

**Elias Ribeiro de Arruda Junior**

**“Mosaicagem”  
de imagens digitais**

**Presidente Prudente  
2002**

*Elias Ribeiro de Arruda Junior*

# “Mosaicagem” de imagens digitais

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciências Cartográficas da FCT/UNESP, Campus de Presidente Prudente - SP, para obtenção do título de Mestre.  
ORIENTADOR: *Prof. Dr. Júlio Kiyoshi Hasegawa*

Presidente Prudente  
**2002**

## **DADOS CURRICULARES**

### **ELIAS RIBEIRO DE ARRUDA JUNIOR**

**NASCIMENTO:** 11/12/1973 – Rancharia – SP  
**FILIAÇÃO:** Elias Ribeiro de Arruda  
Maria de Paula Arruda

**1994 – 1998:** Graduação  
Engenharia Cartográfica  
Faculdade de Ciências e Tecnologia  
Universidade Estadual Paulista – UNESP  
Campus de Presidente Prudente – SP

**1999 – 2002:** Pós Graduação - Mestrado  
Ciências Cartográficas  
Faculdade de Ciências e Tecnologia  
Universidade Estadual Paulista – UNESP  
Campus de Presidente Prudente – SP

**Dedico** este trabalho a minha companheira, amiga e amada, Alessandra Choqueta de Toledo (Lê), que esteve sempre presente em todos os momentos desta minha jornada, sempre ali, física ou virtualmente, dos melhores aos piores momentos, dividindo espaço no meu coração com as angústias e alegrias advindas deste trabalho.

Aos meus pais, Elias Ribeiro de Arruda e Maria de Paula Arruda, que pela criação, educação, apoio e amor, que me proporcionaram, têm todo o mérito por este momento único em minha vida ...

A minha única irmã, Josiana Ribeiro de Arruda, pelo apoio e companheirismo por toda a vida.

Aos meus segundos pais, João Batista de Toledo e Teresa Choqueta de Toledo, e segunda irmã Fabíola Choqueta de Toledo, por me acolherem em seu lar e me apoiarem como verdadeiro filho.

## AGRADECIMENTOS

Primordialmente, agradeço a Deus por soprar em mim o ar da vida e abastecer-me com a energia da perseverança, para lutar contra todas as dificuldades que, um dia após outro, nos deparamos como pedras em nossas trilhas ...

Agradeço muito ao meu orientador e amigo Prof. Júlio Kiyoshi Hasegawa por dividir comigo o seu conhecimento e experiência, sem hesitar, confiando a mim a responsabilidade deste trabalho de pesquisa.

A todos os professores, funcionários e alunos da FCT/UNESP que contribuíram direta e indiretamente para o enriquecimento desta pesquisa, entre eles, em destaque: Prof. Niltom Nobuhiro Imai, Prof. Maurício Galo, Prof. Antonio M.G.Tommaselli, Miltom Horokazu Shimabukuro, Silvio Tadão Fujisaki, Maria das Graças Teixeira Mestriner (Graça), Maria Aparecida Carnellosi e Silva (Cidinha), Geraldo Ninelo e Ítalo Tsuchiya.

A CAPES, pelo suporte financeiro que dedicou à esta pesquisa.

A todos os parentes, amigos e companheiros de Iepê, da sala 20, da sala de permanência do mestrado, da Petrobrás, do SIVAM/IBGE, entre outros que souberam ouvir lamentações e desabafos e com um gesto, ou uma palavra de conforto, conseguiram me fortalecer para continuar na luta, sem desistir. À Marilea Ferreira Melo, pela ajuda na dissertação.

Aos Carlos Augusto Portela de Senna, Ana Paula Tureta, Francisco Augusto de Senna e Carlota Maria Portela de Senna, pessoas que mesmo me conhecendo há tão pouco tempo, depositaram em mim toda a confiança possível, me acolhendo em seus lares, momento este, decisivo para que eu terminasse este trabalho.

Aos meus companheiros para tudo: Daniel Rodrigues dos Santos, Mário Luiz Lopes Reiss, José Aguiar de Lima Junior (Zito) e Luiz Fernando Sapucci, aos quais considero meus irmãos.

E, como não poderia esquecer, do companheiro Geóide, que participou integralmente da turma, sempre ali, em silêncio, mas presente ...

***O valor do homem é determinado, em  
primeira linha, pelo grau e pelo sentido  
em que ele se libertou do seu ego.***

***(Albert Einstein)***

ARRUDA JUNIOR, E. R. “**Mosaicagem**” de imagens digitais, - Dissertação de mestrado – FCT/UNESP, Faculdade de Ciências Tecnologia, 92p, Presidente Prudente - SP, 2002.

## RESUMO

Paralelo ao advento da computação e dos equipamentos fotográficos, evoluiu também a Fotogrametria, surgindo assim a Fotogrametria Digital, que realiza os processos fotogramétricos num ambiente de computador. Como as câmaras fotogramétricas digitais ainda possuem um preço bastante elevado, as fotografias obtidas com câmaras digitais de uso doméstico (fotografias de pequeno formato), como alternativa, começaram apoiando as fotografias aéreas convencionais e atualmente estão substituindo-as em inúmeras aplicações. Pelo seu tamanho reduzido, faz-se necessário a fusão (mosaicagem) de um grande número destas fotografias para o recobrimento fotográfico de uma área de interesse. Como os produtos disponíveis, que atendem de maneira satisfatória o processo de produção destes mosaicos, estejam disponíveis em grandes pacotes de *softwares*, com custo bastante elevado, com necessidade de operadores especializados e necessidade de estações de trabalho específicas, surgiu a necessidade de um produto que realizasse a mosaicagem de imagens digitais. Neste contexto, o trabalho ora proposto, desenvolve um sistema visando solucionar o problema acima mencionado.

Palavras chaves: **Mosaicagem; Imagem Digital; Fotografia Aérea de Pequeno Formato; Fotogrametria Digital.**

ARRUDA JUNIOR, E. R. “**Mosaicagem**” de imagens digitais, - Dissertação de mestrado – FCT/UNESP, Faculdade de Ciências Tecnologia, 111p, Presidente Prudente - SP, 2002.

### **ABSTRACT**

As well as the computer science and the photographics advents the photogrammetry has also developed. This development promoted the rise of digital photogrammetry which is responsables for all the photogrammetry processes in a computer. Once digital photogrammetric cameras still cost a high price, the domestic cameras became an alternative to take usual aero photographics and nowadays domestic cameras are being used in many cases. But by the small size of the pictures is necessary to joint a great member of those pictures (like in a mosaic) to have the photographics recove of the desired area. The disposable products to satisfy the production process of these mosaics are sold only in big packs of software for a high price. The need of specialized operations brought the necessity of a new product to joint digital images. In this context this work develops a system to solve the problem already mentioned.

Keywords: **Mosaicking; Digital Image; Small-format Aerial Photograph; Digital Photogrammetry.**

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	15
1.1 Contextualização do trabalho .....	15
1.2 Objetivos .....	17
1.3 Estrutura do trabalho .....	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	19
2.1 Imagens Digitais .....	19
2.1.1 Sensores Digitais .....	20
2.2 Câmaras Digitais .....	21
2.3 Reamostragem em imagens digitais .....	22
2.4 Retificação de imagens digitais .....	23
2.5 Calibração de câmaras digitais .....	29
2.5.1 Métodos de Calibração.....	29
2.5.2 Modelo matemático para calibração.....	31
2.6 Ortofotos digitais .....	33
2.7 Mosaicos .....	36
2.8 Mosaicagem de ortofotos digitais .....	38
2.9 Transformações geométricas .....	39
3 MATERIAIS e METODOLOGIA .....	40
3.1 Materiais utilizados.....	40
3.1.1 Materiais utilizados no processo de calibração .....	41
3.2 Metodologia para calibração da câmara .....	42

3.3 Metodologia para retificação de imagens .....	44
3.4 Metodologia para mosaicagem de imagens .....	48
3.4.1 Mosaicagem geométrica .....	48
3.4.1.1 Mosaicagem pelo método direto .....	49
3.4.1.2 Mosaicagem pelo método indireto.....	52
3.4.2 Mosaicagem radiométrica .....	54
4 PROGRAMA IMPLEMENTADO (Mosaicagem) .....	60
4.1 Menus de funções do programa.....	63
4.1.1 Sub-menu <i>Arquivo</i> .....	63
4.1.2 Sub-menu <i>Mosaicagem</i> .....	65
4.1.3 Sub-menu <i>Janelas</i> .....	67
5 EXPERIMENTOS.....	68
5.1 Experimentos de calibração .....	68
5.1.1 Discussão dos resultados da calibração .....	71
5.2 Experimentos de retificação .....	72
5.3 Experimentos de mosaicagem .....	74
5.3.1 Resultados do processo de mosaicagem.....	76
5.3.2 Discussão dos resultados da mosaicagem .....	79
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	84
6.1 Conclusões.....	84
6.2 Recomendações .....	85
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	86

APÊNDICE .....	89
----------------	----

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Princípio de Colinearidade .....	25
Figura 2.2 - Modelo de geração de imagem retificada .....	27
Fonte: Galo et al. (1999). .....	32
Figura 2.3 - Princípio do método direto. ....	35
Figura 2.4 - Princípio do método indireto. ....	35
Figura 3.1 - Imagens digitais (DCP00305.bmp e DCP00311.bmp) da FCT/UNESP - Presidente Prudente, obtidas com a câmara Kodak DC-210. ....	41
Figura 3.2 - Câmara digital Kodak DC 210.....	42
Figura 3.3 - Estrutura de arquivos utilizada no programa CC .....	43
Figura 3.4 - Etapas da retificação.....	45
Figura 3.5 - Mosaicagem geométrica .....	49
Figura 3.6 - Mosaicagem pelo método direto .....	50
Figura 3.7 - Etapas da mosaicagem pelo método direto .....	51
Figura 3.8 - Mosaicagem pelo método indireto .....	52
Figura 3.9 - Etapas da mosaicagem pelo método indireto .....	53
Figura 3.10 - Mosaicagem pelo método indireto com ajuste radiométrico .....	54
Figura 3.11 - Tamanho da superposição e variação dos <i>pixels</i> ( $P_{ij}$ ) .....	55
Figura 3.12 - Cálculo do nível de brilho .....	56
Figura 3.13 - Influência do peso na ponderação .....	57
Figura 3.14 - Etapas da mosaicagem pelo método indireto com ajuste radiométrico	58
Figura 3.15 - Mosaicagem (geométrica + radiométrica) detalhada .....	59
Figura 4.1 - Tela principal do programa .....	61
Figura 4.2 - Estrutura do programa .....	62

Figura 4.3 - Menu principal dos programas .....	63
Figura 4.4 - Sub-menu <i>Arquivo</i> .....	63
Figura 4.5 - Caixa de diálogo .....	64
Figura 4.6 - Sub-menu <i>Mosaicagem</i> .....	65
Figura 4.7 - Janela dos parâmetros de transformação.....	66
Figura 4.8 - Janela do mosaico .....	67
Figura 4.9 - Sub-menu <i>Janelas</i> .....	67
Figura 5.1 - Numeração dos pontos na placa e sistema arbitrário adotado .....	69
Figura 5.2 - Imagens capturadas com a câmara DC 210.....	69
Figura 5.3 - Posicionamento da câmara em relação a placa.....	69
Figura 5.4 – Imagens originais e suas respectivas retificadas .....	74
Figura 5.5 - Distribuição dos pontos de ligação na área de superposição do mosaico .....	75
Figura 5.6 - Mosaico realizado pelo método direto.....	76
Figura 5.7 - Mosaico realizado pelo método indireto.....	77
Figura 5.8 - Mosaico realizado pelo método indireto com ajuste radiométrica .....	78
Figura 5.9 - Mosaico realizado pelo método indireto com ajuste radiométrico utilizando-se imagens retificadas .....	78
Figura 5.10 - Recorte de uma feição em detalhes.....	80
Figura 5.11 – Recortes no mosaico.....	81
Figura 5.12 - Recorte de área com deslocamento devido ao relevo .....	82
Figura 5.13 - Falhas no método direto .....	83

## INDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Modelos utilizados para a modelagem dos erros sistemáticos. ....	32
Tabela 5.1 - Valores aproximados para as fotos. ....	70
Tabela 5.2 - Parâmetros de Calibração da Câmara DC 210. ....	71
Tabela B.1: Elementos de orientação no processo de retificação. ....	92

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 Contextualização do trabalho

Com o desenvolvimento tecnológico os métodos fotogramétricos de mapeamento têm passado por uma readaptação e evolução das metodologias, principalmente com o advento dos equipamentos eletrônicos e da informática. Um fato que marcou mudança na Fotogrametria, foi o surgimento da imagem digital, adquirida através de câmaras digitais ou pela digitalização de fotografias com *scanners*.

Paralelamente à evolução dos computadores, as câmaras fotográficas digitais evoluíram do mesmo modo, alavancando ainda mais a Fotogrametria. Essa evolução tem possibilitado a coleta de fotografias com maior rapidez, facilidade, custo reduzido, entre outras vantagens, quando comparado ao processo analógico.

A partir daí, originou-se a **Fotogrametria Digital**, que é um conjunto de procedimentos e processamentos fotogramétricos (oriundos da Fotogrametria Analítica) realizados num computador. A diferença básica entre a Fotogrametria Digital e a Fotogrametria Analítica, encontra-se no processo de aquisição dos dados. Na analítica as informações são coletadas diretamente no material analógico, isto é, no diapositivo, enquanto que na digital, as observações são realizadas no material digital (imagem).

As câmaras fotogramétricas digitais têm o seu uso ainda bastante restrito, pois possuem um custo bastante elevado. Com isso, abre-se um espaço para as câmaras digitais de uso doméstico, que vêm sendo utilizadas como alternativa para

inúmeros trabalhos, como por exemplo, na atualização cartográfica e no mapeamento qualitativo.

Atualmente, as fotografias obtidas com câmaras digitais não métricas têm o tamanho bastante reduzido em relação às fotografias aéreas convencionais, precisando assim, de inúmeras imagens para recobrir uma área. Por isso, faz-se necessário a fusão de imagens digitais.

Ao processo de fusão entre imagens consecutivas dá-se o nome de **mosaicagem**. Este processo, mesmo não sendo comumente explorado em trabalhos de pesquisa, assume um papel de vital importância na Fotogrametria Digital.

O processo de junção de imagens digitais, pode ser realizado através de *softwares* de tratamento de imagens. os quais não corrigem de maneira satisfatória as distorções geométricas decorrentes de várias fontes e diferenças radiométricas entre imagens. Outra alternativa para a fusão de imagens digitais, seria o uso de grandes pacotes de *softwares* existentes no mercado, os quais não têm como finalidade específica a mosaicagem, mas sim os processos fotogramétricos como um todo, estando entre eles, a mosaicagem. Pode-se citar como exemplo o *SOCETSET* da LH System (*ELava/Laika*). Porém, estes sistemas além de possuírem um custo bastante elevado, necessitam de operadores especializados e requerem estações de trabalho com alto poder de processamento e *hardwares* específicos, restringindo o uso deste tipo de sistema.

Como alternativa aos problemas levantados, o ideal seria um sistema de baixo custo, de operação simples e que suportasse trabalhar em plataformas convencionais nos computadores pessoais.

Neste sentido, este trabalho de pesquisa foi proposto e desenvolvido na Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus de Presidente Prudente – SP, visando solucionar o problema levantado anteriormente. O projeto teve o apoio financeiro da FAPESP e da CAPES/CNPQ.

## **1.2 Objetivos**

O objetivo geral deste trabalho é propor uma metodologia de fusão (“Mosaicagem”) de imagens digitais, com tratamento radiométrico em um sistema de baixo custo.

Os objetivos específicos são:

- Investigar métodos para mosaicagem de imagens digitais e imagens digitais retificadas;
- Propor uma metodologia para a mosaicagem de fotografias aéreas digitais de pequeno formato;
- Implementar e testar rotinas para realização da metodologia proposta.

## **1.3 Estrutura do trabalho**

Para maior clareza na leitura e estudo, este trabalho foi organizado da seguinte maneira:

- Capítulo 1 - faz uma introdução, ressaltando a importância do presente trabalho, além de apresentar sua contextualização, seus objetivos e o seu conteúdo;
- Capítulo 2 - traz uma revisão bibliográfica que visa abordar os assuntos relacionados ao trabalho, de maneira prática, mas sem perder o rigor teórico necessário para o desenvolvimento e solução do problema proposto;
- Capítulo 3 - descreve os materiais utilizados no trabalho e aborda a metodologia utilizada para calibração da câmara e para retificação e mosaicação das imagens aéreas digitais de pequeno formato, discutindo cada método utilizado no presente trabalho;
- Capítulo 4 - mostra o programa implementado para o desenvolvimento da pesquisa, sua estrutura, seus menus, suas funções e discute a diferença entre cada rotina implementada;
- Capítulo 5 - aborda os experimentos, mostra os resultados encontrados e tece comentários sobre os mesmos;
- Capítulo 6 - contém as conclusões geradas a partir dos resultados obtidos e da revisão bibliográfica realizada. Além disso, são apresentadas algumas recomendações que visam auxiliar os trabalhos futuros referentes ao assunto abordado.

Como complemento, são apresentados, no final desta dissertação, as bibliografias referenciadas e consultadas, bem como apêndices que trazem informações adicionais ao texto, todos com o intuito do enriquecimento sobre o assunto abordado.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Imagens Digitais

Schenk (1999), descreve uma imagem digital, como uma função contínua  $f(x, y)$ , onde as coordenadas  $x, y$  são variáveis espaciais e o valor da função (amplitude) é a densidade. Na realidade, esta função contínua é discretizada, entre a variável espacial e a amplitude. A função discreta resultante  $f(x, y)$  é chamada de imagem digital. O processo de discretização da variável espacial  $\Delta x, \Delta y$  é conhecido como reamostragem. Discretizando, a amplitude  $g$  é referida como quantização. O elemento discreto  $\Delta x, \Delta y$  é o *pixel* (derivado do elemento pictórico) e  $\Delta g$  é o nível de cinza, que informalmente pode ser chamado de **brilho**.

Segundo Andrade (1998), um *pixel* pode representar tons de cinza de duas maneiras diferentes: por associação com dígitos ou por matrizes. Na associação por dígitos cada número pode representar um tom de cinza. Adotando um “byte” de 8 “bit”, pode-se representar 256 números diferentes e associá-los a 256 tons de cinza, variando do preto ao branco. No processo matricial, uma matriz de 16x16 elementos pode também representar 256 tons de cinza. Enquanto o primeiro processo é mais adequado para os computadores, o segundo é para as impressoras. Convencionou-se que 0 corresponde ao preto e 255 ao branco. Para representar cores, os mesmos princípios valem, mas para o computador, em virtude da tela, as cores aditivas são mais adequadas: **vermelho, verde e azul** (RGB – Red, Green, blue). Pode-se representar as cores de uma imagem com um “byte” apenas, adotando o conceito de **palheta**. A palheta consiste de um certo número de combinações das cores aditivas (RGB), feita de maneira arbitrária, podendo portanto, ser otimizada para uma dada

imagem (por exemplo, 256 cores). Para impressão, usa-se o processo das cores subtrativas. As diferentes cores são obtidas pela combinação de pigmentos nas cores **amarelo, ciano e magenta**. Pela dificuldade de obter pigmentos com as cores perfeitas, a obtenção do preto misturando (amarelo + ciano + magenta) torna-se difícil e, por isso, as impressoras acrescentam pigmento preto no processo.

Ainda segundo Andrade (1998), como as cores passam a ser representadas por dígitos associados à uma determinada posição, pode-se escrever fórmulas matemáticas para tratar as imagens. Desta forma, todos os conceitos existentes para o tratamento de imagens analógicas como o de filtro, por exemplo, passam a ser realizados com fórmulas matemáticas. A possibilidade de submeter uma imagem digital à matemática, tornou a manipulação dessas imagens sem limites, estando exatamente aí o maior potencial de utilização tecnológica de tais imagens. É muito comum até falar-se em **Fotogrametria Digital**, pois todos os conceitos da Fotogrametria Clássica migraram com as suas aplicações muito enriquecidas pelas infinitas possibilidades oferecidas pela matemática.

### **2.1.1 Sensores Digitais**

Nos sensores digitais, os fotodetectores estão ordenados em forma matricial; assim, o sistema de coordenadas de tela é solidário aos fotodetectores, possibilitando a realização da orientação interior da câmara. Essa premissa só é verdadeira se for garantido que o CCD permaneça fixo e perpendicular em relação ao eixo ótico do sistema de lentes da câmara. No entanto, em várias câmaras, essa condição pode não ser atendida, pois ele pode movimentar-se devido ao sistema de amortecimento do CCD (HASEGAWA e KOYAMA, 2001).

Dessa forma, uma das alternativas viáveis que podem ser utilizadas é determinar (calibrar) os parâmetros de orientação interior da câmara digital, na situação semelhante à de trabalho. Assim, as imagens tomadas com sensores digitais podem ser utilizadas como imagens métricas, desde que os parâmetros de orientação interior do sensor sejam conhecidos (HASEGAWA e KOYAMA, 2001).

## 2.2 Câmaras Digitais

Segundo Tommaselli (2001), a tecnologia de imageamento digital com câmaras digitais tem sido empregada em aplicações de Visão de Máquina, Fotogrametria à Curta Distância e em algumas aplicações aéreas. No Sensoriamento Remoto, o imageamento eletrônico vem sendo usado desde seus primórdios em sensores orbitais, gerando produtos multiespectrais. A maioria das aplicações atuais de Fotogrametria, tanto em mapeamento, quanto em curta distância, são digitais, no sentido de que a informação é toda ela tratada numericamente.

Tommaselli (2001), ainda relata que a captura das imagens em aerofotogrametria continua sendo feita com filmes e depois digitalizada em *scanners* fotogramétricos. Isto ocorre porque os sensores digitais recentemente disponibilizados, que equivalem em resolução à uma câmara fotogramétrica, ainda apresentam custo muito alto. Além disto, a massa de dados a ser armazenada em tempo real é muito grande e o seu gerenciamento é bastante complexo.

Apesar destes problemas, as vantagens das câmaras digitais justificam a substituição gradativa das câmaras convencionais (Tommaselli, 2001):

- As câmaras digitais possuem poucas partes móveis e o sensor *CCD*, de estado sólido, sofre deformações muito pequenas em razão da variação de temperatura, ao contrário dos filmes;
- É possível reaproveitar a mídia de gravação inúmeras vezes e as imagens podem ser melhoradas já durante o vôo;
- Não é necessário digitalizar a fotografia em *scanner*;
- Maior resolução radiométrica, pois conseguem registrar intensidades com *pixels* de até 12 bits, ou seja, é possível distinguir até 4096 níveis de cinza, contra os atuais 256 de uma imagem pancromática convencional.

### 2.3 Reamostragem em imagens digitais

O método do **vizinho mais próximo** é um dos métodos mais simples para reamostragem dos tons de cinza de uma imagem. Este método toma o valor de cinza das coordenadas de máquina ( $u, v$ ) inteiras mais próximas. Este método oferece a vantagem de ser muito simples computacionalmente, além de evitar alterações dos valores de brilho dos *pixels* que compõem a imagem original. Entretanto, as feições existentes na imagem de saída sofrerão um deslocamento espacial, que poderão ocasionar uma aparência de disjunção na imagem de saída (ALMEIDA, 1989).

Existem alguns métodos mais sofisticados de reamostragem que consideram os valores de alguns *pixels* que circundam um dado *pixel* na imagem de entrada para então estabelecer um número digital (ND) sintetizado para ele. A técnica de reamostragem por **interpolação bilinear** considera uma distância ponderada média

dos NDs dos quatro *pixels* mais próximos, e se constitui na realização de duas interpolações lineares. Este processo produz uma aparência de homogeneização na imagem reamostrada, mas pelo fato de alterar o valor de brilho da imagem original, poderão ocorrer problemas nas posteriores análises dos dados, sendo recomendada uma classificação da imagem antes da reamostragem (RICHARDS, 1986).

Uma reamostragem ainda mais aperfeiçoada pode ser realizada pela método da **convolução cúbica**, onde o *pixel* reamostrado tem por base uma vizinhança de 9 *pixels*. Este método evita a aparência de desarticulação que pode ocorrer no método do vizinho mais próximo, e resulta em uma ligeira suavização na imagem resultante, maior do que a observada no método da interpolação bilinear, e também altera o nível de brilho da imagem original (RICHARDS, 1986).

## 2.4 Retificação de imagens digitais

Segundo Wolf (1983), retificação é o processo de geração de uma fotografia vertical equivalente à uma foto negativa inclinada. O produto resultante deste processo é chamado de foto retificada, que teoricamente são fotografias verdadeiramente verticais, e como tal, estão livres de deslocamentos devido à inclinação. Vale ressaltar que estas imagens não estão livres das distorções causadas pelos deslocamentos devido ao relevo, e que estas distorções somente são minimizadas através da retificação diferencial (ortoretificação), ver item 2.7.

Anterior ao processo de retificação, é necessário que se realize o cálculo dos parâmetros de orientação exterior. Segundo Andrade (1998), a orientação exterior permite a recuperação da posição e atitude de cada foto segundo um referencial terrestre – geralmente aquele no qual se pretende realizar o trabalho fotogramétrico.

Ainda, segundo Andrade (1998), uma aerofoto está externamente orientada (segundo um referencial adotado), quando são conhecidas as três coordenadas  $X_0$ ,  $Y_0$ ,  $Z_0$  do ponto de onde foi tomada (centro perspectivo), bem como os três ângulos ( $\omega$ ,  $\phi$  e  $\kappa$ ) que definem a atitude da câmara no instante da tomada da foto. Esses ângulos são chamados de ângulos de Euler e representam rotações sobre os eixos X, Y e Z respectivamente. Estes ângulos aplicados ao sistema fotogramétrico fazem-no paralelo ao sistema de terreno, da mesma maneira que, aplicado ao sistema de terreno fazem-no paralelo ao fotogramétrico.

Para realização da Orientação Exterior, também chamada de Resseção Espacial para o caso de apenas uma foto, o modelo matemático utilizado é a equação de colinearidade.

Segundo Lugnani (1987), a equação de colinearidade é o modelo matemático que relaciona coordenadas nos espaço imagem e espaço objeto. Ela é deduzida com base na condição de que: centro perspectivo, ponto imagem e ponto objeto pertencem a uma reta, obedecendo assim ao princípio de colinearidade. Elas podem ser utilizadas tanto na forma direta quanto inversa.

A figura 2.1 apresenta o princípio da equação de colinearidade, no qual pode-se observar que o centro perspectivo (CP), o ponto objeto (P) e o ponto imagem (p) são colineares.

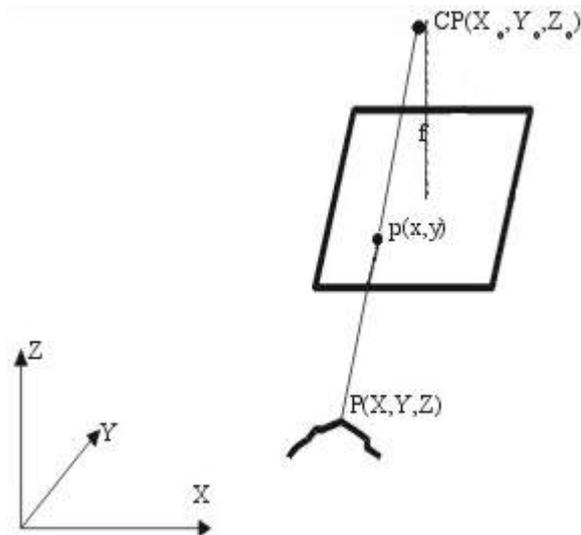


Figura 2.1 - Princípio de Colinearidade

A equação de Colinearidade direta é dada em (LUGNANI, 1987), como:

$$x = -f \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{12}(Y - Y_0) + r_{13}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \quad (2.1)$$

$$y = -f \frac{r_{21}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{23}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

onde,

- $r_{ij}$ ,  $1 \leq i \leq 3$  e  $1 \leq j \leq 3$  : são os elementos da matriz de rotação R em função dos ângulos  $\omega$ ,  $\varphi$  e  $\kappa$ ;
- x e y são as fotocoordenadas refinadas dos pontos na imagem (diapositivo);
- f é a distância focal calibrada da câmara;
- X, Y e Z são as coordenadas do ponto no sistema de coordenadas do espaço objeto (sistema de terreno);
- $X_0$ ,  $Y_0$  e  $Z_0$  são as coordenadas do centro perspectivo, no sistema de coordenadas do espaço objeto.

A matriz R é mostrada como segue:

$$R = \begin{bmatrix} \cos\varphi\cos\kappa & -\cos\varphi\sin\kappa & \sin\varphi \\ \cos\omega\sin\kappa + \sin\omega\sin\varphi\cos\kappa & \cos\omega\cos\kappa - \sin\omega\sin\varphi\sin\kappa & -\sin\omega\cos\varphi \\ \sin\omega\sin\kappa - \cos\omega\sin\varphi\cos\kappa & \sin\omega\cos\kappa + \cos\omega\sin\varphi\sin\kappa & \cos\omega\cos\varphi \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

A resseção espacial de uma foto consiste em calcular os parâmetros de orientação exterior da câmara, a partir das:

- fotocoordenadas de n pontos;
- coordenadas destes mesmos pontos no espaço objeto;
- distância focal calibrada;
- valores aproximados dos elementos de orientação exterior.

Na verdade deve-se calcular correções a estes parâmetros, uma vez que já se dispõe de valores aproximados para os mesmos (LUGNANI, 1987).

A imagem retificada é obtida transferindo valores de brilho de uma imagem digital para uma malha fina e regular, que representa um sistema de coordenadas 3D com a coordenada Z constante. A figura 2.2 representa o processo de geração de uma foto retificada.

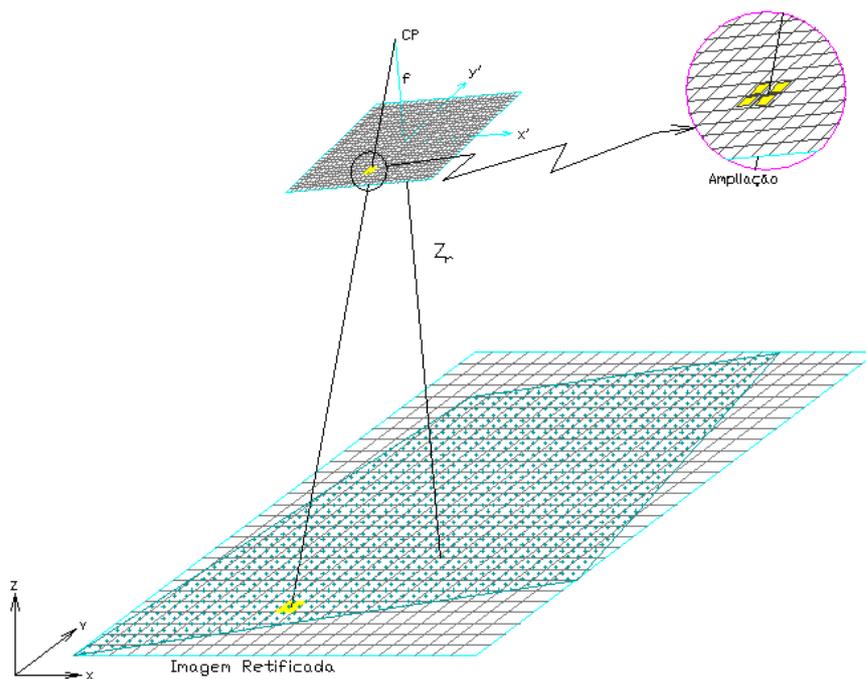


Figura 2.2 - Modelo de geração de imagem retificada

A geração da imagem digital retificada pode ser realizada através de dois métodos: direto e indireto, de forma semelhante ao da produção de ortofoto.

O método direto consiste, inicialmente, em projetar os *pixels* da imagem de entrada para a retificada aplicando-se as correções de erros sistemáticos na equação de colinearidade inversa (equação 2.3).

$$\begin{aligned}
 X &= X_o - \frac{r_{11} x_0 + r_{21} y_0 - r_{31} f}{r_{13} x_0 + r_{23} y_0 - r_{33} f} (Z - Z_o) \\
 Y &= Y_o - \frac{r_{12} x_0 + r_{22} y_0 - r_{32} f}{r_{13} x_0 + r_{23} y_0 - r_{33} f} (Z - Z_o)
 \end{aligned}
 \tag{2.3}$$

Analogamente a ortofoto pode-se identificar três etapas no método direto (ALMEIDA, 1989):

- a) transformação do referencial da imagem digital para o referencial fotogramétrico;
- b) transformação do referencial fotogramétrico para o referencial da imagem retificada;
- c) reamostragem da malha da imagem retificada.

Já o método indireto consiste, inicialmente, em projetar os *pixels* da imagem retificada para a imagem digital, através da equação de colinearidade direta, e um processo “inverso” de correção de erros sistemáticos. Em outras palavras, é necessário introduzir todos os erros sistemáticos para encontrar, na imagem bruta de entrada, a posição correta do ponto projetado.

Entretanto, é usual realizar na prática apenas a transformação do referencial fotogramétrico para o fiducial (translação do ponto principal), e deste para o digital (coluna e linha) utilizando-se da transformação afim. Posteriormente, é necessário aplicar algum método de interpolação de tons de cinza.

O método indireto é, portanto, composto por três etapas:

- a) transformação de *pixels* do referencial da imagem retificada para o referencial fotogramétrico;
  - b) transformação do referencial fotogramétrico para o referencial da imagem digital;
- reamostragem radiométrica.

## 2.5 Calibração de câmaras digitais

De acordo com Andrade e Olivas (1981), a calibração de câmaras consiste na determinação do grupo de parâmetros inerentes às câmaras que reconstroem os feixes de luz.

### 2.5.1 Métodos de Calibração

Segundo Andrade (1998), os métodos de calibração podem ser agrupados em métodos de laboratório e métodos de campo, da seguinte maneira:

#### Métodos de laboratório

- Método do Multicolimador
- Método do Goniômetro

#### Métodos de campo

- Método Estelar
- Método dos Campos Misturados
- Métodos das Câmaras Convergentes
- US Q-28 Geodetic Sub-system
- Método “*Off Wing*”

Os métodos de laboratório para calibração de câmaras são métodos que apresentam condições controladas não representando a situação real de operação

da câmara. O método do Multicolimador utiliza um conjunto de colimadores num arranjo angular conhecido e preciso. O Método do Goniômetro difere do Método dos Multicolimadores apenas na utilização do equipamento (ANDRADE, 1998).

Os métodos de campo são métodos que se utilizam de dados que condizem com a realidade permitindo uma solução mais completa, pois todos os parâmetros são recuperados no processo de calibração, podendo, ainda, fornecer uma superabundância de observações, tornando possível um controle estatístico rigoroso do processo (ANDRADE, 1998). Para não fugir do escopo deste trabalho, serão comentados apenas os métodos dos campos misturados e das câmaras convergentes.

O método dos campos misturados fundamenta-se na quebra da correlação entre pares de parâmetros através do ajustamento simultâneo das observações fotogramétricas realizadas sobre um campo de testes plano e outro montanhoso. A correlação ocorre quando a altura de vôo ( $Z-Z_0$ ) é constante onde esta é quebrada com o método descrito acima, (ANDRADE, 1998).

Ainda na perspectiva de Andrade (1998), o método das câmaras convergentes é um método bastante robusto, de difícil adequação prática para câmaras fotogramétricas, mas fácil para câmaras terrestres. Este método parte do princípio da quebra da dependência linear através das fotografias convergentes. As condições mínimas para calibração de uma câmara por este método são: a obtenção de três fotos, duas convergentes entre si em  $90^\circ$  e pelo menos uma com giro de  $90^\circ$  em relação às outras.

### 2.5.2 Modelo matemático para calibração

Para o processo de calibração faz-se necessário um modelo matemático que represente de maneira satisfatória a realidade do processo de formação da imagem fotográfica. O modelo funcional adotado para esta calibração baseia-se nas equações de colinearidade, acrescidas de alguns parâmetros adicionais (LUGNANI, 1987).

Segundo Galo et al. (1999), as funções expressas pelas equações de colinearidade originais (2.1) fazem o mapeamento de um ponto  $P(X,Y,Z)$  do espaço objeto para o espaço imagem  $p(x,y)$ . Nessa equação considera-se um caso ideal onde não são levadas em conta as distorções provocadas pelo sistema de lentes, etc. Designando as coordenadas observadas no sistema de máquina, transformadas para o sistema fiducial, por  $(x',y')$ ,  $(x_0,y_0)$  as coordenadas do ponto principal no sistema fiducial e  $(\Delta x,\Delta y)$  as funções capazes de modelar as distorções em  $x$  e  $y$  respectivamente, pode-se escrever:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Reescrevendo as equações expressas em (2.1), incorporando o resultado da equação (2.4) obtém-se:

$$\begin{aligned} x' &= x_0 + \Delta x - f \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{12}(Y - Y_0) + r_{13}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \\ y' &= y_0 + \Delta y - f \frac{r_{21}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{23}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \end{aligned} \quad (2.5)$$

As equações utilizadas na calibração de câmara são mostradas na tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Modelos utilizados para a modelagem dos erros sistemáticos.

Componentes da Distorção	Parâmetros	Modelo matemático
Radial Simétrica ( $\delta x_r, \delta y_r$ )	$K_1, K_2$ e $K_3$	$\delta x_r = (x' - x_0)(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6)$ $\delta y_r = (y' - y_0)(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6)$
Descentrada ( $\delta x_d, \delta y_d$ )	$P_1$ e $P_2$	$\delta x_d = P_1(r^2 + 2(x' - x_0)^2) + 2P_2(x' - x_0)(y' - y_0)$ $\delta y_d = P_2(r^2 + 2(y' - y_0)^2) + 2P_1(x' - x_0)(y' - y_0)$
Afinidade* ( $\delta x_a, \delta y_a$ )	A e B	$\delta x_a = A(x' - x_0)$ $\delta y_a = B(y' - y_0)$

$$r = \sqrt{(x' - x_0)^2 + (y' - y_0)^2}$$

Fonte: Galo et al. (1999).

Deste modo, o modelo de erro pode ser finalmente escrito como:

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta x_r \\ \delta y_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta x_d \\ \delta y_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta x_a \\ \delta y_a \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Deve-se ressaltar que a influência dos parâmetros que modelam a distorção descentrada ( $P_1$  e  $P_2$ ) são de pequena magnitude, quando comparado com os demais erros sistemáticos. Por esta razão eles não foram considerados neste trabalho (GALO et al., 1999). Também não foram considerados os:  $K_2$ ,  $K_3$ , A e B.

## 2.6 Ortofotos digitais

Segundo Arruda e Hasegawa (2000), adaptado de Almeida (1989), o princípio da produção de ortofoto digital consiste em transferir tons de cinza de uma imagem aérea digital para uma malha fina e regular, que representa a projeção ortogonal do terreno, ou seja, as coordenadas planas da ortofoto. Para isto são necessários: a imagem digital da área, os valores das orientações interior e exterior e o modelo digital do terreno na forma de uma malha regular.

A produção de ortofoto digital pode ser realizada através de dois métodos: direto e indireto.

O método direto consiste, inicialmente, em projetar os *pixels* da imagem de entrada para a ortofoto digital aplicando-se as correções de erros sistemáticos através da equação de colinearidade inversa, gerando uma malha irregular no referencial da ortofoto digital, ver figura 2.3.

Pode-se, então, identificar três etapas no método direto (ALMEIDA, 1989):

- Transformação do referencial da imagem digital para o referencial fotogramétrico;
- Transformação do referencial fotogramétrico para o referencial da ortofoto digital;
- Reamostragem da malha da ortofoto digital.

Já o método indireto consiste, inicialmente, na busca dos *pixels* da ortofoto digital na imagem digital original, através da equação de colinearidade direta, e um processo “inverso” de correção de erros sistemáticos. Em outras palavras, é necessário introduzir todos os erros sistemáticos para encontrar, na imagem bruta de entrada, a posição correta do ponto projetado. Posteriormente, é necessário

aplicar algum método de interpolação de tons de cinza, pois os *pixels* da malha regular da ortofoto digital, não necessariamente, possuem posição correspondente ao centro de um *pixel* na imagem de entrada.

Este método é, portanto, composto por três etapas:

- Transformação de *pixels* do referencial da ortofoto digital para o referencial fotográfico;
- Transformação do referencial fotográfico para o referencial da imagem digital, utilizando-se a posição altimétrica do ponto na ortofoto através do MDT;
- Reamostragem radiométrica.

O método indireto realiza, em relação ao método direto, um processo inverso para transferência dos tons de cinza da imagem de entrada para a ortofoto digital.

A segunda etapa deste método corresponde à primeira etapa do método direto, só que agora é realizado no sentido “inverso” permitindo a transformação dos *pixels* projetados do referencial fotográfico para o referencial da imagem digital. Como mostra a figura 2.4, o resultado das 2 primeiras etapas é uma malha irregular, a qual não coincide com a malha regular da imagem de entrada.

A terceira etapa deste método consiste na reamostragem dos *pixels* da ortofoto digital.

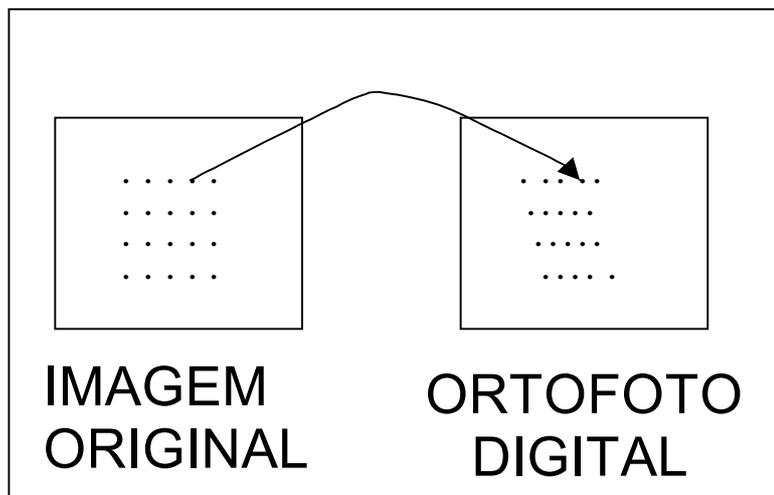


Figura 2.3 - Princípio do método direto.

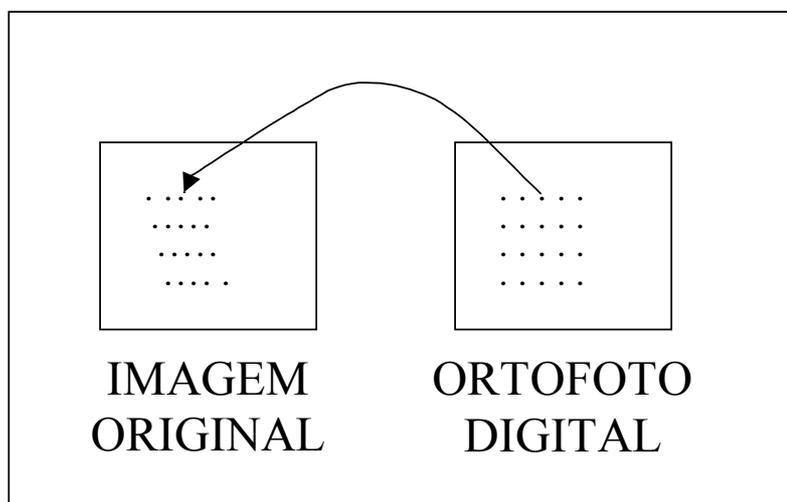


Figura 2.4 - Princípio do método indireto.

As transformações geométricas utilizadas para as mudanças de sistemas de coordenadas no método indireto, podem ser realizadas de duas maneiras: Ponto por Ponto (“*Pixel by Pixel*”); Pontos Âncora (“*Anchoir Points*”).

No método ponto por ponto, a densificação do MDT de uma malha pouco densa, para uma malha que coincida com cada posição da ortofoto, é realizada antes dos cálculos da equação de colinearidade e da transformação afim, fazendo com que todos os cálculos sejam realizados para todas as posições da ortofoto.

Já na transformação geométrica por Pontos Âncora, os cálculos que envolvem a equação de colinearidade e a transformação afim, são realizados apenas nos Pontos Âncora, onde, estes são pontos que delimitam uma célula da malha regular pouco densa do MDT. Os valores para cada posição do MDT são interpolados em seguida, economizando assim grande esforço computacional.

## 2.7 Mosaicos

Segundo Wolf e Dewitt (2000), se uma única foto não contém cobertura suficientemente extensa para servir como um fotomapa de uma área, um mosaico aéreo pode ser preparado. Tradicionalmente, os mosaicos têm sido construídos manualmente de fotografias impressas em papel fotográfico, mas recentemente, mosaicos digitais estão sendo preparados de fotografias digitalizadas através de *Scanners* e imagens obtidas diretamente de câmaras digitais. Tanto manual como digital, os mosaicos são construídos a partir de um bloco de fotografias com superposição, as quais são devidamente aparadas e unidas. Um tipo especial de mosaico digital, conhecido como ortomosaico, é obtido a partir de imagens retificadas diferencialmente. Este produto é bem mais complexo do que um simples mosaico e será comentado no item 2.9.

Wolf e Dewitt (2000), diz que os mosaicos aéreos geralmente são divididos em três classes: **controlados**, **semi-controlados** e **não controlados**. A seguir serão comentados cada um dos tipos mencionados acima:

**Mosaico controlado** é o mais acurado das três classes. No processo manual, estes tipos de mosaicos são preparados a partir de fotografias que podem ser retificadas, isto é, todas as impressões são realizadas equivalentes a fotografias verticais, as quais têm a mesma escala nominal. Na montagem do mosaico, as posições das feições imageadas, comuns nas fotos adjacentes, são emparelhadas o mais próximo possível. Para o aumento da acurácia global da montagem, um arranjo de pontos de controle é preparado para a mesma escala como as fotos retificadas. Então, no processo de concatenação das várias fotos para formar o mosaico, os pontos de controle nas imagens são também sobrepostos com os seus correspondentes pontos de controle marcados para restringir a posição das fotos. Mosaicos digitais controlados têm características similares, mas eles são preparados por um processo analítico similar ao georreferenciamento. Ao longo das extremidades entre fotos adjacentes, as imagens de feições são alinhadas por toda extensão, embora raramente elas coincidam de uma foto para outra. Estes resíduos existem primariamente por causa do deslocamento devido ao relevo (WOLF e DEWITT, 2000).

Um **mosaico não controlado** é preparado por simples junção entre imagens de detalhes em fotos adjacentes. Não são usados pontos de controle no solo, e as fotografias aéreas não são retificadas antes de serem usadas. Mosaicos não controlados são mais fáceis e rápidos para serem preparados do que os controlados. Eles não possuem a mesma acurácia dos mosaicos controlados, mas para muitos usos qualitativos eles são completamente satisfatórios.

Os **mosaicos semi-controlados** são montados utilizando alguma combinação de especificações dos controlados e não controlados. O mosaico semi-controlado pode ser preparado, por exemplo, pelo uso de pontos de controle no solo empregando fotos que não são retificadas e planificadas. Outra combinação que pode ser usada é o uso de fotos retificadas e planificadas e não ser usados pontos de controle no solo. Mosaicos semi-controlados são uma combinação de economia e acurácia.

## **2.8 Mosaicagem de ortofotos digitais**

Segundo Andrade (1998), a mosaicagem é um passo de fundamental importância na produção de uma ortofoto de boa qualidade. Dois tipos de problemas, no entanto, podem ocorrer no momento da mosaicagem: não coincidência geométrica das feições imageadas e não continuidade radiométrica nos tons de cinza entre as imagens. O primeiro problema é resultante da fraca geometria ou a resseção não está suficientemente precisa, ou o MDT não representa bem o terreno. Quando ocorre este problema é necessário que a ortofoto seja refeita.

Ainda, segundo Andrade (1998), o segundo problema citado é passível de correção. Uma primeira solução consiste em padronizar radiometricamente as ortofotos. Segundo (GALO et al. apud SILVA; 1999), pode-se aplicar transformações lineares, utilizando como parâmetros a média e o desvio padrão dos níveis de brilho extraídos da cena completa.

Um método muito adequado para melhorar o aspecto da linha de ligação entre as ortofotos consiste em determinar o perfil das diferenças radiométricas ao longo da linha de ligação entre as ortofotos, “alisá-lo” com uma função de

aproximação e estender as correções por toda a extensão de uma das ortofotos. Quando a ortofoto é composta por mais de duas fotos, este procedimento continua possível, corrigindo-se uma ortofoto de cada vez.

## **2.9 Transformações geométricas**

As transformações geométricas são ferramentas essenciais para quem trabalha ou pretende trabalhar com desenhos e/ou imagens em ambiente computacional. Logicamente, esta afirmação aplica-se também à Fotogrametria Digital, visto que o seu trabalho é basicamente com imagens digitais.

Schenk (1999), lista alguns exemplos de utilização das transformações geométricas:

- Após a orientação interior, pode ser desejável a transformação do sistema de coordenadas da imagem para o sistema de coordenadas da foto;
- Na retificação, importante processo fotogramétrico, partindo desde a pura e simples retificação no plano até o mais complexo processo de geração de ortofotos digitais;
- Registro de imagens, que nada mais é que a transformação de uma imagem a partir de pontos de controle. Este procedimento é tipicamente utilizado para registro de imagens de satélite para mapas;
- Entre outros, pode-se salientar, a mosaicagem de imagens digitais, como produto das transformações geométricas (HOOD, 1989).

### 3 MATERIAIS e METODOLOGIA

#### 3.1 Materiais utilizados

Os recursos utilizados neste trabalho de pesquisa foram basicamente:

- 01 microcomputador Pentium II MMX 400 MHz, 128 Mb de memória RAM, 6 Gb de disco rígido;
- Par de imagens digitais (DCP00305.bmp e DCP00311.bmp), com superposição longitudinal de 80%, que fazem parte de uma seqüência de fotos extraídas com a câmara Kodak DC-210, na escala de 1:25.000, de uma área que abrange a FCT/UNESP - Campus de Presidente Prudente, (figura 3.1);
- Ambiente de implementação *Borland C++ Builder*, versão 4;
- Softwares de edição de texto e manipulação de imagens;
- *Software* implementado neste trabalho;
- Laboratório de Fotogrametria da FCT/UNESP – Campus de Presidente Prudente.



Figura 3.1 - Imagens digitais (DCP00305.bmp e DCP00311.bmp) da FCT/UNESP - Presidente Prudente, obtidas com a câmara Kodak DC-210.

### 3.1.1 Materiais utilizados no processo de calibração

- Placa de “Invar” e hastes de metal (usadas como pontos de controle sobre a placa);
- Programa de Calibração de Câmaras – CC, (GALO, 1993);
- Comparador Digital, (HASEGAWA, 1998);
- Software Gnuplot;
- Câmara digital Kodak DC 210, ver figura 3.2.

A seguir são relacionadas as especificações da câmara digital Kodak DC 210:

FONTE: Home page da Kodak. Disponível em:<<http://www.kodak.com>>.

Acesso em: 2000.

- Focal nominal equivalente a câmara de 35mm: 58.00 mm (*Zoom* máximo) e 28.00 mm (*Zoom* mínimo);
- Distância focal real: 4,4 a 8,8 mm;
- Visor Colorido: 1.8 ";
- Tipo de filme: cartão de armazenamento;
- Velocidade de abertura:  $\frac{1}{4}$  a  $\frac{1}{1000}$  s;
- Tamanho do CCD:  $\frac{2}{3}$  " – 16,933 mm no eixo x (formato físico);

- Tamanho do *pixel* (para 35 mm): 0,03038 x 0,03067 mm;
- imageamento de 35 mm x 24 mm);
- Tamanho real do *pixel*: 9 mm;
- Abertura máxima: f/4;
- Resolução geométrica do CCD: 1152 x 864 *pixels*;
- Sensibilidade: ISO 100 – ISO 400;
- Quantidade de imagens armazenadas: 42, com cartão de 10 Mb.



Figura 3.2 - Câmera digital Kodak DC 210

FONTE: Home page da Kodak.

Disponível em: <<http://www.kodak.com>>. Acesso em: 2000.

### 3.2 Metodologia para calibração da câmara

O programa de calibração utilizado neste trabalho, implementado por (GALO, 1993), utiliza como modelo funcional as equações de colinearidade acrescidas de funções capazes de modelar distorções em x e y, ver equação (2.2) do item 2.5.2.

- método de estimação empregado é o método paramétrico com injunções, podendo ser selecionados os parâmetros a serem fixados e mesmo os parâmetros a serem omitidos no processamento. Deste modo tem-se a opção de selecionar os parâmetros adequados à câmara em uso, podendo-se optar por fazer a determinação foto-variante ou bloco-variante, (GALO et al., 1999).

- Num caso genérico de duas imagens, sendo considerado o caso bloco-variante (para os parâmetros  $f$ ,  $x_0$ ,  $y_0$ ,  $K_1$ ,  $A$  e  $B$ , por exemplo), o vetor dos parâmetros ajustados seria escrito como:

$$X_a = [f \ x_0 \ y_0 \ K_1 \ A \ B \ \omega_1 \ \varphi_1 \ \kappa_1 \ X_{cp1} \ Y_{cp1} \ Z_{cp1} \ \omega_2 \ \varphi_2 \ \kappa_2 \ X_{cp2} \ Y_{cp2} \ Z_{cp2} \ X_1 \ Y_1 \ Z_1 \ \dots \ X_n \ Y_n \ Z_n]^t . \quad (3.1)$$

No caso deste trabalho, os parâmetros foram determinados para quatro imagens no modo bloco-variante.

A figura 3.3 mostra a estrutura dos arquivos do programa de calibração utilizado (CC).

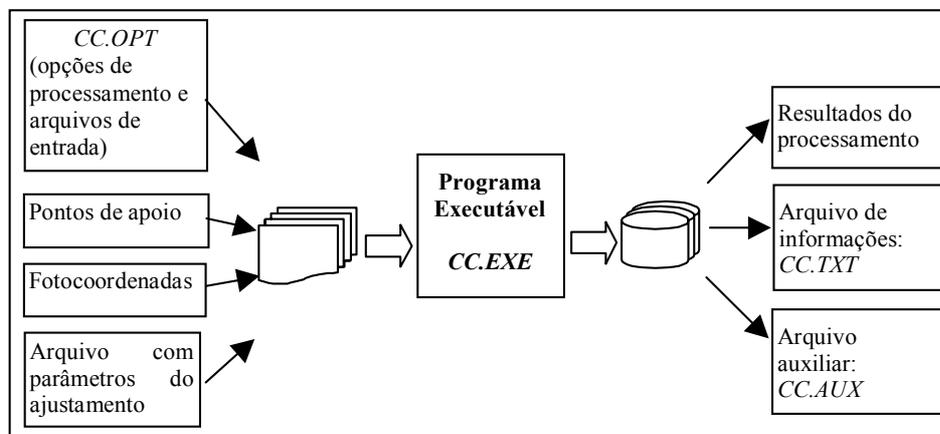


Figura 3.3 - Estrutura de arquivos utilizada no programa CC  
Fonte: (GALO et al., 1999).

### **3.3 Metodologia para retificação de imagens**

A retificação das imagens foi realizada num programa implementado por HASEGAWA, na UNESP de Presidente Prudente, utilizando-se os princípios do método indireto, cujos conceitos são apresentados no item 2.4 deste trabalho. O fluxograma da figura 3.4, mostra as etapas da retificação, incluindo os métodos direto e indireto. O método direto é mostrado apenas a título de informação, visto que neste trabalho foi apenas realizada a retificação pelo método indireto.

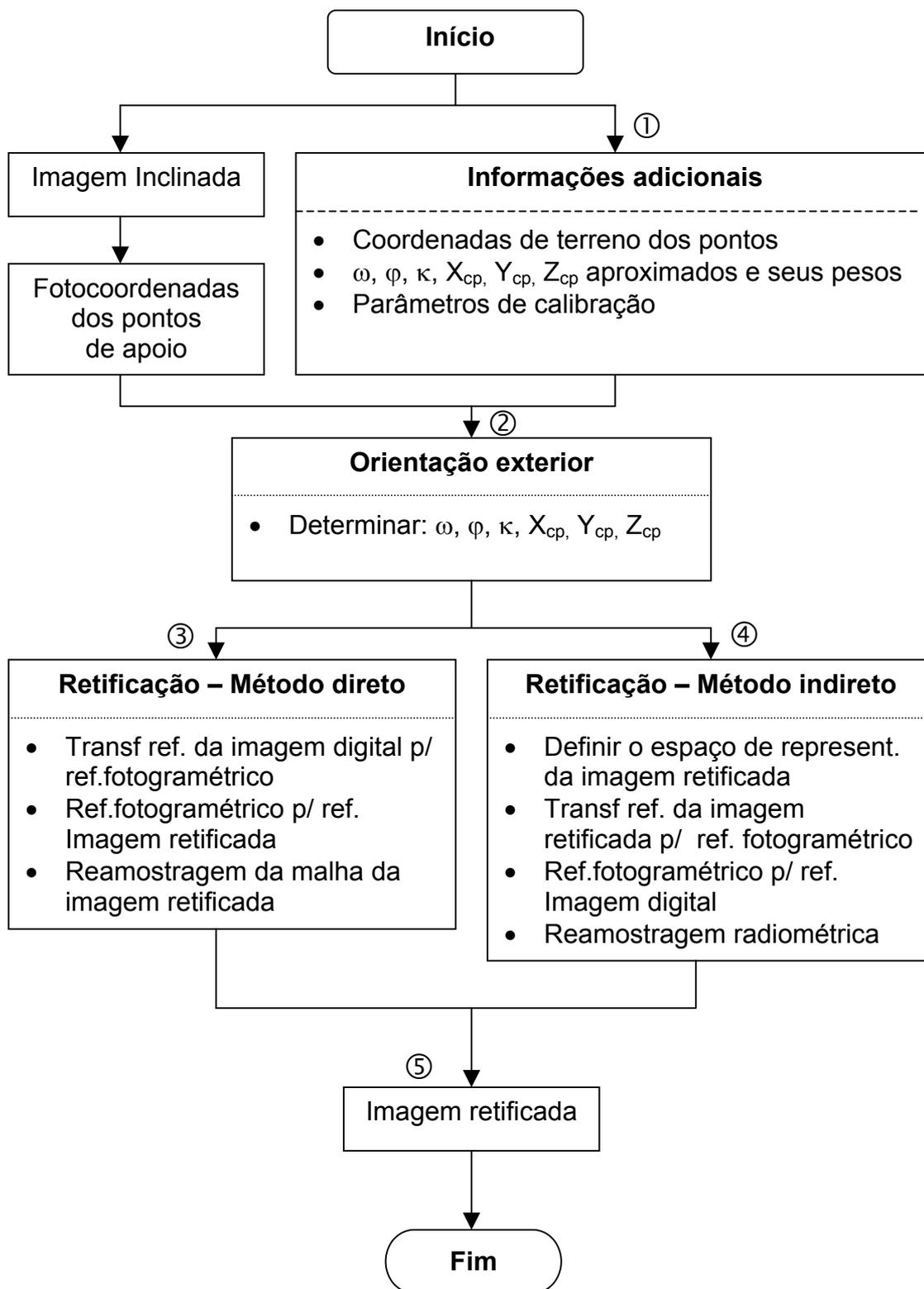


Figura 3.4 - Etapas da retificação.

A seguir cada quadro numerado no fluxograma da figura 3.4, é explicado de maneira detalhada:

- ① Além da imagem digital e das fotocoordenadas dos pontos de apoio (no sistema da imagem), faz necessário alguns dados e parâmetros para o processo de retificação:
  - Coordenadas de terreno dos pontos (sistema de referência);
  - Parâmetros aproximados de orientação da imagem ( $\omega$ ,  $\varphi$ ,  $\kappa$ ,  $X_{cp}$ ,  $Y_{cp}$ ,  $Z_{cp}$ ) e seus respectivos pesos;
  - Dados adicionais para o ajustamento: Tamanho do *pixel*, distância focal calibrada ( $f$ ), coordenadas do ponto principal ( $X_0$ ,  $Y_0$ ), deslocamento do ponto principal ( $P_1$ ,  $P_2$ ) e coeficientes de distorção radial ( $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ).
- ② Antes do processo de retificação propriamente dito, a orientação exterior deve ser realizada, para determinação dos parâmetros de orientação de cada fotografia em relação a um sistema de coordenadas de referência. Essa orientação para o caso de apenas uma fotografia é chamada de Resseção espacial. Esse processo é realizado através da equação de colinearidade, mostrada na equação (2.1) do item 2.4.
- ③ Na retificação pelo método direto, os *pixels* da imagem de entrada são projetados para a retificada aplicando-se as correções de erros sistemáticos na equação de colinearidade inversa (equação 2.3, item 2.4). O método direto pode ser dividido em três etapas básicas:

- transformação do referencial da imagem digital para o referencial fotogramétrico;

- transformação do referencial fotogramétrico para o referencial da imagem retificada;
- reamostragem da malha da imagem retificada.

④ Já no método indireto, inicialmente, faz-se necessário a definição do espaço de representação da imagem retificada, em seguida, os *pixels* são projetados da imagem retificada para a imagem original, através da equação de colinearidade direta (equação 2.1, item 2.4), através de um processo “inverso” de correção dos erros sistemáticos. Em outras palavras, é necessário introduzir todos os erros sistemáticos para encontrar, na imagem bruta de entrada, a posição do ponto projetado. Como as coordenadas obtidas estão no sistema fotogramétrico, faz-se necessário transformá-las para o sistema de tela, antes deste processo.

Em qualquer um dos dois processos de retificação, (método direto ou indireto), têm-se como resultado:

⑤ Uma imagem retificada que tem como característica principal ser uma fotografia vertical equivalente de uma fotografia inclinada. Esta apresenta-se teoricamente livre de deslocamento devido à inclinação.

### **3.4 Metodologia para mosaicagem de imagens**

A mosaicagem geométrica foi desenvolvida, partindo-se do princípio utilizado para a retificação de imagem digital e produção de ortofoto digital, enquanto a mosaicagem radiométrica seguiu o princípio de média ponderada.

Para o processo de mosaicagem de imagens, são necessários pontos de ligação, que serão utilizados na solução da transformação afim. As equações desta transformação necessitam solucionar seis (06) incógnitas, correspondentes aos parâmetros de transformação. Para isso são necessários, pelo menos, três pontos visíveis nas duas imagens (cada ponto fornecendo duas coordenadas), para que seja possível a solução destas incógnitas. Geralmente, para que o ajustamento seja realizado de maneira satisfatória, faz-se necessário a existência de observações com redundância. Por este motivo, são escolhidos mais pontos de ligação que o necessário. Estes pontos devem ser bem distribuídos nas imagens para que o resultado seja confiável.

#### **3.4.1 Mosaicagem geométrica**

A mosaicagem geométrica entre imagens digitais pode ser avaliada por dois métodos distintos: Método direto e método indireto, tendo uma leve semelhança como os métodos utilizados nos processos de retificação de imagem e produção de ortofoto, sendo que, na mosaicagem, são utilizados os recursos da transformação geométrica no espaço bidimensional.

Nos dois métodos que serão descritos a seguir (itens 3.4.1.1 e 3.4.1.2), a imagem escolhida para ser usada como referência para o mosaico (imagem 1), é

copiada na íntegra para a imagem de saída, ou mosaico (imagem 3), e os procedimentos de transformação são aplicados para a imagem a ser concatenada (imagem 2) sobre a imagem de referência, sobrepondo assim a segunda sobre a primeira, essa representação pode ser vista na figura 3.5. Informações mais detalhadas acerca dos métodos direto e indireto, consultar item 2.7, que trata dos métodos de construção de ortofotos, dos quais foram extraídos os conceitos aplicados para o processo de mosaicagem.

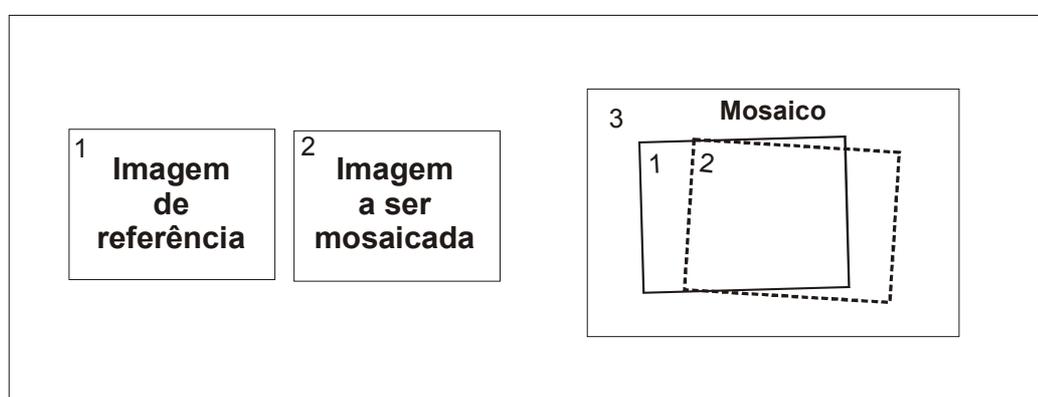


Figura 3.5 - Mosaicagem geométrica

#### 3.4.1.1 Mosaicagem pelo método direto

Inicialmente os parâmetros de transformação afim devem ser determinados, em seguida, a transformação afim inversa é aplicada para relacionar o sistema da imagem original com o sistema do mosaico e realizar o transporte dos níveis de brilho dos *pixels* da imagem original para o mosaico.

Nesse caso é necessário a realização de um processo de reamostragem no mosaico, pois os *pixels* da imagem a ser mosaicada nem sempre atingem uma posição central nos *pixels* do mosaico. Esse procedimento pode ser realizado por vários métodos, entre eles estão: vizinho mais próximo, interpolação bilinear,

convolução cúbica, entre outros. Na metodologia em questão foi utilizado o método do vizinho mais próximo, que, mesmo sendo um método bastante simples e econômico computacionalmente, atende às necessidades para o presente trabalho. Maiores detalhes sobre interpolação podem ser vistos no item 2.3.

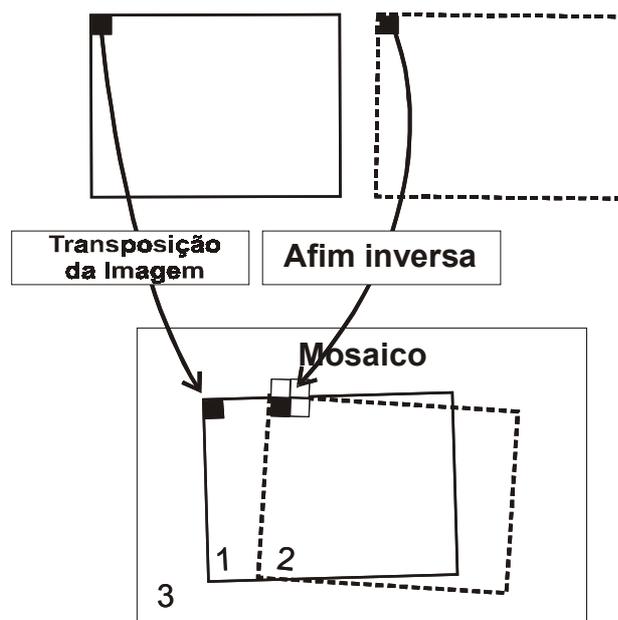


Figura 3.6 - Mosaicagem pelo método direto

O fluxograma da figura 3.7 mostra o procedimento adotado para a realização da mosaicagem geométrica pelo método direto.

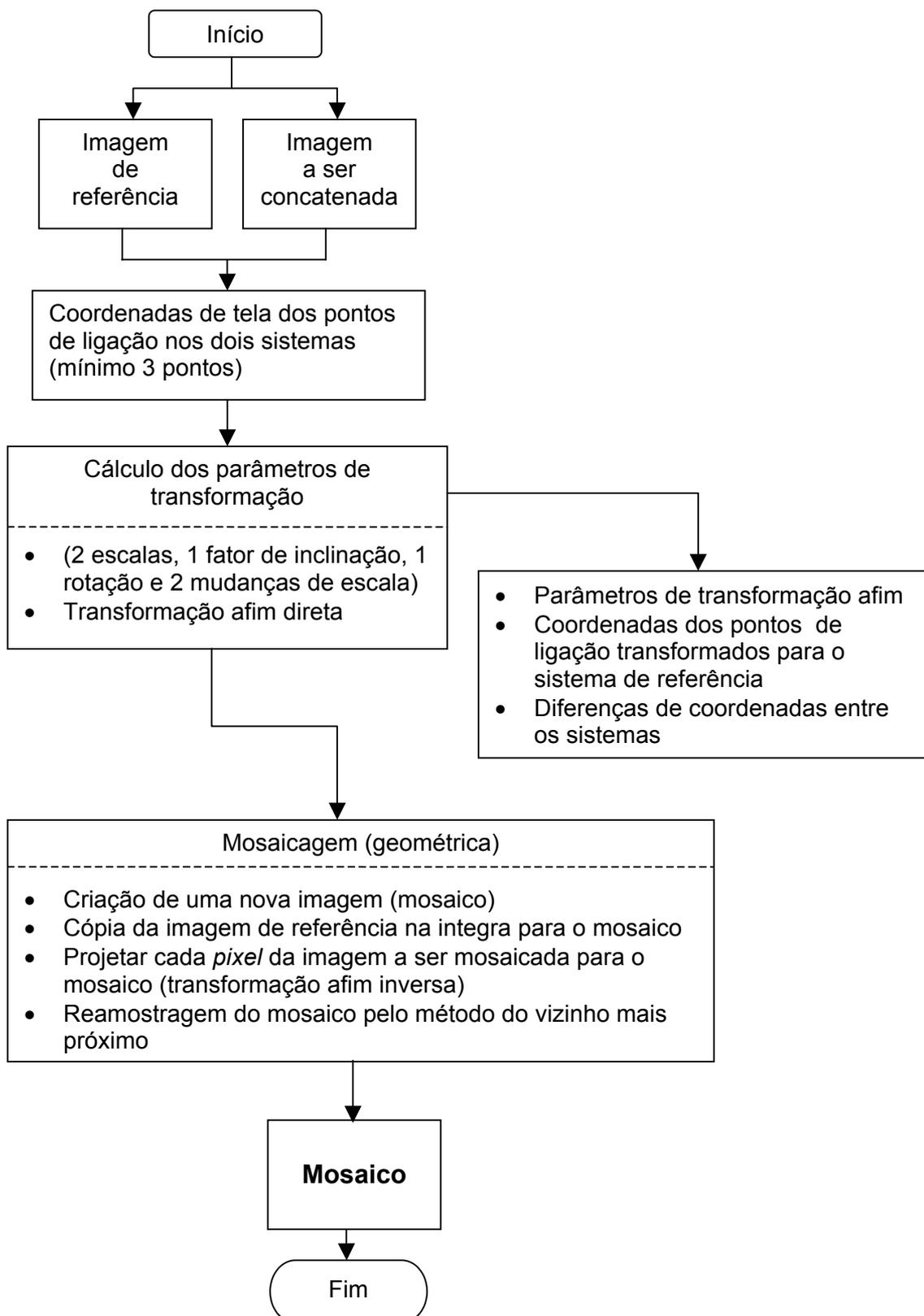


Figura 3.7 - Etapas da mosaicagem pelo método direto

### 3.4.1.2 Mosaicagem pelo método indireto

No método indireto de mosaicagem o transporte dos níveis de brilho são realizados de maneira contrária ao método direto. Partindo de cada posição de *pixel* do mosaico, encontra-se um valor de brilho, ou cor, na imagem de entrada através da transformação afim, no seu modo direto. Quando as coordenadas são determinadas pela transformação afim e a busca da sua posição é realizada no sistema da imagem de entrada, esta pode não coincidir com o centro de um *pixel*, sendo necessária a interpolação dos valores de brilho. Neste caso também foi utilizada a reamostragem pelo método do vizinho mais próximo.

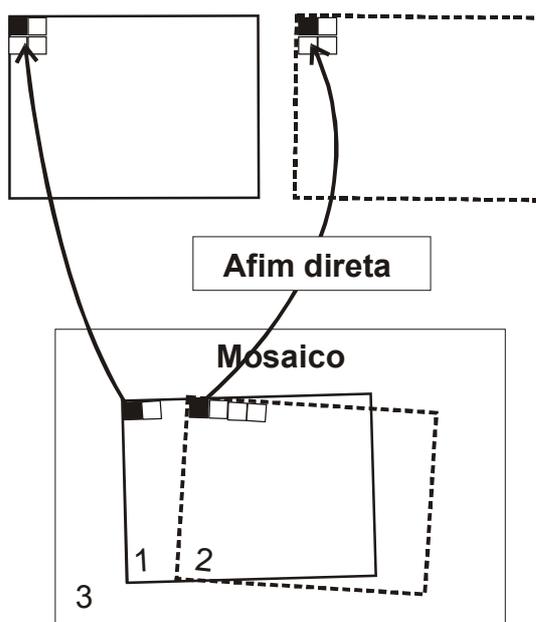


Figura 3.8 - Mosaicagem pelo método indireto

O fluxograma da figura 3.9 mostra o procedimento adotado para a realização da mosaicagem pelo método indireto.

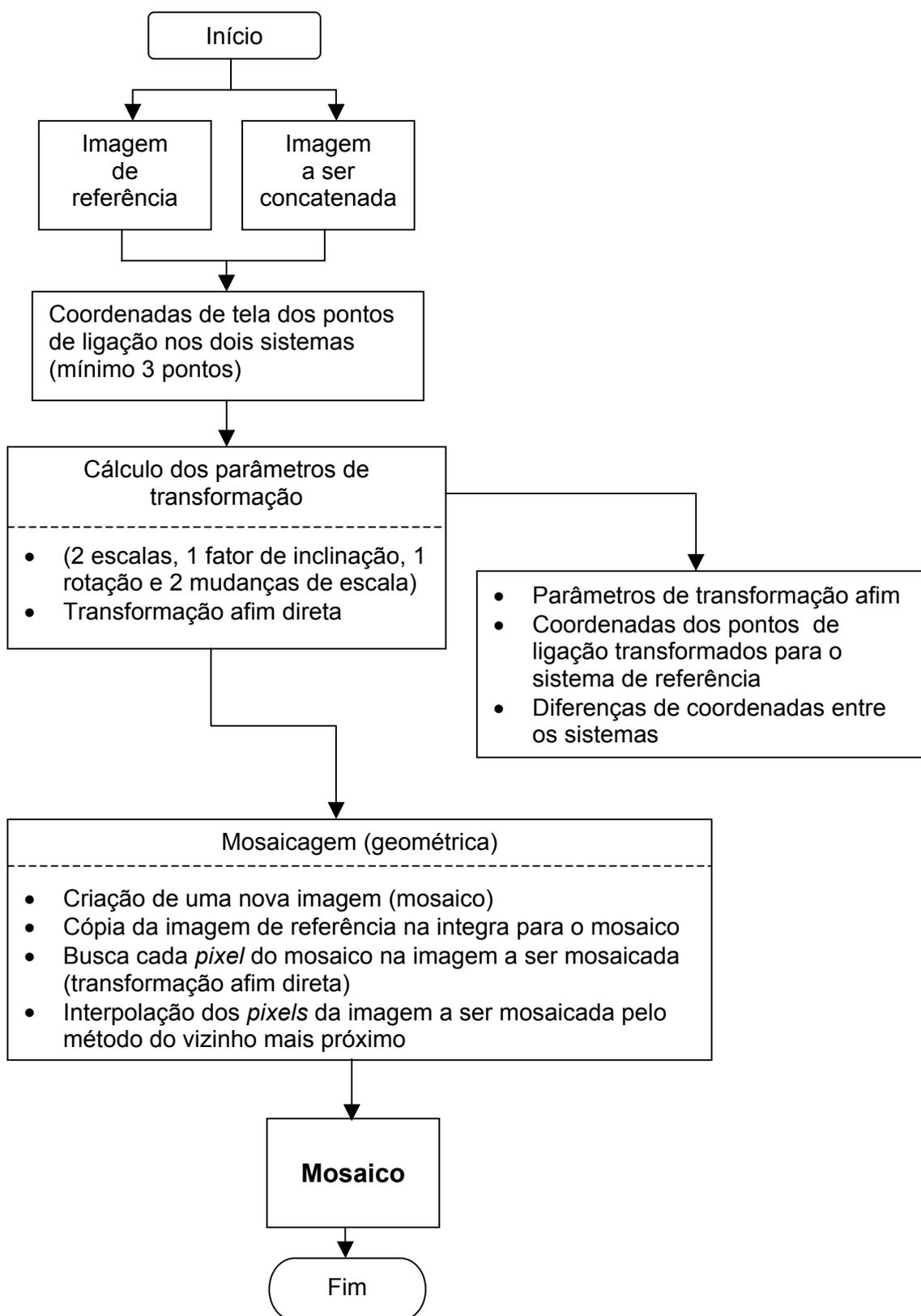


Figura 3.9 - Etapas da mosaicagem pelo método indireto

### 3.4.2 Mosaicagem radiométrica

A mosaicagem radiométrica foi realizada utilizando a transformação afim direta associada à uma correção radiométrica.

Essa metodologia utiliza os mesmos princípios da mosaicagem pelo método indireto, ou seja, utilizando as equações da transformação afim direta, acrescido da correção radiométrica sobre a área de superposição entre as duas imagens. Essa correção radiométrica pode ser considerada como uma suavização ponderada da área de superposição entre as duas imagens subseqüentes, mantendo a continuidade na concatenação entre as duas imagens. Desta forma, para cada posição do mosaico (imagem 3), é calculada uma média ponderada entre os valores de brilho das imagens de referência e da imagem a ser mosaicada (imagens 1 e 2, respectivamente).

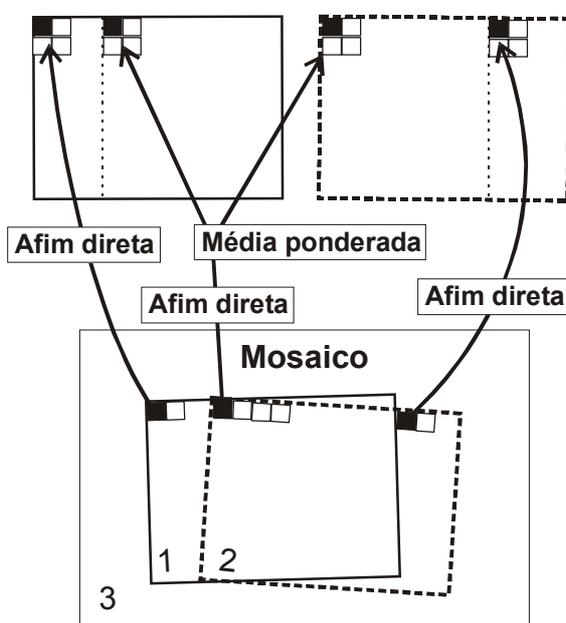


Figura 3.10 - Mosaicagem pelo método indireto com ajuste radiométrico

O critério para a ponderação é atribuir maior peso para o *pixel* da imagem mais próxima da posição do *pixel* na área de superposição e dar menor peso para o mais distante. Realizado da seguinte maneira:

- Inicialmente, é determinado o tamanho da superposição entre as duas imagens, denominado  $T$ , (figura 3.11).

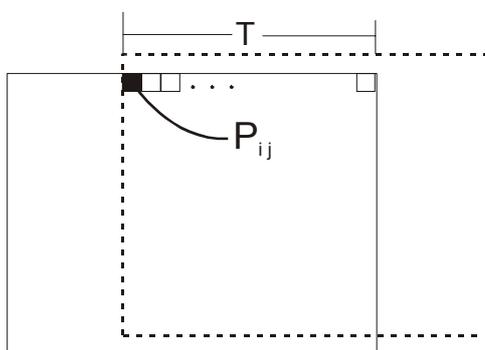


Figura 3.11 - Tamanho da superposição e variação dos *pixels* ( $P_{ij}$ )

- Na seqüência, é calculado o fator peso, que terá a função de controlar a ponderação, chamado de  $F$ , um número real que varia de 0 a 1. Exatamente no meio da superposição entre as duas imagens,  $F$  recebe o valor 0,5 e o valor de brilho sofrerá influência igual das duas imagens. O fator de peso é calculado da seguinte maneira:

$$F = \frac{P_{ij}}{T} \quad (3.2)$$

onde,

$P_{ij}$  é dado pela posição do *pixel*, que varia na extensão da superposição entre as duas imagens;

$T$  é o tamanho da superposição.

- Calcula-se então o nível de brilho para cada posição da área de superposição entre as duas imagens, da seguinte maneira:

$$B_{ij} = BE_{ij} * (F) + BD_{ij} * (F - 1) \quad (3.3)$$

onde,

$B_{ij}$  é o brilho calculado pela transformação para cada posição da área de superposição entre as duas imagens, no mosaico;

$BE_{ij}$  corresponde ao nível de brilho na imagem da esquerda correspondente à mesma posição no mosaico;

$BD_{ij}$  é o nível de brilho na imagem da direita correspondente à mesma posição no mosaico.

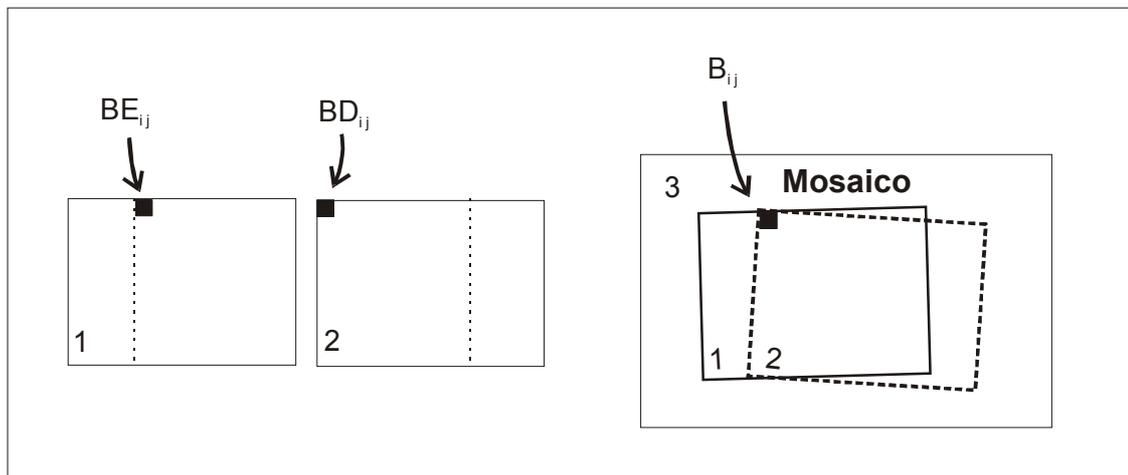


Figura 3.12 - Cálculo do nível de brilho

Na equação (3.3), os níveis de brilhos de cada posição nas imagens, são multiplicados por  $F$  e  $(F-1)$ , respectivamente, nas imagens (1 e 2), de maneira, que

tomando a área de superposição entre as duas imagens esta tenha maior influência da imagem que estiver mais próximo.

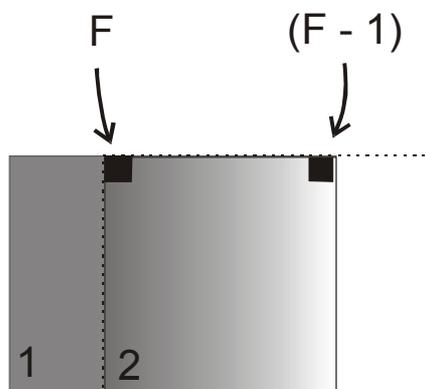


Figura 3.13 - Influência do peso na ponderação

O fluxograma da figura 3.14 ilustra as etapas do processo de mosaicagem pelo método indireto com ajuste radiométrico. A figura 3.15 mostra a mosaicagem (geométrica + radiométrica) em forma de fluxograma.

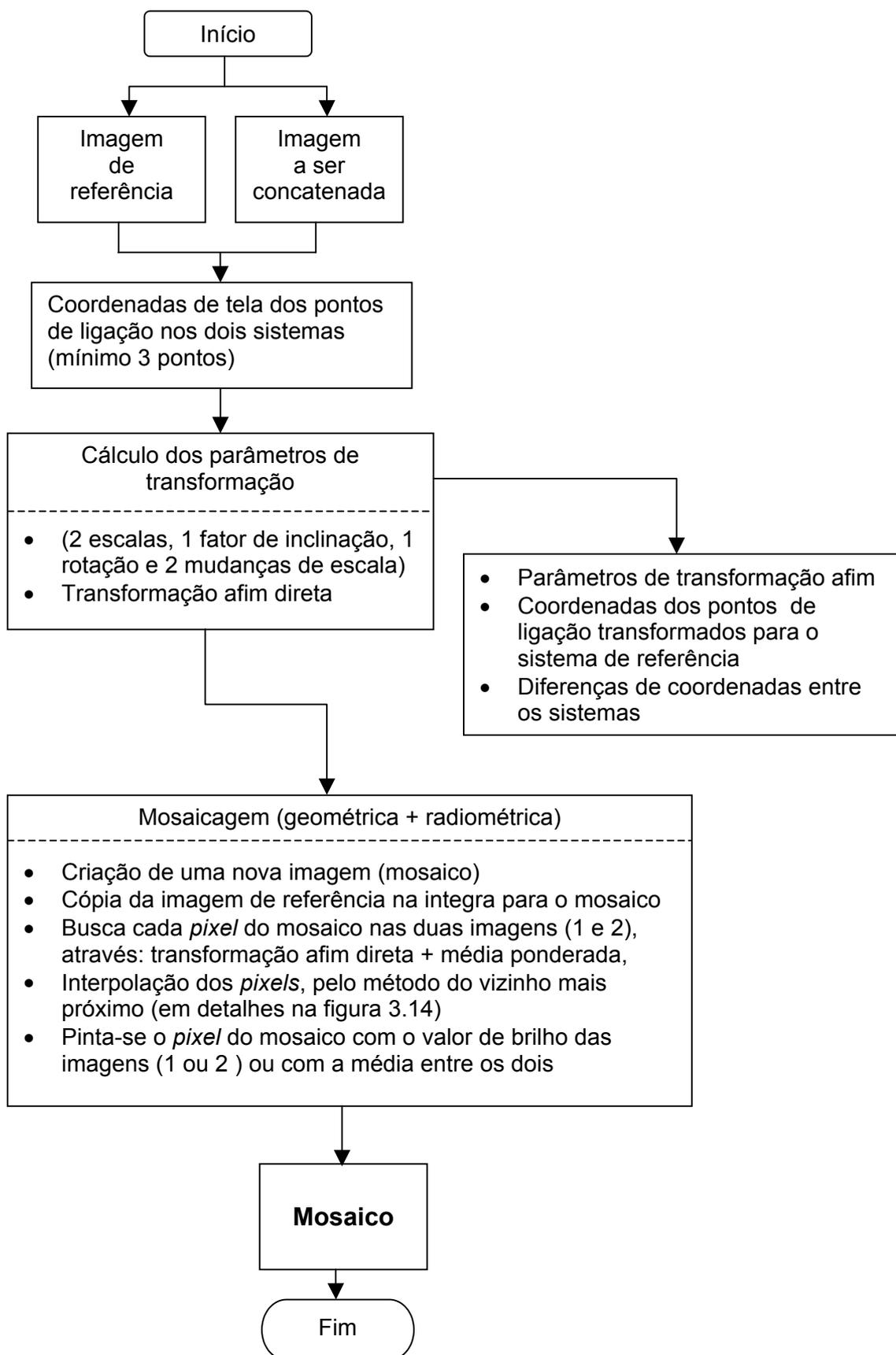


Figura 3.14 - Etapas da mosaicagem pelo método indireto com ajuste radiométrico

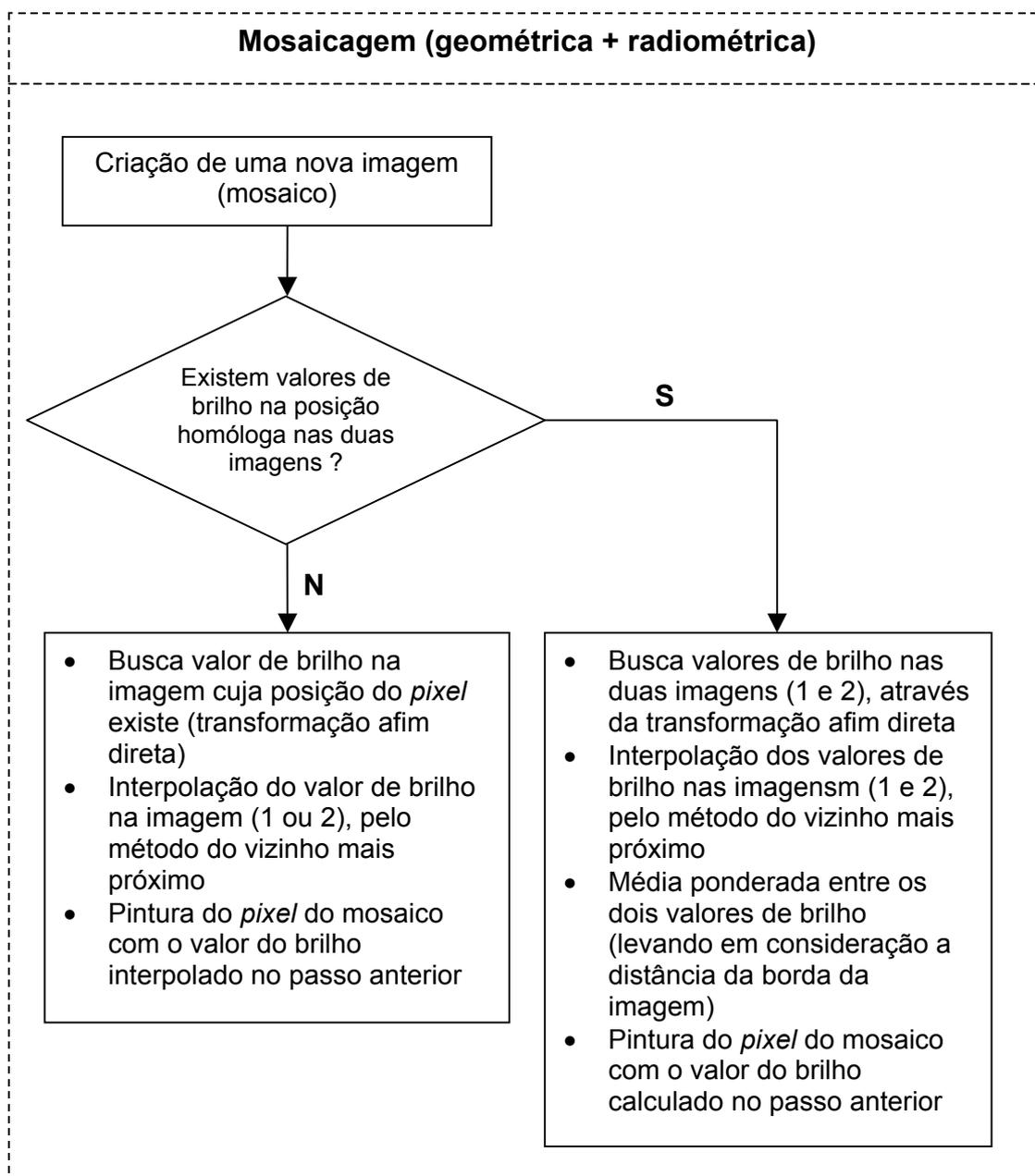


Figura 3.15 - Mosaicagem (geométrica + radiométrica) detalhada

#### 4 PROGRAMA IMPLEMENTADO (Mosaicagem)

Para os testes, fez se necessário a implementação de algumas rotinas para execução dos métodos de mosaicagem de imagens, abordados nesta dissertação. O programa **MID** (Mosaicagem de imagens digitais) foi implementado no ambiente de desenvolvimento *Borland C++ Builder*, versão 4.

Basicamente são três as rotinas desenvolvidas a partir deste trabalho:

**Mosaicagem 1:** Trata da mosaicagem de imagens aéreas digitais pelo método direto.

**Mosaicagem 2:** Trata da mosaicagem de imagens aéreas digitais pelo método indireto.

**Mosaicagem 3:** Trata da mosaicagem de imagens aéreas digitais pelo método indireto, com ajuste radiométrico entre as imagens superpostas.

As três rotinas citadas acima estão dispostas na mesma interface e estrutura de programa. A diferença entre elas está no método de mosaicagem, explicado anteriormente. A seguir, serão mostrados em detalhes, a estrutura e interface do programa implementado, cada menu e suas funções. Na figura 4.1 tem-se uma visão da tela principal do programa.

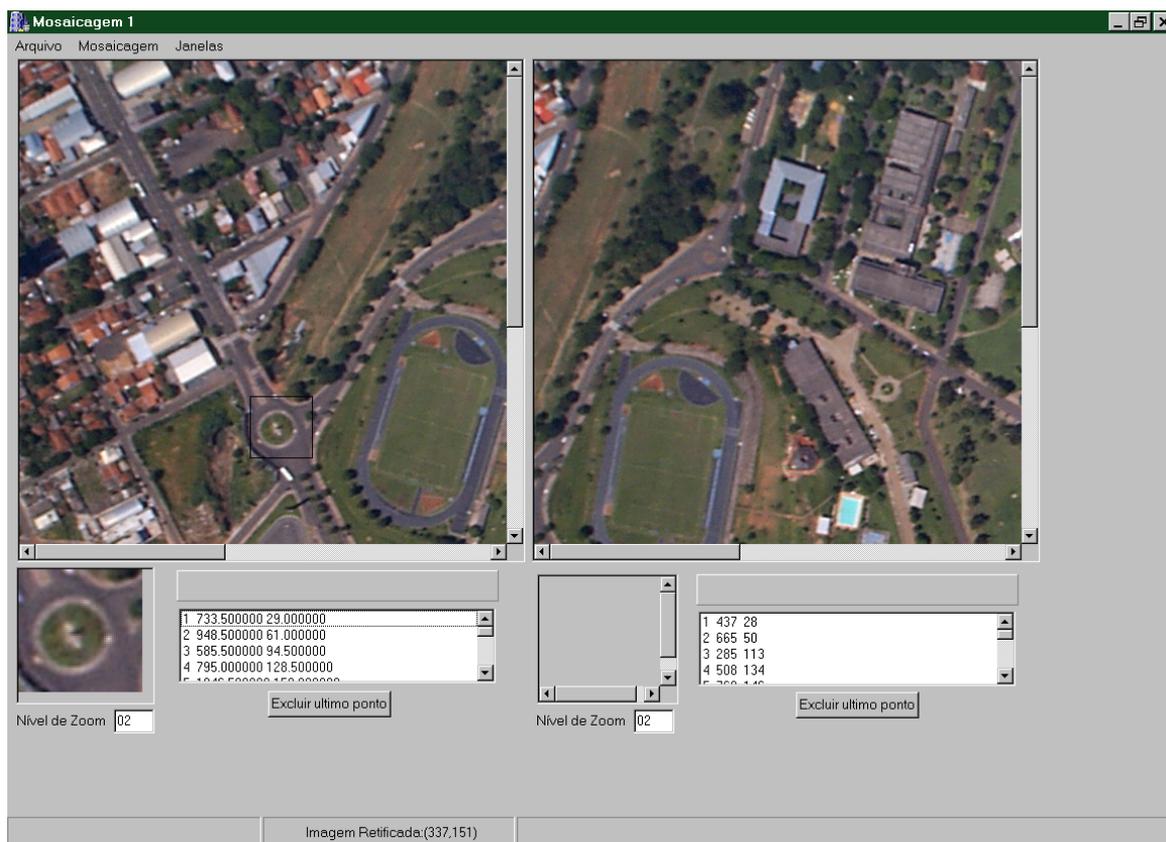


Figura 4.1 - Tela principal do programa

O fluxograma da figura 4.2 mostra de maneira clara toda estrutura do programa.

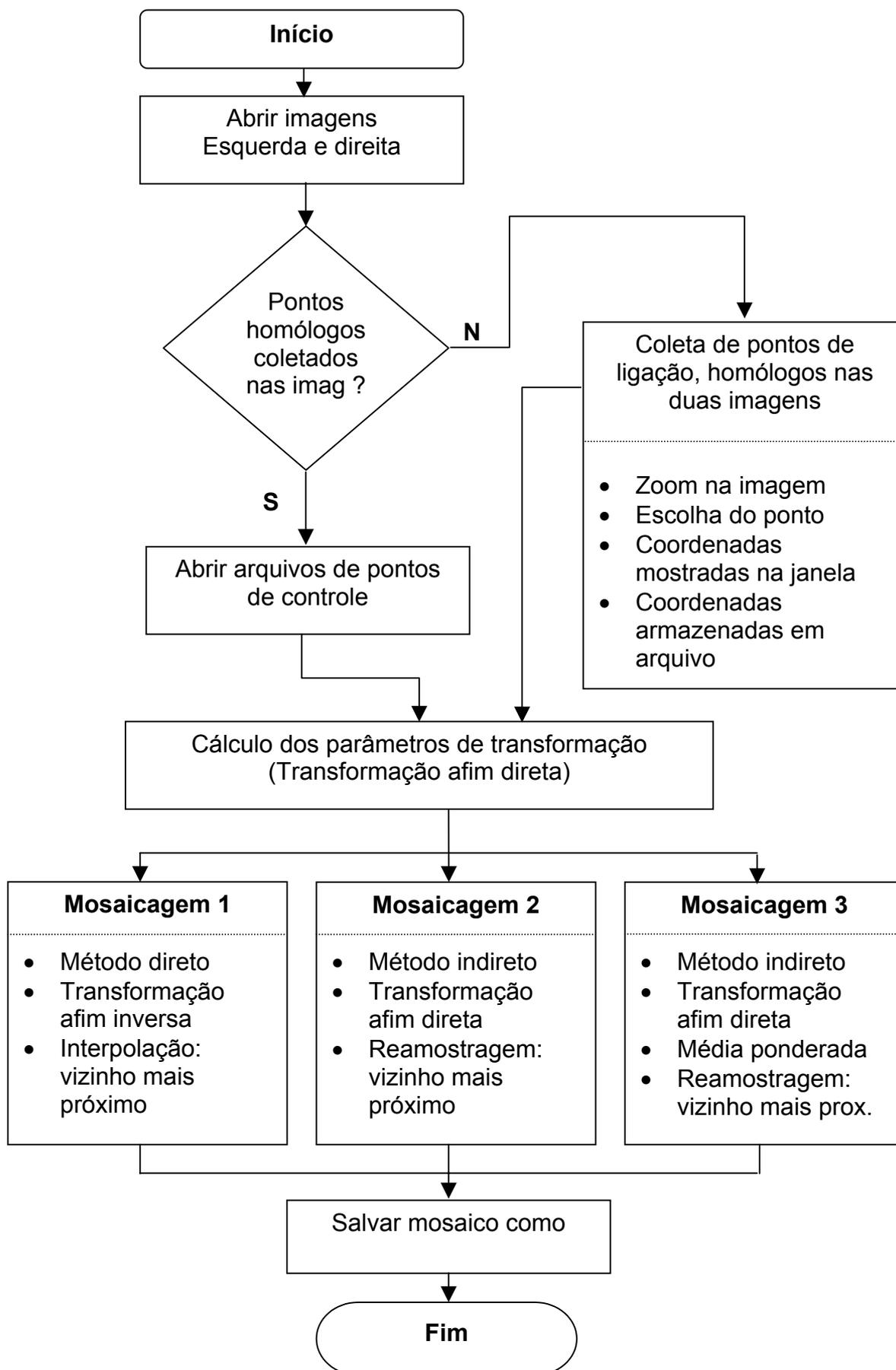


Figura 4.2 - Estrutura do programa

## 4.1 Menus de funções do programa

O programa desenvolvido possui todas as características de um *software Windows*; por isso seus menus de funções são bastante intuitivos e semelhantes a outros programas conhecidos. Cada opção de menu carrega em seu próprio nome, a função nele contida.

O menu principal dos programas possui em cada uma das suas três opções (*Arquivo*, *Mosaicagem* e *Janelas*), sub-menus que serão explicados com detalhes na seqüência.

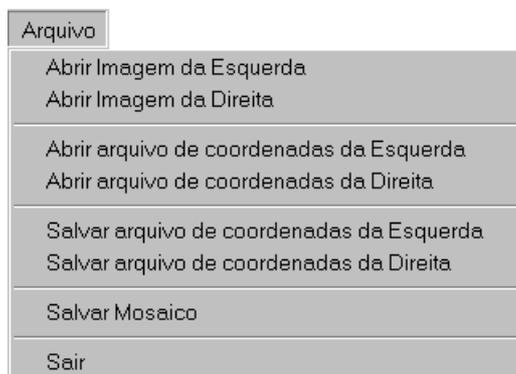


Arquivo Mosaicagem Janelas

Figura 4.3 - Menu principal dos programas

### 4.1.1 Sub-menu *Arquivo*

O sub-menu *Arquivo* exibe as seguintes opções, como mostrado na figura 4.4:



Arquivo

- Abrir Imagem da Esquerda
- Abrir Imagem da Direita
- Abrir arquivo de coordenadas da Esquerda
- Abrir arquivo de coordenadas da Direita
- Salvar arquivo de coordenadas da Esquerda
- Salvar arquivo de coordenadas da Direita
- Salvar Mosaico
- Sair

Figura 4.4 - Sub-menu *Arquivo*

Todos as opções de *Abrir* e *Salvar* deste menu, utilizam-se de caixas de diálogo como mostrada na figura 4.5, para a escolha do arquivo, no caso de imagens, arquivos com extensão BMP e no caso de coordenadas, arquivos com extensão TXT.

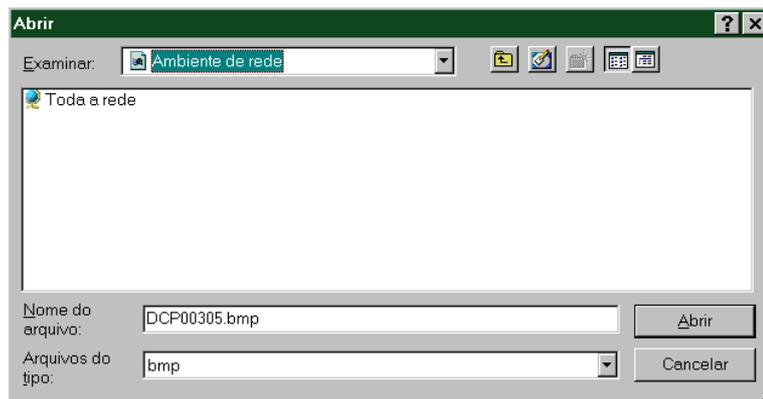


Figura 4.5 - Caixa de diálogo

Ao iniciar o programa é necessário a abertura das duas imagens, da esquerda e direita, para que possam ser iniciados os processos propostos.

Para realização da mosaicagem das duas imagens, são requeridos alguns pontos de ligação, no caso da transformação afim, no mínimo três (03) para que sejam solucionadas as equações de transformação. Se estes pontos já foram coletados em outro momento e, montados adequadamente em um arquivos TXT, então estes são abertos através das opções de *Abrir arquivo de coordenadas*, referentes as duas imagens. Caso eles ainda não tenham sido coletados, esta coleta pode ser realizada através do programa.

Os pontos coletados, são mostrados em duas janelas logo abaixo das suas respectivas imagens. Ainda, para facilitar a coleta dos pontos, uma rotina é acionada a partir da abertura de uma janela com o cursor do *mouse* sobre cada imagem, que recorta a área escolhida e a projeta com um nível de *zoom* (escolhido pelo usuário),

em uma outra janela no canto inferior esquerdo de cada imagem para facilitar a escolha do ponto.

Quando um arquivo é montado, editado, acrescido ou decrescido de algum ponto, este pode ser salvo a partir das opções de *Salvar arquivos de coordenadas*.

#### 4.1.2 Sub-menu *Mosaicagem*

Após as imagens e seus respectivos pontos de controle terem sido abertos na tela do programa, faz-se necessário o cálculo dos parâmetros de transformação, neste caso, a transformação afim.



Figura 4.6 - Sub-menu *Mosaicagem*

A opção *Transformação Afim*, mostrada acima no sub-menu *Mosaicagem*, realiza o cálculo dos parâmetros desta transformação, mostra-os na janela da figura 4.7, além de salvar o mesmo conteúdo da janela em arquivo de saída (tipo texto) para uso posterior.

Os dados mostrados na janela e salvos no arquivo de saída são: seis parâmetros da transformação afim, coordenadas de todos os pontos utilizados transformados para o sistema de referência e diferenças entre as coordenadas nos dois sistemas.

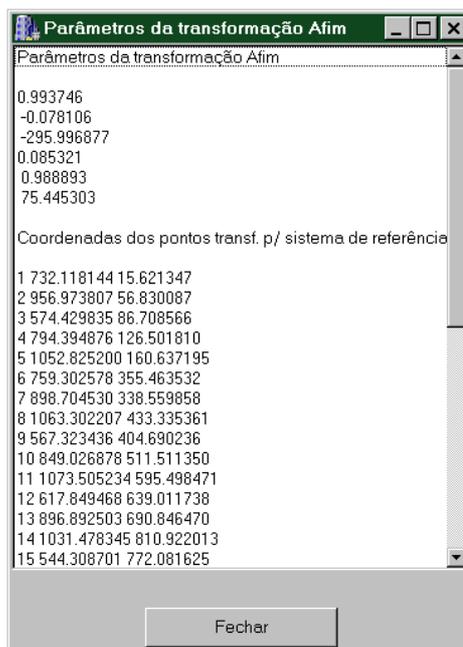


Figura 4.7 - Janela dos parâmetros de transformação

Depois de calculados os parâmetros da transformação afim, o próximo procedimento é a mosaicagem das duas imagens através da opção *Mosaicar Imagens*, disposta no sub-menu *Mosaicagem*. Este pode ser realizado por três métodos distintos, discutidos no item 3.4.

O resultado dos procedimentos de mosaicagem de as imagens é mostrado na figura 4.8. Este mosaico pode ser salvo a partir da opção *Salvar Mosaico* do sub-menu *Arquivo*, como uma imagem no formato BMP.

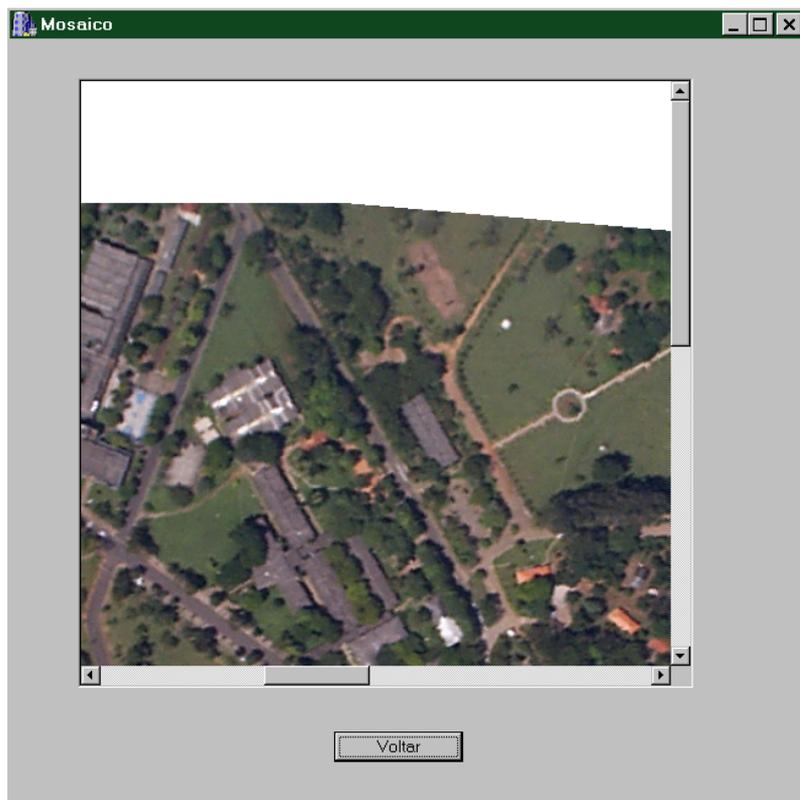


Figura 4.8 - Janela do mosaico

#### 4.1.3 Sub-menu *Janelas*

Mesmo após terem sido fechadas as janelas de parâmetros da transformação afim, quanto a que mostra o mosaico, estas podem ser visualizadas a qualquer momento através das opções: *Parâmetros da Transformação Afim* e *Mosaico* do sub-menu *Janelas*, mostrado abaixo.



Figura 4.9 - Sub-menu *Janelas*

## 5 EXPERIMENTOS

Neste capítulo são mostrados três experimentos realizados nesta pesquisa. São eles: calibração da câmara digital Kodak DC210, retificação das imagens obtidas com a câmara citada anteriormente e a mosaicagem das imagens digitais brutas e retificadas.

### 5.1 Experimentos de calibração

Com o intuito de verificar o comportamento geométrico da câmara digital DC 210 da *Kodak*, foram realizados alguns experimentos, usando como campo de testes uma placa de “Invar” com 88 pontos de apoio, distribuídos em um arranjo matricial com espaçamento de 100 mm entre as células.

Adotou-se um sistema de coordenadas arbitrário, cuja origem está situada no ponto 11 da placa de “Invar”, (figura 5.1).

Desses 88 pontos, 10 possuem altura de 145 mm, que permitem a quebra da correlação entre os parâmetros de calibração ( $f$ ,  $x_0$  e  $y_0$ ) e a posição dos centros perspectivos ( $X_{cp}$ ,  $Y_{cp}$ ,  $Z_{cp}$ ), evitando a singularidade do sistema de equações linearizadas.

Foram capturadas quatro imagens com a câmara DC 210, em posições diferentes (figura 5.2). Na figura 5.3 e na tabela 5.1 são mostradas as orientações das capturas das fotos, bem como as suas orientações.

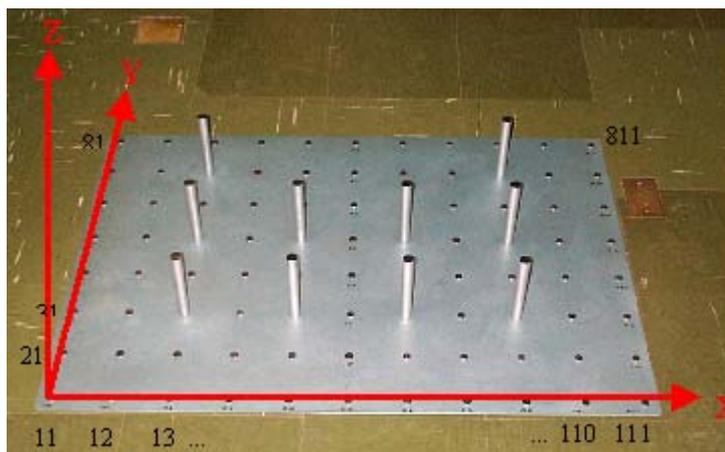


Figura 5.1 - Numeração dos pontos na placa e sistema arbitrário adotado

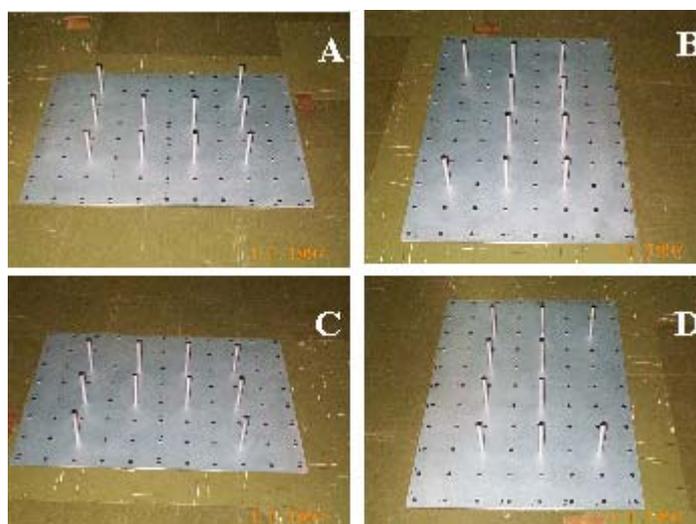


Figura 5.2 - Imagens capturadas com a câmara DC 210  
A: Foto 1, B: Foto 2, C: Foto 3 e D: foto 4

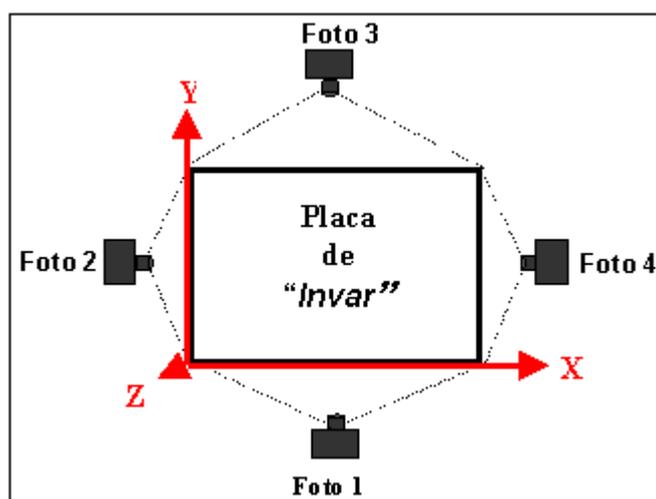


Figura 5.3 - Posicionamento da câmara em relação a placa

Na tabela 5.1 são mostrados os valores aproximados das posições do CP da câmara ( $X_{cp}$ ,  $Y_{cp}$ ,  $Z_{cp}$ ) no instante da tomada da foto bem como as suas orientações angulares aproximadas ( $\omega$ ,  $\phi$ ,  $\kappa$ ) em relação ao sistema de coordenadas arbitrário descrito acima (Figura 5.1):

Tabela 5.1 - Valores aproximados para as fotos.

FOTO	XCP (mm)	YCP (mm)	ZCP (mm)	$\omega$ (Omega) °	$\phi$ (Phi) °	$\kappa$ (kapa) °
1	500	-1200	1700	45	0	0
2	-1000	350	1700	0	-45	-90
3	500	1900	1700	-45	0	180
4	2000	350	1700	0	45	90

Após as imagens terem sido capturadas e devidamente transferidas da câmara para um micro-computador, através de interface apropriada, realizou-se a coleta das coordenadas (coluna, linha) dos pontos no espaço imagem (coordenadas da foto) para cada uma das quatro fotos. Para coleta de coordenadas, utilizou-se o Comparador Digital implementado por Hasegawa, em 1998, onde os dados são armazenados em arquivos do tipo texto, para processamento no programa de calibração CC elaborado por Galo, em 1993.

Antes de executar o processo de ajustamento das quatro fotos simultaneamente, o programa foi executado para cada foto a fim de detectar os possíveis erros grosseiros e conferir os valores aproximados dos parâmetros.

### 5.1.1 Discussão dos resultados da calibração

Os parâmetros de calibração obtidos do processo utilizado são mostrados na tabela 5.2:

Tabela 5.2 - Parâmetros de Calibração da Câmara DC 210

	VALOR	DESVIO PADRÃO	DESCRIÇÃO
<b>F</b>	53.985	+-.240	Distância focal calibrada (mm)
<b>X<sub>0</sub></b>	.0520	+-.040	Coordenada do ponto principal (Coluna 577.234)
<b>Y<sub>0</sub></b>	.643	+-.211	Coordenada do ponto principal (Linha 410.056)
<b>K<sub>1</sub></b>	-.103E-04	+-.135E-05	Coefficiente de distorção radial K <sub>1</sub>
<b>A</b>	-.576E-03	+-.421E-03	Parâmetro de afinidade
<b>B</b>	.226E-02	+-.347E-03	Parâmetro de afinidade

Também fazem parte dos resultados do programa de calibração (CC) os parâmetros de orientação da câmara ( $\omega$ ,  $\varphi$ ,  $\kappa$ ,  $X_{cp}$ ,  $Y_{cp}$ ,  $Z_{cp}$ ) para cada foto, bem como as coordenadas no espaço objeto (X, Y, Z) para cada ponto e suas respectivas precisões, que não são mostrados por fugir do escopo do trabalho.

Para visualização destes resultados utilizou-se um software chamado “*Gnuplot*” que mostra os resíduos em forma de gráficos de dispersão. Estes gráficos foram utilizados para detecção de erros grosseiros de maior magnitude. Os erros de menor magnitude foram detectados utilizando-se os resíduos gerados pelo programa de calibração, os quais foram corrigidos iterativamente.

Vale salientar que este processo de calibração foi realizado algum tempo após o vôo, podendo gerar valores não compatíveis com a realidade da câmara no momento da aquisição das fotografias a ser processadas. Outro fator a considerar, é que a distribuição das hastes sobre a placa de Invar foi concentrada na região

central da placa, podendo com este procedimento, alterar os parâmetros de calibração.

O processo utilizado para calibração neste trabalho, é a única forma de se obter parâmetros de calibração para este tipo de câmara.

Mesmo com todas estas restrições expostas, os valores encontrados neste trabalho para a distância focal calibrada e seu desvio padrão foram comparados com calibração realizada por (AMORIM, 2000), apresentando os valores ( $f=53,985$  mm com Desvio Padrão = 0.081941), valores estes, iguais para distância focal e com uma diferença de 0,16 mm para o desvio padrão, diferença não significativa para este experimento. Levando em consideração que estas calibrações foram realizadas separadamente e em épocas diferentes, os resultados mostram que os parâmetros de calibração estão bastante confiáveis e denotam um comportamento estável da câmara DC210.

## **5.2 Experimentos de retificação**

Para verificação do comportamento geométrico do processo de retificação, foram realizados alguns experimentos:

- experimentos com imagem obtida em laboratório, proporcionando melhor controle dos pontos; e
- experimentos com imagem aérea de uma área com mapeamento existente.

Para os experimentos citados anteriormente foi utilizado um programa de retificação implementado por HASEGAWA na FCT/UNESP, em Presidente Prudente. Maiores detalhes deste experimento, consultar (ARRUDA et al., 2000).

São mostradas nas Figuras 5.4 - a) e c), as imagens originais e suas respectivas imagens retificadas em b) e d). Maiores informações, como: fotocoordenadas e coordenadas de terreno dos pontos de controle, parâmetros necessários para o programa e elementos de orientação exterior das fotografias, são apresentadas no APÊNDICE A.

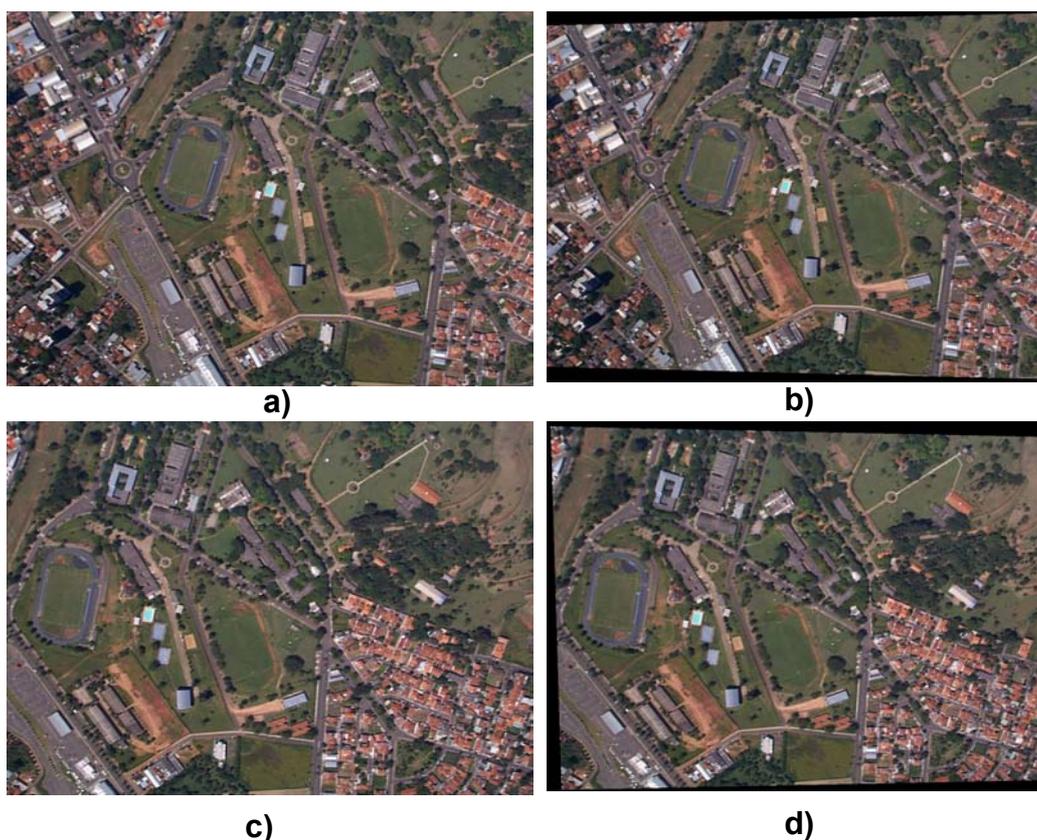


Figura 5.4 – Imagens originais e suas respectivas retificadas

### 5.3 Experimentos de mosaicagem

Para a realização destes experimentos, foi necessário a implementação de um programa através do ambiente de desenvolvimento *Borland C++ Builder*, versão 4. Este programa é explanado com detalhes no capítulo 4 desta dissertação.

O processo de concatenação entre imagens (mosaicagem), pelo método direto, método indireto e método indireto com ajuste radiométrico foram aplicados para as duas imagens digitais (DCP00305 e DCP00311), mostradas no capítulo 3. O método indireto com ajuste radiométrico ainda foi estendido para as imagens (DCP00305 e DCP00311) retificadas pelo processo descrito no item (3.4) e realizado no item (5.2) deste trabalho.

Todos os experimentos foram realizados de igual maneira e utilizando-se dos mesmos dados, dezesseis (16) pontos de ligação nas duas imagens a ser concatenadas, de maneira bem distribuídos pela área de superposição entre as duas imagens. A figura 5.5 ilustra a distribuição dos pontos de ligação.



Figura 5.5 - Distribuição dos pontos de ligação na área de superposição do mosaico

### 5.3.1 Resultados do processo de mosaicagem

Os mosaicos mostrados nas figuras 5.6 e 5.7, foram processados respectivamente pelos métodos de mosaicagem direto e indireto, onde, o direto foi realizado através das equações da transformação afim inversa e o indireto com as equações de transformação afim direta. Nestes dois experimentos, não foi trabalhado o aspecto radiométrico, somente o geométrico.



Figura 5.6 - Mosaico realizado pelo método direto



Figura 5.7 - Mosaico realizado pelo método indireto

Já os dois mosaicos mostrados nas figuras 5.8 e 5.9, receberam um tratamento que corrigiu tanto os aspectos geométricos quanto os radiométricos. Nesses mosaicos, as imagens digitais foram concatenadas através do método indireto com ajuste radiométrico, onde a mosaicagem geométrica foi realizada pela transformação afim direta e a radiométrica através da média ponderada. Esses dois procedimentos foram discutidos nos itens (3.4.1.2) e (3.4.2) respectivamente.

O mosaico da figura 5.8, foi produzido utilizando-se as imagens (DCP00305 e DCP00311) sem nenhum tipo de processamento, já o da figura 5.9, utilizou o mesmo método de processamento, mas com as imagens retificadas.



Figura 5.8 - Mosaico realizado pelo método indireto com ajuste radiométrica



Figura 5.9 - Mosaico realizado pelo método indireto com ajuste radiométrico utilizando-se imagens retificadas

### 5.3.2 Discussão dos resultados da mosaicagem

As figuras 5.6, 5.7 e 5.8, mostram respectivamente os mosaicos confeccionados a partir dos métodos direto, indireto e indireto com ajuste radiométrico. A figura 5.9 mostra um mosaico realizado pelo método indireto com ajuste radiométrico aplicado às mesmas imagens, após terem passado pelo processo de retificação. Como o método de análise dos resultados nestes casos é puramente visual, as figuras 5.10 e 5.12 mostra uma feição com ampliação de 4 vezes nas cinco (05) situações, para que possam ser analisados os detalhes:

- a) Imagem original (dcp00305.bmp);
- b) Mosaico pelo método direto;
- c) Mosaico pelo método indireto;
- d) Mosaico pelo método indireto com ajuste radiométrico;
- e) Mosaico pelo método indireto com ajuste radiométrico aplicado à imagem (Dcp00305.bmp) retificada.

A primeira porção das imagens escolhida para a figura 5.10 é uma região de ligação entre elas, ou seja, a borda esquerda da dcp00311.bmp sobre a dcp00305.bmp.

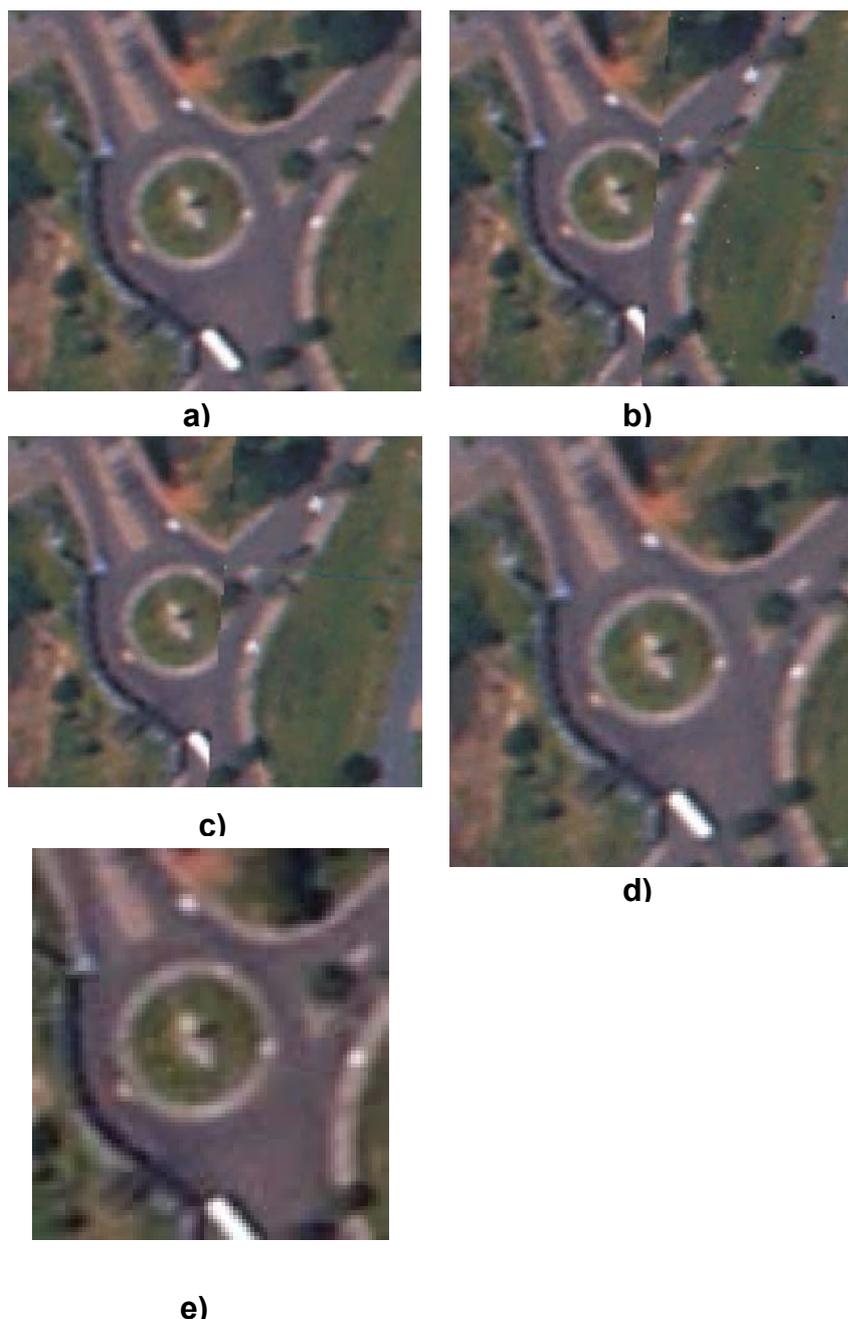


Figura 5.10 - Recorte de uma feição em detalhes

As figuras 5.10.b e 5.10.c expressam, respectivamente, a porção do mosaico realizado pelos métodos direto e indireto, que visualmente tem o mesmo resultado geométrico.

Outro detalhe importante é que nos mosaicos sem ajuste radiométrico (5.10.b e 5.10.c), percebe-se uma linha de ligação entre as duas imagens, pois as mesmas possuem somente o ajuste geométrico proporcionado pela transformação afim. Já

nas figuras 5.10.d e 5.10.e, a ligação entre as imagens é suavizada por conta do ajuste radiométrico aplicado, não transparecendo a sensação de descontinuidade entre as duas imagens, sobre a linha de ligação entre as mesmas.

Uma segunda porção do mosaico foi escolhida de maneira a contemplar uma região de aproximadamente 12 m de variação de altitude, a fim de verificar o comportamento neste tipo de situação.

A localização dos dois recortes realizados foi mostrada na figura 5.11.

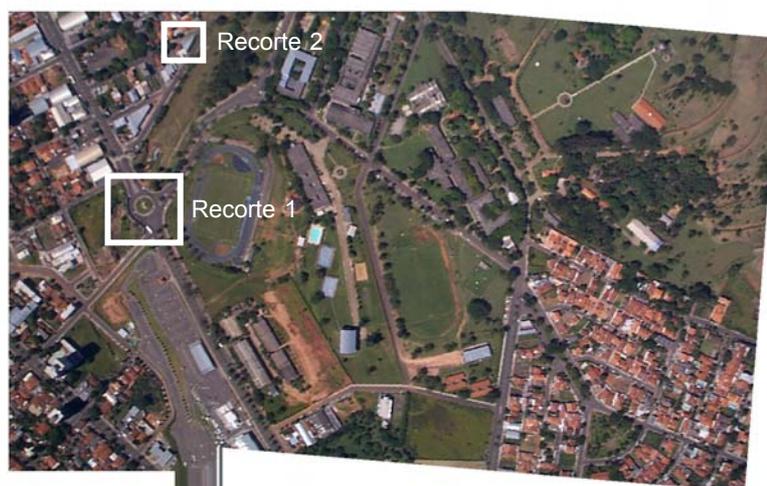


Figura 5.11 – Recortes no mosaico

A figura 5.12 mostra recortes de uma mesma região, com ampliação de 4 vezes, realizados, respectivamente: na imagem original, no mosaico realizado pelo método direto, no mosaico realizado pelo método indireto, no mosaico realizado pelo método indireto com ajuste radiométrico e no mosaico realizado pelo método indireto com ajuste radiométrico utilizando imagens retificadas.

Os recortes da figura 5.12 realçam uma feição posicionada na região de grande variação de altitude, onde, este caso não mostrou deslocamento. Os recortes estão na mesma disposição dos da figura 5.10.

Pela indisponibilidade de imagens retificadas diferencialmente (orto retificada), não foi possível realizar testes comparativos com este tipo de imagem. Acredita-se que as imagens ortorretificadas, não sofreriam esse tipo de degradação, pois teoricamente imagens ortorretificadas estão isentas de deslocamento devido ao relevo.



Figura 5.12 - Recorte de área com deslocamento devido ao relevo

Como já se esperava no método direto, por projetar o *pixel* da imagem original para o mosaico, através da transformação afim inversa, pode ocorrer de *pixels* do mosaico ficarem sem receber valores de brilho da imagem original, permanecendo sem cor, ou neste caso com a cor branca. A figura 5.13 destaca as falhas ocorridas na imagem gerada, provocada pelo algoritmo de mosaicagem



Figura 5.13 - Falhas no método direto

## **6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, pode-se tirar algumas conclusões e fazer algumas recomendações, com o objetivo de facilitar os próximos passos no avanço das pesquisas, no que se refere à Fotogrametria digital e suas áreas afins.

### **6.1 Conclusões**

Diante do problema apresentado nesta dissertação, o primeiro passo foi, através da revisão bibliográfica, abordar todos os assuntos ligados ao problema, de maneira prática, mas sem perder o rigor teórico necessário para um bom embasamento acerca das soluções propostas. Junto a isto, foi apresentada uma metodologia, testada e comprovada com experimentos que mostraram resultados satisfatórios.

Ao comparar os valores obtidos nos processos de calibração realizados em duas épocas diferentes, após a realização da coleta das imagens, pode-se perceber que os parâmetros de Orientação Interior da câmara se mantiveram constantes.

Através de falhas (pontos em branco), encontradas no mosaico realizado pelo método direto, conclui-se que este não é um método adequado.

A metodologia de mosaicagem de imagens digitais aplicada a FAPF's de uma área que engloba o Campus da Unesp de Presidente Prudente – SP, através do método indireto, utilizando as equações da transformação afim direta, com ajuste radiométrico por ponderação, mostrou-se adequada para a solução do problema.

Como já se esperava, um resultado mais satisfatório foi comprovado utilizando FAPF's retificadas.

## **6.2 Recomendações**

A partir dos resultados obtidos com a mosaicagem de FAPF's e FAPF's retificadas, acredita-se obter um resultado ainda melhor utilizando FAPF's retificadas diferencialmente (orto retificadas). Pelo fato destas possuírem uma melhor precisão geométrica e estarem isentas de deslocamento devido ao relevo, aumentando assim a gama de possibilidades de utilização deste produto.

Além da metodologia e dos testes realizados, algumas melhorias no método, bem como no programa, poderiam ser realizadas para que este obtivesse o máximo de desempenho e eficácia na resolução de suas tarefas. Por isso, algumas sugestões são propostas para uma continuidade deste trabalho:

- Automatizar o máximo possível os processos de coleta de pontos de ligação, utilizando rotinas de correlação, para minimizar as fontes de erros;
- Implementar e testar outras transformações, além da transformação afim e comparar o desempenho das mesmas;
- Utilizar outros procedimentos para o ajuste radiométrico entre as imagens, sugestão: média e desvio padrão;
- Reproduzir os teste para FAPF's retificadas diferencialmente;
- Realizar testes comparativos, com resultados numéricos e controle de qualidade através de recursos estatísticos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, J. Ortofoto Digital. 1989. 98 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

ANDRADE, J. B. Fotogrametria. Curitiba, SBEE, Universidade Federal do Paraná, 1998. 258p.

ANDRADE, J. B. de; OLIVAS, M. A de A. Calibração de Câmeras Aerofotogramétricas. Boletim da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, n.26, 39p, 1981.

ARRUDA JR, E.R.; HASEGAWA, J.K.; IMAI, N.N. Atualização Cartográfica baseada em Imagens Digitais Retificadas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO (COBRAC), 4., 2000, Florianópolis. Anais eletronicos... Florianópolis: UFRGS, CD-Rom.

BOLT, M.F.; ATKINSON, K.B. Space reception of 35 mm model aircraft photography. In: CONGRESS OF INTERNATIONAL SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING, 15.,1984, Rio de Janeiro. Anais ... Rio de Janeiro: Committee of the XV th International Congress of Photogrammetry and Remote Sensing, 1984. v.25, p.90-99. (Part.A5, Commission V).

DISPERATI, A.A. Obtenção e uso de Fotografias Aéreas de Pequeno Formato, Curitiba, Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná, Universidade Federal do Paraná, 1991.

GALO, M.; HASEGAWA, J. K.; TOMMASELLI, A.M.G. Avaliação Geométrica de Câmaras de Vídeo para Uso em Fotogrametria Digital. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 14., 1999, Recife. Anais eletrônicos ... Recife, UFPE, 1999, CD-Rom.

HOOD, J. Image Processing Techniques for Digital Orthophotoquad Production. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v.55, n.9, p.1323-1329, Sep.1989.

KODAK: Especificações técnicas, 2000. Disponível em: <<http://www.kodak.com>>. Acesso em: 10 ago.2000.

LUGNANI, J. B. Introdução à fototriangulação. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 1987, 134p.

MIKHAIL, E.M.; BETHEL, J.S. e MCGLONE, J.C. Introduction to Modern Photogrammetry, New York: John Wiley & Song Inc., 2001, 479p.

RICHARDS, J.A. Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction, Berlin, Springer-Verlag: 1986.

ROBERTS, A.; GRISWOLD, L. Pratical photogrammetry from 35 mm aerial photography. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Falls Church, v.52, n.4, p.501-508, 1996.

SCHENK, T., Digital Photogrammetry: Background, Fundamentals, Automatic Orientation Procedure, USA: TerraScience, 1999, v.1, 428p.

THOMSON, G.H. Evaluting image quality of small format aerial photography systems. Photogrammetric Record, London, v.12, n.71, p.595-603, 1988.

TOMMASELLI, A. M. G.; TOZZI, C. L.; Técnicas de calibração de câmaras em visão computacional, Jornada EPUSP/IEEE em Computação Visual, Dezembro, 1990.

TOMMASELLI, A. M. G. Mapeamento com câmaras digitais : análise de requisitos e experimentos, In: CONGRESSO BRASILEIRO DE

CARTOGRAFIA, 20., 2001, Porto Alegre. Anais CD-Rom... Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Cartografia, 2001.

WOLF, P.R. Elements of Photogrammetry, Singapore: McGraw-Hill Book Company, 1983.

WOLF, P.R. e DEWITT, B. A. Elements of Photogrammetry: With Applications in GIS, 3ed. U.S.A.: McGraw-Hill Book Company, 2000, 607p.

## APÊNDICE

### APÊNDICE A: Arquivos utilizados no processo de retificação

Os arquivos apoio.dat, obse.dat, cps.dat e info.dat são necessários para execução do programa de retificação utilizado neste trabalho. O arquivo result.dat é gerado no processo de retificação. Os arquivos citados serão explicados a seguir:

Apoio.dat – contém as coordenadas dos pontos de apoio utilizados para o processo de retificação, no sistema de coordenadas do terreno (neste caso UTM) e seus devidos pesos no processo de ajustamento.

Obse.dat – coordenadas dos mesmos pontos de apoio do arquivo anterior, no sistema de coordenadas de tela, coletados sobre a fotografia digital.

Cps.dat – informa os valores aproximados para os elementos de orientação e seus respectivos pesos, dados por:  $\omega$ ,  $\sigma_\omega$ ,  $\varphi$ ,  $\sigma_\varphi$ ,  $\kappa$ ,  $\sigma_\kappa$ ,  $X_0$ ,  $\sigma_{X_0}$ ,  $Y_0$ ,  $\sigma_{Y_0}$ ,  $Z_0$ ,  $\sigma_{Z_0}$ , onde os ângulo de atitude da câmara, são expressos em radianos e as coordenadas dos centros perspectivos da câmara, são expressas em metros, para o instante da tomada de cada foto.

Info.dat – retrata informações adicionais para o processo de retificação, como: critério de convergência, número máximo de iterações no processo de ajustamento, resolução do *pixel*, distância focal da câmara, parâmetros da distorção radial simétrica e descentrada e deslocamento do ponto principal.

Result.dat – mostra alguns dados do processo de ajustamento, parâmetros de orientação ajustados, seus desvios-padrão e as coordenadas dos pontos de controle ajustadas e seus respectivos desvios-padrão.

## Arquivos utilizados na retificação da imagem Dcp0305:

### apoio.dat

```
5
3 457949.63 10.0 7553596.64 10.0 440.918 1.0
13 457920.15 10.0 7553906.44 10.0 431.918 1.0
26 458291.88 10.0 7553935.97 10.0 406.738 1.0
27 458420.52 10.0 7553791.55 10.0 403.719 1.0
29 458143.34 10.0 7554261.40 10.0 401.841 1.0
```

### obse.dat

```
3 1044.199951 -153.000000
13 842.400024 -505.200012
26 433.200012 -264.600006
27 410.799988 -31.799999
29 345.799988 -708.799988
```

### cps.dat

```
1 0.04 0.0 0.1 0.0 3.66 0.0 458109.0 0.0 7553802.0 0.0 1769.0 0.0
```

### info.dat

```
0.01
10
0.03
53.985
0.0000006E-0
0E-0
0E-0
0E-0
0E-0
0.145 1.179
```

### result.dat

```
Num. de Parâmetros = 21
Num. de Observ. = 10
Num. de Injunções = 15
Graus de Liberdade = 4
Sigma a priori = 1.0
Sigma a posteriori = 0.022081
    -0.0343 +/- 0.0064
    -0.1108 +/- 0.0064
    3.7564 +/- 0.0009
    457994.3873 +/- 9.1735
    7553972.0743 +/- 9.2944
    1821.1565 +/- 1.8489
3 457949.6299 +/- 0.0070 7553596.6400 +/- 0.0070 440.9180 +/- 0.0221
13 457920.1500 +/- 0.0070 7553906.4400 +/- 0.0070 431.9180 +/- 0.0221
26 458291.8801 +/- 0.0070 7553935.9700 +/- 0.0070 406.7382 +/- 0.0221
27 458420.5200 +/- 0.0070 7553791.5501 +/- 0.0070 403.7188 +/- 0.0221
29 458143.3400 +/- 0.0070 7554261.4000 +/- 0.0070 401.8409 +/- 0.0221
```

## Arquivos utilizados na retificação da imagem Dcp0311:

### apoio.dat

```

5
5 457892.99 10.0 7553483.14 10.0 443.494 1.0
13 457920.15 10.0 7553906.44 10.0 431.918 1.0
27 458420.52 10.0 7553791.55 10.0 403.719 1.0
29 458143.34 10.0 7554261.40 10.0 401.841 1.0
31 457447.35 10.0 7553893.70 10.0 415.968 1.0

```

### obse.dat

```

5 917.000000 -43.500000
13 591.750000 -516.000000
27 92.250000 -53.750000
29 110.500000 -757.000000
31 1112.750000 -788.500000

```

### cps.dat

```

1 0.040.0 0.1 0.0 3.66 0.0 458109.0 0.0 7553802.0 0.0 1769.0 0.0

```

### info.dat

```

0.01
10
0.03
53.985
0.0000006E-0
0E-0
0E-0
0E-0
0E-0
0.145 1.179

```

### result.dat

```

Num. de Parâmetros = 21
Num. de Observ. = 10
Num. de Injunções = 15
Graus de Liberdade = 4
Sigma a priori = 1.0
Sigma a posteriori = 0.127531
    0.0670 +/- 0.0229
    0.0928 +/- 0.0143
    3.6645 +/- 0.0039
    458113.4811 +/- 20.4471
    7553711.6004 +/- 32.0263
    1778.4923 +/- 7.8721
5 457892.9899 +/- 0.0403 7553483.1394 +/- 0.0403 443.4952 +/- 0.1275
13 457920.1501 +/- 0.0403 7553906.4401 +/- 0.0403 431.9180 +/- 0.1275
27 458420.5195 +/- 0.0403 7553791.5504 +/- 0.0403 403.7180 +/- 0.1275
29 458143.3404 +/- 0.0403 7554261.4001 +/- 0.0403 401.8415 +/- 0.1275
31 457447.3502 +/- 0.0403 7553893.7000 +/- 0.0403 415.9672 +/- 0.1275

```

**APÊNDICE B: Elementos de orientação no processo de retificação**

Tabela B.1: Elementos de orientação no processo de retificação

<b>Elementos de Orientação</b>	<b>Dcp0305</b>	<b>Dcp0311</b>
$\omega$ (Ômega) (rad)	-0,0343	0,0670
$\varphi$ (Phi) (rad)	-0,1108	0,0928
$\kappa$ (Kapa) (rad)	3,7564	3,6645
$X_0$ (m)	457994,3873	458311,4811
$Y_0$ (m)	7553972,0743	7553711,6004
$Z_0$ (m)	1821,1565	1778,4923

## APÊNDICE C: Transformações afins

Mikhail (2001), relata que várias transformações afins podem ser construídas, usando várias seqüências de transformações elementares, onde são elas: translação, escala uniforme, rotação, reflexão, stretch e inclinação. A seguir estão duas das transformações bidimensionais comumente usadas em Fotogrametria.

### C.1 Transformação com quatro parâmetros

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u & 0 \\ 0 & u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & \text{sen } \beta \\ -\text{sen } \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \end{bmatrix} \quad (\text{C.1})$$

ou

$$\begin{aligned} y_1 &= ux_1 \cos \beta + ux_2 \text{sen } \beta + t_1 \\ y_2 &= -ux_1 \text{sen } \beta + ux_2 \cos \beta + t_2 \end{aligned} \quad (\text{C.2})$$

ou

$$\begin{aligned} y_1 &= ax_1 + bx_2 + c \\ y_2 &= -bx_1 + ax_2 + d \end{aligned} \quad (\text{C.3})$$

ou

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ -b & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c \\ d \end{bmatrix} \quad (\text{C.4})$$

A transformação inversa seguinte Mikhail (2001), é dada por:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{u} \begin{bmatrix} \cos \beta & -\text{sen } \beta \\ \text{sen } \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 - t_1 \\ y_2 - t_2 \end{bmatrix} \quad (\text{C.5})$$

ou

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{a^2 + b^2} \begin{bmatrix} a & -b \\ b & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 - c \\ y_2 - d \end{bmatrix} \quad (\text{C.6})$$

Esta transformação tem quatro parâmetros: uma escala uniforme, uma rotação e duas translações, Mikhail (2001).

## C.2 Transformação com seis parâmetros

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1 & 0 \\ 0 & s_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & k \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & \text{sen } \beta \\ -\text{sen } \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \end{bmatrix} \quad (\text{C.7})$$

ou

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ d & e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c \\ f \end{bmatrix} \quad (\text{C.8})$$

Mikhail (2001), cita ainda, que os seis parâmetros desta transformação são: duas escalas, um fator de inclinação (falta de perpendicularidade dos eixos), uma rotação e duas mudanças de posição. A transformação inversa é dada por

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{ae - bd} \begin{bmatrix} e & -b \\ -d & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 - c \\ y_2 - f \end{bmatrix} \quad (\text{C.9})$$

Autorizo a reprodução deste trabalho.

Presidente Prudente, 15 de Julho de 2002.

**ELIAS RIBEIRO DE ARRUDA JUNIOR**

## Ficha Catalográfica

A817m

Arruda Junior, Elias Ribeiro de  
“Mosaicagem” entre imagens digitais / Elias Ribeiro  
de Arruda Junior. – Presidente Prudente: [s.n], 2002.a  
92p. : il.; 29 cm.

Dissertação (mestrado). – FCT/UNESP, Faculdade de  
Ciências Tecnologia, Presidente Prudente, 2002.  
Orientador: Prof. Júlio Kiyoshi Hasegawa

1.Mosaicagem. 2. Imagem Digital. 3. Fotografia Aérea  
Digital de Pequeno Formato. 4. Fotogrametria Digital. I.  
Título.

CDD (18ª ed.) 623.72