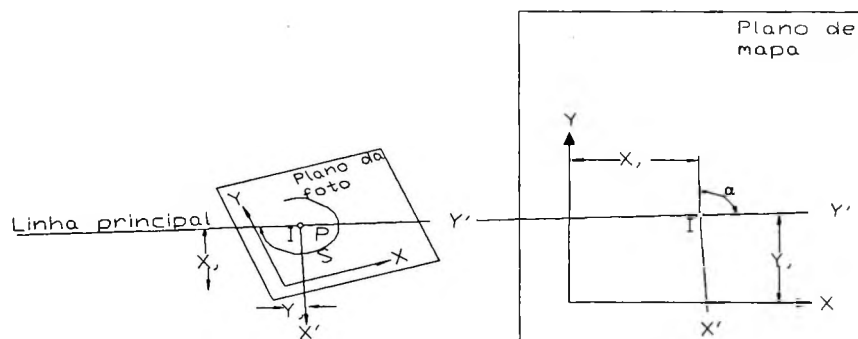


Figura 17 – Sistema de coordenadas na foto e no terreno ou no mapa.

Fonte: Adaptado por J. Raffo de Edit. American Society of Photogrammetry, 1980.

As equações de “projetividade” são indicadas a seguir (2.16.):

$$X = \frac{a_1x + b_1y + d_1}{a_4x + b_4y + 1} \quad Y = \frac{a_2x + b_2y + d_2}{a_4x + b_4y + 1} \quad (2.16.)$$

onde:

$$a_1 = \frac{-h' \cos(s - \alpha) + X_T \operatorname{sen}(s)}{f' - y'_t}$$

$$a_2 = \frac{-h' \operatorname{sen}(s - \alpha) + Y_T \operatorname{sen}(s)}{f' - y'_t}$$

$$b_1 = \frac{h' \operatorname{sen}(s - \alpha) + X_T \cos(s)}{f' - y'_t}$$

$$b_2 = \frac{-h' \cos(s - \alpha) + Y_T \cos(s)}{f' - y'_t}$$

$$d_1 = \frac{h'(x'_t \cos(\alpha) + y'_t \operatorname{sen}(\alpha))}{f' - y'_t} + X_T$$

$$d_2 = \frac{-h'(x'_t \operatorname{sen}(\alpha) - y'_t \cos(\alpha))}{f' - y'_t} + Y_T$$

$$a_4 = \frac{\operatorname{sen}(s)}{f' - y'_t}$$

$$b_4 = \frac{\cos(s)}{f' - y'_t}$$

$$\cos(t) = \frac{f' - y'_p}{f'}$$

$$\operatorname{sen}(t) = \frac{f}{f'}$$

$$h = h' \frac{f}{f'}$$

As “equações inversas” das equações de projetividade são (2.17.):

$$\begin{aligned} x &= \frac{(b_2 - b_4 d_2)X + (-b_1 + b_4 d_1)Y + (b_1 d_2 - b_2 d_1)}{(a_2 b_4 - a_4 b_2)X + (a_4 b_1 - a_1 b_4)Y + (a_1 b_2 - a_2 b_1)} \\ y &= \frac{(-a_2 + a_4 b_2)X + (a_1 - a_4 d_1)Y + (a_2 d_1 - a_1 d_2)}{(a_2 b_4 - a_4 b_2)X + (a_4 b_1 - a_1 b_4)Y + (a_1 b_2 - a_2 b_1)} \end{aligned} \quad (2.17.)$$

Conhecidos os parâmetros das equações de projetividade, podem ser calculados os elementos de orientação, na relação projetiva, segundo mostram as fórmulas (2.18.).

$$\operatorname{tg}(s) = \frac{a_4}{b_4} \quad (2.18.)$$

$$f' - y'_t = (a_4^2 + b_4^2)^{-1/2}$$

$$X_T = \frac{a_4(a_1 - b_2) + b_4(a_2 + b_1)}{a_4^2 + b_4^2}$$

$$Y_T = \frac{a_4(a_2 + b_1) - b_4(a_1 - b_2)}{a_4^2 + b_4^2}$$

$$\operatorname{tg}(s - \alpha) = \frac{a_4(a_4 b_1 - b_4 a_1) + b_4(a_4 b_2 - b_4 a_2)}{a_4(-a_4 b_2 + b_4 a_2) + b_4(a_4 b_1 - b_4 a_1)}$$

$$h' = (f' - y'_t)^3 \left(\frac{a_4(a_4 b_1 - b_4 a_1) + b_4(a_4 b_2 - b_4 a_2)}{\operatorname{sen}(s - \alpha)} \right)$$

$$x'_t = \frac{(f' - y'_t)}{h'} [(d_1 - X_T) \cos(\alpha) - (d_2 - Y_T) \operatorname{sen}(\alpha)]$$

$$y'_t = \frac{(f' - y'_t)}{h'} [(d_1 - X_T) \operatorname{sen}(\alpha) + (d_2 - Y_T) \cos(\alpha)]$$

3 O SISTEMA FOTOGRÁFICO

No item 2.1. tratou-se a questão da geometria da fotografia. Outros elementos importantes a considerar no desenvolvimento da metodologia proposta são os recursos instrumentais, como câmaras fotográficas, lentes, filtros, acessórios e filmes, assim como o planejamento do recobrimento fotográfico. O Prof. A. Disperatti em seu livro *“Obtenção e uso de fotografias aéreas de pequeno formato”* (1989), faz uma análise detalhada destes assuntos, que serão, a seguir, abordados de forma resumida.

3.1 Câmaras fotográficas

As fotografias aéreas podem ser obtidas por câmaras especialmente construídas para fotogrametria, conhecidas como câmaras métricas ou por câmaras fotográficas convencionais, também chamadas não métricas.

Considerações sobre câmaras métricas e não métricas:

Câmara métrica:

- a) elaborada e calibrada especificamente para medidas fotogramétricas;
- b) a orientação interna da câmara é conhecida e estável;
- c) usualmente o foco é fixo;
- d) contém marcas fiduciais para permitir a recuperação dos elementos de orientação interna da câmara;
- e) freqüentemente contém placa de vácuo para manter a planura do filme;
- f) disponibilidade comercial limitada.

Câmara não métrica:

- a) geralmente câmara manual e de alta qualidade;
- b) geralmente não mantém uma orientação interna constante;
- c) usualmente não apresenta foco fixo ou construído rigidamente;
- d) marcas fiduciais não instaladas, mas podendo ser definidas posteriormente;
- e) disponibilidade comercial muito grande, com vários tamanhos de câmaras e uso de diferentes filmes e lentes.

Deve-se observar particularmente que a câmara métrica apresenta foco fixo, o que não ocorre com uma câmara não métrica. Em termos práticos, isto significa que toda vez, ao se fotografar uma cena ou um objeto com uma câmara não métrica, é necessário que seja efetuada a correta focalização da cena no visor da câmara, através da alteração da distância focal da lente. Caso isso não seja feito, a fotografia resultante poderá não estar nítida ou seja, ficar fora de foco. Esta focalização torna-se mais necessária quando a distância entre a lente da câmara e a cena for pequena. Para distâncias grandes (maiores de 20m) apenas ajusta-se a lente para a posição de infinito. Esta situação ocorre sempre durante a tomada de fotografias aéreas, pois a distância entre a lente da câmara e o terreno (a altura de vôo) é grande. Por esse motivo, qualquer câmara aérea de focal variável, deverá ter o seu foco ajustado para o infinito.

O tamanho do negativo do filme fotográfico usado na câmara fornece uma outra diferença básica entre os tipos de fotografias aéreas.

O termo câmara fotográfica 35 mm refere-se a um tipo de câmara que utiliza filme com tamanho de negativo de 24 mm x 36 mm.

A denominação de câmara 70 mm, refere-se a um tipo do formato médio, que utiliza um filme fotográfico em que os negativos de tamanho individual, são de 6 cm x 6 cm ou 6 cm x 4,5 cm.

Algumas câmaras fotogramétricas 70 mm são equipadas com uma placa de vidro contendo um reticulado ("reseau"). Quando a fotografia é obtida com a câmara equipada com o "reseau", o reticulado aparecerá na imagem fotografada. As discrepâncias entre as coordenadas calibradas do reticulado e as medidas na fotografia refletem a influência da deformação do filme e também da não planura do filme no instante em que a fotografia foi tomada.

As câmaras 70 mm equipadas com "reseau" são consideradas métricas ou semimétricas e também são usadas em trabalhos ou estudos fotogramétricos aéreos e terrestres."

3.2 Lentes

A distância focal da lente é a distância medida desde o ponto nodal anterior ao plano no qual a imagem é formada em foco. A distância focal da lente é expressa geralmente em milímetros. Seu valor é gravado no anel metálico que circunda a objetiva.

A escolha da distância focal do câmara fotográfica é muito importante, pois o seu valor determinará a altura de vôo da aeronave durante o recobrimento fotográfico. A altura de vôo é determinada pela relação entre a distância focal e a escala desejada das fotografias aéreas e seu valor é diretamente proporcional à distância focal e inversamente à escala da fotografia aérea.

Para efeito de fotografias aéreas, as distâncias focais mais usadas nas câmaras de formato 35 mm são: 28 mm e 35 mm (grande angulares) e 50 ou 55 mm (normais). Nas de formato 70 mm, as distâncias focais mais usadas são: 35 mm ou 50 mm (super grande angulares) e 70 ou 80 mm (normais).

3.3 Filmes

Existem diversos tipos de filmes fotográficos que podem ser usados adequadamente para as fotografias aéreas. A escolha destes filmes, porém, depende da finalidade do trabalho, aliada às condições sob as quais as fotografias serão obtidas.

Os filmes aéreos usados em câmaras aerofotogramétricas são elaborados especialmente para a finalidade e apresentam, geralmente, mais contraste do que os filmes normais, utilizados nas câmaras de formatos 35 mm e 70 mm. Entretanto, estes filmes normais, apesar de serem produzidos em categoria profissional e amador, também se prestam para as fotografias aéreas, resultando, na maioria das vezes, em materiais excelentes para interpretação e mapeamento.

Há quatro tipos de filmes “preto e branco”: sensível ao azul, ortocromático, pancromático e o infravermelho. A diferença básica entre os quatro tipos de filmes acima mencionados refere-se à sensibilidade da emulsão.

Usualmente, quando alguém utiliza um filme “preto e branco”, sem especificar detalhes, geralmente refere-se ao pancromático, porque é o mais utilizado. É sensível a todas as cores do espectro visível (azul, verde e vermelho) e penetrando um pouco na região do ultravioleta. O filme sensível ao azul tem utilidade em trabalhos

onde se necessita de um poder de resolução extremamente alto. O filme ortocromático atualmente não é mais utilizado. O filme infravermelho, “preto e branco”, conserva sua sensibilidade aos curtos comprimentos de onda do faixa do visível (ultravioleta, violeta e azul), mas reage também ao infravermelho. O filme infravermelho tem sido usado com freqüência em trabalhos de mapeamento temático através de fotografias aéreas.

Quanto aos filmes coloridos, existem dois tipos: colorido reversível e negativo colorido.

Quando um filme colorido reversível é processado e revelado, o produto final é o próprio filme anteriormente exposto à luz para registrar a cena e o resultado de cada exposição é conhecido pelo nome de “slide”. Os filmes slides são preferidos em relação aos demais, quando se deseja definição das imagens e reprodução das cores.

Com o filme negativo colorido, a fotografia é obtida em dois estágios diferentes. No primeiro estágio é efetuada a revelação do filme fotográfico e, no segundo estágio, a cópia da exposição obtida no filme, em papel fotográfico.

Todos os filmes são produtos perecíveis e suas características sensitométricas alteram-se gradualmente com o tempo. Os filmes coloridos, particularmente o infravermelho, podem ser mais seriamente afetados por condições adversas de armazenamento.

O filme infravermelho preto e branco deve ser armazenado em refrigerador, a uma temperatura de -13°C ou inferior, enquanto para o infravermelho colorido a temperatura de estocagem deve ser na faixa de -18°C a -23°C . Estes filmes infravermelhos precisam ser retirados da geladeira algum tempo antes de serem usados para que possam voltar à temperatura ambiente.

Uma característica importante dos filmes é a velocidade ("film speed"), que indica numericamente a sensibilidade à luz de cada emulsão fotográfica. Dois tipos de sistema indicam numericamente essa sensibilidade: o sistema ASA e o sistema DIN. A relação entre ambos os sistemas aparece indicada na Tabela 1.

Tabela 1 - Equivalência entre os valores de ASA e DIN.

ASA	25	32	40	64	100	200	400	1000	2000	3200
DIN	15	16	17	19	21	24	27	31	34	36

Fonte: A. Disperati (1991).

O conhecimento da velocidade do filme é um fator muito importante, pois fornece o tempo de exposição correta para uma dada quantidade de luz.

A correta quantidade de luz que atinge o filme na câmara fotográfica (exposição correta) é obtida da combinação adequada da velocidade do obturador, com a abertura do diafragma da câmara. Ambos os valores determinam a nitidez da imagem fotográfica e a profundidade de campo.

Outro fator importante a considerar na pesquisa metodológica proposta, refere-se à granulação do filme. Quanto mais rápido for o filme, maior será o tamanho dos grãos de haletos de prata na emulsão e, conseqüentemente, menos contraste e menor definição na fotografia.

3.4 Filtros

O filtro é um simples acessório de material transparente, colorido ou não, que pode ser acoplado temporariamente na frente da objetiva da câmara fotográfica. Existem inúmeros tipos e tamanhos, identificados por suas cores e seus efeitos, especificados por números e letras.

Há três razões básicas para o uso de filtros em câmara fotográfica para aquisição de fotografias aéreas:

- a) proteger a lente;
- b) impedir que determinados comprimentos de onda atinjam o filme;
- c) corrigir a cor ou os tons de cinza nos filmes coloridos ou preto e branco, respectivamente.

Na maioria das vezes, o filtro colocado diante da lente da câmara diminui a quantidade de luz que atinge o filme. Por isso, pode ser necessário maior tempo de exposição para obtê-la corretamente. A quantidade adicional de exposição é indicada por um número denominado fator do filtro. O fator 2, por exemplo, indica que duas vezes mais exposição são necessárias para obter o mesmo resultado, conseguido sem seu uso.

Existem, também, filtros destinados à radiação ultravioleta, tais como: UV e o Skylight. Ambos possuem fator 1 não alterando as cores ou tons de cinza nas fotografias e não necessitando ajustar os valores determinados para a exposição da fotografia. Estes filtros são usados tanto com filmes coloridos, como com preto e branco,

a fim de impedirem a entrada dos raios ultravioleta na lente e, assim, eliminarem o indesejado efeito da névoa, comum nas fotografias aéreas.

4 RECOBRIMENTO AEROFOTOGRAFICO

4.1 Planejamento do recobrimento fotográfico

Para efeito do planejamento de um recobrimento aerofotográfico, são indispensáveis as seguintes informações:

- a) objetivo do recobrimento e tipo de informação desejada para ser extraída das fotografias aéreas;
- b) escala e outros requisitos dos produtos ou mapas finais;
- c) localização, topografia, tamanho e formato do local a ser fotografado;
- d) altura máxima de vôo da aeronave disponível;
- e) tipo de câmaras fotográficas, lentes, filmes disponíveis para uso;
- f) condições climáticas do local a ser fotografado;
- g) período de tempo e recursos financeiros disponíveis para efetuar o recobrimento;
- h) necessidade ou não de recobrimentos lateral e longitudinal.

A definição da escala fotográfica, do filme a ser usado e da época de recobrimento dependem da natureza do mapeamento, associada ao nível de detalhe que se deseja extrair das fotografias aéreas.

O tipo de aeronave disponível, aliado à sua capacidade de altura máxima de vôo, determinam os valores máximo e mínimo de escalas possíveis de serem utilizados no levantamento aerofotográfico.

É também durante a fase do planejamento que se estabelecem os períodos prováveis do ano para a efetivação da missão fotográfica. Em geral, para cada local existem certos períodos do ano mais adequados à tarefa.

Para efeito de cálculo de custo do recobrimento aerofotográfico, diversos aspectos devem ser considerados, entre os quais se destacam as horas de vôo necessárias, a depreciação do equipamento, tipo de material a ser usado, o custo da tripulação envolvida. Deve-se ter sempre presente, porém, a necessidade de ser refeito total ou parcialmente um recobrimento aerofotográfico, devido à ocorrência de falhas técnicas ou condições atmosféricas adversas.

Uma vez decididos os principais aspectos referentes ao planejamento aerofotográfico, a etapa seguinte é a elaboração do plano de vôo para a missão fotográfica. Este plano tem por finalidade orientar a equipe de vôo, dar uniformidade, maior rendimento, precisão e economia à tarefa de fotografar.

4.2 Fotografia aérea oblíqua

A obtenção de fotografias aéreas oblíquas não é difícil, uma vez que o fotógrafo mantém a câmara fotográfica manualmente dentro da aeronave e, desse modo, fotografa o local de interesse através da janela da aeronave. Melhor será a qualidade das fotografias resultantes quando existir a possibilidade de fotografar com a janela aberta. Deste modo, são eliminados os efeitos de reflexão do material que constitui a parte transparente do janela do avião, o que prejudica a qualidade da imagem fotográfica.

Se a área de interesse a ser fotografada for de pequena extensão e se as fotografias aéreas oblíquas forem usadas apenas com finalidade ilustrativa, não será necessário dedicar atenção ao planejamento do vôo aerofotográfico. Quando houver necessidade de fotografias aéreas oblíquas estereoscópicas, o planejamento do vôo deverá ser cuidadosamente elaborado.

O recobrimento aerofotográfico para a obtenção das fotografias aéreas oblíquas estereoscópicas, segue, em essência, o mesmo procedimento do recobrimento aerofotográfico para fotografias aéreas verticais estereoscópicas. As diferenças existentes entre os dois tipos de recobrimento são devidas à inclinação da câmara fotográfica. Os aspectos a serem abordados referem-se à trajetória da linha de vôo, à posição da câmara fotográfica em relação ao alvo e ao Sol, e à geometria da fotografia inclinada.

Existem duas situações distintas na obtenção de fotografias aéreas oblíquas estereoscópicas, que dependem do tamanho e do formato do local a ser fotografado. Na primeira situação, quando o local não é muito extenso e todos os objetos de interesse

estão muito próximos. Neste caso, é suficiente uma linha de vôo horizontal, podendo ser de formato circular ou retilínea. Exemplos dessa situação referem-se à obtenção de fotografias aéreas de uma indústria, alguns quarteirões de um bairro, uma área de ocupação física recente, etc. Na segunda situação, a área de interesse é de tamanho maior, impossível de ser fotografada através de poucas fotografias seqüenciais, devido à extensão do terreno e, assim, devem ser efetuadas várias linhas de vôo para a cobertura aerofotográfica.

As Figuras 18a e 18b correspondem a um local pequeno e o vôo pode ser efetuado em linha reta ou em curva.

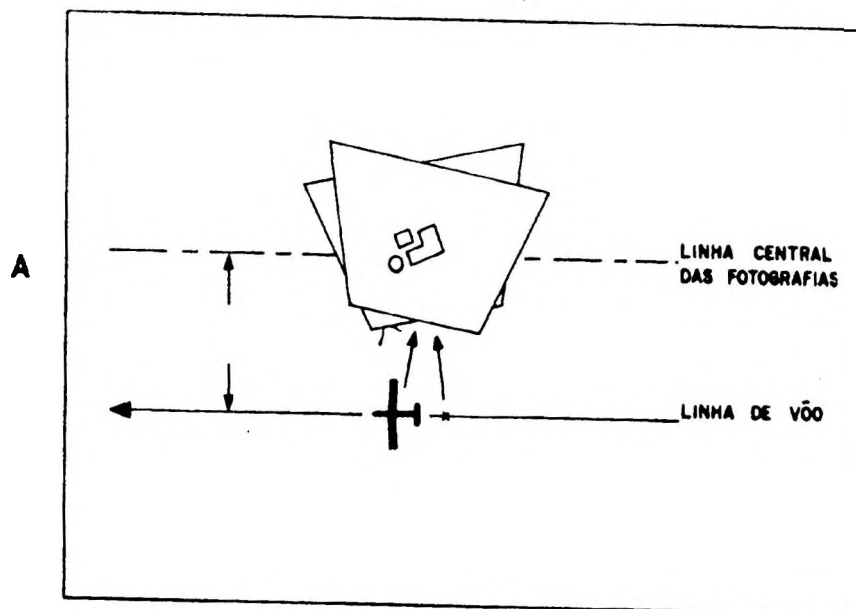


Figura 18a – Vôo fotográfico em linha reta para a obtenção de fotografias inclinadas.
(Fonte: A. Disperatti, 1991)

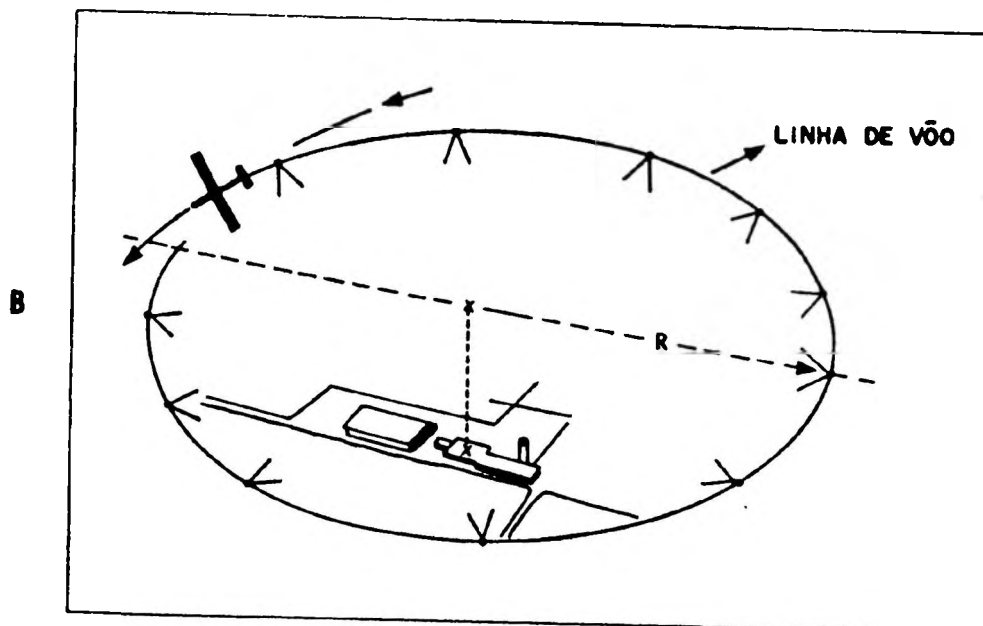


Figura 18b – Linha de vôo em curva para a obtenção de FAPEFs inclinadas.

(Fonte: A. Disperatti, 1991)

No vôo circular, o fotógrafo deve evitar fotografar de frente ou de costas para o Sol, evitando, desta forma, manchas de sobre-exposição na fotografia ou manchas escuras provocadas pela sombra da própria aeronave.

Sob o ponto de vista prático e com o uso de avião de asa alta, em condições normais de vôo, comumente denominado vôo horizontal nivelado, podem se obter fotografias aéreas oblíquas, com ângulo de inclinação de 30° a 90° (eixo da câmara perpendicular à vertical). A Figura 19 ilustra a obtenção de fotografia aérea com inclinação de 15° .

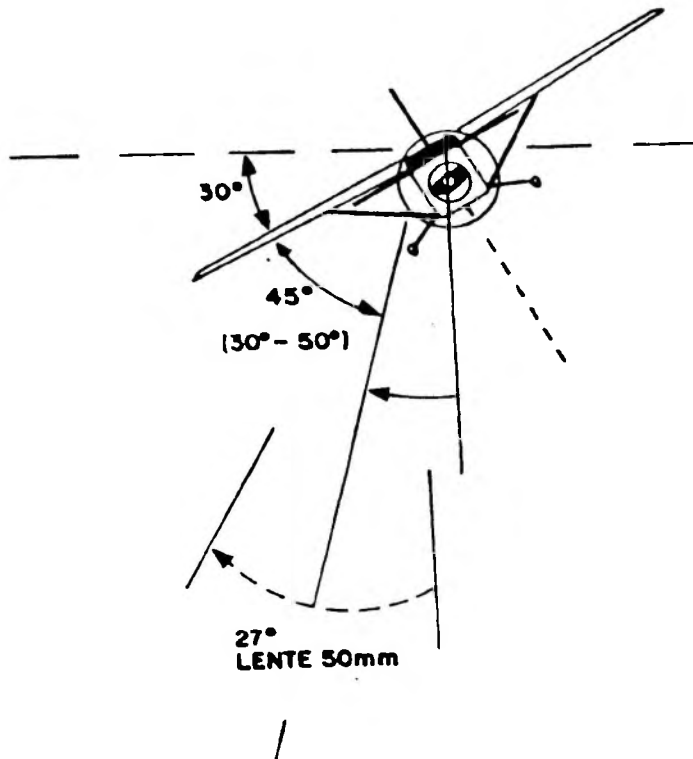


Figura 19 – Inclinação lateral do avião de asa alta para a obtenção de fotografias aéreas inclinadas.

(Fonte: A. Disperatti, 1991)

A completa cobertura aerofotográfica de áreas extensas pode ser feita através de uma ou mais linhas de vôo horizontais retilíneas. Estas linhas, podem ser paralelas ou não. A Figura 20 apresenta a solução para duas situações diferentes. Na primeira situação (Figura 20a) foi necessária apenas uma linha de vôo, enquanto que na segunda (Figura 20b) foi necessário efetuar 3 linhas de vôo não paralelas. Em ambos os vôos aerofotográficos, a câmara fotográfica foi mantida com a mesma inclinação. Existe ainda uma terceira situação, que se refere ao recobrimento com inúmeras linhas de vôo paralelas.

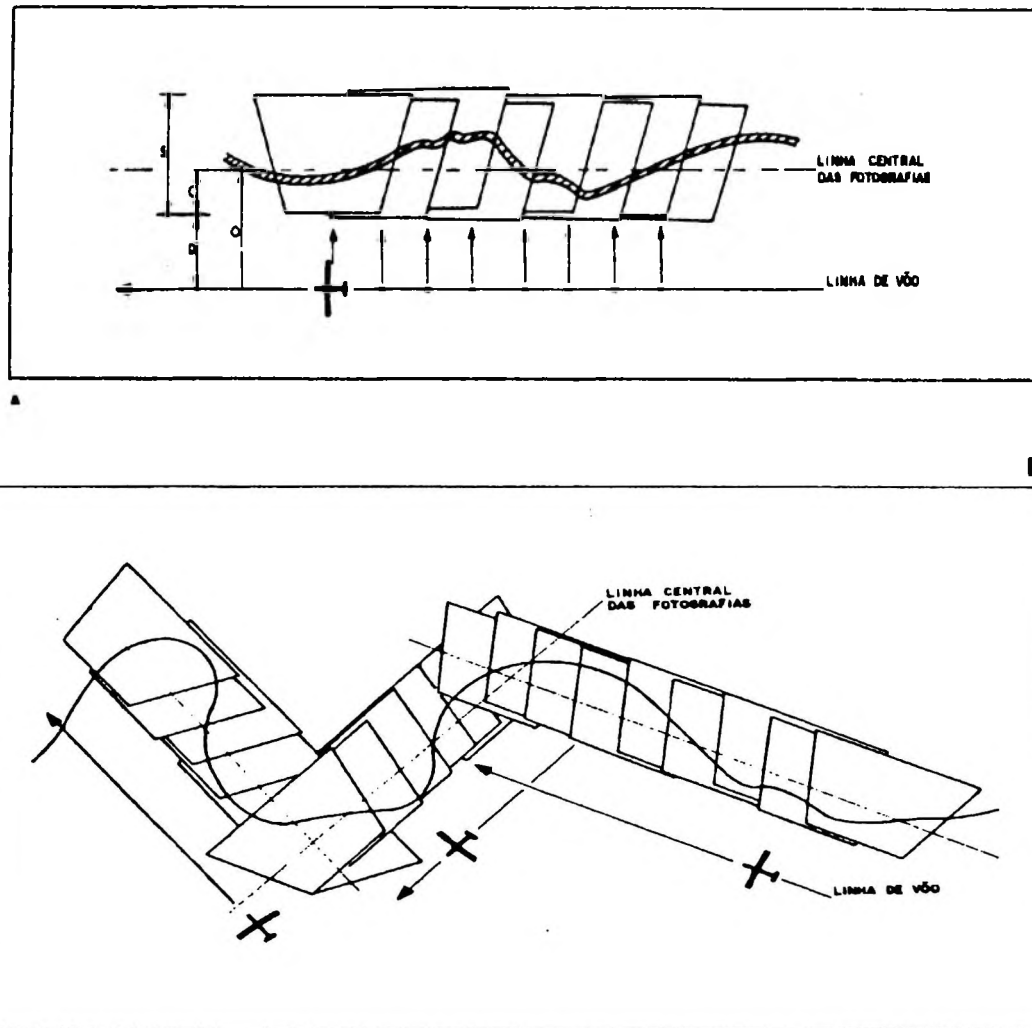


Figura 20 – Obtenção de fotografia aérea inclinadas estereoscópicas.

a) de objetos de extensão linear.

b) de objetos de forma irregular

(Fonte: A. Disperatti, 1991)

4.3 Geometria da fotografia aérea inclinada

A Figura 21 ilustra a tomada de uma fotografia aérea inclinada, usando uma câmara fotográfica equipada com lente de distância focal f e com ângulo de abertura de

2α . O lado do negativo fotográfico mede x e o ângulo de depressão ϑ . O ângulo de inclinação (i) e o de depressão (ϑ) são complementares.

Admitindo-se que não existam deformações da imagem e que o terreno seja plano e horizontal, as fórmulas que definem as variáveis para o planejamento do vôo aerofotográfico são indicadas a seguir.

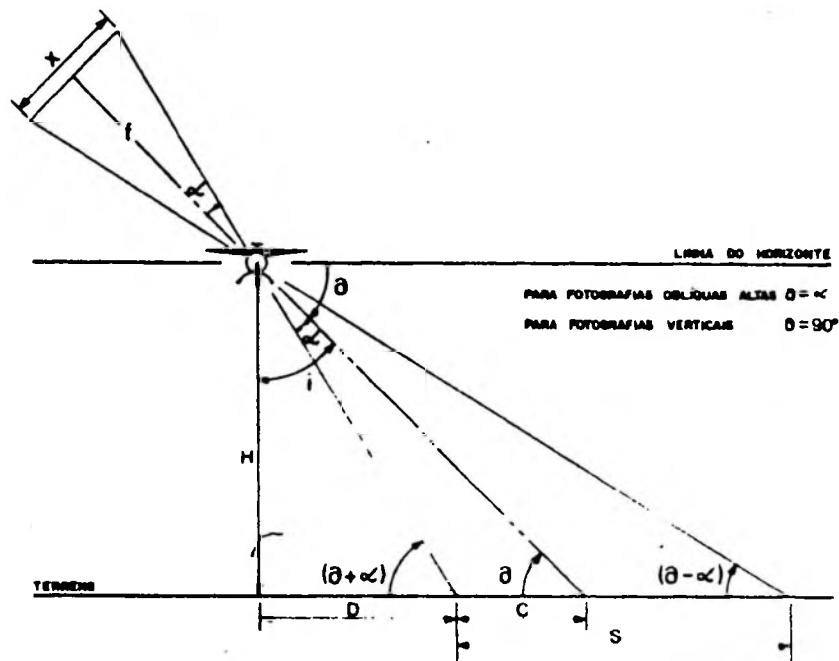


Figura 21 – Geometria básica da fotografia aérea inclinada.

(Fonte: A Disperatti, 1991)

a) α = ângulo de abertura da lente = $\arctan(x/2f)$,

x = lado do negativo fotográfico

f = distância focal da lente

b) D = distância do ponto nadir, à margem mais próxima da fotografia

$$D = H \left[\frac{1}{\tan(\partial + \alpha)} \right], \text{ onde} \quad (2.19.)$$

H = altura de vôo

∂ = ângulo de depressão.

c) C = distância da margem mais próxima, até o centro da fotografia

$$C = H \left[\frac{1}{\tan \partial} - \frac{1}{\tan(\partial + \alpha)} \right] \quad (2.20.)$$

d) O = distância do ponto nadir, ao centro do fotografia

$$O = H \left[\frac{1}{\tan(\partial - \alpha)} - \frac{1}{\tan(\partial + \alpha)} \right] \quad (2.21.)$$

e) S = distância no terreno, correspondente ao lado da fotografia

$$S = H \left[\frac{1}{\tan(\partial - \alpha)} - \frac{1}{\tan(\partial + \alpha)} \right] \quad (2.22.)$$

5 IMAGENS DIGITAIS

5.1 Definição

Em geoprocessamento, chama-se imagem digital a imagem apresentada no monitor do computador e resultante de um mapa de bits ou de um arquivo vetorial. Nesta pesquisa, tratam-se somente imagens do tipo mapa de bits ou também chamadas tipo raster.

As imagens digitais são arquivadas na memória do computador, como matrizes “bi-dimensionais”. Cada elemento da matriz é chamado de "pixel" (picture element) e tem a sua localização definida na por um par de coordenadas (i, j).

5.2 Resolução espacial de uma imagem

Denomina-se resolução espacial, ao número de pixels contidos numa determinada medida linear. Quanto maior for o número de pixels por unidade de comprimento, maior é a resolução espacial da imagem. A resolução espacial indica-se em dpi ("dots per inch") ou dpmm ("dots per millimeter").

5.3 Resolução radiométrica de uma imagem

A resolução radiométrica refere-se à coloração da imagem, indicando o número de cores ou tons de cinza que cada pixel pode assumir. Esta resolução se traduz por um número armazenado na memória do computador, para cada pixel da imagem.

Quanto maior for a resolução radiométrica, mais fiel será a imagem digitalizada em relação à imagem original no tocante a sua coloração.

5.4 Arquivos de imagem

As imagens digitais geradas na rasterização de uma fotografia através de um “scanner”, estão constituídas por arquivos numéricos que podem ser apresentados no monitor do computador, armazenados ou impressos.

Esses arquivos estão estruturados em duas partes:

- a) **Cabeçalho:** onde são armazenadas informações como resolução da imagem, número total de cores, tamanho do arquivo, etc.
- b) **Mapa de bits ("Bitmaps"):** é a representação binária da cor ou tom de cinza de cada pixel.

Atualmente existem diferentes formatos para os arquivos de imagens digitais e os principais são indicados a seguir:

- a) **BMP ("Bitmaps" - Mapa de Bits)** - tipo de arquivo utilizado pelo sistema operacional Windows, armazena os dados em mapas de bits, de forma independente do equipamento de saída e pode operar com 16 milhões de cores.

- b) PCX ("PC Paintbrush")- da Zoft Corporation - a visualização da imagem depende do equipamento de saída. Possui compressão de imagens.
- c) TIFF ("Tagged Image File Format" - criado para ser utilizado como intercâmbio de imagens entre diversos programas e equipamentos, possui compressão e trabalha com 16 milhões de cores.
- d) JPEG ("Joint Photographic Experts Group" - é independente do equipamento de saída, trabalha com 16 milhões de cores e possui sistema de compressão destrutivo de informações. Muito utilizado em Internet.
- e) GIF ("Graphics Interchange Formaf" - criado e utilizado pela CompuServe, pode acomodar mais do que uma imagem por arquivo; é independente do equipamento de saída e não possui compressão; muito utilizado em Internet.

Na metodologia pesquisada é importante o conhecimento do formato dos arquivos gerados no processo de captação das imagens, para se ter uma melhor compreensão das possíveis distorções que possam ocorrer.

5.5 Captação de Imagens Digitais

As imagens digitais utilizadas na fotogrametria são captadas através de:

- a) câmaras digitais;
- b) imageadores ou numerizadores ("scanners");
- c) sensores espaciais (satélites).

Tanto os scanners como as câmaras digitais possuem o mesmo tipo de dispositivo, o CCD (Charge Coupled Devices), que são constituídos por um arranjo de diodos fotosensíveis.

A principal diferença entre uma câmara digital e um scanner consiste no sistema ótico. A câmara é projetada para captar imagens em distâncias variáveis e o scanner capta as imagens situadas em distâncias fixas.

Outra diferença importante entre câmara digital e scanner é a fonte de iluminação. Na câmara fotográfica a iluminação é externa, enquanto o scanner possui um sistema de iluminação própria.

Os dispositivos CCD das câmaras digitais possuem uma resolução que ultrapassa a das câmaras de TV, porém, ainda muito aquém da resolução das câmaras fotográficas de filme.

5.6 Resolução de digitalização

No processo de digitalização através de scanner, a resolução espacial escolhida no instrumento deve assegurar que a resolução fotográfica original seja mantida ou diminuída até limites toleráveis, mas de que os arquivos digitais não apresentem problemas de armazenamento e de processamento em tempo real, resultantes de seu tamanho. A Tabela 2 mostra o tamanho dos arquivos originados por uma fotografia de formato 230 mm, rasterizada com diferentes resoluções.

Tabela 2 - Resolução e tamanho de arquivos para uma foto 230x230 mm.

Resolução		Tamanho do	Arq. Preto e	Arq. Tons de	Arq. Colorido
(dpi)	(dpmm)	Pixel	Branco 1 bit	Cinza 8 bits	RGB 24 bits
		(gm)	(Mbytes)	(Mbytes)	(Mbytes)
300	11.8	85	0.9	7.3	21.9
400	15.7	64	1.6	13.0	39.0
450	17.7	56	2.1	16.4	49.2
500	19.7	51	2.5	20.3	60.9
600	23.6	42	3.7	29.2	87.6
800	31.5	32	6.5	51.8	155.4
1200	47.2	21	15.0	120.0	360.0
2400	94.5	11	25.7	437.2	1311.6
3400	133.9	7.5	117.6	940.4	2821.2

Fonte: D. Rosalen (1997)

6 RETIFICAÇÃO DE IMAGENS

A fotografia é uma imagem resultante de uma projeção perspectiva (Figura 22b), e a planta topográfica é o resultado de uma projeção ortogonal (Figura 22a). Se o terreno fotografado for plano e horizontal, ambas as projeções produzem a mesma imagem e a fotografia pode ser confundida com uma planta (Figuras 22a e 22b). Na prática, dificilmente isto acontece, já que há diferentes altitudes entre os pontos do terreno (Figura 23).

Com o objetivo de se obterem imagens com as mesmas características geométricas das cartas, desenvolveu-se uma técnica conhecida como “retificação”.

Atualmente, existem diferentes processos para retificação de imagens: diferencial, polinomial e projetiva. Os mesmos podem ser implementados em forma analógica, analítica ou digital. Estas técnicas são tratadas por diferentes autores como por exemplo: Novak (1992), M.P. (4a.ed), M. Chueca Pazos (1982), J.Carre (1971), R. Knoepfli (1974), E.A.Paredes (1987), G.Lehmann (1975), A.Kreling (1980), P.Tavares & P.Fagundes (1991), N.Bobir et al. (1982), J.J de Seixas (1981).

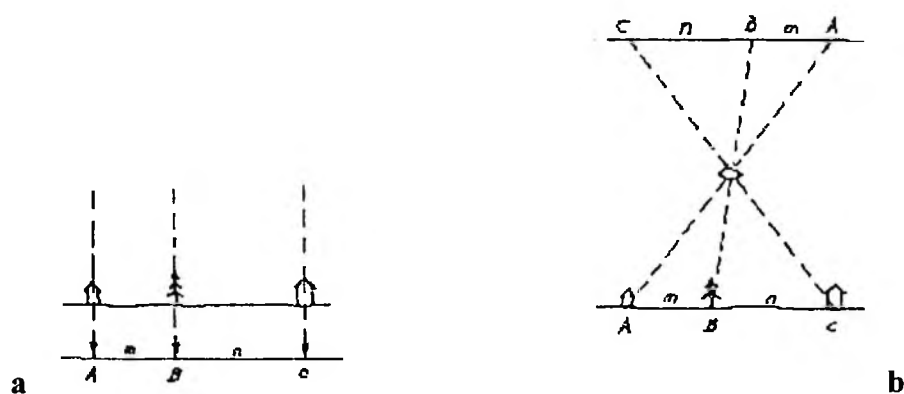


Figura 22 – Comparação entre projeção ortogonal (carta) (a) e projeção perspectiva (fotografia) (b) correspondente a uma mesma região plana e horizontal.

(Fonte: R.Knoepfli, 1974)

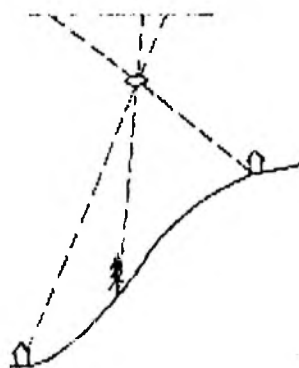


Figura 23 – Imagem perspectiva de terreno com diferentes altitudes.

(Fonte: R.Knoepfli, 1974)

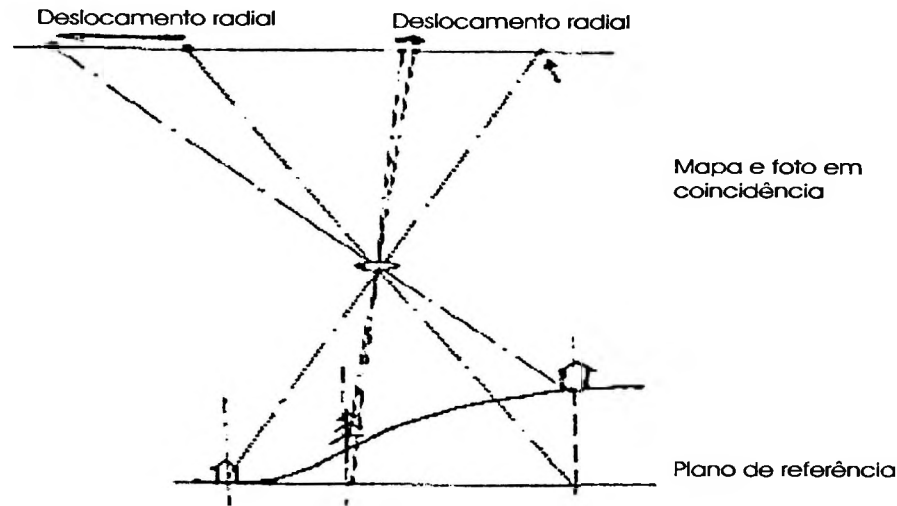


Figura 24 – Comparação entre imagens na fotografia e na projeção ortogonal.
(Fonte: R.Knoepfli, 1974)

6.1 Retificação diferencial

A retificação diferencial pode ser implementada utilizando-se instrumentos analógicos, analíticos ou digitais. Embora as metodologias instrumentais empregadas possam diferir, o fundamento conceitual da retificação diferencial é o mesmo. Nas Figuras 25 e 26, mostra-se o princípio da retificação diferencial.

A Figura 24 mostra que a diferença de altitude dos pontos do terreno e, conseqüentemente, a diferença de afastamento da câmara fotográfica, provoca diferenças de escala, e deslocamento radial das imagens dos pontos do terreno na fotografia. Se fosse possível mudar a altitude da câmara fotográfica, de forma a mantê-la paralela à superfície do terreno, todos os pontos apresentariam a mesma escala e não existiria

deslocamento provocado pela diferença de altitude. Esta idéia foi materializada no “Ortoprojeto” ou “Retificador Diferencial”, que aparece nas Figuras 25 e 26.

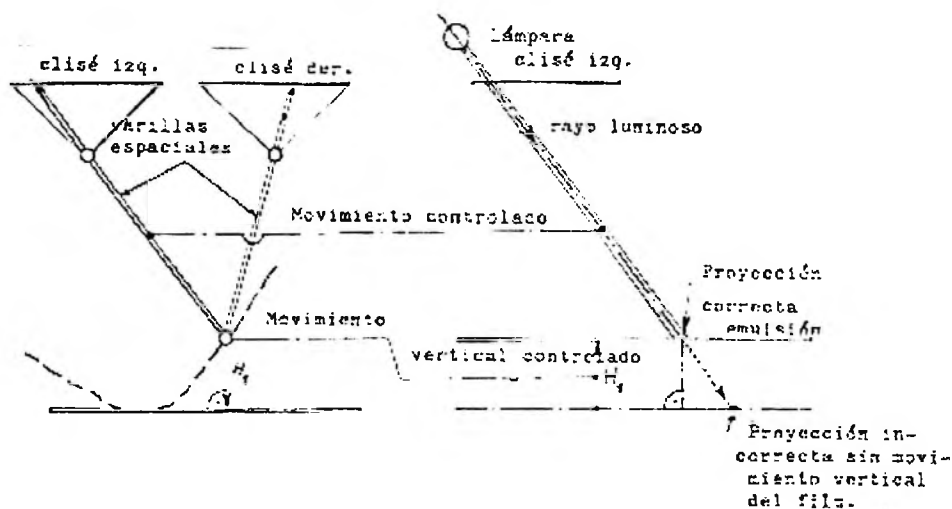


Figura 25 – Esquema de um retificador diferencial.

(Fonte: R.Knoepfli – 1974)

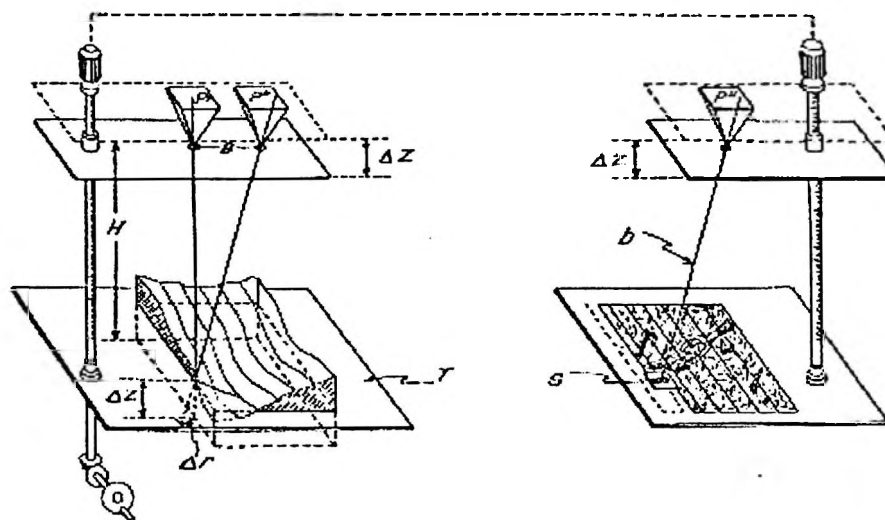


Figura 26 – Esquema do retificador diferencial Zeiss Ortho-DP1.

(Fonte: D. Marchetti – 1979)

Indicam-se, a seguir, os procedimentos utilizados no processo de retificação:

- a) No aparelho restituidor é formado o modelo estereoscópico do terreno a partir de um “par” de fotografias.
- b) O restituidor está vinculado de forma mecânica ou eletrônica a um projetor de luz, onde se instala um filme fotográfico a ser sensibilizado. Este filme será impressionado em parcelas por um feixe de luz que passa através de uma fenda muito estreita e que vai sendo deslocada pelo operador, de forma a percorrer todo o modelo estereoscópico.
- c) O retificador diferencial é construído de forma que, quando há um deslocamento no sentido vertical da “marca flutuante” no restituidor, há também um deslocamento similar no plano da emulsão fotográfica que está sendo impressionada. Este mecanismo simula o fato de manter constante a distância entre a câmara fotográfica e os pontos do terreno, resultando que a escala de todos os pontos continua sendo a mesma e evitando-se o deslocamento radial na nova imagem fotográfica criada no filme impressionado.

Este princípio básico tem sido implementado de diversas formas, com instrumentos que operam em tempo real ou em tempo diferido.

Para se obter uma ortofotografia perfeita cumprindo-se as exigências teóricas, a transformação deveria ser ponto a ponto. Para isto ser possível, a fenda deveria ser pontual e o modelo estereoscópico deveria ser percorrido de forma a obter

perfis de largura infinitesimal. Na prática, opera-se utilizando uma fenda retangular, cujas dimensões variam de 0,2 a 0,6 mm de comprimento (dimensão no sentido do deslocamento da fenda em cima da emulsão) e de 2 a 16 mm de largura (dimensão no sentido perpendicular ao deslocamento da janela). O modelo estereoscópio é percorrido em perfis paralelos, distantes entre eles a largura utilizada na fenda. O movimento para obter os perfis é efetuado automaticamente pelo instrumento e o operador deve procurar manter a marca flutuante sobre o modelo estereoscópico do terreno. Os pontos do perfil correspondem ao centro da fenda em cada uma de suas posições sucessivas.

6.2 Retificação projetiva

Previamente ao desenvolvimento da retificação diferencial, mais conhecida como ortofotografia, existia outro método de retificação, utilizado especialmente para preparar fotografias destinadas à construção de mosaicos fotográficos. Esta retificação era conhecida pelo nome de retificação projetiva, fotoretificação, retificação convencional ou endereçamento de fotos.

6.2.1 Princípio da retificação projetiva

A Figura 27 mostra o princípio de funcionamento da retificação projetiva. Nela, é considerada uma região plana e horizontal do terreno. Na tomada da fotografia, o plano do filme geralmente não é paralelo ao terreno, resultando a imagem obtida não

homotética ou semelhante ao terreno. Se a imagem negativa for projetada num plano paralelo ao terreno e existir um filme sensível à luz nesse local, obter-se-ia uma nova imagem, homotética com o terreno e a mesma poderia ser utilizada como uma carta topográfica.

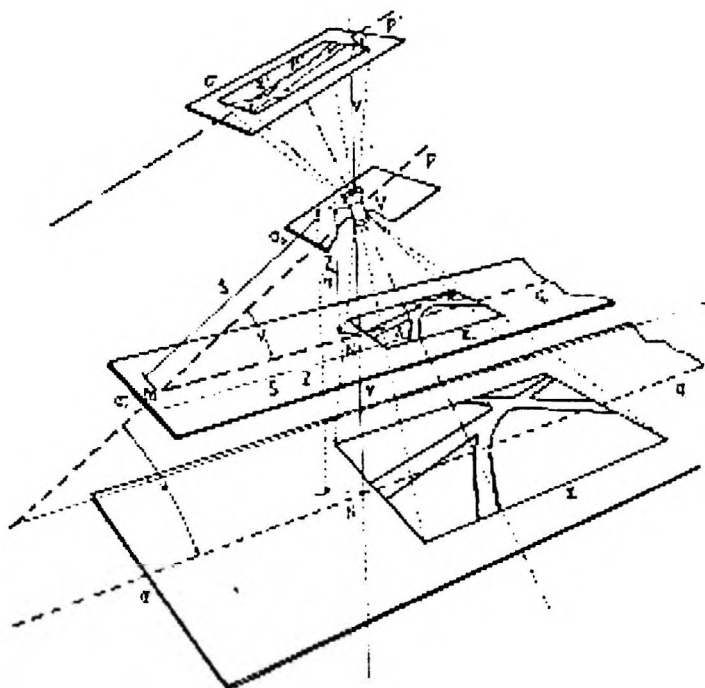


Figura 27 – Princípio da Retificação Projetiva.

(Fonte: M. Chueca Pazos, 1982).

Um projetor pode produzir uma nova imagem fotográfica retificada, sempre que for possível impor que o plano do filme e o plano de projeção formem o mesmo ângulo existente entre o terreno e o plano do filme fotográfico no momento da tomada da fotografia original.

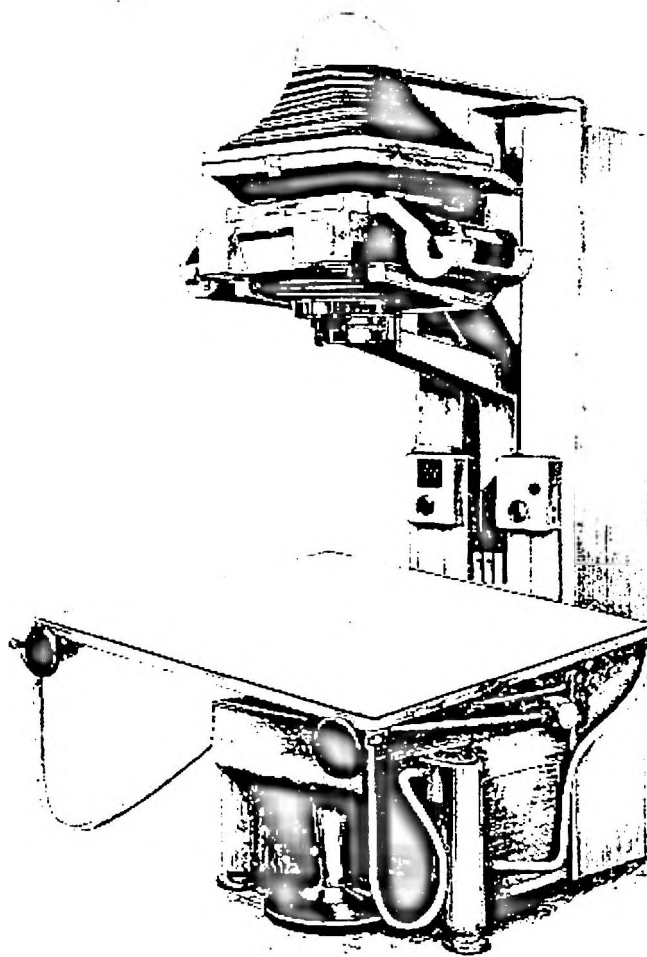


Figura 28 - Retificador convencional SEG V.

(Fonte: Seixas, 1981)

Os instrumentos retificadores conseguem implementar as condições da retificação projetiva, mediante o uso de uma série de movimentos do projetor e da mesa de projeção. Os movimentos utilizados, assim como a ordem em que eles são efetuados depende do tipo de equipamento. Geralmente consistem em: variação da distância existente entre o projetor e o plano de projeção, inclinações do plano de projeção, giro e translações do projetor. Todos estes movimentos são realizados pelo operador do

instrumento, em forma empírica e iterativa, utilizando-se como referência quatro pontos de controle, com coordenadas conhecidas na imagem retificada.

6.2.2 Retificação Projetiva Parcial

A retificação projetiva está operacionalmente limitada a terrenos quase planos. Com o objetivo de estender sua aplicação a terrenos ondulados, foi desenvolvido o método de retificação parcial (Seixas, 1981). Esse método compreende retificações parciais da fotografia original, considerando cada região como uma unidade elementar de retificação, que podem ser facetas quadrangulares ou zonas limitadas por curvas de nível.

No caso das facetas (Figura 29), a superfície do terreno é dividida em quadriláteros e neles o terreno é considerado plano. O tamanho dos quadriláteros é definido em função da declividade do terreno, pelo operador. Regiões mais onduladas terão facetas menores, regiões mais planas facetas maiores, chegando a faceta, em algum caso, a abranger toda a fotografia. As altitudes dos vértices das facetas devem ser conhecidas. Este método foi empregado pela Organização Cadastral Francesa entre os anos 1946-1960 e, neste caso, as altitudes eram determinadas pelo nivelamento barométrico.

No método das zonas (Seixas, 1981) (Figura 30), antes de se proceder à retificação, traçam-se as curvas de nível num restituidor. As zonas ficam limitadas pelas curvas de nível sucessivas. Em cada uma das zonas escolhem-se, pelo menos, quatro pontos de controle com coordenadas conhecidas, que servem para orientar o aparelho retificador. A retificação do filme efetua-se por zonas, recobrimo-se as demais Na ortofotografia também são utilizadas facetas, só que, neste caso, são horizontais e diferenciais (Figura 31).

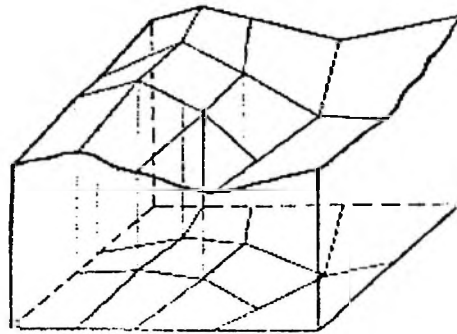


Figura 29 – Retificação Projetiva Parcial por facetas.

(Fonte: G. Lehmann, 1975)

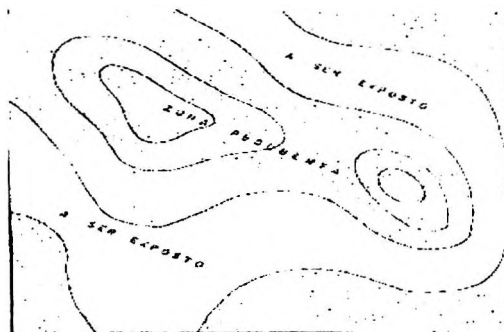


Figura 30 – Retificação Projetiva Parcial por zonas.

(Fonte: Seixas, 1981)

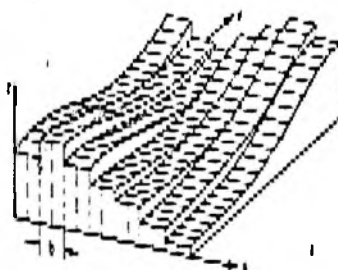


Figura 31 – Retificação por facetas horizontais.

Método utilizado na ortofotografia.

(Fonte: G. Lehmann, 1975)

6.2.3 Mosaico Aéreo

Associado às fotografias retificadas, existe um produto fotogramétrico conhecido pelo nome de mosaico aéreo ou simplesmente mosaico.

O mosaico aéreo está constituído por uma montagem de fotografias aéreas com as margens recortadas seletivamente e adaptadas às fotografias adjacentes para a finalidade de se obter uma representação contínua de uma parte da superfície da Terra (C. de Oliveira, 1987).

6.2.3.1 Uso dos mosaicos

Os mosaicos tem muitas aplicações como substitutivos dos mapas ou cartas, especialmente em atividades que exigem uma grande quantidade de informações espaciais de tipo qualitativo e com exigências da exatidão quantitativa menor. A seguir, são indicadas algumas aplicações dos mosaicos: cadastro imobiliário urbano e rural, planejamento agrícola, inventário florestal, estudo de impacto ambiental, pesquisas de geografia humana e social, estudos geomorfológicos e geológicos, subsídios para anteprojetos de engenharia civil, planejamento municipal e regional, etc.

6.2.3.2. Espécies de Mosaicos

Os mosaicos são de diferentes tipos, dependendo das exigências técnicas do usuário e dos recursos econômicos disponíveis. Basicamente, pode falar-se em: a) mosaicos não controlados, b) mosaicos controlados e c) fotocartas.

a) Os mosaicos não controlados são confeccionados sem pontos de apoio ou controle; a escala é dada pela relação entre a distância focal e a altura média de vôo. A ligação entre as fotografias é feita pela combinação dos detalhes comuns das margens das fotografias contíguas. Estes mosaicos apresentam diferenças de escala, assim como deslocamento planimétrico dos objetos, conseqüência do relevo do terreno e da diferença de altitude do avião nas diferentes tomadas fotográficas. A aparência dos mosaicos não controlados e a distribuição das deformações neles existentes, dependem muito da habilidade do técnico encarregado de sua confecção. Nami & Slepety (1953) indicam ter encontrado nos Estados Unidos, mosaicos não controlados com diferenças planimétricas de até 2 cm na ligação dos detalhes.

b) Os mosaicos controlados também são confeccionados superpondo fotografias recortadas, mas, neste caso, são previamente retificadas pelo método projetivo.

c) As fotocartas são mosaicos controlados, nos quais foram incorporados sistemas de coordenadas geográficas, plano-retangulares ou ambos. Nas fotocartas são realçados

detalhes topográficos como: rios, lagos, estradas de ferro e de rodagem, linhas transmissoras e telefônicas, casas e construções em geral, etc. Também indica-se a escala, os pontos cardeais e a toponímia. A exatidão métrica em regiões pouco onduladas é comparável a das cartas topográficas na mesma escala (Nami & Slepetyts, 1953).

6.3 Retificação diferencial

No ano de 1979, Keating apresentou o primeiro sistema de geração de imagens com retificação diferencial ou ortofotos, substituindo o sistema de lentes e prismas por sensores eletrônicos. Estes sensores digitalizam pequenas partes da fotografia original e, após processamento desta informação, é confeccionada a ortofotografia digital.

A partir deste trabalho inicial diversos pesquisadores desenvolveram a tecnologia utilizada atualmente, que se expõem, a seguir, em seus princípios básicos.

6.3.1 Processo para a obtenção de ortofotos digitais

A produção de ortofotos digitais normalmente efetua-se através das seguintes etapas:

a) Digitalização das fotos aéreas

Na primeira etapa, as fotografias são rasterizadas com scanners especiais. Estes scanners geram imagens com pixels de 25 μm de lado ou menor, e conseguem fazer leitura da imagem com até 400.000 pixels por segundo. Com estes instrumentos, digitalizar uma fotografia aérea de formato 230 mm, demora aproximadamente 20 minutos.

b) Orientação

Os softwares de retificação digital existentes no mercado exigem o conhecimento dos parâmetros correspondentes à orientação interior da câmara fotográfica (ponto principal, distância focal, distorção radial) e parâmetros correspondentes à orientação externa ($\phi, \kappa, \omega, X_o, Y_o, Z_o$).

Com este propósito, cada fotografia possui pontos de controle com coordenadas topográficas conhecidas.

c) Preparação do modelo digital do terreno (DTM)

Para construir as ortofotos é preciso contar com um modelo digital do terreno (DTM) da região em questão. O DTM é um modelo matemático representativo do terreno, onde o mesmo foi substituído por uma superfície poliédrica de faces planas,

semelhante ao indicado na Figura 30. Neste caso, a base dos prismas tem forma regular e o valor do lado não atinge 1 mm.

A cada pixel da imagem corresponde uma micro-faceta do terreno. O pixel da nova imagem é modificado em posição, escala e cor, em função da forma do DTM na região, construindo-se, desta forma, a ortofotografia. Conseqüentemente, erro na altitude ou cota dos pontos do DTM, provoca erros na ortofoto. Na prática, verifica-se o erro máximo da planimetria nas esquinas do modelo, chegando a ser da mesma ordem de grandeza do erro em elevação. O grau de exatidão do modelo, portanto, vai definir a exatidão da ortofoto (Hohle, 1996).

d) Transformação geométrica

Para se obter a ortofoto, deve-se determinar a cor ou o tom de cinza de cada pixel da nova imagem, a partir da imagem original. As coordenadas (x, y, z) , dos pontos do DTM, aplicadas às equações de colinearidade (2.15) permitem calcular as coordenadas do pixel correspondente (ortofoto), segundo indica Novak (1992). O tom de cinza ou de cor de cada pixel é calculado por interpolação dos tons dos pixels adjacentes. Esta metodologia é chamada de “reamostragem por interpolação” e são utilizados diferentes modelos matemáticos, com este objetivo, como por exemplo: “vizinho mais próximo”, “interpolador bilinear”, “convolução cúbica”, etc.

Dependendo de sua complexidade, resultará o tamanho da memória do computador e do tempo de processamento exigido pela retificação efetuada.

III PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

1 PROCESSO CRONOLÓGICO DO DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA E DO USO DOS DIFERENTES EQUIPAMENTOS

No desenvolvimento da pesquisa foram utilizadas diferentes metodologias para o imageamento e para a obtenção das coordenadas dos pontos de apoio. Também foram usadas diversas câmaras fotográficas e recursos computacionais, tanto software como hardware, assim como diferentes modelos matemáticos de cálculo. Todos estes recursos foram intercalando-se e mudando ao longo do tempo como resultado da evolução tecnológica durante o período de desenvolvimento do trabalho, especialmente os de tipo computacional, e também, como consequência dos aprimoramentos e das mudanças necessárias no processo da pesquisa, efetuadas com o propósito de atingir os objetivos definidos na proposta da tese: desenvolver uma metodologia de atualização cartográfica tecnicamente aceitável dentro da exatidão esperada, operacionalmente viável e financeiramente não muito onerosa.

1.1 Fase um: avaliação de modelos matemáticos

Na etapa inicial da pesquisa pensou-se em atualizar a Cartografia através da restituição fotogramétrica estereoscópica implementada em forma analítica, através do método de intersecção de raios homólogos, sobre fotografias digitalizadas, obtidas por câmaras convencionais.

Com este objetivo foram desenvolvidos softwares em linguagens PASCAL 4.0, a partir dos seguintes modelos matemáticos: equações de colinearidade (2.15), equações de projetividade (2.16) e transformação linear direta (DLT) (Karara, 1974).

A operacionalidade dos programas de computador foi testada com um modelo simulado do terreno. Em etapa posterior, foram efetuados testes sobre imagens reais. Com este objetivo, e para simplificar as operações, foram tomadas fotografias terrestres do vitrô do pátio da Faculdade de Geografia da USP, em São Paulo. Foi escolhido este campo de testes, porque o vitrô, por sua estrutura em retângulos, permitia de forma simples, o cálculo de coordenadas e era de fácil acesso. Nesta oportunidade, foi utilizada uma câmara fotográfica marca Zenith, do tipo reflex, com distância focal de 58mm. Os cálculos foram efetuados num computador PC 486 e as fotografias rasterizadas num scanner com resolução espacial ótica de 600 dpi.

Avaliando-se os erros obtidos percebeu-se o comportamento dos diferentes modelos matemáticos: a) na transformação linear direta, verificou-se o indicado por Karara (1974): um considerável aumento do erro nos pontos da região externa ao polígono definido pelos pontos de apoio; b) no modelo das equações de colinearidade,

constatou-se uma sensibilidade muito alta com relação aos erros de medida nas coordenadas fotográficas dos pontos de apoio, provocando erros muito significativos no cálculo das coordenadas topográficas dos pontos incógnitos; c) por último, os erros foram bem menores quando utilizou-se o modelo das equações de projetividade.

O modelo DLT logo foi descartado, em razão dos resultados obtidos.

O modelo das equações de colinearidade é utilizado normalmente na fotogrametria analítica convencional. A pouca acuracidade apresentada nos testes efetuados, nesta pesquisa, pode ter a seguinte explicação: os raios de luz estão representados analiticamente pelas equações de colinearidade, e sua orientação espacial fica definida por 3 ângulos κ , ω , ϕ . A exatidão no conhecimento destes ângulos depende da acuracidade na medida das coordenadas fotográficas dos pontos de apoio. Se o erro destas medidas for grande, também o erro nos ângulos será significativo e, conseqüentemente, o desvio na orientação dos raios será considerável, resultando que raios homólogos, provenientes de ambas as fotos do par estereoscópico não se cortarão, ou, se o fizerem, será num local muito afastado do correto, resultando que as coordenadas calculadas do ponto de intersecção apresentarão um erro importante.

No caso da fotogrametria convencional, as coordenadas medidas na fotografia possuem acuracidade em nível de microns (μm), já que os instrumentos restituidores e monocomparados utilizados estão dotados de sofisticados componentes óticos e eletromecânicos, capazes de efetuar medições muito finas. O cálculo posterior da orientação espacial resulta muito mais acurado, e as coordenadas topográficas terão um erro bem menor.

Na metodologia testada neste trabalho, o instrumento utilizado para selecionar os pontos, consta da combinação formada pela vista do operador, o fator “zoom” do software utilizado e o “mouse” do computador. Nestas condições, constatou-se por vários testes efetuados, que a incerteza na medida das coordenadas fotográficas é de aproximadamente 1,5 pixel. Com este nível de erro, o movimento relativo dos raios homólogos é muito significativo, resultando sua intersecção num local muito afastado do correto, gerando um erro muito significativo no cálculo das coordenadas.

Visto que o modelo das equações de colinearidade também resultava impróprio para o projeto, adaptou-se, finalmente, o modelo das equações de projetividade, por ter mostrado menor erro.

O fato de adotar o modelo das equações de projetividade supõe abandonar a tridimensionalidade e o efeito estereoscópico, já que este modelo aplica-se a superfícies planas correspondentes numa projetividade.

Após estas conclusões, a pesquisa continuou objetivando a restituição monoscópica. Este fato foi algo desalentador na época pela perda da estereoscopia, mas, posteriormente, verificou-se em trabalhos de outros autores, Paredes (1998), por exemplo, na viabilidade deste tipo de restituição.

1.2 Fase dois: escolha do meio de apresentação

A pesquisa objetiva desenvolver uma metodologia de levantamento e de atualização cartográfica, os resultados numéricos e/ou gráficos decorrentes da mesma,

precisam ser apresentados em alguma mídia. As diferentes alternativas de apresentação cogitadas foram: a) mapa de linha em formato digital ou impresso em papel, b) imagem digital obtida a partir da fotografia original, após retificação, c) imagem digital original com correção das coordenadas topográficas dos pontos nela existentes, através do processo de retificação escolhido.

Na segunda fase do projeto, foram analisadas as diferentes alternativas indicadas.

- A produção de um mapa de linha, na forma digital ou na tradicional em papel, exige que as cartas a serem atualizadas sejam previamente digitalizadas. A digitalização pode ser efetuada em mesa digitalizadora ou através da tela do monitor de vídeo do computador, após serem rasterizadas. Em ambos os casos, a metodologia é demorada e os softwares utilizados exigem um treinamento prolongado por parte dos operadores, resultando esta alternativa bastante custosa e demorada. Esta opção não pareceu ser coerente com a filosofia do projeto, que pressupõe custos baixos e, por tal razão, foi descartada.

- Passou-se a estudar a elaboração de imagens digitais retificadas, uma versão mais econômica das “ortofotos digitais”. Esta alternativa não exclui a anterior, já que, como subproduto das imagens retificadas, podem ser construídos mapas de linha, ou podem ser atualizados os bancos de dados dos sistemas de informações geográficas. As imagens retificadas apresentam a vantagem de serem de fácil uso pelo usuário. Um

software de visualização de imagens relativamente simples, como o Paint Brush incluído no Microsoft Windows permitiria visualizar as imagens. Assim mesmo, seria preciso desenvolver um software específico para efetuar medidas sobre a imagem, ou utilizar softwares existentes no mercado que permitem realizar medidas utilizando imagens raster de fundo. Por outro lado, as imagens retificadas apresentam uma quantidade de informação qualitativa oriunda das fotografias, que os mapas de linha não possuem e que são muito importantes aos fins interpretativos. Considerando as vantagens das imagens retificadas em relação aos mapas de linha, as primeiras foram escolhidas, como produto resultante da metodologia pesquisada.

Feita a escolha do produto final, passou-se a efetuar uma revisão bibliográfica, referente às metodologias de retificação de imagens. Um resumo desta pesquisa aparece no item 6 do capítulo II deste trabalho.

A retificação diferencial conhecida como ortofotografia digital, resultou inviável para as condições estabelecidas no projeto, ao requerer o uso de instrumentos sofisticados e de alto custo como: câmaras fotográficas métricas ou semi-métricas (com reseau) para a obtenção das imagens, scanners de altíssima resolução para digitalizá-las, monocomparadores ou restituidores fotogramétricos para efetuar as medições dos pontos nas fotografias, softwares especiais destinados a construir os modelos digitais de terreno (DTM), etc. Por outro lado, o manuseio das ortofotografias digitais por parte do usuário é complexo, já que as mesmas exigem um hardware especial, no referente à velocidade de

processamento, ao tamanho da memória RAM e aos meios de armazenamento permanente das imagens.

Frente à inviabilidade do uso da ortofotografia, dadas as limitações estabelecidas no projeto, passou-se a analisar a retificação projetiva (6.2). Este tipo de retificação, conhecido como “endereçoamento das fotos”, efetua-se, normalmente, por um processo ótico-mecânico, utilizando-se um instrumento chamado “retificador convencional” (Figura 28). Com este instrumento, cria-se uma nova imagem fotográfica, resultante da projeção da fotografia original sobre um filme fotográfico. O plano de projeção pode ser movimentado através de rotações e translações. Desta forma, procura-se imitar a posição relativa existente entre o terreno e o plano do filme no momento da tomada da fotografia. Este fato permite produzir uma nova imagem, simulando o posicionamento da câmara fotográfica paralelo ao terreno, eliminando-se, desta forma, os erros provocados pela inclinação relativa entre ambos planos.

Após ter-se resolvido utilizar a retificação projetiva, foi preciso desenvolver uma metodologia para substituir o retificador mecânico convencional (Figura 28), pelo conjunto: computador, scanner e software específico para efetuar a retificação.

1.3 Fase três: retificação projetiva

O processo metodológico para se chegar à retificação projetiva da fotografia digitalizada, assim como os testes efetuados, são indicados a seguir:

- No começo do processo, foram tomadas as fotografias a serem retificadas. Estas imagens foram de dois tipos: fotografias terrestres tomadas com câmara reflex, marca Zenith, de 58mm de distância focal e com câmara Nikon F-45, de 50mm de focal, e fotografias aéreas obtidas com os mesmos instrumentos, previamente instalados num avião, preparado para tal fim, com a abertura de uma janela na sua parte inferior e com a instalação de um sistema de nivelamento, objetivando tomar as fotografias, quase verticais. A revelação das mesmas efetuou-se em laboratório comercial, através do processo habitual de revelação automática em máquina reveladora de produção em forma contínua.

- As cópias fotográficas em papel foram digitalizadas em Scanner de tipo comercial, com resolução ótica de 600 dpi. Na etapa posterior, estas imagens deveriam ser retificadas.

- Para efetuar a retificação desenvolveu-se um software específico, em linguagem C, destinado a funcionar em plataforma computacional 486, operando com sistema operacional DOS. O referido software efetua a retificação das fotografias, fundamentando-se nas equações de projetividade (2.16). Para a obtenção das cores dos pixels da nova imagem, utiliza-se o modelo matemático chamado de “vizinho mais próximo”.

Os testes efetuados mostraram-se alentadores. O erros constatados situavam-se dentro dos valores esperados, verificando-se a acurácia procurada. Embora os resultados fossem interessantes, a metodologia apresentou alguns problemas, o que levou à sua substituição por outra, em etapa posterior.

Estes problemas são indicados a seguir:

- I) A implementação de uma estrutura especial na aeronave, destinada à tomada de fotografias quase verticais encarece e dificulta a metodologia. O suporte da câmara não deve alterar a aerodinâmica do avião e os órgãos encarregados da segurança aérea são muito rigorosos nesse sentido. Este fato limita em muito os tipos de aeronaves que poderiam ser utilizadas nos vôos fotográficos, contradizendo os princípios norteadores do projeto: simplicidade operacional e baixo custo. Por outro lado, os testes efetuados utilizando-se fotografias terrestres, apresentando acentuada inclinação entre o plano objeto e o plano da fotografia, mostraram que o modelo matemático das equações de projetividade, era também eficiente nesta situação. Esta constatação levou a se pensar em desenvolver uma metodologia de forma a utilizar fotografias oblíquas, obtidas desde a janela do avião, retirado previamente o vidro para evitar deformações da imagem. Com este objetivo, efetuou-se uma revisão bibliográfica referente à geometria da fotografia inclinada (2.3), que é mais complexa que a da imagem vertical.

II) Outro problema observado, foi o referente à condição exigida no modelo matemático de projetividade. Neste modelo, as duas superfícies vinculadas na projeção (filme e terreno) devem ser planas. O filme pode considerar-se plano, mas o terreno não pode ser considerado plano na maioria dos casos. Este problema já tinha sido tratado e resolvido no sistema de retificação projetiva parcial por facetas (Figura 29). Resolveu-se usar o mesmo critério neste projeto. Desta forma, se conseguiria diminuir o erro provocado pelo efeito do relevo do terreno. A superfície topográfica da Terra ficaria representada por uma superfície poliédrica multifacetada. Este procedimento resolvia um problema, mas criava outro: a fotografia retificada estaria constituída por um mosaico formado pelas imagens das diferentes facetas, e deveria ser utilizado um software para juntar as imagens das diversas facetas, processo conhecido como “mosaicamento” das imagens. O uso de um programa de mosaicamento existente no mercado, evitaria a necessidade de desenvolver um software específico, embora poderia apresentar problema de comunicação com o programa de retificação.

Considerados estes fatores, descartou-se a retificação real da fotografia e pensou-se em utilizar uma metodologia que foi denominada, neste trabalho, de retificação projetiva virtual. O princípio matemático do método continua sendo o mesmo da retificação projetiva parcial por facetas. A diferença consiste em que a imagem apresentada no monitor do computador tem as mesmas dimensões da imagem original, mas as coordenadas terrestres dos pontos dela, correspondem à posição

retificada. Em outras palavras, a retificação efetua-se numa forma estritamente numérica e não gráfica e, por este motivo, foi chamada de retificação virtual.

1.4 Fase quatro: Análise de outros recursos de imageamento

Paralelamente ao desenvolvimento da metodologia indicada pesquisaram-se outros recursos de imageamento existentes no mercado e que poderiam ser incluídos no projeto.

O primeiro dos recursos pesquisados foi a câmara digital. Obtiveram-se fotografias com duas câmaras digitais diferentes, uma delas provida de um sistema para simular fotografias do tipo infravermelho. As imagens foram processadas pelo software desenvolvido no projeto. Os erros constatados foram significativamente maiores que os oriundos de fotografias de filme, digitalizadas. Estima-se que este fato se deva à menor resolução espacial das imagens digitais em relação ao filme, provocando um erro maior nos pontos de apoio. Efetuaram-se consultas a empresas de fotogrametria sobre o uso de câmaras digitais, constatando-se que as mesmas continuam utilizando fotografias obtidas com câmaras de filme, posteriormente digitalizadas em scanners de alta resolução, quando as fotografias destinam-se à fotogrametria digital. Isto se deve à baixa resolução geométrica das câmaras digitais, comparadas com o filme fotográfico.

A segunda questão analisada foi o possível emprego da fotografia de formato 230 mm, utilizada na fotogrametria tradicional. Com este objetivo, foram efetuados testes do uso do software de retificação virtual em fotografias 230 mm. As coordenadas dos

pontos de apoio foram obtidas de cartas topográficas, procurando-se manter a coerência entre as escalas da fotografia e do mapa e entre os níveis de precisão de ambas. Os resultados obtidos ficaram dentro da acurácia procurada. O uso deste tipo de fotografia justifica-se só no caso de as mesmas existirem. Caso contrário, resultaria muito dispendioso efetuar um recobrimento aerofotogramétrico para posteriormente produzir fotomapas através da metodologia proposta, o que não seria coerente com a filosofia do projeto.

Deve-se observar, também, que geralmente este tipo de fotografias não é colorido, dificultando os trabalhos de fotointerpretação.

A terceira alternativa estudada foi o uso de imagens de vídeo, tecnologia conhecida como videografia. Com este propósito, efetuou-se um vôo, filmando-se uma região do Campus da ESALQ-USP em Piracicaba-SP. Também efetuaram-se testes usando fitas de vídeo já existentes, produzidas por profissionais especializados neste tipo de filmagem. Observou-se que a filmagem resulta difícil dentro do avião, devido à dificuldade de orientação da filmadora para o alvo procurado. Outros inconvenientes encontrados foram: a necessidade de transformação da imagem que, na fita, está em formato analógico, para formato digital, e desta forma poder processá-la em computador, a baixa qualidade ótica da imagem de vídeo e a necessidade de possuir um hardware e software apropriados para efetuar a transformação entre os formatos analógico e digital.

A última alternativa considerada foi o uso da imagem de satélite. Estas imagens são comercializadas de duas formas diferentes: digital e impressa. As imagens impressas devem ser previamente rasterizadas para seu uso com o software desenvolvido,

e as digitais devem estar em formato compatível. O maior inconveniente das imagens de satélite é a baixa resolução espacial que apresentam, que, em geral, não é menor que uma dezena de metros.

Uma alternativa promissora é o uso de imagens de satélite de alta resolução (pixel de 1m), especialmente se as mesmas forem comercializadas pela Internet, como está projetado.

1.5 Fase cinco: desenvolvimento de software básico e complementar

Como foi indicado anteriormente, nesta pesquisa, escolheu-se a “retificação projetiva virtual” e o modelo matemático das “equações projetivas”, para a obtenção das coordenadas topográficas dos elementos existentes nas fotografias aéreas digitalizadas. O formato das fotografias adotado como padrão é o de 35mm, e as mesmas são tomadas desde a janela da aeronave.

A implementação destes procedimentos levou ao desenvolvimento de dois softwares que foram chamados: software básico e software complementar.

O software básico objetivava efetuar a retificação virtual dos pontos da imagem, utilizando o modelo matemático das equações projetivas, aplicado às facetas escolhidas nas fotografias. Este programa foi desenvolvido originalmente em linguagem Pascal 4.0 e foi devidamente testado. Posteriormente, foi codificado em linguagem Visual Basic 5.0, para poder utilizar os recursos do sistema operacional Windows. A linguagem Pascal, utilizada originalmente, opera em sistema operacional DOS. O software

desenvolvido proporciona as coordenadas topográficas dos pontos escolhidos na fotografia rasterizada. A implementação deste software encerrava o propósito da pesquisa, já que, através dele, era possível concretizar o objetivo do trabalho: desenvolver uma metodologia de fácil operacionalidade, de baixo custo e com uma acuracidade aceitável, destinada a atualizar a cartografia existente.

Mesmo assim, pensou-se em desenvolver um software complementar ao primeiro, destinado a manipular informações geo-referenciadas, preenchendo, desta forma, as necessidades de usuários leigos em geoprocessamento.

Este software complementar foi desenvolvido a partir do anterior, também em linguagem Visual Basic 5.0, destinado a operar em plataforma 486 ou Pentium, e operando sobre sistema operacional Windows 95 ou superior.

O referido software está formado por módulos, os quais apresentam as seguintes características:

- a) Existência de recursos de cálculo para obtenção das coordenadas topográficas dos pontos da imagem. Em outros termos, este processo pode ser denominado de “retificação virtual da imagem”.
- b) Existência de recursos de cálculo para a determinação de distâncias, ângulos, áreas e para projetar divisões de áreas nas imagens retificadas virtualmente.

- c) Possibilidade de visualização de diferentes tipos de imagens, desde fotografias aéreas convencionais até plantas topográficas, passando por fotografias de pequeno formato (verticais e oblíquas) e imagens de satélite, todas elas previamente rasterizadas.

- d) Possibilidade de comunicação com outros softwares de uso generalizado como o Paintbrush, para permitir o uso, por parte do usuário, de ferramentas de desenho sobre as imagens, ou como o editor de textos Word, a planilha eletrônica Excel ou o Gerenciador de Banco de Dados Access possibilitando, desta forma, relacionar bases de dados, planilhas e documentos de texto, às imagens apresentadas.

- e) Possibilidade de apresentação de imagens, em formato raster, resultantes de Sistemas de Informações Geográficas de alta performance, de sistemas CAD ou de outros softwares específicos para atividades como topografia, modelagem digital do terreno, etc.

IV RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISE DOS ERROS

1 ESTUDO DOS ERROS NA FOTOGRAFIA COM RETIFICAÇÃO VIRTUAL

O produto resultante da metodologia utilizada neste trabalho, consiste da imagem original, retificada em forma virtual, através do modelo matemático das equações de projetividade podendo ser complementada com informações alfanuméricas, apresentando um aspecto similar a uma carta topográfica. Por apresentar características semelhantes a um mapa, este produto foi denominado no trabalho de "fotomapa digital". A partir dele, também poderão ser elaborados outros produtos, como por exemplo, um "mapa de linha".

A seguir, são analisados os erros prováveis na retificação virtual e no fotomapa digital.

1.1 Tipos de erros de medida

Uma parte das ciências físico-matemáticas chamada "teoria dos erros", encarrega-se de estudar a natureza dos erros de medida e sua forma de propagação. Nesta teoria, os erros se classificam em três tipos: acidentais, sistemáticos e grosseiros.

1.1.1 Erros acidentais

Os erros acidentais resultam das variações aleatórias no resultado da medição, devido a fatores que não podem ser controlados no processo de medida.

Este tipo de erro se caracteriza por apresentar uma distribuição estatística chamada "distribuição normal". Na ausência de erro sistemático e conforme o número de medições aumentar indefinidamente ($\ell \rightarrow \infty$), o valor médio (ℓ_m) aproxima-se do valor verdadeiro da grandeza em questão. Na estatística, mostra-se que a média (ℓ_m) (fórmula 4.1.) de um conjunto de medidas apresenta maior probabilidade de coincidir com o verdadeiro valor da grandeza em questão, que qualquer uma das medidas isoladas, adotando-se como melhor valor para expressar a medida de uma magnitude. O desvio padrão (4.2.) indica, em termos de probabilidade, o grau de incerteza da média com relação ao verdadeiro valor.

$$\ell_m = \frac{\ell_1 + \ell_2 + \dots + \ell_n}{n} \quad (4.1.)$$

ℓ_m = média

ℓ_i = medida de
grandeza em questão

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{\sum v_i^2}{n(n-1)}} \quad (4.2.)$$

n = n° de medições

σ_m = desvio padrão da média

v_i = $\ell_m - \ell_i$

1.1.2 Erros sistemáticos

Os erros sistemáticos caracterizam-se por serem modelados através de uma lei físico-matemática definida e não apresentar um efeito aleatório. Após modelado, o erro sistemático pode ser corrigido, diferentemente dos erros acidentais, que só podem ser homogeneamente distribuídos ou ajustados. Os erros sistemáticos são provocados por fenômenos como a incorreta calibração dos instrumentos, efeitos do ambiente como temperatura, pressão atmosférica, umidade, limitações no poder de observação do operador, modelagem matemática incorreta do fenômeno estudado, etc.

1.1.3 Erros grosseiros

Os erros grosseiros são enganos que ocorrem na medição ou nos cálculos. Quando existir suspeita de erro grosseiro em leitura de instrumento, a mesma deve ser repetida ou eliminada do conjunto dos dados. Para se evitar erros grosseiros, deve-se repetir as medições e conferir cuidadosamente os cálculos.

2 TIPOS DE ERROS OBSERVADOS NA METODOLOGIA PROPOSTA

2.1. Erro sistemático em deslocamento dos pontos da imagem, provocado pelo relevo do terreno

O afastamento dos objetos em relação ao plano de referência, provoca deslocamento na posição da imagem dos referidos pontos na fotografia, em relação à posição teórica dos mesmos numa planta topográfica (Figura 24). No presente caso, a superfície de referência está representada pela face substitutiva do terreno e, como o terreno geralmente não é plano, a face substitutiva passa a ser plano médio da região. Conseqüentemente, existirá um erro sistemático provocado pelo afastamento existente entre terreno e faceta. Quanto menor for o afastamento entre ambas as superfícies, menor será o erro. A escolha das facetas com menor erro e economicamente viáveis, dependerá da experiência topográfica do operador, de sua formação conceitual em teoria de erros e de seu bom senso.

2.1.1. Efeito na fotografia vertical

Segundo aparece indicado na fórmula (2.3.), o “efeito do relevo”, numa fotografia vertical é função da altura de vôo, da altura do objeto com relação ao plano de referência e da distância existente entre a imagem do ponto em questão e o ponto principal da fotografia.

Tabela 3 – Efeito provocado pelo relevo do terreno numa fotografia vertical de focal 50 mm e com escala 1/1000 na ampliação.

Altura do relevo	Erro na ampliação	Erro no terreno
5 m	2,25 mm	2,25 mm
10 m	4,5 mm	4,5 mm
20 m	9,0 mm	9,0 mm

Fonte: J. Raffo (2000).

2.1.2 Efeito na fotografia oblíqua

Quando a fotografia for oblíqua, o valor do erro indicado na fórmula (2.4.) sofre o efeito do ângulo de inclinação t , (Figura 4), diminuindo com relação à fotografia vertical na parte superior da linha isométrica (2.3.3) e aumentando na parte inferior. O cálculo destes erros pode ser obtido, aproximadamente, pelas fórmulas:

$$e_{Ri} = e_{Rv} \cdot \cos t \quad (4.3.) \text{ na parte superior da foto}$$

$$e_{Ri} = e_{Rv} / \cos t \quad (4.4.) \text{ na parte inferior da fotografia.}$$

onde:

e_{Ri} = erro de relevo em foto inclinada

e_{Rv} = erro de relevo em foto vertical

t = ângulo de inclinação

A partir das fórmulas (4.3.) e (4.4.) calculou-se uma tabela, apresentando o erro provocado pelo relevo para fotografias oblíquas com diferentes ângulos de inclinação.

Tabela 4 - Relação dos erros provocados pelo relevo, numa foto oblíqua e numa foto vertical.

Ângulo de Inclinação	Fator de erro de relevo na parte superior da fotografia(*)	Fator de erro de relevo na parte inferior da fotografia (*)
0°	1	1
3°	0,9986	1,0014
5°	0,9962	1,0038
10°	0,9848	1,0154
15°	0,9659	1,0353
20°	0,9397	1,0642
25°	0,9063	1,1034
30°	0,8660	1,1547
40°	0,7660	1,3054
45°	0,7071	1,4142
60°	0,5000	2,0000
75°	0,2588	3,8637
80°	0,1736	5,7587
85°	0,0087	11,4737

(*) Fonte: Jorge Raffo (2000).

Analisando-se a tabela anterior, pode-se observar que, com inclinação de até 25°, a diferença de erro entre a foto vertical e inclinada, não ultrapassa 10% do referido erro, mas aumenta em forma acelerada, chegando a ser 11 vezes maior para 85° de inclinação. Os fatores calculados sugerem que, na tomada das fotos, procure-se manter a câmara fotográfica entre a posição vertical e uma inclinação máxima de 45°.

2.2 Estimativa da altura de vôo com relação ao erro de relevo

Estabelecido o ângulo limite de inclinação, pode-se calcular a altura de vôo, objetivando não ultrapassar determinado valor de erro do relevo, já que ambas as grandezas estão vinculadas (fórmula 2.3.). A partir desta análise pode-se determinar o afastamento máximo admissível entre os pontos do terreno e a faceta e, conseqüentemente, o tamanho da mesma, fato este que vai influir no tempo de trabalho e nos custos. Considerando-se a situação mais desfavorável em 45° , têm-se:

$$\begin{aligned} t &= 45^\circ \\ e_{Ri} &= 1,414 e_{Rv} \end{aligned} \quad (4.5.)$$

onde:

e_{Ri} = erro de relevo em foto oblíqua

e_{Rv} = erro de relevo em foto vertical

Por outro lado, os testes efetuados neste trabalho, relativos à medição de coordenadas dos pontos escolhidos no monitor do computador, por diferentes operadores, mostraram um erro acidental ou incerteza de aproximadamente 1,5 pixel. Considerando-se este valor e a fórmula (4.5.), pode-se calcular a tolerância de erro do relevo para as condições instrumentais da pesquisa:

$$Tol.e_R : 1,414e_{Rv} \leq 1,5 \text{ pix}$$

segundo a fórmula (2.3.): $e_{RV} = rh/H \Rightarrow 1,414 \cdot \frac{rh}{H} \leq 1,5 \text{ pix}$ (4.6.)

ou em fórmula aproximada

$$h \leq 1 \text{ pix} \cdot \frac{H}{r} \quad (4.7.)$$

Considerando-se a fórmula (4.7.) são apresentadas tabelas referentes às alturas máximas ou afastamentos que podem ter os objetos com relação ao plano de referência, de forma a verificar a tolerância do erro de relevo. Efetuou-se o cálculo para duas câmaras fotográficas de distâncias focais 50 mm e 58 mm, trabalhando-se com ampliações fotográficas convencionais de tamanho 10 x 15 cm, efetuadas no comércio por máquinas de revelar e com medidas efetuadas num monitor configurado por operar com 640 x 480 pixels.

Tabela 5 - Limite do afastamento entre o objeto e o plano da face substitutiva, para não ultrapassar a tolerância de erro de relevo.

Escala Média da Ampliação	Altura de vôo (H)	Afastamento do objeto (h) da face	Escala Média da Ampliação	Altura de vôo (H)	Afastamento do objeto (h) da face
1/1000	200 m	0,86 m	1/1000	232 m	0,998 m
1/1500	300 m	1,29 m	1.1500	348 m	1,50 m
1/2000	400 m	1,72 m	1/2000	464 m	1,998 m
1/3000	600 m	2,58 m	1/3000	696 m	2,997 m
1/5000	1000 m	4,30 m	1/5000	1160 m	4,99 m
1/10000	2000 m	8,61 m	1/10000	2320 m	9,99

Câmara com focal 50 mm
Fonte: J. Raffo (2000).

Câmara com focal 58 mm
Fonte: J. Raffo (2000).

Observação: A tabela foi calculada para ponto situado em $r = 90$ mm. Pior situação que pode ocorrer numa fotografia 35 mm, de ampliação comercial.

2.2.1 Erro residual na escala provocado pelo relevo do terreno

Se o terreno fotografado for plano e o filme fotográfico paralelo ao terreno, a fotografia poderá ser utilizada como planta, não existindo deslocamento na posição dos pontos, nem mudança de escala. Se a foto for oblíqua e o terreno não plano, como sucede na maioria dos casos, a imagem deve ser retificada em forma virtual através do

modelo matemático adotado. Neste processo, aparece erro na posição dos pontos, assunto tratado no item anterior e erro na escala, assunto este a ser discutido a seguir.

Considerando-se uma fotografia obtida com câmara de focal 50 mm, tomada a 200 m de altura, uma ampliação comercial 10 x 15 cm apresentará escala 1/1000. Se esta ampliação fotográfica for digitalizada em escala real (1 x 1), um pixel do monitor (0,3875 mm) corresponderá a 0,387 m do terreno. Se a face substitutiva do modelo matemático estiver afastada 0,86 m do terreno real, a escala a ser adotada será 1/995,7, resultado da fórmula (1.2.), considerando $f = 50$ mm e $H = 200,86$ m.

Um pixel da fotografia medirá 0,3858 m no terreno, resultando um erro de:

$$0,3858 - 0,387 = -0,0012 \text{ m}$$

como consequência de adotar a escala de face e não de terreno real.

O erro acidental de leitura do operador (1,5 pixel) corresponde, no terreno, a 0,58 m, mais de 500 vezes o erro da escala, resultando que o erro de escala pode ser desconsiderado frente ao erro acidental de posicionamento no monitor.

Se a câmara fotográfica for de focal 58 mm, a altura de vôo, 232 m e o afastamento da face 0,998 m, obtém-se o mesmo resultado anterior.

Feitos os cálculos para as demais escalas indicadas na tabela, constatar-se-á que o valor do erro de escala se mantém fixo, aumentando a distância focal e/ou a altura de vôo e, conseqüentemente, pode-se modelar o terreno com faces mais afastadas e de maior tamanho, diminuindo os custos da retificação.

2.3 Erro sistemático provocado pela inclinação da fotografia

Como foi indicado em (2.3.2.), a falta de paralelismo da fotografia com o terreno provoca um deslocamento da posição dos pontos na imagem e variações da escala dos objetos. Este efeito é conhecido como erro de inclinação da fotografia. O modelo matemático das equações de projetividade (2.16.), adotado neste trabalho, efetua a correção deste efeito quando o objeto fotografado for uma superfície plana.

O referido modelo fundamenta-se na relação de projetividade que pode ser estabelecida entre dois planos. Na prática, raramente o terreno é plano, mas pode considerar-se um modelo matemático (DMT) representativo dele, constituído por uma superfície poliédrica. As diferentes faces desta superfície podem ser tão pequenas quanto for necessário (Figura 29) e seu número poderá tender ao infinito e o limite matemático deste modelo será o terreno real.

Na prática, isto não é possível, nem preciso, contanto que o erro provocado por adotar a face em substituição do terreno real não ultrapasse outros erros existentes. O pesquisador Yu Cheng (1996) analisa o erro máximo cometido nas coordenadas planimétricas (x, y) de um ponto, numa projetividade como a que está sendo tratada, quando o mesmo for considerado pertencendo a um plano, se o mesmo se encontra fora desse plano.

Yu Cheng chega à fórmula (4.8.) para calcular o erro máximo cometido nessas condições.

$$C_{\Delta(\text{MAX})} \leq \frac{1}{2.n} \quad (4.8.)$$

onde C_{Δ} é a diferença nas coordenadas do ponto real e do ponto considerado como pertencente ao plano da face e n é o resultado do quociente entre a altura de vôo e o afastamento do ponto à face representativa do terreno.

Exemplificando: se for tomada uma fotografia a 350 m de altura, com uma câmara de focal 58 mm, as ampliações comerciais de tamanho 10 x 15 cm teriam uma escala aproximada de 1/1500.

Se o terreno estiver afastado 3,50 m do plano teórico substitutivo, o valor $n = 100$, resultado de dividir 350 m por 3,50 m, e o $C_{\Delta(\text{MAX})} \leq 1/200$, indicando que o erro máximo seria menor ou igual a 1/200 ou 0,5%. Considerando um ponto num dos cantos da fotografia, o que representa a pior situação, por serem as coordenadas de imagem máximas ($u = 75$ mm e $v = 50$ mm), o valor numérico do erro analisado seria de 0,375 e 0,25 mm, respectivamente. Esses valores são menores que a resolução do monitor que, configurado para operar com 640 x 480 pixels, é de 0,387 mm.

Esta análise permite observar que o tamanho da face está determinado pela altura do vôo, pelo desnível do terreno e pela resolução do monitor do computador.

Após escolhida a face, devem ser calculados os parâmetros das equações de projetividade apresentadas em (2.4.6.2.), e para tal, efetuaram-se medições das coordenadas de pontos de apoio no terreno ou numa carta topográfica e na fotografia rasterizada. O número mínimo de pontos de apoio a serem utilizados é quatro, mas objetivando distribuir os erros de medida, neste trabalho, adotou-se um número mínimo de cinco pontos de apoio. Desta forma, são obtidas observações superabundantes (10) com relação ao número de incógnitas (8), efetuando-se um ajustamento pelo método dos

mínimos quadrados, utilizando-se a sistemática chamada "dos parâmetros", estruturada através da metodologia matricial e que aparece detalhadamente na obra do Prof. Camil Gemael (Gemael, 1984).

2.4 Critério para escolha das faces do modelo do terreno

O processo de retificação virtual desenvolvido neste trabalho fundamenta-se na substituição da superfície real do terreno por uma superfície poliédrica como a mostrada na Figura 30. Teoricamente, o tamanho de cada face pode ser arbitrariamente pequeno e o número das faces pode tender ao infinito. O limite matemático desta superfície poliédrica é a superfície real do terreno. Na prática, será usado um número limitado de faces. Fica por conta do profissional que utilizar a metodologia, a escolha das faces que melhor se ajustem ao terreno em questão, procurando uma solução de equilíbrio entre a qualidade técnica, o tempo utilizado e os custos. A seguir, são propostos alguns critérios destinados à escolha das faces da superfície poliédrica:

- a) Após obtidas as fotografias, é importante posicioná-las sobre uma planta topográfica existente, que possua curvas de nível, a fim de definir as diferentes faces.

A Tabela (5) indica os limites toleráveis de afastamento entre o terreno e a face, para diferentes escalas e distâncias focais. O afastamento indicado na tabela é perpendicular à faceta; e, como normalmente estas não são horizontais, existe uma diferença entre o comprimento do afastamento, e a distância entre curva de nível do

terreno e a reta de nível da face desenhados na planta. Este efeito pode ser observado na Figura 32 e o valor pode ser calculado com a fórmula (4.10.).

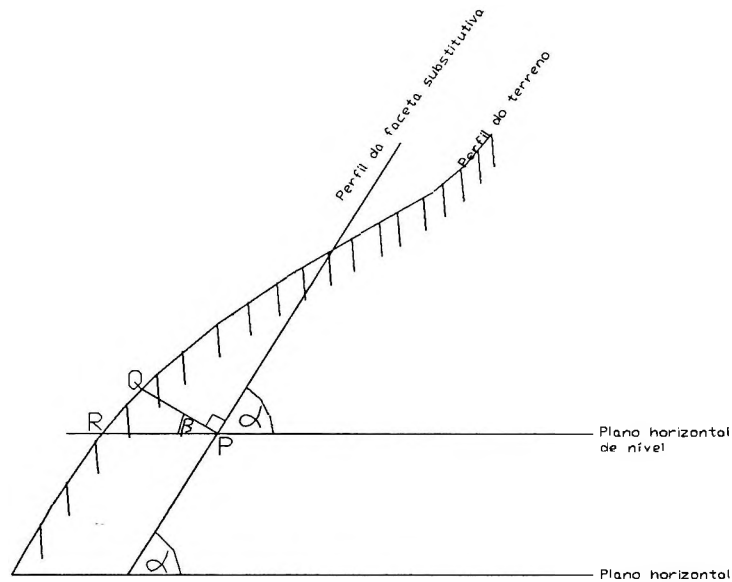


Figura 32 – Perfil do terreno e Perfil da face substitutiva.

α = ângulo de inclinação da faceta

$$\beta = 180 - (90 + \alpha) \quad (4.9.)$$

PQ = afastamento entre as superfícies do terreno e da faceta

PR = afastamento entre a curva de nível do terreno e a reta de nível da faceta

$$\cos \beta \approx \frac{QP}{RP} \Rightarrow RP \approx \frac{QP}{\cos \beta} \quad (4.10.)$$

Para o cálculo da distância máxima (RP) entre a curva de nível e a reta de nível deve-se conhecer o ângulo β e o afastamento entre ambas superfícies (QP).

O afastamento (QP) pode ser obtido da Tabela (5) e o ângulo β surge da fórmula (4.9). Nesta fórmula deve-se conhecer α , que pode ser confundido com o ângulo de declividade do terreno, substituição esta que não provoca erro significativo.

Exemplificando:

Encosta com declividade de 8%
 Escala média de amplificação fotográfica 1/1000
 Distância focal da câmara = 50 mm
 Afastamento máximo entre superfícies = 0,36 m

Para a declividade de 8%, os ângulos são: $\alpha = 4^{\circ},5739$
 $\beta = 85^{\circ},4261$

$$RP = \frac{0,86 M}{\cos (85^{\circ},4261)} \Rightarrow RP = 10,78 m$$

- Deve-se observar a diferença significativa entre ambas as medidas: QP = 0,86 m e RP = 10,78 m. Para declividades menores a diferença é maior ainda.

b) Calculada a distância entre a curva e a reta de nível, o segmento é transferido à planta e, desta forma, pode ser desenhada a face na planta e, posteriormente, escolhida na fotografia.

Resulta bastante comum que em fotografias de escala grande, 1/1000 por exemplo, toda a sua parte central pertença a uma única face.

- c) É conveniente que cada face seja escolhida numa região do terreno onde a curvatura das curvas de nível seja do mesmo tipo, ou côncava ou convexa.
- d) Também é importante que a distância entre os pontos de apoio utilizados e que delimitam a face, seja maior possível, diminuindo, desta forma, o número de faces, poupando trabalho e custos, melhorando a “rigidez” ou “força geométrica” do ângulo poliédrico formado pelos pontos de apoio e o centro ótico da câmara fotográfica, já que o ângulo poliédrico muito agudo ou muito obtuso provocam maior erro.

A conformação geométrica das figuras e sua relação com a qualidade dos resultados no cálculo de coordenadas foi amplamente estudado pela Geodésia (Gemael, 1977).

2.5 Erro de modelagem nas regiões de fronteira das faces

Em todo cálculo de coordenadas de um mesmo ponto, a partir de modelos físicos ou matemáticos diferentes, geralmente são obtidos valores numéricos distintos. Este fato é bem conhecido na Fotogrametria tradicional, embora a mesma utilize instrumental sofisticado.

Na restituição analógica, por exemplo, as coordenadas de um mesmo ponto, obtidas a partir de modelos estereoscópicos diferentes apresentam diferenças, o que obriga a efetuar correções na minuta de restituição, antes de ser enviada para impressão. Na restituição analítica e na restituição digital, acontece o mesmo fenômeno e os softwares dos sistemas, vêm equipados com módulos de ajustamento de coordenadas

para resolver este problema. Na aerotriangulação aparece o mesmo problema e existem diferentes softwares destinados a efetuar o ajustamento das coordenadas.

Problema similar apresenta-se na construção de mosaicos fotográficos, embora aqui, as discrepâncias não sejam numéricas, e sim gráficas. Estes fatos são provocados por erros de modelagem, como a incorreta orientação absoluta e relativa dos modelos estereoscópicos. A estes erros, agregam-se os erros acidentais de medida.

Na metodologia de retificação pesquisada neste trabalho e, como era de se esperar, devido ao uso de instrumental bem menos sofisticado, aparecem discrepâncias entre coordenadas de um mesmo ponto, quando for considerado como pertencente a uma ou a outra face, ou quando for calculado a partir de duas fotografias adjacentes.

Neste caso, os pontos pertencem à região da borda ou fronteira, entre duas faces ou duas fotografias.

As coordenadas finais dos referidos pontos são obtidas a partir do cálculo da média das coordenadas. Observando a fórmula (4.11.) deduz-se que, na pior das hipóteses, quando os erros nas coordenadas de ambos os modelos têm o mesmo sinal, o erro será menor ou igual ao erro de maior módulo.

P_I – ponto P na face I

P_{II} – ponto P na face II

$P_I (x_I, y_I, z_I)$, erros $[e_{x_I}]$; $[e_{y_I}]$; $[e_{z_I}]$

$P_{II} (x_{II}, y_{II}, z_{II})$, erros $[e_{x_{II}}]$; $[e_{y_{II}}]$; $[e_{z_{II}}]$

$$x_{PM} = \frac{x_I + x_{II}}{2}; \quad y_{PM} = \frac{y_I + y_{II}}{2}; \quad z_{PM} = \frac{z_I + z_{II}}{2}$$

$$[ex_{PM}] \leq \frac{[ex_I] + [ex_{II}]}{2},$$

$$[ez_{PM}] \leq \frac{[ez_I] + [ez_{II}]}{2}$$

(4.11)

$$[ey_{PM}] \leq \frac{[ey_I] + [ey_{II}]}{2},$$

Se as faces forem projetadas utilizando-se os critérios antes indicados e, conseqüentemente, os erros encontram-se dentro das tolerâncias estabelecidas, espera-se que o erro do ponto médio não ultrapasse a referida tolerância.

No caso de atualização cartográfica de uma área extensa, deverá ser utilizado um software de ajuste de coordenadas utilizando-se o método de faixas, de blocos ou outro modelo matemático.

2.6 Erro de Refração Atmosférica

O raio de luz proveniente do objeto terrestre ao atravessar a atmosfera para chegar à câmara fotográfica, sofre um desvio provocado pela refração da luz, nas capas da atmosfera segundo aparece indicado na Figura 33.

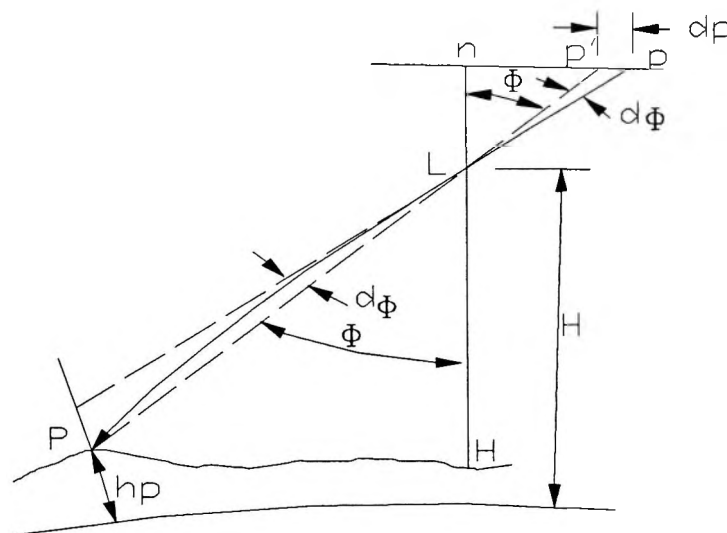


Figura 33 – Curvatura do raio causada pela refração atmosférica.

Fonte: Moffitt, 1980.

Este efeito verifica-se tanto para câmaras métricas e não métricas, já que é provocado por um elemento externo, a atmosfera.

O deslocamento dos pontos na imagem, varia em forma radial e pode ser calculado pelas fórmulas (4.12.) e (4.13.):

$$dr = k\left(r + \frac{r^3}{f^2}\right) \quad (4.12.)$$

onde:

dr = erro radial do posicionamento do ponto na fotografia;

k = fator de refração

$$k = \left(\frac{2410 H}{H^2 - 6H + 250} - \frac{2410 h}{h^2 - 6h + 250} \cdot \frac{h}{H} \right) \cdot 10^{-6} \quad (4.13.)$$

H = altitude de vôo

r = distância desde o ponto principal da

h = altitude do objeto

fotografia até a imagem do ponto

f = focal da câmara fotográfica

em questão.

Considerando ampliações fotográficas de formato (10 x 15 cm), referentes a fotografias obtidas com câmara de focal 50 mm em diferentes alturas, sobre uma região de altitude média de 700 m, chega-se à seguinte tabela:

Tabela 6 – Erro de Refração Atmosférica.

Altura do vôo	K	dr
200 m	$-3.901 \cdot 10^{-9}$ m	$-4.22 \cdot 10^{-7}$ m
300 m	$-4.809 \cdot 10^{-9}$ m	$-5.2 \cdot 10^{-7}$ m
400 m	$-5.363 \cdot 10^{-9}$ m	$-5.8 \cdot 10^{-7}$ m
600m	$-4.868 \cdot 10^{-9}$ m	$-6.3 \cdot 10^{-7}$ m
1000 m	$-5.859 \cdot 10^{-9}$ m	$-6.3 \cdot 10^{-7}$ m
2000 m	$-4.785 \cdot 10^{-9}$ m	$-5.2 \cdot 10^{-7}$ m

Fonte: J. Raffo (2000).

Os resultados da Tabela 6 mostram que o deslocamento provocado pelo efeito da refração atmosférica é muito pequeno, e pode ser desprezado para o objetivo deste trabalho.

2.7 Erro de curvatura terrestre

Tanto o modelo estereoscópico utilizado na restituição fotogramétrica tradicional, como o modelo matemático utilizado na metodologia proposta neste trabalho, adotam como superfície de referência das altitudes, o plano. Na Cartografia, as altitudes estão referidas ao GEOIDE, que é uma superfície curva. Esta diferença de superfícies de referência, provoca um erro no posicionamento planimétrico dos pontos na fotografia, conhecido como erro de curvatura terrestre, mostrado na Figura (34).

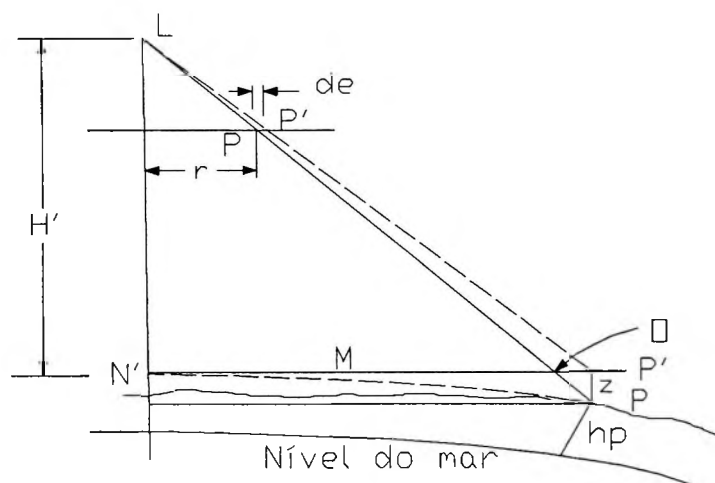


Figura 34 – Deslocamento da imagem provocado pela curvatura da Terra.

Fonte: Adaptado por J. Raffo de Moffitt (1980).

O erro de curvatura terrestre na fotografia (d_g), pode ser obtido através da fórmula (4.14.):

$$d_g = \frac{r^3 \cdot H'}{2f R} \quad (4.14.)$$

onde: r = distância desde o nadir da fotografia até o ponto em questão.

R = raio médio da Terra.

f = focal da câmara.

H' = altura do vôo.

Considerando-se, uma ampliação (10 x 15 cm), obtida a partir de uma fotografia vertical, obtida com câmara de focal 50 mm, e nela um ponto na situação mais desfavorável, o que corresponde ao canto da fotografia, pode ser calculada a Tabela 7.

Tabela 7 – Erro provocado pela curvatura terrestre.

Altura do vôo	D_r
200 m	$-4.97 \cdot 10^{-4}$ mm
300 m	$-7.46 \cdot 10^{-4}$ mm
400 m	$-9.94 \cdot 10^{-4}$ mm
600m	$-1.49 \cdot 10^{-3}$ mm
1000 m	$-2.49 \cdot 10^{-3}$ mm
2000 m	$-4.97 \cdot 10^{-3}$ mm

Fonte: J. Raffo (2000).

Os resultados da Tabela 7 mostram que o deslocamento na imagem fotográfica, provocado pela curvatura da Terra é bem menor que o erro acidental da leitura do monitor do computador e também pode ser desconsiderado.

Deve-se observar que quando a altura de vôo for maior que 10.000 m, por exemplo, o erro para a foto vertical fica em $-2,48 \cdot 10^{-2}$ mm, valor bem mais significativo. Se a fotografia for oblíqua, o efeito se acentua.

Uma ampliação (10 x 15 cm) correspondente a uma fotografia oblíqua tomada a 10.000 m de altura, apresentará nos cantos, um erro de curvatura terrestre de $3,83 \cdot 10^{-2}$ mm; a 2000 m o erro será de $7,67 \cdot 10^{-3}$ mm e a 200 m o erro será de $7,66 \cdot 10^{-4}$ mm.

Dos cálculos efetuados resulta que, para a metodologia proposta, dever-se-á evitar a tomada de fotografias oblíquas, além dos 2.000 m de altura de vôo, para evitar atingir valores significativos de erro de curvatura.

2.8 Erros de orientação interna

A orientação interna é realizada a partir do conhecimento do ponto principal das fotografias e da distância focal de câmara.

Nas câmaras métricas, estes valores são conhecidos com grande exatidão através de sua calibração que deve efetuar-se periodicamente, por metodologia sofisticada e em laboratórios especializados. As câmaras não métricas têm focal variável e não possuem marcas fiduciais, o que torna extremamente difícil e caro o processo de calibração.

Os erros de orientação interna comprometem fortemente os resultados métricos do levantamento. A focal determina a escala da imagem e o ponto principal influi no posicionamento relativo dos pontos da imagem, quando a metodologia utilizada no processo cartográfico exige o conhecimento da distância focal e do ponto principal, como sucede na restituição fotogramétrica tradicional. O modelo matemático utilizado para efetuar a retificação, neste trabalho, independe do conhecimento da distância focal, e do ponto principal. Consequentemente, este tipo de erros não afeta a metodologia proposta e foi esta uma das razões que levaram a adotar este modelo matemático, evitando-se os erros de orientação interna.

2.9 Erros de Distorção

Existem dois tipos de aberrações óticas que afetam o posicionamento e as coordenadas dos pontos na fotografia: a distorção radial e a distorção descentrada ou tangencial.

A distorção radial (Figura 35) provoca uma mudança de direção do raio de luz que parte do sistema ótico da câmara para impressionar o filme, em relação ao raio que chega do objeto, ao sistema ótico da câmara. Este fenômeno é inerente ao sistema ótico e aparece em todas as máquinas fotográficas, métricas ou não métricas.

A distorção descentrada ou tangencial (Figura 36) é um efeito provocado pelo alinhamento imperfeito das diferentes lentes que formam o sistema ótico da câmara fotográfica e depende da qualidade construtiva do instrumento.

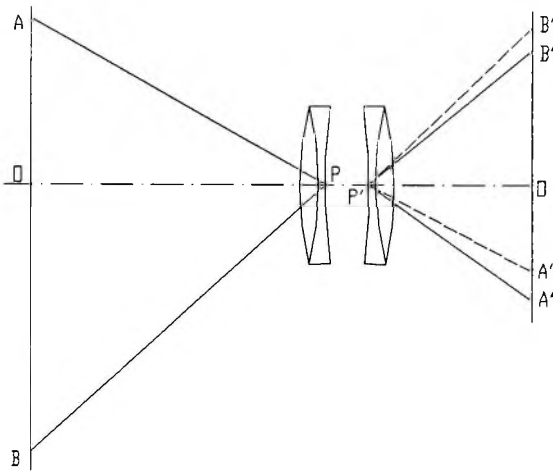


Figura 35 – Distorção Radial.

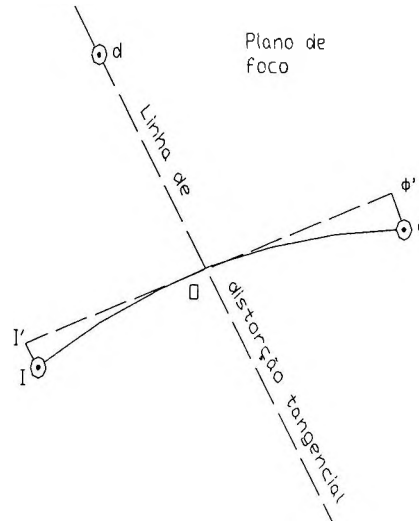


Figura 36 – Distorção Descentrada.

(Fonte: Adaptado por J. Raffo de Moffit, 1980)

A distorção radial possui valor variável, segundo a posição do raio de luz dentro do feixe. Warner (1994), estudando a distorção radial para algumas câmaras não métricas, obteve valor máximo de $\pm 55\mu\text{m}$, ou 0,055 mm sobre o filme. Este valor, para uma ampliação fotográfica de 10 x 15 cm, corresponde a 0,220 mm, resultando menor que o erro acidental de posicionamento do ponto no monitor. De qualquer forma, se for necessário, o mesmo pode ser determinado através de uma calibração simplificada e as medidas fotográficas, corrigidas deste efeito.

Com relação à distorção descentrada deve-se observar que, no conjunto de câmaras de pequeno formato, existe um grande número de marcas e de fabricantes. Ghosh (1989), estudando câmaras não métricas do tipo reflex, chegou à conclusão de que a distorção descentrada era negligenciável neste tipo de câmara. As câmaras

utilizadas nesta pesquisa são do tipo reflex, que são as máquinas fotográficas utilizadas pelos fotógrafos profissionais. Não foram consideradas câmaras de formato 35 mm, de focal fixa, conhecidas como câmaras para viagem, geralmente de baixo custo, muitas das quais possuem lentes de acrílico e não de vidro e onde a distorção descentrada pode ser bem maior.

2.10 Erros provocados por deformações do filme

Numerosos fatos contribuem para provocar deformações do filme em fotografias oriundas de câmaras não métricas, como por exemplo: deformação da superfície plana do mesmo, agravada pelo fato de que as câmaras não métricas não possuem sistema de vácuo para aplanar o filme; tensões sobre o filme durante a tomada das fotos e durante o processamento, efeito da temperatura e da umidade relativa durante o processamento ou a estocagem, etc.

Todos estes efeitos, geralmente, são tratados em forma conjunta, devido à impossibilidade de separá-los. Karara & Abdal Aziz (1974) estudaram o problema para as câmaras de pequeno formato e obtiveram os seguintes valores médios:

Câmara 35 mm : $27\mu\text{m} = 0,027 \text{ mm}$

Câmara 70 mm : $31 \mu\text{m} = 0,031 \text{ mm}$

Estes valores são aproximadamente 10 vezes menores que o erro acidental de leitura no monitor e, também, podem ser negligenciados nas condições instrumentais deste trabalho.

2.11 Erros provocados pelo Scanner

No processo de digitalização das imagens através do uso de scanners, podem ocorrer distorções na imagem, provocando erro nas coordenadas dos pontos. Também podem ocorrer diferenças de coloração ou de tons de cinza, entre a imagem original e a resultante da scannerização.

O erro de tons na nova imagem resulta importante quando se trabalha com fotografias branco e preto, por dificultar a individualização dos objetos. As fotografias 35 mm, em geral são coloridas e são pouco afetadas pelos erros de tom

Os erros de origem geométrica são provocados por vários fatores: distorções das lentes dos scanners, erros de alinhamento dos sensores, desfocagem, erros de amostragem, vibrações, ruídos eletrônicos, etc.

Quando são utilizados scanners especiais, como os usados na fotogrametria, estes erros variam entre 5 e 20 μm (Bethel, 1995), valores bem menores que as tolerâncias exigidas neste trabalho.

Com relação ao tipo de scanners de baixo custo, utilizados neste trabalho, a pesquisa bibliográfica efetuada não apresenta referências sobre a sua acuracidade.

Pretende-se, futuramente, desenvolver pesquisas destinadas à calibração deste tipo de instrumentos.

2.12 Erros nas coordenadas dos pontos de apoio

Para poder efetuar a retificação virtual das imagens, faz-se necessário o conhecimento de coordenadas planas (X, Y) de pontos de apoio. Para obter as referidas coordenadas, pode ser efetuado um levantamento topográfico convencional, utilizar-se a metodologia GPS ou utilizar-se a cartografia existente. A escolha de qual metodologia utilizar, resultará de uma análise das condicionantes técnicas e econômicas.

A teoria dos erros mostra que qualquer tipo de medição é afetada de erros e que o valor dos mesmos depende da metodologia e do instrumental utilizados.

Num levantamento topográfico convencional, utilizando-se o método taqueométrico clássico, a incerteza mínima esperada na posição dos pontos é de 0,10 m e, na prática, este valor varia entre 0,15 e 0,30 m, em condições normais de trabalho. Se o levantamento taqueométrico for efetuado com uma ‘estação total’, o erro acidental cai para 0,03 m, aproximadamente. Se o levantamento for efetuado utilizando-se triangulações ou poligonais fechadas, com centragem forçada nos vértices, podem-se esperar incertezas milimétricas na posição dos pontos.

Se o levantamento for efetuado utilizando-se GPS, a incerteza varia dependendo do instrumento utilizado, da metodologia e de estar operando ou não, a “disponibilidade seletiva” (S.A.) (Fontes, 1994).

Para receptores de navegação com S.A. desligada a incerteza, estima-se entre 8 e 15 metros, segundo o modelo, e com S.A. ligada, passa para 100 m.

Nos métodos de levantamento GPS conhecidos como tipo topográfico a incerteza varia entre 0,5 m e 1 m. Usando instrumental e metodologia geodésica, os erros podem ser centimétricos e milimétricos.

As coordenadas dos pontos de apoio também podem ser obtidas a partir de medição numa carta topográfica. Nesta situação, aparecem diferentes erros: os erros originais, de quando foi efetuada a minuta de restituição e, posteriormente, a impressão; as deformações posteriores do papel, provocadas por dobras, umidade, etc e, por último, a acuracidade visual do operador e a sensibilidade dos instrumentos de medida (geralmente escalímetros). Considerando todos estes fatores, aceita-se, a incerteza da posição do ponto na planta em pelo menos 0,0005 m. Este valor, multiplicado pelo denominador da escala, gera o valor do erro no terreno.

Considerando as diferentes situações, percebe-se que a metodologia para obtenção das coordenadas dos pontos de apoio dependerá das exigências de precisão e dos recursos instrumentais e econômicos disponíveis.

Caberá ao técnico responsável avaliar a metodologia a ser empregada para a determinação das coordenadas dos pontos de apoio.

De qualquer forma, deve existir coerência entre o erro das coordenadas topográficas dos pontos de apoio e o erro oriundo da resolução da imagem. O erro topográfico sempre deverá ser menor ou igual ao erro de resolução.

Exemplificando:

Uma ampliação fotográfica na escala 1/1000, obtida com câmara de focal 50 mm e operando num monitor de 640 x 480 pixels, apresenta uma resolução espacial de aproximadamente 0,39 m no sistema de coordenadas do terreno. O erro das coordenadas de apoio deverá ser menor ou igual ao referido valor.

Esta precisão nas coordenadas dos pontos de apoio poderá ser obtida de alguma das seguintes formas:

- a) por meio de um levantamento topográfico utilizando-se, preferivelmente, uma estação total.
- b) por meio de um levantamento GPS, com receptor topográfico ou geodésico.
- c) medindo as coordenadas, desde uma planta topográfica em escala 1/500, no caso desta existir, o que assegurará uma incerteza de 0,25 m nas coordenadas dos pontos de apoio.

2.13 Relação entre altura do vôo, escala da fotografia e incerteza dos pontos de apoio

Os parâmetros utilizados no modelo matemático de retificação (2.16) são calculados através da relação matemática existente entre 5 pontos do terreno e seus correspondentes na imagem. Os referidos pontos são chamados pontos de apoio, e deles é preciso conhecer as coordenadas do terreno e do monitor. Ambos os tipos de coordenadas apresentam incertezas. Para o caso do monitor adotado como padrão neste

trabalho (640 x 480 pontos), verificou-se estatisticamente que a incerteza mede aproximadamente 0,4 mm. Para obter o erro correspondente no terreno, basta multiplicar este valor pelo denominador da escala da imagem, no local do ponto em questão. Deve-se observar que a fotografia tem escala variável.

Para o cálculo dos parâmetros do modelo matemático, dever-se-á impor que a incerteza nas coordenadas topográficas dos pontos de apoio, seja menor ou igual ao erro acidental do monitor. Esta condição deve ser imposta para estabelecer coerência de precisão entre monitor e terreno.

Considerando este critério técnico e os custos operacionais, se têm subsídios para a escolha da metodologia que proporcione as coordenadas topográficas dos pontos de apoio (planta existente, GPS ou levantamento topográfico convencional), assim como a necessidade do uso de matriz dos pesos (P) unitária ou diferente de 1 para o ajuste do cálculo dos parâmetros.

Como a incerteza provocada pelo tamanho do pixel depende da escala da foto na região considerada e este valor é determinado pela obliquidade da fotografia e o relevo do terreno na região, cada projeto de levantamento aerofotográfico deve ser planejado de forma individual.

A seguir, apresenta-se uma análise deste tipo, como exemplo: deve-se efetuar um levantamento aerofotográfico com fins cadastrais e será utilizada uma câmara fotográfica, formato 35 mm, equipada com focal de 50 mm, efetuando-se ampliações comerciais (10 x 15 cm), digitalizadas com Scanner na escala 1 x 1 ou 100%.

Para fornecer as coordenadas dos pontos de apoio, existe uma planta topográfica na escala 1/1000.

Primeiramente, deve-se analisar as incertezas nos pontos de apoio, provocadas pelo erro no monitor, para o qual dever-se-á conhecer a escala da fotografia em cada ponto, valor obtido pela fórmula (2.12.) ou sua transformada (4.15.):

$$\text{Esc} = \frac{1}{\frac{H}{f - y \text{ sen}(t)}} \quad (4.15.)$$

onde: H = altura do avião com relação ao ponto em questão.

f = focal da câmara (neste caso focal virtual da imagem ampliada).

y = ordenada do ponto, medida sobre o eixo principal da fotografia, desde o isocentro da mesma.

O isocentro encontra-se no meio do caminho entre o Ponto Principal e o Nadir, e sua distância do ponto principal (PI) é calculada pela fórmula (4.16.).

$$\text{PI} = f \cdot \text{tg}(t/2) \quad (4.16.)$$

t = ângulo de inclinação.

f = focal real ou virtual, segundo seja considerado filme fotográfico, ou slide ou ampliação em papel fotográfico.

Tabela 8 - Cálculo da escala pontual na fotografia.

Tipo de Fotografia	Ângulo de Inclinação t	Denominador de Escala
Vertical	0	H / f
Oblíqua baixa	15	$H/(f - 0.3 y)$
Oblíqua baixa	30	$H/(f - 0.5 y)$
Oblíqua baixa	45	$H/(f - 0.7 y)$
Oblíqua alta	60	$H/(f - 0.87 y)$
Oblíqua alta	75	$H/(f - 0.96 y)$
Oblíqua alta	90	$H/(f - y)$

(Fonte: J. Raffo, 2000).

Com o auxílio de da Tabela 8, pode ser efetuada a análise referente ao problema proposto.

a) Previamente, deve-se tratar a região fotografada como horizontal e a fotografia do tipo vertical. Desta forma, pode-se efetuar uma primeira estimativa da escala média da fotografia, e da altura de vôo.

A incerteza gráfica de uma planta, estima-se normalmente, em 0.5 mm. Como a planta topográfica está na escala 1/1000, a incerteza corresponde, no terreno, a 0,5 m.

A incerteza do monitor é de 0,4 mm. Se este valor for multiplicado pelo denominador da escala, obter-se-á o erro, no terreno, provocado pelo erro da medida no

monitor. Considerando, que o erro oriundo da planta é de 0,5 m, pode-se calcular o denominador da escala (n), de forma que o erro provocado pelo monitor e pela carta tenham a mesma grandeza no terreno. Feita esta consideração, o denominador da escala (n), obtém-se da operação $0,4 \text{ mm} \cdot n = 0,5 \text{ m}$, resultando $n = 1250$.

A fotografia vertical ampliada deverá ter uma escala média de 1/1250 e será obtida desde 250 m de altura.

b) A seguir, deve-se considerar a fotografia oblíqua. Se o ângulo de inclinação for, por exemplo, de 45° , a expressão que permite calcular o denominador da escala indicada pela Tabela 8, é a fórmula (4.17.).

$$H / (f - 0,7 y) \quad (4.17.)$$

Para calcular-se o valor de y, previamente dever-se-á determinar o Isocentro (Figura 6), que, neste caso, encontrar-se-á a 83 mm do Ponto Principal.

Deve-se observar, também, que a escala é menor na parte superior da fotografia e maior na parte inferior que contém o Nadir, e que para verificar a condição de tolerância imposta pela resolução do monitor, a menor escala poderá ser 1/1250. Feitas estas observações, calcula-se a altura de vôo H para o ponto de menor escala na imagem, utilizando a fórmula (4.18.), que surge a partir da (4.15.).

$$H = (f - 0,7 y) \cdot \frac{1}{\text{ESC}} \quad (4.18.)$$

onde:

$f = 200$ mm (focal virtual para a ampliação considerada)

$y = (83 + 90)$ mm (ordenada da paralela isométrica no extremo superior da fotografia)

ESC = 1/1250 (menor escala admitida na fotografia).

O cálculo dá como resultado $H = 98,62$ m. A escala da ampliação no extremo superior será: 1/1250; no isocentro: 1/493 e no extremo inferior: 1/481.

c) Se o terreno não for plano, na fórmula (4.15.), a escala deverá ser corrigida pela altitude do ponto, para depois calcular a altura do avião H com relação ao ponto em questão.

2.14 Erros vinculados ao nível de resolução da imagem

O nível de resolução apresentado pela imagem no monitor do computador terá uma significativa importância na acuracidade das medidas efetuadas sobre a referida imagem. A qualidade destas medidas depende da identificação correta do objeto a ser mensurado e da dimensão, no terreno, da unidade de medida do monitor, chamado pixel (picture element). Há vários fatores que influenciam na identificação do objeto e no tamanho do pixel, como, por exemplo: a resolução espacial da imagem, a resolução radiométrica da imagem e a resolução da ampliação fotográfica original.

2.14.1 Resolução da ampliação fotográfica original

No processo operacional adotado neste trabalho, o filme fotográfico é revelado e, a seguir, são feitas ampliações em papel fotográfico. Posteriormente, estas fotografias são digitalizadas num scanner.

Tanto o filme, como o papel fotográfico das ampliações possuem uma resolução espacial maior que o Scanner, resultando vantajoso aproveitar a capacidade resolutive oriunda da fotografia. Neste sentido, quando for feito o planejamento do vôo fotográfico, deve-se observar que:

- a) diminuindo a altura de vôo, aumenta a escala das fotografias, facilitando-se, desta forma, a identificação dos objetos e melhorando as medições efetuadas sobre elas. Nas fotografias acontece um fenômeno similar ao chamado “generalização”, que afeta as cartas topográficas quando estas mudam de escala. O pesquisador W. Warner fez um estudo mostrando que a escala da fotografia influe no valor numérico das medições efetuadas sobre um objeto, comparando medidas de um mesmo objeto, efetuadas sobre fotografias de diferentes escalas (Warner, 1990).

- b) Aumentando a escala das fotografias evita-se exigir muita resolução geométrica na digitalização, poupando tamanho de arquivos e, especialmente, evitando possíveis deformações provocadas pelo software do scanner, no processo de aumento da resolução espacial.

- c) Diminuindo a granulação do filme (Time-Life, 1976), aumenta a nitidez da fotografia mas, simultaneamente, perde-se sensibilidade à luz, exigindo maior tempo de exposição, obrigando a diminuir a velocidade do avião para evitar o efeito de “foto tremida”. A granulação de um filme está indicada através do valor ASA. Os filmes coloridos de 100 ASA apresentam boa granulação para levantamentos aerofotográficos e foram utilizados neste trabalho. Este tipo de filme colorido é o mais comum no mercado.

2.14.2 Resolução radiométrica do Scanner

A resolução radiométrica do Scanner, também conhecida como profundidade de imagem (“bit-depth”), consiste no número de níveis digitais utilizados pelo scanner para quantificar os diferentes tons de cinza, ou as diferentes cores da imagem original. Este número de níveis depende do número de bits utilizado pelo sistema, hardware (computador e scanner) e software, para efetuar a digitalização.

Um sistema que opere com um bit para arquivar a cor de um pixel de imagem, só guardará duas cores: branco e negro, ou 0 e 1. Se utilizar 2 bits, poderá guardar 4 tons diferentes, correspondentes às quatro combinações possíveis: 00; 01; 10; 11.

Com 4 bits poderão ser quantificados 16 tons de cinza ou 16 cores; com 8 bits podem ser indicados 256 cores ou tons de cinza.

Se o sistema operar com 8 bits para quantificar os tons de vermelho, 8 bits para os tons de verde e outros 8 bits para os tons de azul, serão produzidos 256 tons de cada cor, que combinando os três canais irão gerar 16.777.216 cores.

Uma fotografia branco e preto ou colorida apresenta um grande número de tons de cinza ou de cores, no entanto, quando for digitalizada, seu número fica reduzido aos valores antes indicados.

Como o olho humano dificilmente percebe mais de 30 tons diferentes de cinza (Costa, 1992), se o sistema de digitalização operar com 5 bits, apresentará 32 tons de cinza e quando for digitalizada uma fotografia preto e branco, a imagem resultante mostrará ao observador o mesmo aspecto de tonalidades que a fotografia original.

Se a fotografia for digitalizada com um número menor de tons que aqueles percebidos pela visão humana, a imagem digital apresentará manchas e não uma variação contínua de tons. Este efeito é chamado de posterização da imagem.

O mesmo fenômeno indicado para as imagens branco-preto acontece nas imagens coloridas. Se uma fotografia colorida for digitalizada com 16 cores, o referido efeito, resulta muito notável; se for digitalizada com 256 cores é bem menos perceptível e se o for com 16 milhões de cores é imperceptível. Se, por exemplo, uma fotografia aérea for digitalizada com baixa resolução radiométrica e nela aparece o telhado de uma casa de cor laranja e, como fundo, o verde da grama do chão, pode aparecer uma faixa marrom (combinação de verde e laranja), na borda entre ambas as superfícies, e também um efeito de pontilhado, como consequência de mudanças bruscas de tons. Estes efeitos dificultarão a seleção de pontos a serem medidos, especialmente na região da borda.

Da análise efetuada deduz-se que:

- a) a resolução radiométrica afeta o aspecto qualitativo e quantitativo da imagem, ao afetar a identificação dos objetos e a definição de seus limites.

- b) Previamente à digitalização da fotografia colorida a ser medida, deve-se fazer um teste prévio com diferentes resoluções radiométricas, para cores e para tons de cinza. Deverá ser escolhida a resolução radiométrica que permita melhor identificação e definição dos objetos e que seu tamanho possa ser suportado pela memória RAM do computador e pelo software utilizado.

- c) Os softwares de tratamento de imagens como o Corel Photo Paint ou o Adobe Photo Show apresentam recursos como “contraste”, que tornam as regiões escuras mais escuras e as claras mais claras, “gamma”, que altera somente as cores intermediárias, “sharpen”, que aumenta a nitidez e “brilho”, que deixa toda a imagem mais iluminada. Estes recursos podem ser utilizados melhorando a identificação dos objetos e a definição de seus limites, contribuindo, indiretamente, na qualidade das medidas efetuadas sobre eles.

2.14.3 Resolução geométrica

A resolução geométrica é definida como a quantidade de informação por polegada linear ou por polegada quadrada, que pode ser capturada ou reproduzida por

um sistema (D. Bush, 1993). No presente caso, deve ser analisada a resolução geométrica da imagem no monitor do computador, já que, sobre ela, são efetuadas as medições. A resolução geométrica da imagem no monitor resulta de vários componentes:

- a) a resolução geométrica do filme fotográfico
- b) a resolução ótica do scanner
- c) a resolução geométrica do scanner, oriunda do software utilizado na digitalização
- d) a resolução do monitor do computador.

- a) A resolução geométrica do filme fotográfico é consequência do tamanho dos cristais de sais de prata. Como estes cristais são bem menores que os sensores do scanner, a resolução do filme é maior que a do scanner.

O aumento da granulação provoca um aumento da sensibilidade, ou diminuição do tempo de exposição, mas, paralelamente, provoca um efeito de pontilhado na fotografia, diminuindo o detalhamento apresentado na mesma. “Um filme lento, na faixa de 20 a 50 ASA, é inigualável para os trabalhos de detalhe” indica o Manual de Fotografia (Time-Life, 1976), já que o mesmo permite fazer grandes ampliações sem perda da definição. Dificilmente este tipo de filme pode ser utilizado em fotografias obtidas em movimento, como as fotografias aéreas. O planejador do recobrimento aerofotográfico deve utilizar filmes da menor ASA possível no seu projeto

de vôo, procurando equilíbrio entre as variáveis: altura de vôo, velocidade de aeronave e sensibilidade do filme utilizado.

- b) Os scanners são aparelhos formados, basicamente, por uma fonte de luz e um grupo de sensores instalados numa barra. A luz produzida pela fonte é refletida pela imagem que se procura digitalizar e, posteriormente, é captada pelos sensores, segundo aparece na Figura 37.

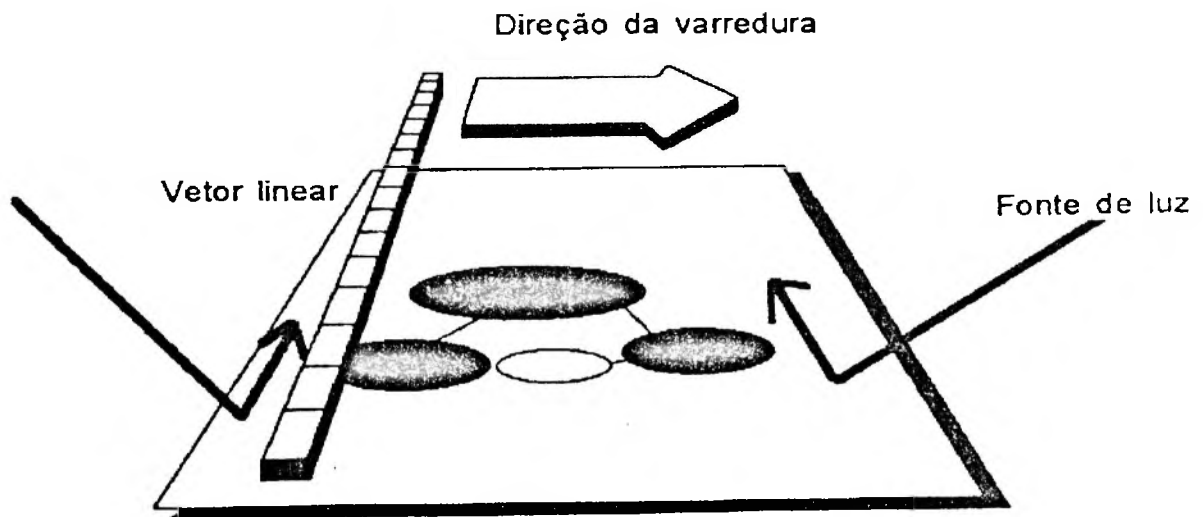


Figura 37 – Esboço esquemático do scanner.

Fonte (Busch, 1993).

O número de sensores por polegada linear é chamado de resolução ótico-geométrica. Quanto maior for o número de sensores, tanto maior será a resolução ótica do scanner.

A tecnologia de sensores desenvolveu-se muito, sendo possível encontrar scanners de baixo custo, com resolução ótica de 600 dpi, coisa quase impossível há alguns anos. O scanner utilizado neste trabalho possui essa resolução ótica e o tamanho de uma unidade sensora mede 0,04 mm. Numa fotografia em papel de escala média 1/1000, cada unidade sensora captará a imagem de 0,40 m do terreno.

c) Os scanners trazem incorporado um software, que permite efetuar o gerenciamento dos mesmos.

Geralmente, estes softwares permitem a mudança de resolução geométrica, tanto no sentido de seu aumento ou de diminuição.

Indica o “Manual Scanner para IBM-PC”, Bush (1993), que para o aumento da resolução, o software procede dividindo em pedaços menores a imagem captada com sua resolução ótica, permitindo ampliar a imagem (no monitor ou na impressora), sem aumentar sua fragmentação. Na diminuição da resolução, simplesmente se ignora parte da informação obtida pelos sensores.

Em ambas as situações, há modificação do aspecto da imagem mas, não se incorpora nenhuma informação adicional à original, obtida através da resolução ótica do scanner.

A mudança da resolução geométrica pelo software provoca uma variação no tamanho da imagem no monitor e no tamanho do arquivo na memória do computador. Duplicar a resolução, implica aumentar 4 vezes o tamanho do arquivo.

O scanner utilizado neste trabalho apresenta valores “default” de resolução de software, entre 75 dpi e 2400 dpi, embora permita escolher livremente, resoluções entre 1 e 9999 dpi.

d) A imagem digitalizada pelo scanner será apresentada num periférico de saída, por exemplo: uma impressora, um ploter ou o monitor do computador. Todos estes aparelhos possuem uma resolução geométrica própria.

Os monitores SVGA que são os de uso mais generalizado, permitem mudar a sua resolução através das “configurações” do “painel de controle”, do menu “Iniciar” do Windows.

Os valores de resolução permitidos são (640 x 480), (800 x 600) e (1024 x 1268) pixels, respectivamente, correspondendo às resoluções: baixa, média e alta. Aumentando-se a resolução do monitor, obtém-se um ganho na definição da imagem, já que o tamanho dos pixels é menor e a imagem aparece menos fragmentada. Em compensação, o tamanho da mesma resulta menor, por ter mostrado um número maior de pixels, num monitor que possui fisicamente as mesmas dimensões.

Feitas todas estas considerações, fica claro que o planejamento do vôo fotográfico deve ser efetuado cuidadosamente, procurando combinar todas as variáveis, de forma de obter o melhor resultado técnico e econômico possível.

2.15 Erro na altimetria

O software desenvolvido para o projeto permite calcular as coordenadas planimétricas (x,y) dos pontos identificados na imagem e não as altimétricas. Embora assim, é possível desenhar as curvas de nível do terreno sobre as imagens digitais, através do uso de outros softwares existentes no mercado, especialmente projetados nesse sentido, como o SURFER, por exemplo.

O erro na altitude dos pontos depende da qualidade da modelagem do terreno efetuada pelo Surfer, e esta modelagem resulta da quantidade de pontos e da boa conformação deles, para se obter a forma correta do terreno e do modelo matemático de interpolação adotado: “krigagem”, “inverso da distância”, “vizinho mais próximo”, “triangulação com interpolação linear”, etc. Os resultados numéricos da altimetria, obtidos a partir das curvas de nível existentes nas imagens, superaram as expectativas de acuracidade, que nesse sentido se tinham.

Em versões posteriores do software elaborado para o presente trabalho, pretende-se incluir recursos computacionais, de forma que o mesmo possa calcular a altitude de pontos a partir das curvas de nível incorporadas na imagem.

2.16 Erros na determinação da altura de objetos verticais

Tradicionalmente, a determinação de altura de objetos verticais na fotogrametria tem sido efetuada a partir de estereoscopia e não de métodos monoscópicos, devido ao erro considerável que estes últimos provocam. Embora assim,

sendo, nesta pesquisa foram feitos alguns testes monoscópicos, utilizando-se a fórmula 4.19., apresentada por J. Carre (1975), para determinar altura de objetos verticais em fotografias oblíquas.

$$Z = \frac{ab}{nb} \cdot H \cdot \frac{1}{1 - \frac{a_1 b_1}{k}} \quad (4.19.)$$

$$k = f / (\text{sen } i \cdot \text{cos } i) \quad (4.20.)$$

onde:

Z = altura do objeto

ab = comprimento na fotografia, da imagem do objeto a ser medido.

nb = distância desde o Nadir da fotografia até o topo da imagem do objeto.

H = altura do avião.

$a_1 b_1$ = projeção do segmento ab sobre a linha principal da fotografia.

i = ângulo de inclinação da fotografia.

f = focal da câmara.

Os testes efetuados apresentaram um erro médio de aproximadamente 10% da altura do objeto medido. Embora os resultados obtidos não podem ser considerados bons, são auspiciosos, sendo necessário aprofundar as pesquisas referentes à aplicabilidade da fórmula (4.19.), assim como aprimorar a metodologia para diminuir o erro apresentado.

2.17 Erros e correções na medida de distâncias e de áreas

Quando os objetos a serem medidos estiverem na superfície do terreno, o qual supostamente está próximo à faceta, as medidas de distância e de áreas deverão apresentar pequena diferença com relação às que seriam efetuadas se o objeto estiver sobre a faceta. Entretanto, se o objeto a ser medido estiver bastante afastado da superfície da faceta, como por exemplo, quando se pretende medir a área da laje de cobertura de um edifício de apartamentos, dever-se-á analisar a necessidade de corrigir as medidas efetuadas, já que as mesmas são calculadas no suposto que o objeto (a laje, neste caso), pertence à faceta substitutiva do terreno. Um exemplo de análise nesse sentido, é apresentado a seguir, considerando a laje do prédio, anteriormente indicada.

a) Fotografia vertical

Numa fotografia vertical, a escala linear dos objetos está indicada pelas fórmulas (4.21.) e (4.22.).

$$\text{Escala linear ao nível do terreno: } \frac{1}{(H/f)} \quad (4.21.)$$

$$\text{Escala linear ao nível da laje: } \frac{1}{(H - h)/f} \quad (4.22.)$$

onde:

f = focal da câmara

H = altura do vôo.

h = altura do prédio.

Considerando um mesmo comprimento, situado ao nível do terreno e ao nível da laje, e chamando l' e l suas imagens na fotografia, pode-se escrever a equação (4.23.) resultante de igualar ambas as medidas.

$$l \cdot \left(\frac{H-h}{f} \right) = l' \cdot \left(\frac{H}{f} \right) \quad (4.23.)$$

ou a equação (4.24.) que expressa a relação existente entre as imagens oriundas de objetos que encontram-se em diferentes níveis, mas que possuem o mesmo comprimento.

$$l = l' \left(\frac{1}{1 - \frac{h}{H}} \right) \quad (4.24.)$$

Aplicando valores numéricos na equação (4.24.), tem-se:

Ex. 1: Altura de vôo = 200 m

Altura da construção = 2 m

$$l = l' (1,01)$$

diferença entre uma medida linear no telhado e no terreno $\approx 1\%$

Ex. 2: Altura de vôo = 200 m

Altura da construção = 20 m

$$l = l' (1,111)$$

diferença entre a medida linear no telhado e no terreno $\approx 10\%$

Considerando que a relação entre as medidas de comprimento e as de área é quadrática e chamando S e S' às áreas ao nível da laje e do terreno, pode-se escrever a relação existente entre ambas:

Ex. 1: $\ell^2 = \ell'^2 \cdot (1,01)^2$ ou $S = S' (1,02)$, diferença entre ambas as áreas $\approx 2\%$

Ex. 2: $\ell^2 = \ell'^2 \cdot (1,111)^2$ ou $S = S' (1,234)$, diferença entre ambas as áreas $\approx 23\%$

Dos resultados numéricos conclui-se que, quanto maior for o resultado do quociente entre a altura do objeto e a altura do vôo, maior resultará o erro em comprimento e maior ainda na área.

b) Fotografia oblíqua

Se a fotografia for oblíqua, o comprimento da imagem de um objeto vertical fica modificado, com relação à dimensão da imagem do mesmo objeto, existente numa fotografia de tipo vertical. A relação entre ambos comprimentos está indicada em forma aproximada pela fórmula (4.25.):

$$l_o = l_v \cdot \cos(i) \quad (4.25.)$$

onde:

l_o = imagem de objeto vertical na foto oblíqua

l_v = imagem de objeto vertical na foto vertical

i = ângulo de inclinação de fotografia oblíqua.

O fator de correção: $\cos(i)$ deverá ser aplicado a ambos os membros da equação (4.24.), resultando que o mesmo se anula, por aparecer em ambos os lados da igualdade. Conseqüentemente, as fórmulas utilizadas para estudar a relação de distâncias e de áreas entre objetos em diferentes alturas em fotos verticais, também são aplicáveis para fotografias oblíquas.

3 ESTUDO DE CASOS

Ao longo do desenvolvimento da pesquisa foram efetuados inúmeros testes, combinando-se diferentes fatores com objetivo de poder analisar sua influência no resultado do produto final. As experiências foram efetuadas considerando-se:

a) diferentes objetos fotográficos. Os testes iniciais foram efetuados usando-se fotografias de prédios, de faces planas e regulares e fotografias de fachadas. Foram escolhidos estes objetos, por sua facilidade de acesso, por possuírem uma geometria simples e por serem planos, evitando-se também, o problema de afastamento da faceta da superfície real do objeto. Em seguida, foram usadas fotografias do tipo “close range”, de campos de testes implantados, para estudar o problema da terceira dimensão, que, normalmente, na fotogrametria tradicional, é resolvido por estereoscopia, mas que não o seria neste trabalho. Posteriormente, passou-se a pesquisar-se com imagens aéreas e, neste caso, o objeto fotográfico foi a superfície da Terra.

- b) diferentes modelos matemáticos.** Para analisar o desempenho de diferentes modelos matemáticos na metodologia pesquisada, testaram-se os modelos das equações de colinearidade, das equações de projetividade, o método das quadrículas (Carre, 1975), o método do modelo digital do terreno e combinações destes métodos.
- c) diferentes tipos de imagens.** Embora o propósito do trabalho foi de operar com fotografias oblíquas em formato 35 mm obtidas desde a janela do avião, também efetuaram-se testes com fotografias verticais 35 mm, fotografias de formato 70 mm, fotografias métricas, imagens de satélite, imagens obtidas através de câmaras de vídeo e plantas topográficas digitalizadas com scanner.
- d) diferentes configurações de scanner.** Para poder analisar a qualidade da imagem, a facilidade na identificação dos pontos cujas coordenadas devem ser calculadas, o tamanho dos arquivos e suas conseqüências no tempo usado para processamento e na capacidade da memória RAM dos computadores, foram feitos diferentes testes, mudando-se a resolução geométrica e radiométrica do scanner.

De todos os testes efetuados, são apresentados a seguir, alguns exemplos, correspondentes a diferentes tipos de imagens: fotografia aérea métrica, fotografia aérea vertical de formato 70 mm, fotografia aérea vertical de formato 35 mm, fotografia aérea baixa oblíqua de formato 35 mm, fotografia aérea alta oblíqua de formato 35 mm, imagem de satélite, imagem de vídeo e planta fotográfica rasterizada.

3.1 Fotografia métrica

No teste com fotografia aérea de formato 230 x 230 mm, também conhecida como fotografia métrica, por ser oriunda de câmaras fotogramétricas, utilizou-se uma fotografia do recobrimento fotogramétrico da cidade de Piracicaba, do ano de 1993, na escala média de 1/5000. As coordenadas dos pontos de apoio foram obtidas de uma planta topográfica da referida cidade, em escala de 1/1000. A fotografia foi scaneada com resolução de 250 dpi. O arquivo ocupou 6 MB de memória.

Com objetivo de verificar a qualidade dos resultados, foram efetuadas as medições de 10 comprimentos na imagem retificada em forma virtual, na planta topográfica e na fotografia original. As medidas da fotografia original foram multiplicadas pelo denominador da escala média, que aparece indicado na própria fotografia, para se obterem as medidas de distância do terreno. Foram também calculadas as áreas de 5 regiões da imagem. Os resultados destes testes são indicados nas Tabelas 9 e 10.

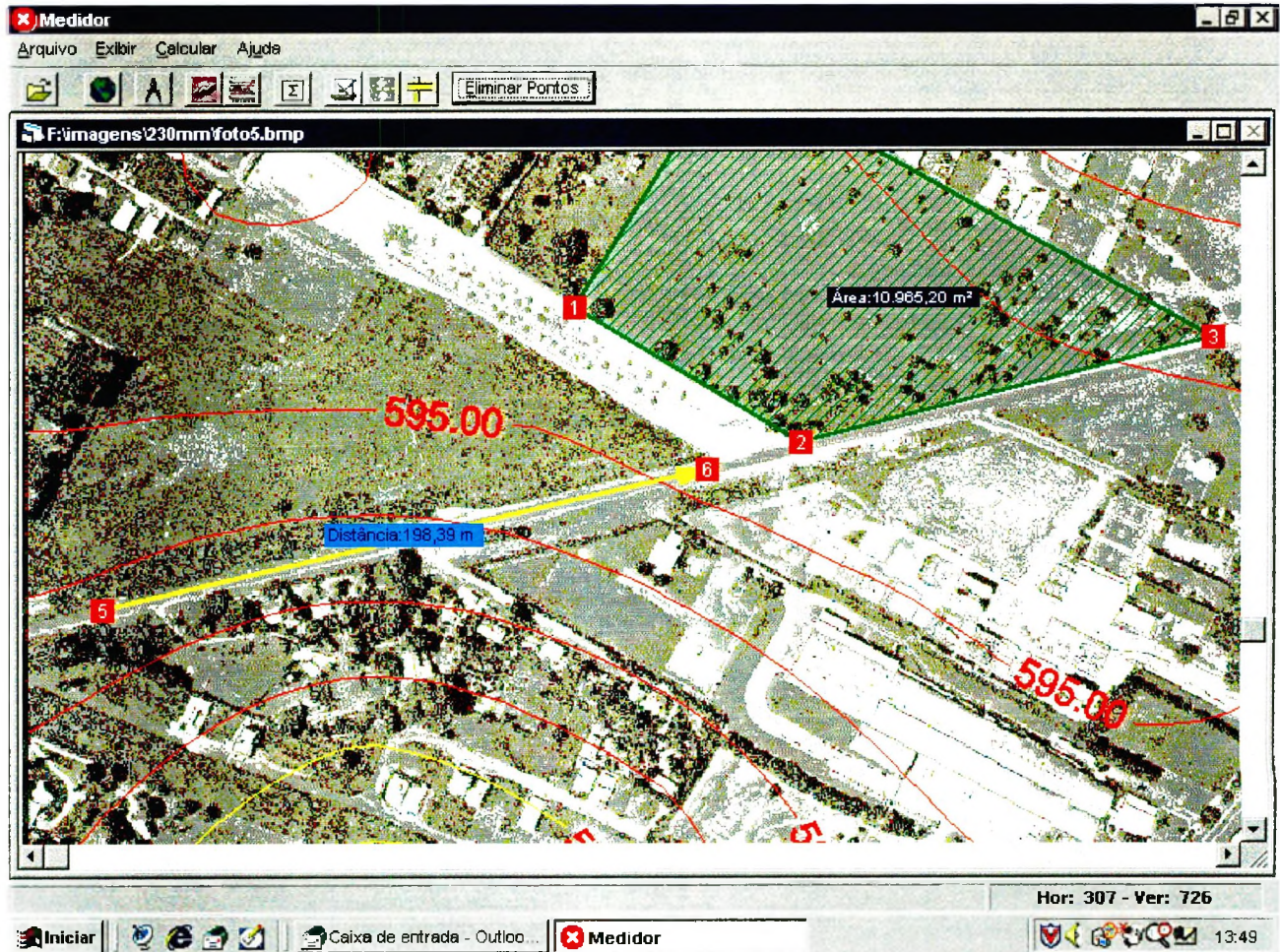


Figura 38 - Medida de distância , área e desenho de curvas de nível sobre fotografia aérea de formato 230mm.

(Fonte: J.Raffo. 2000)

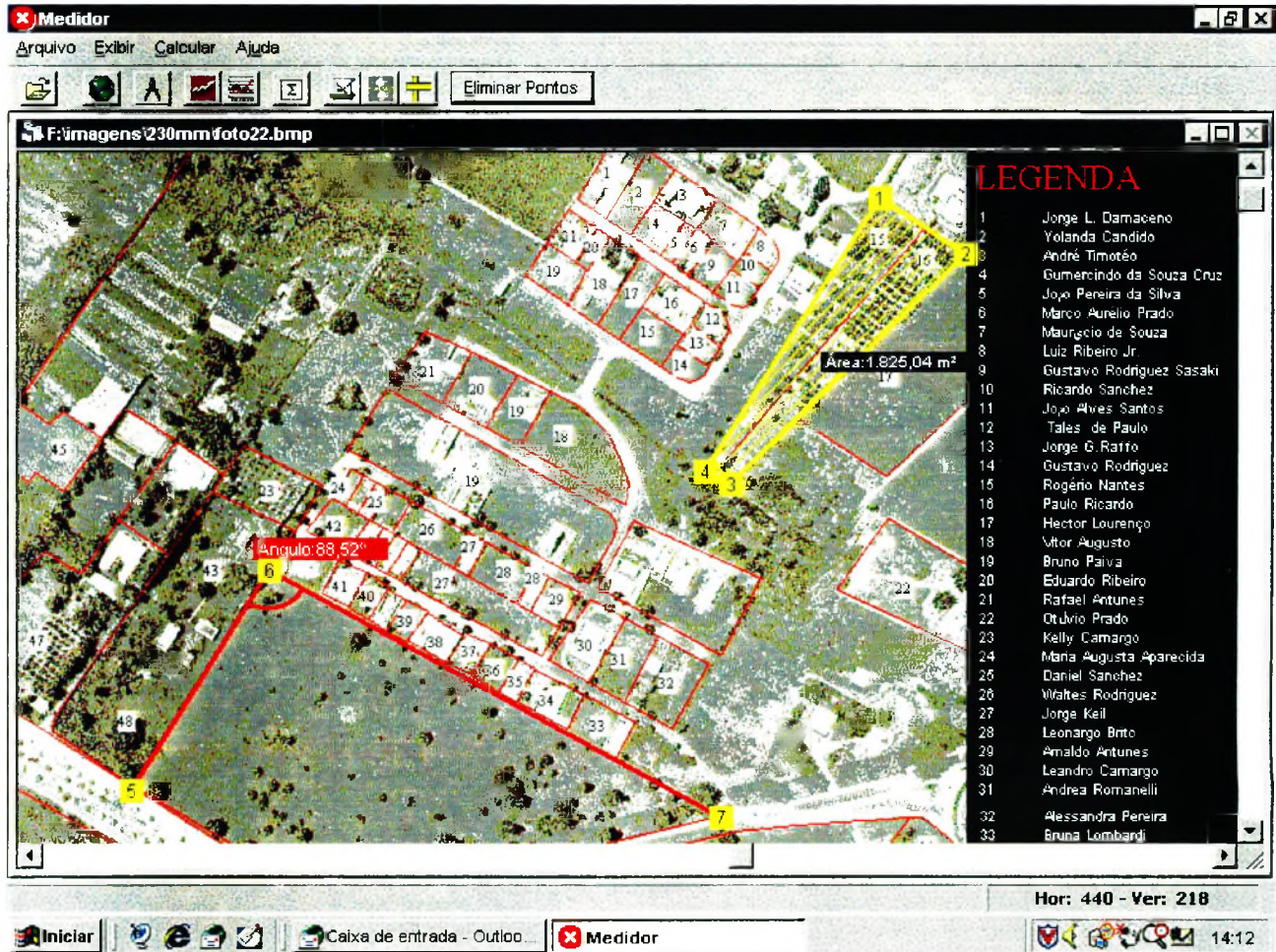


Figura 39 - Medida de ângulo , área e indicação dos proprietários dos diferentes lotes.
(Fonte: J.Raffo.2000)

Tabela 9 – Resultados de medida de distância em fotografia aérea métrica (formato 230 mm).

Distância obtida na retificação virtual	Distância obtida na planta topográfica	Distância obtida na fotografia original	Diferença de distância entre a retificação virtual e planta topográfica	Diferença em % e módulo com relação à distância na planta adotada como correta	Diferença de distâncias entre a foto original e planta topográfica	Diferença em % e módulo com relação à distância na planta adotada como correta
364,85 m	362 m	431 m	2,85 m	0,79	69 m	19,06
535,58 m	530 m	595 m	5,58 m	1,05	65 m	12,26
784,06 m	785 m	885 m	-0,94 m	0,12	100 m	12,74
504,58 m	500 m	545 m	4,58 m	0,92	45 m	9,00
425,69 m	430 m	460 m	-4,31 m	1,00	30 m	6,98
666,82 m	660 m	730 m	6,82 m	1,03	70 m	10,61
659,98 m	668 m	747 m	-8,02 m	1,20	79 m	11,83
366,04 m	360 m	387 m	6,04 m	1,68	27 m	7,5
853,29 m	832 m	910 m	21,29 m	2,56	78 m	9,37
198,39 m	197 m	209 m	1,39 m	0,70	12 m	6,09
			MÉDIA	1,11	MÉDIA	10,54
			Desvio Padrão	0,61	Desvio Padrão	3,57

Tabela 10 – Resultados de medida de áreas em fotografia aérea métrica (formato 230 mm).

Área obtida na retificação virtual	Área obtida a partir de planta	Área obtida a partir de foto original	Diferença de áreas entre a retificação virtual e planta topográfica	Diferença em % e módulo, com relação à área da região na planta topográfica, adotada como correta	Diferença de áreas entre foto e planta topográfica	Diferença em % e módulo, com relação à área da região na planta topográfica, adotada como correta
88526,30 m ²	86968,09 m ²	112950,00 m ²	1558,21 m ²	1,79	25981,19 m ²	29,87
107374,61 m ²	107499,86 m ²	125203,00 m ²	-125,25 m ²	0,12	17703,14 m ²	16,47
176730,33 m ²	176608,85 m ²	221239,64 m ²	121,48 m ²	0,07	44630,79 m ²	25,27
10965,2 m ²	11023,7 m ²	14789,56 m ²	-58,5 m ²	0,53	3765,86 m ²	34,16
			MÉDIA	0,62	MÉDIA	26,44
			Desvio Padrão	0,69	Desvio Padrão	6,56

3.2 Fotografia de formato 70 mm

No teste com fotografia aérea de formato 70 mm, foi utilizada uma fotografia vertical, obtida com uma câmara HASSELBLAD MKWE, provida de reseau, correspondente a uma região da cidade de São Paulo e apoiada em dados obtidos da planta de um guia de ruas da referida cidade, na escala 1/5000. A fotografia foi scaneada com resolução de 200 dpi, e o arquivo ocupou um espaço de 4,8 MB.

Para verificar a qualidade dos resultados foram efetuadas medições do comprimento de 6 lados e as áreas de 4 regiões da fotografia, valores que são apresentados na Tabela 11.

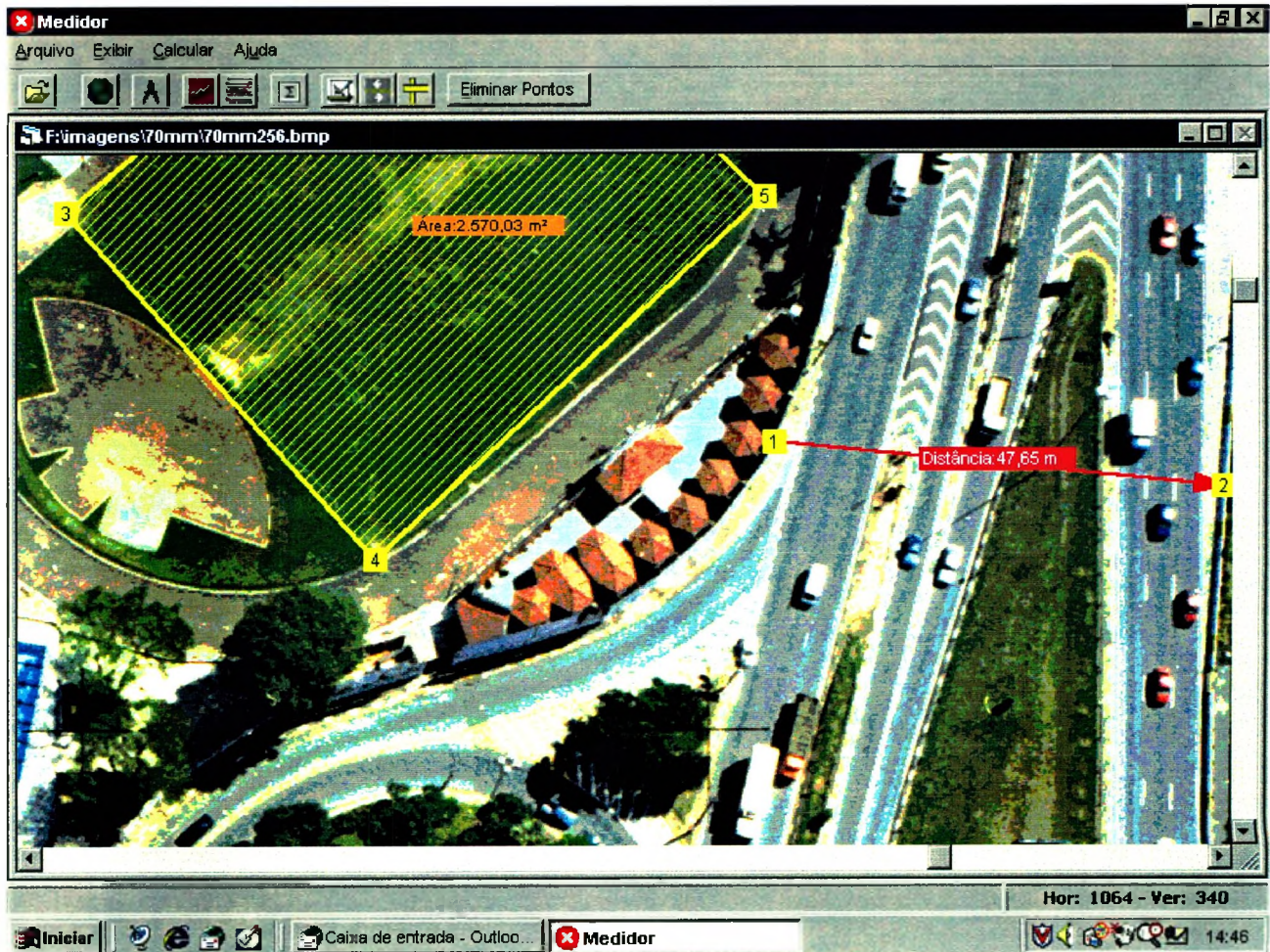


Figura 40 - Medida de distância e área, sobre fotografia aérea vertical, formato 70mm
(Fonte: J.Raffo.2000)

Tabela 11 – Resultados de medida de distância em fotografia 70 mm.

Distância obtida na retificação virtual	Distância obtida na planta topográfica	Distância obtida na fotografia original	Diferença de distâncias entre a retificação virtual e planta topográfica	Diferença em % e módulo, com relação à área da região na planta topográfica, adotada como correta	Diferença de distância entre a foto original e planta topográfica	Diferença em % e módulo, com relação à área da região na planta topográfica, adotada como correta
55,06 m	55,09 m	55,1 m	-0,03 m	0,05	0,01 m	0,02
41,75 m	41,93 m	43,5 m	-0,18 m	0,42	1,57 m	3,74
17,61 m	17,58 m	17,47 m	0,03 m	0,17	-0,11 m	0,62
23,58 m	22,95 m	20,3 m	0,63 m	2,74	-2,65 m	11,54
52,78 m	53,1 m	50,75 m	-0,32 m	0,60	2,35 m	4,42
47,65 m	47,43 m	47,5 m	0,22 m	0,46	0,07 m	0,15
			MEDIA	0,74	MEDIA	3,42
			Desvio Padrão	0,91	Desvio Padrão	4,03

Tabela 12 – Resultados de medida de áreas em fotografia 70 mm.

Área obtida na retificação virtual	Área obtida a partir de planta	Área obtida a partir de foto original	Diferença de áreas entre retificação virtual e planta topográfica	Diferença em % e módulo, com relação à área da região na planta topográfica, adotada como correta	Diferença de áreas entre foto e planta topográfica	Diferença em % e módulo, com relação à área da região na planta topográfica, adotada como correta
2490,57 m ²	2477,55 m ²	2520,5 m ²	13,02 m ²	0,52	42,95 m ²	1,73
417,77 m ²	418,25 m ²	443,75 m ²	-0,48 m ²	0,11	25,5 m ²	6,09
1307,61 m ²	1313,6 m ²	1342,80 m ²	-5,99 m ²	0,45	29,2 m ²	2,22
2570,03 m ²	2561,6 m ²	2587,34 m ²	8,43 m ²	0,32	25,74 m ²	1,00
			MÉDIA	0,36	MÉDIA	2,76
			Desvio Padrão	0,16	Desvio Padrão	1,97

3.3 Fotografia vertical de formato 35 mm

Para o teste da fotografia aérea vertical de 35 mm, utilizou-se uma fotografia obtida com câmara Nikon F45, com focal de 50 mm, de uma região da cidade de Atibaia, SP, com pontos de apoio obtidos de uma planta topográfica da região na escala 1/10000. Na rasterização com scanner foi utilizada resolução de 200 dpi e 216 cores, ocupando um espaço em disco de 2,3 MB.

A qualidade métrica foi verificada através da medida de 11 lados e 6 áreas, medidas estas apresentadas nas Tabelas 13 e 14.

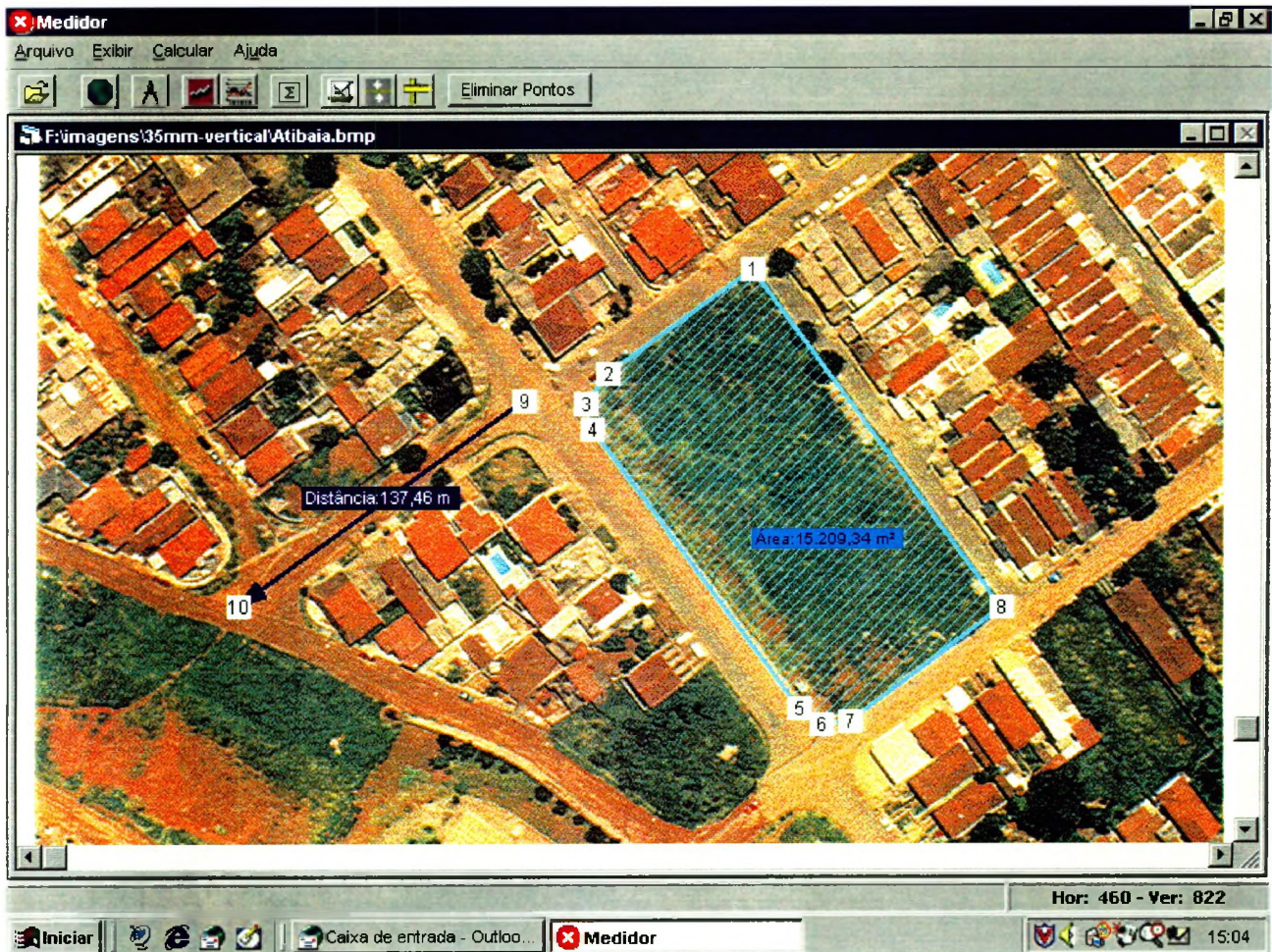


Figura 41 - Medida de distância e área sobre fotografia aérea formato 35mm, vertical
(Fonte:J.Raffo.2000)



Figura 42 - Desenho de curvas de nível sobre fotografia aérea vertical , formato 35mm.
(Fonte: J.Raffo.2000)

Tabela 13 – Resultados de medida de distância em fotografia 35 mm, vertical.

Distância obtida na retificação virtual	Distância obtida na planta topográfica	Distância obtida na fotografia original	Diferença de distância entre a retificação virtual e planta topográfica	Diferença em % e módulo, com relação à área da região na planta topográfica, adotada como correta	Diferença de distância entre a foto original e planta topográfica	Diferença em % e módulo, com relação à área da região na planta topográfica, adotada como correta
267,5 m	271,07 m	262,5 m	-3,57 m	1,31	-8,57 m	3,16
348,41 m	347,46 m	333,75 m	0,95 m	0,27	-13,71 m	3,94
570,01 m	569,5 m	555 m	0,51 m	0,08	-14,5 m	2,54
477,11 m	477,18 m	457,5 m	-0,07 m	0,01	-19,68 m	4,12
502,19 m	497,86 m	483,75 m	4,33 m	0,86	-14,11 m	2,83
685,04 m	684,55 m	667,5 m	0,49 m	0,07	-17,05 m	2,49
520,97 m	521,36 m	502,5 m	-0,39 m	0,07	-18,86 m	3,61
224,62 m	223,51	225 m	1,11 m	0,49	1,49 m	0,66
217,21 m	208,17 m	210 m	9,04 m	4,34	1,83 m	0,87
204,02 m	201,42 m	200,62 m	2,6 m	1,29	-0,8 m	0,39
137,46 m	139,13 m	141 m	-1,67 m	1,20	1,87 m	2,36
			MEDIA	0,91	MEDIA	2,36
			Desvio Padrão	1,19	Desvio Padrão	1,28

Tabela 14 – Resultados de medida de áreas em fotografia 35 mm, vertical.

Área obtida na retificação virtual	Área obtida a partir de planta	Área obtida a partir de foto original	Diferença de áreas entre a retificação virtual e planta topográfica	Diferença em % e módulo, com relação à área da região na planta topográfica, adotada como correta	Diferença de áreas entre foto e planta topográfica	Diferença em % e módulo, com relação à área da região na planta topográfica, adotada como correta
61144,97 m ²	64256,63 m ²	59701,98 m ²	-3111,66 m ²	4,84	-4554,65 m ²	7,08
19975,93 m ²	19170,12 m ²	19304,38 m ²	805,81 m ²	4,20	134,26 m ²	0,70
74033,84 m ²	75130,39 m ²	70794,6 m ²	-1096,55 m ²	1,45	-4335,79 m ²	5,77
44183,05 m ²	45142,07 m ²	41695,25 m ²	-959,02 m ²	2,12	-3446,82 m ²	7,63
54090,39 m ²	51592,69 m ²	37379,81 m ²	2497,7 m ²	4,84	-14212,88 m ²	27,5
15209,34 m ²	14934,5 m ²	15530,46 m ²	274,84 m ²	1,84	595,96 m ²	3,99
			MÉDIA	3,21	MÉDIA	8,79
			Desvio Padrão	1,44	Desvio Padrão	8,69

3.4 Fotografia baixa oblíqua, formato 35 mm

No teste de fotografia 35 mm, baixa oblíqua, foi usada uma fotografia correspondente à parte da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da USP, em Piracicaba, obtida desde a janela do avião.

Os dados para o apoio foram obtidos a partir de um levantamento topográfico efetuado posteriormente ao vôo, e a incerteza das coordenadas dos pontos de apoio foi de $\pm 0,05$ m.

A fotografia foi scaneada em formato colorido, com 256 cores e com 200 dpi de resolução, ocupando o arquivo 2,3 MB de memória.

A análise de erros foi efetuada através de medida do comprimento de 22 distâncias, e da medida de 6 áreas, valores estes apresentados nas Tabelas 15 e 16.

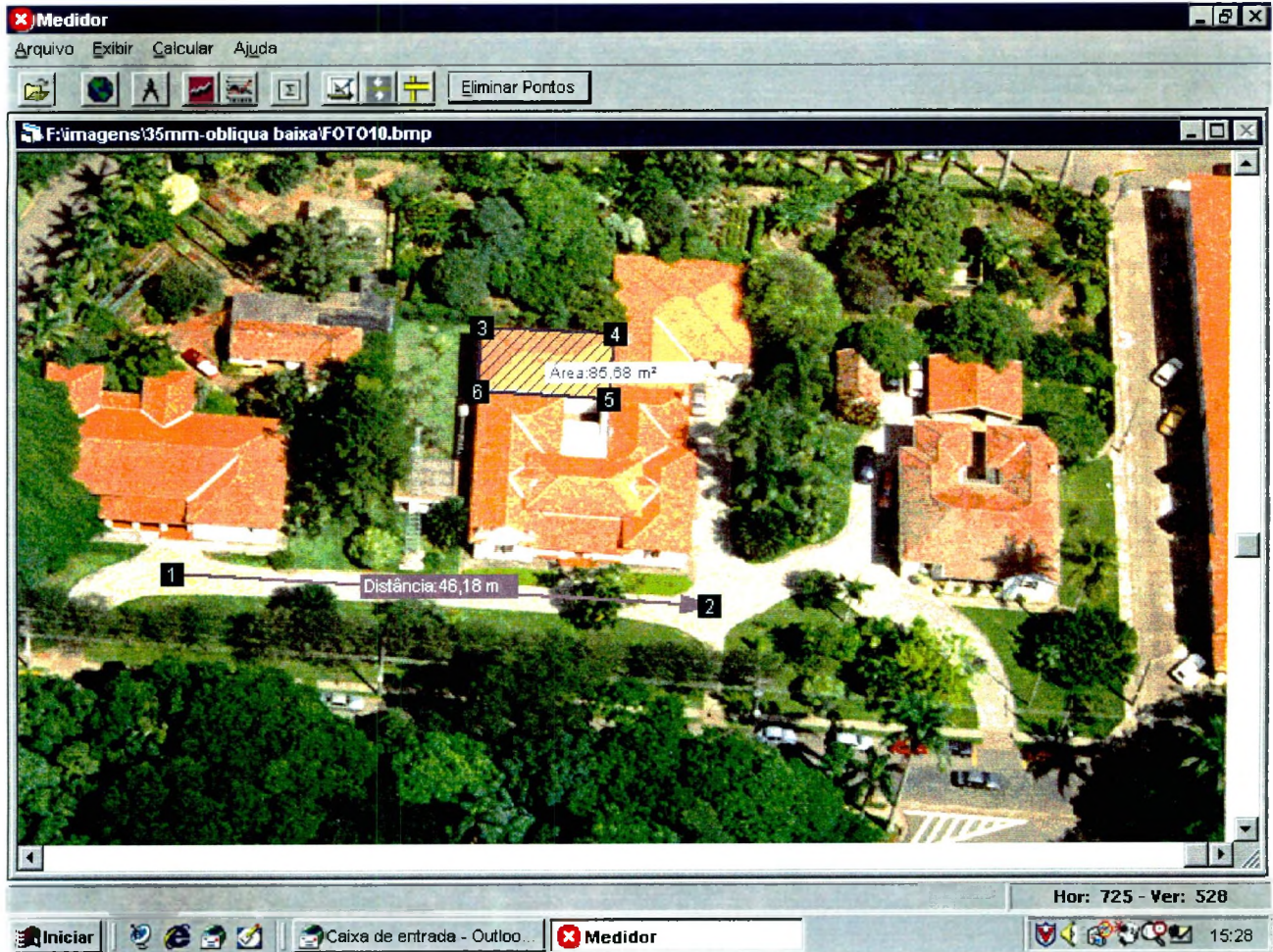


Figura 43. Medida de distância e área sobre fotografia aérea formato 35mm, baixa-obliqua (Fonte:J.Raffo.2000)

Tabela 15 – Resultados de medida de distância em fotografia 35 mm, oblíqua baixa.

Distância obtida na retificação virtual	Distância obtida na planta topográfica	Distância obtida na fotografia original	Diferença entre retificação virtual e planta topográfica	Diferença em % com relação à distância na planta (módulo)	Diferença entre a foto original e planta topográfica	Diferença em % com relação à distância na planta (módulo)
27,5 m	26,62 m	26,68 m	0,88 m	3,30	0,06 m	0,22
50,29 m	48,62 m	46,08 m	1,67 m	3,43	-2,54 m	5,22
57,27 m	57,74 m	63,15 m	-0,37 m	0,64	5,41 m	9,36
78,47 m	79,6 m	86,68 m	-1,13 m	1,41	7,08 m	8,89
72,14 m	72,43 m	78,39 m	-0,29 m	0,40	5,96 m	8,22
75,52 m	75,07 m	80,22 m	0,45 m	0,59	5,51 m	6,86
33,61 m	33,04 m	29,83 m	0,57 m	1,72	-3,21 m	9,71
74,33 m	74,32 m	69,28 m	0,01 m	0,01	-5,04 m	6,78
58,19 m	57,75 m	59,66 m	0,44 m	0,76	1,91 m	3,30
54,65 m	53,55 m	47,73 m	1,1 m	2,05	-5,82 m	10,86
29,57 m	29,45 m	28,67 m	0,12 m	0,40	-0,78 m	2,64
38,5 m	38,28 m	38,12 m	0,22 m	0,57	-0,16 m	0,41
60,56 m	60,67 m	52,21 m	-0,11 m	0,18	-8,46 m	13,94
112,29 m	112,66 m	90,99 m	-0,37 m	0,32	-21,67 m	19,23
65,33 m	65,64 m	53,03 m	-0,31 m	0,47	-12,61 m	19,21
7,19 m	6,92 m	7,46 m	0,27 m	3,90	0,54 m	7,80
22,99 m	24,02 m	25,69 m	-1,03 m	4,28	1,67 m	6,95
4,66 m	4,86 m	4,64 m	-0,2 m	4,11	-0,22 m	4,52
3,06 m	3,41 m	2,82 m	-0,35 m	10,2	-0,59 m	17,30
11,84 m	11,48 m	11,44 m	0,36 m	3,13	-0,04 m	0,34
95,3 m	95,13 m	87,84 m	0,17 m	0,17	-7,29 m	7,66
48,18 m	48,37 m	49,25 m	-0,19 m	0,39	0,88 m	1,82
			MÉDIA	1,94	MÉDIA	7,79
			Desvio Padrão	2,32	Desvio Padrão	5,54

Tabela 16 – Resultados de medida de áreas em fotografia 35 mm, oblíqua baixa.

Área obtida na retificação virtual	Área obtida a partir de planta	Área obtida a partir de foto original	Diferença de áreas entre retificação virtual e planta topográfica	Diferença em % e módulo, com relação à área da região na planta topográfica, adotada como correta	Diferença de áreas entre foto e planta topográfica	Diferença em % e módulo, com relação à área da região na planta topográfica, adotada como correta
1442,43 m ²	1403,57 m ²	1452,72 m ²	38,86 m ²	2,76	49,15 m ²	3,50
990,67 m ²	959,31 m ²	1032,76 m ²	31,36 m ²	3,26	73,45 m ²	7,65
3477,49 m ²	3490,27 m ²	3232,3 m ²	-12,78 m ²	0,36	-257,97 m ²	7,39
1575,88 m ²	1536,9 m ²	1399,95 m ²	38,98 m ²	2,53	-136,95 m ²	8,91
1442,43 m ²	1403,57 m ²	1452,72 m ²	38,86 m ²	2,76	49,15 m ²	3,50
85,08 m ²	83,5 m ²	88,9 m ²	1,58 m ²	1,89	5,4 m ²	6,47
			MEDIA	2,27	MEDIA	6,24
			Desvio Padrão	0,94	Desvio Padrão	2,06

3.5 Fotografia alta oblíqua, formato 35 mm

No teste de fotografia formato 35 mm, alta oblíqua, usou-se uma fotografia obtida com focal de 50 mm, de uma parte da Fazenda Areião, propriedade da Universidade de São Paulo, situada nas proximidades da cidade de Piracicaba.

As coordenadas de apoio foram obtidas em uma planta topográfica existente, na escala 1/5000. A imagem foi rasterizada em cores, com resolução de 200 dpi e o arquivo ocupou 2,2 MB de memória.

A verificação dos resultados efetuou-se com a medição de 13 distâncias e de 4 áreas, que são apresentadas nas Tabelas 17 e 18.

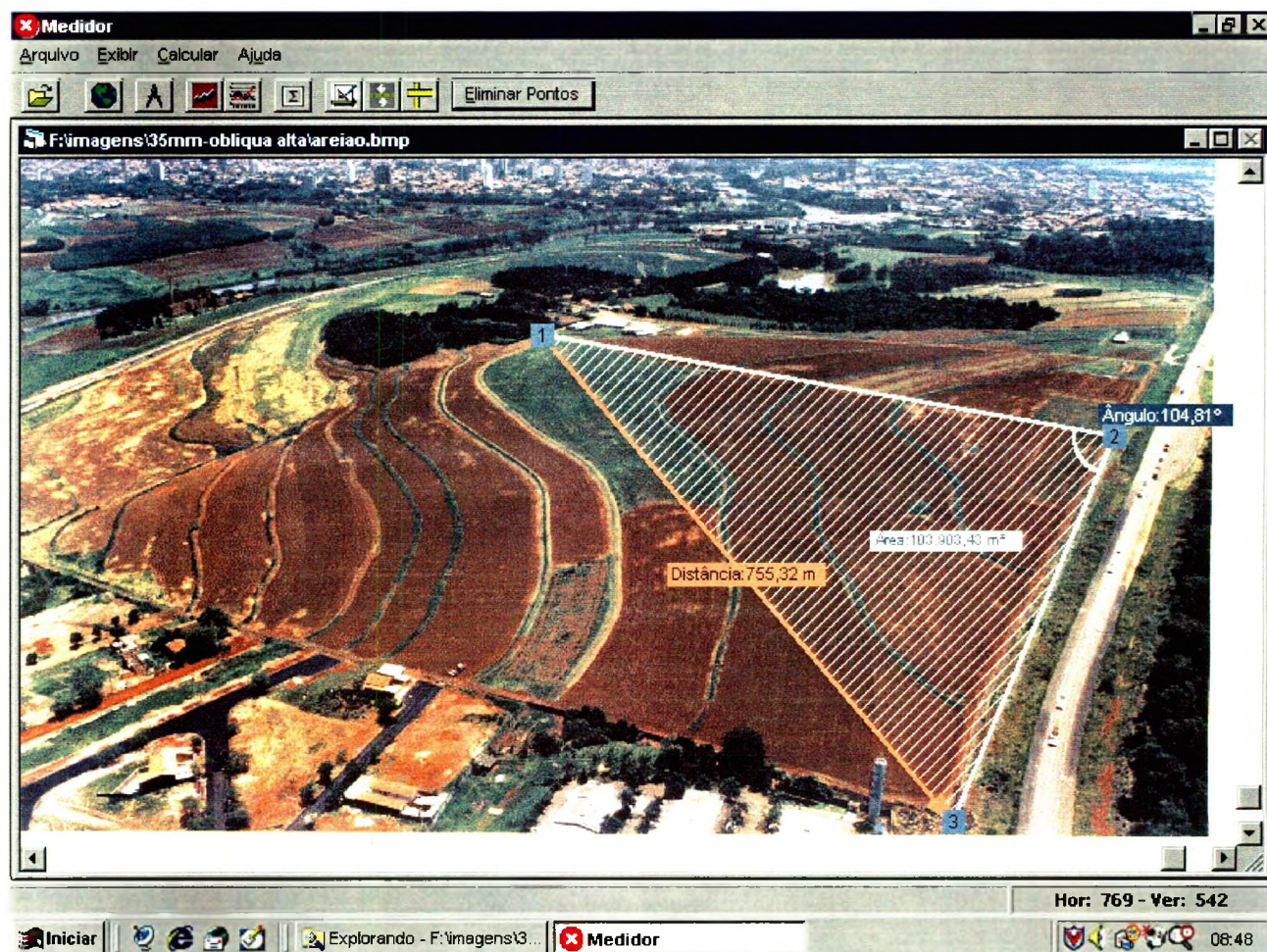


Figura 44 - Medida de área, distância e ângulo, sobre fotografia aérea formato 35mm, alto-obliqua. (Fonte:J.Raffo.2000)



Figura 45. Divisão de áreas através de uma paralela a um lado da propriedade, sobre fotografia aérea formato 35mm, alto-oblíqua.
(Fonte: J.Raffo.2000)

Tabela 17 – Resultados de medida de distância em fotografia 35 mm, alta oblíqua.

Distância obtida na retificação virtual	Distância obtida na planta topográfica	Distância obtida na fotografia original	Diferença de distância entre a retificação virtual e planta topográfica	Diferença em % e módulo, com relação à área da região na planta topográfica, adotada como correta	Diferença de distâncias entre a foto original e planta topográfica	Diferença em % e módulo, com relação à área da região na planta topográfica, adotada como correta
454,83 m	547 m	503,09 m	-1,17 m	0,21	-43,91 m	8,02
605,99 m	624 m	558,43 m	-18,01 m	2,88	-65,57 m	10,50
172,09 m	179 m	588,87 m	-6,91 m	3,86	409,87 m	228,97
866,01 m	864 m	679,18 m	2,01 m	0,23	-184,82 m	21,39
174,52 m	170 m	251,55 m	4,52 m	2,65	81,55 m	47,97
533,67 m	525 m	654,02 m	8,67 m	1,65	129,02 m	24,57
434,47 m	438 m	377,32 m	-3,53 m	0,80	-60,68 m	13,85
639,19 m	644 m	855,26 m	-4,81 m	0,74	211,26 m	32,80
570,58 m	563 m	617,45 m	7,58 m	1,34	54,45 m	9,67
772,55 m	755 m	452,96 m	17,55 m	2,32	-302,04 m	40,00
1117,28 m	1170 m	1006,19 m	-52,72 m	4,50	-163,81 m	14,00
1035,67 m	1050 m	1056,5 m	-14,33 m	1,36	6,5 m	0,61
755,32 m	784 m	718,2 m	-28,68 m	3,66	-65,8 m	8,39
			MÉDIA	2,02	MÉDIA	35,44
			Desvio Padrão	1,36	Desvio Padrão	57,42

Tabela 18 – Resultados de medida de áreas em fotografia 35 mm, alta oblíqua.

Área obtida na retificação virtual	Área obtida a partir de planta	Área obtida a partir de foto original	Diferença de áreas entre retificação virtual e planta topográfica	Diferença em % e módulo, com relação à área da região na planta topográfica, adotada como correta	Diferença de áreas entre foto e planta topográfica	Diferença em % e módulo, com relação à área da região na planta topográfica, adotada como correta
179095,3 m ²	176722,5 m ²	135056,4 m ²	2372,85 m ²	1,34	-41666,08 m ²	23,57
58865,31 m ²	57116,47 m ²	131445,4 m ²	1748,84 m ²	3,06	74328,92 m ²	130,13
52058,94 m ²	55823,02 m ²	131445,4 m ²	1748,84 m ²	6,74	107586,3 m ²	192,72
103903,4 m ²	102456,6 m ²	89456,3 m ²	1446,83 m ²	1,41	-13000,2 m ²	12,69
			MÉDIA	3,14	MÉDIA	89,78
			Desvio Padrão	2,19	Desvio Padrão	75,08

3.6 Imagem de Satélite

Para o teste com imagem de satélite foi utilizada uma imagem do satélite Landsat, correspondente a uma região da Baixada Santista, incluindo as cidades de Santos e São Vicente, na escala 1/50000. O apoio foi efetuado a partir de uma planta topográfica da região, na mesma escala.

A rasterização foi colorida com resolução de 100 dpi e o espaço ocupado em disco foi de 1,9 MB.

Os resultados numéricos aparecem nas Tabelas 19 e 20.

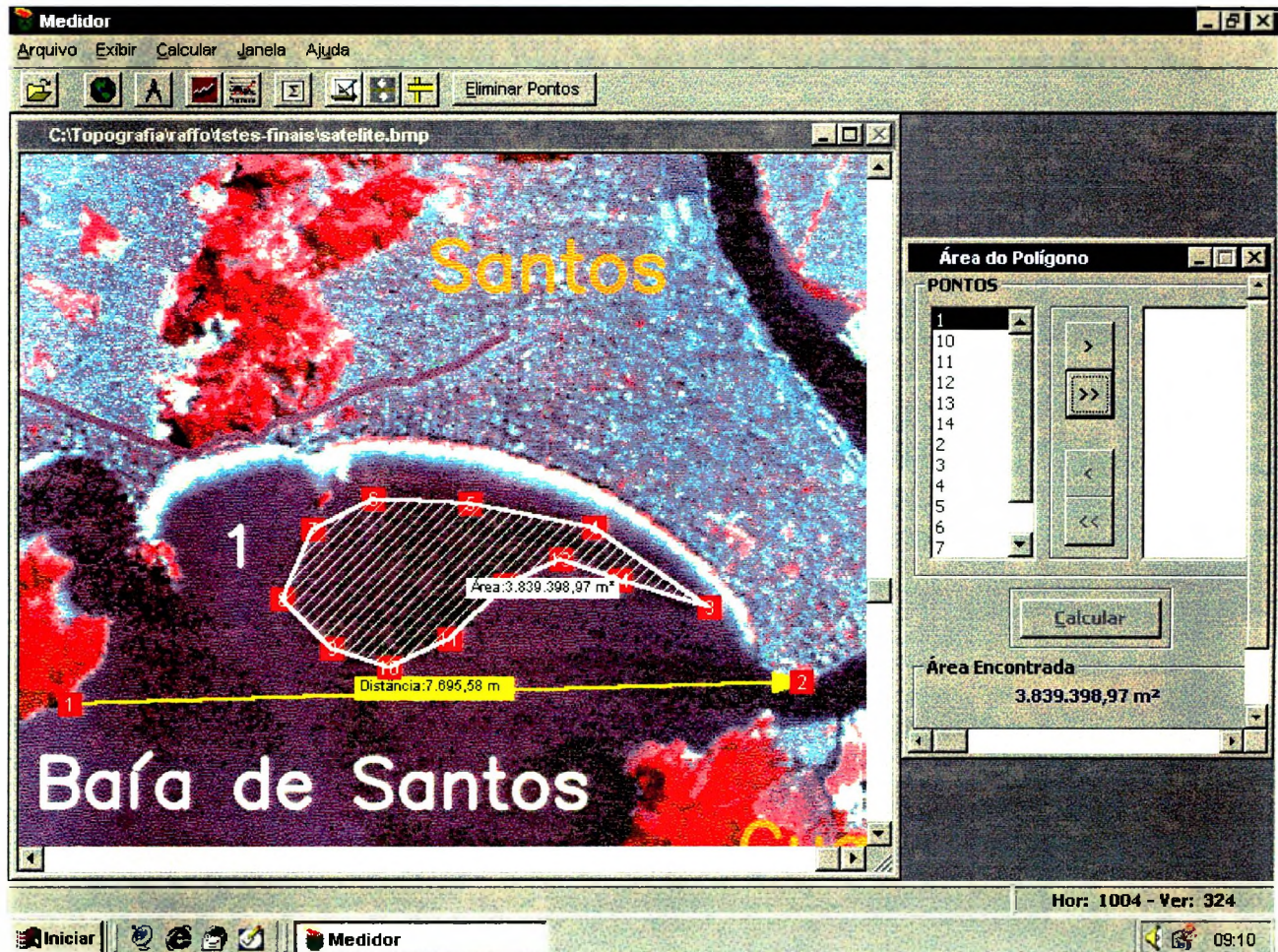


Figura 46 - Medida de distância e área sobre imagem de satélite Landsat
(Fonte: J.Raffo.2000)

Tabela 19 – Resultados de medida de distância sobre imagem de satélite.

Distância na retificação virtual	Distância na planta topográfica	Diferenças entre distâncias	Diferença em % e módulo com relação à distância na planta
7695,58 m	7750 m	-54,42 m	0,70
3846,72 m	3850 m	-3,28 m	0,08
2396,17 m	2430 m	-33,83 m	1,39
7305,21 m	7300 m	5,21 m	0,07
		Média	0,56
		Desvio Padrão	0,54

Tabela 20 – Resultados de medida de áreas sobre imagem de satélite.

Área na retificação virtual	Área na planta topográfica	Diferença entre áreas	Diferença em % e módulo, com relação à área na planta
3839399 m ²	3881889 m ²	-42490,03 m ²	1,09
157345 m ²	167345 m ²	-10000 m ²	5,97
43789 m ²	42268 m ²	1521 m ²	3,59
		Média	3,55
		Desvio Padrão	1,99

3.7 Imagem de Vídeo

No referente ao teste com imagem de vídeo, foi utilizada uma imagem de parte da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Deve-se observar que a qualidade ótica da imagem de vídeo é pior que a qualidade de fotografias de câmara de filme, posteriormente rasterizadas.

O apoio foi obtido de uma planta na escala 1/5000, a resolução do scanner foi de 100 dpi e o tamanho do arquivo 1,9 MB.

Os resultados numéricos aparecem nas Tabelas 21 e 22.

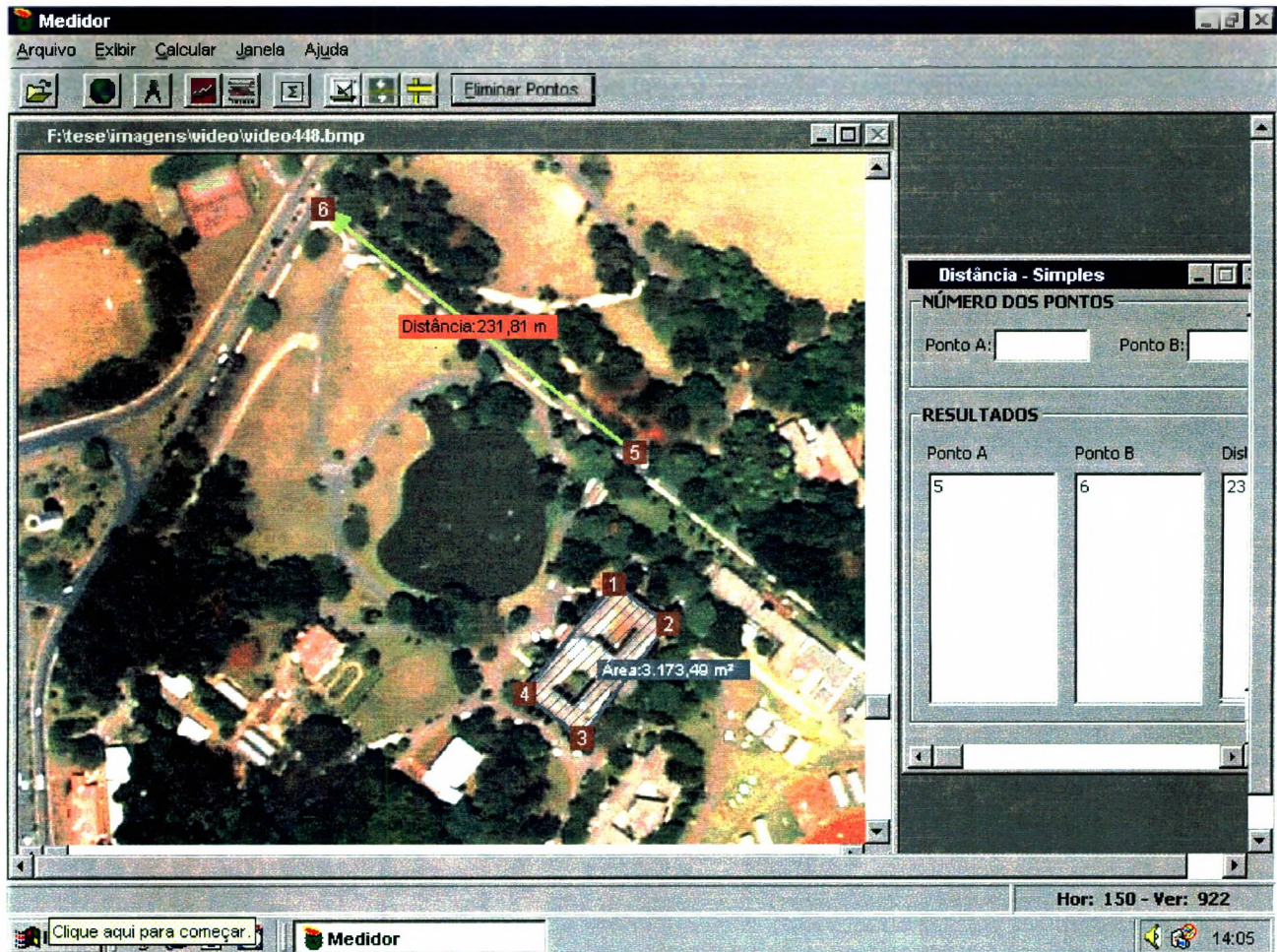


Figura 47 - Medida de área e distância sobre imagem de vídeo.
(Fonte:J.Raffo.2000)

Tabela 21 – Resultados de medida de distância sobre imagem de vídeo.

Retificação Virtual	Planta topográfica	Imagem original	Diferença de distâncias entre retificação e planta	Diferença em % com relação à distância na planta adotada como amostra	Diferença de distância entre imagem e planta	Diferença em % com relação à distância na planta adotada como correta
285,88 m	285 m	284 m	0,88 m	0,31	-1 m	0,35
317,34 m	316 m	322 m	1,34 m	0,42	6 m	1,90
84,56 m	83 m	85 m	1,56 m	1,90	2 m	2,41
41,36 m	40 m	43,5 m	1,36 m	3,4	3,5 m	8,75
118,6 m	120 m	114 m	-1,4 m	1,17	-6 m	5
			Média	1,44		3,68
			Desvio Padrão	1,13		2,94

Tabela 22 – Resultados de medida de áreas sobre imagem de vídeo.

Retificação Virtual	Planta topográfica	Imagem original	Diferença de distâncias entre retificação e planta	Diferença em % com relação à distância na planta adotada como amostra	Diferença de distância entre imagem e planta	Diferença em % com relação à distância na planta adotada como correta
3173,49 m ²	3234 m ²	3098,5 m ²	-60,51 m ²	1,87	-135,5 m ²	4,19
10345,56 m ²	10419,39 m ²	10756,7 m ²	-72,83 m ²	0,70	338,31 m ²	3,25
348,45 m ²	360 m ²	390 m ²	-11,55 m ²	3,20	30 m ²	8,33
			Média	1,93		5,25
			Desvio Padrão	1,02		2,21

3.8 Planta topográfica rasterizada

Ao longo do desenvolvimento da pesquisa observou-se que o mesmo modelo matemático e o software correspondente, também poderiam ser utilizados com plantas topográficas rasterizadas, permitindo desta forma efetuar facilmente medições de distâncias, áreas, ângulos e efetuar divisões de áreas.

Com objetivo de teste, foi digitalizada com scanner, uma planta topográfica de parte da ESALQ/USP em Piracicaba. Neste caso, os pontos de apoio foram obtidos da mesma planta, e os resultados da verificação métrica são apresentados nas Tabelas 23 e 24.

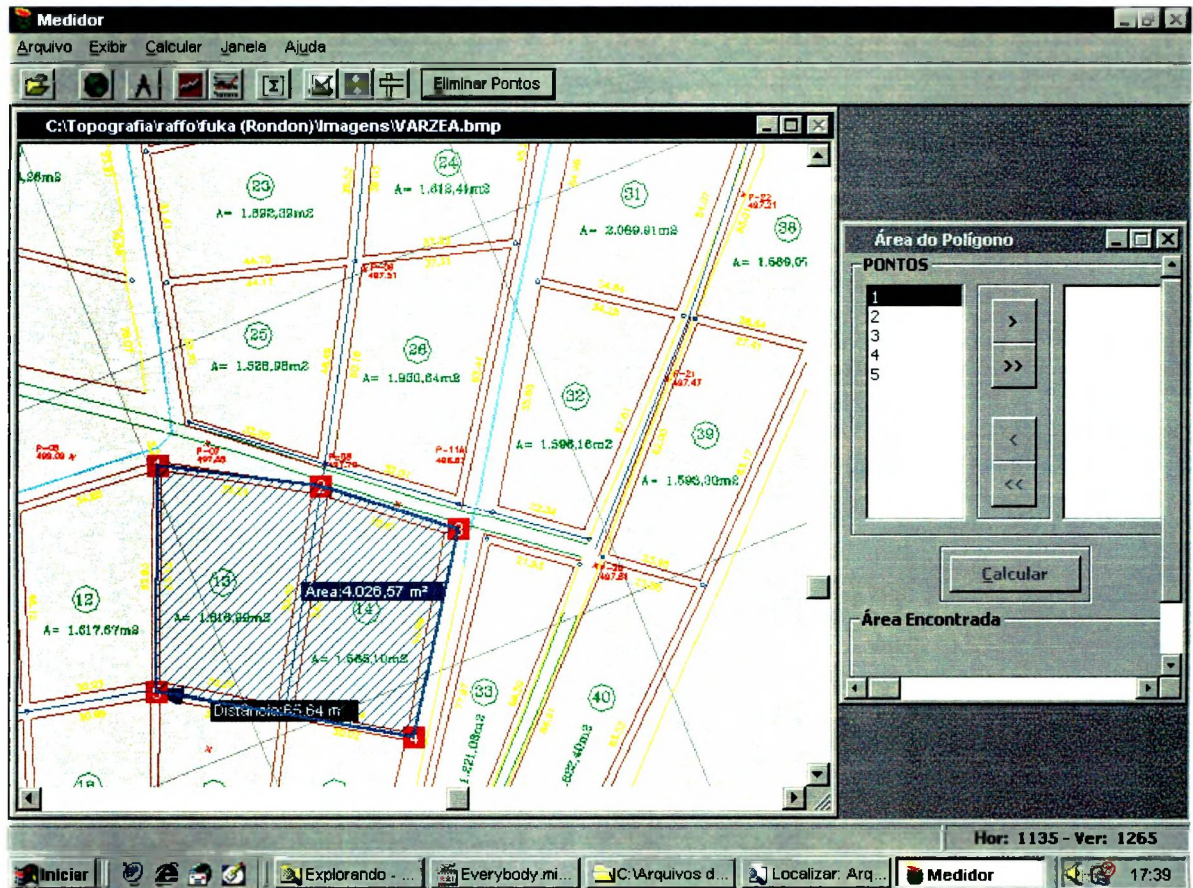


Figura 48 - Medida de área e distância sobre planta topografica rasterizada.
(Fonte:J.Raffo.2000)

Tabela 23 – Resultados de medida de distância em planta rasterizada.

Retificação virtual	Planta original	Diferença de distâncias	Diferença de distâncias em % e módulo
72,64 m	72,34 m	0,3 m	0,41
42,59 m	42,46 m	0,33 m	0,78
83,35 m	83,52 m	0,17 m	0,20
42,47 m	42,21 m	0,26 m	0,62
99,78 m	100 m	-0,22 m	0,22
65,64 m	66 m	-0,36 m	0,54
		Média	0,46
		Desvio Padrão	0,21

Tabela 24 – Resultados de medida de áreas em plantas rasterizadas.

Retificação virtual	Planta original	Diferença de áreas	Diferença de áreas em % e módulo
9994,55 m ²	10000 m ²	-5,45 m ²	0,05
2751,02 m ²	2752,18 m ²	-1,16 m ²	0,04
1569,77 m ²	1598,16 m ²	-28,39 m ²	1,78
1350,95 m ²	1349,24 m ²	1,71 m ²	0,13
4026,57 m ²	4030 m ²	-3,43 m ²	0,08
		Média	0,42
		Desvio Padrão	0,45

V CONCLUSÕES

Como resultado do trabalho desenvolvido, foi obtida uma série de conclusões que podem ser agrupadas por razões de clareza em 3 grupos: referentes a acuracidade, relativas à praticidade operacional da metodologia e concernentes aos custos da metodologia proposta.

1 CONCLUSÕES REFERENTES À ACURACIDADE DA RETIFICAÇÃO VIRTUAL

1.1 A primeira conclusão foi que, dos diferentes modelos matemáticos analisados, deveria ser adotado o das equações de projetividade, por ser este modelo o que se mostrou com menor sensibilidade aos erros instrumentais, levando-se em conta a baixa precisão esperada, decorrente do instrumental utilizado (fotografia com câmara não métrica, revelação com máquina reveladora de produção contínua, scanner padrão, computador com características médias com relação à velocidade de processamento, à capacidade da memória RAM e à placa de vídeo, ao tamanho do monitor e ao tipo de mouse). Nas Ciências Geodésicas um modelo matemático pouco sensível aos erros, como neste caso, é chamado de “robusto”.

1.2 Com relação aos erros analisados, pode ser feita uma classificação em ordem decrescente de grandeza dos mesmos:

I) O erro que se mostrou mais significativo na determinação da qualidade métrica da retificação virtual foi a incorreta identificação dos pontos de apoio. O modelo matemático usado é robusto, no entanto, os pontos de apoio devem estar isentos de erros grosseiros, como por exemplo, uma correspondência incorreta entre os pontos da fotografia e da planta topográfica. Constatou-se que este tipo de erro acontece mais facilmente do que imaginado e, por essa razão, quando se identificarem pontos correspondentes entre fotografia e planta fotográfica, o cuidado do operador deve ser redobrado.

II) O erro que se segue em importância é o provocado pelo efeito do relevo do terreno, sendo ainda maior nas fotografias oblíquas que nas verticais. Este erro pode ser reduzido a valores toleráveis, através de uma escolha adequada do afastamento das facetas (Figura 29) com relação ao terreno. Neste caso, não se deve esquecer que, ao aproximar as facetas à superfície da terra, suas dimensões diminuem, mas seu número aumenta, encarecendo o produto final.

III) Na mesma ordem de importância do anterior, encontra-se o erro provocado pela inclinação da fotografia com relação à superfície do terreno. O objetivo principal do modelo matemático escolhido, consiste em corrigir este tipo de erro. Se a identificação dos pontos de apoio for correta, assim como suas coordenadas topográficas, o software

desenvolvido na pesquisa, a partir do modelo matemático de projetividade, deve eliminar este erro e o mesmo deve ser desconsiderado.

IV) O erro nas regiões de fronteira provocado pela modelagem diferente das facetadas, demonstrou-se no item 2.5 do capítulo IV, ser menor ou igual ao erro de modelagem em cada uma das facetadas. Se estes erros estiverem dentro das tolerâncias estabelecidas, o erro de fronteira também o estará, sendo tolerável.

V) Os erros de distorção são de dois tipos: a distorção descentrada, que como já foi visto no item 2.9 do capítulo IV, é muito pequena nas câmaras 35 mm e pode ser negligenciada; a distorção radial, que tem um valor considerável, pode ser considerado corrigida parcialmente, junto com a inclinação da fotografia, através das equações de projetividade. De qualquer forma, seria importante continuar os estudos, no sentido de corrigir este erro de forma independente, para evitar erros residuais de distorção radial.

VI) Os erros provocados pela refração atmosférica e pela curvatura da Terra tem uma magnitude bem menor que os erros do tipo instrumental, especialmente pelo fato de que, em geral, os vôos fotográficos utilizados nesta metodologia são baixos. Nesta situação, a capa da atmosfera é menor e o efeito de curvatura do horizonte também. Estes erros podem ser negligenciados.

VII) Os erros provocados pelas deformações do filme, analisados no item 2.10 do capítulo IV, por terem valores bem menores dos erros instrumentais da metodologia proposta, também podem ser negligenciados.

VIII) Os erros oriundos do scanner podem ser provocados por diferentes fatores. Para o tipo de scanner utilizado no trabalho, não foram encontradas pesquisas que quantificassem esses erros. Mesmo assim, foram feitos alguns testes básicos, rasterizando quadriculas cuidadosamente construídas e, posteriormente, efetuando medidas sobre elas, não foram observados erros significativos provocados pelo scanner utilizado. Consequentemente, este erro foi desconsiderado no trabalho.

IX) Na fotogrametria efetuada utilizando-se câmaras métricas, um dos fatores mais importantes na definição do erro final nas coordenadas dos pontos da imagem, são os erros de orientação interna, que incluem o erro na distância focal e o erro no posicionamento do ponto principal. No modelo matemático utilizado neste trabalho e no software desenvolvido a partir dele, não se faz necessário o conhecimento destes elementos, já que os mesmos estão incluídos nas equações de projetividade de forma implícita e não explicitamente. Como estes dados não são informados ao sistema para o cálculo da retificação, seu possível erro não vai influir no cálculo das coordenadas dos pontos e este tipo de erro deve ser desconsiderado na metodologia proposta. Uma das razões que levaram à escolha do modelo das equações de projetividade, foi a possibilidade de efetuar os cálculos sem necessidade de conhecer os parâmetros interiores da câmara fotográfica, que nas câmaras de formato 35 mm, são desconhecidos.

1.3 A utilização de fotografia de formato 35 mm, rasterizada e, posteriormente, processada com um software de retificação virtual, como o desenvolvido neste trabalho, apresenta-se como uma tecnologia com qualidade métrica razoável, e compatível com as normas de tolerância de vários tipos de atividade que requerem o uso de medidas. Fica claro que estes resultados não podem ser comparados com medidas diretas efetuadas em campo, com instrumentos como distanciômetros, por exemplo; mas, podem e devem ser comparados com medidas efetuadas sobre documentos cartográficos existentes, com escalas similares.

1.4 Deve-se observar o ganho obtido na fotografia retificada em relação às plantas topográficas, no relativo à abundância de informações qualitativas, que normalmente as cartas não possuem.

1.5 As diferentes tabelas resultantes do estudo de casos, mostram um ganho de qualidade nas medidas efetuadas sobre a fotografia retificada em forma virtual, com relação à fotografia bruta, o que se faz especialmente notável no caso das fotografias alto-obliquas. A metodologia pesquisada permite fazer uso métrico deste tipo de fotografias, as quais, geralmente não são utilizadas com propósitos de medida, conseqüência de sua grande variabilidade de escala.

1.6 No referente a medições efetuadas na imagem de objetos bastante afastados do terreno, como por exemplo, no cálculo de áreas em lajes de altos prédios de apartamentos, deve ser efetuada uma correção de escala resultante do afastamento da

mesma com relação à faceta. Este assunto foi tratado em detalhe, no item 2.17 do capítulo IV.

2 CONCLUSÕES RELATIVAS À PRATICIDADE OPERACIONAL DA METODOLOGIA PROPOSTA

2.1. Analisando os resultados numéricos apresentados desde a Tabela 9 até a 24, pode-se observar a vantagem do uso da retificação virtual com relação ao uso de fotografia original. Este fato passa a ser mais significativo, quando comparado com fotografias oblíquas. Geralmente, estas fotos conhecidas como panorâmicas, não são usadas com fins de medida, por apresentarem grandes diferenças de escala. Com a metodologia proposta, as mesmas podem ser utilizadas. Entende-se que o ganho tecnológico nesta forma de aplicação, seja talvez o resultado mais importante deste trabalho de pesquisa.

2.2. Com relação ao software, deve-se observar que o mesmo tem-se mostrado muito amigável para o usuário. O treinamento para seu uso não tem demandado mais de meia hora, e suas exigências de hardware e software da base são podem ser preenchidas com os recursos comuns existentes no mercado. A possibilidade de seu uso é ampla, considerando-se que foi desenvolvido para operar com fotografias rasterizadas, e com plantas topográficas digitalizadas com scanner, criando uma nova alternativa de trabalho com estes materiais, sendo o mesmo de simples operacionalidade por parte do operador leigo.

2.3. Outra vantagem da metodologia proposta é a facilidade de acesso ao instrumental por ela exigido. A aeronave utilizada pode ser um avião de pequenas dimensões existente no local do levantamento, não exigindo a implantação de suporte para instalar a câmara fotográfica, já que as fotografias podem ser obtidas desde a janela, sem o vidro, para evitar as possíveis distorções.

A câmara fotográfica usada só deve verificar a condição de ser reflex, tipo de câmara utilizada normalmente pelos fotógrafos profissionais.

O pessoal envolvido no levantamento (piloto e fotógrafo) devem possuir um treinamento básico, embora não a especialização requerida para os pilotos e fotógrafos dos recobrimentos fotogramétricos.

Com relação ao trabalho de escritório, a metodologia também é simples, já que o software desenvolvido é de fácil uso, e o hardware exigido consiste de um computador com características médias e um scanner de uso comum.

2.4 O tipo de vôo fotográfico geralmente efetuado na metodologia proposta é de baixa altura, devido especialmente à distância focal das câmaras. Este fato, indiretamente contribui para aumentar o número de dias úteis para efetuar o levantamento, já que por ser baixo, muitas vezes é possível obter as fotografias em dias nublados ou com nebulosidade abundante, sem diminuir sensivelmente a qualidade das fotografias. Aumentando-se o número de dias úteis, facilita-se o cumprimento dos prazos de entrega e diminuem-se os custos.

3 CONCLUSÕES CONCERNENTES AOS CUSTOS DA METODOLOGIA PROPOSTA

Embora resulte muito difícil estabelecer valores numéricos, referentes ao quilômetro quadrado ou a hectare de levantamento fotogramétrico ou de levantamento fotográfico, já que cada serviço tem suas características particulares e o orçamento deve ser calculado em cada caso, podem ser considerados alguns fatores que servem de base para comparar os custos entre as duas metodologias.

3.1 O custo dos equipamentos destinados a levantamentos fotográficos com câmara de formato 35 mm, são sensivelmente menores que os custos de um levantamento fotogramétrico tradicional.

a) O valor das câmaras fotogramétricas é aproximadamente 100 vezes maior que o valor das câmaras reflex de 35 mm e as câmaras de formato 70 mm são entre 10 e 15 vezes mais custosas que as de 35 mm.

b) O custo das aeronaves usadas em fotogrametria é aproximadamente 10 vezes maior que o valor dos aviões de pequeno porte, que podem ser utilizados para os levantamentos fotográficos aqui tratados.

A diferença de custo de manutenção e de custos operativos entre ambos os tipos de aeronaves é bem significativa, embora a relação de custos não seja proporcional à relação de valor das aeronaves.

- c) O custo dos filmes utilizados nas câmaras de formato 35 mm é 60 vezes menor que os usados por câmaras fotogramétricas, e 20 vezes menor que o filme de 70 mm.
- d) Os custos de revelação comercial para filmes 35 mm, são bem menores que os custos correspondentes à manutenção de um laboratório para revelação de fotografias de tipo métrico.
- e) O hardware e o software requeridos na metodologia pesquisada neste trabalho, podem ter um custo de até 100 vezes menor que o correspondente ao instrumental usado na fotogrametria tradicional.

3.2 Como o capital fixo e o capital de giro que devem ser destinados ao levantamento fotogramétrico é significativamente maior que o necessário para um vôo fotográfico efetuado segundo a metodologia tratada neste trabalho, os custos financeiros e de amortização decorrentes, também são significativamente maiores.

3.3 Utilizando-se a metodologia proposta, podem ser utilizados aviões existentes no local do levantamento ou próximos dele, poupando-se os gastos provocados pelo deslocamento das aeronaves, assim como as despesas de hotel, alimentação, etc, para o piloto, o fotógrafo e pessoal de apoio.

3.4 As pequenas aeronaves sugeridas para serem utilizadas na metodologia, geralmente são mais lentas e voam mais baixo, permitindo, desta forma, diminuir o problema

provocado pelas nuvens de baixa altura e dos dias nublados, para a tomada das fotografias, aumentando o número de dias úteis para o levantamento diminuindo, desta forma, o custo do mesmo.

3.5 As fotografias aéreas de pequeno formato apresentam desvantagem com relação às de formato 230 mm, por abrangerem áreas menores. Usando-se fotografias verticais, podem ser necessárias 60 fotos de 35 mm para cobrir com a mesma escala, a mesma área fotografada com uma câmara métrica. Esta diferença pode ser diminuída a 20 fotos, utilizando-se fotografias oblíquas de formato 35 mm.

3.6 Outro inconveniente das fotografias de pequeno formato com relação a fotos de 230 mm, é a necessidade de um número maior de pontos de apoio, por ser maior o número das fotografias. Este problema poderia ser amenizado através do uso de softwares de aerotriangulação, dos quais existem vários no mercado fotogramétrico, e que poderiam ser adaptados para o uso em fotografias de 35 mm.

3.7 O software desenvolvido para a restituição virtual das fotografias, mostrou-se útil também para trabalhar com plantas topográficas rasterizadas, permitindo que o trabalho sobre plantas papel, usando instrumentos como planímetro e escalímetro, possa ser substituído pelo trabalho no computador, numa forma menos cansativa para o operador e bem mais rápida, melhorando a eficiência e diminuindo custos.

3.8 As considerações anteriores tratam, basicamente, da comparação de custos entre a fotogrametria tradicional e a metodologia proposta. Também deve-se observar que existe uma poupança indireta de toda a sociedade, através do uso por órgãos públicos mantidos pelos contribuintes, da metodologia proposta em diversas aplicações:

- Atualização da Cartografia Sistemática ou Temática, utilizando-se os dados obtidos nas fotografias retificadas virtualmente.
- Uso das fotografias retificadas em forma virtual, associadas ao software desenvolvido, com fins de cadastro municipal, especialmente urbano.
- Aplicação do software com as imagens retificadas em forma virtual, para fins fotointerpretativos em diferentes atividades como por exemplo: agronomia, florestamento, monitoramento da vida selvagem e seu habitat, geologia e mineração a céu aberto, relatórios de impacto ambiental e danos ambientais, avaliação de efeitos de incêndios, inundações e outras catástrofes, estudos multiespectrais utilizando-se filmes infravermelhos ou filtros coloridos para filmes pancromáticos, levantamentos em áreas arqueológicas e históricas, análise de uso da terra, subsídios na fase exploratória de projetos de engenharia civil e de urbanismo, assim como monitoramento durante a fase de execução dos mesmos, fonte de informações para projetos de agricultura de precisão, subsídios para planejamento urbano e regional, levantamento de dados para cadastro rural, destinado a empresas públicas ou concessionárias de serviços públicos, atuantes na área rural, e especialmente para

cadastros próprios das empresas agropecuárias, assim como, cadastros de registros públicos de imóveis ou de empresas imobiliárias.

3.9 Por último, não devem ser desconsiderados os ganhos sociais provocados pela utilização da metodologia proposta. O uso de imagens de satélite de alta resolução apresenta-se como a tendência futura, em substituição da aerofotogrametria tradicional, efetuada com fotografias verticais de formato 230 mm. Este fato, possivelmente, irá gerar crises de desemprego no setor. As fotografias panorâmicas e de baixa altura resultam bem mais difíceis de serem substituídas por imagens de satélite, e podem ser uma alternativa laboral para muitas pessoas, especialmente em empresas de pequeno porte. Deve-se observar também, que a tecnologia proposta por exigir infraestrutura bem mais simples e menos custosa que a tradicional, contribui para a descentralização da atividade fotogramétrica, aumentando a competitividade no setor e contribuindo com a distribuição de renda.

VI SUGESTÕES

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho, tem-se observado a necessidade de dar continuidade à pesquisa em diferentes aspectos que, por razões de tempo, não puderam ser aprofundados no mesmo. Os resultados obtidos sugerem continuá-las para aprimorar a metodologia. As linhas de pesquisa propostas são as indicadas a seguir:

- 1) Efetuar estudos referentes à matriz de pesos (P), usada no ajustamento pelo método dos mínimos quadrados, quando são usadas fotografias oblíquas, especialmente alto oblíquas e desenvolvimento de um software nesse sentido.
- 2) Estudar as possíveis vantagens do uso do GPS para a obtenção das coordenadas dos pontos de apoio em fotografias 35 mm, especialmente usando sistema de premarcação dos pontos de apoio.
- 3) Desenvolver um software para planejamento de vôo fotográfico de forma a otimizar a combinação de todas as variáveis que nele intervêm, assim como um software

destinado à orientação do piloto e fotógrafo, usando GPS de navegação na aeronave, para as condições de um voo fotográfico com câmara 35 mm, considerando os problemas de comunicação dentro da mesma, quando são tomadas as fotografias com a janela do avião aberta.

- 4) Efetuar estudos destinados a achar um modelo matemático, e desenvolver um software vinculado com esse modelo, objetivando calcular a altura de objetos verticais, como por exemplo, torres, árvores, prédios, etc, em fotografias oblíquas de formato 35 mm.
- 5) Aprofundar o estudo dos possíveis erros provocados pelo uso do scanner de baixo custo, e desenvolver uma metodologia de calibração destes instrumentos.
- 6) Efetuar estudos referentes a levantamentos aerofotográficos utilizando-se câmaras fotográficas digitais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGNARD, J.P.; GAGNON, P.A; NOLETTE, C. Microcomputers and Photogrammetry. A new tool: the Videoplotter. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.54, n.8, p.1165-1167, 1988.

ALBERTS, D.H. Distortion: a problem in single aerial photography. **GIS World**, v.3, n.37, Jan. 1990.

AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY, **Manual of Photogrammetry**. Fourth Edition, Virginia, 1980.

BARRY, M. **Adquisition of 35 mm oblique photographs for stereoscopic analysis and measurement**. R.T. Corporation, State College, 1993.

BARRET, E. **General methods for determining projective invariants in imagery**. Lockheed Company, Califórnia, 1991.

BENSON, M.; MEYERS, B. A camera mount and intervalometer for small format aerial photography. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.50, n.11, 1984.

BONIFACE, P.R. **PRI²SM-Softcopy production of orthophotos and DEM**. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.58, n.1, Jan. 1992.

- BUSCH, D. **Scanner para IBM PC**. Ed. Livros Técnicos, Rio de Janeiro, 1993.
- BLITZKOW, D. **Posicionamento Geodésico NAVSTAR/GPS**. Ed. USP, 1992.
- CARRE, F. **Explotación de las fotografías aéreas**. Ed. Paraninfo, Madrid, 1975.
- CLEGG, R.; SCHERZ, J.P. A comparison of 9-inch, 70 mm and 35 mm cameras. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.41, n.12, 1975.
- COOK, A.; PENDER, T. Relative accuracy of rectifications using coordinates determined from maps and the global positioning system. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.62, n.1, 1996.
- CROSTA, **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. Ed. UNICAMP, Campinas, 1992.
- DAL POZ, A. **Monorestituição: uma nova solução**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 15., São Paulo, 1991. Vol. 2, p.269-274.
- DALMOLIN, Q. **Utilização de fotografias aéreas singulares na atualização cartográfica**. Ed. UFPr, Curitiba, 1992.
- DISPERATI, A. **Obtenção e uso de fotografias de pequeno formato**. Ed. UFPr, Curitiba, 1991.
- DOMENECH, F.V. **Topografia**. Ed. CEAC, Barcelona, 1981.
- DOYTSHER, Y.; HALL, J. Fortran programs for coordinate resection using and oblique photograph and high-resolution. **DTM-CAGEO**, v.21, n.7, 1995.

- EVANS, B. **Acquisition of 35 mm oblique photographs for stereoscopic analysis and measurement.** Resource Technologies Corporation, New York, 1993.
- FOTOGRAFIA: Manual Completo de Arte e Técnica. Ed. Time-Life, 1976. (Edição em Língua Portuguesa da Abril S.A, 1978).
- GEMAEL, C. **Geodésia Elementar.** Diretório Acadêmico de Engenharia do Paraná, Curitiba, 1959.
- GEMAEL, C. **Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas.** Ed. UFIR, 1984. Curitiba.
- GHOSH, S. **Analytical Photogrammetry.** Ed. Pergamon Press, Oxford, 1988.
- GHOSH, S. **Calibration of an amateur camera for various object distances.** Ed. Laval Univ., 1991.
- GOUVEIA, I. **Atualização cartográfica de pequenas áreas urbanas.** Fator Gis-Out, Sagres Editora Ltda., Curitiba, 1994.
- GRAHAM, R. Small format aerial surveys from light and microlight aircraft. **Photogram Recorder**, v.12, n.71, 1988.
- GRUEN, A W. Digital Photogrammetry Processing Systems: Current Status and Prospects. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.55, n.5, 1989.
- GUIDE to GPS positioning. Canadian GPS Associates, Canadá, 1986.
- HODGSON, M. What cell size does the computed slope. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.61, n.5, 1995.

HOHLE, J. Experiences with the production of digital orthophotos. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.62, n.10, 1996.

HOLTZ, R. **Camera Calibration Problems**. Bell Laboratories, New Jersey, 1990.

HOOD, J.; LANDER, L.; CHAMPION, R. Image processing techniques for digital orthophoto Production. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.55, n.9, 1989.

HORNSTEIN, J. **Scanner: digitalização de imagens**. Ed. Campus, RJ, 1996.

HUBERTY, B.; ANDERSON, C. Coal pile inventory using 35 mm oblique terrestrial photogrammetry. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.56, n.8, 1990.

INSTITUT GÉOGRAPHIQUE NATIONAL. **Les photographies obliques**. Paris, 1988.

IHRIG, E. **Aldus Photostyler**. LTC Editora, Rio de Janeiro, 1994.

KANATANI, K. **Computational Projective Geometry**. Guma University, Japan, 1991.

KANATANI, K. **Hypothesizing and testing geometries of image data**. Guma University, Japan, 1991.

KARARA, H. **Non-Metric Cameras**. Department of Civil Engineering. University of Illinois, Illinois, 1992.

KARARA, H. **Accuracy Aspects of Non-Metric Imageries**. Department of Civil Engineering. University of Illinois, Illinois, 1985.

KARAVA, H.M.; ABDEL-AZIZ, Y.I. Accuracy aspects of non-metric imageries. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.55, n.5, 1989.

KENNIE, T. **Engineering surveying technology**. Ed. John Wiley, New York, 1990.

KIENNEGGER, E. Assessment of a Wastewater Service Charge by Intergrating aerial photography ang GIS. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.58, n.11, 1992.

KÖLBL, O. Metric or non-metric camera. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.42, n.1, 1976.

KONECNY, G. Methods and possibilities for digital differential rectification. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.45, n.6, 1979.

KUMAR, K. **Photogrammetry Updating of Cartographic Data**. ITC Journal, Holanda, 1987/4.

LIGHT, D.L. Characteristics of Remote Sensors for Mapping and Earth Science Applications. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.56, n.12, 1990.

LITTON, A. **Is your scanner accurate enough for GIS ?** GIS World, August 1996.

LOCK, C. **Utilização de câmaras de pequeno formato na atualização de mapeamentos**. UFSC, Florianópolis, 1994.

LONG, D.; McCARTHY, J. Cessna aircraft cabin door moment for photographic and videographic cameras. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, n.52, n.11, 1986.

- LUSCHER, H. **Elementos de Fotogrametria**. Edit. Labor, Barcelona, 1926.
- MANUAL OF PHOTOGRAMMETRY. Fourth Edition, Ed. American Society of Photogrammetry, USA, 1980.
- MASON, S.; RUTHER, H.; SMIT, T. Investigation of the KODAK DC-5460 digital camera for small-area mapping. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, n.52, 1997.
- MAUZER, G. Maximizing digital orthophoto use. GIS World, Fort Collins–USA, December, 1995.
- MEDEIROS, J. **Fotografias Aéreas Verticais 35 mm. Aplicações na área florestal**. INPE, 1986.
- MEDEIROS, J.; BATISTA, G. Fotografias Aéreas Verticais 35 mm. Aplicações na área florestal. **Revista Brasileira de Cartografia**, n.3, 1988.
- MILLER, S.B.; EGLVA, U.V.; HELAVA, K.D. Softcopy Photogrammetric Workstation. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.58, n.1, p.77-83, Jan. 1992.
- MOLENAR, M. A PC digital monoplottting system for map updatin. ITC Journal, Holanda, 1987/4.
- MORRIT, F.; MIKHAIL, E. **Photogrammetry**. Ed. Harper & Raw, New York, 1980.
- MURAI, S. **A study on analytical calibration for non-metric cameras**. University of Tokyo, Japan, 1988.

- MURATORI, L. **O uso de Scanners para digitalização de cartas topográficas.** UNESP, Presidente Prudente, 1995.
- MURRAY, K.J. Medium and small format photography for the maintenance of national mapping. **Photogram. Rec.**, v.13, n.73, 1989.
- NALE, D. **How accurate is digital orthophotography.** GIS World, Fort Collins–USA, December, 1995.
- NEEDHAN, T.; SNITH, J. Consequences of enlarging 35 mm aerial photography. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.50, n.8, 1984.
- NEWBY, P.R.T.; WALKER, A.S. The use of photogrammetry for direct digital data capture as Ordnance Survey. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.47, n.3, 1986.
- NEWMAN, N. **Topographic map revision using DTM.** ITC Journal, Holanda, 1992/3.
- NIEDZWIEDZ, W.R. Assessing permit compliance in residential areas using color 35 mm aerial photography. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.56, n.2, 1990.
- NIELSEN, L. **Projective Invariants.** Edit. of Institute of Technology, Suécia, 1991.
- NORDEN, G. **Método de perspectiva práctica.** Ed. José Montesó, Barcelo, 1954.
- NOVAK, K. Rectification of digital imagery. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.58, March 1992.

- NUMAN, N.; AWDA, G.; THANNOON, M. **Topographic map revision in Northern Iraq usign DTM and orthophotos**. ITC Journal, Holanda, 1992/3.
- OLIVEIRA, C. de. **Dicionário Cartográfico**. 3.ed., Rio de Janeiro: IBGE, 1987.
- PAREDES, E.A. **Introdução à Aerofotogrametria para Engenheiros**. CNPq, Brasília-DF, CONCITEC (Maringá-PR), Universidade Estadual de Maringá, v.1, 1986.
- QUINTANILHA, J.A. Erros em bases digitais de dados espaciais para uso em sistema de informação geográfica. São Paulo, 1996. Tese de Doutorado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- ROBERTS, A. **Practical photogrammetry from 35 mm aerial photography**. Ed. Department of Geography, Canadá, 1991.
- ROBERTS, A.; HISCOCKS, P. A computed based camera control system. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.47, 1981.
- ROBERTS, A.; GRISWOLD, L. Practical photogrammetry from 35 mm aerial photography. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.52, n.4, 1986.
- SANCHEZ, R.; BRIZUELA, A.; CARÑEL, G. Georreferenciación de fotografías aéreas para GIS empleando navegadores GPS. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, n.49, 1996.
- SCHENK, T.; TOTH, C.K. Conceptual issues of softcopy photogrammetric workstation. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.58, n.1, 1992.
- SCHENK, T.; TOTH, C.K. Conceptual issues of softcopy. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.58, n.1, p.101-110, Jan. 1992.

SCHWIDEFSKY, K. *Fotogrametria terrestre y aérea*. Editora Labor, Barcelona, 1960.

SKALET, C.D. Implementation of Softcopy Photogrammetric Workstations at the U.S. Geological Survey. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.58, n.1, p.57-63, Jan. 1992.

SOUTO-FONTES, L.P. Especificações e Normas Gerais para Levantamentos GPS. **Fator GIS**, n.5, abril 1994.

SPENCER, R.D. Map intensification from small format camera photography. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.44, n.6, 1978.

THAPA, K.; BOSSLER, J. Accuracy of spatial data used in Geographic Information Systems. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.58, n.6, Jun. 1992.

THIEL, P. Are digital orthophotos for you? GIS World, Fort Collins–USA, December, 1995.

THING, S. **Aldus PhotoStyler**. Ed. LTC, Rio de Janeiro, 1993.

ULUPINAR, F. **Constraints for interpretation on line drawings under perspective projection**. University of Southern California, 1990.

VEJA, I. **Turbo Pascal 5.0**. Ed. LTC, Rio de Janeiro, 1990.

WARNER, W. **A complete small-format aerial photography system for GIS data entry**. ITC Journal, n.2, 1989.

WARNER, W. Creating digital terrain models from 35 mm photography. **The Photogrammetric Records**, n.13, 1989.

- WARNER, W. **Accuracy and small-format surveys: the influence of scale and object definition on photo measurements.** ITC Journal, Holanda, 1990-1.
- WARNER, W. Improving interior orientation for small standard camera. **The Photogrammetric Record**, n.13, 1991.
- WARNER, W. **Mapping monoscopically.** ITC Journal, Hollanda, 1992.
- WARNER, W. **Errors associated with standart digitizing tablet.** ITC Journal, Holanda, 1991/2.
- WARNER, W. Evaluating a low-cost, now metric aerial mapping system for vaste sit investigator. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.60, n.8, 1994.
- WARNER, W.; ANDERSEN. O. Consequence of enlarging small-format imagery via copier. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.58, n.2, 1992.
- WARNER, W.; CARSON, W.; BJORKELO, H. Relative accuracy of monoscopic 35 mm oblique photography. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.59, n.1, 1993.
- WARNER, W.; GRAHAM, R.; READ, R. Small format aerial photography. Ed. Interprint Ltd., Malta, 1996.
- WELCH, R.; JORDAN, T. Analytical non-metric close-range photogrammetry for monitoring stream channel erosion. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.49, 1983.
- WOODCOCK, W. Aerial reconnaissance and photogrammetry with small camera. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.42, n.4, 1976.

WOLF, P. **Calibration of non-metric cameras**. University of Wisconsin, 1991.

XIAOMING, X. **Digital image matching procedure based on local descriptor**. Ed. Graz University of Technology, Graz, 1994.

ZENG, X. **A general solution of a closed-form cameras espace resection**. The Central South University of Technology, China, 1992.

ZENG, X.; WANG, X. A general solution of a closed-form cameras espace resection. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.58, n.3, 1992.

A digitalização deste documento foi possível graças ao investimento do Programa de Pós-graduação em Geografia Humana (PPGH-FFLCH-USP) e realizada com recursos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Essa ação integra as atividades de comemoração dos 50 anos do PPGH no ano de 2021. Para mais informações sobre o PPGH e sua história, visite a página do programa: <http://ppgh.ffeilch.usp.br/>.



1971-2021