

UERJ

Dissertação de Mestrado em Geomática

**VISUALIZAÇÃO E MEDIÇÃO ESTEREOSCÓPICAS DE IMAGENS
FOTOGRAMÉTRICAS DIGITAIS**

Autor: Marcelo Teixeira Silveira

Orientador: Jorge Luís Nunes e Silva Brito, Ph.D.

Co-orientador: Orlando Bernardo Filho, D.Sc.

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Computação

Área de Concentração Geomática

Maio - 2005



**VISUALIZAÇÃO E MEDIÇÃO ESTEREOSCÓPICAS DE IMAGENS
FOTOGRAFÉTRICAS DIGITAIS**

Marcelo Teixeira Silveira

Dissertação submetida ao corpo docente da Faculdade de Engenharia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Computação - Área de Concentração Geomática.

Orientador: Jorge Luís Nunes e Silva Brito, Ph.D.

Co-orientador: Orlando Bernardo Filho, D.Sc.

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Computação

Área de Concentração: Geomática

Rio de Janeiro

Maio - 2005

SILVEIRA, MARCELO TEIXEIRA

Visualização e Medição Estereoscópicas de
Imagens Fotogramétricas Digitais [Rio de
Janeiro] 2005.

xxii, 129 p. 29,7 cm (FEN/UERJ, M.Sc.,
Engenharia de Computação – Área de
Concentração Geomática, 2005)

Dissertação - Universidade do Estado do Rio
de Janeiro - UERJ

1. Fotogrametria
2. Estereoscopia

I. FEN/UERJ II. Título (série)

FOLHA DE JULGAMENTO

Título: VISUALIZAÇÃO E MEDIÇÃO ESTEREOSCÓPICAS DE IMAGENS
FOTOGRAMÉTRICAS DIGITAIS

Candidato: Marcelo Teixeira Silveira

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Computação
Área de Concentração Geomática

Data da defesa: Maio de 2005

Aprovada por:

Jorge Luís Nunes e Silva Brito, PhD., UERJ (Orientador)

Orlando Bernardo Filho, DSc., UERJ (Co-orientador)

João Araújo Ribeiro, D.Sc., UERJ

Leonardo Castro de Oliveira, D.Sc., IME

Agradecimentos

A CAPES, pela bolsa oferecida durante o curso.

Aos professores Jorge Nunes e Orlando, pelo excelente e exemplar apoio na elaboração desta dissertação.

Aos professores da Geomática em geral, que contribuíram de alguma forma para minha formação.

Ao professor da graduação de Engenharia da UERJ, Henrique Goldfeld, pelo estágio de docência.

À Maria Elisabeth, Isabela, Carlos e Alex, da secretaria da Geomática da UERJ, que sempre me ajudaram no que precisei.

Ao funcionário Sidney da engenharia cartográfica da UERJ, que mediu os pontos no restituidor.

Ao professor Leonardo, pela cuidadosa e minuciosa revisão no texto desta dissertação.

Aos meus pais, Murilo e Tereza, ao meu irmão Guilherme e aos meus tios Jorge e Alzira, que são os grandes responsáveis pela minha formação educacional e humana.

Resumo da Dissertação ou Monografia apresentada à FEN/UERJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.) em Engenharia de Computação Área de Concentração Geomática

VISUALIZAÇÃO E MEDIÇÃO ESTEREOSCÓPICAS DE IMAGENS FOTOGRAMÉTRICAS DIGITAIS

Marcelo Teixeira Silveira

Maio/2005

Orientador: Jorge Luís Nunes e Silva Brito, DSc., UERJ

Co-orientador: Orlando Bernardo Filho, DSc., UERJ

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Computação - Área de Concentração Geomática

A fotogrametria tem como objetivo principal a reconstrução de um espaço tridimensional a partir de imagens bidimensionais. O processo de obtenção de imagens está sujeito à perturbações, uma vez que os sensores, de modo geral, estão sujeitos às condições ambientais, resultando em pequenas distorções nas imagens finais.

O projeto E-FOTO tem como objetivo criar uma estação fotogramétrica digital educacional e gratuita, passando por todas as etapas necessárias para a reconstrução do modelo tridimensional do terreno, incluindo a correção das distorções das imagens fotogramétricas.

O objetivo geral desta dissertação é agregar ao projeto E-FOTO um módulo que realize medidas de diferença de altura entre pontos em imagens fotogramétricas digitais, de acordo com o conceito de paralaxe. Essas medições são efetuadas em modo monoscópico e estereoscópico, utilizando-se técnicas de separação espacial e espectral na construção de imagens tridimensionais, com a visualização destas através de estereoscópio de bolso e anaglifo. Obteve-se uma média de erros próxima a um metro, quando comparados aos resultados do sistema ora proposto com os obtidos por um restituidor analógico.

Palavras-chave: Fotogrametria, Anaglifo, Medição Estereoscópica.

Abstract of Dissertation presented to FEN/UERJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.).

STEREOSCOPIC VISUALIZATION AND MESSURE OF DIGITAL PHOTOGRAMMETRIC IMAGES

Marcelo Teixeira Silveira

May/2005

Advisors: Jorge Luís Nunes e Silva Brito

Orlando Bernardo Filho

Program Computing Engineering - Geomatic.

Photogrammetry aims to the reconstruction of the object-space from the 2D image space. This problem is an ill-posed problem which deals with huge matrices. Those matrices come from the scanning of analog images and are the primary source of data for digital photogrammetry.

This work presents a stereoscopic visualization and measurement system for using with digitized frame, aerial images. This system was developed in the Masters Program of Geomatics of the Rio de Janeiro State University (UERJ).

The visualization and measurement system was designed and implemented to integrate the E-FOTO project. The E-FOTO project aims to implement a digital photogrammetric workstation in a free-software (GNU) approach.

Both anaglyph and optical stereovision approaches are available in the current version of the visualization and measurement system. The user can also choose the spectral filters according to the colors of the anaglyph lenses.

Since image inner orientation parameters are known, the measurements of point coordinates in the digital image pixel system has permitted to compute the "x" parallaxes. Object height differences are driven from the parallaxes and their difference.

The results driven from the system proposed were compared with those from a Kern PG-2 stereo-plotter. The statistical analysis of the results has proven the feasibility and reliability of the system being proposed.

Key-words: Stereo Vision from digital imagery; height difference from digitized-frame images; Anaglyph Vision System

Sumário

Capítulo	Pág
1 - Introdução	1
1.1 - Estrutura da dissertação	4
2 - Fundamentos Teóricos	6
2.1 - Visão Estéreo	6
2.1.1 - Paralaxe Estereoscópica	7
2.1.2 - Distorção Radial de Imagens	9
2.1.3 - Técnicas de Visão Estéreo a Partir de Imagens Bidimensionais	10
2.1.3.1 - Anaglifo	11
2.1.3.2 - Estereoscópio	13
2.1.3.3 - Olho Nu	15
2.2 - Fotogrametria	16
2.2.1 - Objetivos da Fotogrametria	17
2.2.2 - Obtenção de Imagens Fotogramétricas	18
2.2.2.1 - Câmara Fotogramétrica	19
2.2.2.2 - Resoluções das Imagens Fotogramétricas Analógicas	22
2.2.2.3 - Aquisição de Imagens Fotogramétricas Digitais	24
2.2.2.4 - Resoluções das Imagens Fotogramétricas Digitais	25
2.2.3 - Fotogrametria Digital	27
2.3 - O Cálculo da Paralaxe em Imagens Fotogramétricas	28
2.3.1 - Elementos Geométricos de uma Fotografia Vertical	28
2.3.2 - A Influência do Relevo em Imagens Fotogramétricas	29
2.3.3 - Projeção de um Objeto em uma Imagem Fotogramétrica	31
2.3.4 - Paralaxe	33
2.4 - O Estado da Arte	37
2.4.1 - Estação Fotogramétrica Digital	38
2.4.2 - Utilização de Estereoscopia em Medições Espaciais	40
2.5 - Conclusões do Capítulo 2	40
3 - Análise e Projeto do Sistema de Visualização e Medição Estereoscópicas	41

Sumário

Capítulo	Pág
3.1 - O Projeto E-FOTO	41
3.1.1 - A Medição Estereoscópica no Contexto do E-FOTO	42
3.2 - Projeto do Sistema	45
3.2.1 - Objetivos	46
3.2.2 - Pré-requisitos	48
3.2.3 - Componentes do Sistema	50
3.2.4 - Análise dos Requisitos do Sistema	50
3.2.4.1 - Imagens Fotogramétricas Digitais	51
3.2.4.2 - Certificado de Calibração da Câmara	51
3.2.4.3 - Orientação Interior	52
3.2.4.4 - Fotobase	52
3.2.4.5 - Armazenamento de Dados	54
3.2.4.6 - Imagens Monoscópicas	54
3.2.4.7 - Medição Automática de Pontos	55
3.2.4.8 - Visualização Estereoscópica	55
3.2.4.9 - Imagens em Anaglifo	57
3.2.4.10 - Coordenadas em Milímetros	58
3.2.4.11 - Medições de Altura	59
3.2.5 - Interface com o Usuário	59
3.3 - Conclusões do Capítulo 3	61
4 - Implementação	62
4.1 - O Ambiente do Sistema	62
4.1.1 - Utilização do Sistema	64
4.2 - A Construção do Sistema	67
4.2.1 - Variáveis e Métodos do Sistema	68
4.2.2 - Visão Monoscópica	71
4.2.3 - Visão em Anaglifo	78
4.2.4 - Visão Estereoscópica	84

Sumário

Capítulo	Pág
4.2.5 - Barra de Paralaxe	85
4.3 - Conclusões do Capítulo 4	86
5 - Testes e Análises de Resultados	87
5.1 - Material Utilizado	88
5.2 - Primeiro Teste: Diferentes Resoluções Espaciais	88
5.3- Segundo Teste: Imagens Normalizadas	91
5.4 - Terceiro Teste: Restituídor Analógico	92
5.5 - Quarto Teste: Imagens 16 e 17 versus 17 e 18	93
5.6 - Resultados dos Quatro Primeiros Testes	93
5.7 - Quinto Teste: Distorções Quanto à Distância da Base	96
5.8 - Sexto Teste: Correlação	97
5.9 - Sétimo Teste: Medições em Estéreo	99
5.10 - A Influência de Erros na Identificação de Pontos Homólogos	99
5.11 - Avaliação Estatística dos Resultados	105
5.12 - Conclusões do Capítulo 5	108
6 - Conclusões	109
Referências Bibliográficas	111
Apêndice A - Orientação Interior	115
Apêndice B - Imagens Fotogramétricas	117
Apêndice C - Pontos Coletados	120
Apêndice D - Dados Utilizados nos Testes	123
Apêndice E - Certificado de Calibração da Câmara	125
Apêndice F - Compilação do Programa em C++ Builder	127
Apêndice G - Cálculo da Resolução Ideal para Digitalização de Imagens	128
Apêndice H - Correlação	130
Apêndice I - Tabelas de Medições	132
Apêndice J - Pontos de Controle	147
Apêndice L - Formulação Para Análise Estatística dos Testes	149

Sumário

Capítulo	Pág
Apêndice M - Otimização da Janela de Pesquisa	153
Apêndice N - Outras Técnicas de Visão em Estéreo	156

Capítulo 1

Introdução

Os conceitos de fotogrametria se iniciam em 1492, quando Leonardo Da Vinci começou a investigar as projeções centrais e perspectivas. Outros cientistas deram continuidade aos estudos de Da Vinci. Porém, o primeiro grande passo dado na criação da fotogrametria como ciência foi dado pelo cientista Johann Heinrich Lambert, que desenvolveu modelos matemáticos para uma imagem em perspectiva, utilizando métodos de ressecção para localizar um ponto no espaço de onde a imagem foi obtida. A primeira fotografia levou cerca de oito horas de exposição, onde N. J. Niépce compôs o diapositivo da imagem. Em 1837, Jacques Mandé Daguerre utilizou um método conhecido como modelo de Daguerre e obteve a primeira fotografia. Em 1840, o termo “fotogrametria” começou a ser utilizado pelos cientistas, em particular Dominique François Jean Arago, um geodesta francês que propôs o uso da fotogrametria no *French Arts* e na Academia de Ciências. A partir de 1850, a fotogrametria se dividiu em quatro períodos, cada um com cerca de 50 anos de duração. O primeiro período é chamado de “tábua de aviação fotogramétrica”, e foi de 1850 a 1900. Depois surgiu a “fotogrametria analógica”, que foi de 1900 a 1960. De 1960 aos presentes dias desenvolveu-se a “fotogrametria analítica”. O período mais recente da fotogrametria é o da “fotogrametria digital”, o qual desenvolveu-se a partir da década de 90.

Em 1849, Aimé Laussedat, conhecido como o “pai da fotogrametria”, foi a primeira pessoa a utilizar fotografias terrestres para mapeamento topográfico. Em 1858 ele começou a fazer experimentos com fotografias aéreas com balões e em 1862 teve seu trabalho aceito pela Academia de Ciências de Madrid, nascendo assim a fotogrametria. Com a invenção do avião e do restituidor analógico, surge a fotogrametria analógica. O primeiro estéreo-planígrafo, um instrumento do tipo restituidor analógico, foi inventado por Edouard Deville, em 1896. O instrumento era bastante complexo e por conta disto, foi pouco utilizado. Em 1907, Ritter von Orel ajudou a desenvolver o primeiro estéreo autógrafo, com uma pequena companhia emergente conhecida como Zeiss. Estes inventos continuavam a ser complexos.

Com a invenção do computador, significativos avanços foram obtidos na fotogrametria, uma vez que cálculos complexos poderiam ser realizados de forma mais rápida e eficaz pela computação numérica. O primeiro cientista a entrar nesta nova fase da fotogrametria foi o Dr Hellmut Schmidt que, em 1953, desenvolveu os princípios de fotogrametria analítica em

multi-estação, utilizando noções de matrizes e soluções pelo método de mínimos quadrados. Em 1957, trabalhando pelo Conselho de Pesquisas do Canadá, Uki Vilho Helava inventou o restituidor analítico. Este instrumento foi o primeiro a ser servo-controlado, diferente dos ótico-mecânicos construídos até então. Helava deu continuidade às pesquisas até a fase atual, a fotogrametria digital.

A fotogrametria digital preocupa-se em automatizar os processos fotogramétricos, principalmente levando-se em conta que os equipamentos de informática hoje em dia permitem o rápido processamento do grande volume de dados que surge em consequência destes processos. Tem-se, como ideal, a criação de uma “máquina de mapeamento automático”, capaz de reconhecer automaticamente as feições do terreno (como prédios, pontes e outras construções) e extrair as formas do relevo da região a ser mapeada. Porém, o problema proposto não é tão simples assim, uma vez que não há um espaço 3D tão “bem comportado”. Pelo contrário, o relevo da superfície terrestre apresenta-se com inúmeras discontinuidades, o que torna praticamente impossível seu mapeamento automático. Surgem então várias condições de contorno para sua solução, exigindo a interação do homem em vários processos. Hoje em dia, pode-se dizer que o estado da arte em fotogrametria digital é o mapeamento semi-automático, ou seja, os processos implementados tentam ser automáticos, porém, ainda exigem a supervisão e eventual intervenção humana nos mesmos (E-FOTO 2003).

Na fase atual em que se encontra, a estação fotogramétrica analógica que ocupa grande espaço, é cara e complexa de ser utilizada, foi substituída pelo computador, onde todos os passos de análise de imagens fotogramétricas já podem ser dados, a um custo menor e de manuseio mais simples. Apesar de custar menos que dispositivos analógicos, uma estação fotogramétrica ainda apresenta elevados custos, no que diz respeito à parte de *software*. Além disto, as empresas desenvolvedoras destes *softwares* não divulgam o código fonte dos seus programas, tornando-se assim estes sistemas “caixas-pretas”. A tabela 1.1 apresenta o custo de diversos tipos de estações fotogramétricas.

Tabela 1.1 - Diversos custos em uma estação fotogramétrica.

Dispositivo	Componentes	Preço (US\$)
Restituído Analógico	Restituído, computador e software.	15.000,00*
DiAP (ISM)	Softwares, computador e acessórios.	80.000,00
SSK (ZI Imaging)	Softwares, computador e acessórios.	23.300,00
DPW770 (Leica)	Softwares, computador e acessórios.	70.000,00
Geomatica Fundamentals Education Suíte (Threetek) - 1 Cópia	Pacote de software mais simples.	1.000,00
Geomatica Total Education Suíte (Threetek) - 1 Cópia	Pacote de softwares completo.	3.000,00
Computador	Base da estação fotogramétrica digital.	1.000,00*
Anaglifo	Visão 3D.	1,00*

* preço estimado. Fontes: Cruz (2003), Raivel e Roque (2003).

A tabela 1.2 discrimina os custos da estação DiAP.

Tabela 1.2 - Discriminação dos custos da estação fotogramétrica DiAP.

Item	Preço (US\$)
Software	60.500,00
Dispositivos de entrada	4.000,00
Acessórios para visão em estéreo	1.500,00
Computador sugerido	5.000,00
Instalação e treinamento	9.000,00

De acordo com a tabela 1.1, observa-se que o custo de uma estação fotogramétrica digital composta por computador, software e acessórios é mais elevado que o custo de um restituído analógico. Observa-se também, de acordo com a tabela 1.2, que o preço do *software* é o item mais caro da estação. Além de pagar caro por um *software*, o usuário poderá encontrar problemas como falta de suporte por parte do desenvolvedor, além da questão de adequação do *software* ao seu problema específico. Observa-se ainda que cada estação tem que pagar ao fornecedor uma licença de uso dos programas.

O programa de mestrado em engenharia de computação da UERJ, área de concentração geomática, dá continuidade, desde junho de 2004, ao desenvolvimento do projeto de pesquisa denominado E-FOTO, iniciado no IME em 2003, cuja proposta é desenvolver uma estação fotogramétrica livre e gratuita, para fins educacionais, onde o usuário, além utilizar o sistema, poderá adequá-lo ao seu problema específico. Este projeto é desenvolvido dentro do conceito de geomática, ou seja, um projeto interdisciplinar, onde estudantes e profissionais das mais

diversas áreas englobadas no projeto interagem de forma única e eficiente. Desta forma, gera-se o domínio da tecnologia utilizada nos sistemas do tipo “caixa-preta” existentes.

Uma estação fotogramétrica tem importância na área militar, na cartografia geral, na construção civil, ou seja, em todas as áreas que necessitam de geoinformação. A partir desta estação, pode-se construir mapas de uma região e reconstruir todo o espaço em questão, utilizando-se imagens fotográficas, tais como fotografias aéreas. As vantagens de se obter produtos a partir de imagens aéreas são inúmeras, como dados sobre regiões de difícil acesso, pouco levantamento de dados no campo, menor tempo de obtenção dos dados etc.

A partir de uma fotografia aérea, somente é possível se obter as coordenadas bidimensionais de um objeto, ou seja, a posição X e Y em relação ao terreno. Porém, para a obtenção da terceira coordenada do sistema, é necessário duas ou mais fotografias tomadas de posições distintas em locais pré-determinados.

Esta dissertação tem como objetivo geral a análise, o projeto e a implementação de um sistema de visualização e medição estereoscópicas de uma estação fotogramétrica digital. Como objetivo específico, pretende-se agregar um módulo de visualização e medição estereoscópica ao projeto E-FOTO, a partir de imagens fotogramétricas aéreas, tornando possível medir a altura dos diferentes objetos presentes em uma cena. Propõe-se ainda o domínio da tecnologia de visão estereoscópica aplicada ao projeto E-FOTO, de soluções baseadas em *software* livre, como visão estereoscópica por separação espacial e a visão em anaglifo.

1.1 - Estrutura da dissertação

Esta dissertação está dividida em seis capítulos e em anexos.

O capítulo 2 é a parte teórica do projeto, passando pelos conceitos de estereoscopia, visão em anaglifo, modelos matemáticos de fotogrametria necessários para a obtenção de coordenadas de objetos no espaço objeto a partir do espaço imagem. O objetivo desse capítulo é apresentar as tecnologias existentes para a solução do problema em si, inclusive servindo de base para futuras melhorias e adaptações que por ventura possam vir a ser necessárias.

O capítulo 3 destina-se a análise e projeto do sistema proposto, apresentando o projeto E-FOTO e explicando minuciosamente como foi desenvolvido, quais as propostas do projeto e o estado atual de desenvolvimento. Em seguida, é apresentado como o projeto desta dissertação se encaixa dentro do projeto E-FOTO. Nesse sentido, são mostrados todos os requisitos

necessários à construção do projeto desta dissertação, assim como os problemas que poderão ser encontrados e solução do sistema como um todo.

O capítulo 4 descreve a implementação do sistema, as ferramentas e sistemas operacionais utilizados para se atingir o objetivo. Para tal, é feita uma análise de cada parte separadamente, associando à parte teórica correspondente, e apresentando as técnicas mais apropriadas que serviram para solucionar os problemas encontrados.

O capítulo 5 apresenta uma série de testes com o sistema implementado, analisando os dados obtidos nas diversas medições. São propostos diversos testes, com o objetivo de averiguar problemas como a diferença de resolução de imagens, o efeito do uso de imagens normalizadas, a diferença entre medição estereoscópica e monoscópica e a comparação com dados provenientes de um restituidor analógico.

O capítulo 6 finaliza a dissertação, apresentando as conclusões sobre o sistema e sugestões para futuros trabalhos.

Os apêndices apresentam os fundamentos teóricos para orientação interior, necessária para o sistema; as imagens fotogramétricas utilizadas no sistema; os dados utilizados nos testes; as imagens dos pontos utilizados nos testes; o certificado de calibração da câmera utilizada para a obtenção de imagens e uma tabela explicando a finalidade dos módulos do sistema, bem como a maneira de compilar o programa.

Capítulo 2

Fundamentos Teóricos

2.1 - Visão Estéreo

O ser humano está imerso num mundo tridimensional, ou seja, os objetos estão presentes num cenário que apresenta três grandezas distintas. Essas grandezas são normalmente mensuradas em relação a um sistema de eixos cartesianos, de orientação levógira ou destrógira.

A visão humana começa pela formação de imagens individuais na retina de cada olho. Estas imagens são bidimensionais, ou seja, a percepção de uma das dimensões é perdida. Imaginando-se uma pessoa olhando de frente para um objeto, chama-se de largura a dimensão que está na direção leste-oeste em relação ao observador, altura a direção norte-sul e profundidade à direção perpendicular ao plano do objeto que o “atravessa”.

Cada um dos olhos do observador irá perceber as dimensões relativas à largura e altura do objeto observado, porém não perceberá a dimensão de profundidade. Porém, cada olho observa a mesma cena de um ângulo diferente do outro. As imagens de cada olho são fundidas no cérebro, proporcionando a sensação da dimensão de profundidade perdida nas imagens individuais. Isto só é possível graças ao conceito de paralaxe estereoscópica. A figura 2.1 mostra como funciona o sistema de visão humana. Nesta figura, cada olho vê a jovem de um ângulo diferente. As imagens são fundidas no cérebro, dando a impressão de profundidade. Este sistema é chamado de visão estereoscópica.

Uma simples experiência pode mostrar como de fato funciona este sistema. Se um dos olhos for tapado e uma tentativa de tocar-se com a ponta do dedo em uma quina de mesa for feita, tem-se a dificuldade de acertar o alvo, uma vez que a sensação de profundidade é perdida. Mas quando se tenta fazer o mesmo com os dois olhos abertos, acerta-se com muito mais facilidade.

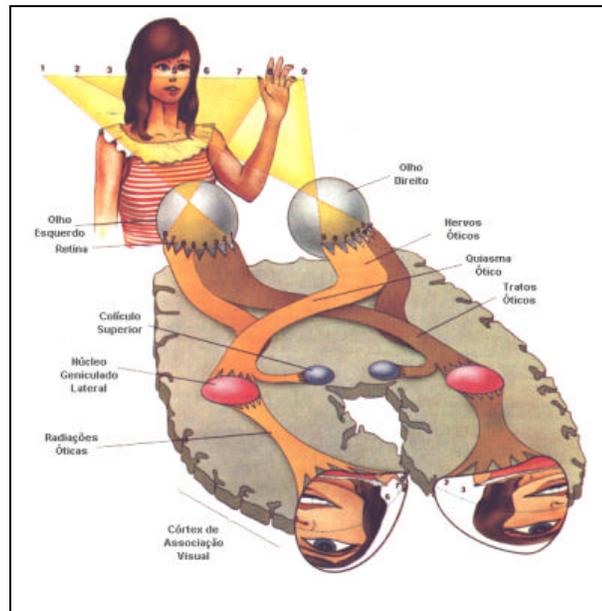


Figura 2.1 - Sistema de visão humana. Fonte: U.A.Madrid (2004).

2.1.1 - Paralaxe Estereoscópica

Paralaxe estereoscópica é definida como o deslocamento aparente da posição de um corpo ou objeto em relação a um ponto ou sistema de referência, causado pela mudança de ponto de observação (ASP, 1960).

Se um observador tomar como referência a quina de uma parede de uma sala, estender seu polegar apontado para cima entre a quina e os seus olhos e o visualizar alternadamente, com um só olho aberto, irá perceber que o alinhamento entre seu dedo e a quina da parede irá se deslocar horizontalmente. Este deslocamento aparente entre o dedo e a quina é chamado de paralaxe estereoscópica. Quanto mais próximo do observador estiver o polegar, maior será este deslocamento horizontal. Desta forma, o cérebro humano é capaz de ter a noção de profundidade num cenário real.

O deslocamento aparente somente acontece paralelo à linha reta que liga o centro de um olho ao outro. No exemplo citado anteriormente, o observador estava com a linha dos olhos paralela à linha do chão. Porém, se o observador inclinar sua cabeça 45 graus para a esquerda e repetir a experiência, ter-se-á paralaxes horizontal e vertical, em relação ao sistema de referência da parede. No sistema de referência do observador, entretanto, continuará havendo somente a paralaxe horizontal.

A figura 2.2 mostra a experiência realizada com a cabeça do observador na posição paralela ao chão da sala. A impressão dada ao observador quando abre seu olho esquerdo é de que seu dedo moveu-se para a direita, em relação ao olho direito. A figura 2.3 mostra a mesma experiência feita com a cabeça inclinada 45 graus à esquerda. Desta vez, a impressão dada é que o dedo subiu e desloca-se para a direita, quando aberto o olho esquerdo.

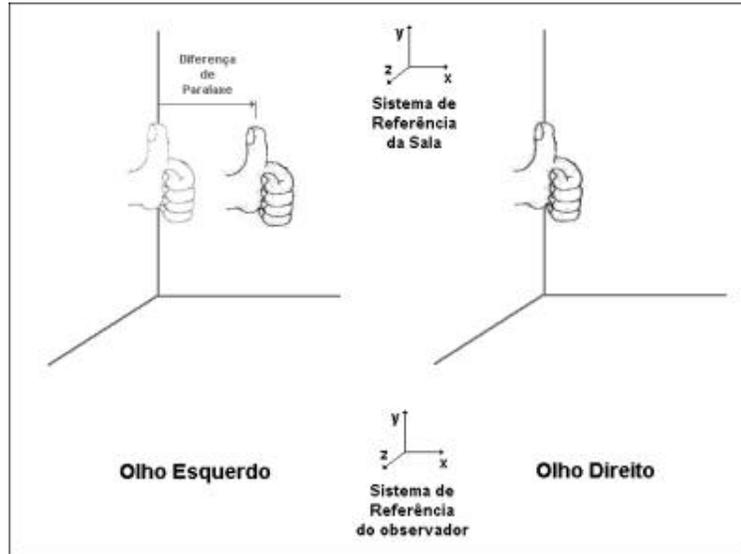


Figura 2.2 - Diferença de paralaxe em x. Adaptado de Anderson (1982).

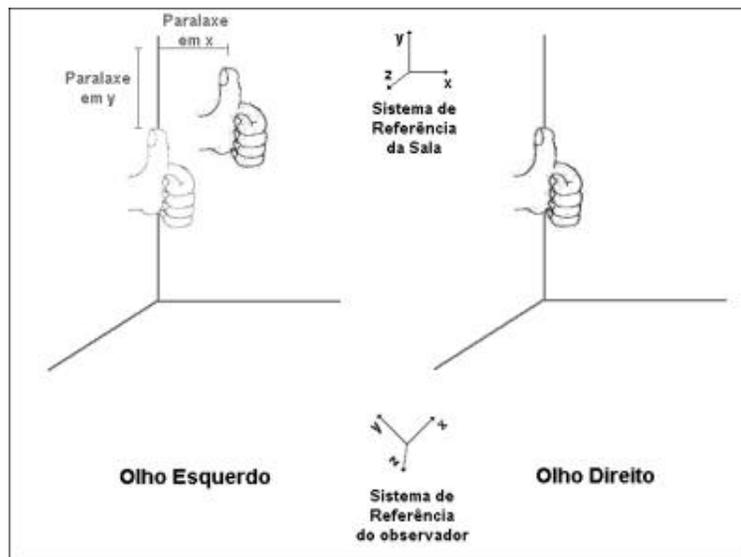


Figura 2.3 - Diferença de paralaxe em x e y. Adaptado de Anderson (1982).

A paralaxe absoluta está relacionada ao deslocamento do mesmo ponto fixo do objeto em relação ao centro focal de cada olho. Seria, por exemplo, entre o topo do dedo polegar e o centro focal. A quina da parede também se desloca em relação ao centro focal de cada olho. O

que o cérebro percebe é o deslocamento relativo entre os dois objetos. O deslocamento entre pontos de referência distintos é chamado de diferença de paralaxe.

2.1.2 - Distorção Radial de Imagens

As imagens percebidas pelo ser humano são projeções cônicas, ou seja, os raios luminosos advindos dos diversos pontos de uma cena convergem para o centro focal do olho. Com isso, os objetos se deformam conforme se afastam do centro perspectivo. Conforme a figura 2.4, os objetos que se afastam do centro perspectivo do observador, representado pela letra C, vão sofrendo deformações na imagem projetada na retina.

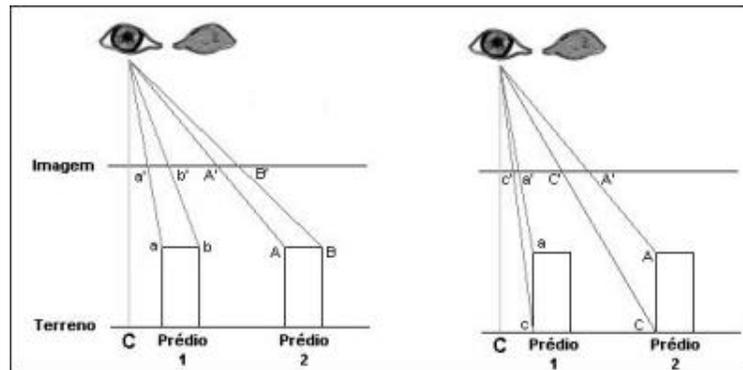


Imagem 2.4 - Distorção Radial.

Pode-se observar que os pontos pertencentes ao plano dos objetos, que estão paralelos ao plano de visão, vão se afastando conforme se afastam do centro da imagem. Por outro lado, as distâncias entre os pontos pertencentes aos demais planos vão aumentando conforme o afastamento do centro. Isto dá a impressão que os objetos vão tombando conforme se afastam do centro de perspectiva. Observando a figura 2.4, conclui-se que quanto mais alto for o objeto observado, ou seja, quanto maior for a distância entre os pontos a e c, maior será o efeito do tombamento da imagem. A distorção radial acontece tanto no eixo x quanto no eixo y do plano de visão do observador. Portanto, o efeito de tombamento é radial em torno do centro C.

Se o observador da figura 2.4 abrir seu outro olho, e supondo que seu sistema de coordenadas coincida com o sistema do plano observado, o centro de perspectiva irá se deslocar na direção do eixo x . As distorções em relação ao eixo y permanecerão inalteradas,

pois a coordenada do centro de foco em relação à y é a mesma. A impressão para o observador é que os objetos têm um tombamento diferente em relação ao eixo x .

2.1.3 - Técnicas de Visão Estéreo a Partir de Imagens Bidimensionais

O sistema de visão humana pode ser simulado através de imagens fotográficas. Para tal, é necessário fotografar os objetos de pontos de vista distintos, de forma que haja uma uniformidade na escala das imagens e uma superposição longitudinal de 60 % ou mais. Depois, é necessário utilizar técnicas apropriadas para conseguir visualizar duas fotografias, simultaneamente, de forma que o resultado seja a sensação de uma imagem tridimensional.

A tomada da foto pode ser feita em relação a uma paisagem, por uma pessoa qualquer. Também pode-se tomar fotografias a bordo de um avião, ou até mesmo, a partir de sensores orbitais. Observa-se que a tomada de foto feita por uma pessoa poderá ser bastante precisa em relação ao posicionamento da câmara, pois se dispõe de ferramentas que podem garantir a coordenada precisa x , y e z da câmara. De forma distinta, o controle preciso do posicionamento de uma aeronave, uma vez que fatores como correntes de ar e a perícia do piloto podem alterar as coordenadas desejáveis do avião, exige o uso de sistema de posicionamento por satélites e navegação inercial, tornando as imagens aéreas de elevado custo de obtenção.

Se uma pirâmide for colocada no chão e duas fotografias forem tiradas movendo-se a câmara apenas na direção do eixo x , conforme a figura 2.5a, será observado o efeito de tombamento do topo da pirâmide somente neste eixo. Se porventura a câmara se mover em y também, o efeito de tombamento também será notado nesta direção, conforme mostra a figura 2.5b. Na figura 2.5a, chama-se de paralaxe estereoscópica o movimento aparente do topo da pirâmide. No exemplo mostrado, este efeito só é percebido quanto à x . Com a mudança de tomada da figura 2.5b, o efeito de paralaxe é percebido tanto na direção x quanto na y .

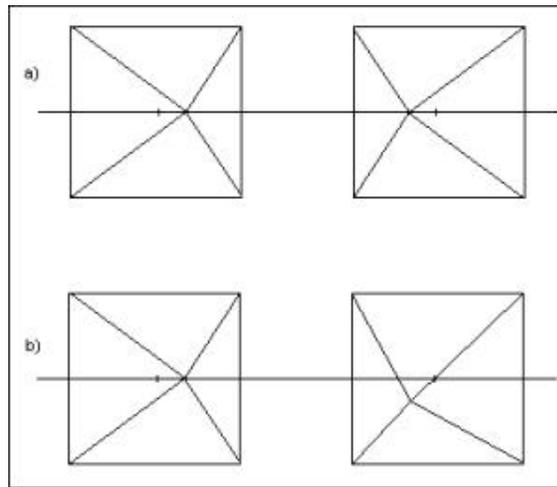


Figura 2.5 - Imagens aéreas de pirâmides.

Se o olho esquerdo conseguir captar somente a imagem da esquerda na figura 2.5a e o olho direito conseguir captar somente a imagem da direita, a imagem é fundida no cérebro e tem-se a sensação de uma pirâmide tridimensional. Por mais que se deseje separar cada foto para ser observado por um olho, não é trivial consegui-lo. Para isto existem algumas técnicas, que serão discutidas a seguir.

2.1.3.1 - Anaglifo

Uma imagem colorida possui componentes de cor vermelha, azul e verde. São chamadas de cores primárias. A combinação destes componentes de cores gera todas as cores conhecidas na natureza. Uma imagem em tons de cinza, popularmente conhecida como em “preto e branco”, possui um equilíbrio de intensidade entre os componentes de cor.

A técnica de anaglifo consiste em separar as imagens através de um óculos especial, com um filtro de cor em cada lente. O objetivo deste filtro é deixar passar certas componentes de cor e bloquear as demais. O filtro vermelho permite que somente as componentes de cor primária vermelha o atravessem. Para completar as demais cores, o outro filtro deverá ser de cor ciano, uma mistura de verde com azul, ou seja, as cores primárias que faltam. Pode-se construir os óculos com outras cores, desde que não haja coincidência de cores primárias nos dois filtros. Por exemplo, um óculos com filtros azul e amarelo, que é a combinação de verde e vermelho, poderia ser construído. Normalmente, os óculos são construídos com filtros vermelhos para o olho esquerdo e ciano para o olho direito.

As imagens também deverão ser filtradas, a fim de serem captadas pelo respectivo olho. A imagem do olho esquerdo sofre a seguinte transformação: $I_e(R,G,B) \rightarrow I_e(R,0,0)$, onde somente a informação da componente de cor vermelha é mantida, anulando-se as demais. Por conseqüência, a imagem do olho direito sofre a seguinte transformação: $I_d(R,G,B) \rightarrow I_d(0,G,B)$. Por final, as imagens devem ser sobrepostas, formando uma imagem final $(R_eG_dB_d)$. Deve-se lembrar que as imagens deverão ser obtidas de pontos de vistas diferentes. Na figura 2.6, observa-se o processo descrito. A imagem do olho esquerdo contém somente a componente vermelha, enquanto que a outra possui as componentes de cor verde e azul. Quando as imagens são fundidas e o anaglifo utilizado, cada olho perceberá a imagem correspondente, dando a impressão de três dimensões. Acima da imagem fundida, observa-se um par de óculos anaglifo. Nota-se que as imagens foram tomadas de ângulos distintos, com deslocamento horizontal igual à distância interpupilar média humana.

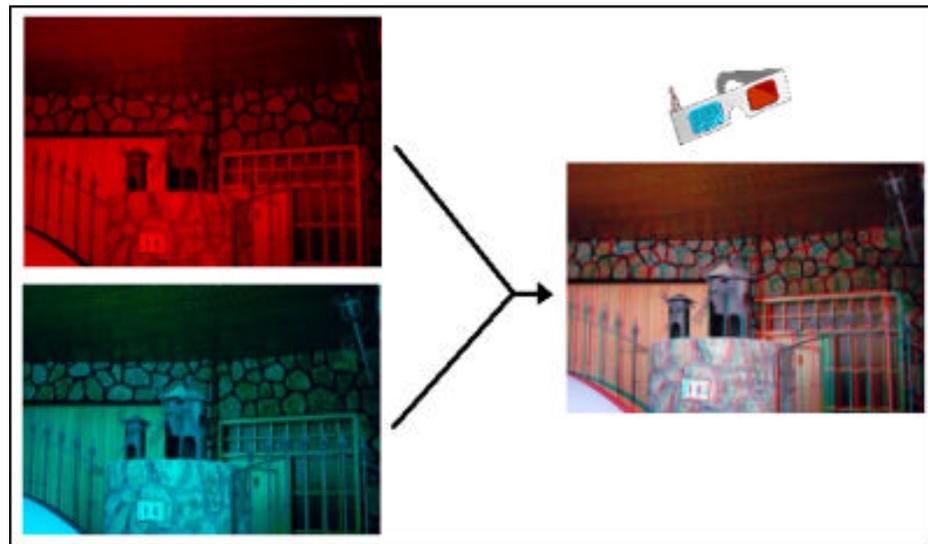


Figura 2.6 - Composição de imagens por anaglifo. Fonte: U.A.Madrid (2004).

Quando um ponto vermelho está mais à direita que seu homólogo ciano, a impressão que dá ao observador é que ele está em um plano acima do plano-objeto. Quando eles coincidem, a impressão dada é de que esta coincidência se dá no plano-objeto. Por fim, quando o ponto vermelho está à esquerda do seu ponto homólogo, a impressão dada é que este ponto está em um plano abaixo do plano-objeto. Pode-se aplicar com sucesso esta técnica para imagens em tons de cinza. O processo é rigorosamente o mesmo utilizado para as imagens coloridas.

2.1.3.2 - Estereoscópio

O estereoscópio é um instrumento óptico especialmente desenvolvido para separar as imagens em cada olho. Consiste de uma base fixa de 130 mm de altura e lentes separadas de 65 a 70 mm, distância correspondente à média da distância interpupilar do ser humano. O seu esquema de construção pode ser visto na figura 2.7a.

Diferentemente do processo do anaglifo, as imagens deverão estar afastadas uma da outra e colocadas sob o estereoscópio exatamente à distância de separação das lentes. Cada lente só permitirá a visão da respectiva imagem situada abaixo dela, conforme a figura 2.7b. Desta forma, consegue-se o isolamento do par de imagens para seu respectivo olho e, por consequência, a fusão da imagem tridimensional no cérebro.

Na imagem da pirâmide da figura 2.5a, ao separar os centros focais dos objetos a 6,5 cm e alinhar os planos, conforme a figura 2.8, tem-se uma visão tridimensional quando vista no estereoscópio. Qualquer erro no alinhamento e na separação das fotos implicará em uma imagem distorcida. O alinhamento deverá ser feito separando-se pontos homólogos a 6,5 cm. Normalmente, o ponto escolhido está deslocado devido à paralaxe e esta distância deverá ser real, de acordo com a projeção do ponto no plano da imagem marcado no centro da pirâmide na figura 2.8. Portanto, na prática este alinhamento é feito a partir do resultado da imagem, ou seja, ajustam-se as imagens, obtendo o resultado ótimo quando a imagem for fundida corretamente no cérebro.

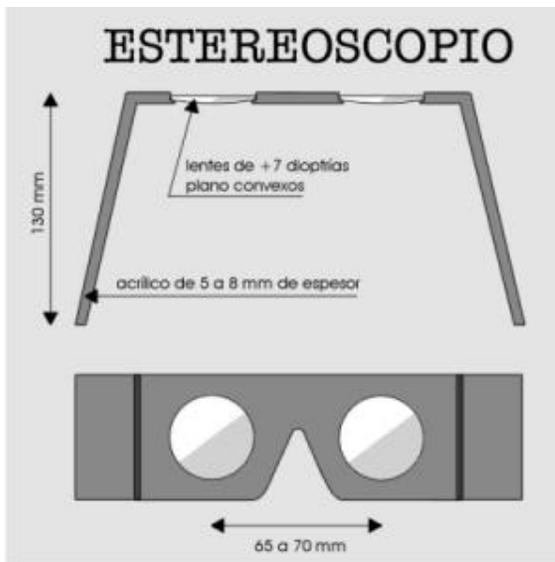


Figura 2.7a - Estereoscópio de bolso.
Fonte: U. de la Republica (2004).

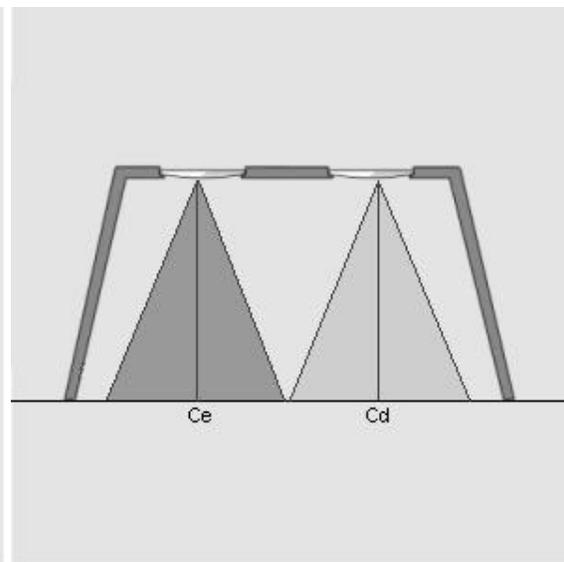


Figura 2.7b - Campo de visão das lentes do estereoscópio.
Fonte: U. de la Republica (2004).

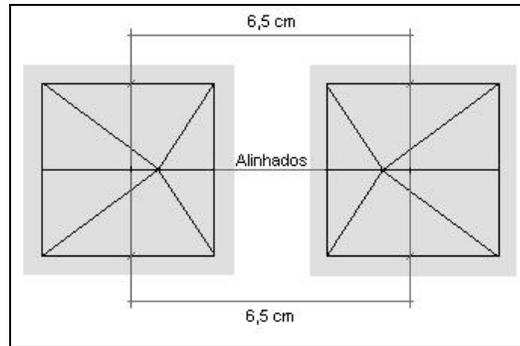


Figura 2.8 - Alinhamento das imagens

O estereoscópio apresentado na figura 2.7a é chamado de estereoscópio de lentes simples ou estereoscópio de bolso. Quando as imagens excedem o campo visual do estereoscópio, estas deverão se sobrepor, com a junção passando exatamente no centro do estereoscópio. Se for necessário visualizar áreas fora do campo de visão das lentes, ter-se-á que movimentar as imagens e, por consequência, realinhá-las.

Imagens aéreas têm normalmente medidas de 23 x 23 cm. Como a separação entre pontos é de aproximadamente 6,5 cm, estas imagens irão se sobrepor. Este tamanho proporciona o desconforto de mover as imagens sempre que se deseja obter visão estéreo de regiões fora do campo de visão das lentes. Para contornar este inconveniente, foi desenvolvido um estereoscópio que fosse capaz de proporcionar visão estéreo com separação das imagens superior ao tamanho da foto. Com isto, as duas imagens ficam completamente visíveis. Este estereoscópio é chamado de estereoscópio de espelhos. Seu princípio consiste em desviar o centro focal das lentes do observador, através de espelhos planos, conforme mostra a figura 2.9.

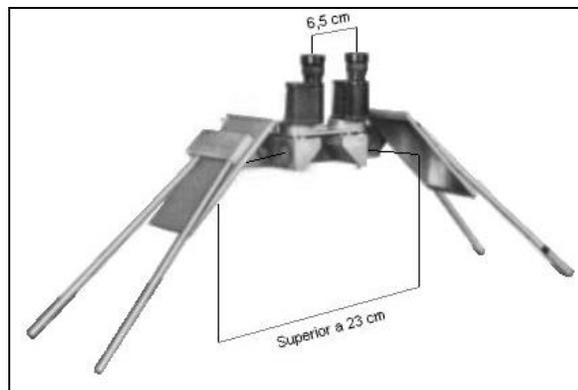


Figura 2.9 - Estereoscópio de espelhos. Fonte: E. de Uruguay (2004).

O alinhamento de imagens no estereoscópio de espelhos é feito de forma distinta do estereoscópio de bolso. Primeiro, deve-se encontrar a base instrumental. Para isto, deve-se colocar sob o estereoscópio uma folha de papel em branco, com largura superior a esta distância. Em seguida, através das oculares do aparelho, fecha-se um dos olhos e marca-se uma cruz no papel, no lado respectivo do olho aberto. Com os dois olhos abertos, passa-se o lápis para o lado do olho que estava fechado e tenta-se encontrar a cruz com a ponta do lápis. Quando a cruz é encontrada, marca-se uma nova cruz sobre a primeira. A distância entre as duas cruzes marcadas corresponde à base instrumental do estereoscópio de espelhos. Uma vez descoberta a base instrumental, as fotos devem ser alinhadas a esta distância conforme a figura 2.8. Por fim, deve-se alinhar o aparelho com as linhas que separam os dois centros focais paralelas, obtendo sucesso quando as imagens se fundirem no cérebro.

As vantagens do estereoscópio de bolso são o seu tamanho, que o torna portátil, e o preço, que é bem inferior ao estereoscópio de espelhos.

2.1.3.3 - Olho Nu

É possível separar as imagens também sem a ajuda de dispositivos. Porém, a separação das imagens não é obtida simplesmente olhando-se para elas. Este processo utiliza imagens separadas uma da outra, assim como o estereoscópio.

Normalmente quando uma pessoa está observando uma imagem, os centros focais de seus olhos coincidem com o plano da imagem. O ser humano é capaz de mudar voluntariamente o plano de interseção dos centros focais dos olhos, conforme a figura 2.10. Com isso, cada centro focal dos olhos vai se separando um do outro no plano da imagem. A consequência disto é a separação visual das imagens.

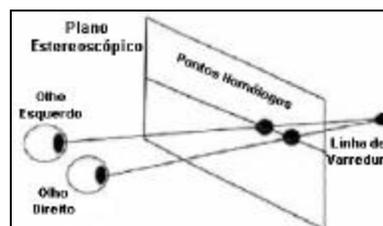


Figura 2.10 - Foco ocular. Fonte: Bruno Eduardo Madeira (2004).

Este processo é obtido como se o observador estivesse imaginando o foco de visão num plano além do plano da imagem, relaxando a visão, de acordo com a figura 2.11a. Pode-se

obter sucesso também focalizando um objeto antes da imagem, conforme a figura 2.11b. Este objeto pode ser até mesmo o dedo do observador. Para isto, o observador deverá focalizar o dedo e deixar a imagem como segundo plano. Aproximando e afastando o dedo, o observador irá ajustar a calibração da imagem formada ao fundo. Para muitas pessoas, este é um processo de maior facilidade.

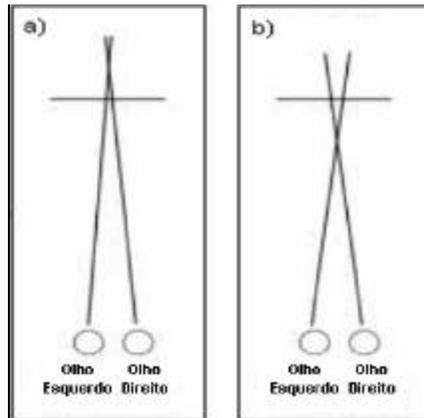


Figura 2.11 - Foco depois e antes do plano da imagem. Fonte: U.A.Madrid (2004).

Os processos de obtenção de imagens tridimensionais a olho nu não são tão fáceis de serem executados, além do fato de haver pessoas que têm um grau de dificuldade maior em obtenção do resultado. Ademais, o observador não poderá perder o foco obtido, senão a imagem tridimensional desaparece. Este processo pode acarretar efeitos colaterais, como dor de cabeça ao observador, além do fato de que o observador não poderá perder o controle sobre o foco. Além disto, acresça-se o fato de que a visão estéreo a olho nu não tem aplicações para fins fotogramétricos. O apêndice N apresenta outros sistemas de visualização estereoscópica.

2.2 - Fotogrametria

O vocábulo “fotogrametria” vem de *photon*, que significa luz; *graphos*, escrita; e *metron*, medição. Isto significa dizer que fotogrametria é medição feita em fotogramas.

Existem diversas abordagens e discussões em torno do conceito de fotogrametria, mas o consenso geral a define como “ciência e tecnologia de se obter informação confiável, através de imagens adquiridas por sensores remotos” (E-FOTO, 2003). Ciência, uma vez que os processos de captação da energia eletromagnética, do qual os raios luminosos são formados,

são estudados, bem como a análise dos resultados obtidos com os mesmos. Tecnologia, porque a utiliza para tornar os resultados mais rápidos e eficazes para o usuário. Informação confiável, de acordo com as normas e padrões vigentes e dentro de tolerâncias e acurácias desejáveis. Imagens, onde registros ópticos podem ser classificados como “a reprodução aparente de um objeto, formado por um sistema de lentes ou espelhos, a partir de ondas luminosas refletidas, refratadas ou difratadas” (Encyclopædia Britannica, 2001). Sensores Remotos, onde um sensor é “qualquer equipamento capaz de transformar alguma forma de energia em um sinal passível de ser convertido em informação sobre o ambiente, sem contato físico entre este sensor e os alvos de interesse” (Novo, 1992).

2.2.1 - Objetivos da Fotogrametria

A fotogrametria traz diversos benefícios à cartografia, tais como a redução do trabalho de campo para levantamento de coordenadas, reduzindo os custos; o menor tempo na obtenção de dados, uma vez que maioria da informação está na fotografia; grande área de abrangência; etc. Entretanto, o objetivo principal da fotogrametria é “a reconstrução de um espaço tridimensional, chamado de espaço objeto, a partir de imagens bidimensionais, chamadas de espaço imagem” (E-FOTO, 2003).

Esta reconstrução é uma transformação entre sistemas, isto é, a transformação do sistema bidimensional das fotografias para o sistema tridimensional que representa o espaço objeto. Normalmente utiliza-se um sistema bidimensional próprio de cada câmara, com origem aproximadamente no centro de seu quadro, e de coordenadas determinadas por calibração da câmara em laboratório, antes de sua utilização. O sistema tridimensional, no caso mais comum, representa o sistema de coordenadas do terreno sobre o qual se obtém as imagens, o qual pode estar sendo representado em coordenadas geodésicas (latitude, longitude e altura ou altitude), planialtimétricas (E, N e altitude) ou cartesianas (X, Y, Z). Para outros tipos de alvos, como monumentos ou objetos pequenos, pode-se criar um sistema de referência próprio, de origem arbitrária.

A partir da reconstrução do espaço tridimensional do terreno, através da conversão de dados entre os sistemas, e da obtenção do modelo numérico de elevações (MNE), pode-se reconstruir sinteticamente este espaço em um computador. Assim, o usuário poderá fazer diversas análises em um terreno qualquer como se estivesse realmente no local, sem custos de deslocamentos e sem enfrentar problemas de acesso ao mesmo.

2.2.2 - Obtenção de Imagens Fotogramétricas

A obtenção de imagens fotogramétricas, bem como a digitalização de imagens analógicas, é um objeto de estudo fundamental, pois a fotografia é a principal base de dados da fotogrametria. As imagens utilizadas na fotogrametria são em geral aéreas e são obtidas através de câmaras fotográficas, onde se classificam como analógicas ou digitais e métricas ou não-métricas.

A câmara analógica é aquela em que a imagem obtida é registrada sobre uma película de filme, onde o mesmo é exposto à luz, através da abertura do obturador, por um tempo em torno de 1/100 segundos. O tempo de exposição é aumentando quando o cenário tem quantidade luz insuficiente para um registro pelo filme, e diminuído quando há presença excessiva de luz no cenário. O filme é então revelado, obtendo-se a imagem da cena impressa em um papel fotográfico.

A câmara digital obtém a imagem através de sensores fotoelétricos, que transformam a informação de luz em informação elétrica. Esta informação é armazenada em forma de dígitos binários em uma memória digital presente na mesma. O formato dos dígitos binários segue padrões de formatos de imagens de computador, tais como bitmap e JPEG. Assim, somente é preciso passar a informação desta câmara para um computador, através de uma interface de comunicação.

As câmaras métricas são aquelas que apresentam condições para que um profissional possa resgatar informações quanto às coordenadas dos objetos na foto. Por outro lado, as câmaras não métricas são as câmaras voltadas para obtenção de imagens sem nenhum tipo de informação métrica da mesma.

As fotografias aéreas são obtidas a partir de um avião e tomadas a uma certa altura, de acordo com a escala desejada. A relação entre a altura de vôo e a escala utilizada é dada pela equação 2.1.

$$E = f / H \quad (2.1)$$

Onde:

- E - Escala;
- f - Distância focal calibrada;
- H - Altura de vôo.

Para se obter bons resultados na reconstrução do espaço tridimensional, as fotografias aéreas deverão ter cerca de 60% de sobreposição longitudinal, conforme a figura 2.12.

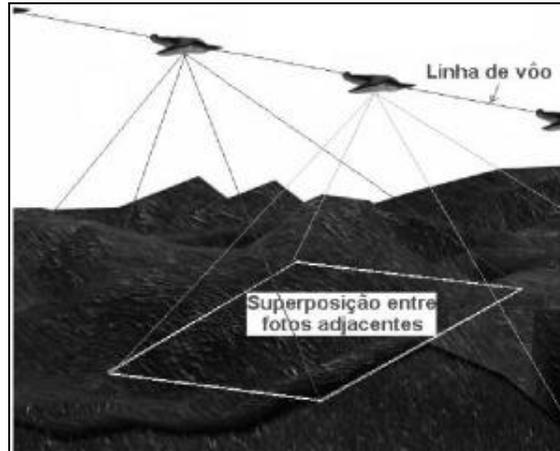


Figura 2.12 - Sobreposição de imagens fotogramétricas.

Fonte: E-FOTO (2003).

2.2.2.1 - Câmara Fotogramétrica

Câmara fotogramétrica é a câmara que possui características especiais, como maior rigor métrico nos parâmetros que a regem. Desta forma, obtém-se informação métrica e precisa das imagens obtidas por essas câmaras.

As câmaras fotogramétricas podem ser aéreas, como também terrestres, usadas em fotogrametria arquitetônica. As partes principais de que se compõe uma câmara fotogramétrica são o cone e o magazine, de acordo com a figura 2.13.

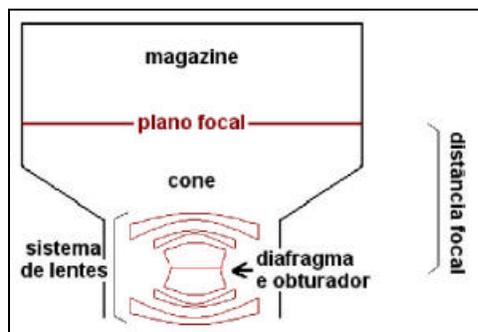


Figura 2.13 - Esquema de uma câmara fotogramétrica.

Fonte: E-FOTO (2003).

No cone, localiza-se o sistema de lentes da objetiva, o diafragma, o obturador, o suporte de filtros e a esquadria de registros. O sistema da objetiva é um conjunto de lentes que deve direcionar os raios luminosos vindos do exterior em direção à imagem que será formada no plano focal. O obturador é responsável pela abertura necessária do diafragma (um conjunto de cortinas circulares concêntricas), de modo a se obter uma exposição desejada.

Pode-se colocar filtros sobre a lente, caso se deseje algum efeito sobre a fotografia. O filtro absorve parte ou certo tipo de energia que passa por ele. Porém, a presença de filtros obriga a um maior tempo de exposição na tomada da fotografia. A esquadria de registros comporta várias informações marginais que virão a ser impressas em cada uma das fotografias. As mais importantes são as marcas fiduciais, que definem um sistema rígido de coordenadas da imagem. Outros dados que podem ser impressos são o número da foto, a empresa contratante, o vôo, dentre outros.

O plano focal é onde se forma a imagem e onde se posiciona o filme. Nas câmaras digitais, há uma matriz de detectores nessa região da câmara, isto é, no lugar do filme. Já no magazine, localiza-se o sistema de aderência a vácuo e de troca de filmes. Ele está somente presente nas câmaras analógicas.

Toda câmara fotogramétrica vem acompanhada de um certificado de calibração, ou seja, um documento que atesta os valores precisos de determinados parâmetros fundamentais da câmara, que serão devidamente utilizados nos processos fotogramétricos posteriores. Um exemplo de certificado encontra-se na figura 2.14. Os parâmetros principais da câmara são:

- Tipo de câmara e tipo de lentes - possui informações sobre o nome do fabricante e modelo da câmara, bem como das lentes utilizadas;
- Distância Focal Nominal - de acordo com a lei de Gauss, a distância focal f é expressa pela equação $1/f = 1/i + 1/o$, onde i é a distância entre a lente e a imagem e o a distância entre o objeto (cenário) e a lente, conforme a figura 2.15. Caso a distância-objeto seja muito maior que a distância-imagem, o valor de f é constante e igual à distância-imagem. Em geral, f assume valores nominais de 88 mm, 150 mm ou 300 mm;
- Ângulo de Abertura - é o ângulo formado pelos raios luminosos captados de maior ângulo em relação à normal do centro da lente da câmara, que na figura 2.15 é representado pela letra grega α ;
- Quadro do Negativo - indica o tamanho da fotografia final. Normalmente mede 23 x 23 centímetros.

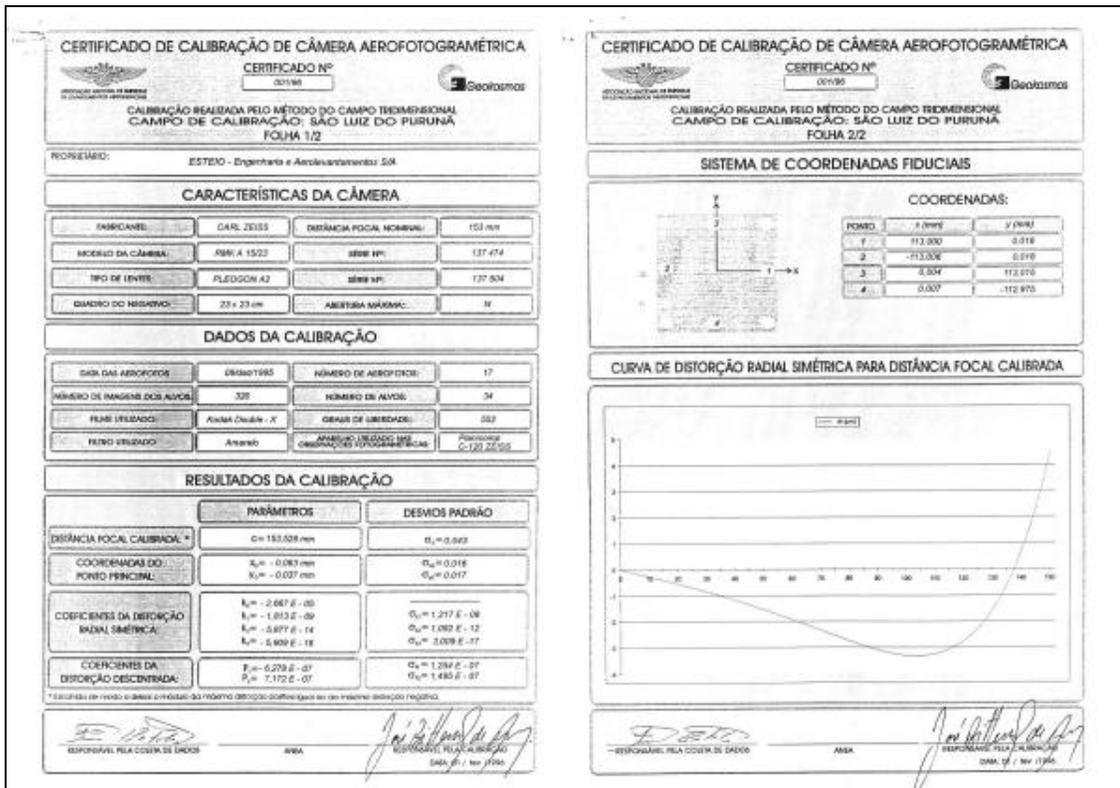


Figura 2.14 - Certificado de calibração de câmara fotogramétrica. Fonte: IPP (1997).

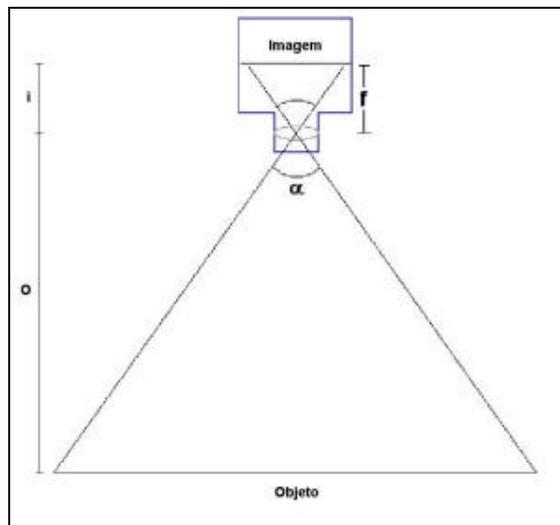


Figura 2.15 - Sistema de feixes em uma câmara fotogramétrica. Fonte E_FOTO (2003).

As marcas fiduciais vêm impressas na fotografia e tem como finalidade servir de referência métrica na imagem. São marcas grandes e pretas, com um pequeno ponto no centro

(figura 2.16). Localizam-se nas margens da fotografia, podem ser quatro ou oito e estar no centro ou nos cantos destas margens.

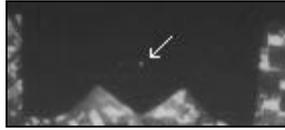


Figura 2.16 - Marca fiducial.

O sistema de coordenadas fotogramétricas possui origem aproximadamente no centro da fotografia. Os eixos cartesianos são traçados, ligando-se os pontos centrais das marcas fiduciais, conforme a figura 2.17. O certificado de calibração da câmara traz informações quanto às coordenadas dos pontos centrais das marcas fiduciais, que se encontram em milímetros. A partir destes dados, é possível determinar as coordenadas métricas de qualquer ponto da fotografia.

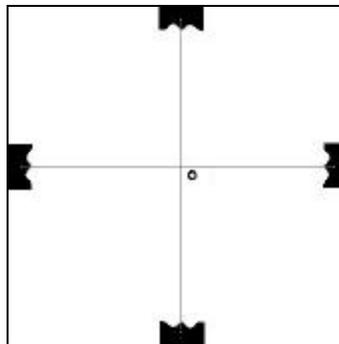


Figura 2.17 - Sistema de coordenadas fotogramétricas.

2.2.2.2 - Resoluções das Imagens Fotogramétricas Analógicas

A luz visível é uma energia eletromagnética composta por diferentes faixas de frequência. Designa-se faixa de frequência um trecho contínuo de frequências, como por exemplo, frequências que variam de 10 MHz a 50 MHz. A luz visível é dividida em diversas faixas de frequências, percebidas pelo olho humano como cores. As faixas de frequências das energias como o infra-vermelho, radar e térmica estão fora da faixa de frequência percebida pelo olho humano, isto é, são invisíveis. A figura 2.18 mostra uma escala de frequências e o comprimento de onda de algumas cores.

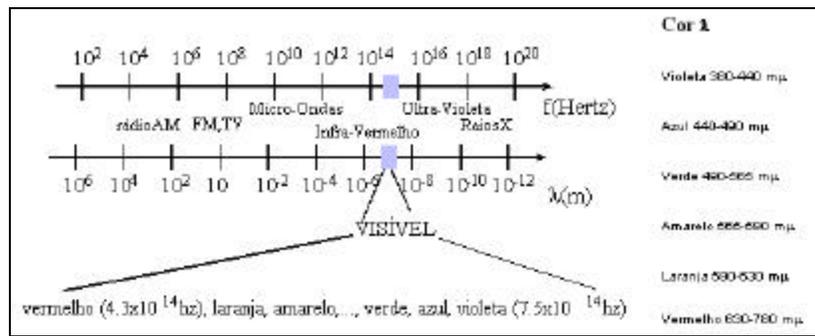


Figura 2.18 - Espectro de frequências. Fonte: IF-UFRJ (2004).

A resolução é a capacidade de uma imagem guardar informações. São ao todo quatro tipos de resoluções: espacial, radiométrica, espectral e temporal. A resolução espacial indica qual o menor tamanho de um objeto que é distinguível em uma fotografia. Por exemplo, a resolução de 1 metro indica que objetos de 1 ou mais metros podem ser distinguidos. Os objetos menores que a resolução espacial são agrupados em conjuntos com o tamanho da resolução espacial, isto é, como se fossem um só objeto, e a intensidade de energia luminosa deste grupo é a média da intensidade de energia luminosa dos objetos que o formam. Utiliza-se um alvo em laboratório para medir a resolução de uma câmara analógica. Este alvo foi criado pela força aérea americana e chama-se USAF 1951, conforme a figura 2.19.

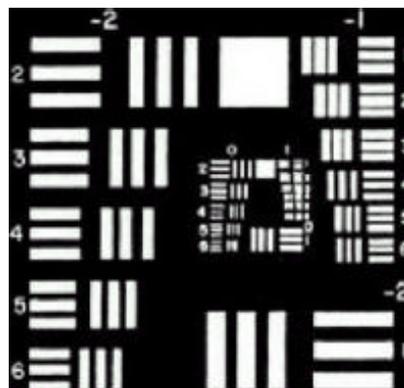


Figura 2.19 - Alvo USAF 1951.

Fonte: E-FOTO (2003).

A resolução espectral está relacionada com o número de bandas, ou seja, faixas de frequência, e o respectivo tamanho destas faixas. Uma fotografia colorida, por exemplo, possui três bandas diferentes: vermelho, verde e azul. Já uma fotografia pancromática possui largura de faixa da fotografia colorida, porém em uma banda apenas.

A resolução radiométrica é a capacidade de se distinguir a intensidade de energia eletromagnética em diferentes tonalidades, em cada banda. As diferentes frequências

presentes em uma faixa de uma banda são agrupadas em um certo número de grupos e cada grupo assume um valor. Por exemplo, uma fotografia com 2 tons agrupa todas as frequências da luz branca visível em dois grupos, onde um grupo possui frequências desde o início da faixa até o meio da mesma, e outro grupo com o restante das frequências. A intensidade de cada faixa é feita por amostragem, isto é, amostra-se uma frequência de cada grupo. Já a fotografia com 256 tons é composta de 256 grupos de frequências, onde se amostram frequências de cada grupo em intervalos de frequências iguais. Quanto mais tons houver em uma fotografia, melhor será a capacidade de se distinguir os objetos.

A resolução temporal geralmente é aplicada a satélites, onde se mede a variação de tempo entre aquisição de imagens de uma mesma região. Um satélite que seja capaz de adquirir imagens de 2 em 2 dias terá maior resolução que outro que seja capaz de adquirir de 10 em 10 dias.

2.2.2.3 - Aquisição de Imagens Fotogramétricas Digitais

Atualmente, as imagens fotogramétricas digitais ainda são, normalmente, advindas de conversão de imagens fotogramétricas analógicas para digitais. Existem dois tipos de imagens digitais: matricial e vetorial.

A imagem digital é uma matriz bidimensional composta por células quadradas, chamadas de *pixels* (picture elements), onde cada célula possui somente uma cor, que é definida por um número inteiro e positivo. A faixa de variação de valores depende da resolução radiométrica da imagem digital. A figura 2.20 mostra a relação entre a imagem digital e sua representação matricial para uma resolução radiométrica de 256 tons.

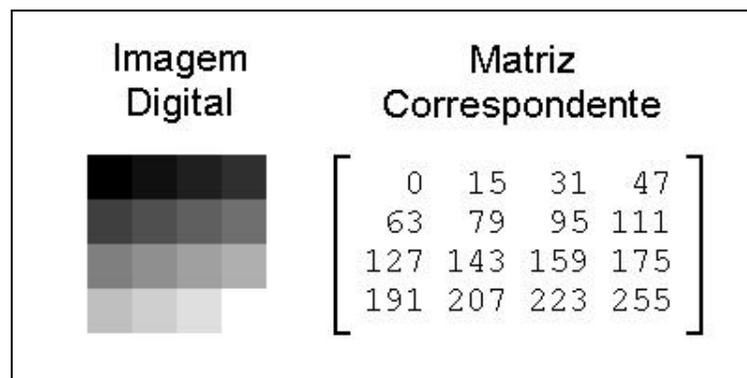


Figura 2.20 - Relação entre imagem digital e sua forma matricial.

Uma imagem é dita matricial quando toda a informação do espaço em questão é armazenada sob a forma de uma matriz. Quando se deseja visualizar este tipo de imagem, é necessário somente passar os valores da matriz para o sistema de vídeo. Uma fotografia analógica é convertida para a forma matricial através de um *scanner*. Este tipo de imagem ocupa bastante espaço de armazenamento, porém sua manipulação é extremamente rápida.

A imagem vetorial é formada de pontos, linhas e polígonos, ou seja, objetos de uma cena representados por pontos, linhas ou contornos. O ponto é a menor unidade; a linha é um conjunto de pontos interligados; e o polígono é um conjunto de pontos interligados, formando uma linha cíclica, ou seja, o primeiro ponto é interligado com o último ponto. Na imagem vetorial são armazenadas as coordenadas dos pontos e a ligação entre eles. Para ser visualizada uma imagem vetorial, o programa deverá “desenhar” os objetos, recriando a cena original. Este tipo de imagem é obtida através de uma mesa digitalizadora, onde o operador coleta os pontos que irão representar os objetos. Como armazena-se apenas pontos, linhas ou contornos dos objetos de uma cena, este tipo de imagem ocupa muito menor espaço em relação à matricial. Em compensação, a manipulação dos dados é mais complexa e mais lenta. Este tipo de digitalização é empregado na construção de mapas.

2.2.2.4 - Resoluções das Imagens Fotogramétricas Digitais

Assim como na imagem fotogramétrica analógica, tem-se quatro tipos de resolução para imagens digitais. A resolução espacial está relacionada com o tamanho do *pixel*. Por exemplo: tendo-se uma imagem de 200 X 100, ou seja, 200 colunas e 100 linhas, e um terreno tiver 200 X 100 metros (200 metros na direção das colunas e 100 metros na direção das linhas), um *pixel* representa uma área de 1 X 1 metro² do terreno. Conforme já mencionado, a área correspondente a um *pixel* será representada por uma única cor. Esta cor corresponde à média das cores que compõem a área equivalente na imagem original. Quanto mais pontos a imagem puder ser representada, menor será a área discretizada, melhorando a resolução espacial. Chama-se de discretização o processo que reduz o espaço contínuo de informação em um conjunto discreto de elementos. Normalmente, este processo é feito tomando-se amostra de valores em um intervalo de tempo contínuo. Comumente utiliza-se o termo inglês DPI (*Dots Per Inch*), que significa pontos por polegada, para indicar a resolução espacial de uma imagem digital. Uma polegada é equivalente a aproximadamente 2,54 cm. Desta forma, pode-

se dizer que DPI é a quantidade de *pixels* presentes em cada trecho linear de 2,54 cm da imagem analógica original.

A resolução radiométrica indica a capacidade de discernimento de diferentes tons dentro de uma faixa de uma banda eletromagnética. Como o sistema numérico do computador é o binário, utiliza-se quantidades de tons relacionadas com a potência de 2. Por exemplo: uma imagem de 256 cores, ou 2^8 cores, possui 8 bits de informação por *pixel*. Uma imagem com 2 tons, ou 1 bit por *pixel*, é chamada de imagem binária, normalmente representados pelas cores preta e branca. Esta imagem terá resolução menor que uma imagem de 8 bits.

Esta resolução está diretamente relacionada com o tamanho final de uma imagem. Para se calcular o tamanho que uma imagem ocupa em bytes, utiliza-se a equação 2.2.

$$\text{número de colunas X número de linhas X resolução radiométrica em bits} \quad (2.2)$$

8

Exemplificando: uma imagem de 100x100 com resolução radiométrica de 8 bits ocupa 10.000 bytes, ou seja, 9,77 Megabytes.

As resoluções espectral e temporal funcionam de forma semelhante às imagens analógicas. Porém, ressalta-se que as imagens coloridas são compostas de três bandas, que é a divisão da faixa de luz visível em três partes iguais, onde apresenta bandas de cor vermelha, verde e azul. Pode-se dizer que são três imagens distintas, onde cada imagem contém os níveis de intensidade relativos à banda de cor em questão. A imagem relativa à banda vermelha, quando exibida isoladamente, apresenta somente tons de cor vermelha. O mesmo se aplica para as demais bandas. Quando esta imagem final é exibida na tela, as três imagens são fundidas em uma só, formando as demais cores. O total de tons em uma imagem multispectral é calculado multiplicando-se as resoluções individuais de cada banda. Por exemplo: uma imagem colorida, onde cada banda possui 256 tons, possuirá no total $256 \times 256 \times 256 = 16777216$ tons. Esta resolução é chamada de *true color* (cor real), por ser a mais próxima da realidade da natureza.

Pode-se transformar uma imagem colorida em tons de cinza, balanceando-se os valores de cada *pixel* em todas as bandas. Para isto, faz-se uma média aritmética da intensidade de cada *pixel* nas três bandas, alterando-se o valor das três bandas para o valor da média encontrado.

É possível se analisar uma imagem digital cujos dados foram captados por energia fora da faixa de frequência visível ao olho humano. De acordo com o conceito de resolução espectral, a faixa de frequência respectiva à energia de análise é dividida em grupos e cada grupo de frequências adota uma intensidade para representar todos os componentes do grupo. No

modelo digital, os números são inteiros e variam de zero ao total de grupos menos um. Assim, basta passar estes valores a qualquer banda colorida, ou até mesmo para as três, obtendo-se uma imagem em tons de cinza. Nota-se que a imagem formada neste caso nada têm a ver com dados coletados nas bandas coloridas, e sim com a banda em questão.

Quando se obtém uma imagem fotogramétrica digital através do *scanner* há perda de algumas cores, uma vez que a tecnologia atual não é capaz de reconhecer todas as cores da natureza. Poderá haver perdas em relação à resolução espacial, se não for observada a relação entre a resolução analógica da fotografia e a resolução digital equivalente. Esta situação é ilustrada no apêndice G, que inclui um exemplo prático. Para se obter a resolução digital em DPI, correspondente à resolução analógica, utiliza-se a equação 2.3 (equação G.3).

$$1/2\sqrt{2} RIA \leq RID (Pixel) \leq 1/2 RIA \quad (2.3)$$

2.2.3 - Fotogrametria Digital

Com o surgimento de computadores digitais, capazes de manipular dados mais rápido e eficiente que o homem, a partir dos anos 80 deu-se início a era da fotogrametria digital. Nos anos 90, com o aprimoramento dos computadores, este ramo da fotogrametria foi ganhando mais espaço. A fotogrametria digital é o processo fotogramétrico em que a entrada de dados é digital, o processamento é analítico (computador) e a saída de dados é digital.

Para se converter fotografias analógicas em digitais utiliza-se um scanner, conforme já mencionado no item 2.2.2.3. A partir da imagem digital, utiliza-se um modelo matemático para relacionar as coordenadas espaciais das marcas fiduciais com as coordenadas de *pixel* da imagem digital. Este processo é chamado de transformação afim. Pode-se determinar os três ângulos de derivação do avião que fez a tomada aérea em uma imagem. Para tal, deverão ser coletados, pelo menos, quatro pontos não colineares *in loco* (no terreno) através de um GPS. O processo que determina os ângulos de derivação das imagens fotogramétricas é chamado de orientação exterior. Por fim, tendo em mãos os ângulos de atitude do avião, é possível corrigir a imagem para a posição correta. Este processo é chamado de normalização, quando aplicado simultaneamente a pares estereoscópicos de imagens. O processo de normalização elimina possíveis paralaxes em torno do eixo y e do eixo z.

2.3 - O Cálculo da Paralaxe em Imagens Fotogramétricas

Para o entendimento do cálculo da paralaxe em um par estereoscópico, bem como a reconstrução do espaço tridimensional, serão apresentados métodos de reconstrução de objetos a partir de uma imagem e de um par de imagens.

Imagens fotogramétricas são imagens aéreas verticais, isto é, o plano da imagem deve ser paralelo ao plano do terreno do qual são obtidas. Além disto, a linha de vôo deve ser constante. Devido a perturbações na aeronave, tais como correntes de ar, existem pequenas derivações no resultado desejado. Normalmente, a maioria das imagens tem derivações menores do que 3° , pois assim produzem resultados com erros desprezíveis.

2.3.1 - Elementos Geométricos de uma Fotografia Vertical

Os elementos básicos de uma fotografia aérea vertical são apresentados na figura 2.21. Conforme apresentado na seção 2.2.2.1, a imagem do terreno se forma atrás da lente, distante da mesma com a distância focal da câmara. Pode-se rebater este negativo da imagem, para uma distância focal f positiva, situada a frente da lente da câmara. Desta maneira, fica mais simples a compreensão dos feixes de luz traçados da imagem para o terreno.

Os eixos cartesianos são traçados, ligando-se as marcas fiduciais conforme a figura 2.17. O eixo x da imagem se situa mesma direção do vôo da aeronave, crescendo no mesmo sentido do vôo. O eixo y se situa a 90° no sentido anti-horário do eixo x . O eixo z está perpendicular aos planos da imagem e do terreno. Devido à precisão das marcas fiduciais, pode-se afirmar que o centro o da imagem está no terreno em O .

As letras a , b , c e d representam os limites do terreno imageado pela fotografia. As letras maiúsculas representam pontos do terreno e as letras minúsculas representam pontos correspondentes na imagem. Para o negativo, acrescenta-se o apóstrofo à cada letra.

Os feixes partem do terreno, passam pela imagem rebatida e se concentram no centro focal da lente, representado na figura 2.17 pela letra L . Para se determinar um ponto no terreno, traça-se uma linha desde o centro focal, passando pelo ponto em questão na imagem e se atingindo o alvo no terreno. Nota-se que este alvo é atingido, levando-se em conta a coordenada Z do terreno.

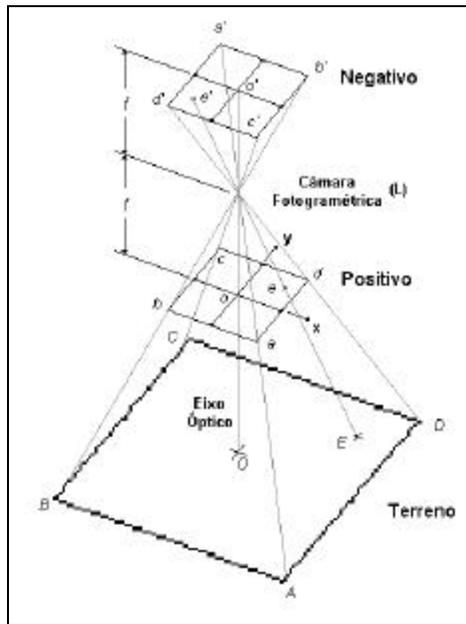


Figura 2.21 - Elementos básicos de uma imagem aérea vertical. Adaptado de: Lillesand e Kiefer (1994).

2.3.2 - A Influência do Relevo em Imagens Fotogramétricas

Na seção anterior foi mostrado como se traçam os feixes luminosos dos objetos em um terreno plano. Porém, a natureza apresenta terrenos bastante acidentados, como montanhas, prédios, torres etc. O objetivo desta seção é o estudo destes terrenos acidentados, mostrando como são formados os objetos na imagem.

A figura 2.22 apresenta um terreno montanhoso, onde um plano é desenhado no terreno com origem no centro O' . Os pontos representados com letras e apóstrofo pertencem a este plano, ou seja, possuem a mesma altura no terreno que a origem O' . Os pontos representados pelas letras maiúsculas apenas são os pontos reais no terreno. Os pontos pertencentes ao plano criado são achados quando se traça uma linha normal ao ponto correspondente do terreno, no sentido do plano. Por exemplo: B' é determinado traçando-se uma linha normal a partir de B. Na imagem, observam-se os pontos correspondentes aos pontos citados.

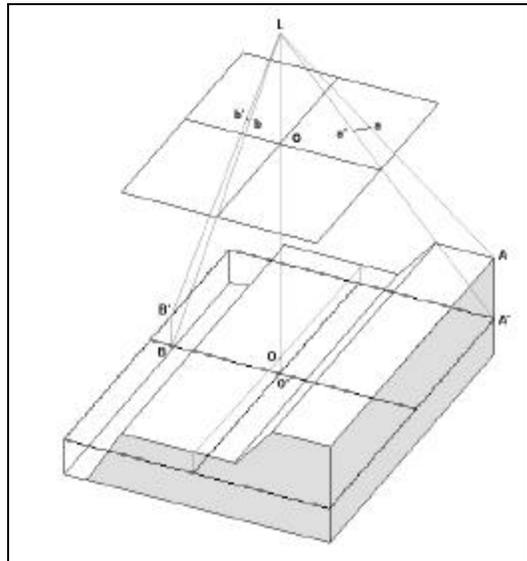


Figura 2.22 - Deslocamentos devido ao relevo.
Adaptado de: Lillesand e Kiefer (1994).

A figura 2.23 apresenta toda a geometria necessária para a determinação de distâncias e ângulos entre pontos presentes em uma imagem.

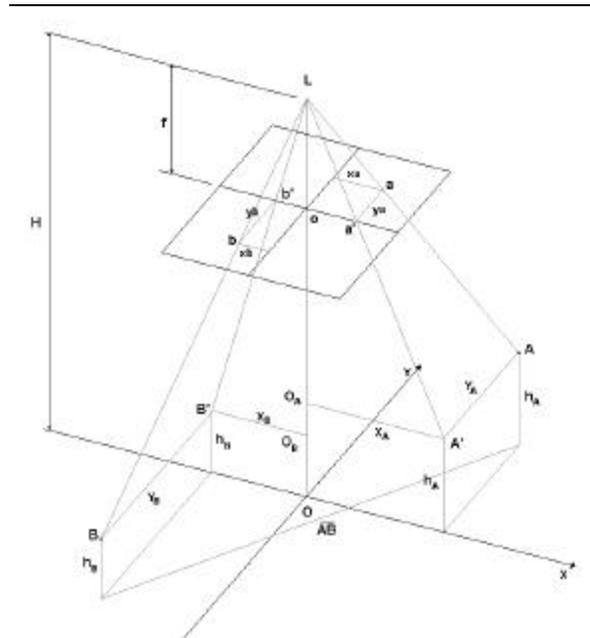


Figura 2.23 - Determinado coordenadas de terreno a partir de uma imagem. Adaptado de: Lillesand e Kiefer (1994).

Pela semelhança de triângulos de $LO_A A'$ e Loa' , tem-se:

$$x_a / X_A = f / (H - h_A), \text{ onde se obtém: } X_A = x_a (H - h_A) / f \quad (2.4)$$

O mesmo serve para os triângulos LAA' e La'a:

$$y_a / Y_A = f / (H - h_A), \text{ onde se obtém: } Y_A = y_a (H - h_A) / f \quad (2.5)$$

Fazendo-se o mesmo para o ponto B, obtém-se:

$$X_B = x_b (H - h_B) / f \quad (2.6)$$

$$Y_B = y_b (H - h_B) / f \quad (2.7)$$

A distância entre os pontos A e B é determinada pelo teorema de Pitágoras, onde:

$$AB = [(X_A - X_B)^2 + (Y_A - Y_B)^2]^{1/2} \quad (2.8)$$

2.3.3 - Projeção de um Objeto em uma Imagem Fotogramétrica

Conforme já foi discutido na seção 2.1.2, a projeção da imagem na retina do homem, assim como a projeção da imagem no negativo da fotografia, são projeções cônicas. Deste modo, os objetos vão sofrendo distorção radial em torno do centro focal da câmara. Quanto mais um ponto do objeto se afastar do plano pertencente ao centro focal, maior será a distorção do mesmo. A exata posição do centro focal não apresenta qualquer tipo de distorção.

A figura 2.24 apresenta todos os feixes luminosos traçados da imagem para o terreno na reconstrução de uma torre registrada na imagem. É importante notar que para a reconstrução da torre estão visíveis a base e o topo da mesma. Outro fato importante é que o reconstrutor da cena sabe que a torre da imagem tem a base mais baixa que o topo e que, provavelmente, a torre faz 90° com o plano do terreno.

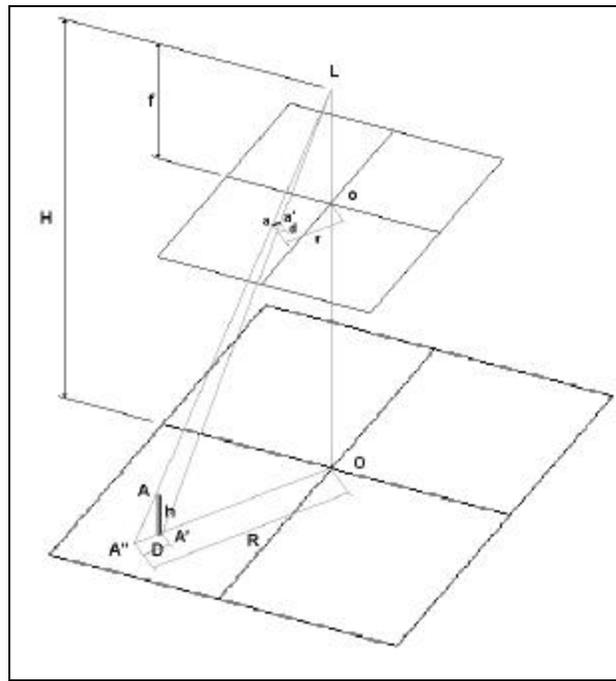


Figura 2.24 - Elementos geométricos de distorções radiais.

Adaptado de: Lillesand e Kiefer (1994).

Pela semelhança de triângulos $AA'A''$ e LOA'' , tem-se:

$$D/h = R/H$$

Pela escala da imagem, pode-se escrever:

$$d/h = r/H$$

onde:

- d - comprimento da imagem do objeto;
- r - distância radial do centro da imagem para o ponto de máximo do objeto;
- h - altura do objeto no terreno;
- H - altura de vôo.

Desta forma, para calcular a altura do objeto no terreno, faz-se:

$$H = d.H / r \tag{2.9}$$

2.3.4 - Paralaxe

Na seção anterior mostrou-se que é possível a reconstrução geométrica de um objeto a partir de uma fotografia. Porém, alguns fatores necessários a esta reconstrução foram observados, como a visibilidade da base e do topo na imagem, além do conhecimento do reconstitutor do cenário da real posição da torre no cenário.

A partir de duas imagens pode-se determinar a altura de um objeto, mesmo sem a visualização de sua base, assim como o conhecimento de sua geometria ou posição no terreno. Isto se dá graças ao conceito de paralaxe. A figura 2.25 apresenta duas imagens aéreas de uma mesma região, com 60% de superposição, onde os pontos *A* e *B* do terreno foram obtidos nas fotografias em posições distintas devido ao deslocamento “perfeito” da aeronave. Observa-se que a distância entre os dois pontos varia entre uma imagem e outra. Este fato indica que os objetos não pertencem ao mesmo plano no terreno.

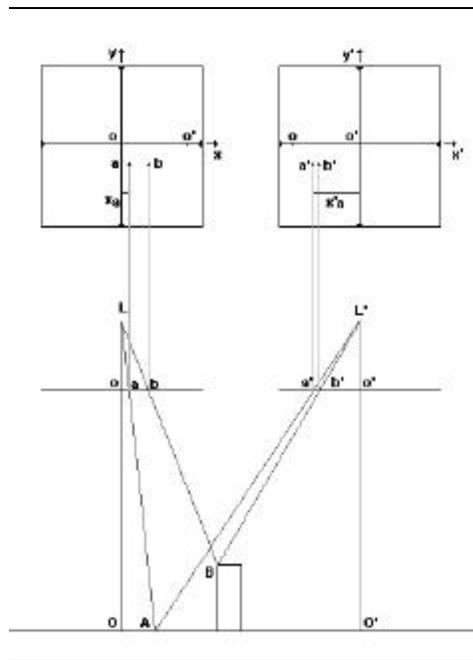


Figura 2.25 - Deslocamento devido à paralaxe.

Adaptado de: Lillesand e Kiefer (1994).

A paralaxe é calculada de acordo com a seguinte equação:

$$p_a = x_a - x'_a \tag{2.10}$$

Na figura 2.25 a paralaxe existe somente no eixo x . Observa-se que os pontos a e b mantêm o mesmo alinhamento no eixo y em a' e b' . Este conceito em tese só é válido quando o avião não sofre desvios em torno de seus três eixos. Na prática, imagens fotogramétricas analógicas precisam ser alinhadas. Para tal, localiza-se o centro de cada imagem na outra imagem. Então, traça-se uma linha reta unindo-se os quatro centros.

A figura 2.26 mostra que a paralaxe pode ser calculada tanto pela distância entre os pontos relativos nas imagens aos centros das imagens, representado por x e x' , assim como a distância entre si dos pontos equivalentes e entre os pontos centrais, representados por d e D . Esta figura também apresenta o alinhamento entre os quatro centros, necessários para corrigir a linha de vôo real da aeronave. O afastamento das imagens é irrelevante para o cálculo por d e D .

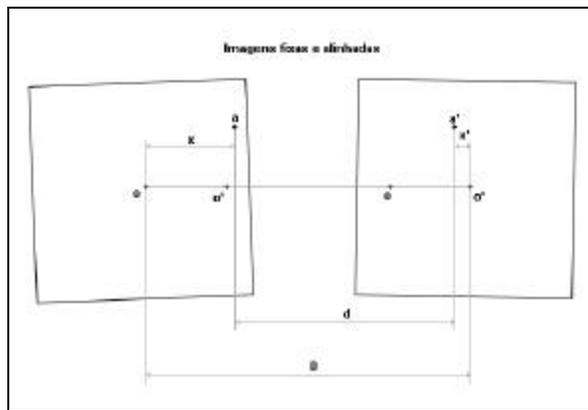


Figura 2.26 - As formas de medição de paralaxe.

Adaptado de: Lillesand e Kiefer (1994).

De acordo com a figura 2.26, a paralaxe de a é obtida por:

$$p = x - x' = D - d \quad (2.11)$$

A figura 2.27, mostra a generalização da figura 2.26 para dois pontos.

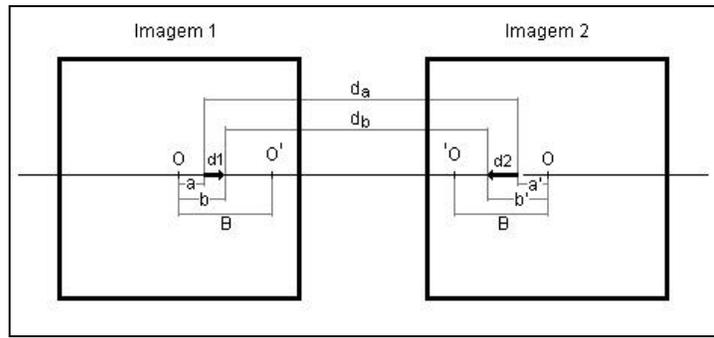


Figura 2.27 - Diferença de paralaxe. Adaptado de: Lopez Vergara (1971).

Desta forma, pode-se extrair a equação:

$$dp = da - db = d1 + d2 = p_b - p_a \quad (2.12)$$

A reconstrução espacial a partir de um par estereoscópico é mostrada na figura 2.28. As imagens são colocadas no sentido do vôo do avião, ou seja, a primeira tomada aérea é colocada à esquerda, enquanto a segunda tomada é colocada à direita.

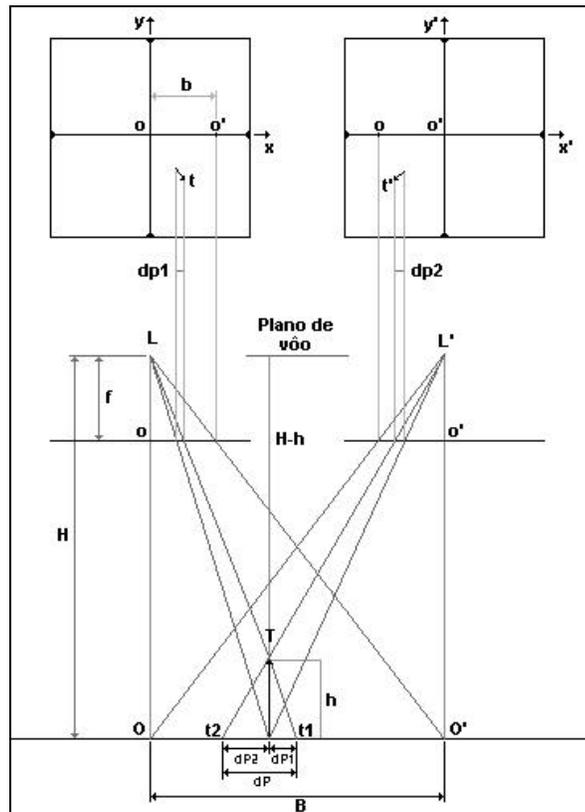


Figura 2.28 - Reconstrução 3D a partir do par estereoscópico. Adaptado de: Anderson (1982).

De acordo com a figura 2.28:

- h - altura do objeto;
- H - altura média de vôo;
- B - aerobase, onde B é a distância OO' ';
- b - fotobase, onde b é a distância oo' ';
- dp - diferença de paralaxe entre a base e o topo do objeto.

Pode-se calcular a altura do objeto de duas maneiras: diretamente ou pela diferença de altitudes de pontos isolados. Para se calcular a altura de um objeto diretamente, necessita-se apenas da diferença de paralaxe, da fotobase e da altura de vôo. Pela semelhança de triângulos LTL' e t_2Tt_1 :

$$h / (H - h) = dp / B$$

A razão dP / B é a mesma que dp / b . Logo:

$$h = H.dp / (b + dp) \quad (2.13)$$

A figura 2.29 é a sobreposição de triângulos, formado a partir da figura 2.28.

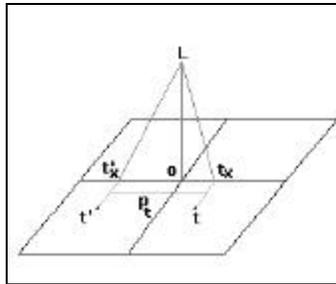


Figura 2.29 - Triângulos sobrepostos.
Adaptado de: Lillesand e Kiefer (1994).

Pode-se determinar a altura de um objeto através do cálculo das alturas de pontos isolados em relação a uma superfície de referência de nível. Esta superfície pode ser tanto o nível médio dos mares, quanto o plano médio do terreno. No primeiro caso, mede-se a elevação; no segundo, a altura. Para determinar a altura de um objeto, primeiro encontra-se a elevação relativa da base do objeto, e em seguida, a elevação relativa do topo do objeto. Por fim,

calcula-se a diferença entre as elevações. Pela semelhança de triângulos $L_t t_x'$ e LTL' (figuras 2.28 e 2.29):

$$\begin{aligned} p_t / f &= B / (H - h_t) \\ H - h_t &= B.f / p \\ h_t &= H - (B.f / p) \end{aligned} \tag{2.14}$$

Na equação 2.14 p_t é a paralaxe do topo do objeto, conforme a equação 2.10 e h_t é a elevação do topo em relação à média do terreno. A mesma equação 2.14 deverá ser aplicada à base. Para determinar h , faz-se:

$$h = h_t - h_b \tag{2.15}$$

O modelo da equação 2.13 será referenciado como modelo de medição direta de pontos, enquanto que o modelo da equação 2.15 será referenciado como modelo de alturas.

2.4 - O Estado da Arte

A obtenção de medidas fotogramétricas clássicas, onde a fonte de dados é a imagem fotogramétrica analógica, é feita por estéreo-restituidores e equipamentos especialmente projetados para realizar esta função. As medidas estereoscópicas estão factíveis de erros, uma vez que se tratam de leituras instrumentais. Além disto, o procedimento de análise em imagens fotogramétricas analógicas consome um precioso tempo, tanto na preparação de instrumentos óticos, como o estereoscópio de espelhos, como no posicionamento correto das imagens, e também em sucessivas leituras de medidas para que se elimine erros grosseiros. Os problemas citados se repetem cada vez que se deseja fazer uma nova medição nas imagens fotogramétricas.

A partir do advento da fotogrametria digital os problemas citados anteriormente podem ser minimizados. Isto se dá graças à relativa facilidade de se manipular imagens em computadores digitais. Porém, para se trabalhar com imagens fotogramétricas digitais em computadores, é necessário dispor de equipamentos de última geração, além de ferramentas que auxiliem o trabalho do usuário. Ao conjunto de equipamentos utilizados na fotogrametria digital dá-se o nome de estação fotogramétrica digital.

2.4.1 - Estação Fotogramétrica Digital

Uma estação fotogramétrica digital em geral é composta dos seguintes equipamentos:

- Um ou mais monitores de vídeo;
- Dispositivos de visão estereoscópica, como monitores óculos, monitores especiais etc;
- CPU gráfica ou placa de vídeo especial;
- CPU geral;
- Periféricos de entrada/saída, como teclado, *mouse*, *scanner*, mesa digitalizadora, *plotter* e/ou impressora;
- Dispositivo de medição estereoscópica - *TrackBall*, *topo-mouse* etc;
- Módulos de *software* dedicado a estações fotogramétricas, como orientação interior, orientação relativa e orientação absoluta, ou orientação exterior (relativa + absoluta simultaneamente), aerotriangulação (medição e cálculo), restituição, retificação e reamostragem de imagens (geometria epipolar), extração de modelos digitais do terreno, geração de orto-imagens, integração com sistemas de informação geográfica etc.

Os monitores adequados para a estação deverão ter entre 19 e 21 polegadas. Poderão trabalhar em par, com o objetivo de se maximizar a imagem analisada. As CPUs poderão ser de diversos fabricantes e possuírem diversos sistemas operacionais. As estações com o sistema operacional Unix e Silicon Graphics são utilizadas amplamente, porém há uma tendência de crescimento do uso de plataformas Windows. Os instrumentos de separação visual, necessários à visão estereoscópica, podem ser divididos em três tipos principais:

- Separação espacial - As imagens são separadas na tela, dispostas lado a lado, e utiliza-se um estereoscópio para visualizar as imagens;
- Anaglifo - As imagens são sobrepostas, porém cada uma com cores complementares. Utiliza-se um óculos especial, com lentes distintas em cada olho, para separar as imagens;
- Separação radiométrica e espacial - O princípio é o mesmo do anaglifo, porém o monitor exibe alternadamente, a uma taxa de 60 Hz, cada imagem com uma polarização diferente. O óculos possui um filtro espacial, capaz de captar somente a imagem com a polarização correspondente.

A imagem 2.30 apresenta uma estação fotogramétrica digital. Nesta estação, encontram-se estereoscópio, óculos polarizador, CPU, monitor e software. Já a imagem 2.31 apresenta um módulo de software sendo utilizada sobre uma imagem aérea.



Figura 2.30 - Estação fotogramétrica digital.

Fonte: Vinnitsa (2004).



Figura 2.31 - Ferramenta de software de uma estação fotogramétrica. Fonte: Vinnitsa (2004).

A estação fotogramétrica mostrada nas figuras 2.30 e 2.31 é a estação fotogramétrica *Delta*, de propriedade da empresa ucraniana VinGeo. O software que acompanha esta estação possui as seguintes características:

- Processador Intel e compatíveis;
- Sistema operacional Windows 98/ME/NT/XP;
- Modos de vídeo de 1024 x 768 x *Hi Color* até 1600 x 1200 x *True Color*;
- Pode operar com estereoscópios, através de separação espacial ou óculos de separação espectral.

O modo de vídeo citado como *Hi Color*, indica que o sistema possui 65.536 cores. Já o sistema *True Color*, possui 16.777.216 de cores distintas. Estes sistemas são os sistemas de cor mais utilizados atualmente em qualquer computador.

2.4.2 - Utilização de Estereoscopia em Medições Espaciais

O processo de medição estereoscópica é utilizado pela NASA para reconstrução do relevo de planetas. Para tal, a sonda espacial obtém imagens através de uma câmara estéreo especial. Em missão a Marte, a sonda espacial Mars Express obteve imagem estéreo da montanha Olympus Mons, a mais alta do sistema solar, através da câmara HRSC (*Hi Resolution Stereo Câmera*). A figura 2.32 apresenta a imagem em estéreo da montanha para ser visualizada com o anaglifo.

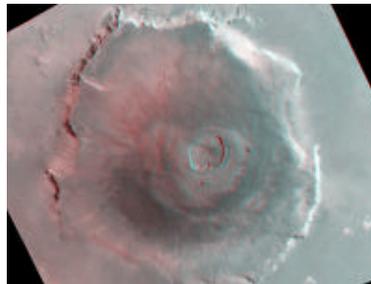


Figura 2.32 - Olympus Mons em 3D.

Fonte: Decatur County (2004).

2.5 - Conclusões do Capítulo 2

O capítulo 2 apresentou toda a teoria que será utilizada na construção e implementação do sistema de visualização e medição estereoscópicas. O capítulo a seguir apresentará o projeto E-FOTO, bem como o sistema de visualização e medição estereoscópicas é agregado a ele e por fim o projeto de construção do sistema ora proposto.

Capítulo 3

Análise e Projeto do Sistema de Visualização e Medição Estereoscópicas

A fotogrametria tem como objetivo a reconstrução de um espaço tridimensional a partir de imagens fotogramétricas. Este processo engloba diversas tarefas, onde necessita-se obter um sistema de informações preciso, no qual o cartógrafo tenha a garantia de uma correspondência entre um ponto na imagem e sua respectiva coordenada no espaço objeto.

O sistema de medições fotogramétricas é crucial para todo o trabalho da estação fotogramétrica, onde o cartógrafo poderá acompanhar o resultado de seu trabalho, observando a coerência das dimensões dos objetos e níveis presentes nas imagens fotogramétricas, podendo corrigir possíveis erros durante alguma fase do processo fotogramétrico.

3.1 - O Projeto E-FOTO

O projeto E-FOTO é o desenvolvimento de uma estação fotogramétrica digital educacional, originalmente idealizada em 2002 no Instituto Militar de Engenharia, com o objetivo de suprir a carência de equipamentos modernos que instituições de ensino não podem dispor para os estudantes de fotogrametria (E-FOTO, 2003). A abordagem educacional é expressa, principalmente, por dois pilares básicos: a gratuidade (liberdade) dos componentes e o auto-aprendizado (Brito e Filho, 2003).

A licença escolhida para os programas do projeto foi a GNU GPL (GNU *General Public License*), onde tanto o código executável quanto o código fonte é livre para o uso e para sofrer modificações, desde que o programador que realize as modificações as disponha gratuitamente para a comunidade. Para os textos a licença escolhida foi a GNU FDL (GNU *Free Documentation License*), onde os princípios são os mesmos da referida licença para os programas.

A linguagem escolhida para o desenvolvimento do sistema é o C++, devido a popularidade da linguagem C, aliado ao paradigma da programação orientada a objetos, indispensável a sistemas grandes e complexos. No sistema operacional Linux utiliza-se a ferramenta de desenvolvimento Qt, devido à sua biblioteca gráfica GUI (*Graphic User*

Interface), onde encontram-se ferramentas que auxiliam no *design* de interfaces com o usuário. Já na plataforma Windows utilizou-se a linguagem de programação Visual C++ da Microsoft. O projeto é dividido em módulos, onde a maior parte desenvolvida até agora encontra-se na plataforma Windows.

A filosofia de auto-aprendizado pressupõe a existência de três níveis que delimitam diferentes esferas de interação entre o usuário e o sistema. O primeiro nível é composto pelos usuários que desejam apenas realizar alguma tarefa fotogramétrica, para as quais utilizarão apenas os programas executáveis. Para isso, há uma ajuda *on-line* de cada um dos módulos, que abrange sua utilização e conceitos básicos de fotogrametria. O segundo nível é composto de usuários que, além de quererem aprender como utilizar os programas, desejam também entender o funcionamento dos mesmos. Para isso eles contam com o *e-book* em fotogrametria digital, que cobre todos os temas principais da fotogrametria. Nesse tutorial é dado o enfoque auto-explicativo, ensinando não apenas os princípios teóricos, mas também a montagem das equações e algoritmos, além de comparações entre diferentes métodos e resultados. Na confecção do texto é priorizada a abordagem de auto-aprendizagem. Assim, a disciplina é apresentada de tal modo que não é necessário qualquer conhecimento prévio em fotogrametria para entendimentos dos conceitos apresentados. O terceiro nível é composto de usuários dos níveis 1 e 2 que desejam agregar-se ao projeto, passando de meros usuários a desenvolvedores do projeto E-FOTO.

3.1.1 - A Medição Estereoscópica no Contexto do E-FOTO

A configuração de uma estação fotogramétrica digital envolve vários módulos, que executam diferentes tarefas do fluxo de trabalho fotogramétrico. No caso do projeto E-FOTO, os seguintes módulos foram definidos (Figura 3.1): pré-processamento de imagens; definição de parâmetros de projeto; calibração de câmara; orientação interior; aerotriangulação analítica (resseção espacial + interseção espacial de um bloco de imagens); extração de um modelo digital do terreno; ortoretificação; e restituição digital em ambiente CAD.

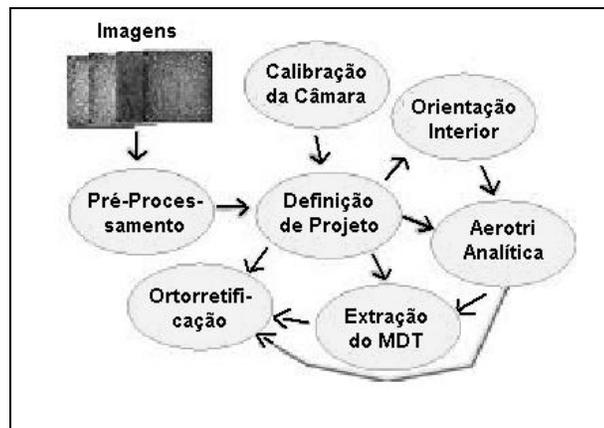


Figura 3.1 - Módulos do projeto E-FOTO. Fonte: Brito e Filho (2003).

A figura 3.2 mostra o fluxograma de todo o projeto.

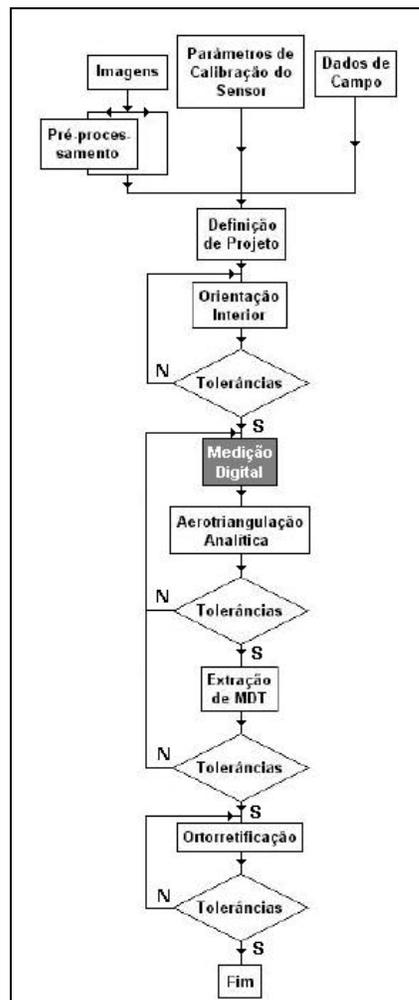


Figura 3.2 - Fluxograma do projeto E-FOTO. Adaptado de: E-FOTO (2003).

A primeira etapa do projeto é a obtenção de imagens fotogramétricas. Para tal, necessita-se de imagens obtidas de vôos fotogramétricos pré-existentes ou a executar. As imagens aéreas não devem possuir derivação superior a cinco graus em nenhum dos três eixos cartesianos. Do contrário, o resultado da medição de pontos por paralaxe poderá estar comprometido.

Em seguida, as imagens obtidas poderão passar por processamentos a fim de melhorar a qualidade das mesmas. Esta etapa é chamada de pré-processamento. Por exemplo: a imagem poderá estar escura ou clara demais, sendo necessário um ajuste de contraste para que sua nitidez seja melhorada para o usuário final. De outra forma, a imagem poderá apresentar falhas que sejam possíveis de serem recuperadas.

Junto com as imagens, são fornecidos todos os parâmetros de calibração da câmara descritos no capítulo 2. Estes parâmetros são necessários para todo e qualquer cálculo sobre as imagens. Por exemplo, a partir das coordenadas das marcas fiduciais é possível reconstruir o eixos cartesianos (x,y) , de modo que pode-se medir qualquer ponto da imagem em relação a esses eixos.

Para um perfeito ajuste das imagens é necessário conhecer os pontos de controle no terreno. Para isto, escolhe-se estrategicamente alguns pontos presentes nas imagens, visita-se o local com um receptor GPS para fins geodésicos, e mede-se as coordenadas X, Y e Z dos pontos em questão. Desta forma, conhece-se as coordenadas do centro de perspectiva da imagem, além dos ângulos de atitude da aeronave, num processo chamado de orientação exterior. Conhecendo-se os ângulos de atitude pode-se corrigir estas derivações de vôo, através de outro processo chamado de normalização de estereogramas.

O módulo de definição de projeto reúne toda documentação inicial do projeto, necessária futuramente. Este módulo já foi implementado e é dividido em dois programas: gerenciador de projeto e parâmetros de câmara. O gerenciador de projeto reúne informações como sistemas de medida adotados, parâmetros de vôo e estatísticas. Já o módulo parâmetros de câmara agrega todos os dados relativos à calibração da câmara fotogramétrica usada na obtenção das imagens.

O módulo de orientação interior também já se encontra pronto, e serve para fazer a reconstrução do feixe perspectivo por intermédio de um sistema de equações, que transforma as coordenadas em *pixels* da imagem em coordenadas em milímetros. Enquanto esta orientação não estiver dentro do limite de tolerância aceitável, repete-se o procedimento.

O módulo de medição digital é o último módulo já implementado no projeto E-FOTO. Serve para medir pontos de Gruber, necessários na etapa de fototriangulação (E-FOTO, 2003).

O módulo de fototriangulação analítica irá orientar em conjunto (simultaneamente) as imagens aéreas, de acordo com os pontos colhidos no campo. Desta forma, descobre-se as coordenadas dos centros de perspectiva e os três ângulos de derivação da aeronave em cada imagem. Uma vez descobertos estes ângulos e as coordenadas do centro de perspectiva, é possível corrigir as distorções de cada imagem. Além dos três ângulos, este módulo retorna a posição do ponto principal da câmara aérea em relação ao referencial de terreno ou espaço objeto.

O módulo de extração de MDT tem como finalidade reconstruir o terreno. Por fim, o módulo de ortoretificação tem como finalidade eliminar as distorções nos objetos devido à perspectiva cônica da câmara, gerando as orto-imagens.

O sistema de visualização e medição estereoscópicas se encaixa no módulo de medições digitais, uma vez que retorna a coordenada Z dos objetos situados na área de superposição das imagens. Após a correção da imagem nos módulos seguintes, torna-se possível relacionar as coordenadas das imagens digitais (*pixel*) com as coordenadas do espaço-objeto (metros). Porém, as coordenadas em *pixel* são bidimensionais, sendo possível apenas as relacionar com as coordenadas X e Y do campo. Com a medição da coordenada altimétrica (Z) das feições desejadas, têm-se então completo o modelo do terreno obtido a partir das imagens. Esta característica de processo fotogramétrico ressalta a importância de um sistema de visualização e medição estereoscópicas para uma estação fotogramétrica digital.

3.2 - Projeto do Sistema

O projeto do sistema de visualização e medição estereoscópicas consiste na verificação dos objetivos, pré-requisitos e componentes do sistema. Os objetivos são os produtos finais do sistema, ou seja, onde se deseja realmente chegar. Nesse contexto, os pré-requisitos são indispensáveis. Por fim, são necessárias as componentes do sistema, onde serão inseridos dados fundamentais, calculadas informações necessárias e oferecidas rotinas de ajuste e calibração de imagens.

3.2.1 - Objetivos

Os objetivos do sistema ora proposto são: visualizar monoscopicamente e estereoscopicamente um modelo fotogramétrico (duas imagens com área de superposição); e medir coordenadas bi ou tridimensionais de pontos situados no modelo estereoscópico. Uma das aplicações imediatas do sistema proposto é a medição da altura de objetos artificiais (feições construídas pelo homem). Para tal utiliza-se, basicamente, duas estratégias: um modelo de medições diretas das alturas (medição direta), materializado pela equação 2.13; e o modelo de alturas, que utiliza a equação 2.15. Deseja-se comparar os dois modelos, a fim de verificar o que melhor se ajusta ao sistema. A figura 3.3 apresenta o fluxograma do sistema proposto. Há que ressaltar também que a medição tridimensional pode ser feita tanto no módulo de visualização estereoscópica por separação espacial, quanto na visualização pelo processo anaglifo (separação espectral).

O primeiro objetivo do sistema proposto é exibir as imagens fotogramétricas digitais na tela do computador. Há três formas de visualização: monoscópica, estereoscópica e anaglifo. A imagem monoscópica é uma mera reprodução das imagens fotogramétricas digitais originais. Cada imagem é apresentada distintamente, assim como a marcação de pontos é feita individualmente nas imagens. A visão estereoscópica reproduz o mesmo sistema de visão tridimensional feito no modo analógico. Divide-se a tela em duas partes, com uma divisão vertical, apresentando cada imagem fotogramétrica em cada uma das metades. Para a visualização em anaglifo é necessário aplicar um filtro ciano na imagem correspondente ao olho direito e um filtro vermelho na imagem correspondente ao olho esquerdo. Além disso é necessário fundir as imagens, de modo que sejam vistas simultaneamente, conforme o item 2.1.3.1. Este primeiro passo somente gera as imagens a serem trabalhadas fotogrametricamente.

O segundo passo faz uma transformação de sistemas, onde as coordenadas em *pixel* da posição corrente das marcas de medição são convertidas para coordenadas milimétricas do sistema das marcas fiduciais, sistema este originalmente utilizado no modo analógico.

A partir das medições das coordenadas de pontos homólogos, tendo-se disponíveis as posições de base e topo do objeto nas duas imagens, pode-se calcular a altura do mesmo. Para isso são necessários alguns dados: altitude de vôo, fotobase, distância focal e escala da imagem.

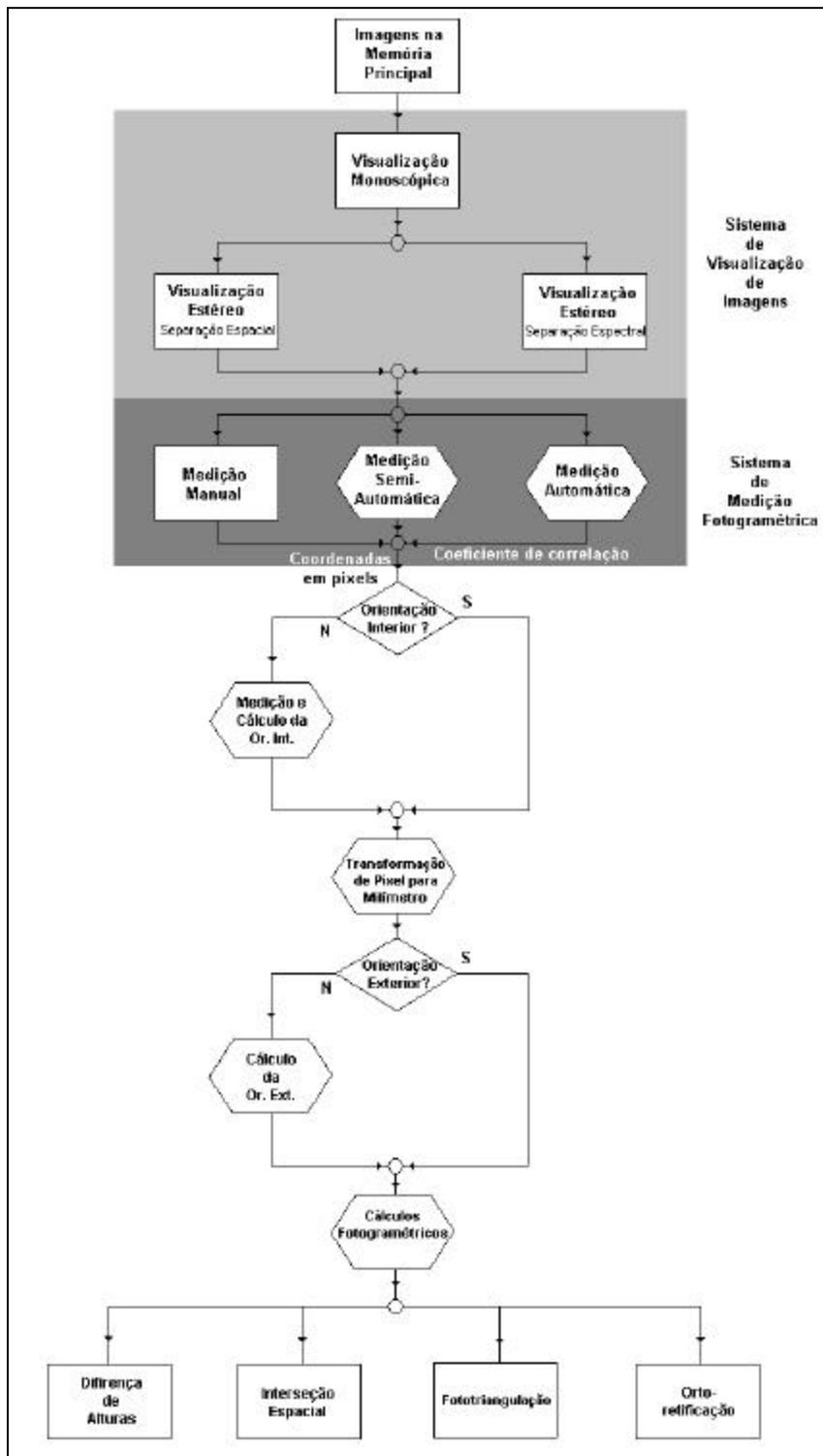


Figura 3.3 - Fluxograma do sistema de visualização e medição estereoscópicas em imagens fotogramétricas digitais.

3.2.2 - Pré-requisitos

Os pré-requisitos são todos os dados necessários e restrições das condicionantes de determinada solução de um problema. A figura 3.4 apresenta o fluxograma de pré-requisitos do sistema ora proposto. Esses pré-requisitos são descritos em seguida.

Os dados necessários para o sistema são:

- Imagens fotogramétricas digitalizadas com suas respectivas resoluções espacial e espectral;
- Certificado de calibração da câmara;
- Coordenadas das marcas fiduciais;
 - Distância focal calibrada da câmara;
 - Parâmetros de distorção da câmara.
- Dados de cobertura aerofotogramétrica:
 - Escala nominal de vôo;
 - Plano médio do terreno;
 - Fotobase (é medida antes da operação do sistema);
 - Aerobase (pode ser calculada no processo denominado “cálculos auxiliares”);
 - Altura e/ou altitude de vôo (pode ser calculada no processo denominado “cálculos auxiliares”).

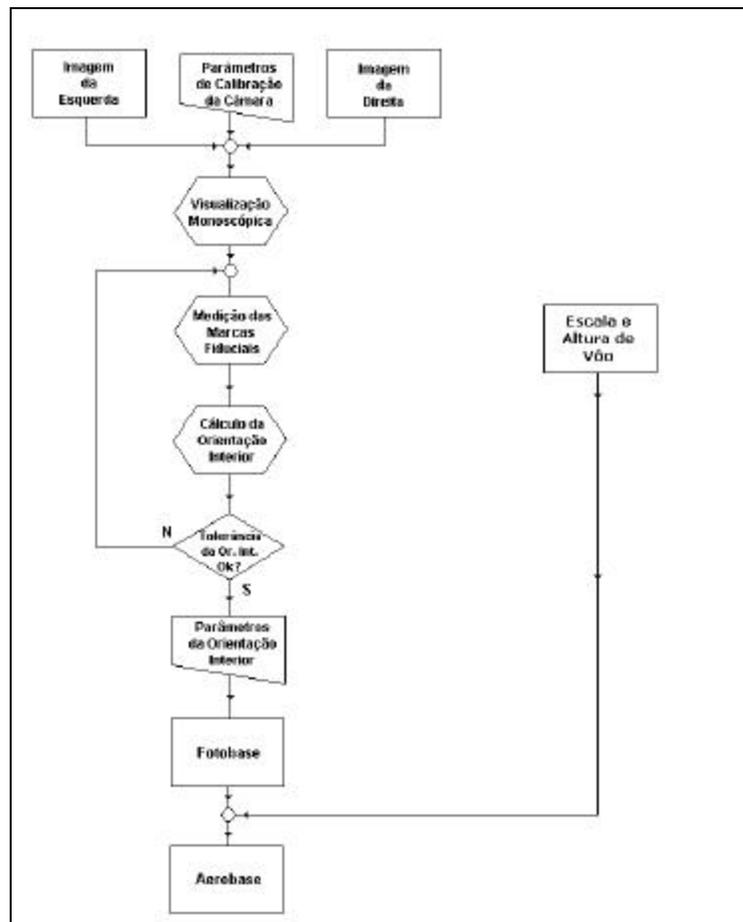


Figura 3.4 - Fluxograma dos pré-requisitos.

A fotobase é a medida da distância entre os centros perspectivas de duas imagens fotogramétricas que se sobrepõem. Devido ao efeito de paralaxe dos centros homólogos, efeito este ausente no centro de cada imagem, tira-se a média aritmética entre os valores obtidos em cada imagem fotogramétrica. A aerobase é essa medida correspondente no terreno. Para este cálculo, é necessário se conhecer a escala de vôo e/ou a altura média de vôo, pois a escala pode ser calculada a partir da altura de vôo e da distância focal calibrada.

As imagens fotogramétricas digitais normalmente ainda são obtidas digitalizando-se imagens fotogramétricas analógicas, o que geralmente fornece imagens em tons de cinza. O certificado de calibração da câmara acompanha as imagens fotogramétricas. A partir das coordenadas milimétricas das marcas fiduciais, mais as suas coordenadas em *pixels*, é possível fazer a orientação interior, conforme o apêndice A. Os dados das imagens são armazenados na memória principal do computador. Estas informações poderão ser gravadas em disco, em um arquivo no formato de texto, onde poderão ser utilizadas para futuras medições em um par de imagens fotogramétricas. É necessário que se obtenha pelo menos dois dos três dados referentes ao vôo: a distância focal calibrada, a altura média de vôo e a

escala nominal da cobertura aerofotogramétrica. A partir de dois desses dados, é possível determinar o terceiro, através da equação 2.1. Nota-se que escala é o dado do denominador, como por exemplo, 8000 em 1/8000.

O par de imagens digitalizados são carregadas na memória principal do computador. Se as imagens aéreas, obtidas por câmaras com 23,5 cm de lado do quadro (magazine), forem digitalizadas a 1200 DPI, necessitam de pelo menos 256 Mb de memória principal do sistema. Qualquer tentativa de acessar as imagens por partes, carregando-se estas diretamente do disco, tornará o sistema extremamente lento. Logo, deve-se carregar toda a imagem na memória principal.

3.2.3 - Componentes do Sistema

Alguns componentes são necessários para auxiliar o sistema. O primeiro componente, denominado “calibração de imagens”, tem como objetivo corrigir o posicionamento errôneo entre o par de imagens que formam a imagem final em estéreo, uma vez que as imagens fotogramétricas digitais não possuem alinhamento perfeito. Este componente irá simplesmente movimentar uma das imagens até que se alinhe com a outra na direção da cobertura aerofotogramétrica.

Outro componente, denominado “medição automática de pontos”, tem como objetivo determinar pelo método de correlação pares de pontos homólogos em duas imagens que aparecem com área de superposição (estéreopar). Por fim, oferece-se um par de barras verticais a fim de se calibrar o estereoscópio. Pode-se utilizar este módulo para treinamento do uso do estereoscópio de bolso no computador.

3.2.4 - Análise dos Requisitos do Sistema

Uma vez vistos todos os componentes necessários para a construção do sistema, é necessário fazer uma análise detalhada de como estes componentes irão interagir entre si e com o equipamento.

3.2.4.1 - Imagens Fotogramétricas Digitais

As imagens fotogramétricas digitais podem ter sido digitalizadas pelo órgão ou responsável pela aquisição das mesmas. Caso não tenham sido digitalizadas, deve-se digitalizar as imagens fotogramétricas analógicas conforme os conceitos apresentados no apêndice G. Desta forma, caso se deseje trabalhar em resoluções menores, deve-se simplesmente reduzir o tamanho da imagem com um editor de imagens. Para reduzir a resolução da imagem, deve-se dividir igualmente cada dimensão da mesma pela mesma taxa de redução da resolução. Por exemplo, se uma imagem tiver 10000 x 10000 pontos e 1200 DPI e desejar-se reduzi-la para a resolução de 600 DPI, faz-se:

- Taxa de redução = $1200 / 600 = 2$;
- Número de colunas = 10.000;
- Número de linhas = 10.000;
- Novo número de colunas = $10.000 / 2 = 5.000$;
- Novo número de linhas = $10.000 / 2 = 5.000$.

Se o usuário somente dispuser de uma imagem de 300 DPI e desejar aumentar para 600 DPI, não encontrará melhorias, uma vez que este aumento é artificial. De forma contrária, há perdas de uma imagem de 600 DPI para uma imagem de 300 DPI, tanto reduzida no computador como obtida por scanner. Portanto, esta é a razão de se ter imagens em maiores resoluções.

3.2.4.2 - Certificado de Calibração da Câmara

O certificado de calibração da câmara é fornecido pela empresa que produz as imagens fotogramétricas aéreas. Este certificado é o documento chave para se manipular uma ou mais imagens fotogramétricas. Os dados são referentes a todas as imagens tomadas por determinada câmara. O certificado deve-se observar dados referentes a:

- Distancia focal calibrada e sua precisão;
- Coordenadas das marcas fiduciais e suas precisões;
- Coordenadas do ponto principal e respectivas precisões;

- Parâmetros de distorção das lentes.

3.2.4.3 - Orientação Interior

A entrada para a orientação interior (apêndice A) são as coordenadas em milímetros e em *pixels* de todas as marcas fiduciais. De acordo com a figura 2.16, da seção 2.2.2.1, obtêm-se a coordenada em *pixels* de cada marca fiducial no centro do furo indicado pela seta. A obtenção da orientação interior é feita pelo módulo de orientação interior do E-FOTO.

O resultado da orientação interior são os seis parâmetros de uma transformação afim entre os sistemas de coordenada da imagem analógica (mm) e o da imagem digital (*pixels*). Esses parâmetros são calculados por intermédio de uma solução de ajustamento de observações que utiliza o princípio dos mínimos quadrados. Esta solução é denominada “método das equações de observação” ou “modelo paramétrico” (Brito, 2003). A solução desse sistema é fundamental, pois todas as equações fotogramétricas utilizam coordenadas em milímetros para encontrar os valores desejados.

3.2.4.4 - Fotobase

Fotobase é a distância em milímetros de um centro de perspectiva de uma foto para o centro de perspectiva da outra foto, transposto para a foto corrente. Na imagem 2.25, da seção 2.3.4, reproduzida na figura 3.5, corresponde à distância entre o e o' . Na prática, esta distância difere de uma imagem para a outra. Portanto, mede-se as duas distâncias e calcula-se a média entre elas.

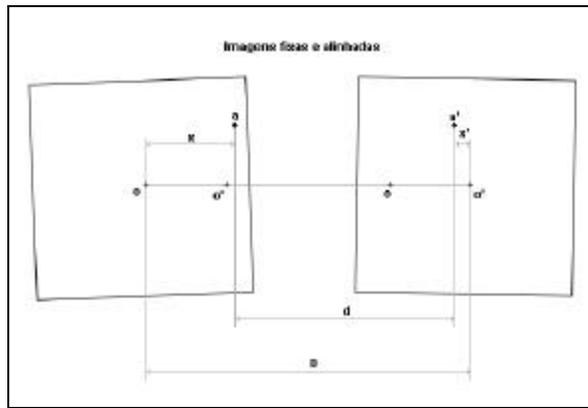


Figura 3.5 - Reprodução da figura 2.25.

Pode-se realizar esta medida tanto nas imagens fotogramétricas analógicas, como utilizando algum programa que realize medida entre pontos. O sistema proposto terá a informação das coordenadas em *pixels* e em milímetros do ponto corrente, conforme o usuário desloque o *mouse* pela imagem. Desta forma, será possível armazenar-se as coordenadas dos pontos o e o' e, em seguida, calcular o tamanho do segmento de reta que une os dois pontos, conforme a figura 3.6. Nota-se que um dos pontos tem coordenada próxima ao ponto 0,0 no sistema em milímetros. Porém, estas coordenadas são apresentadas no certificado de calibração da câmara, que contém também suas respectivas precisões.

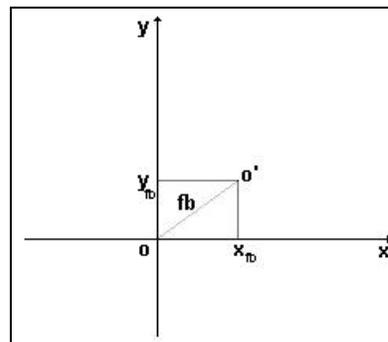


Figura 3.6 - Medição da fotobase.

Para a obtenção da fotobase, faz-se o seguinte cálculo:

$$fb = [(x_{o'} - x_o)^2 + (y_{o'} - y_o)^2]^{1/2} \quad (3.1)$$

3.2.4.5 - Armazenamento de Dados

Os dados fotogramétricos, tais como parâmetros da orientação interior, fotobase, aerobase etc, serão armazenados na memória principal do computador como elementos que podem ser acessados por qualquer parte do sistema. Estes dados poderão ser salvos em disco, afim de utilizá-los em futuras medições para o respectivo par fotogramétrico. Deve-se utilizar um módulo de inserção de dados em tempo de execução para se introduzir os dados pela primeira vez, carregar dados outrora introduzidos e salvos, ou salvar os dados em disco. Aliás, esta é uma tarefa da qual se encarrega o módulo de criação do projeto fotogramétrico.

As imagens fotogramétricas digitais que compõem o par estereoscópico de interesse deverão estar na memória principal do computador, por completo e sem nenhum tipo de compactação. A leitura de parte da imagem no disco torna o sistema extremamente lento. Da mesma forma, a imagem compactada na memória fará que o sistema dependa de um bom processador que a descompacte em tempo real, limitando o uso do programa. O tempo de descompressão de imagens é da ordem de segundos.

3.2.4.6 - Imagens Monoscópicas

As imagens monoscópicas são as imagens sem qualquer artifício para serem visualizadas em estéreo. É simplesmente a exibição individual de cada imagem armazenada na memória principal do computador (RAM). Cada imagem deverá aparecer individualmente para que o usuário faça medições fotogramétricas em objeto, sem o auxílio de qualquer dispositivo, tal como a visualização em anaglifo ou estereoscópica.

Uma imagem fotogramétrica digital de 300 DPI possui cerca de 2500 x 2500 *pixels*. O projeto prevê um ambiente com resolução gráfica mínima de 1024 x 768 *pixels*, pois resoluções maiores limitariam o uso do sistema a equipamentos mais modernos. Como deverão aparecer informações e botões de controle, este espaço deve ser reduzido para 800 x 600 pontos. Desta forma, uma imagem fotogramétrica será sempre maior do que sua janela de exibição. Quando o usuário passar o *mouse* sobre um ponto da imagem, este ponto deverá ser-lhe apresentado como o verdadeiro ponto da imagem (em seu sistema de coordenadas digitais), não um ponto relativo à janela de 800 x 600.

É interessante que o sistema forneça mecanismos para que o usuário obtenha as coordenadas dos pontos coletados para futuras referências. Por exemplo, no caso de

determinação de altura de objetos, é desejável que os pontos marcados como base e topo apareçam na imagem pois, de forma contrária, poderá confundir o usuário na marcação do ponto homólogo na segunda imagem fotogramétrica.

3.2.4.7 - Medição Automática de Pontos

No modo monoscópico pode-se introduzir um módulo de busca automática de pontos homólogos. Será utilizado o método de correlação de imagens digitais (apêndice H) e testadas quais configurações são necessárias para que se obtenha bons resultados com o menor esforço computacional possível.

3.2.4.8 - Visualização Estereoscópica

Para configurar as imagens fotogramétricas digitais para serem visualizadas com um estereoscópio, deve-se separá-las da mesma maneira como é feito analogicamente em instrumentos ótico-mecânicos. A vantagem de se fazer esta medição digitalmente é poder separar as imagens sem que as mesmas se sobreponham, como na medição analógica tradicional. Além disto, não é necessário fixar as imagens e nem manusear uma barra de paralaxe.

Deve-se dividir a janela de exibição em duas partes, de 400 x 600 *pixels* cada. Os centros perspectivos o e o centro perspectivo o' das duas imagens deverão estar afastados de uma distância equivalente à distância interpupilar. O alinhamento horizontal é feito sobre a origem das coordenadas milimétricas das duas imagens fotogramétricas (sistema de marcas fiduciais). Será incluso um módulo de medição interpupilar, onde duas barras paralelas verticalmente se aproximam e afastam.

Como os vãos fotogramétricos sofrem a influência das condições ambientais, deve ser incluída uma ferramenta de ajuste onde uma das imagens seja deslocada vertical e horizontalmente, para que certas regiões do modelo estereoscópico sejam observadas corretamente. A movimentação pelas imagens deverá ser feita de forma simultânea, senão serão perdidos os alinhamentos.

A obtenção de pontos neste modo não deverá ser feita com os cliques do *mouse*. Uma barra de paralaxe será construída. Esta barra é representada por dois círculos presentes no centro da tela, afastados entre si da distância interpupilar. Conforme o operador afaste estes círculos, a impressão dada é de que a marca estereoscópica desce no modelo estereoscópico. Isto acontece porque a diferença de paralaxe diminui, diminuindo a altura da marca. Do mesmo modo, quando aproxima-se as marcas, a sensação dada é de elevação sobre a imagem tridimensional do terreno. As marcas podem ser de cor preta, assim como o são numa barra de paralaxe. Obtêm-se o ponto de base ou topo, quando a marca atinge a altura do respectivo detalhe a ser medido. Os pontos das imagens da esquerda e da direita deverão ser coletados seqüencialmente. A figura 3.7 apresenta o comportamento da marca fiducial tanto nas imagens bidimensionais, como na visualização em estéreo. A figura 3.8 apresenta este mesmo comportamento no modo anaglifo.

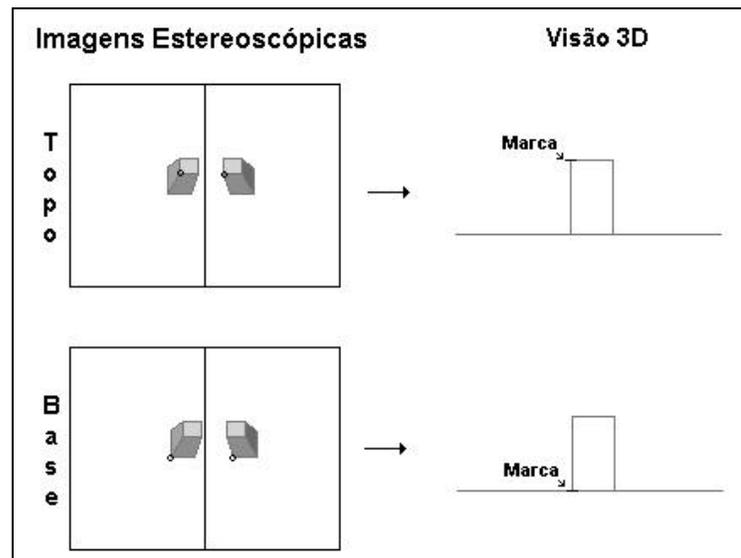


Figura 3.7 - Barra de paralaxe na visão estereoscópica.

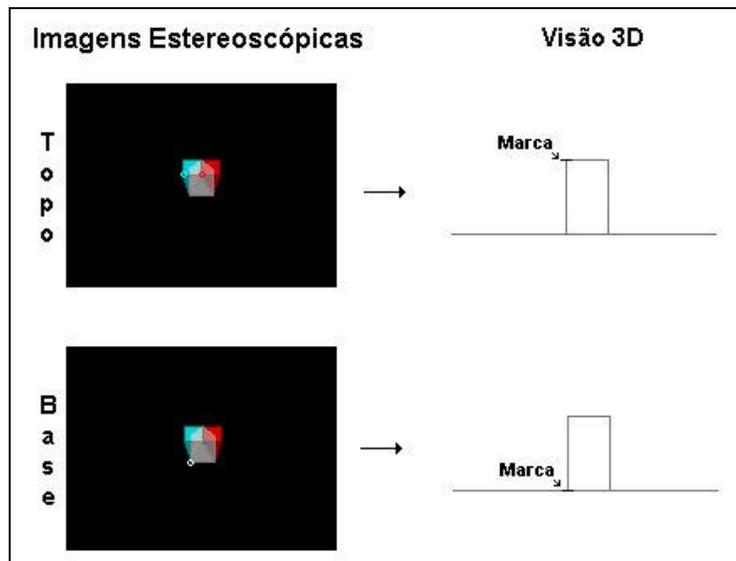


Figura 3.8 - Barra de paralaxe na visão em anaglifo.

3.2.4.9 - Imagens em Anaglifo

As imagens em anaglifo são as únicas que podem ser exibidas simultaneamente e de forma integral na janela de exibição. Desta forma, trabalha-se com um trecho maior das imagens e com maior dinamismo.

A imagem correspondente ao olho esquerdo deverá receber um filtro vermelho, da seguinte forma:

$$I_e (R_e, G_e, B_e) \times V(1,0,0) = I_{ev} (R_e, 0, 0) \quad (3.2)$$

A imagem vermelha resultante deverá ser uma nova imagem, pois caso o filtro seja aplicado na imagem original perde-se as informações relativas às componentes verde e azul. Porém, caso a imagem seja em tons de cinza, esta informação poderá ser recuperada, copiando-se o valor da componente vermelha para as demais componentes.

A imagem correspondente ao olho direito deverá receber um filtro ciano da seguinte forma:

$$I_d (R_d, G_d, B_d) \times C(0,1,1) = I_{dc} (0, G_d, B_d) \quad (3.3)$$

A mesma observação feita para a imagem vermelha quanto à geração de uma nova imagem é válida para a imagem ciano. Por fim, deve-se reunir as imagens em uma só, por intermédio da equação 3.4.

$$I_{ev}(R_e, 0, 0) + I_{dc}(0, G_d, B_d) = I_{an}(R_e, G_d, B_d) \quad (3.4)$$

Outra questão relevante é o alinhamento das imagens. Este alinhamento é feito da mesma forma que no modo estereoscópio. A diferença está na ausência da distância interpupilar, ou seja, os pontos homólogos dos centros de perspectiva serão coincidentes na visualização estereoscópica pelo processo anaglifo.

A medição de alturas dá-se da mesma maneira que é feita no modo estereoscópio, com diferença para as cores das marcas circulares da barra de paralaxe, onde uma é ciano e outra vermelha, além do fato de que, inicialmente, estas estão coincidentes devido à ausência de distância interpupilar.

A marca relativa aos objetos da imagem da esquerda, que é vermelha, é também vermelha. A marca relativa à imagem da direita, que é ciano, é também ciano. Quando a marca vermelha estiver à esquerda da marca ciano, a impressão dada ao observador é que a marca visualizada no modelo tridimensional está abaixo do plano das imagens. Ao contrário, quando a marca vermelha estiver à direita da marca ciano, a impressão dada ao observador é de que esta marca está acima do plano de visão da imagem no sistema tridimensional.

3.2.4.10 - Coordenadas em Milímetros

Os pontos coletados serão armazenados na memória em coordenadas milimétricas para serem aplicados nas equações de altura. Porém, a informação inicial é a coordenada em *pixels*. A partir da orientação interior, estas coordenadas são transformadas para milímetros (sistema de marcas fiduciais). Como a paralaxe está relacionada somente ao eixo x , não é necessário guardar informações quanto à coordenada milimétrica na direção transversal (y) à linha de vôo (x).

3.2.4.11 - Medições de Altura

A fim de testar a confiabilidade do sistema ora em desenvolvimento, são propostos dois métodos de medição de altura de objetos: a medição direta e a medição por elevações. Desta forma serão comparados os resultados e verificadas as influências e erros obtidos em cada um dos métodos.

A medição direta está relacionada com a equação 2.13 e a medição por elevações com a equação 2.15. A equação 2.13 necessita de dados como a altura média de vôo e a fotobase. A diferença de paralaxe é calculada em milímetros, de acordo com os pontos colhidos. Já a equação 2.15 precisa da altura média de vôo, da aerobase e da distância focal calibrada. A paralaxe é calculada de acordo com os pontos coletados.

3.2.5 - Interface com o Usuário

Uma vez analisadas as funcionalidades do sistema, deve-se analisar a interface do sistema com o usuário. Existem diversas possibilidades para criar uma interface com o usuário, pois o mais importante do sistema são as propriedades anteriormente descritas. Porém, decidiu-se fazer uma interface simples e funcional, apresentada na figura 3.9.

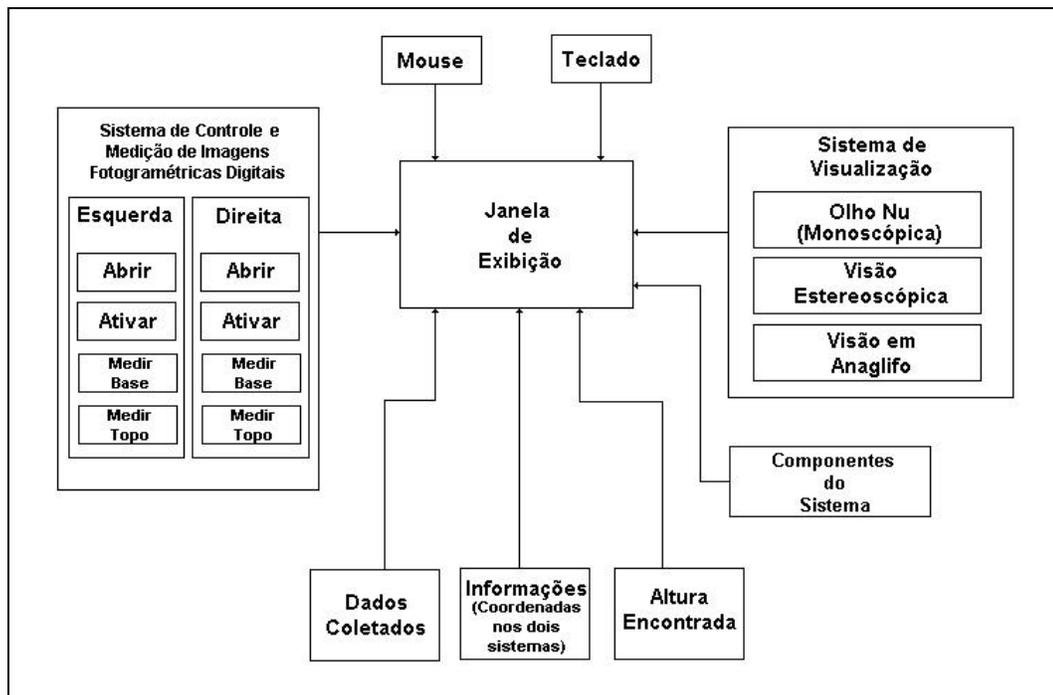


Figura 3.9 - Módulo de interface com o usuário do sistema de visualização e medição estereoscópicas.

O módulo de medição e controle de imagens irá carregar as imagens fotogramétricas digitais na memória principal, bem como controlará a exibição alternada no modo monoscópico e as medições dos pontos. Os dados coletados serão armazenados em campo homônimo, para que o usuário possa consultá-los e copiá-los para um arquivo texto ou uma planilha de cálculos. O *mouse* serve para medir pontos no modo monoscópico e também localizar pontos na imagem. O teclado servirá como um dispositivo auxiliar na movimentação das marcas de medição da “barra de paralaxe”. O usuário deverá escolher o modo de exibição das imagens. Porém, antes de exibir imagens em estéreo, deverá inserir os dados relativos às imagens fotogramétricas (esses dados já devem ter sido inseridos quando da criação do projeto). Por fim, após a medição dos pontos necessários na base e no topo de um objeto ou obra de arte, pode-se determinar a sua altura e, assim, testar a confiabilidade do sistema desenvolvido.

3.3 - Conclusões do Capítulo 3

A apresentação do projeto E-FOTO e de como o módulo de medição e visualização estereoscópicas se encaixa no contexto deste projeto, bem como das soluções propostas e dos requisitos necessários para o correto funcionamento do sistema, deve proporcionar condições para que se possa compreender a implementação concebida, que é apresentada no capítulo a seguir, assim como realizar possíveis alterações e melhorias no sistema.

Capítulo 4

Implementação

4.1 - O Ambiente do Sistema

O sistema de visualização e medição estereoscópicas foi desenvolvido para a plataforma Windows, utilizando o ambiente de desenvolvimento C++ Builder 3, da Borland. A escolha do sistema operacional Windows deve-se ao fato de que o projeto E-FOTO foi originalmente desenvolvido nesta plataforma, enquanto que a versão do E-FOTO para o Linux ainda passa por processo de desenvolvimento e adaptação.

O ambiente de desenvolvimento C++ Builder 3 é de uso livre para desenvolvedores, oferecendo inúmeros recursos inerentes ao desenvolvimento rápido e eficiente do projeto. Os requisitos básicos para o funcionamento do sistema são:

- Sistema Operacional Windows 95;
- Placa de vídeo com suporte ao modo 24 bits de cor;
- Placa de vídeo com resolução de 1024 x 768;
- Memória RAM de 64 MB, 512 MB para imagens de 1200 DPI.

O sistema de medições estereoscópicas, conforme a figura 4.1, é dividido nas seguintes partes:

- Zoom;
- Controle de Imagens;
- Visualização;
- Ferramentas;
- Imagem Esquerda;
- Imagem Direita;
- Informações Gerais;
- Imagem Fotogramétrica.



Figura 4.1 - O sistema de visualização e medição estereoscópicas.

O “zoom” amplia cinco vezes o tamanho da região sobre a qual o *mouse* está passando, na área da imagem. Serve para dar maior precisão ao usuário.

O “controle de imagens” é dividido em imagem da esquerda e imagem da direita. O botão “abrir” permite ao usuário carregar por vez uma imagem fotogramétrica no sistema. O formato da imagem deve ser *bitmap*. O botão “ver” permite ao usuário mudar a visualização entre a imagem da esquerda e a imagem da direita, quando o modo de visão for o de olho nu. O botão “medir base” serve para marcar o ponto na imagem referente à base do objeto de interesse. Do mesmo modo, o botão “medir topo” marca o ponto referente ao topo do objeto. As medições somente estarão à disposição do usuário quando a respectiva imagem estiver em uso.

A “visualização” é a parte onde se escolhe o modo de operação do sistema. Quando estiver no modo olho nu, ter-se-á as imagens editadas separadamente. Este é o modelo de medição monoscópica. O modo anaglifo funde as imagens para serem visualizadas com um par de óculos anaglifo. O modo estereoscópio permite ao usuário a visão em 3D através de um estereoscópio de bolso. Ambos são modelos de medições estereoscópicas.

As “ferramentas” contêm itens que servem de auxílio na utilização do sistema. A “busca automática” permite a localização do ponto homólogo quando se utilizam as medições de base ou topo. O botão “calibrar estereoscópio” permite ao usuário fazer a separação de pontos de um estereoscópio. Devido aos diferentes tamanhos de monitores e resoluções de telas, foi

necessário desenvolver esta ferramenta. O botão “dados das imagens” carrega, salva ou edita as principais características das imagens. O botão “calibrar imagem” permite ao usuário acertar o alinhamento da imagem da direita, de acordo com a imagem da esquerda. Este recurso foi adotado devido ao problema de distorções de vôo presentes em imagens não normalizadas.

Os painéis “imagem da esquerda” e “imagem da direita” exibem informações coletadas das medidas de base e topo da imagem.

O painel de “informações gerais” mostra a coordenada em *pixel* e em milímetros do local em que o *mouse* está passando sobre a imagem. O botão “altura” mede a altura do objeto, após os quatro pontos necessários terem sido coletados. Este sistema permite fazer a medição de altura tanto por medição direta, como por medição de alturas.

A “imagem fotogramétrica” exhibe a imagem digital em uso. Quando o modo for olho nu, conterà apenas uma imagem de cada vez. No modo anaglifo, exibirá as imagens fundidas, sendo necessário o uso dos respectivos óculos anaglifo. No modo estereoscópio serão exibidas as duas imagens ao mesmo tempo, cada uma ocupando metade do espaço. O tamanho total da área de exibição das imagens é de 800 pontos na horizontal e 600 pontos na vertical.

4.1.1 - Utilização do Sistema

Para uma explanação geral e completa do sistema, serão feitas medidas em separado nos três modos disponíveis. Para se trabalhar no sistema, deve-se ter à mão os dados de orientação interior, da calibração da câmara e da medida da fotobase.

O primeiro passo é carregar as duas imagens no sistema. Para tal, o usuário deverá pressionar o botão “abrir” da respectiva imagem. Para se percorrer a imagem, utilizam-se as barras de rolagem às margens da área de imagem.

Em seguida, é imprescindível que o usuário preencha os dados das imagens, conforme a figura 4.2. O formulário é composto da orientação interior, dos dados da câmara, da calibração do estereoscópio, da fotobase e da aerobase. Os dados da orientação interior serão provenientes do próprio projeto E-FOTO, ou poderão ter sido previamente calculados pelo usuário. Os dados da câmara estão no certificado de calibração. Quando um dos dados estiver faltando, este poderá ser calculado, apertando-se o botão “calcular”. Quando a calibração do estereoscópio for realizada, a distância em *pixels* é mostrada em “calibração do

estereoscópio”. Preenche-se a fotobase. Através do botão “aerobase” calcula-se o valor da mesma. Antes dessa opção, os dados da câmara deverão estar preenchidos.

Dados das Imagens

Orientação Interior

Esquerda: $x = -121 + 0,084 \cdot \text{coluna} + -0,00 \cdot \text{linha}$
 $y = 115,8 + -0,00 \cdot \text{coluna} + -0,08 \cdot \text{linha}$

Direita: $x = -122 + 0,084 \cdot \text{coluna} + 0,00 \cdot \text{linha}$
 $y = 116,2 + -0,00 \cdot \text{coluna} + -0,08 \cdot \text{linha}$

Dados de Câmera

Distância Focal Calibrada: 153,527999 mm
Altura Média de Vão: 1228,22399 m
Escala 1 / 8000

Calcular

Outros Parâmetros

Calibração do Estereoscópio: 150 Pontos
Fotobase: 84,5 mm
Aerobase: 676,094 m Aerobase

Carregar Dados Salvar Dados Alterar

Figura 4.2 - Dados das imagens.

Uma vez que o usuário carregou as imagens e passou os dados ao sistema, poderá fazer medições. Estes primeiros passos são comuns aos três modos de visão.

Para fazer a medição no modo olho nu, o usuário deverá localizar o objeto de interesse na imagem. É indiferente a escolha da imagem, se da esquerda ou da direita, para se fazer as primeiras coletas de dados. Em seguida, deverá ser pressionado o botão “medir base” ou “medir topo”, conforme a necessidade do operador, escolhendo-se o respectivo ponto na imagem, com o auxílio da janela de “zoom”, passando-se o *mouse* sobre o ponto e clicando com o botão esquerdo do mesmo. Desta forma, informa-se ao sistema as coordenadas do ponto de interesse. Uma marca de cor amarela será impressa na imagem, caso tenha sido medida a base do objeto, e uma marca de cor vermelha, caso tenha sido medido o topo do objeto. O mesmo deverá ser feito na outra imagem, totalizando quatro pontos. Por fim, determina-se o método de medição desejado (direto, alturas) e aperta-se o botão “medir altura”. A figura 4.3 apresenta as marcações feitas em um edifício, os quatro pontos colhidos e a altura encontrada.

Imagem Esquerda				Imagem Direita			
x (mm)	Coluna	Linha		x (mm)	Coluna	Linha	
Base:	29,5742	1788	1045	Base:	54,7713	797	1024
Topo:	32,6267	1824	1049	Topo:	55,1115	793	1030

Informações Gerais		
metros	Linha: 1351	Medição de Altura:
Altura: 47,4091	Coluna: 2143	<input checked="" type="radio"/> Medição Direta
<input type="button" value="Medir Altura"/>	x: 59,6413870	<input type="radio"/> Medição por Alturas
	y: 0,94293174	

Figura 4.3 - Medição pelo modo olho nu.

Para fazer as medições pelo método anaglifo, o usuário deverá carregar as imagens e preencher os seus respectivos dados, conforme o modo “olho nu”. Pressionando-se o botão “anaglifo” as imagens serão fundidas, onde a imagem da esquerda recebe o filtro vermelho e a imagem da direita o filtro ciano. A figura 4.4 mostra o modo anaglifo.

É desejável que as imagens sejam normalizadas, isto é, todas as distorções decorridas nas obtenções das imagens sejam corrigidas. Desta forma, as áreas de sobreposição terão o posicionamento bem próximo do ideal. Caso as imagens não tenham sido normalizadas, poderá ser utilizada a ferramenta de calibração de imagens para se alinhar os objetos. O alinhamento é feito movimentando-se a barra vertical ou a barra horizontal desta ferramenta.

Para a localização precisa de objetos poderá ser fechado um dos olhos, e somente a respectiva imagem é visualizada, inclusive no “zoom”. O cursor muda para a cor da respectiva imagem em medição. A medição é feita do mesmo modo que no modo olho nu, com a diferença de que ambas estão sendo visualizadas simultaneamente, ou seja, pode-se medir qualquer um dos quatro pontos.

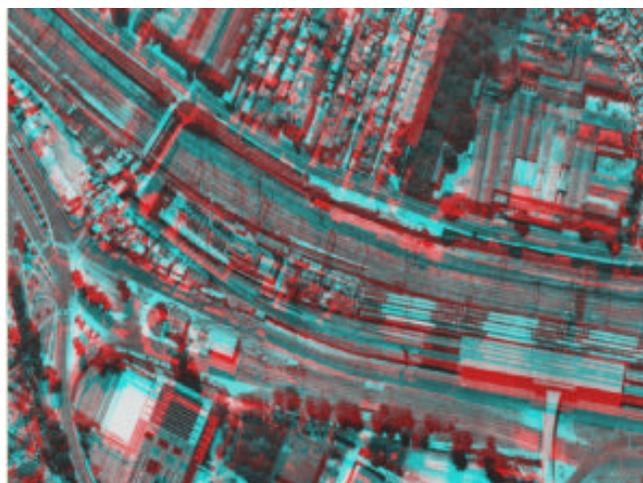


Figura 4.4 - Modo Anaglifo

Diferentemente dos modos “olho nu” e “estereoscópio”, as marcas são vermelhas para a imagem da esquerda e ciano para as imagens da direita.

Para se utilizar o estereoscópio de bolso deve-se carregar as imagens e os dados. Para a utilização deste modo, deve-se calibrar o estereoscópio antes de prosseguir. Para tal, deve-se clicar no botão “calibrar estereoscópio”, colocar o estereoscópio entre as barras separadas, juntando-as até que se fundam. Então, deve-se clicar no botão “retornar calibração”. Este modo deverá ser iniciado clicando-se no botão “estereoscópio”. As duas imagens são exibidas na tela, conforme a figura 4.5.



Figura 4.5 - Modo Estereoscópio

Como ambas as imagens estão sendo exibidas ao mesmo tempo, pode-se colher qualquer um dos quatro pontos. A exemplo do modo olho nu, quando coleta pontos da base, uma marca amarela é feita neste ponto, e outra vermelha os para pontos do topo. A medição estereoscópica é feita pela barra de paralaxe, descrita no item 4.2.5.

4.2 - A Construção do Sistema

A programação em C++ Builder é uma programação visual, onde há uma janela em que os componentes como botões, caixas de diálogo, *labels*, painel de imagens etc, são montados sobre ela. A esta janela chama-se de formulário. Neste tipo de ambiente, o sistema se comporta como analisador de eventos, isto é, ele espera alguma ação do usuário para tomar alguma atitude e dar uma resposta. Nos sistemas clássicos, o programador é o responsável pela interação entre usuário e máquina, sendo obrigado a informar a todo instante qual passo deverá ser tomado.

O sistema de medições estereoscópicas é composto de três formulários, onde um é o formulário principal do sistema, conforme a figura 4.1. O segundo é o formulário de dados das imagens, de acordo com a figura 4.2. Por fim, há um formulário responsável pelo deslocamento da imagem da direita para a coincidência com a imagem da esquerda, conforme a figura 4.3.

O C++ Builder cria uma classe formulário onde haverá diversos métodos, ou seja, funções pertencentes à classe formulário. A vantagem da criação de classes para cada formulário é a independência de variáveis entre formulários. Isto significa dizer que pode-se criar uma variável x para ambos os formulários, sem que um formulário altere o valor de x do outro. Os eventos de cada formulário, tais como clique sobre imagem, clique sobre botão, tecla pressionada etc, serão tratados como eventos da classe formulário. O nome do evento estará atrelado ao nome do componente correspondente. O método poderá receber parâmetros que serão analisados dentro deste código. Normalmente o método retorna um valor vazio, mas também poderá retornar algum tipo de variável.

O arquivo com extensão “.cpp” contém o código fonte do sistema. O arquivo com extensão “.h” contém a declaração da classe do formulário, bem como a declaração dos métodos. Poderão ser declaradas as variáveis dentro deste arquivo, classificadas como públicas ou privadas. As variáveis públicas podem ser enxergadas por qualquer classe, enquanto que as variáveis privadas somente poderão ser enxergadas pela classe que as criou.

A seguir, serão apresentadas todas as variáveis do sistema e métodos, bem como sua função. Do item 4.2.2 em diante, serão apresentadas as técnicas de construção do sistema.

4.2.1 - Variáveis e Métodos do Sistema

A tabela 4.1 apresenta todas as variáveis globais do formulário principal, chamado de Form1. A tabela 4.2 mostra todos os métodos deste formulário.

Tabela 4.1 - Constantes e variáveis do Form1.

Nome	Tipo	Valor Inicial	Função
cr<nome>	Constante	22 em diante	Tipo de ponteiro de mouse. Não foram implementados, porém estão disponíveis para futuras versões.
Bitmap1	TBitmap *	-	Objeto que conterà a imagem da esquerda.
Bitmap2	TBitmap *	-	Objeto que conterà a imagem da direita.

Tabela 4.1 - Continuação.

Nome	Tipo	Valor Inicial	Função
rBitmap	TBitmap *	-	Objeto com filtro vermelho de 800 x 600.
cBitmap	TBitmap *	-	Objeto com filtro ciano de 800 x 600.
b1Bitmap	TBitmap *	-	Objeto com buffer de 800 x 600.
b2Bitmap	TBitmap *	-	Objeto com buffer de 800 x 600.
largura_1	int	-	Indica o tamanho em x da imagem esquerda.
altura_1	int	-	Indica o tamanho em y da imagem esquerda.
largura_2	int	-	Indica o tamanho em x da imagem direita.
altura_2	int	-	Indica o tamanho em y da imagem direita.
base_1	float	-	Armazena o valor x da base na imagem da esquerda.
topo_1	float	-	Armazena o valor x do topo na imagem da esquerda.
base_2	float	-	Armazena o valor x da base na imagem da direita.
topo_2	float	-	Armazena o valor x do topo na imagem da direita.
dx_1	int	0	Indica o deslocamento da imagem esquerda em colunas.
dy_1	int	0	Indica o deslocamento da imagem esquerda em linhas.
dx_2	int	0	Indica o deslocamento da imagem direita em colunas.
dy_2	int	0	Indica o deslocamento da imagem direita em linhas.
a0_1, a1_1, a2_1, b0_1, b1_1, b2_1.	float	-	Coefficientes da orientação interior da imagem da esquerda.
a0_1, a1_1, a2_1, b0_1, b1_1, b2_1.	float	-	Coefficientes da orientação interior da imagem da direita.
fb	float	0	Fotobase.
df	float	0	Distância focal da câmara.
E	float	0	Escala, onde o valor é $E = 8000$ para escala 1/8000.
H	float	0	Altura de vôo.
B	float	0	Aerobase.
foto	bool	-	Indica a imagem em uso. 0 é a esquerda e 1 é a direita.
mede	char	0	Medição em uso, como topo, base, esquerda e direita.
visão	char	0	Tipo de medição. 0 olho nu, 1 anaglifo e 2 estereoscópio.
anaglifo[4]	int	-	Guarda deslocamentos causados pela fusão de imagens.
calibra	bool	false	Modo de calibração ativado ?
barra_esquerda	int	385	Barra de calibração esquerda do estereoscópio.
barra_direita	int	385	Barra de calibração direita do estereoscópio.
separacao	int	0	Separação da barra de calibração do estereoscópio.
Zoom_orig	TRect	-	Recorte da área origem de zoom.
Zoom_dest	TRect	(0,0,99,99)	Recorte da área destino de zoom.
zoom_center	TRect	(50,50,54,54)	Recorte da área de zoom central.
full_rect	TRect	(0,0,799,599)	Recorte de toda a área da imagem.
mark[4][2]	int	-	Guarda posições para desenhar as marcas na imagem.
parallax_bar[2][2]	int	-	Posição da barra de paralaxe.

Tabela 4.2 - Métodos do Form1.

Nome	Retorno	Função
FormCreate	void	Rotinas executadas na criação do formulário.
OpenLeftClick	void	Trata o evento de abertura de imagem da esquerda.
OpenRightClick	void	Trata o evento de abertura de imagem da direita.
ScrollBar1Change	void	Move a imagem horizontalmente, quando mudada a posição do <i>scroll</i> .
ScrollBar2Change	void	Move a imagem verticalmente, quando mudada a posição do <i>scroll</i> .
Image1MouseMove	void	Executa rotina toda vez que o <i>mouse</i> é movimentado na imagem.
Image1MouseDown	void	Executa rotina quando um botão do mouse for pressionado sobre a imagem.
ChangeLeftClick	void	Rotina para mudar a visualização da imagem direita para a esquerda.
ChangeRightClick	void	Rotina para mudar a visualização da imagem esquerda para a direita.
LeftBaseClick	void	Indica ao sistema que será feita medição na base da imagem esquerda.
LeftTopClick	void	Indica ao sistema que será feita medição no topo da imagem esquerda.
RightBaseClick	void	Indica ao sistema que será feita medição na base da imagem direita.
RightTopClick	void	Indica ao sistema que será feita medição no topo da imagem direita.
AlturaClick	void	Executa rotina de cálculo de altura.
Homologo	void	Executa rotina de busca de pontos homólogos por correlação.
Centralize	void	Centralizar a busca de homólogos.
Repaint	void	Redesenha a imagem.
Form1_to_Form2	void	Passagem de parâmetros do Form1 para o Form2.
Form2_to_Form1	void	Passagem de parâmetros do Form2 para o Form1.
BtnCalibraClick	void	Rotina para calibração do estereoscópio.
BtnDadosClick	void	Abre Form2, que é o formulário de dados.
AnaglifoClick	void	Muda para modo anaglifo.
Criar_Anaglifo	void	Chama rotinas necessárias para utilização do anaglifo.
Alinha_Imagens	void	Alinhamento de imagens.
FormKeyDown	void	Ajuste da barra de paralaxe.
EstereoClick	void	Muda para o modo estereoscópio.
NormalClick	void	Muda para o modo normal.
BtnCalibraImgClick	void	Abre o Form3, o formulário de calibração de imagens.
Calibra_Direita	void	Rotinas de calibração da imagem.

O Form2 é o formulário de dados das imagens. Há uma interação entre o Form1 e o Form2 através dos métodos Form1_to_Form2 e Form2_to_Form1. A tabela 4.3 apresenta os métodos do Form2, uma vez que a classe Form2 não tem variáveis globais. Nota-se que as variáveis globais são variáveis globais da respectiva classe.

O Form3 é o formulário responsável pelo controle de calibração da imagem direita. É composto por duas barras de regulagens, onde o início 0 é o centro das mesmas. A tabela 4.4 apresenta os métodos pertencentes à classe Form3.

Tabela 4.3 - Métodos do Form2.

Nome	Retorno	Função
BtnCamaraClick	void	Calcula o dado da câmara que estiver faltando.
BtnAerobaseClick	void	Calcula o valor da aerobase.
FormActivate	void	Rotinas necessárias quando o formulário é iniciado.
BtnAlterarClick	void	Altera os valores no Form1.
BtnSalvarClick	void	Salva os dados no formato de texto comum.
BtnCarregaClick	void	Carrega os dados salvos previamente.

Tabela 4.4 - Métodos do Form3.

Nome	Retorno	Função
TrackBar1Change	void	Move imagem da direita horizontalmente.
TrackBar2Change	void	Move imagem da direita verticalmente.
FormShow	void	Rotinas necessárias quando o formulário é aberto.

A maioria dos tipos de variáveis são de conhecimento geral, pois fazem parte da linguagem C. Porém, aparecem algumas variáveis que são do tipo API do Windows. A API do Windows é uma biblioteca do sistema operacional Windows com diversas funcionalidades, como por exemplo, funções para impressão, desenho de figuras geométricas em modo gráfico etc. O tipo “TBitmap” pertence à classe Graphics, onde seu conteúdo é uma imagem bitmap. Este tipo de variável permite uma total, fácil e poderosa manipulação de imagens. Já o tipo “TRect” é uma variável que contém as quatro coordenadas de um retângulo.

Apesar de fazer chamadas a bibliotecas do Windows, existem bibliotecas similares no Linux, tornando assim o sistema portátil para este sistema operacional.

4.2.2 - Visão Monoscópica

O processo de visão monoscópica foi desenvolvido para futuras implementações no campo de automatização de medições fotogramétricas. Além disso, serve para aqueles que têm problemas de visão estereoscópica.

Quando o botão “abrir” é pressionado, surge uma caixa de diálogo na tela para a localização do arquivo da imagem. Quando o arquivo é aberto, o tamanho da imagem é passado para as variáveis altura e largura, de acordo com a tabela 4.1. O deslocamento da imagem é zerado. Por fim, o método “ChangeLeftClick” ou “ChangeRightClick”, de acordo com a imagem, é chamado para executar as rotinas finais. A imagem da esquerda é carregada

na variável *Bitmap1* e a imagem da direita é carregada na variável *Bitmap2*. Os métodos “ChangeLeftClick” e “ChangeRightClick” ajustam as barras de rolagem, passando o tamanho da imagem para cada uma. O deslocamento das barras é de um em um *pixel*. Em seguida, a imagem é posicionada de acordo com o deslocamento. A variável *foto* é atribuída com o valor 0 se a imagem atual for a imagem da esquerda e com 1, se a imagem atual for a da direita. Alguns botões são bloqueados para que o usuário faça correto uso do sistema. Por fim, o método “Repaint” é chamado para desenhar a imagem. O responsável pelo desenho da imagem no formulário é o componente “Image1”. Esse componente é um componente do tipo imagem, onde sua função é exibir imagens e desenhos. O método “Image1->Canvas->Draw(x,y,objeto)” é quem passa a informação da variável do tipo *bitmap*, onde estão as imagens. Os valores *x* e *y* são as posições do canto superior esquerdo do “Image1” a ser copiado. O tamanho do recorte será o tamanho do componente Image1, que é de 800 x 600 pontos. O recorte sempre começa na posição 0,0 do objeto de origem. Portanto, se *x* e *y* forem negativos, desloca-se a imagem para a esquerda. Este método é apresentado na figura 4.6.

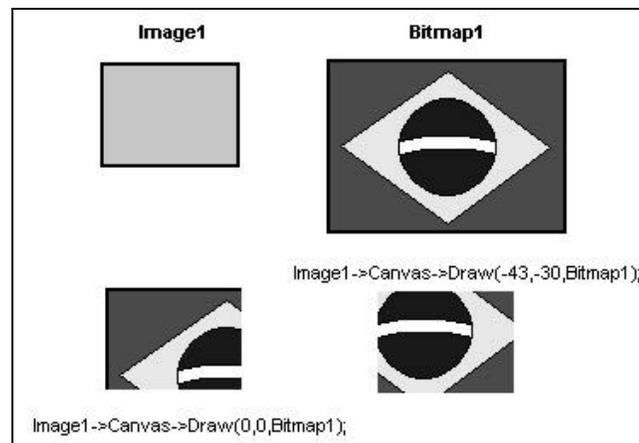


Figura 4.6 - Deslocamento da imagem no componente Image1.

Após terem sido carregadas as imagens, pode-se alterar a visualização das mesmas através do botão “ver”. O botão “ver” chama o método “ChangeRightClick”, caso a imagem a ser trocada seja a imagem da direita, e “ChangeLeftClick”, se a imagem a ser vista for a imagem da esquerda.

Antes de fazer qualquer medição, é necessário preencher os dados das imagens. Para isto, deve-se apertar o botão “dados das imagens”. Este botão irá chamar o Form2. O certificado de calibração das imagens fotogramétricas utilizadas como teste apresenta somente informações referentes à distância focal e a escala. Neste caso, pode-se utilizar o botão “calcular” para se determinar a altura média de vôo. O código deste botão é apresentado a seguir.

```

if (StrToFloat(Edit_H->Text)==0)
{
    Edit_H->Text=FloatToStr(StrToFloat(Edit_f->Text)*StrToFloat(Edit_E->
Text)/1000);
    return;
}
if (StrToFloat(Edit_f->Text)==0)
{
    Edit_f->Text=FloatToStr(StrToFloat(Edit_H->Text)/StrToFloat(Edit_E->
Text));
    return;
}
if (StrToFloat(Edit_E->Text)==0)
    Edit_E->Text=FloatToStr(1000*StrToFloat(Edit_H->Text)/StrToFloat(
Edit_f->Text));

```

Observa-se que este código tenta determinar se algum dos campos contém o valor 0. Se tiver, esse é o campo que está faltando para a realização do cálculo. “Edit” é um componente do tipo caixa de texto, onde os valores são passados ao sistema. “StrToFloat” é um método de conversão de tipo *AnsiString* para tipo *float*. “FloatToStr” faz a operação inversa. A equação utilizada no cálculo é a equação 2.1.

A fotobase pode ser determinada medindo-se a distância entre pontos *o* e *o'* das imagens, em milímetros. Para o cálculo da Aerobase, utiliza-se o botão “aerobase”. O código a seguir mede a aerobase, de acordo com a semelhança de triângulos LOO' e Loo' (Figura 2.27).

```

Edit_ab->Text=FloatToStr((StrToFloat(Edit_fb->Text)/1000)*(StrToFloat
(Edit_f->Text)/1000+StrToFloat(Edit_H->Text))/(StrToFloat(Edit_f->Text)
/1000));

```

A equação do código anterior pode ser simplificada em:

$$\text{aerobase} = \frac{\text{fotobase}}{\text{distância_focal}} \left(\frac{\text{distância_focal} + \text{altura_media}}{1000} \right) \quad (4.1)$$

A equação 4.1 é decorrente da semelhança de triângulos entre distância_focal e fotobase, com a distância_focal + altura média e aerobase. A divisão por mil nos dois cálculos é decorrente da transformação de unidades. Passa-se todo o sistema para metros.

O formato do arquivo de dados salvo é texto comum, podendo ser editado em qualquer editor de texto. Este arquivo contém uma mensagem de apresentação de duas linhas. A seguir, as variáveis são armazenadas de duas em duas linhas, onde a primeira recebe o nome da variável e a segunda, o valor.

O método “Form1_to_Form2” passa o conteúdo atual das variáveis globais do Form1 para os respectivos componentes do Form2. Do mesmo modo, o método “Form2_to_Form1” passa o conteúdo dos componentes atualizados para o Form1. Após a atualização dos dados das imagens, pode-se observar as coordenadas em *pixel* e em milímetros no campo “informações gerais”. O método responsável pelo cálculo é o método “Image1MouseMove”. Este método também é o responsável pelo aumento do trecho da imagem exibida no campo “zoom”.

O método “Image1MouseMove” recebe como parâmetros o estado da tecla “shift” e as coordenadas x e y de onde o *mouse* está passando sobre a imagem. O método “Image1MouseDown” é chamado toda vez que um dos três botões do *mouse* é pressionado sobre a imagem. Os parâmetros passados são o botão pressionado, o estado da tecla shift e as coordenadas x e y do local pressionado. Para efetuar a primeira medição de ponto na imagem deve-se pressionar o botão “medir base” ou “medir topo”, de acordo com o interesse do usuário. Em condições normais, a variável *mede*, relativa aos botões de medição, possui valor 0, indicando ao sistema que nenhuma medição será efetuada. Quando o botão “medir base” da imagem esquerda é pressionado, este valor é alterado para 1. O botão “medir topo” da imagem da esquerda altera este valor para 2. O botão “medir base” da imagem direita altera o valor de *mede* para 3. Por fim, o botão “medir topo” da imagem direita altera o valor para 4. De acordo com a variável *mede*, passa-se os valores do ponto para o campo de dados da imagem esquerda ou direita. Além disto, as coordenadas em *pixel* dos pontos marcados são passados para a variável *mark*, para que o método “Repaint” saiba onde marcar este ponto.

Caso o usuário tenha optado pelo método de busca automática quando um ponto é marcado, seu homólogo é buscado na outra imagem pelo método de correlação. A busca por correlação utiliza a biblioteca *correlação.h*.

A janela de *template* para a busca de pontos homólogos tem 7 *pixels* de lado, de acordo com os testes realizados no capítulo 5.

Teoricamente, um par de pontos homólogos na imagem distam do valor da fotobase. Porém, de acordo com deslocamento devido ao relevo e às distorções devido à atitude do avião, os pontos homólogos sofrem um pequeno desvio em relação a esta distância. Então, pode-se criar uma janela de pesquisa em torno destes pontos. Para se calcular as dimensões da janela de pesquisa em torno do ponto determinado pela distância da fotobase, pode-se adotar os seguintes critérios:

- Para o limite inferior e superior, supõe-se que o ponto homólogo sofreu um desvio angular do máximo permitido segundo os padrões fotogramétricos aceitáveis.
- Para os limites laterais, calcula-se a distância referente à diferença de paralaxe da altura exagerada de um objeto.

O apêndice M apresenta detalhadamente a construção desta janela de pesquisa. O código fonte da medição de pontos é apresentado a seguir.

```

switch (mede)
{
    case 0 : return; break;
    case 1 : EditLeftBasePx->Text=IntToStr(X-dx_1);
            EditLeftBasePy->Text=IntToStr(Y-dy_1);
            base_1=a0_1+a1_1*(X-dx_1)+a2_1*(Y-dy_1);
            EditLeftBaseMm->Text=FloatToStr(base_1);
            mark[0][0]=X-dx_1;
            mark[0][1]=Y-dy_1;
            break;
    case 2 : EditLeftTopPx->Text=IntToStr(X-dx_1);
            EditLeftTopPy->Text=IntToStr(Y-dy_1);
            topo_1=a0_1+a1_1*(X-dx_1)+a2_1*(Y-dy_1);
            EditLeftTopMm->Text=FloatToStr(topo_1);
            mark[1][0]=X-dx_1;
            mark[1][1]=Y-dy_1;
            break;
    case 3 : EditRightBasePx->Text=IntToStr(X-dx_2);
            EditRightBasePy->Text=IntToStr(Y-dy_2);
            base_2=a0_2+a1_2*(X-dx_2)+a2_2*(Y-dy_2);
            EditRightBaseMm->Text=FloatToStr(base_2);
            mark[2][0]=X-dx_2;
            mark[2][1]=Y-dy_2;
            break;
    case 4 : EditRightTopPx->Text=IntToStr(X-dx_2);
            EditRightTopPy->Text=IntToStr(Y-dy_2);
            topo_2=a0_2+a1_2*(X-dx_2)+a2_2*(Y-dy_2);
            EditRightTopMm->Text=FloatToStr(topo_2);
            mark[3][0]=X-dx_2;
            mark[3][1]=Y-dy_2;
            break;
}

```

```

Repaint();
if ((CheckBusca->Checked)&&(mede!=0))
    Homologo(StrToInt(LabelColuna->Caption),StrToInt(LabelLinha->Caption));

```

Observa-se que o método “Image1MouseDown” recebe as coordenadas x e y do componente Image1, onde se localiza a imagem digital. Este componente varia o valor de x de 0 a 799, bem como varia y de 0 a 599. Como a imagem pode estar deslocada, conforme a figura 4.6, o ponto real da imagem deve ser calculado introduzindo-se o deslocamento da imagem. Como o deslocamento é negativo, anula-se este sinal com outro sinal negativo.

Emprega-se para a conversão entre *pixels* e milímetro a transformação afim, descrita com detalhes no apêndice A, sendo dada por:

$$\begin{aligned}
 x &= a0 + a1.coluna + a2.linha \\
 y &= b0 + b1.coluna + b2.linha
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

onde:

- coluna - coordenada x em *pixels*;
- linha - coordenada y em *pixels*;
- $a0, a1, a2, b0, b1, b2$ - coeficientes da orientação interior;
- x - coordenada x em mm;
- y - coordenada y em mm.

Porém, a maioria das interfaces gráficas adotam x e y como coordenadas de *pixels*. Portanto, no código do sistema, as variáveis x e y serão as coordenadas em *pixels*, enquanto que linha e coluna serão as coordenadas em milímetros. Isto significa dizer que as equações 4.2 e 4.3 terão x e y trocados no código por coluna e linha, respectivamente, e vice-versa.

Após os quatro pontos terem sido coletados, pode-se determinar a altura do objeto. Foram colocados dois métodos de determinação de altura, conforme as equações 2.13 e 2.15. O código referente à medição de altura é apresentado a seguir.

```

if (!RadioAltitude->Checked)
{
    // Solução para objetos (Anderson)
    float dp=(topo_1-topo_2)-(base_1-base_2); // pb-pa
    EditHeight->Text=FloatToStr(H*dp/(fb+dp));
}

```

```

}
else
{
    // Solução para alturas (Kiefer)
    float pa=(base_1-base_2), pb=(topo_1-topo_2);
    float ha, hb;
    ha=H-(B*df/pa);
    hb=H-(B*df/pb);
    EditHeight->Text=FloatToStr(fabs(ha-hb));
}

```

O método “Repaint” é chamado toda vez que a imagem é carregada, há uma troca de visão ou quando se move a imagem pelas barras de rolagem. Este método desempenha funções diferentes de acordo com o modo de visão. O código do “repaint” relativo ao modo olho nu é apresentado a seguir.

```

Image1->Canvas->Pen->Width = 2;
Image1->Canvas->Brush->Style = bsClear;
if (!foto)
{
    Image1->Canvas->Draw(dx_1,dy_1,Bitmap1); // Desenha Imagem com o
deslocamento
    Image1->Canvas->Pen->Color = 0x0000FFFF; // Amarelo
    Image1->Canvas->Ellipse(mark[0][0]+dx_1-10, mark[0][1]+dy_1-10,
mark[0][0]+dx_1+10, mark[0][1]+dy_1+10);
    Image1->Canvas->Pixels[mark[0][0]+dx_1][mark[0][1]+dy_1]= 0x0000FFFF;
    Image1->Canvas->Pen->Color = 0x000000FF; // Vermelho
    Image1->Canvas->Ellipse(mark[1][0]+dx_1-10, mark[1][1]+dy_1-10,
mark[1][0]+dx_1+10, mark[1][1]+dy_1+10);
    Image1->Canvas->Pixels[mark[1][0]+dx_1][mark[1][1]+dy_1]= 0x000000FF;
}
else
{
    Image1->Canvas->Draw(dx_2,dy_2,Bitmap2);
    Image1->Canvas->Pen->Color = 0x0000FFFF;
    Image1->Canvas->Ellipse(mark[2][0]+dx_2-10, mark[2][1]+dy_2-10,
mark[2][0]+dx_2+10, mark[2][1]+dy_2+10);
    Image1->Canvas->Pixels[mark[2][0]+dx_2][mark[2][1]+dy_2]= 0x0000FFFF;
    Image1->Canvas->Pen->Color = 0x000000FF;
    Image1->Canvas->Ellipse(mark[3][0]+dx_2-10, mark[3][1]+dy_2-10,
mark[3][0]+dx_2+10, mark[3][1]+dy_2+10);
}

```

```

Image1->Canvas->Pixels[mark[3][0]+dx_2][mark[3][1]+dy_2]= 0x000000FF;
}

```

Esse código verifica se a imagem atual é a imagem esquerda ou a imagem direita, através da variável *foto*. A cor do desenho é alterada pelo método “Image1->Canvas->Pen->Color”. A cor é determinada pela seqüência de componentes de cor azul, verde e vermelha, com um *byte* para cada. No sistema hexadecimal, corresponde ao valor 0x00BBGGRR, onde BB é um *byte* com a intensidade de azul, GG um *byte* com intensidade de verde e RR um *byte* com a intensidade de vermelho.

O método “Image1->Canvas->Ellipse” desenha uma elipse na imagem. Já o método “Image1->Canvas->Pixels” serve para marcar pontos na imagem. O ponto marcado em questão é o ponto central da elipse. O método “Image1->Canvas->Pen->Width” corresponde à largura do traço da elipse.

Os dados obtidos na medição poderão ser copiados diretamente dos componentes caixa de texto dos valores medidos para qualquer documento.

4.2.3 - Visão em Anaglifo

A partir de um anaglifo pode-se trabalhar com as duas imagens simultaneamente. O grande desafio deste modo de visão é fazer coincidir as imagens corretamente. Diferente da visão com estereoscópio, onde as imagens são separadas de 6,5 cm, as imagens serão sobrepostas. Então, como sobrepor duas imagens onde os objetos apresentam claras distorções radiais em relação à outra imagem? A resposta está no ponto principal da imagem. No ponto principal não existe distorção radial, ou seja, a posição deste ponto é perfeitamente vertical. Como a fotobase medida é a média das fotobases medidas nas duas imagens, e pressupondo que as imagens não têm distorções devido à normalização do par estereoscópico, o centro homólogo se localiza a esta distância do centro da imagem, considerado como imagem-base.

A equação 4.2 serve para calcular a coordenada em milímetros a partir de um *pixel*. Para se encontrar a origem em *pixels* da imagem fotogramétrica, deve-se rearranjar a equação 4.2:

$$\begin{aligned}
 \text{coluna} &= (b2.x - b2.a0 - a2.y + b0.a2) / (a1.b2 - b1.a2) \\
 \text{linha} &= (a1.y - a1.b0 - b1.x + b1.a0) / (b2.a1 - b1.a2)
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

No código do programa há a inversão das variáveis coluna e linha com x e y , conforme já foi citado anteriormente. Porém, elas serão citadas no texto da maneira convencional.

Fazendo-se x e y igual a 0, acha-se os pontos centrais correspondentes em *pixels*. Apesar do centro não estar exatamente no ponto 0,0 (o certificado de calibração apresenta as coordenadas do centro dos eixos), quando se adota a coordenada 0,0 nas duas imagens fotogramétricas com fins de alinhamento, o erro relativo entre as imagens é nulo. Para se encontrar o ponto homólogo, faz-se coluna em *pixels* igual a fotobase positiva na imagem da esquerda, e coluna igual fotobase negativa na imagem da direita. Uma vez determinados os pontos centrais e seus homólogos, traz-se a origem homóloga da imagem da esquerda para coincidir com a origem desta imagem, conforme a figura 4.7.

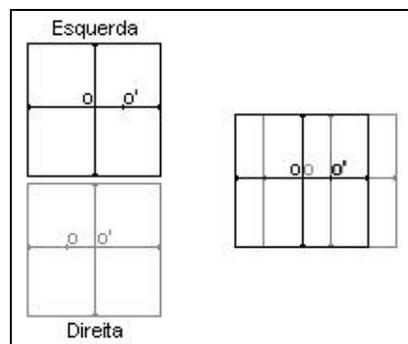


Figura 4.7 - Coincidência de imagens
no modo anaglifo.

Normalmente as imagens fotogramétricas são em tons de cinza, ocupando apenas uma banda de cor, isto é, 256 tonalidades no sistema de vídeo do computador. As imagens são na maioria das vezes grandes, na ordem de 8 *Megabytes* na resolução de 300 DPI, 32 *Megabytes* para resolução de 600 DPI e 128 *Megabytes* para a resolução de 1200 DPI. O anaglifo necessita aumentar o número de bandas para três, pois serão necessários utilizar os componentes de cor vermelho, verde e azul, sem comprometer a resolução espectral da imagem. Isto significa dizer que o tamanho da imagem triplicará. Neste caso, um par de imagens fotogramétricas de 1200 DPI ocuparia 768 *Megabytes* de memória RAM do sistema, tornando a execução do sistema de medições fotogramétricas restrito à máquinas com pelo menos 1 *Gigabyte* de memória RAM. Tornou-se necessário fazer otimizações para que a utilização do sistema fosse de melhor eficiência.

A região de interesse está presente somente nos 60% de sobreposição das imagens. Portanto, não há a necessidade de exibir as duas imagens na totalidade. A manipulação individual dos *pixels* é bastante lenta, tendo-se em conta que as imagens variam de cerca de 8

milhões de *pixels* a 128 milhões de *pixels*. Observa-se que o tempo de resposta aumenta com o tamanho da imagem. A biblioteca gráfica do Windows possui funções que fazem chamadas diretas ao *hardware* da placa gráfica. Deste modo, o tempo das operações cai significativamente. Como a área de exibição está restrita a 800 x 600 pontos, basta apenas operar sobre esta área da imagem.

Existem dois caminhos a serem seguidos: gerar uma terceira imagem com três bandas, porém processada apenas uma vez, ou gerar o recorte de 800 x 600 toda vez que se movimenta a imagem. Observou-se durante a execução do sistema que o tempo de atualização da imagem é inferior a um segundo, ou seja, é satisfatório. Desta forma, economiza-se memória e tem-se uma atualização eficiente. Os passos para geração da imagem em anaglifo são descritos adiante.

- 1- Recortar uma janela de 800 x 600 pontos na imagem da esquerda;
- 2- Aplicar um filtro vermelho nesta imagem;
- 3- Recortar uma janela de 800 x 600 pontos na imagem da direita;
- 4- Aplicar um filtro ciano nesta imagem;
- 5- Juntar as duas imagens.

Conforme a tabela 4.1, existem quatro variáveis do tipo *Bitmap* destinadas a esta operação. O *rBitmap* conterá uma imagem de 800 x 600, com todos os *bytes* possuindo o componente de cor vermelho com seu valor máximo igual a 255 e as demais bandas em 0. O *cBitmap* terá uma imagem de mesmo tamanho, com todos os *bytes* possuindo os componentes de cor azul e verde com seu valor máximo igual a 255 e a vermelha em 0. *b1Bitmap* e *b2Bitmap* são *buffers* de 800 x 600 para as operações.

Há uma função de cópia de recortes da API do Windows que copia a fonte no destino, aplicando operações lógicas. Trata-se do método “CopyRect”.

Pega-se o recorte diretamente da imagem fotogramétrica da esquerda, e o copia para o *b1Bitmap*. Junta-se com o filtro vermelho, armazenando o resultado em *b1Bitmap*. A operação lógica entre o filtro e o recorte da imagem é o *AND* (E). Em seguida, faz-se o mesmo para o recorte da imagem da direita com o filtro ciano, armazenando o resultado em *b2Bitmap*. Para juntar o resultado, aplica-se a operação lógica *OR* (OU) nos dois *buffers*, armazenando o resultado em *b2Bitmap*. Então, faz-se uma cópia no componente Image1. Este esquema é mostrado na figura 4.8.

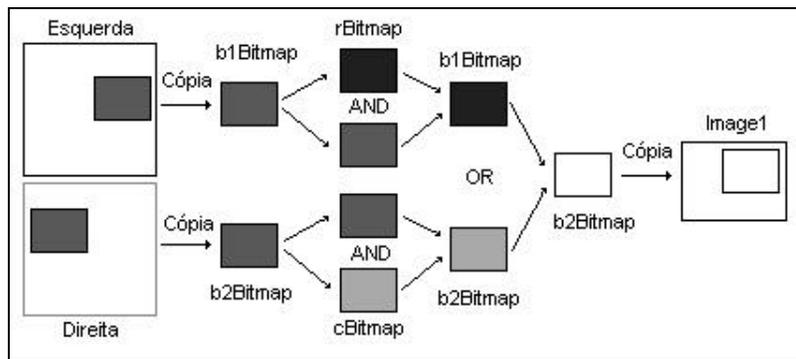


Figura 4.8 - Esquema de geração de imagem em anaglifo.

A operação lógica *AND* modifica os bits, segundo a tabela 4.5, e a operação lógica *OR* modifica os bits, de acordo com a tabela 4.6.

Tabela 4.5 - Tabela verdade AND.

Entrada A	Entrada B	Saída
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Tabela 4.6 - Tabela verdade OR.

Entrada A	Entrada B	Saída
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

A operação age sobre a imagem *pixel a pixel* e banda a banda. Os *buffers* possuem 24 bits de resolução espectral, enquanto que os filtros possuem 8 bits. O *buffer* deve possuir resolução espectral total, porque é nele que ocorrem as operações lógicas. Para um *pixel* qualquer, a transformação realizada com o filtro vermelho é:

$$P_{na}(C,C,C) \text{ AND } R(255,0,0) = P_{na}(C_r,0,0)$$

Para o filtro ciano a transformação é a seguinte:

$$P_{nb}(C,C,C) \text{ AND } R(0,255,255) = P_{nb}(0,C_c,C_c)$$

Por fim, a operação *OR* entre as imagens filtradas é:

$$P_{na}(C_r, 0, 0) \text{ OR } P_{nb}(0, C_c, C_c) = P_n(C_r, C_c, C_c)$$

Onde:

- C - nível de cinza;
- P - (R,G,B);
- C_r - Nível de cinza filtrado em vermelho;
- C_c - Nível de cinza filtrado em ciano.

A memória utilizada deste modo fica:

$$2 \times (800 \times 600 \times 3) + 2 \times (800 \times 600) = 3.840.000 \text{ bytes.}$$

A área restrita ao sistema é calculada, de forma que o x da imagem da direita não seja menor que 0, em *pixels*, nem que x ultrapasse a largura máxima da imagem da esquerda. Em relação ao eixo y , calcula-se o deslocamento da origem da imagem da direita em relação à origem da imagem da esquerda. Em seguida, desloca-se a imagem da direita para que haja coincidência em relação a este eixo. O código que alinha as imagens em anaglifo é apresentado a seguir.

```
// Coordenadas do ponto o na imagem esquerda
xo1=int((b2_1*C-b2_1*a0_1-a2_1*L+b0_1*a2_1)/(a1_1*b2_1-b1_1*a2_1)); // O
yo1=int((a1_1*L-a1_1*b0_1-b1_1*C+b1_1*a0_1)/(b2_1*a1_1-b1_1*a2_1));
// Coordenadas do ponto o' na imagem direita
xo2=int((b2_2*C-b2_2*a0_2-a2_2*L+b0_2*a2_2)/(a1_2*b2_2-b1_2*a2_2)); // O'
yo2=int((a1_2*L-a1_2*b0_2-b1_2*C+b1_2*a0_2)/(b2_2*a1_2-b1_2*a2_2));
// Coordenadas do ponto o' na imagem esquerda
C=fb;
xo12=int((b2_1*C-b2_1*a0_1-a2_1*L+b0_1*a2_1)/(a1_1*b2_1-b1_1*a2_1)); // O'
homólogo
yo12=int((a1_1*L-a1_1*b0_1-b1_1*C+b1_1*a0_1)/(b2_1*a1_1-b1_1*a2_1));
// Coordenadas do ponto o na imagem direita
C=-fb;
xo21=int((b2_2*C-b2_2*a0_2-a2_2*L+b0_2*a2_2)/(a1_2*b2_2-b1_2*a2_2)); // O
homólogo
yo21=int((a1_2*L-a1_2*b0_2-b1_2*C+b1_2*a0_2)/(b2_2*a1_2-b1_2*a2_2));
```

```

// Determina margens da imagem fundida
ScrollBar1->Max=largura_1-(xo1-xo2l)-800; // Largura da imagem
dy=yo1-yo2;
if (altura_1<altura_2+dy)
    maxY=altura_1;
else
    maxY=altura_2;
if (dy<0)
    minY=0;
else
    minY=dy;
ScrollBar2->Max=maxY-minY-600; // Altura da Imagem
// Alinha imagens
ScrollBar1->Position=0;
ScrollBar2->Position=0;
anaglifo[0]=-(xo1-xo2l);
anaglifo[1]=0;
anaglifo[2]=0;
anaglifo[3]=dy;
dx_1=anaglifo[0]; dy_1=anaglifo[1];
dx_2=anaglifo[2]; dy_2=anaglifo[3];

```

Se o par de imagens utilizadas no sistema não estiver normalizado, pode-se utilizar o módulo de alinhamento. Este módulo aumenta ou diminui o deslocamento da imagem da direita. Este processo é semelhante ao ajustamento manual de imagens fotogramétricas analógicas, com diferença no fato que as imagens não poderão ser rotacionadas.

Percebe-se que, tanto na imagem como no “zoom”, se o usuário olhar somente com uma das lentes irá observar apenas a imagem correspondente ao olho aberto. Desta forma, pode-se aumentar a precisão das medidas.

O sistema de marcação de pontos neste modo é diferente dos demais. Tanto a base como o topo de cada imagem é marcado numa só cor. A imagem da esquerda possui marcações vermelhas, enquanto que a imagem da direita possui marcações em ciano. O cursor muda de cor conforme o lado escolhido para efetuar-se a marcação. Quando um ponto é marcado na base da imagem esquerda, aperta-se o botão correspondente na imagem da direita, fazendo o cursor ciano chegar ao mesmo plano que a marca vermelha, afastando ou aproximando o cursor horizontalmente desta marca.

4.2.4 - Visão Estereoscópica

O modo de visão estereoscópica permite a visão estéreo nos mesmos moldes dos estereoscópios utilizados em fotogrametria analógica. As imagens neste modo são separadas fisicamente na tela. A área de imagem de 800 x 600 é dividida horizontalmente em duas partes de 400 x 600. O alinhamento é feito pela rotina de alinhamento do anaglifo, partindo-se da posição de superposição. Este modo isenta qualquer tipo de processamento diretamente sobre as imagens, ou seja, é apenas uma cópia do recorte da imagem fotogramétrica para a devida posição. O alinhamento do estereoscópio consiste em encontrar a distância entre as oculares. Esta medida possui variações quanto:

- Ao tamanho do monitor;
- À resolução da tela;
- À distância interpupilar do usuário.

Ao clicar sobre o botão “calibrar estereoscópio” surgirão duas barras verticais na tela. Movimentando-se a barra de rolagem horizontal afastam-se ou aproximam-se as barras. O usuário então deve posicionar o estereoscópio entre as barras. O ponto ideal de calibração é o ponto em que as barras se fundem na visão do usuário. A figura 4.9 mostra as barras de calibração.



Figura 4.9 - Calibração de estereoscópio.

As barras de calibração foram criadas de cores distintas, para facilitar a identificação das mesmas pelo usuário. O valor da calibração é medido em *pixels*, e aparece no formulário de dados, ou Form2.

Após o alinhamento das imagens e da calibração do estereoscópio, uma rotina do método “EstereoClick” é chamada para corrigir a posição da imagem da esquerda. A equação que corrige a imagem da esquerda é a seguinte:

$$dx_1 = 400 - \text{separação} + dx_1 \quad (4.2)$$

O valor 400 é o tamanho da janela de cada imagem neste modo. A finalidade desta equação é fazer a coincidência dos pontos homólogos nas imagens da esquerda e da direita. Em seguida, as imagens devem ser afastadas de tal modo que os pontos homólogos fiquem afastados entre si à distância correspondente à distância interpupilar, medida na calibração do estereoscópio. A marcação de pontos neste modo é semelhante ao modo olho nu. A diferença está no tamanho do círculo, que coincide com o tamanho do cursor.

4.2.5 - Barra de Paralaxe

A barra de paralaxe é uma ferramenta auxiliar que permite a medição de pontos em estéreo. São dois círculos, que tem como finalidade serem observados separadamente por cada olho do operador, tais que esses círculos se fundam sobre o objeto. A figura 4.10 mostra a presença das marcas no modelo estereoscópico, sobre um ponto em comum. Para o observador, uma única marca será observada no nível do objeto (em seu topo ou em sua base).



Figura 4.10 - Marcas da barra de paralaxe.

Através da tecla A, a barra sobe na tela, e da tecla Z, a barra desce na tela. A tecla < afasta as marcas, enquanto que a tecla > aproxima as marcas. A impressão dada para o modo estereoscópio é que as marcas estão subindo quando pressionada a tecla >. Do mesmo modo,

se esta mesma tecla for pressionada no modo anaglifo, a impressão é de que elas estão subindo. Quando pressionada a tecla <, as marcas aparentam estar descendo no terreno. As marcas no modo anaglifo começam coincidindo na tela. São duas marcas, uma vermelha e outra ciano.

A diferença entre o modo de medição feita nesse sistema e a medição feita em imagens fotogramétricas analógicas, é que nesse sistema são as imagens que se movem, porque a barra de paralaxe é fixada longitudinalmente.

4.3 - Conclusões do Capítulo 4.

Este capítulo apresentou uma solução para o sistema proposto no capítulo 3, bem como proporcionou um ambiente para se testar toda a teoria aplicada a este projeto. O capítulo a seguir realiza uma série de testes, com o propósito de se testar todas as variáveis que envolvem o sistema de visualização e medição estereoscópicas, obtendo-se conclusões sobre a implementação do sistema, bem como os problemas encontrados e suas possíveis soluções.

Capítulo 5

Testes e Análises de Resultados

Este capítulo tem por finalidade realizar a descrição detalhada dos testes realizados nesta dissertação. Há que se ressaltar que esses testes tiveram por objetivo especificar a verificação da implementação realizada. Existindo algum problema, detecta-lo e apresentar a definição da solução de forma que o módulo de visualização e medição estereoscópicas possa vir a ser efetivamente integrada ao projeto E-FOTO.

O primeiro teste tem como objetivo verificar os resultados em um par de imagens (modelo estereoscópico) a partir de diferentes resoluções espaciais. Desta forma, observa-se a coerência das diferentes resoluções e quais os problemas encontrados em cada caso.

O segundo teste compara o resultado entre imagens fotogramétricas originais e as mesmas imagens fotogramétricas normalizadas, apenas em uma resolução. Assim, deseja-se verificar a influência das distorções da cobertura aerofotogramétrica nos resultados finais.

O terceiro teste compara os resultados gerais com a medição analógica assistida por computador, realizada em laboratório, através do restituidor analógico Kern PG-2 existente no laboratório de fotogrametria da UERJ. Este equipamento serve, dentro de outras finalidades, para medir a altura dos objetos a partir de um par de imagens fotogramétricas analógicas.

O quarto teste verifica a coerência de alguns pontos comuns entre as imagens 16, 17 e 18.

Para os quatro primeiros testes, coloca-se o ponto do nível da base o mais próximo possível do objeto, amenizando assim os erros devido às distorções presentes nas imagens.

O quinto teste verifica o efeito da distorção de imagens, quando o ponto da base é medido nas proximidades e distante do objeto em questão.

Os cinco primeiros testes foram realizados a olho nu, como objetivo de se testar a precisão do sistema, buscando-se os pontos homólogos de forma mais precisa possível.

O sexto teste faz uma verificação no modo de medição automática do ponto conjugado por correlação de imagens.

O sétimo teste mede alguns pontos utilizando-se o modo de visão estéreo.

Ao final do capítulo é incluído um relatório de erros devido à escolha de *pixels* vizinhos ao *pixels* correto.

5.1 - Material Utilizado

Para os testes de implementação do sistema de visualização e medição estereoscópicas foram utilizados os seguintes dados:

- Um conjunto de 3 imagens fotogramétricas aéreas em escala 1/8000. Estas imagens foram digitalizadas nas seguintes resoluções geométricas: 300 DPI, 600 DPI e 1200 DPI;
- Implementação da orientação interior das imagens pela transformação afim (apêndice A);
- Um conjunto de 30 pontos fotogramétricos de teste, cujas coordenadas foram obtidas em campo (pontos X , Y e Z) ou por intermédio de um restituidor analógico Kern PG-2. 29 desses pontos referem-se ao topo de objetos selecionados, enquanto que 1 ponto destina-se à base de um dos objetos. O apêndice C apresenta imagens dos objetos escolhidos, enquanto que os resultados da medição analógica encontram-se no apêndice I desta dissertação;
- Um conjunto de 10 pontos para o teste de correlação. Estes pontos também são apresentados no apêndice C;
- Certificado de calibração da câmara fotogramétrica, apresentado no apêndice E;
- Um óculos analifo nas cores vermelho e ciano;
- Um estereoscópio de bolso;
- Um computador Pentium IV 2.8 GHz, 256 MB de memória RAM.

5.2 - Primeiro Teste: Diferentes Resoluções Espaciais

Este teste tem como objetivo verificar se há coerência de dados utilizando pares de imagens fotogramétricas de diferentes resoluções. Foram realizadas medidas em 30 pontos presentes na área de superposição de duas imagens fotogramétricas. Vinte e nove destes pontos são pontos relativos ao topo de objetos. Um ponto foi reservado à base de um objeto, onde se encontra em terreno bem mais elevado e com maior dificuldade de identificação do que as demais devido à inexistência de arruamentos próximos.

As medições foram realizadas manualmente, no modo “olho nu”, escolhendo-se os pontos no topo dos objetos e determinando-se pontos próximos a base (apêndice C). Devido ao fato de um mesmo ponto de base não aparecer nas duas imagens, escolhe-se pontos no arruamento

próximo ao objeto, onde o valor da altura relativa à altura média do terreno é próxima ao valor da base (mesmo nível).

Por intermédio da implementação de uma orientação interior, o sistema se encarrega de converter as coordenadas em *pixel* para milímetros, onde o resultado da medição de um ponto aparece no campo “Imagem Esquerda” ou “Imagem Direita” do sistema.

A fotobase foi calculada de duas maneiras: a primeira através do modo analógico, medindo-se a distância entre os centros perspectivados nas duas imagens com uma régua (a distância *oo'* na imagem da esquerda e a distância *o'o* na imagem da direita) e tirando-se a média dos valores encontrados, onde o resultado foi de 84,5 mm. A segunda, através de imagens digitais e da equação 3.1, onde a tabela 5.1 apresenta os dados coletados.

Tabela 5.1 - Medição da fotobase na imagem digital.

	Origem				Homólogo				fb
	Coluna	Linha	x	y	Coluna	Linha	x	y	
16	1441	1364	0,09448	-0,06699	2428	1392	83,78844	-2,62892	83,73316
17	1444	1367	0,03348	0,02004	438	1351	-85,2728	1,56798	85,32028
Média									84,52672

Valores de x, y e fb expressos em milímetros.

O valor da fotobase adotado com base nas duas medições foi de 84,5 mm.

As imagens utilizadas: 16 e 17.

As resoluções geométricas utilizadas foram de 300, 600 e 1200 DPI.

As colunas das tabelas 5.2 a 5.4 são descritas a seguir:

- Ponto - identificação do ponto de teste;
- Base Esquerda - ponto da base do objeto na imagem esquerda;
- Base Direita - ponto da base do objeto na imagem direita;
- Topo Esquerda - ponto do topo do objeto na imagem esquerda;
- Topo Direita - ponto do topo do objeto na imagem direita;
- x - coordenada *x* do ponto, em milímetros;
- Coluna - coordenada da coluna do ponto, em pixels;
- Linha - coordenada da linha do ponto, em pixels;
- Direto - resultado da altura encontrada, em metros, utilizando-se a equação 2.13;
- Elevações - resultado da altura encontrada, em metros, utilizando-se a equação 2.15.

Será apresentado apenas um ponto por tabela, para ilustração. As tabelas completas se encontram no apêndice I.

A tabela 5.2 refere-se às medições realizadas em imagens fotogramétricas, com resolução espacial de 300 DPI. A tabela 5.3 refere-se à de 600 DPI. Por fim, a tabela 5.4 refere-se à 1200 DPI.

Tabela 5.2 - Imagens 16 e 17 à 300 DPI.

300 DPI - 16 e 17														
Ponto	Base Esquerda			Base Direita			Topo Esquerdo			Topo Direito			Altura	
	x	Coluna	Linha	x	Coluna	Linha	x	Coluna	Linha	x	Coluna	Linha	Direto	Alturas
1	-4,7490	1383	865	-90,446	376	847	-6,9519	1357	849	-96,465	305	833	53,06996	51,63516

Valores de x e y expressos em milímetros e alturas expressos em metros.

Tabela 5.3 - Imagens 16 e 17 à 600 DPI.

600 DPI - 16 e 17														
Ponto	Base Esquerda			Base Direita			Topo Esquerdo			Topo Direito			Altura	
	x	Coluna	Linha	x	Coluna	Linha	X	Coluna	Linha	x	Coluna	Linha	Direto	Alturas
1	-4,8970	2725	1759	-90,350	679	1709	-7,0314	2674	1728	-96,398	535	1681	54,3691	53,19613

Valores de x e y expressos em milímetros e alturas expressos em metros.

Tabela 5.4 - Imagens 16 e 17 à 1200 DPI.

1200 DPI - 16 e 17														
Ponto	Base Esquerda			Base Direita			Topo Esquerdo			Topo Direito			Altura	
	x	Coluna	Linha	x	Coluna	Linha	X	Coluna	Linha	x	Coluna	Linha	Direto	Alturas
1	-4,8700	5452	3516	-90,392	1366	3419	-7,0677	5347	3458	-96,377	1071	3364	52,68971	51,47082

Valores de x e y expressos em milímetros e alturas expressos em metros.

A tabela 5.5 apresenta as diferenças absolutas encontradas entre as medições feitas nas imagens, bem como a média dos erros e o desvio padrão, ambos em metros.

Os pontos 26 e 27 são pontos bem definidos de um objeto sobre uma elevação, uma vez que há dificuldade de se determinar a base desse objeto. Portanto, o ponto 27 não entrará nos cálculos.

Tabela 5.5 - Erros obtidos entre imagens de diferentes resoluções.

	300 x 600		300 x 1200		600 x 1200	
	Direto	Alturas	Direto	Alturas	Direto	Alturas
Média	0,907667	0,928365	0,830534	0,867815	0,736670	0,762831
Desv.Pad.	0,857390	0,887954	0,756607	0,801911	0,611970	0,623927

Valor das alturas expressos em metros.

Observa-se que a média dos erros situa-se entre 93 e 74 cm. Dois fatores podem explicar a pequena diferença encontrada durante as medidas:

- Somente o topo dos objetos é um ponto bem definido;
- Erro devido à diminuição da resolução.

O primeiro fator explica-se pelo fato de que a base deverá ser encontrada pelo usuário nas duas imagens, reconhecendo feições e escolhendo locais de medida confiáveis. Utilizou-se na

maioria das vezes um ponto mais próximo da rua, visível nas duas imagens, uma vez que a base da maioria dos objetos é oclusa em uma das imagens.

O segundo fator deve-se ao fato que uma resolução menor agrupa em um único *pixel* diversos *pixels* de uma resolução maior.

Observou-se, durante os procedimentos operacionais para a escala de vôo utilizada (1/8000) que as imagens de 600 DPI são ótimas para reconhecimento de feições, porque reúnem características de espaço de armazenamento e possibilidade de identificação visual de detalhes a serem medidos. Porém, os resultados dos testes mostraram que pode-se até mesmo trabalhar com imagens com resolução de 300 DPI, mas com uma imagem de 600 DPI para solução de dúvidas quanto às feições. A figura 5.1 apresenta um quadro comparativo de feições, em imagens de diferentes resoluções.

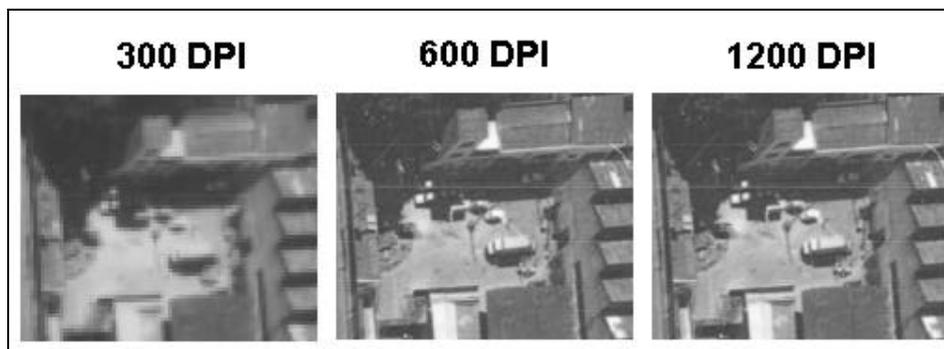


Figura 5.1 - Feições em diferentes resoluções.

5.3- Segundo Teste: Imagens Normalizadas

Este teste se propõe a testar o efeito da normalização no par de imagens fotogramétricas, a fim de verificar a validade da utilização de imagens originais no sistema ou, alternativamente, da necessidade de se normalizar as imagens do par estereoscópico antes de se efetuar as medições. Os procedimentos são os mesmos do primeiro teste, a exceção das imagens utilizadas:

- Imagens originais: fotos 16 e 17, em 600 DPI;
- Imagens normalizadas: fotos 16 e 17, em 300 DPI.

As imagens 16 e 17 foram normalizadas de acordo com os pontos de controle do apêndice J, através do programa Erdas (Leica Geosystems, 2004). No apêndice I são apresentados os resultados das medições dos pontos na imagem normalizada.

A tabela 5.6 é uma atualização da tabela 5.5, onde a comparação entre as medições realizadas nas imagens de 300 DPI é acrescida. A coluna “300 x 300N” significa a comparação entre as imagens originais e imagens normalizadas, ambas digitalizadas à resolução geométrica de 300 DPI.

Tabela 5.6 - Atualização da tabela 5.5.

	300 x 600		300 x 1200		600 x 1200		300 x 300N	
	Direto	Alturas	Direto	Alturas	Direto	Alturas	Direto	Alturas
Média	0,907667	0,928365	0,830534	0,867815	0,736670	0,762831	0,979641	1,031664
Desv.Pad.	0,857390	0,887954	0,756607	0,801911	0,611970	0,623927	0,637426	0,732196

Valor das alturas expressos em metros.

Até o presente momento, tem-se como referência apenas as imagens originais e as imagens normalizadas. Falta uma terceira referência, clássica e confiável, onde resultados mais consistentes podem ser obtidos. Trata-se de comparação entre as medições tridimensionais em um restituidor analógico de alta precisão e as medições e cálculos efetuados pelo protótipo ora em teste. Esses resultados são apresentados em seguida.

5.4 - Terceiro Teste: Restituidor Analógico

Este terceiro teste tem como objetivo obter as alturas dos prédios, através de um método fotogramétrico clássico e confiável, onde conclusões gerais podem ser obtidas com mais segurança. Utilizou-se um restituidor analógico, marca Kern, modelo PG-2, pertencente à Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Este equipamento foi operado por um técnico em fotogrametria bastante experiente.

Mediu-se as coordenadas do topo três vezes, obtendo-se a média das observações como a medida para o respectivo ponto. A base de cada objeto foi obtida medindo-se somente a coordenada Z do topo ao chão. Não foram conseguidas as medidas dos pontos 14, 15 e 21, devido ao fato de que o restituidor não os alcançou. Utilizou-se as imagens 16 e 17, em diafilme. Os resultados obtidos no restituidor Kern PG-2 são apresentados no apêndice I, nas tabelas I.6, I.7 e I.8.

5.5 - Quarto Teste: Imagens 16 e 17 versus 17 e 18

Este teste verifica a coerência de algumas alturas encontradas no par de imagens 16 e 17, utilizando-se o par fotogramétrico 17 e 18, com resolução espacial de 600 DPI. Os pontos de interesse são os pontos que são comuns às três imagens. Utilizou-se as imagens 17 e 18, em 600 DPI. Os procedimentos restantes são os mesmos adotados no primeiro teste. Os resultados se encontram no apêndice I, onde os pontos assinalados com a letra *x* no resultado obtido são pontos que não estão presentes na imagem 18, portanto não são comuns às três imagens. Então, comparam-se os resultados das tabelas I.2 e I.5.

5.6 - Resultados dos Quatro Primeiros Testes

Depois de uma série de testes comuns propostos, apresentam-se os resultados comparativos. A tabela 5.7 apresenta a média e os desvios padrões para os erros entre as alturas encontradas em diversas resoluções e também entre imagens originais e normalizadas. São ao todo 29 pontos, onde o erro entre uma resolução e outra é calculado obtendo-se o valor absoluto da diferença entre as alturas encontradas.

Tabela 5.7 - Tabela resumo dos testes comparativos entre resoluções, uso (ou não) de estereopar normalizado e uso de pares de imagens diferentes.

	Erros Entre Imagens Digitais									
	300 x 600		300 x 1200		600 x 1200		300 x 300N		16-17 x 17-18	
	Direto	Alturas	Direto	Alturas	Direto	Alturas	Direto	Alturas	Direto	Alturas
Média	0,907667	0,928365	0,830534	0,867815	0,736670	0,762831	0,979641	1,031664	0,970473	0,924019
Desv.Pad.	0,857390	0,887954	0,756607	0,801911	0,611970	0,623927	0,637426	0,732196	0,658117	0,863044

Valor das alturas expressos em metros.

A tabela I.9 apresenta os valores de todos os pontos necessários aos cálculos da tabela 5.7.

A partir dos resultados do restituidor fotogramétrico, analisa-se o erro devido à diferença entre cada altura encontrada nas diferentes resoluções e os valores obtidos no restituidor. A tabela 5.8 apresenta os resultados.

Tabela 5.8 - Comparação das diferenças de alturas medidas no restituidor Kern PG-2 e as alturas calculadas pelo sistema.

	Erros Entre Imagens e Restituidor									
	300 DPI		600 DPI		1200 DPI		300N DPI		600 DPI (17-18)	
	Direto	Alturas	Direto	Alturas	Direto	Alturas	Direto	Alturas	Direto	Alturas
Média	1,279806	1,538921	1,298983	1,463252	1,085148	1,225779	1,507437	1,780765	1,171969	0,844290
Desv.Pad.	0,964615	1,112371	1,042407	1,169492	1,038650	1,134597	1,040745	1,090816	1,019222	0,577423

Valor das alturas expressos em metros.

Observa-se que as imagens com baixa resolução espacial podem confundir o operador, no que diz respeito à medição de pontos da base do objeto, uma vez que as feições não estão bem definidas. A utilização de imagens com resoluções muito altas pode acarretar em uma lentidão no sistema, além da exibição na tela dos objetos em escala maior, de forma que não sejam visualizadas algumas de suas partes na janela de exibição. A resolução que apresentou feições mais bem definidas e com tamanho satisfatório, para a imagem utilizada na experiência, foi a resolução de 600 DPI.

Observa-se que, pelas médias e desvios padrões, as imagens originais apresentaram resultados semelhantes ao das imagens normalizadas.

Propõe-se um teste comparativo, de acordo com o resultado do restituidor, dividindo a imagem fotogramétrica em zonas radiais ao centro perspectivo da imagem. Cada um dos pontos será classificado de acordo com sua respectiva distância ao centro *o* da imagem. A distância é calculada, transformando-se as coordenadas em *pixels*, em coordenadas em milímetros. Em seguida, calcula-se o raio, pelo teorema de Pitágoras:

$$r^2 = x^2 + y^2 \tag{5.1}$$

Esta distância é classificada em cinco zonas, de acordo com a faixa de valores:

- Zona 1 - 0 a 29 mm;
- Zona 2 - 30 a 59 mm;
- Zona 3 - 60 a 89 mm;
- Zona 4 - 90 a 119 mm;
- Zona 5 - 120 mm em diante.

A tabela 5.9 apresenta os resultados obtidos. O resultado completo do teste encontra-se na tabela I.12. A figura 5.2 mostra como a imagem fotogramétrica foi distribuída por zonas.

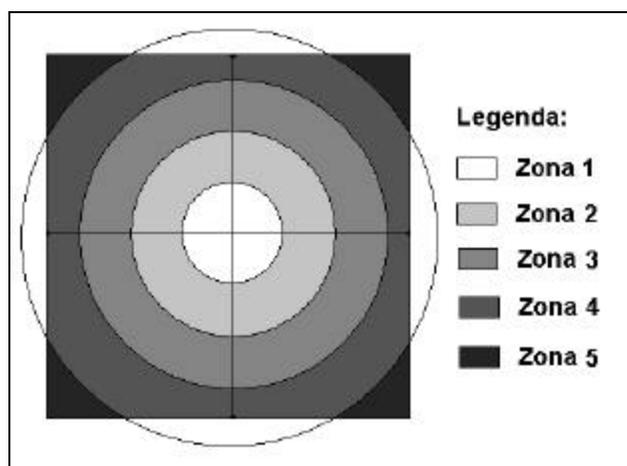


Figura 5.2 - Distribuição por zonas.

Tabela 5.9 - Erros em função do zoneamento em relação ao restituídor.

Erros Devido à Zona								
Zona 1								
	300 DPI		600 DPI		1200 DPI		300 N	
	Direto	Alturas	Direto	Alturas	Direto	Alturas	Direto	Alturas
Média	1,602734	1,732875	0,879532	0,945553	0,855822	0,785592	1,779235	1,719419
Desv.Pad.	1,365542	1,234025	0,564998	0,611721	0,569129	0,624919	1,422122	1,283293
Zona 2								
	300 DPI		600 DPI		1200 DPI		300 N	
	Direto	Alturas	Direto	Alturas	Direto	Alturas	Direto	Alturas
Média	1,152886	1,538161	1,073846	1,287548	0,884777	1,208441	1,426272	1,88527
Desv.Pad.	1,074243	1,190335	0,514415	0,668084	0,640476	0,929271	0,912577	1,146072
Zona 3								
	300 DPI		600 DPI		1200 DPI		300 N	
	Direto	Alturas	Direto	Alturas	Direto	Alturas	Direto	Alturas
Média	1,527818	1,768236	1,045573	1,488557	1,013913	1,25031	1,666339	1,960968
Desv.Pad.	0,803112	1,004444	0,43442	0,815136	0,713596	0,510221	1,118526	1,062951
Zona 4								
	300 DPI		600 DPI		1200 DPI		300 N	
	Direto	Alturas	Direto	Alturas	Direto	Alturas	Direto	Alturas
Média	1,527818	1,768236	1,045573	1,488557	1,013913	1,25031	1,666339	1,960968
Desv.Pad.	0,803112	1,004444	0,43442	0,815136	0,713596	0,510221	1,118526	1,062951
Zona 5								
	300 DPI		600 DPI		1200 DPI		300 N	
	Direto	Alturas	Direto	Alturas	Direto	Alturas	Direto	Alturas
Média	0,70372	0,81889	0,935706	1,112	0,977677	1,153025	1,83424	2,198261
Desv.Pad.	0,199254	0,648238	0,658154	1,05471	1,132587	1,555227	1,066582	1,638807

Valor das alturas expressos em metros.

Ao final do capítulo, será realizado um teste de qualidade dos resultados para todas as medições feitas no sistema.

5.7 - Quinto Teste: Distorções quanto à distância da base

Este teste se propõe a medir as distorções causadas na obtenção de alturas, quando o ponto da base é medida longe do objeto em questão. Este teste é necessário para avaliar o efeito de afastamento da base devido à oclusão da base de objetos em uma das imagens, presença de árvores, presença de vilas de casas perto do objeto, sombras etc. O afastamento não deverá se prolongar muito, devido ao desnível natural presente no terreno. Foram escolhidos 10 pontos dos 30 usados anteriormente. As tabelas I.13, I.14 e I.15 apresentam os resultados deste teste. As imagens utilizadas foram de 300 DPI e 300 DPI normalizada. A imagem 5.3 ilustra o conceito de base perto e base longe.



Figura 5.3 - Bases perto e longe.

A descrição das colunas da tabela do apêndice I, relativa ao erro das bases longas em relação ao restituidor analógico, é apresentada abaixo:

- Zona - zona ao qual o ponto pertence;
- Colunas - distância x em *pixels* do ponto do topo à base;
- Linhas - distância y em *pixels* do ponto do topo à base;
- d - distância direta, em *pixels*, entre o topo e a base.

Na tabelas I.13 e I.14, observa-se que o valor das alturas encontrados são inconsistentes, quando a distância é muito superior a adotada em todas as medições normais (próximo à base).

5.8 - Sexto Teste: Correlação

Este teste tem como objetivo analisar uma técnica experimental do sistema de medições, a busca automática de pontos homólogos por correlação. Foram escolhidos 10 pontos da imagem 16, em 300 DPI. Os pontos são apresentados no apêndice C. A correlação é classificada em função do valor do coeficiente de Pearson (\tilde{n}), onde:

- $0,70 \leq |\tilde{n}| \leq 1,0$ - correlação forte;
- $0,50 \leq |\tilde{n}| \leq 0,69$ - correlação fraca;
- $|\tilde{n}| \leq 0,49$ - a correlação falhou.

O critério de escolha dos pontos foi baseado na mudança do *template* (janela em torno do ponto origem, cujo homólogo deve ser localizado). Caso o objeto em questão tenha maioria dos *pixels* do *template*, provavelmente será bem sucedido no processo de correlação, mesmo que o ambiente em torno dele mude completamente. De forma distinta, caso o objeto em questão tenha minoria dos *pixels* dessa janela, e se o ambiente em torno dele mudar de forma abrupta (como acontece nos topos dos edifícios), a correlação provavelmente irá falhar. A figura 5.4 apresenta essa questão, mostrando quando uma situação é boa ou ruim para o sucesso da busca automática por correlação. O ponto em questão está no centro do *template*.

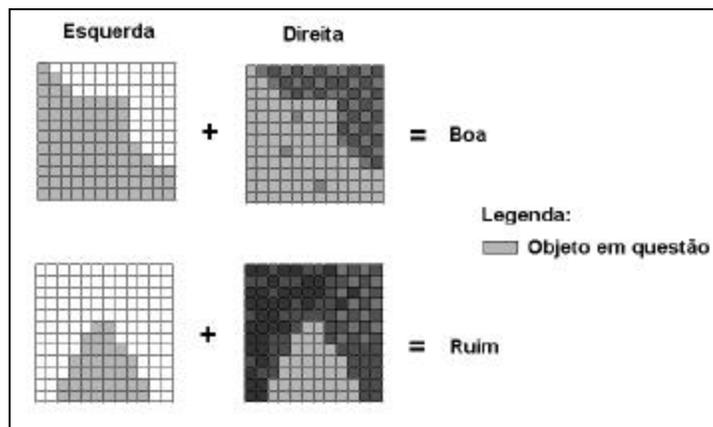


Figura 5.4 - Método de avaliação de correlação.

Outra questão levada em conta para uma boa correlação é a escolha de janelas que contenha altos contrastes (heterogênea), como por exemplo, as janelas da figura 5.4.

A tabela 5.10 relaciona os 10 pontos com este critério de avaliação, avaliando previamente os resultados.

Tabela 5.10 - Critérios de avaliação
para correlação.

Coordenadas - 16 e 300 DPI			
Ponto	Coluna	Linha	Condições
1	1569	786	Boa
2	1726	1035	Boa
3	1779	1040	Boa
4	1824	1049	Ruim
5	2155	1339	Boa
6	1528	1660	Boa
7	1544	1723	Boa
8	1973	1998	Ruim
9	1973	1981	Boa
10	2644	1290	Boa

O teste da busca por correlação consiste em verificar qual o melhor tamanho de *template*, aliado ao tempo gasto e a quantidade de acertos. Utilizou-se os tamanhos de *template* 35, 25 e 12 *pixels* de lado. O tempo é expresso em segundos. O resultado deste teste encontra-se no apêndice I, tabela I.20.

Os dez pontos são referentes à imagem 16. A resposta do teste são os pontos homólogos medidos pelo operador na imagem 17. Então, compara-se esta resposta com os pontos homólogos encontrados na busca automática por correlação.

Descrição das colunas da tabela :

- Linha - linha do pixel;
- Coluna - coluna do pixel;
- Imagem 16 - coordenadas do *pixel* do ponto de teste;
- Imagem 17 - coordenadas do *pixel* que a busca deve encontrar (resposta);
- Achado - coordenadas do *pixel* encontrada pelo método de correlação;
- \tilde{n} - coeficiente de correlação ($0 < \tilde{n} < 1$);
- Acertou? - grau de acerto, segundo os seguintes critérios de avaliação:
 - Exato, quando o ponto homólogo tenha sido encontrado onde foi previsto;
 - Perto, quando o erro está entre 1 *pixel* e 10 *pixels* de distância;
 - Errou, quando o erro é superior a 10 *pixels* de distância.
- Tempo - tempo gasto em segundos para encontrar o ponto homólogo, em um computador Pentium IV, com *clock* de 2,8 GHz.

Conforme o previsto na tabela 5.10, a busca automática errou nos pontos 4 e 8. Isto significa dizer que o usuário pode prever bons resultados para sua busca, adotando-se os critérios da figura 5.4. Por exemplo: os cantos de topos de edifícios onde os *pixels* relativos ao topo do edifício são minoria na janela de *template* são objetos provavelmente ruins, pois

além de ser minoria na janela, o cenário em volta geralmente muda drasticamente. Deve-se procurar por cantos do topo onde os *pixels* do topo do edifício sejam maioria na janela. Além disso, deve-se procurar por características únicas, como feições que provavelmente não existirão em torno do ponto homólogo, como faixas de pedestre, telhados etc. Objetos situados na base provavelmente não terão mudanças em relação à sua vizinhança, uma vez que ele está na altura do solo que o cerca. Objetos com predominância de tom, como por exemplo um ponto aleatório em uma rua, resultarão em confusão na busca, pois provavelmente existirão centenas de regiões iguais a esta.

5.9 - Sétimo Teste: Medições em Estéreo

Este último teste tem como objetivo detectar a existência de erros grosseiros, no modo de visão estéreo ora implementado, comparando os resultados com os resultados do restituidor. Até o presente momento, mediu-se pontos com coordenadas precisas, diretamente no *pixel* de interesse. Este teste usará o efeito da marca flutuante nas medições de pontos sem qualquer auxílio a ferramenta de *zoom*.

Será realizado um teste no modo estereoscópio e outro no modo anaglifo. O par de imagens é de 300 DPI, não normalizada. Foram utilizados somente 10 dos 30 pontos. Os resultados são apresentados nas tabelas I.16 a I.19. Durante as medições teve-se que calibrar horizontalmente as imagens, devido às distorções de vôo presentes.

5.10 - A Influência de Erros na Identificação de Pontos Homólogos

No modo de visão olho nu, o operador escolhe precisamente o *pixel* correto do objeto a ser medido. Para o modo estéreo, deve-se calcular o quanto um *pixel* errado influencia no resultado final da medição. Este conceito deve-se ao fato do operador atribuir pixels vizinhos, em vez de atribuir ao pixel correto.

Utilizando-se as orientações interiores de todos os modos de visão, mais a equação 4.2, pode-se estabelecer o erro para os oito vizinhos de um pixel. Ao final, tira-se a média de erro por *pixel* em cada resolução. A figura 5.5 apresenta a orientação dos *pixels* vizinhos adotada.

1	2	3
8	0	4
7	6	5

Figura 5.5 - Orientação dos *Pixels*.

Adotou-se o valor de 50 para a coluna e linha das coordenadas em *pixels*. Uma vez que o sistema da orientação interior é linear, os erros devido à vizinhança serão os mesmos para qualquer *pixel*.

Os testes não foram realizados na imagem 16. Foram criados dados hipotéticos, a exceção da orientação interior, que foi utilizada desta imagem. Calculou-se o erro final somente em cima do eixo *x*. A tabela 5.11 apresenta as coordenadas em milímetros para o *pixel* correto. A tabela 5.12 mostra a coordenada *x* em milímetros para cada *pixel* da vizinhança da figura 5.5. A tabela 5.13 apresenta o resultado final, com a média dos erros e o desvio padrão.

Tabela 5.11 - Valores do *pixel* correto.

	300	300 N	600	1200
0	-117,691	-117,691	-116,827	-120,917

Valores em milímetros.

Tabela 5.12 - Valores dos *pixels* vizinhos.

	300	300 N	600	1200
0	-117,691	-117,691	-116,827	-120,917
1	-117,776	-117,776	-116,868	-120,938
2	-117,691	-117,691	-116,826	-120,917
3	-117,606	-117,606	-116,784	-120,895
4	-117,606	-117,606	-116,784	-120,896
5	-117,606	-117,606	-116,785	-120,896
6	-117,691	-117,691	-116,827	-120,917
7	-117,776	-117,776	-116,869	-120,938
8	-117,776	-117,776	-116,869	-120,938
Média	-117,691	-117,691	-116,827	-120,917
Desvio	0,078514	0,078514	0,038892	0,019623

Valores em milímetros.

Tabela 5.13 - Média dos erros.

	300	300 N	600	1200
1	0,084679	0,084679	0,04175	0,021166
2	0,000126	0,000126	0,000257	2,95E-05
3	0,084931	0,084931	0,042264	0,021225
4	0,084805	0,084805	0,042007	0,021195
5	0,084679	0,084679	0,04175	0,021166
6	0,000126	0,000126	0,000257	2,95E-05
7	0,084931	0,084931	0,042264	0,021225
8	0,084805	0,084805	0,042007	0,021195
Média	0,063635	0,063635	0,03157	0,015904
Desvio	0,039199	0,039199	0,019327	0,009798

Valores em metro.

Os erros ora apresentados são a influência em milímetros do erro em um *pixel*.

A avaliação do erro em relação a altura final do objeto leva em conta a aplicação de uma das fórmulas de altura. Utilizou-se a equação 2.13:

$$h = H.dp / (b+dp)$$

Onde,

$$h = H.(p_b-p_a) / (b+p_b-p_a)$$

E por fim,

$$h = H.(p_b-x_a+x'_a) / (b+p_b-x_a+x'_a)$$

Foram utilizados os seguintes valores:

- $H = 1000$ m;
- $b = 80$ mm;
- $p_b = 50$ mm.

x_a é representado pela vizinhança da figura 5.5. x'_a é calculado de forma que a paralaxe em a , no ponto 0 (*pixel* correto), seja 48 mm. Logo:

$$x'_a = x_{p0} - 48$$

onde p_0 é a coordenada em milímetros do ponto 0, segundo a figura 5.5. Desta forma, a paralaxe em a (p_a) é calculada da seguinte forma:

$$p_a = x_a - x'_{p0} + 48$$

O erro é proporcional ao tamanho do objeto, porém se mantém constante em relação à posição do objeto na imagem (coordenadas). Para ilustração, as três tabelas seguintes apresentam as medidas com os dados fornecidos. Em seguida, será calculado o erro devido à diferença de paralaxe. A tabela 5.14 apresenta os valores das alturas do *pixel* correto, para diferentes resoluções. A tabela 5.15 apresenta as alturas relativas aos pontos da vizinhança da

figura 5.5. A tabela 5.16 apresenta os erros em metros de cada *pixel* da vizinhança. Todas as medidas em metros.

Tabela 5.14 - Valores das alturas do *pixel* correto.

	300	300 N	600	1200
0	24,39024	24,39024	24,39024	24,39024

Valores em metro.

Tabela 5.15 - Valores das alturas por resolução.

	300	300 N	600	1200
1	25,3967	25,3967	24,8867	24,6420
2	24,3887	24,3887	24,3872	24,3899
3	23,3787	23,3787	23,8871	24,1377
4	23,3802	23,3802	23,8902	24,1380
5	23,3817	23,3817	23,8933	24,1384
6	24,3917	24,3917	24,3933	24,3906
7	25,3997	25,3997	24,8928	24,6427
8	25,3982	25,3982	24,8898	24,6424
Média	24,3895	24,3895	24,3901	24,3902
Desvio	0,9341	0,9341	0,4627	0,2335

Valores em metro.

Tabela 5.16 - Erro das alturas por resolução.

	300	300 N	600	1200
1	1,0064	1,0064	0,4965	0,2518
2	0,0015	0,0015	0,0031	0,0004
3	1,0115	1,0115	0,5031	0,2526
4	1,0100	1,0100	0,5000	0,2522
5	1,0085	1,0085	0,4970	0,2519
6	0,0015	0,0015	0,0031	0,0004
7	1,0094	1,0094	0,5026	0,2525
8	1,0079	1,0079	0,4995	0,2521
Média	0,7571	0,7571	0,3756	0,1892
Desvio	0,4664	0,4664	0,2300	0,1166

Valores em metro.

Observa-se pelas tabelas de erro, que a maior influência no resultado final é o erro no eixo x , que é da ordem de 1 metro nas resoluções de 300 DPI. Portanto, deve-se tomar cuidado na hora de localizar o ponto homólogo no que diz respeito a este eixo.

Conforme já mencionado, o erro devido ao deslocamento de *pixels* não altera o valor da diferença de paralaxe, por consequência, não altera os erros finais. Porém, quando se altera a diferença de paralaxe, altera-se os erros finais. As figuras 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9 apresentam o erro em metros, de acordo com a diferença de paralaxe em milímetros das imagens de 300, 300 normalizada, 600 e 1200 DPI, respectivamente. Para todas as figuras há dois grupos de linhas, devido à proximidade de valores, conforme pode ser observado na tabela 5.16: uma coincidente com o eixo dp , que representa os pontos 2 e 6; e as demais linhas que representam o restante dos pontos. As figuras 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9 apresentam erro em altura (m) expresso em metros e a diferença de paralaxe (dp) expressa em milímetros.

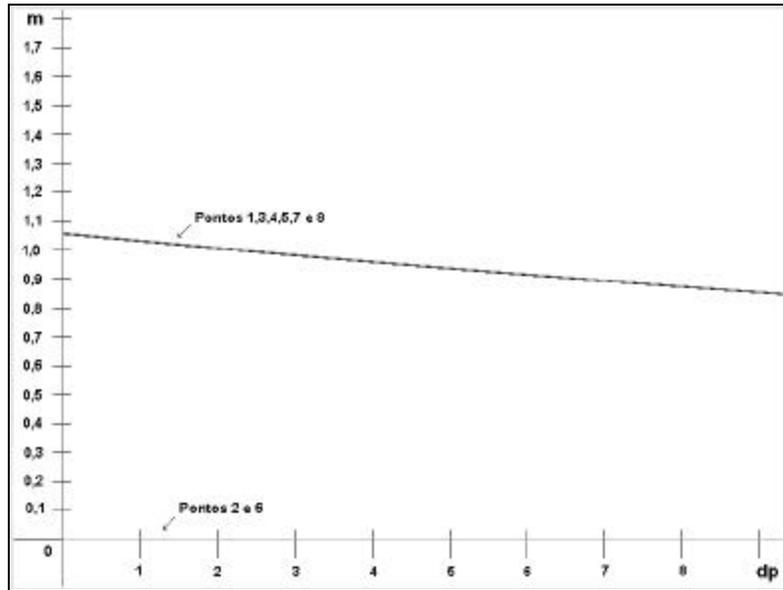


Figura 5.6 - Erro em função da diferença de paralaxe - 300 DPI.

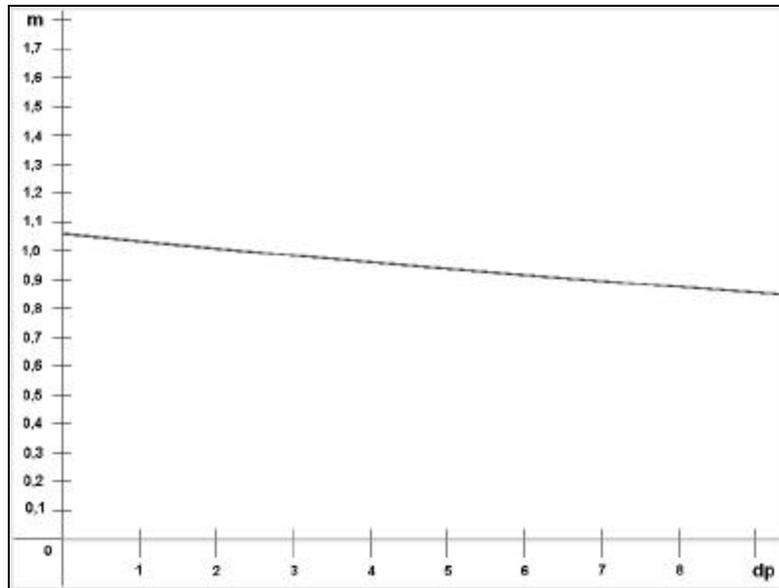


Figura 5.7 - Erro em função da diferença de paralaxe - 300 DPI normalizado.

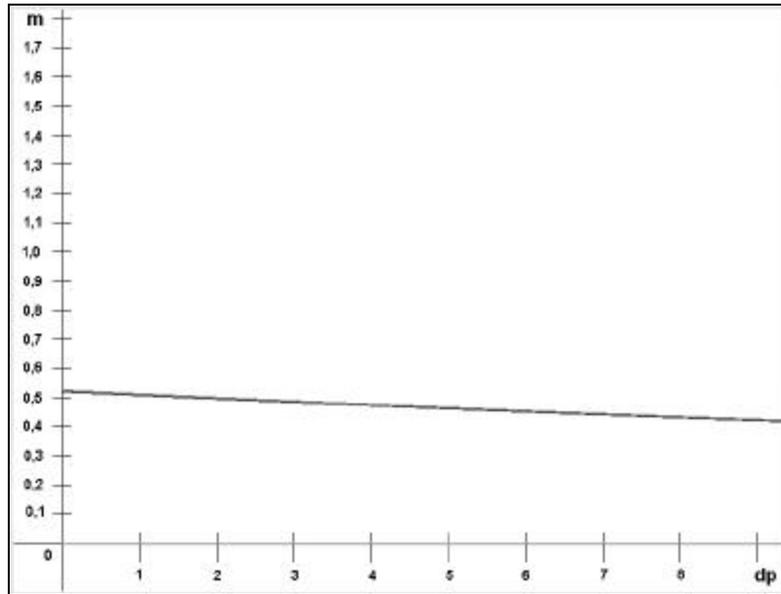


Figura 5.8 - Erro em função da diferença de paralaxe - 600 DPI.

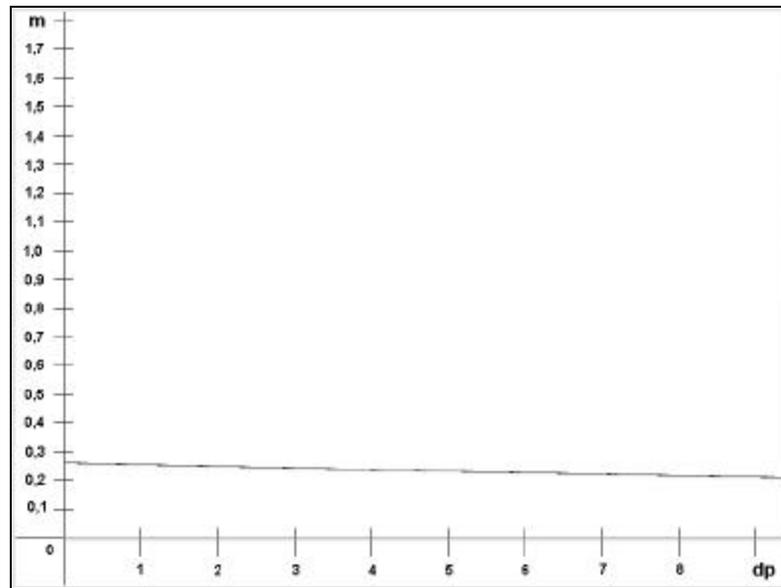


Figura 5.9 - Erro em função da diferença de paralaxe - 1200 DPI.

Observa-se que quanto menor o objeto, maior a influência do erro devido ao *pixel* no resultado final. Quando a resolução aumenta, diminui-se o erro proporcionalmente.

5.11 - Avaliação Estatística dos Resultados

O objetivo desta avaliação é apresentar os resultados dos testes de acordo com os conceitos de estatística. Como estratégia geral de ação, serão utilizados conceitos como intervalo de confiança para duas médias, com o objetivo de certificar se os resultados de duas amostras de dados podem ser ou não considerados iguais.

A tabela I.8 será utilizada como base para as comparações, uma vez que lista os resultados das medições efetuadas por um técnico bastante experiente, utilizando o restituidor analógico Kern PG-2 existente no laboratório de fotogrametria da UERJ. Esses resultados serão considerados como a “verdade de campo”, por apresentarem alta precisão, conforme se pode observar na própria tabela I.8. O apêndice L apresenta a formulação estatística utilizada nos testes, bem como a tabela da distribuição *t-Student* utilizada.

Uma vez obtidos dados confiáveis por um restituidor analógico, tratar-se-á de efetuar comparações entre esses e os resultados da implementação realizada. Nesse sentido, pretende-se testar, estatisticamente, os seguintes resultados:

- Igualdade das médias dos erros das medições, comparando-se os métodos “direto” e “por elevações”, por resolução espacial, utilizando os valores da tabela I.10;
- Igualdade das médias dos erros das medições entre o sistema proposto e o restituidor, por resolução espacial, utilizando os valores da tabela I.10;
- Igualdade das médias dos erros das medições, comparando-se os erros entre pares de resoluções, utilizando os valores da tabela I.10;
- Igualdade das médias dos erros das medições, comparando-se o modo “olho nu” com os modos em estéreo.

Para todos os testes, utilizou-se $\alpha=0,05$, ou seja, 95% de certeza. Isto significa dizer que tem-se 95 % de certeza da afirmação conclusiva dos testes.

As tabelas comparativas apresentam os seguintes itens:

- DPI - resolução espacial da imagem;
- Intervalo de confiança - intervalo de confiança de duas amostras, em metros;
- Faixa de variação - faixa de variação do intervalo de confiança, em metros;
- Situação - igual ou diferente, de acordo com o fato do intervalo de confiança conter ou não o valor 0 (zero), que compreende, obviamente, à igualdade entre às médias.

A primeira comparação verifica se há diferença entre os modos “direto” e “por elevações”, comparando os resultados por resolução. A tabela 5.17 apresenta os resultados obtidos da primeira comparação.

Tabela 5.17 - Comparação estatística entre métodos “direto” e “por elevações”.

Igualdade entre métodos (95%)						
DPI	Intervalo de confiança			Faixa de variação		Situação
300	-0,259114757	+/-	0,580395468	-0,839510225	0,321280711	Igual
300N	-0,27332804	+/-	0,594308349	-0,867636389	0,320980309	Igual
600	-0,164268516	+/-	0,617554559	-0,781823075	0,453286043	Igual
1200	-0,140630354	+/-	0,606354048	-0,746984402	0,465723694	Igual
600-(17-18)	0,327679097	+/-	1,281924773	-0,954245676	1,60960387	Igual
Estereoscópio	-0,478682915	+/-	1,285303674	-1,763986589	0,806620759	Igual
Anaglifo	0,006348402	+/-	1,159701627	-1,153353225	1,166050029	Igual

Valores expressos em metros.

De acordo com a tabela 5.17, pode-se afirmar com 95% de confiança que não há diferenças entre o método “direto” e o método “por elevações”.

A comparação a seguir

verifica se o sistema de visualização e medição estereoscópicas apresenta a mesma precisão que o restituidor analógico. São comparações dos dados da tabela I.10 com os dados da tabela I.8. A tabela 5.18 apresenta os resultados.

Tabela 5.18 - Comparação estatística entre o sistema proposto e o restituidor.

Igualdade entre resultados do sistema proposto e restituidor (95%)							
DPI	Modo	Intervalo de confiança			Faixa de valores		Situação
300	Direto	1,237669241	+/-	0,389935001	0,84773424	1,627604242	Diferentes
	Elev.	1,496783998	+/-	0,449597604	1,047186394	1,946381602	Diferentes
300N	Direto	1,465299907	+/-	0,420674622	1,044625285	1,885974529	Diferentes
	Elev.	1,738627947	+/-	0,44089331	1,297734637	2,179521257	Diferentes
600	Direto	1,256846348	+/-	0,421345629	0,835500719	1,678191977	Diferentes
	Elev.	1,421114864	+/-	0,472664907	0,948449957	1,893779771	Diferentes
1200	Direto	1,043011444	+/-	0,419828835	0,623182609	1,462840279	Diferentes
	Elev.	1,183641798	+/-	0,458572904	0,725068894	1,642214702	Diferentes
17-18	Direto	1,12983246	+/-	1,265458183	-0,135625723	2,395290643	Iguais
	Elev.	0,802153363	+/-	0,717078196	0,085075167	1,519231559	Diferentes

Valores expressos em metros.

Conforme a tabela 5.18, o sistema não apresenta a mesma precisão do restituidor, uma vez que este tem uma sensibilidade maior que a do sistema, aliado ao fato de trabalhar com os parâmetros da orientação exterior das imagens. Porém, dentro de um padrão de erros por *pixel* que varia de 0,25 a 1,0 metro (tabela 5.16) e obtendo-se as médias em torno de 1 metro, pode-se considerar os resultados obtidos como satisfatórios.

A comparação seguinte verifica se há igualdade de resultados entre diferentes resoluções, por método, ou seja, comparam-se resultados da tabela I.10, como por exemplo 300 DPI direto com 600 DPI direto. A tabela 5.19 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 5.19 - Comparação estatística entre diferentes resoluções.

Igualdade entre diferentes resoluções (95%)							
DPI	Modo	Intervalo de confiança			Faixa de valores		Situação
300 x 600	Direto	-0,019177107	+/-	0,55985087	-0,579027977	0,540673763	Igual
	Elev.	0,075669134	+/-	0,636238585	-0,560569451	0,711907719	Igual
300 x 1200	Direto	0,194657797	+/-	0,558764971	-0,364107174	0,753422768	Igual
	Elev.	0,3131422	+/-	0,626343228	-0,313201028	0,939485428	Igual
600 x 1200	Direto	0,213834904	+/-	0,579779602	-0,365944698	0,793614506	Igual
	Elev.	0,237473066	+/-	0,641988592	-0,404515526	0,879461658	Igual
300 x 300N	Direto	-0,227630666	+/-	0,559370261	-0,787000927	0,331739595	Igual
	Elev.	-0,241843949	+/-	0,613833062	-0,855677011	0,371989113	Igual
16-17 x 17-18	Direto	0,127013888	+/-	1,222411989	-1,095398101	1,349425877	Igual
	Elev.	0,618961501	+/-	0,760182386	-0,141220885	1,379143887	Igual

Valores expressos em metros.

De acordo com a tabela 5.19, pode-se afirmar com 95 % de confiança que os cálculos efetuados com base nas medições em diferentes resoluções não apresentaram diferenças significativas.

A última comparação testa a eficácia do sistema no modo estéreo, comparando-o com as medições monoscópicas. Os resultados da medição em estéreo (tabela I.17) são comparados com os resultados da tabela I.10. A tabela 5.20 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 5.20 - Comparação estatística entre modo monoscópico e estereoscópico, em 300 DPI.

Igualdade entre Olho Nu e Estéreo (95%)						
Modo	Intervalo de confiança			Faixa de valores		Situação
Estereos. Direto	-0,27560122	+/-	0,97504199	-1,25064321	0,69944077	Igual
Estereosc. Elev.	-0,495169378	+/-	1,013731162	-1,50890054	0,518561784	Igual
Anaglifo Direto	0,467353117	+/-	0,908760846	-0,441407729	1,376113963	Igual
Anaglifo Elev.	0,201889958	+/-	0,973203645	-0,771313687	1,175093603	Igual

Valores expressos em metros.

De acordo com os resultados da tabela 5.20, pode-se afirmar com 95% de certeza que o modo estéreo é tão eficaz quanto o modo monoscópico.

5.12 - Conclusões do Capítulo 5

No capítulo 5 foi possível comprovar a eficiência do sistema de visualização e medição estereoscópicas, a partir de uma série de testes propostos. No capítulo final, apresentam-se as conclusões gerais da pesquisa, bem como sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 6

Conclusões

Esta dissertação propôs um sistema de medição e visualização estereoscópicas em imagens digitais, como um módulo dentro do projeto de estação fotogramétrica digital educacional E-FOTO.

A pesquisa teve como objetivo desenvolver um sistema para efetuar a medição de altura de objetos presentes em uma área de sobreposição de um par de imagens fotogramétricas digitais, utilizando-se do conceito de paralaxe, procedendo da mesma forma que um fotogrametrista as realiza por intermédio de instrumentos como um restituidor, um estereoscópio ou uma barra de paralaxe. Além disso, foi proposta a visualização em estéreo das áreas sobrepostas, com a possibilidade de se medir objetos estereoscopicamente.

Utilizando-se da linguagem C++, através do compilador C++ Builder, foi possível materializar o sistema proposto, bem como testar toda a teoria envolvida na construção do sistema, observando-se os acertos e os erros que surgiram. A construção deste sistema não exigiu recursos vultosos, uma vez que o material necessário à sua implementação é de baixo custo e fácil aquisição, além do fato de se poder aproveitar qualquer computador moderno, hoje presente em maioria dos lares e instituições educacionais brasileiras.

Os resultados foram bastante satisfatórios, uma vez que foi possível se determinar a altura dos objetos dentro de uma margem de erro aceitável, de acordo com os diversos testes realizados, dispondo-se apenas de um par de imagens fotogramétricas, do seu respectivo certificado de calibração da câmara aérea e de sua orientação interior.

O sistema de visualização e medição estereoscópicas contribui de forma muito significativa e ampla ao projeto E-FOTO, uma vez que abre frente à construção de um restituidor digital, com características semelhantes ao restituidor analógico já existente. Além disso, oferece um excelente ponto de partida para pesquisas na área da obtenção automática do modelo numérico de elevações.

Apesar de algumas placas de vídeo modernas alcançarem resoluções espaciais de pelo menos o dobro da utilizada no sistema, necessita-se de monitores especiais, e geralmente acima de 19 polegadas. Portanto, atualmente a resolução utilizada ainda é de 1024 x 768 DPI, fazendo assim que a influência de erro no *pixel* ainda seja significativa, devido ao fato de se utilizar imagens a 300 DPI de resolução espacial, principalmente quando algumas medidas de

precaução não são tomadas, como a escolha exata do ponto homólogo, principalmente em relação ao eixo x .

O sistema proposto não pode efetuar medições para imagens de 1200 DPI (com as características utilizadas) no modo estéreo, uma vez que os objetos ficaram com tamanho excessivo para a janela do sistema. Para a solução deste problema, a resolução da tela do computador deveria ser dobrada (2048 x 1536), ou até mesmo quadruplicada (4096 x 3072) para se trabalhar com a mesma eficiência e conforto das outras resoluções utilizadas.

Devido à ausência da orientação exterior, não é possível se determinar com extrema precisão os pontos homólogos nas imagens, visto que o processo de correlação está sujeito a falhas.

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se construir um restituidor digital a partir de um trabalho de orientação exterior confiável. Desta forma, o sistema poderá trabalhar com as coordenadas no sistema de terreno (espaço objeto) dos pontos, em vez de trabalhar com coordenadas em *pixels*, o que resultará em maior flexibilidade de trabalho e, possivelmente, em maior precisão e acuracidade das medidas.

Outra proposta é realização das medições monoscópicas automaticamente. Isto será possível quando o sistema conseguir identificar automaticamente feições de objetos. Assim, através de um par de imagens fotogramétricas, será possível gerar o MNE automaticamente, ou seja, a reconstrução tridimensional da área sobreposta nas duas imagens.

A partir dos conceitos de estereoscopia implementados nesta dissertação, é possível agregar um terceiro modelo de medição estereoscópica, de separação temporal, por intermédio de um par de óculos polarizadores.

Como uma idéia final, espera-se ter apresentado uma contribuição para o domínio do conhecimento de fotogrametria digital, particularmente na visualização e medição estereoscópicas de fotogramas. Essas operações são cruciais para a continuidade do projeto E-FOTO e para futuras implementações do gênero, já que o conhecimento ora apresentado tornar-se-á de domínio público.

Referências Bibliográficas

AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY. *Manual of Photographic Interpretation*, 1960, Washington D.C., E.U.A.

ANDERSON, P.S. Fundamentos Para Fotointerpretação. *Sociedade Brasileira de Cartografia*, Rio de Janeiro, 1982. 129 p.

BRITO, J.L.N.S., *Curso de Fotogrametria Digital - Mestrado de Sistemas e Computação da Universidade do Estado do Rio de Janeiro*, Notas de aula, 2003.

BRITO, J.L.N.S.; FILHO, L.C.T.C. Projeto E-FOTO: Uma Estação Fotogramétrica Digital Educacional. *Anais XI SBSR*, Belo Horizonte. Brasil, 05- 10 abril 2003, INPE, p. 763-770.

BRUNO EDUARDO MADEIRA, Computer Graphics, Um Sistema para Visualização Estereoscópica de Gráficos de Funções de Duas Variáveis, disponível em: <http://www.de9.ime.eb.br/~madeira/compgraph/compgraph.html>, acesso em 8 de ago. 2004.

CRUZ, V.N.R., *Estações Fotogramétricas Digitais*, trabalho do curso de fotogrametria digital do Mestrado de Sistemas e Computação da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2003.

DECATUR COUNTY SCHOOL CORPORATION, *Welcome to 3D Space Images*, disponível em <http://www.decaturo.k12.in.us/space/3DSpaceImages.html>, acesso em 29 nov. 2004.

E-FOTO, *Fotogrametria Digital - 1ª edição*, disponível em: <http://e-foto.sourceforge.net/e-book-pt.html>, acesso em: 19 de set. 2003.

EJÉRCITO NACIONAL DE URUGUAY, *S.G.M. Edición Internet*, disponível em <http://www.ejercito.mil.uy/cal/sgm/foto.htm>, acesso em: 17 de nov. 2004.

ENCYCLOPÆDIA BRITANNICA, *Encyclopædia Britannica On Line*, disponível em <http://www.britannica.com/eb/article?tocId=9057229&query=image&ct=>, acesso em: 04 de nov. 2005

ENGINEERING STATISTICS HANDBOOK, *Upper Critical Values of the Student's-t Distribution*, <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/index.htm>, acesso em 20 jan. 2004.

ESA - MARS Express, *News - Western flank of Olympus Mons*, disponível em http://t2wesa.r3h.net/SPECIALS/Mars_Express/SEM59O67ESD_0.html, acesso em 29 nov. 2004.

ESTATÍSTICA CURSO COMPLETO, *Apostila de estatística*, <http://www.resumosconcursos.hpg.com.br>, acesso em 20 jan. 2004.

INTEGRATED SENSOR ORIENTAION COURSE, *Universität Hannover*, disponível em <http://www.ipi.uni-hannover.de/elan/iso/history.htm>, acesso em 30 jan. 2005.

INSTITUTO DE FÍSICA DA UFRJ, *Luz e Cor*, disponível em <http://www.if.ufrj.br/teaching/luz/cor.html>, acesso em 9 dez. 2004.

INSTITUTO PEREIRA PASSOS, *Imagens Fotogramétricas*. Rio de Janeiro, 1997.

LEICA GEOSYSTEMS, *Erdas*, <http://gis.leica-geosystems.com/>, acesso em 20 dez. 2004.

LILLESAND, T.M.; KIEFER, R.W. *Remote Sensing and Image Interpretation*. 3. ed. New York: John Wiley & Sons Inc., 1994. 750 p., 29 cm.

LOPEZ VERGARA, M. L. *Manual de Fotogeologia*. Madri, Espanha: Blume, 1971. 387p.

NOVO, E. *Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações*. Editora Edgard Blücher. 2a Ed. São Paulo, Brasil: 1992.

MFB GEO-CONSULTING, *news related to Earth observation*, disponível em http://www.mfb-geo.ch/text_e/news_old_e16.html, acesso em 29 de nov. 2004.

RAIVEL, J.P.C.; ROQUE, L.A.L., *Programas Dedicados à Fotogrametria Digital*, trabalho do curso de fotogrametria digital do Mestrado de Sistemas e Computação da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2003.

RAFAEL MULLOR CASERO, *Como se Generan los Anaglifos*, disponível em: <http://ttt.upv.es/rmullor/Anaglifos/Anaglifos.htm>, acesso em 8 de ago. 2004.

SONDAS ESPACIALES, *Mars Express*, disponível em <http://www.sondasespaciales.com/modules.php?name=Sections&op=viewarticle&artid=7030>, acesso em 18 dez. 2004.

STEREOWEB, *Sistemas de Visualización Estereoscópica*, <http://www.users.red3i.es/~stereoweb/display.htm>, acesso em 31 jan 2005.

STRUCTURE PROBE INC., *Mirror Stereoscope*, <https://secure.2spi.com/catalog/stereo-3D/mstereo.shtml>, acesso 31 jan. 2005.

THE AMERICAN SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING.
Digital Photogrammetry - An Addendum to the Manual of Photogrammetry. Bethesda, MA,
Estados Unidos: 1997.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID, Percepción Visual, disponível em:
http://www.uam.es/personal_pdi/psicologia/travieso/web_percepcion/principal.html, acesso
em: 8 de ago. 2004.

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA - FACULTAD DE AGRONOMIA, *Taller de RRNN*,
disponível em http://www.fagro.edu.uy/geologia/web/Taller2/t2_matnec.html, acesso em: 17
de nov. 2004.

VINNITSA, *Hardware Specifications* - Digital Photogrammetric Station “Delta”, disponível
em: <http://www.vinnitsa.com/geo/Hardware.htm>, acesso em 13 dez. 2004.

Apêndice A

Orientação Interior

Orientação interior é a transformação do sistema de coordenadas em *pixels* para o sistema original da imagem fotogramétrica, em milímetros. O modelo que representa esta transformação é o modelo afim geral, representado pela equação 4.2:

$$x = a_0 + a_1 \cdot \text{coluna} + a_2 \cdot \text{linha}$$

$$y = b_0 + b_1 \cdot \text{coluna} + b_2 \cdot \text{linha}$$

Linha e coluna são as coordenadas dos pontos no sistema de *pixels*, enquanto x e y são as coordenadas dos pontos no sistema milimétrico. As incógnitas a_0 , a_1 , a_2 , b_0 , b_1 e b_2 são parâmetros que irão representar a transformação entre os sistemas. Para se determinar estes parâmetros, deve-se utilizar coordenadas conhecidas nos dois sistemas, como as coordenadas das marcas fiduciais, pois seus valores vêm descritos no certificado de calibração da câmara.

Como as incógnitas são em número de seis, há necessidade de pelo menos seis observações para uma solução. Como há pelo menos quatro marcas fiduciais, tem-se oito coordenadas ao total ($x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3, x_4, y_4, \text{linha}_1, \text{coluna}_1, \text{linha}_2, \text{coluna}_2, \text{linha}_3, \text{coluna}_3, \text{linha}_4, \text{coluna}_4$), duas a mais que o mínimo necessário.

A equação 4.2 pode ser transformada em uma equação matricial:

$$\begin{array}{c|c} \begin{array}{c} x \\ y \end{array} & = & \begin{array}{ccc|ccc} 1 & \text{coluna} & \text{linha} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \text{coluna} & \text{linha} \end{array} & \cdot & \begin{array}{c} A_0 \\ A_1 \\ A_2 \\ B_0 \\ B_1 \\ B_2 \end{array} \end{array}$$

$$L = A \cdot X$$

Para as quatro marcas fiduciais, o sistema de equação ficará:

$$\begin{array}{c|c|cccccc|c}
 x1 & & 1 & \text{coluna1} & \text{linha1} & 0 & 0 & 0 & \\
 y1 & & 0 & 0 & 0 & 1 & \text{coluna1} & \text{linha1} & a0 \\
 x2 & & 1 & \text{coluna2} & \text{linha2} & 0 & 0 & 0 & a1 \\
 y2 & & 0 & 0 & 0 & 1 & \text{coluna2} & \text{linha2} & a2 \\
 x3 & = & 1 & \text{coluna3} & \text{linha3} & 0 & 0 & 0 & b0 \\
 y3 & & 0 & 0 & 0 & 1 & \text{coluna3} & \text{linha3} & b1 \\
 x4 & & 1 & \text{coluna4} & \text{linha4} & 0 & 0 & 0 & b2 \\
 y4 & & 0 & 0 & 0 & 1 & \text{coluna4} & \text{linha4} & \\
 \hline
 L & = & & & & A & & & X
 \end{array}$$

O modelo paramétrico para o ajustamento é descrito por:

$$Xa = (A^T A)^{-1} \cdot (A^T L)$$

O resultado é uma matriz (6,1) com o valor dos parâmetros. A0 corresponde ao elemento (1,1), A1 corresponde ao elemento (2,1) e assim por diante. A qualidade do ajustamento pode ser encontrada em Brito (2003).

Apêndice B

Imagens Fotogramétricas

As imagens fotogramétricas utilizadas nos testes são imagens de sobrevôo da área dos bairros do Maracanã, Vila Isabel, Tijuca e Praça da Bandeira, realizados no ano de 1997 pelo IPLANRIO. As figuras B.1, B.2 e B.3 apresentam as imagens 16, 17 e 18, respectivamente.



Figura B.1 - Imagem 16



Figura B.2 - Imagem 17.

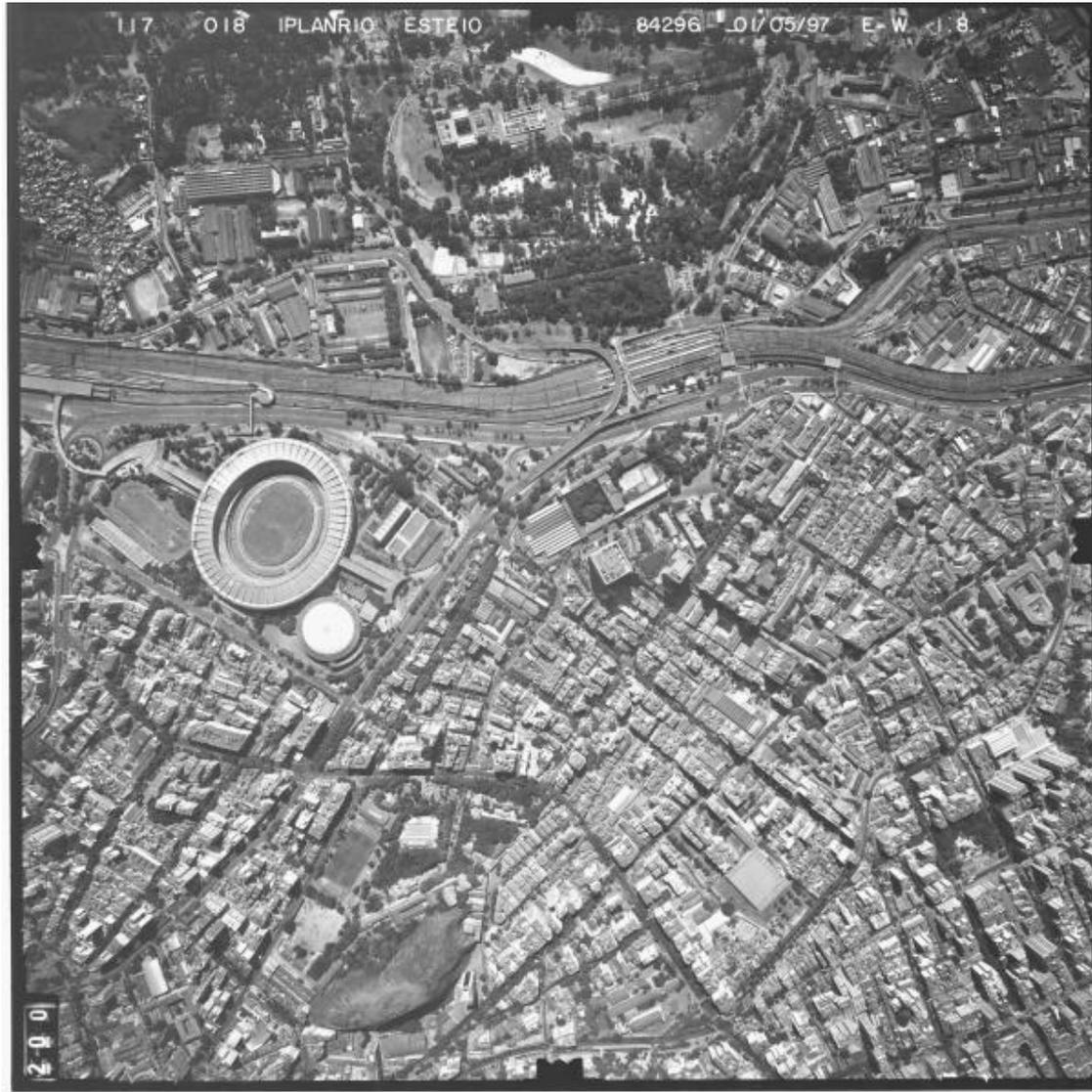


Figura B.3 - Imagem 18.

Apêndice C

Pontos Coletados

Este apêndice apresenta imagens dos pontos coletados nos testes do capítulo 5. A tabela C.1 apresenta imagens dos pontos colhidos para medição de alturas. A tabela C.2 apresenta imagens dos pontos colhidos para o teste de correlação.

Tabela C.1 - Pontos de altura

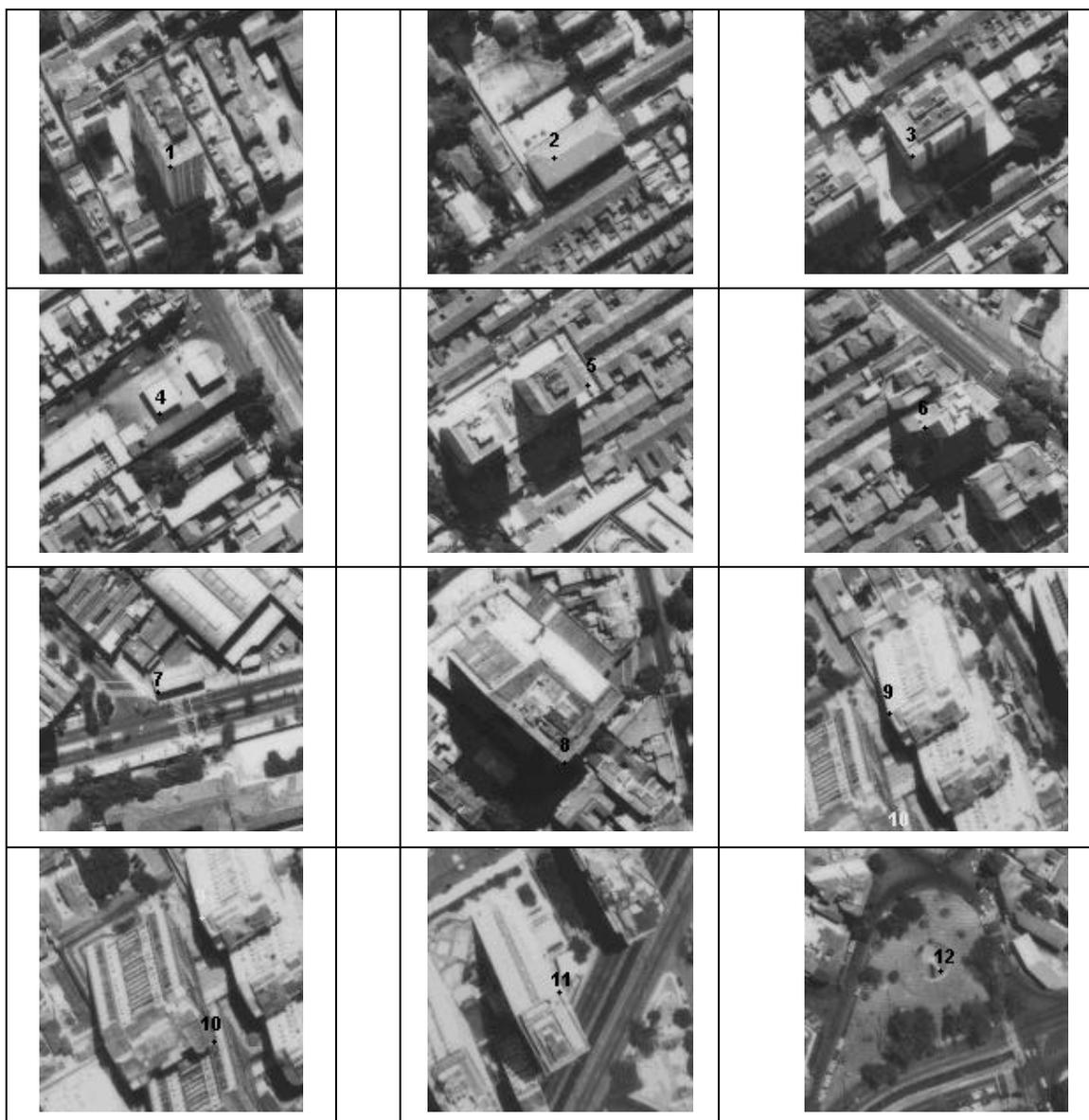


Tabela C.1 - Continuação.

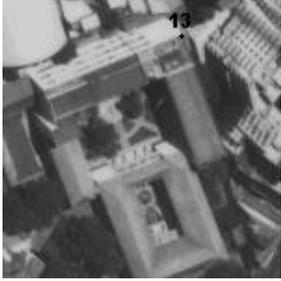
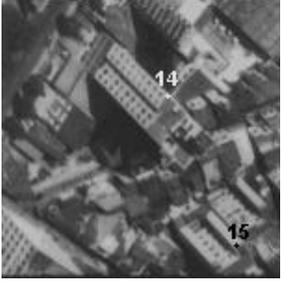
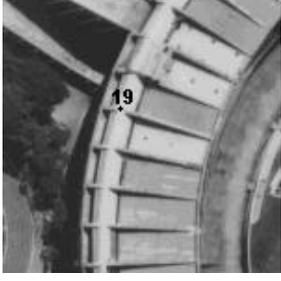
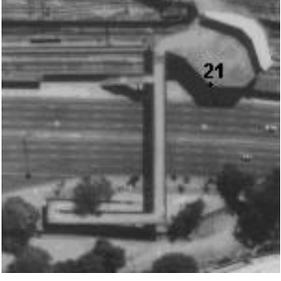
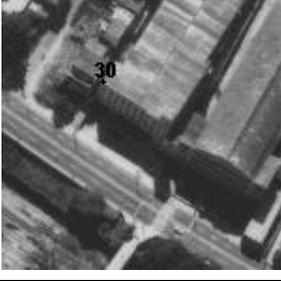
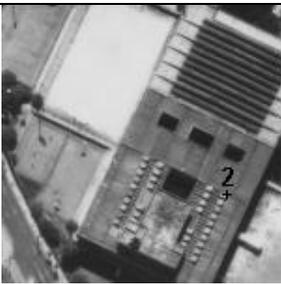
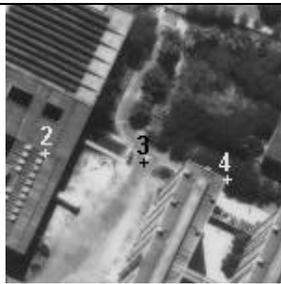
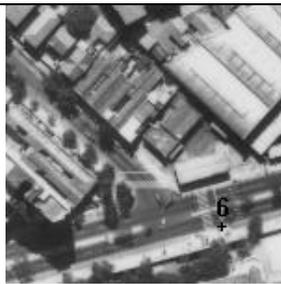
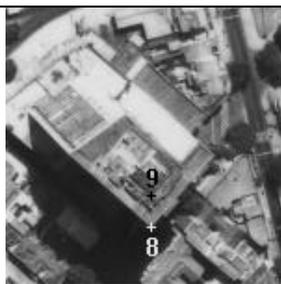
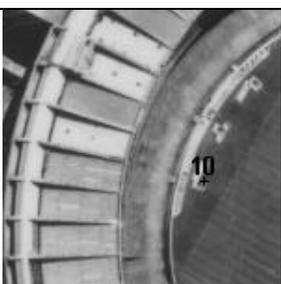
			
			
			
			
			
			

Tabela C.2 - Pontos de correlação.

Apêndice D

Dados Utilizados nos Testes

Orientação Interior

Marcas fiduciais em milímetros:

Marca	x	y
M1	113	0,016
M2	-113,006	0,018
M3	0,004	113,015
M4	0,007	-112,975

Pontos coletados:

300 DPI - Imagem 16			300 DPI - Imagem 17					
Marca	linha	coluna	Marca	linha	coluna			
M1	2771	1361	M1	2775	1364			
M2	106	1367	M2	110	1370			
M3	1443	2696	M3	1447	2698			
M4	1439	30	M4	1442	34			
300 DPI Nom. - Imagem 16			300 DPI Norm. - Imagem 17					
Marca	linha	coluna	Marca	linha	coluna			
M1	1900	1047	M1	1970	1068			
M2	66	984	M2	77	973			
M3	998	68	M3	1048	75			
M4	977	1968	M4	998	1966			
600 DPI - Imagem 16			600 DPI - Imagem 17			600 DPI - Imagem 18		
Marca	linha	coluna	Marca	linha	coluna	Marca	linha	coluna
M1	5538	2748	M1	5521	2760	M1	5538	2764
M2	158	2780	M2	141	2764	M2	158	2794
M3	2831	74	M3	2828	71	M3	2832	89
M4	2864	5456	M4	2833	5453	M4	2863	5470
1200 DPI - Imagem 16			1200 DPI - Imagem 17					
Marca	linha	coluna	Marca	linha	coluna			
M1	11077	5498	M1	11042	5519			
M2	316	5561	M2	282	5527			
M3	5663	147	M3	5656	141			
M4	5729	10912	M4	5666	10905			

Dados finais:

	A0	A1	A2	B0	B1	B2	f	H	b	B
300 / 16	-121,925	0,084805	-0,00013	115,874	-0,00019	-0,08477	153,528	1228,224	84,5	676,0845
300 / 17	-122,199	0,084805	-0,00016	116,216	-0,00019	-0,08483	153,528	1228,224	84,5	676,0845
300N / 16	-122,75	0,123183	0,001362	116,883	0,004084	-0,1189	153,528	1228,224	84,5	676,0845
300N / 17	-125,222	0,119232	0,003154	115,687	0,005989	-0,11935	153,528	1228,224	84,5	676,0845
600 / 16	-118,914	0,042007	-0,00026	116,808	-0,00025	-0,04199	153,528	1228,224	84,5	676,0845
600 / 17	-118,808	0,042009	-3,8E-05	116,084	-3,2E-05	-0,04199	153,528	1228,224	84,5	676,0845
600 / 18	-118,954	0,042007	-0,00024	117,405	-0,00023	-0,042	153,528	1228,224	84,5	676,0845
1200 / 16	-118,919	0,021002	-0,00013	116,796	-0,00012	-0,02099	153,528	1228,224	84,5	676,0845
1200 / 17	-118,808	0,021004	-1,9E-05	116,063	-1,6E-05	-0,021	153,528	1228,224	84,5	676,0845

Onde:

- $A_0 \sim B_2$ - Adimensional
- f (distância focal calibrada) - Milímetros
- H (altitude média de vôo) - Metros
- b (fotobase) - Milímetros
- B (aerobase) - Metros

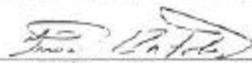
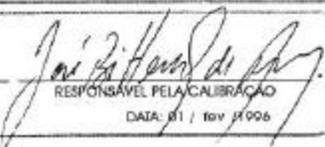
Utilizou-se o módulo de matrizes do projeto E-FOTO para o cálculo dos valores da orientação interior.

A fotobase foi calculada em experiência com imagens fotogramétricas analógicas.

O certificado de calibração da câmara é válido para as três imagens utilizadas nos testes.

Apêndice E

Certificado de Calibração da Câmara

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DE CÂMERA AEROFOTOGRAMÉTRICA			
	CERTIFICADO Nº <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">001/96</div>		
CALIBRAÇÃO REALIZADA PELO MÉTODO DO CAMPO TRIDIMENSIONAL CAMPO DE CALIBRAÇÃO: SÃO LUIZ DO PURUNÁ FOLHA 1/2			
PROPRIETÁRIO:		ESTEIO - Engenharia e Aerolevantamentos S/A	
CARACTERÍSTICAS DA CÂMERA			
FABRICANTE:	CARL ZEISS	DISTÂNCIA FOCAL NOMINAL:	153 mm
MODELO DA CÂMERA:	RMK A 15/23	SÉRIE Nº:	137 474
TIPO DE LENTES:	PLEOGON A2	SÉRIE Nº:	137 504
QUADRO DO NEGATIVO:	23 x 23 cm	ABERTURA MÁXIMA:	f4
DADOS DA CALIBRAÇÃO			
DATA DAS AEROFOTOS:	09/dez/1995	NÚMERO DE AEROFOTOS:	17
NÚMERO DE IMAGENS DOS ALVOS:	320	NÚMERO DE ALVOS:	34
FILME UTILIZADO:	Kodak Double - X	GRAUS DE LIBERDADE:	552
FILTRO UTILIZADO:	Amarelo	APARELHO UTILIZADO NAS OBSERVAÇÕES FOTOGRAMÉTRICAS:	Planicomp C-120 ZEISS
RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO			
	PARÂMETROS	DESVIOS PADRÃO	
DISTÂNCIA FOCAL CALIBRADA: *	$c = 153,528 \text{ mm}$	$\sigma_c = 0,043$	
COORDENADAS DO PONTO PRINCIPAL	$x_c = -0,063 \text{ mm}$ $y_c = -0,037 \text{ mm}$	$\sigma_x = 0,016$ $\sigma_y = 0,017$	
COEFICIENTES DA DISTORÇÃO RADIAL SIMÉTRICA:	$k_0 = -2,667 \text{ E} - 05$ $k_1 = -1,813 \text{ E} - 09$ $k_2 = -5,877 \text{ E} - 14$ $k_3 = -5,909 \text{ E} - 18$	$\sigma_{k1} = 1,217 \text{ E} - 08$ $\sigma_{k2} = 1,092 \text{ E} - 12$ $\sigma_{k3} = 3,009 \text{ E} - 17$	
COEFICIENTES DA DISTORÇÃO DESCENTRADA:	$p_1 = -6,278 \text{ E} - 07$ $p_2 = 7,172 \text{ E} - 07$	$\sigma_{p1} = 1,254 \text{ E} - 07$ $\sigma_{p2} = 1,495 \text{ E} - 07$	
* Escolhida de modo a deixar o módulo da máxima distorção positiva igual ao da máxima distorção negativa.			
 RESPONSÁVEL PELA COLETA DE DADOS	ANEA	 RESPONSÁVEL PELA CALIBRAÇÃO	DATA: 01 / fev / 1996

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DE CÂMERA AEROFOTOGRAMÉTRICA



CERTIFICADO Nº
001/96



CALIBRAÇÃO REALIZADA PELO MÉTODO DO CAMPO TRIDIMENSIONAL
CAMPO DE CALIBRAÇÃO: SÃO LUIZ DO PURUNÃ
FOLHA 2/2

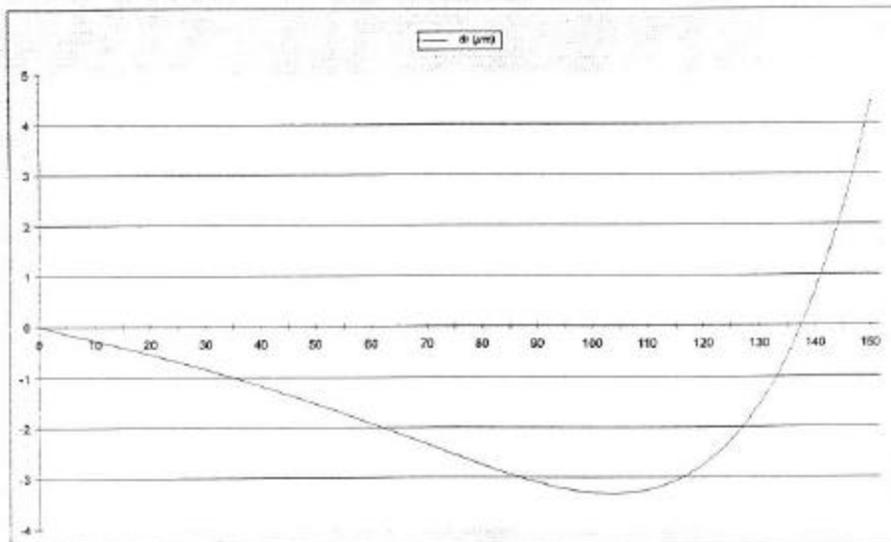
SISTEMA DE COORDENADAS FIDUCIAIS



COORDENADAS:

PONTO	x (mm)	y (mm)
1	113,000	0,016
2	-113,006	0,018
3	0,004	113,015
4	0,007	-112,975

CURVA DE DISTORÇÃO RADIAL SIMÉTRICA PARA DISTÂNCIA FOCAL CALIBRADA



[Signature]
RESPONSÁVEL PELA COLETA DE DADOS

ANEA

[Signature]
RESPONSÁVEL PELA CALIBRAÇÃO

DATA: 01 / fev / 1996

Apêndice F

Compilação do Programa em C++ Builder

O programa foi gerado no compilador C++ Builder, versão 3.0 da empresa Borland Inc. Este compilador foi projetado para funcionar no sistema operacional Windows 9x em diante. A tabela F.1 apresenta os arquivos que compõem o programa e sua funcionalidade.

Tabela F.1 - Descrição dos arquivos do programa.

Arquivo	Descrição
correlacao.c	Arquivo de testes para a correlação. Não faz parte do programa.
correlacao.h	Biblioteca de correlação.
efoto.ico	Ícone do programa.
Project1.bpr	Armazena os ajustes de compilação e <i>links</i> que o C++ usou no projeto.
Project1.cpp	Contém todas as rotinas de iniciação do programa. Em C.
Project1.exe	Executável.
Project1.obj	Imagem binária.
Project1.res	Recursos do projeto, como ícones e cursores.
Project1.tds	Informações quanto ao processo de <i>debug</i> , durante o tempo de compilação.
Unit1.cpp	Código fonte do formulário 1. Neste caso, o principal do programa.
Unit1.dfm	Definições do formulário 1.
Unit1.h	Cabeçalho do formulário 1.
Unit1.obj	Imagem binária do formulário 1.
Unit2.cpp	Código fonte do formulário 2. Dados.
Unit2.dfm	Definições do formulário 2.
Unit2.h	Cabeçalho do formulário 2.
Unit2.obj	Imagem binária do formulário 2.
Unit3.cpp	Código fonte do formulário 3. Calibração.
Unit3.dfm	Definições do formulário 3.
Unit3.h	Cabeçalho do formulário 3.
Unit3.obj	Imagem binária do formulário 3.

Para compilar, deve-se abrir o C++ Builder 3.0 ou superior, abrir o projeto Project1.bpr, em seguida *clique* em *run*.

Apêndice G

Cálculo da Resolução Ideal para Digitalização de Imagens

Quando o usuário não dispuser de imagens fotogramétricas digitalizadas, ele as terá que digitalizar. Para isto, deverá ter conhecimento de como se digitalizar as imagens fotogramétricas com a resolução espacial ótima, isto é, sem perdas ou excesso de informação.

De acordo com o teorema de Nyquist, a resolução espacial da imagem digital (RID) deve ser o dobro da resolução espacial da imagem analógica (RIA), para que não haja perda de informação (Brito, 2003). Assim, tem-se:

$$RID (Pixel) = 1/2 RIA \quad (G.1)$$

Há possibilidade de haver desalinhamento da amostragem, chamado de fator Kell, determinado empiricamente, onde:

$$RID (Pixel) = 1/2\sqrt{2} RIA \quad (G.2)$$

Juntando-se o fator Kell, mais o teorema de amostragem (Nyquist), tem-se:

$$1/2\sqrt{2} RIA \leq RID (Pixel) \leq 1/2 RIA \quad (G.3)$$

De acordo com a ASPRS, tem-se as seguintes estimativas de valores médios para a resolução de sistemas fotográficos:

- 39 pares de linhas / mm para cenas de baixo contraste.
- 54 pares de linhas / mm para cenas de alto contraste.

Supondo-se a resolução analógica (RIA) de 40 pares / mm, deve-se primeiro determinar o comprimento de uma linha.

1 mm ---- 40 linhas

x mm ---- 1 linha

$$x = 1000 \text{ } \mu\text{m} / 40 = 25 \text{ } \mu\text{m}$$

Aplicando-se na equação G.3, tem-se:

$$25 \cdot (0,354) \text{ RID} = 25 \cdot (0,5)$$

$$8,84 \text{ RID} = 12,5$$

Tirando-se a média e arredondando, tem-se:

$$1 \text{ Pixel} = 11 \text{ } \mu\text{m}$$

Em uma polegada (1 polegada = 2,54 cm), a resolução em DPI fica:

$$\text{DPI} = 2,54 \times 10^{-2} \text{ m} / 1,1 \times 10^{-5} \text{ m}$$

$$\text{DPI} = 2309$$

Portanto, a resolução espacial do *scanner*, tal que não acarretará perda de conteúdo informativo das imagens e não haverá excesso de informação é de 2309 DPI. Como o *scanner* não apresenta exatamente esta resolução, deve-se utilizar a primeira resolução espacial disponível que seja maior que este valor.

Apêndice H

Correlação

A correlação é utilizada para se encontrar pontos homólogos em imagens digitais.

O coeficiente de correlação de Pierson (\tilde{r}) é determinado pela equação H.1.

$$\tilde{r} = \sigma_{xy} / (\sigma_x \cdot \sigma_y) \quad (\text{H.1})$$

onde:

$$\sigma_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x - \mu_x) (y - \mu_y)}{n-1} \quad (\text{H.2})$$

$$\mu_x = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (\text{H.3})$$

$$\mu_y = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (\text{H.4})$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x - \mu_x)^2}{n-1}} \quad (\text{H.5})$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y - \mu_y)^2}{n-1}} \quad (\text{H.6})$$

O coeficiente de Pearson é uma medida estatística do grau de dependência entre duas variáveis aleatórias (Brito, 2003).

Dado um ponto na imagem de referência (imagem da esquerda), determinar as coordenadas do seu homólogo na imagem de pesquisa (imagem da direita). A imagem H.1 mostra como a pesquisa por correlação é realizada.

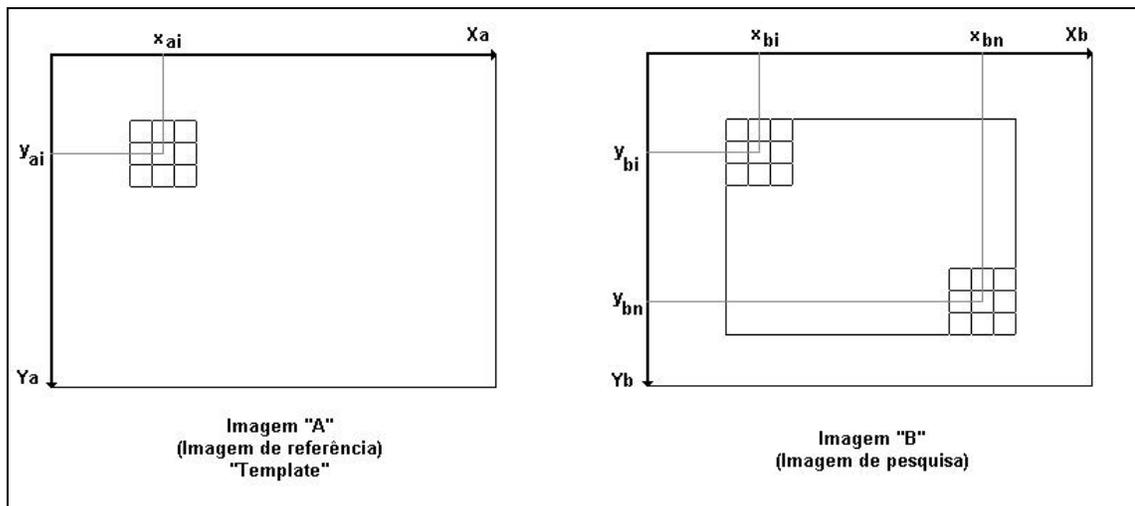


Figura H.1 - Mecanismo de busca de pontos homólogos por correlação (Brito, 2003).

- O objetivo da correlação de imagens é determinar pontos homólogos nas imagens digitais.
- Um *template* é definido na imagem de referência.
- Uma área de busca é definida na imagem de pesquisa.
- Os coeficientes de correlação são calculados para cada posição (n,m) do *template* dentro da área de busca.
- A posição em que o coeficiente de correlação é máximo corresponderá às coordenadas (n,m) do ponto homólogo.

Obs: n é a coluna de pesquisa, enquanto que m é a linha de pesquisa.

Apêndice I

Tabelas de Medições

Este apêndice apresenta as medições completas efetuadas no capítulo 5.

Tabela I.1 - Medições para as imagens 16 e 17 a 300 DPI.

Ponto	300 DPI - 16 e 17													
	Base Esquerda			Base Direita			Topo Esquerdo			Topo Direito			Altura	
	x	Coluna	Linha	x	Coluna	Linha	x	Coluna	Linha	x	Coluna	Linha	Direto	Alturas
1	-4,749	1383	865	-90,4462	376	847	-6,95191	1357	849	-96,4651	305	833	53,06996	51,63515
2	2,61426	1470	982	-82,7468	467	960	-0,77817	1430	984	-87,0733	416	969	13,42771	13,1611
3	-8,78109	1336	1232	-93,8125	337	1220	-4,35573	1388	1109	-92,3513	354	1096	41,62344	41,11858
4	12,77458	1590	1111	-71,7432	597	1093	11,75201	1578	1150	-73,1066	581	1134	4,93345	4,93197
5	6,378172	1515	1397	-78,1494	522	1383	20,70867	1684	1409	-66,7873	656	1394	41,68194	41,66036
6	30,47106	1799	1331	-53,6298	811	1313	27,75402	1767	1357	-59,1465	746	1341	39,38917	39,7629
7	6,262357	1514	1643	-78,2734	521	1631	5,584675	1506	1637	-79,3744	508	1622	6,122859	6,118468
8	48,62846	2014	1931	-35,3213	1028	1909	45,14314	1973	1997	-43,643	930	1978	66,49298	67,35194
9	19,80866	1675	2494	-64,1589	689	2471	22,17991	1703	2520	-65,0955	678	2495	46,26968	46,85295
10	19,80866	1675	2494	-64,1589	689	2471	22,76472	1710	2590	-65,1064	678	2564	54,23435	54,91584
11	51,33865	2047	2632	-32,3775	1064	2600	46,07924	1985	2644	-42,3867	946	2614	65,36463	66,5696
12	59,84925	2147	2393	-24,1989	1160	2364	60,2724	2152	2400	-24,2002	1160	2372	6,137996	6,204797
13	89,51808	2497	2495	5,552387	1511	2460	91,30327	2518	2461	6,236356	1519	2425	15,80051	16,00282
14	96,63261	2581	2567	12,8347	1597	2529	100,8649	2631	2630	14,26658	1614	2591	39,39885	40,05604
15	96,70493	2582	2666	12,81953	1597	2625	103,9926	2668	2710	18,57931	1665	2669	21,81378	22,13448
16	93,04978	2538	2061	9,266617	1554	2032	86,5275	2461	2000	0,710811	1453	1972	28,86312	29,35692
17	82,25944	2410	1548	-1,33837	1428	1523	86,58549	2461	1540	0,189382	1446	1515	39,37005	40,21541
18	84,57274	2437	1361	1,150675	1457	1335	81,68459	2403	1399	-2,6717	1412	1374	13,43065	13,77978
19	89,24444	2492	1302	5,909224	1513	1275	94,76369	2557	1247	9,649167	1557	1221	25,3292	26,03792
20	47,92572	2005	1451	-35,9242	1020	1431	53,10423	2066	1408	-32,6947	1058	1387	27,69011	28,11966
21	100,6472	2626	993	17,83135	1653	962	105,7355	2686	993	22,49577	1708	961	6,130311	6,382233
22	63,66768	2190	1030	-19,9134	1208	1004	62,14245	2172	1020	-21,9472	1184	994	7,347059	7,510019
23	49,47943	2023	1235	-34,3633	1038	1213	54,14471	2078	1227	-31,394	1073	1206	24,1666	24,5463
24	29,57425	1788	1045	-54,7715	797	1025	32,62672	1824	1049	-55,1115	793	1030	47,40709	47,58314
25	23,88578	1721	1097	-60,5468	729	1079	23,29328	1714	1088	-61,8174	714	1070	9,778568	9,795296
26	36,88452	1873	237	-50,316	848	199	37,22487	1877	228	-50,569	845	190	8,564258	8,044758
27	36,88452	1873	237	-50,316	848	199	37,22487	1877	228	-50,569	845	190	8,564258	8,044758
28	86,38619	2457	430	3,504907	1483	390	90,62858	2507	413	6,984747	1524	372	10,98461	11,41726
29	0,652698	1446	397	-85,2824	436	369	3,286311	1477	360	-83,9194	452	330	18,19449	17,59842
30	24,62384	1729	624	-60,3007	731	595	23,1053	1711	561	-63,0896	698	534	18,19167	18,01384

Nota: x em milímetros; coluna e linha em pixels; e altura em metros.

Tabela I.2 - Medições para as imagens 16 e 17 a 600 DPI.

600 DPI - 16 e 17														
Ponto	Base Esquerda			Base Direita			Topo Esquerdo			Topo Direito			Altura	
	x	Coluna	Linha	x	Coluna	Linha	x	Coluna	Linha	x	Coluna	Linha	Direto	Alturas
1	-4,89701	2725	1759	-90,35	679	1709	-7,0314	2674	1728	-96,3981	535	1681	54,36907	53,19613
2	-2,39112	2786	1979	-87,586	745	1931	-0,88401	2822	1999	-86,9987	759	1954	13,22661	13,01449
3	2,067503	2894	2283	-82,8929	857	2241	-4,4351	2739	2250	-92,3436	632	2210	41,40684	40,97175
4	11,98681	3130	2261	-72,3899	1107	2217	11,63276	3122	2331	-73,1068	1090	2288	5,251204	5,267144
5	17,73569	3270	2775	-66,5706	1246	2734	20,78138	3343	2856	-66,6998	1243	2817	44,47686	44,68331
6	30,65445	3577	2687	-53,4185	1559	2644	27,61401	3505	2749	-59,1761	1422	2708	38,26442	38,65283
7	7,051859	3019	3320	-77,3039	991	3283	5,499143	2982	3314	-79,236	945	3277	5,490618	5,510133
8	37,61942	3750	3863	-46,3641	1728	3817	45,13544	3930	4039	-43,5984	1794	3994	65,37124	66,16425
9	19,88222	3335	5047	-64,3888	1300	4988	22,13826	3389	5095	-65,357	1277	5039	45,14197	45,38873
10	19,88222	3335	5047	-64,3888	1300	4988	22,73135	3404	5239	-65,4464	1275	5180	54,27584	54,57138
11	47,74157	4000	5340	-36,3801	1967	5271	46,18628	3963	5344	-42,7236	1816	5279	65,86651	66,45267
12	59,88613	4286	4286	-24,1784	2257	4771	60,46986	4300	4849	-24,221	2256	4788	9,037739	9,132357
13	89,82619	5000	5038	5,598136	2966	4967	91,56672	5041	4967	6,230918	2981	4898	15,89301	15,99713
14	97,01335	5172	5186	12,81806	3138	5111	101,3074	5275	5313	14,28359	3173	5235	39,78194	40,07064
15	97,92348	5195	5404	13,56598	3156	5325	105,7291	5381	5434	19,86625	3306	5351	21,49707	21,57186
16	92,405	5056	4157	8,614131	3037	4099	86,55434	4916	4039	0,720957	2849	3984	28,98773	29,47822
17	90,8791	5013	3066	7,479709	3009	3012	86,66657	4913	3112	0,462366	2842	3062	39,45882	40,495
18	85,27934	4878	2789	1,819179	2874	2736	81,69872	4793	2828	-2,71932	2766	2777	13,76685	14,11174
19	89,26912	4972	2629	5,900236	2971	2574	94,92556	5106	2522	9,811143	3064	2467	24,85818	25,53349
20	51,5028	4074	2800	-32,2503	2063	2752	53,13037	4113	2842	-32,504	2057	2795	26,7479	27,22506
21	100,7283	5241	2009	17,81284	3254	1945	105,7694	5361	2008	22,43381	3364	1944	6,076402	6,310959
22	63,66121	4359	2075	-19,9557	2355	2019	62,1103	4322	2062	-21,9716	2307	2007	6,722317	6,865464
23	58,61084	4241	2439	-25,1789	2231	2388	54,10504	4134	2482	-31,524	2080	2434	26,16442	26,60841
24	28,70265	3527	2109	-55,6645	1505	2061	32,60519	3620	2125	-55,077	1519	2077	46,36572	46,51483
25	24,39172	3425	2211	-60,0373	1401	2163	23,25882	3398	2206	-61,8015	1359	2159	9,107995	9,124337
26	36,84855	3711	488	-50,3498	1630	406	37,06321	3716	470	-50,8531	406	385	10,34766	9,720856
27	36,84855	3711	488	-50,3498	1630	406	37,06321	3716	470	-50,8531	406	385	10,34766	9,720856
28	88,42284	4941	855	5,549473	2961	772	90,61131	4993	839	6,936408	2994	755	11,54109	11,99779
29	1,264741	2866	830	-84,6841	813	755	3,220194	2912	740	-83,7985	834	666	15,35603	14,84763
30	21,58299	3352	1208	-63,3588	1321	1144	22,94418	3384	1142	-63,1461	1326	1076	16,47023	16,30252

Nota: x em milímetros; coluna e linha em *pixels*; e altura em metros.

Tabela I.3- Medições para as imagens 16 e 17 a 1200 DPI.

1200 DPI - 16 e 17														
Ponto	Base Esquerda			Base Direita			Topo Esquerdo			Topo Direito			Altura	
	x	Coluna	Linha	x	Coluna	Linha	x	Coluna	Linha	x	Coluna	Linha	Direto	Alturas
1	-4,87002	5452	3516	-90,3919	1356	3419	-7,06774	5347	3458	-96,3771	1071	3364	52,68971	51,47082
2	-2,40675	5572	3959	-87,5439	1492	3862	-0,8999	5644	4000	-86,9777	1519	3909	13,52175	13,32293
3	-1,38308	5625	4655	-86,2132	1556	4572	-4,4504	5478	4500	-92,3226	1265	4420	42,67971	42,35922
4	11,96976	6260	4524	-72,3898	2214	4436	11,61575	6244	4664	-73,1277	2179	4577	5,554092	5,573264
5	17,69739	6539	5550	-66,5915	2491	5468	20,78468	6687	5713	-66,6997	2486	5634	44,75487	44,98089
6	30,63573	7154	5376	-53,4183	3118	5288	27,59556	7010	5500	-59,1969	-59,1969	5416	38,55487	38,96341
7	6,214936	5999	6652	-78,1441	1942	6577	5,482707	5964	6630	-79,236	1890	6555	5,204351	5,222336
8	36,83979	7464	7761	-47,1838	3417	7670	45,13644	7861	8080	-43,5982	3588	7988	64,85963	65,58562
9	19,88565	6671	10095	-64,3677	2601	9975	22,14149	6779	10191	-65,4199	2551	10079	46,27174	46,5437
10	19,88565	6671	6671	-64,3677	2601	9975	22,71379	6808	10477	9975	2549	10359	54,55478	54,87438
11	48,06123	8016	10652	-36,1272	3946	10512	10652	7927	10691	-42,7024	3633	10557	64,72963	65,20486
12	59,92781	59,92781	9666	-24,1361	4516	9542	60,46961	8601	9699	-24,2208	4512	9577	9,039187	9,133913
13	89,76028	9998	10077	5,57745	5931	9933	91,56354	10083	9936	6,252223	5963	9796	16,18652	16,31002
14	96,98842	10344	10376	12,81837	6276	10222	101,2828	10550	10625	14,30493	6347	10469	39,49925	39,80943
15	97,42096	10367	10769	13,08406	6289	10605	104,6007	10710	10954	18,66773	6555	10786	22,76987	22,86003
16	78,72802	9460	8002	-5,09549	5421	7892	86,53072	9832	8079	0,721244	5698	7968	28,20366	28,65903
17	80,81301	9549	6322	-2,75279	5531	6217	86,41151	9815	6228	0,147588	5669	6124	38,00422	38,85006
18	85,27694	9757	5578	1,840492	5749	5749	81,69639	9587	5658	-2,69803	5533	5554	13,76825	14,12127
19	89,22422	9943	5259	5,858526	5940	5148	94,92202	10213	5046	9,832456	6129	4934	24,55583	25,22487
20	51,50341	8149	5601	-32,2712	4125	5506	53,13074	8227	5685	-32,4618	4116	5591	25,8685	26,31686
21	100,7245	10483	4018	17,79212	6507	3892	105,7652	10723	4016	22,45515	6729	3888	5,464234	5,672955
22	63,63962	8718	4151	-19,9344	4711	4039	62,08923	8644	8644	-22,0133	4612	4012	7,634317	7,80491
23	52,43001	8188	4764	-31,3518	4168	4663	54,04231	8266	4965	-31,5237	4160	4868	25,39853	25,83449
24	28,68409	7054	4220	-55,6643	3010	4122	32,60754	7241	4250	-55,0558	3039	4153	46,36411	46,53343
25	24,37381	6850	4422	-59,9952	2804	4327	23,28301	6798	6798	-61,7594	2720	4319	9,710791	9,74201
26	36,91348	7426	976	-50,3495	3260	809	37,08587	7434	942	-50,7898	3239	768	8,841352	8,293194
27	36,91348	7426	976	-50,3495	3260	809	37,08587	7434	942	-50,7898	3239	768	8,841352	8,293194
28	85,93485	9765	1765	3,070186	5804	1600	90,60838	9987	1678	6,915704	5987	1510	11,91854	12,39274
29	1,269892	5733	1660	-84,4532	1637	1520	3,161776	5822	1483	-83,8195	-83,8195	1333	18,01935	17,51467
30	21,56519	6704	2417	-63,3586	2642	2288	22,94738	6769	2284	-63,209	2649	2152	17,65771	17,48532

Nota: x em milímetros; coluna e linha em *pixels*; e altura em metros.

Tabela I.4- Medições para as imagens 16 e 17 a 300 DPI - Normalizadas.

300 DPI - 16 e 17 (Normalizadas)														
Ponto	Base Esquerda			Base Direita			Topo Esquerdo			Topo Direito			Altura	
	x	Coluna	Linha	x	Coluna	Linha	x	Coluna	Linha	x	Coluna	Linha	Direto	Alturas
1	-5,44155	945	661	-90,3836	276	612	-7,67519	927	649	-96,383	226	600	52,40145	51,87553
2	-3,37117	961	734	-88,0008	294	687	-1,38253	977	747	-87,006	302	700	14,27689	14,23521
3	-3,32542	960	858	-87,9706	291	810	-4,83631	948	834	-92,3355	255	787	40,1282	39,99786
4	12,17248	1086	841	-71,8023	427	795	11,2238	1078	868	-73,0287	416	822	4,023304	4,07425
5	28,16821	1213	1099	-55,9622	553	1054	20,35182	1150	1058	-66,7094	464	1011	41,17309	41,53474
6	30,74064	1235	998	-52,9422	581	953	27,32421	1207	1022	-59,1858	528	977	39,76306	40,53554
7	6,29011	1034	1225	-77,8611	366	1180	5,412843	1027	1214	-79,0913	356	1168	5,108199	5,151194
8	37,33653	1284	1409	-46,6476	623	1361	45,07606	1346	1484	-43,5526	647	1435	63,99201	64,76796
9	19,92401	1138	1829	-64,422	463	1774	22,41492	1158	1849	-65,1999	456	1792	45,74261	45,91233
10	20,04855	1139	1830	-64,422	463	1774	22,97713	1162	1900	-65,403	453	1841	54,31345	54,35719
11	48,77551	1371	1939	-35,7041	701	1882	46,44456	1352	1946	-42,7231	642	1887	64,55894	64,59725
12	60,12447	1465	1770	-24,1853	802	1716	60,62401	1469	1775	-24,1695	802	1721	6,991696	7,024063
13	90,05737	1707	1860	5,664948	1050	1805	91,73969	1721	1829	6,282559	1056	1774	15,28328	15,32388
14	96,29962	1757	1921	11,8158	1100	1865	101,6414	1800	1954	14,29822	1120	1896	40,20166	40,22188
15	97,6091	1767	1978	13,05606	1109	1918	104,9246	1826	2013	18,77036	1156	1953	22,84069	22,81513
16	77,85227	1612	1491	-5,96929	962	1443	86,6078	1683	1498	0,729779	1018	1450	29,18077	29,653
17	82,10271	1650	1175	-1,35266	1009	1130	86,41003	1685	1172	0,184743	1022	1126	38,98345	39,95458
18	84,38654	1670	1043	1,334175	1035	999	81,46421	1646	1068	-2,64086	1001	1024	15,11292	15,64301
19	95,28967	1761	818	13,02145	1139	773	94,2581	1751	965	10,22485	1112	907	25,13023	26,5008
20	47,62704	1371	1096	-35,8214	722	1051	52,75849	1413	1065	-32,5807	750	1020	26,88074	27,55834
21	100,2966	1802	786	17,93141	1181	742	105,3484	1843	787	22,58462	1220	743	5,767428	6,070234
22	63,23621	1501	799	-19,9465	863	754	61,62529	1488	792	-21,8795	847	746	4,662985	4,812149
23	49,01725	1384	941	-34,4026	-34,4026	-34,4026	53,81594	1423	937	-31,4313	763	893	25,99864	26,67236
24	28,24815	1217	796	-55,6095	564	750	32,07635	1248	803	-55,1105	568	757	46,55632	47,26445
25	23,62169	1179	836	-60,3718	523	790	22,87169	1173	828	-61,7086	512	782	8,470289	8,573484
26	36,21896	1288	227	-51,8376	610	207	36,21078	1288	221	-52,346	606	197	7,229121	6,659267
27	36,21896	1288	227	-51,8376	610	207	36,21078	1288	221	-52,346	606	197	7,229121	6,659267
28	85,33514	1685	383	3,284204	1069	332	89,87519	1722	370	6,939392	1100	319	12,72843	13,49707
29	-0,34925	990	330	-85,121	329	277	2,325351	1012	304	-83,7816	341	248	19,10684	18,98778
30	24,14804	1187	499	-60,0166	535	449	22,36081	1173	453	-63,1488	510	401	19,24315	19,39796

Nota: x em milímetros; coluna e linha em *pixels*; e altura em metros.

Tabela I.5- Medições para as imagens 17 e 18 a 600 DPI.

600 DPI - 17 e 18														
Ponto	Base Esquerda			Base Direita			Topo Esquerdo			Topo Direito			Altura	
	x	Coluna	Linha	x	Coluna	Linha	x	Coluna	Linha	x	Coluna	Linha	Direto	Alturas
1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
5	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
6	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
7	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
8	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
9	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
10	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
11	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
12	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
13	4,882376	2949	5009	-80,5064	945	5174	6,230957	2981	4897	-80,3111	949	5061	16,53728	16,19906
14	11,72414	3112	5155	-73,3585	1116	5320	14,32559	3174	5235	-73,5885	1111	5403	39,8224	39,2925
15	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
16	-5,74789	2695	3972	-91,4261	679	4121	0,720957	2849	3984	-86,8917	787	787	27,4888	26,74944
17	2,021797	2879	2879	-83,4829	862	3061	0,126298	2834	3062	-88,2627	749	3198	40,54134	39,61451
18	1,861226	2875	2735	-83,7716	854	2865	-2,71932	2766	2777	-89,3697	721	721	14,61396	14,23386
19	12,76809	3134	2042	-72,7222	1113	2163	9,853151	3065	3065	-77,5309	1001	2593	26,9218	26,31158
20	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
21	17,8128	3254	1946	-67,6992	1232	2063	22,43381	3364	1944	-63,4555	1333	2059	5,460002	5,332391
22	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
23	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
24	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
25	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
26	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
27	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
28	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
29	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
30	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Nota: x em milímetros; coluna e linha em *pixels*; e altura em metros.

Tabela I.6- Medições no restituidor Kern PG-2 - Coordenadas UTM e altitude do topo dos objetos.

Ponto	E	N	Topo	Ponto	E	N	Topo	Ponto	E	N	Topo
1	680573,8	7465485	70,43	11	680984,2	7464245	74,95	21	X	x	x
	680573,8	7465485	70,2		680984	7464245	74,9		X	x	x
	680573,8	7465485	70,28		680984,1	7464245	74,88		X	x	x
2	680622,3	7465401	29,7	12	681115,4	7464393	15,21	22	681162,6	7465370	17,18
	680622,2	7465401	29,65		681115,4	7464393	15,08		681162,6	7465370	17,25
	680622,3	7465401	29,7		681115,4	7464393	15,1		681162,6	7465370	17,3
3	680591,4	7465308	53,98	13	681366,9	7464349	27,01	23	681081,8	7465218	35,44
	680591,4	7465308	54		681366,8	7464349	27,18		681081,7	7465218	35,5
	680591,5	7465308	54,2		681366,8	7464349	27		681081,8	7465218	35,38
4	680727,5	7465283	15,78	14	x	x	x	24	680898	7465343	59,45
	680727,4	7465283	15,7		x	x	x		680898	7465343	59,52
	680727,4	7465283	15,73		x	x	x		680898	7465343	59,4
5	680794,9	7465093	55,9	15	x	x	x	25	680827,3	7465325	22,64
	680794,9	7465093	56		x	x	x		680827,2	7465325	22,69
	680794,9	7465093	56		x	x	x		680827,2	7465325	22,65
6	680853,8	7465128	47,52	16	681332,3	7464671	36,57	26	680951,1	7465925	62,45
	680853,8	7465128	47,6		681332,3	7464671	36,62		680951	7465925	62,47
	680853,8	7465128	47,57		681332,3	7464671	36,5		680951,1	7465925	62,4
7	680667,9	7464934	15,69	17	681337,6	7464991	46,4	27	x	x	x
	680667,9	7464934	15,73		681337,6	7464991	46,48		x	x	x
	680667,9	7464934	15,77		681337,6	7464991	46,4		x	x	x
8	680978,1	7464693	74,68	18	681316,2	7465091	22,37	28	681420,7	7465818	19,55
	680978,1	7464693	74,66		681316,2	7465091	22,42		681420,5	7465818	19,49
	680978	7464693	74,73		681316,2	7465091	22,3		681420,2	7465818	19,58
9	680788	7464341	58,54	19	681425,3	7465197	33,99	29	680665,8	7465850	40,48
	680788	7464341	58,6		681425,3	7465197	34,15		680665,8	7465850	40,45
	680787,9	7464341	58,58		681425,2	7465197	34		680665,9	7465850	40,42
10	680790,5	7464300	67,3	20	681068,6	7465090	36,2	30	680831,9	7465703	35,84
	680790,6	7464300	67,33		681068,6	7465090	36,28		680831,8	7465703	35,8
	680790,6	7464300	67,28		681068,7	7465090	36		680831,8	7465703	35,78

Nota: Valores expressos em metros.

Tabela I.7- Média dos valores da tabela I.6, medição da base* e cálculo da altura.

Ponto	E	N	Topo	Base	Altura
1	680573,81	7465485,12	70,30333	16,6	53,70333
2	680622,2533	7465401,147	29,68333	15,7	13,98333
3	680591,4433	7465307,913	54,06	12,1	41,96
4	680727,4367	7465282,94	15,73667	11,4	4,336667
5	680794,88	7465092,973	55,96667	11,1	44,86667
6	680853,78	7465128,397	47,56333	11	36,56333
7	680667,9033	7464934,12	15,73	11,9	3,83
8	680978,04	7464692,813	74,69	10,5	64,19
9	680787,94	7464340,8	58,57333	12,55	46,02333
10	680790,55	7464299,513	67,30333	12,5	54,80333
11	680984,09	7464245,42	74,91	12,1	62,81
12	681115,4	7464393,39	15,13	11,3	3,83
13	681366,8267	7464349,063	27,06333	10,7	16,36333
14	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0
16	681332,3133	7464671,3	36,56333	9,3	27,26333
17	681337,6167	7464991,417	46,42667	8,52	37,90667
18	681316,2	7465091,203	22,36333	9,1	13,26333
19	681425,2567	7465196,627	34,04667	8,6	25,44667
20	681068,64	7465089,733	36,16	10	26,16
21	0	0	0	0	0
22	681162,5967	7465369,76	17,24333	11,4	5,843333
23	681081,7467	7465218,033	35,44	11,1	24,34
24	680898,0167	7465343,433	59,45667	14,32	45,13667
25	680827,2267	7465324,837	22,66	12,8	9,86
26	680951,0533	7465925,07	62,44	54,7	7,74
27	0	0	0	0	0
28	681420,46	7465818,023	19,54	9,4	10,14
29	680665,8233	7465850,093	40,45	23,6	16,85
30	680831,82	7465702,733	35,80667	20	15,80667

* a base foi medida apenas uma vez, para cada objeto. Valores expressos em metro.

Tabela I.8- Erros das medições em um restituidor Kern PG-2.

	E	N	Topo
Média	0,024444	0,017949	0,042137
Des.Pad.	0,038296	0,016751	0,033247

Nota: Valores expressos em metro.

Na tabela I.8 foram obtidas as médias e desvios padrões dos erros de todas as medições efetuadas no restituidor, onde os erros são calculados obtendo-se a diferença absoluta de cada ponto (tabela I.6) e sua respectiva média (tabela I.7).

Tabela I.9- Erros entre imagens digitais.

Erros Entre Imagens Digitais										
Ponto	300 x 600		300 x 1200		600 x 1200		300 x 300N		16-17 x 17-18	
	Direto	Alturas	Direto	Alturas	Direto	Alturas	Direto	Alturas	Direto	Alturas
1	1,299104	1,56098	0,380253	0,164337	1,679356	1,725317	0,668512	0,240374	x	x
2	0,201097	0,146615	0,09404	0,161831	0,295137	0,308446	0,849188	1,074112	x	x
3	0,216603	0,146825	1,056274	1,240637	1,272877	1,387462	1,495238	1,120721	x	x
4	0,317754	0,335174	0,620642	0,641294	0,302888	0,30612	0,910146	0,85772	x	x
5	2,794924	3,022956	3,072931	3,32053	0,278007	0,297574	0,508847	0,125614	x	x
6	1,12475	1,110071	0,834299	0,799496	0,290452	0,310575	0,373882	0,77264	x	x
7	0,632241	0,608335	0,918508	0,896132	0,286268	0,287797	1,01466	0,967274	x	x
8	1,121738	1,187691	1,633349	1,766313	0,51161	0,578622	2,500967	2,583978	x	x
9	1,127711	1,464225	0,002054	0,309247	1,129765	1,154978	0,52707	0,940617	x	x
10	0,041488	0,344455	0,32043	0,041462	0,278942	0,302992	0,079098	0,558645	x	x
11	0,50188	0,116926	0,635001	1,364733	1,136881	1,247808	0,805692	1,972346	x	x
12	2,899743	2,92756	2,901191	2,929116	0,001448	0,001556	0,8537	0,819266	x	x
13	0,092506	0,005691	0,386009	0,307203	0,293503	0,312894	0,517226	0,678933	0,644265	0,201933
14	0,383091	0,014602	0,100405	0,24661	0,282685	0,261212	0,802807	0,16584	0,040465	0,778142
15	0,316709	0,562626	0,956086	0,725548	1,272794	1,288174	1,026904	0,680645	x	x
16	0,124616	0,121301	0,659455	0,697896	0,784071	0,819197	0,317653	0,296078	1,498932	2,728784
17	0,088772	0,279591	1,365827	1,365352	1,4546	1,644942	0,386599	0,260832	1,082522	0,880495
18	0,336197	0,33196	0,337598	0,341496	0,001401	0,009536	1,68227	1,863229	0,84711	0,122121
19	0,471022	0,504435	0,773367	0,813052	0,302345	0,308618	0,198968	0,462876	2,06362	0,77809
20	0,942219	0,894608	1,821619	1,802809	0,8794	0,9082	0,809374	0,561323	x	x
21	0,05391	0,071274	0,666078	0,709278	0,612168	0,638004	0,362883	0,311998	0,6164	0,978568
22	0,624743	0,644555	0,287258	0,294891	0,912	0,939446	2,684074	2,69787	x	x
23	1,997815	2,062108	1,23193	1,288193	0,765885	0,773915	1,832035	2,126058	x	x
24	1,041362	1,068312	1,04298	1,049716	0,001617	0,018597	0,850767	0,318691	x	x
25	0,670573	0,670959	0,067777	0,053286	0,602796	0,617673	1,308279	1,221812	x	x
26	1,783406	1,676098	0,277094	0,248436	1,506313	1,427662	1,335137	1,38549	x	x
27	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
28	0,556477	0,580529	0,933922	0,975473	0,377446	0,394944	1,743813	2,079809	x	x
29	2,838465	2,750795	0,175142	0,083755	2,663323	2,66704	0,91235	1,389357	x	x
30	1,721442	1,711327	0,533966	0,528519	1,187476	1,182808	1,051478	1,38412	x	x
Média	0,907667	0,928365	0,830534	0,867815	0,736671	0,762831	0,979642	1,031664	0,970473	0,924019
Desv.Pad.	0,85739	0,887954	0,756607	0,801911	0,61197	0,623927	0,637426	0,732196	0,658117	0,863044

Nota: Valores expressos em metro.

Tabela I.10- Erros em relação ao restituídor.

Ponto	Erros Relativos à Medição Analógica									
	300 DPI		600 DPI		1200 DPI		300 N		600 DPI (17-18)	
	Direto	Alturas	Direto	Alturas	Direto	Alturas	Direto	Alturas	Direto	Alturas
1	0,63337	2,068179	0,665733	0,507199	1,013623	2,232516	1,301882	1,827805	x	x
2	0,555627	0,822233	0,756724	0,968848	0,461587	0,660402	0,293561	0,251879	x	x
3	0,336562	0,841421	0,553165	0,988246	0,719712	0,399216	1,8318	1,962142	x	x
4	0,596783	0,595303	0,914537	0,930478	1,217426	1,236597	0,313362	0,262416	x	x
5	3,184731	3,206309	0,389807	0,183353	0,1118	0,114221	3,693579	3,331923	x	x
6	2,82584	3,19957	1,70109	2,0895	1,991541	2,400075	3,199722	3,97221	x	x
7	2,292859	2,288468	1,660618	1,680133	1,374351	1,392336	1,278199	1,321194	x	x
8	2,302981	3,161936	1,181242	1,974245	0,669632	1,395623	0,197986	0,577959	x	x
9	0,246351	0,829617	0,88136	0,634608	0,248405	0,52037	0,280719	0,111001	x	x
10	0,568984	0,112506	0,527496	0,231949	0,248554	0,071043	0,489886	0,446139	x	x
11	2,554632	3,759597	3,056512	3,642672	1,919631	2,394864	1,74894	1,787252	x	x
12	2,307996	2,374797	5,207739	5,302357	5,209187	5,303913	3,161696	3,194063	x	x
13	0,562826	0,360517	0,470321	0,366208	0,176818	0,053313	1,080053	1,039449	0,173944	0,164275
14	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
15	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
16	1,599785	2,093589	1,724401	2,21489	0,94033	1,395693	1,917438	2,389667	0,225468	0,513894
17	1,463383	2,308747	1,552155	2,588338	0,097556	0,943396	1,076784	2,047916	2,634677	1,707843
18	0,167321	0,516445	0,503517	0,848405	0,504918	0,857941	1,849591	2,379674	1,350627	0,970527
19	0,117468	0,591256	0,58849	0,086822	0,890835	0,221796	0,316436	1,054132	1,47513	0,864912
20	1,530114	1,959664	0,587896	1,065056	0,291505	0,156855	0,72074	1,398341	x	x
21	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
22	1,503726	1,666686	0,878983	1,022131	1,790984	1,961577	1,180348	1,031184	x	x
23	0,173396	0,206298	1,824418	2,268406	1,058533	1,494491	1,658639	2,332356	x	x
24	2,270419	2,446477	1,229057	1,378164	1,22744	1,396761	1,419652	2,127785	x	x
25	0,081432	0,064704	0,752005	0,735663	0,149209	0,11799	1,389711	1,286516	x	x
26	0,824258	0,304758	2,607664	1,980856	1,101352	0,553194	0,510879	1,080733	x	x
27	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
28	0,844615	1,277263	1,401091	1,857792	1,778537	2,252736	2,588428	3,357072	x	x
29	1,344491	0,748421	1,493974	2,002374	1,169349	0,664666	2,256841	2,137778	x	x
30	2,385005	2,207177	0,663563	0,49585	1,851039	1,678658	3,436483	3,591296	x	x
Média	1,279806	1,538921	1,298983	1,463252	1,085148	1,225779	1,507437	1,780765	1,171969	0,84429
Desv.Pad.	0,964615	1,112371	1,042407	1,169492	1,03865	1,134597	1,040745	1,090816	1,019222	0,577422

Nota: Valores expressos em metro.

Tabela I.11- Diferenças entre modelos de altura.

Ponto	Diferença entre Alturas			
	300DPI	600 DPI	1200 DPI	300 N
1	1,434808	1,172932	1,218893	0,525923
2	0,266606	0,212124	0,198815	0,041682
3	0,504859	0,435081	0,320496	0,130342
4	0,00148	0,01594	0,019172	0,050946
5	0,021578	0,206453	0,226021	0,361655
6	0,37373	0,38841	0,408533	0,772488
7	0,004391	0,019515	0,017985	0,042995
8	0,858956	0,793003	0,725991	0,775945
9	0,583266	0,246752	0,271965	0,169718
10	0,68149	0,295547	0,319598	0,043747
11	1,204965	0,586159	0,475233	0,038312
12	0,066801	0,094618	0,094726	0,032367
13	0,20231	0,104113	0,123504	0,040603
14	0,657192	0,288704	0,310177	0,020225
15	0,320699	0,074782	0,090162	0,02556
16	0,493804	0,490489	0,455363	0,472229
17	0,845364	1,036183	0,84584	0,971131
18	0,349125	0,344888	0,353023	0,530084
19	0,708724	0,675312	0,669039	1,370568
20	0,42955	0,47716	0,44836	0,677601
21	0,251922	0,234557	0,208721	0,302806
22	0,16296	0,143148	0,170593	0,149164
23	0,379694	0,443988	0,435957	0,673717
24	0,176057	0,149107	0,169321	0,708133
25	0,016728	0,016342	0,03122	0,103195
26	0,5195	0,626809	0,548158	0,569854
27	x	x	x	x
28	0,432648	0,456701	0,474199	0,768644
29	0,596069	0,5084	0,504683	0,119063
30	0,177828	0,167713	0,172381	0,154814
Média	0,438728	0,369136	0,355453	0,367018
Desv.Pad.	0,348156	0,291679	0,269811	0,357436

Nota: Valores expressos em metro.

Tabela I.12- Zoneamento de erros.

Erros Devido à Zona								
Zona 1								
	300 DPI		600 DPI		1200 DPI		300 N	
Ponto	Direto	Alturas	Direto	Alturas	Direto	Alturas	Direto	Alturas
3	0,336562	0,841421	0,553165	0,988246	0,719712	0,399216	1,8318	1,962142
4	0,596783	0,595303	0,914537	0,930478	1,217426	1,236597	0,313362	0,262416
5	3,184731	3,206309	0,389807	0,183353	0,1118	0,114221	3,693579	3,331923
7	2,292859	2,288468	1,660618	1,680133	1,374351	1,392336	1,278199	1,321194
Média	1,602734	1,732875	0,879532	0,945553	0,855822	0,785592	1,779235	1,719419
Desv.Pad.	1,365542	1,234025	0,564998	0,611721	0,569129	0,624919	1,422122	1,283293
Zona 2								
	300 DPI		600 DPI		1200 DPI		300 N	
Ponto	Direto	Alturas	Direto	Alturas	Direto	Alturas	Direto	Alturas
1	0,63337	2,068179	0,665733	0,507199	1,013623	2,232516	1,301882	1,827805
2	0,555627	0,822233	0,756724	0,968848	0,461587	0,660402	0,293561	0,251879
6	2,82584	3,19957	1,70109	2,0895	1,991541	2,400075	3,199722	3,97221
20	1,530114	1,959664	0,587896	1,065056	0,291505	0,156855	0,72074	1,398341
23	0,173396	0,206298	1,824418	2,268406	1,058533	1,494491	1,658639	2,332356
24	2,270419	2,446477	1,229057	1,378164	1,22744	1,396761	1,419652	2,127785
25	0,081432	0,064704	0,752005	0,735663	0,149209	0,11799	1,389711	1,286516
Média	1,152886	1,538161	1,073846	1,287548	0,884777	1,208441	1,426272	1,88527
Desv.Pad.	1,074243	1,190335	0,514415	0,668084	0,640476	0,929271	0,912577	1,146072
Zona 3								
	300 DPI		600 DPI		1200 DPI		300 N	
Ponto	Direto	Alturas	Direto	Alturas	Direto	Alturas	Direto	Alturas
8	2,302981	3,161936	1,181242	1,974245	0,669632	1,395623	0,197986	0,577959
17	1,463383	2,308747	1,552155	2,588338	0,097556	0,943396	1,076784	2,047916
18	0,167321	0,516445	0,503517	0,848405	0,504918	0,857941	1,849591	2,379674
22	1,503726	1,666686	0,878983	1,022131	1,790984	1,961577	1,180348	1,031184
29	1,344491	0,748421	1,493974	2,002374	1,169349	0,664666	2,256841	2,137778
30	2,385005	2,207177	0,663563	0,49585	1,851039	1,678658	3,436483	3,591296
Média	1,527818	1,768236	1,045573	1,488557	1,013913	1,25031	1,666339	1,960968
Desv.Pad.	0,803112	1,004444	0,43442	0,815136	0,713596	0,510221	1,118526	1,062951
Zona 4								
	300 DPI		600 DPI		1200 DPI		300 N	
Ponto	Direto	Alturas	Direto	Alturas	Direto	Alturas	Direto	Alturas
9	0,246351	0,829617	0,88136	0,634608	0,248405	0,52037	0,280719	0,111001
10	0,568984	0,112506	0,527496	0,231949	0,248554	0,071043	0,489886	0,446139
11	2,554632	3,759597	3,056512	3,642672	1,919631	2,394864	1,74894	1,787252
12	2,307996	2,374797	5,207739	5,302357	5,209187	5,303913	3,161696	3,194063
16	1,599785	2,093589	1,724401	2,21489	0,94033	1,395693	1,917438	2,389667
19	0,117468	0,591256	0,58849	0,086822	0,890835	0,221796	0,316436	1,054132
21	x	x	x	x	x	x	x	x
26	0,824258	0,304758	2,607664	1,980856	1,101352	0,553194	0,510879	1,080733
27	x	x	x	x	x	x	x	x
Média	1,174211	1,438017	2,084809	2,01345	1,508328	1,49441	1,203713	1,437569
Desv.Pad.	0,986453	1,343222	1,693746	1,927856	1,727692	1,862482	1,100691	1,090192
Zona 5								
	300 DPI		600 DPI		1200 DPI		300 N	
Ponto	Direto	Alturas	Direto	Alturas	Direto	Alturas	Direto	Alturas
13	0,562826	0,360517	0,470321	0,366208	0,176818	0,053313	1,080053	1,039449
14	x	x	x	x	x	x	x	x
15	x	x	x	x	x	x	x	x
28	0,844615	1,277263	1,401091	1,857792	1,778537	2,252736	2,588428	3,357072
Média	0,70372	0,81889	0,935706	1,112	0,977677	1,153025	1,83424	2,198261
Desv.Pad.	0,199254	0,648238	0,658154	1,05471	1,132587	1,555227	1,066582	1,638807

Nota: Valores expressos em metro.

Tabela I.13- Base distante para imagens 16 e 17 a 300 DPI.

Ponto	300 DPI – Base Longe													
	Base Esquerda			Base Direita			Topo Esquerdo			Topo Direito			Altura	
	x	Coluna	Linha	x	Coluna	Linha	x	Coluna	Linha	x	Coluna	Linha	Direto	Alturas
1	6,45431	1515	793	-78,5617	516	772	-6,95191	1357	849	-96,465	305	832	62,06294	61,33837
4	-7,68493	1349	1282	-92,6332	351	1270	11,75201	1578	1150	-73,1066	581	1134	1,301798	1,291041
7	-17,9205	1229	1750	-102,799	232	1741	5,584675	1506	1637	-79,3744	508	1622	1,165319	1,155163
8	53,86354	2076	2112	-30,6856	1083	2090	45,14314	1973	1997	-43,643	930	1978	58,64556	58,58628
10	5,816872	1510	2486	-78,0659	525	2465	22,76472	1710	2590	-65,0218	679	2565	54,23558	55,02561
11	54,3256	2082	2483	-29,7256	1095	2455	46,07924	1985	2644	-42,3865	946	2613	60,98014	61,62439
13	67,89878	2242	2448	-15,9812	1257	2417	91,30327	2518	2461	6,236356	1519	2425	17,01277	17,26551
19	49,11223	2019	1457	-34,6531	1035	1437	94,76369	2557	1247	9,73413	1558	1220	18,10538	18,42427
18	42,73725	1944	1573	-41,2863	957	1554	81,51485	2401	1400	-2,67202	1412	1376	2,368892	2,396114
24	11,78693	1578	873	-72,9774	582	853	32,62672	1824	1049	-55,1115	793	1030	41,75733	41,50691

Nota: x em milímetros; coluna e linha em *pixels*; e altura em metros.

Tabela I.14- Base distante para imagens 16 e 17 a 300 DPI - Normalizadas.

Ponto	300 DPI Normalizada - Base Longe													
	Base Esquerda			Base Direita			Topo Esquerdo			Topo Direito			Altura	
	x	Coluna	Linha	x	Coluna	Linha	x	Coluna	Linha	x	Coluna	Linha	Direto	Alturas
1	5,825895	1037	613	-78,4894	377	565	-7,55201	928	649	-96,383	226	600	62,30727	62,58129
4	-8,11786	920	957	-92,4213	251	911	11,2238	1078	868	-73,0287	416	822	0,743663	0,743663
7	-18,1388	835	1287	-102,591	157	1240	5,412843	1027	1214	-79,0913	356	1168	0,749876	0,750792
8	53,19875	1411	1569	-30,5204	754	1522	45,19788	1347	1483	-43,5558	647	1434	69,06292	70,32911
10	5,990705	1025	1819	-78,2845	347	1764	22,97713	1162	1900	-65,403	453	1841	56,90212	57,20613
11	54,78888	1421	1832	-29,7097	754	1779	46,44456	1352	1946	-42,7231	642	1887	64,31145	64,32146
13	68,18858	1530	1812	-16,0643	869	1758	91,73969	1721	1829	6,282559	1056	1774	17,25818	17,36094
19	48,74113	1380	1100	-34,7357	731	1055	94,2581	1751	965	10,22485	1112	907	8,03451	8,232949
18	42,44461	1328	1180	-41,4178	673	1129	81,46558	1646	1069	-2,64086	1001	1024	3,537313	3,591781
24	11,20314	1080	672	-72,9379	422	624	32,07635	1248	803	-55,1105	568	757	42,73153	43,09594

Nota: x em milímetros; coluna e linha em *pixels*; e altura em metros.

Tabela I.15- Erros das bases distantes em relação ao restituidor.

Ponto	Erros das bases longes em relação ao restituidor							
	300 DPI		300 DPI - Normal		Zona	Distância Base - Topo		
	Direto	Alturas	Direto	Alturas		Colunas	Linhas	Distância
1	8,359611	7,635037	8,603932	8,877958	2	158	56	167,6305
4	3,034868	3,045626	3,593004	3,593004	1	229	132	264,3199
7	2,664681	2,674837	3,080124	3,079208	1	277	113	299,1622
8	5,544437	5,603719	4,872917	6,139115	3	103	115	154,3826
10	0,56775	0,22228	2,09879	2,402798	4	200	104	225,424
11	1,829862	1,185608	1,501447	1,511462	4	97	161	187,9628
13	0,649432	0,902175	0,894849	0,997611	5	276	13	276,306
19	7,341283	7,022393	17,41216	17,21372	4	538	210	577,5327
18	10,89444	10,86722	9,72602	9,67155	3	457	173	488,6492
24	3,379339	3,629752	2,405141	2,040731	2	246	176	302,4764
Média	3,461824	3,320657	4,766621	4,919557				
Desv.Pad.	2,749836	2,630338	4,940261	4,916671				

Nota: Altura em metro. Colunas, linhas e distância em *pixels*.

Tabela I.16- Medições no modo estéreo - estereoscópio.

300 DPI - Modo Estereoscópio														
Ponto	Base Esquerda			Base Direita			Topo Esquerdo			Topo Direito			Altura	
	x	Coluna	Linha	x	Coluna	Linha	x	Coluna	Linha	X	Coluna	Linha	Direto	Alturas
1	-4,91874	1381	866	-90,6160	374	848	-5,424413	1375	841	-94,85227	324	823	51,93241	50,52751541
4	12,09539	1582	1117	-72,4228	589	1100	11,66721	1577	1150	-73,1915	-73,1915	1135	4,930593	4,929077
7	7,195084	1525	1644	-77,2557	533	1631	5,49987	1505	1637	-79,4595	507	1624	7,34845	7,357907
8	47,86357	2005	1944	-36,087	1019	1925	45,14314	1973	1997	-43,7279	929	1978	67,58325	68,45443
10	18,70821	1662	2478	-65,3438	675	2456	20,98697	1689	2565	-66,7992	658	2543	51,98012	52,53039
11	47,26789	1999	2633	-36,3624	1017	2594	46,07924	1985	2644	-42,217	948	2614	64,27263	65,58886
13	89,43201	2496	2505	5,551124	1511	1511	91,38807	2519	2461	6,321319	1520	2424	16,99815	17,25038
19	95,89224	2570	1040	12,98942	1596	1013	94,76356	2557	1248	9,988386	1561	1221	26,62496	27,65261
18	84,57274	2437	1361	1,31997	1459	1337	81,5149	2401	1400	-2,67202	1412	1376	13,4288	13,833668
24	28,72671	1778	1041	-55,7041	-55,7041	1023	32,62672	786	1023	-55,0269	794	1031	45,12358	45,20187

Nota: x em milímetros; coluna e linha em pixels; e altura em metros.

Tabela I.17- Erros da medição
estéreo em relação ao restituidor
no modo estereoscópio.

Ponto	Erro Estéreoscópio	
	Direto	Alturas
1	1,770926	3,17582
4	0,593926	0,59241
7	3,51845	3,527907
8	3,393246	4,264433
10	2,823211	2,272946
11	1,462633	2,778856
13	0,634819	0,887047
19	1,178293	2,205942
18	0,16548	0,570334
24	0,013086	0,065206
Média	1,55541	2,03409
Desv.Pad.	1,29608	1,43620

Nota: Valores expressos em metro.

Tabela I.18- Medições no modo estéreo - anaglifo.

300 DPI - Modo Anaglifo														
Ponto	Base Esquerda			Base Direita			Topo Esquerdo			Topo Direito			Altura	
	x	Coluna	Linha	x	Coluna	Linha	x	Coluna	Linha	x	Coluna	Linha	Direto	Alturas
2	2,026309	1463	937	-83,3341	460	920	-0,86298	1429	984	-87,1578	415	967	13,43244	13,16617
4	12,94924	1592	1071	-71,4826	600	1054	11,75201	1578	1150	-73,1064	581	1133	6,168778	6,179575
7	6,345649	1515	1655	-78,1049	523	1638	5,584171	1506	1641	-79,2899	509	1624	6,126112	6,13398
8	48,63438	2014	1884	-35,3994	1027	1867	45,22845	1974	1993	-43,6427	930	1976	66,50474	67,2328
10	20,40292	1682	2489	-63,6502	695	2472	21,32771	1693	2553	-66,4589	662	2536	51,97036	52,51912
11	51,59369	2050	2627	-32,3773	1064	2599	47,51726	2002	2002	-40,9499	963	2645	62,05043	62,8225
13	89,00761	2491	2508	4,955594	1504	2480	85,10886	2445	2490	0,209369	1448	2462	12,19579	12,3271
23	60,99977	2159	1339	-22,9312	1173	1318	55,50083	2094	1233	-30,1229	1088	1212	24,12072	24,44865
18	84,48756	2436	1364	1,320126	1459	1336	81,43005	2400	1400	-2,75619	1411	1372	14,63216	15,10389
24	28,981	1781	1042	-55,5341	788	1021	1042	1824	1050	-55,1962	792	1029	46,26622	46,25577

Nota: x em milímetros; coluna e linha em *pixels*; e altura em metros.

Tabela I.19- Erros da medição
estéreo em relação ao restituidor
no modo anaglifo.

Ponto	Erro Anaglifo	
	Direto	Alturas
1	0,550888	0,81716
4	1,832111	1,842908
7	2,296112	2,30398
8	2,314737	3,042801
10	2,832975	2,284214
11	0,759571	0,012503
13	4,167545	4,036232
23	0,219278	0,108646
18	1,368823	1,840557
24	1,129551	1,119107
Média	1,747159	1,740811
Desv.Pad.	1,198766	1,268753

Nota: Valores expressos em metro.

Tabela I.20- Teste de Correlação.

Teste Quanto ao Tamanho do Template - 300 DPI									
Lado = 35									
	Imagem 16		Imagem 17		Achado				
Ponto	Coluna	Linha	Coluna	Linha	Coluna	Linha	ñ	Acertou?	Tempo (s)
1	1569	786	571	765	571	765	0,87	Exato	8
2	1726	1035	725	1015	893	1010	0,52	Errou	8
3	1779	1040	787	1019	1112	1033	0,73	Errou	8
4	1824	1049	793	1029	818	1018	0,83	Errou	8
5	2155	1339	1172	1317	1172	1317	0,96	Exato	8
6	1528	1660	535	1646	535	1646	0,86	Exato	8
7	1544	1723	542	1710	542	1710	0,87	Exato	8
8	1973	1998	930	1978	417	1985	0,67	Errou	8
9	1973	1981	928	1961	930	1962	0,62	Perto	8
10	2644	1290	1668	1261	1668	1261	0,92	Exato	8
Lado = 25									
	Imagem 16		Imagem 17		Achado				
Ponto	Coluna	Linha	Coluna	Linha	Coluna	Linha	ñ	Acertou?	Tempo (s)
1	1569	786	571	765	571	765	0,86	Exato	5
2	1726	1035	725	1015	725	1015	0,65	Exato	4
3	1779	1040	787	1019	787	1019	0,76	Exato	4
4	1824	1049	793	1029	1114	1015	0,84	Errou	5
5	2155	1339	1172	1317	1172	1317	0,97	Exato	5
6	1528	1660	535	1646	535	1646	0,85	Exato	5
7	1544	1723	542	1710	542	1710	0,85	Exato	5
8	1973	1998	930	1978	2675	1988	0,8	Errou	5
9	1973	1981	928	1961	930	1962	0,61	Perto	5
10	2644	1290	1668	1261	1668	1261	0,93	Exato	4
Lado = 12									
	Imagem 16		Imagem 17		Achado				
Ponto	Coluna	Linha	Coluna	Linha	Coluna	Linha	ñ	Acertou?	Tempo (s)
1	1569	786	571	765	571	764	0,84	Perto	1
2	1726	1035	725	1015	732	1016	0,63	Exato	2
3	1779	1040	787	1019	1104	1025	0,59	Exato	2
4	1824	1049	793	1029	1727	1035	0,9	Errou	2
5	2155	1339	1172	1317	1172	1317	0,99	Exato	2
6	1528	1660	535	1646	535	1646	0,96	Exato	1
7	1544	1723	542	1710	543	1710	0,88	Exato	1
8	1973	1998	930	1978	930	1978	0,96	Exato	1
9	1973	1981	928	1961	2647	1964	0,64	Errou	1
10	2644	1290	1668	1261	2234	1247	0,87	Errou	1

Nota: coluna e linha em *pixels*.

Apêndice J

Pontos de Controle

Neste apêndice são apresentados os quatro pontos de controle utilizados para fazer a orientação exterior, tanto na normalização da imagem quanto no restituidor analógico.

Os pontos de controle foram obtidos in loco por estudantes de engenharia cartográfica da UERJ através de um GPS.

Tabela J.1 - Coordenadas x e y na imagem 017.

Ponto	Coluna	Linha
Terraço UERJ	0847	1095
Quinta da Boa Vista	2344	0263
Manoel de Abreu	0344	1987
Marechal Rondon	0339	0456

Tabela J.2 - Dados dos pontos de controle (coordenadas em milímetros e no sistema UTM) .

Ponto	x	y	N	E	H
Terraço UERJ	-50,542	23,164	7465297,383	680932,742	67,903
Quinta da Boa Vista	76,542	93,456	7465874,579	682020,902	22,339
Manoel de Abreu	-93,340	-52,409	7464679,747	680542,281	12,385
Marechal Rondon	-93,522	77,468	7465798,024	680539,053	18,475

Tabela J.3 - Imagem dos pontos de controle.

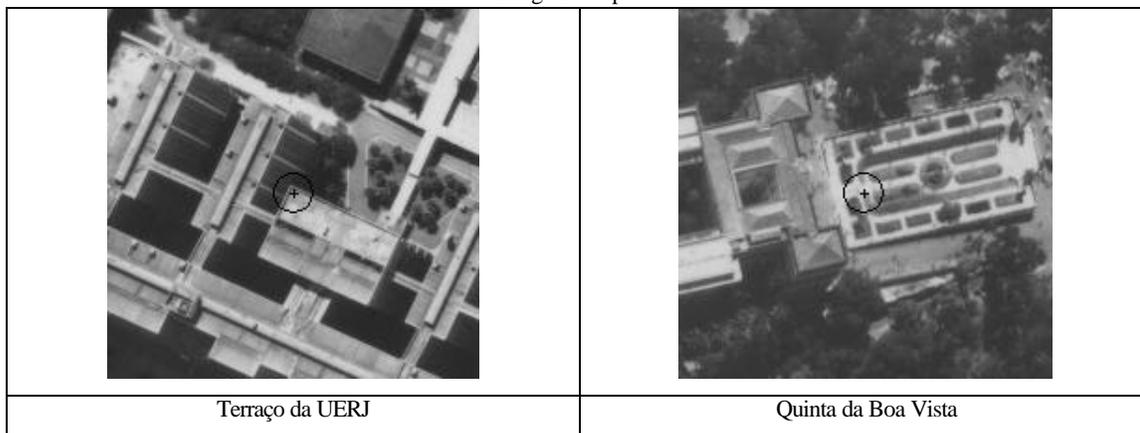


Tabela J.3 - Continuação.

	
<p>Manoel de Abreu</p>	<p>Marechal Rondon</p>

Apêndice L

Formulação Para Análise Estatística dos Testes

Neste apêndice são apresentadas as formulações utilizadas para as comparações estatísticas do capítulo 5.

Foi utilizado o conceito de intervalo de confiança para duas médias, para variâncias desconhecidas e para populações heterocedásticas.

A fórmulas utilizadas foram:

$$IC(\mu_a - \mu_b)_{1-\alpha} = \bar{x}_a - \bar{x}_b \pm t_{\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{s_a^2}{n_a} + \frac{s_b^2}{n_b}} \quad (L.1)$$

$$v = \frac{\left(\frac{s_a^2}{n_a} + \frac{s_b^2}{n_b}\right)^2}{\frac{\left(\frac{s_a^2}{n_a}\right)^2}{n_a-1} + \frac{\left(\frac{s_b^2}{n_b}\right)^2}{n_b-1}} \quad (L.2)$$

Onde:

- IC - intervalo de confiança para duas médias.
- 1 - á - intervalo de confiança, entre 0 e 1.
- \bar{x}_a, \bar{x}_b - estimador da média populacional μ .
- t - distribuição de *t-Student*.
- v - graus de liberdade
- s_a, s_b - estimador da variância populacional σ .
- n_a, n_b - número de amostras.

Tabela L.1 - Distribuição de *t-Student*, para v graus de liberdade.

v	Probabilidade exceder o valor crítico ($\alpha/2$)					
	0,10	0,05	0,025	0,01	0,005	0,001
1	3,078	6,314	12,706	31,821	63,657	318,313
2	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	22,327
3	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	10,215
4	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	7,173
5	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	5,893
6	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	5,208
7	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	4,782

Tabela L.1 - Continuação.

V	Probabilidade exceder o valor crítico ($\alpha/2$)					
	0,10	0,05	0,025	0,01	0,005	0,001
8	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	4,499
9	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	4,296
10	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	4,143
11	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	4,024
12	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	3,929
13	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	3,852
14	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	3,787
15	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	3,733
16	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	3,686
17	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,646
18	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,610
19	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,579
20	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,552
21	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,527
22	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,505
23	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,485
24	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,467
25	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,450
26	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,435
27	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,421
28	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,408
29	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,396
30	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,385
31	1,309	1,696	2,040	2,453	2,744	3,375
32	1,309	1,694	2,037	2,449	2,738	3,365
33	1,308	1,692	2,035	2,445	2,733	3,356
34	1,307	1,691	2,032	2,441	2,728	3,348
35	1,306	1,690	2,030	2,438	2,724	3,340
36	1,306	1,688	2,028	2,434	2,719	3,333
37	1,305	1,687	2,026	2,431	2,715	3,326
38	1,304	1,686	2,024	2,429	2,712	3,319
39	1,304	1,685	2,023	2,426	2,708	3,313
40	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704	3,307
41	1,303	1,683	2,020	2,421	2,701	3,301
42	1,302	1,682	2,018	2,418	2,698	3,296
43	1,302	1,681	2,017	2,416	2,695	3,291
44	1,301	1,680	2,015	2,414	2,692	3,286

Tabela L.1 - Continuação.

v	Probabilidade exceder o valor crítico ($\alpha/2$)					
	0,10	0,05	0,025	0,01	0,005	0,001
45	1,301	1,679	2,014	2,412	2,690	3,281
46	1,300	1,679	2,013	2,410	2,687	3,277
47	1,300	1,678	2,012	2,408	2,685	3,273
48	1,299	1,677	2,011	2,407	2,682	3,269
49	1,299	1,677	2,010	2,405	2,680	3,265
50	1,299	1,676	2,009	2,403	2,678	3,261
51	1,298	1,675	2,008	2,402	2,676	3,258
52	1,298	1,675	2,007	2,400	2,674	3,255
53	1,298	1,674	2,006	2,399	2,672	3,251
54	1,297	1,674	2,005	2,397	2,670	3,248
55	1,297	1,673	2,004	2,396	2,668	3,245
56	1,297	1,673	2,003	2,395	2,667	3,242
57	1,297	1,672	2,002	2,394	2,665	3,239
58	1,296	1,672	2,002	2,392	2,663	3,237
59	1,296	1,671	2,001	2,391	2,662	3,234
60	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660	3,232
61	1,296	1,670	2,000	2,389	2,659	3,229
62	1,295	1,670	1,999	2,388	2,657	3,227
63	1,295	1,669	1,998	2,387	2,656	3,225
64	1,295	1,669	1,998	2,386	2,655	3,223
65	1,295	1,669	1,997	2,385	2,654	3,220
66	1,295	1,668	1,997	2,384	2,652	3,218
67	1,294	1,668	1,996	2,383	2,651	3,216
68	1,294	1,668	1,995	2,382	2,650	3,214
69	1,294	1,667	1,995	2,382	2,649	3,213
70	1,294	1,667	1,994	2,381	2,648	3,211
71	1,294	1,667	1,994	2,380	2,647	3,209
72	1,293	1,666	1,993	2,379	2,646	3,207
73	1,293	1,666	1,993	2,379	2,645	3,206
74	1,293	1,666	1,993	2,378	2,644	3,204
75	1,293	1,665	1,992	2,377	2,643	3,202
76	1,293	1,665	1,992	2,376	2,642	3,201
77	1,293	1,665	1,991	2,376	2,641	3,199
78	1,292	1,665	1,991	2,375	2,640	3,198
79	1,292	1,664	1,990	2,374	2,640	3,197
80	1,292	1,664	1,990	2,374	2,639	3,195
81	1,292	1,664	1,990	2,373	2,638	3,194

Tabela L.1 - Continuação.

v	Probabilidade exceder o valor crítico ($\alpha/2$)					
	0,10	0,05	0,025	0,01	0,005	0,001
82	1,292	1,664	1,989	2,373	2,637	3,193
83	1,292	1,663	1,989	2,372	2,636	3,191
84	1,292	1,663	1,989	2,372	2,636	3,190
85	1,292	1,663	1,988	2,371	2,635	3,189
86	1,291	1,663	1,988	2,370	2,634	3,188
87	1,291	1,663	1,988	2,370	2,634	3,187
88	1,291	1,662	1,987	2,369	2,633	3,185
89	1,291	1,662	1,987	2,369	2,632	3,184
90	1,291	1,662	1,987	2,368	2,632	3,183
91	1,291	1,662	1,986	2,368	2,631	3,182
92	1,291	1,662	1,986	2,368	2,630	3,181
93	1,291	1,661	1,986	2,367	2,630	3,180
94	1,291	1,661	1,986	2,367	2,629	3,179
95	1,291	1,661	1,985	2,366	2,629	3,178
96	1,290	1,661	1,985	2,366	2,628	3,177
97	1,290	1,661	1,985	2,365	2,627	3,176
98	1,290	1,661	1,984	2,365	2,627	3,175
99	1,290	1,660	1,984	2,365	2,626	3,175
100	1,290	1,660	1,984	2,364	2,626	3,174
	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576	3,090

Apêndice M

Otimização da Janela de Pesquisa

Este apêndice apresenta como se construir uma janela de pesquisa de modo a minimizar a busca automática de pontos homólogos.

Pode-se estimar a localização de um ponto homólogo, fazendo-se um deslocamento no eixo x do valor da fotobase da seguinte maneira:

- Se o ponto de origem estiver na imagem da esquerda, o deslocamento é positivo;
- Se o ponto de origem estiver na imagem da direita, o deslocamento é negativo.

Portanto:

$$x' = x + fb \quad (M.1)$$

$$x' = x - fb \quad (M.2)$$

onde:

- x - ponto de origem;
- x' - estimativa do ponto homólogo;
- fb - fotobase.

Porém, de acordo com deslocamento devido ao relevo e com as distorções devido à atitude do avião, o ponto homólogo sofre um pequeno desvio em relação a esta distância. Esta situação é ilustrada na figura M.1.

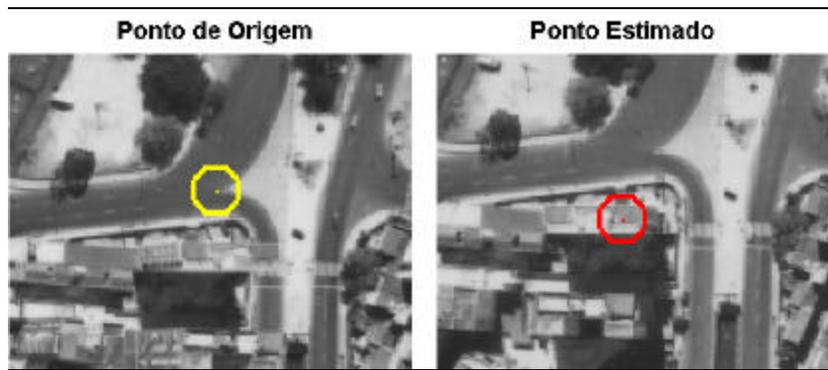


Figura M.1 - Estimativa do ponto homólogo.

Então, deve-se encontrar o ponto homólogo por correlação. O passo seguinte é a criação de uma janela de pesquisa em torno do ponto x' .

A questão então é: como determinar os limites verticais e horizontais de forma que sejam genéricos para qualquer resolução de imagem? Os limites verticais podem ser determinados a partir dos limites aceitáveis de atitude do avião. Porém, como a imagem é bidimensional, há somente um sentido de rotação. Como o desvio angular pode ser tanto para um sentido como para o outro, então aplica-se este desvio nos dois sentidos de rotação. A figura M.2 apresenta o cálculo dos limites verticais da janela de pesquisa.

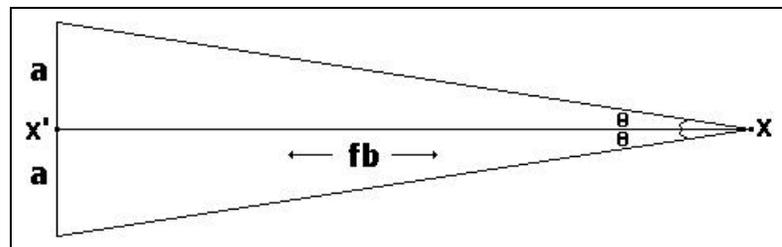


Figura M.2 - Cálculo dos limites verticais da janela de pesquisa.

O valor de a é calculado segundo a equação:

$$a = \text{tg} \theta \cdot fb \quad (\text{M.3})$$

onde:

- a - limite inferior e superior da janela de pesquisa.
- θ - ângulo de desvio.

O valor de θ utilizado no sistema implementado foi de 3° .

Para o cálculo dos limites horizontais da janela de pesquisa, deve-se estimar um valor máximo que um ponto pode sofrer deslocamento devido à paralaxe. Este valor deve ser exagerado, de forma que não haja objetos presentes no par de imagens que atinjam este valor. Por exemplo, em uma área urbana onde os prédios alcançam no máximo 70 metros, coloca-se uma janela que atenda 80 metros de paralaxe. Assim como nos limites verticais, aplica-se este valor para os dois sentidos, ou seja, esquerda e direita. A figura M.3 mostra o cálculo dos limites horizontais.

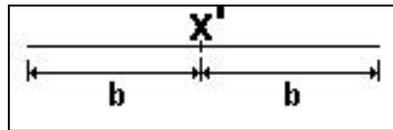


Figura M.3 - Limites horizontais.

O valor de b é equivalente à diferença de paralaxe, pois trata-se da altura máxima estimada. Rearranjando a equação 2.13, tem-se:

$$b = (h \cdot b) / (H - h) \tag{M.4}$$

A altura máxima utilizada no sistema implementado foi de 80 metros.

O resultado da janela de pesquisa pode ser observado na figura M.4. Observa-se que o ponto homólogo está presente nesta janela.

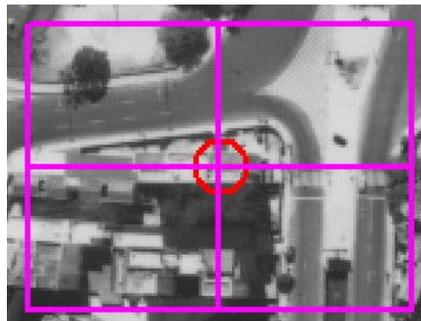


Figura M.4 - Janela de pesquisa.

Apêndice N

Outras Técnicas de Visão em Estéreo

Este apêndice apresenta mais algumas técnicas de visão em estéreo. São técnicas apresentadas em *Sistemas de Visualización Estereoscópicas* (2005).

Polarização - Utiliza-se luz polarizada para separar as imagens esquerda e direita. O sistema de polarização não altera as cores, porém há uma certa perda de luminosidade. É utilizado tanto em projeção de cinema 3D como em monitores de computador mediante telas de polarização alternativa. Hoje em dia é o sistema mais econômico para uma qualidade de imagem aceitável. A figura N.1 apresenta o par de óculos utilizado neste sistema.



Figura N.1 - Óculos para sistema polarizador. Fonte: S.V.E (2005).

Alternativo - Neste sistema as imagens esquerda e direita são apresentadas em seqüência e alternadamente, em sincronia com um óculos dotado com obturadores de cristal líquido (denominados LCS, *Liquid Crystal Shutter glasses* ou LCD, *Liquid Crystal Display glasses*), de forma que cada olho veja somente sua imagem correspondente. A uma frequência elevada, a troca de imagens é imperceptível. Esta técnica é utilizada em monitores, TV e cinemas 3D de última geração. A figura N.2 apresenta o óculos utilizado neste sistema.



Figura N.2 - Óculos para sistema alternativo. Fonte: S.V.E (2005).

Head Mounted Display (HMD) - Um HMD é um óculos especial que possui duas telas, ou seja, um sistema ótico para cada olho, de forma que a imagem é formada no próprio dispositivo. Seu principal uso até agora tem sido a realidade virtual, a um custo exorbitante e de forma experimental. A figura N.3 apresenta este dispositivo.



Figura N.3 - Óculos para sistema HMD. Fonte: S.V.E (2005).

Monitores Auto-Estéreo - Estão sendo desenvolvidos protótipos de monitores que não precisam de óculos especiais para sua visualização 3D. Todos eles empregam variantes do sistema lenticular, ou seja, microlentes dispostas paralela e verticalmente sobre a tela do monitor, que geram um certo desvio a partir de duas ou mais imagens (normalmente de 2 a 8).

Efeito Pulfrich - O efeito Pulfrich foi descoberto pelo médico alemão Carl Pulfrich em 1922. O fenômeno é a percepção de um efeito estereoscópico quando se observa uma imagem em movimento horizontal sobre um plano e com um filtro escuro situado diante de um dos olhos. Devido a menor luminosidade percebida pelo olho com o filtro, a imagem chega ao cérebro com um retardo de uns centésimos de segundo. Portanto, o cérebro percebe a mesma imagem, mas com uma pequena diferença de posição horizontal, o que gera o efeito estereoscópico. Não é propriamente um sistema de visualização em estéreo, já que não se trata de um par de imagens e sim de uma única imagem 2D animada.

ChromaDepth - O sistema ChromaDepth da empresa CromaTek Inc. se baseia no desvio que produzem as diferentes cores do espectro. Em um prisma, a luz se desvia ligeiramente dependendo de seu comprimento de onda: mais desvio no vermelho, menos no azul. A informação de profundidade é codificada por cores. Os óculos especialmente desenhados para a visualização destas imagens dispõem de uns cristais transparentes com microprismas. Quando a imagem, denominada CyberHologram são observadas pelos óculos HoloPlay (para imagens de computador) ou HoloPlay (para imagens impressas), a imagem 2D se converte em tridimensional. A desvantagem deste sistema é a perda de informação cromática, mas a vantagem dos óculos é que as imagens também podem ser vistas em 2D.