

PABLO EDILBERTO GRAJALES VILLARREAL

**ATUALIZAÇÃO DE MAPAS DIGITAIS COM
FOTOGRAFIAS AÉREAS SINGULARES**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas para a obtenção do Grau de Mestre em Ciências pela Universidade Federal do Paraná.

CURITIBA
1992

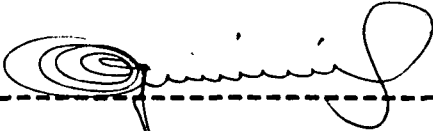
ATUALIZAÇÃO DE MAPAS DIGITAIS COM FOTOGRAFIAS AEREAS
SINGULARES

POR

PABLO EDILBERTO GRAJALES VILLARREAL

Dissertação aprovada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, pela Comissão formada pelos professores:

ORIENTADOR :



Prof. Dr. Quintino Dalmolin



Prof. Ph.D. João Bosco Lugnani



Profa. M.Sc. Mary Angélica de Azevedo Olivas

Curitiba, 06 de Fevereiro de 1992.

Dedico este trabalho a meus
pais, irmãos e avós, pelo
incentivo e apoio.

Agradecimentos

O autor deseja externar seus agradecimentos às pessoas e entidades abaixo relacionadas:

- Ao Professor Doutor Quintino Dalmolin pela dedicada orientação e incentivo;

- Ao Professor Doutor Camil Gemael pela dedicação pessoal ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas;

- Aos Professores Doutor João Bosco Lugnani e M.Sc. Mary A. Olivas pelas sugestões recomendadas;

- Ao Engenheiro Júlio Cesar Menezes, interlocutor constante durante a elaboração dos programas computacionais;

- Aos colegas da turma de mestrado de 1989 (Andrea, Artur, Gilberto, Jucilei, Marconi, Otavio, Paulo e Ronaldo);

- A Coordenadoria de Aperfeiçoamento do Pessoal do Ensino Superior (CAPES), pela concessão de bolsa de estudo, durante a realização do curso;

- A Empresa Aerosul S.A., que gentilmente forneceu os dados numéricos usados nos testes práticos;

- A todos os demais colegas e amigos que, direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMARIO

	Pg
TERMO DE APROVAÇÃO -----	ii
DEDICATORIA -----	iii
AGRADECIMENTOS -----	iv
SUMARIO -----	v
LISTA DE TABELAS -----	viii
LISTA DE FIGURAS -----	xii
RESUMO -----	xiv
ABSTRACT -----	xv
1 INTRODUÇÃO -----	1
2 CONCEITOS TEORICOS -----	6
2.1 O Modelo Matemático dos Planos Equivalentes -----	6
2.1.1 Desenvolvimento Matemático -----	7
2.1.1.1 A Equação do Plano em Função da Feição Reta no Espaço Imagem -----	8
2.1.1.2 Equação do Plano em Função da Feição Reta no Espaço Objeto -----	10
2.1.1.3 Forma Final do Modelo dos Planos Equivalentes -----	12
2.2 A Resseção Espacial e as Feições Retas como Controle	14
2.2.1 Introdução -----	14
2.2.2 O Modelo dos Planos Equivalentes e a Resseção Espacial -----	14
2.2.2.1 A Matriz das Derivadas Parciais A -----	16
2.2.2.2 A Matriz dos Pesos P -----	20
2.2.2.3 O Padrão da Matriz Normal N -----	22

2.2.2.4	Parâmetros Aproximados -----	24
2.3	A Resseção Espacial utilizando Feições Retas e Pontos Simples como Controle -----	25
2.4	Injunções Relativas de Posição -----	28
2.5	O Modelo Digital do Terreno -----	30
2.5.1	Interpolação da Coordenada Z -----	31
2.5.1.1	A Interpolação Bilinear -----	32
3.	O SISTEMA DE ATUALIZAÇÃO -----	35
3.1	Configuração do Sistema -----	35
3.2	Princípio de Funcionamento -----	36
3.2.1	Transformação das coordenadas de máquina em coordena- das no sistema de mapa -----	37
3.2.1.1	Transformação das coordenadas de máquina em coordena- das no sistema geodésico local -----	37
3.2.1.2	Cálculo das coordenadas no Sistema do Mapa -----	40
3.3	Refinamento das Fotocoordenadas -----	43
3.4	Características do Sistema de Atualização -----	44
4.	TESTES E RESULTADOS -----	46
4.1	Introdução -----	46
4.2	Geração dos dados simulados -----	46
4.3	Testes com dados simulados -----	49
4.3.1	Teste utilizando pontos de controle -----	49
4.3.2	Teste utilizando pontos e feições retas como contro- le -----	51
4.3.3	Teste utilizando feições retas como controle -----	54

4.4	Análise da qualidade dos resultados apresentados pelos programas implementados -----	56
4.4.1	Teste utilizando pontos como controle -----	57
4.4.2	Teste utilizando pontos e feições retas como controle	60
4.4.3	Teste utilizando feições retas como controle -----	63
4.4.4	Contribuição da precisão das altitudes interpoladas pelo DTM no resultados dos programas -----	67
4.5	Teste com dados reais -----	74
4.5.1	Introdução -----	74
4.5.2	Precisão do DTM -----	75
4.5.3	Teste Prático N ^o 1 -----	75
4.5.4	Teste Prático N ^o 2 -----	79
5.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES -----	85
5.1	Conclusões -----	85
5.2	Recomendações -----	86
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS -----	88

LISTA DE TABELAS

	Pg
TABELA 4.3.1.1 - Valores aproximados, reais e ajustados para os elementos de orientação externa usando pontos como controle -----	50
TABELA 4.3.1.2 - Valores das coordenadas reais, calculadas e coordenada Z aproximada para os pontos de verificação -----	50
TABELA 4.3.2.1 - Valores aproximados, reais e ajustados para os elementos de orientação externa usando pontos e feições retas como controle -----	52
TABELA 4.3.2.2 - Valores das coordenadas reais, calculadas e coordenada Z aproximada para os pontos de verificação -----	53
TABELA 4.3.3.1 - Valores aproximados, reais e ajustados para os elementos de orientação externa usando feições retas como controle -----	55
TABELA 4.3.3.2 - Valores das coordenadas reais, calculadas e coordenada Z aproximada para os pontos de verificação -----	55
TABELA 4.4.1.1 - Resultados da resseção e análise estatística do ajustamento usando pontos simples como controle -----	57
TABELA 4.4.1.2 - Valores das coordenadas reais e calculadas para os pontos de verificação -----	58

TABELA 4.4.1.3 - Erros planimétricos e altimétricos nos pontos de verificação usando pontos como controle -----	59
TABELA 4.4.2.1 - Resultados da resseção e análise estatística do ajustamento usando pontos e feições retas como controle -----	60
TABELA 4.4.2.2 - Valores das coordenadas reais e calculadas para os pontos de verificação -----	61
TABELA 4.4.2.3 - Erros planimétricos e altimétricos nos pontos de verificação usando pontos e feições retas como controle -----	62
TABELA 4.4.3.1 - Resultados da resseção e análise estatística do ajustamento usando feições retas como controle -----	63
TABELA 4.4.3.2 - Valores das coordenadas reais e calculadas para os pontos de verificação -----	64
TABELA 4.4.3.3 - Erros planimétricos e altimétricos cometidos nos pontos de verificação usando feições retas como controle -----	65
TABELA 4.4.4.1 - Erros planimétricos nos pontos de verificação em função de erros na cota Z para o teste usando pontos como controle ---	67
TABELA 4.4.4.2 - Precisão a ser mantida na coordenada Z para o teste usando pontos como controle de modo a garantir as especificações exigidas para o	

	Pg
mapa -----	68
TABELA 4.4.4.3 - Erros planimétricos nos pontos de verificação em função de erros na coordenada Z para o teste usando pontos e feições retas como controle -----	69
TABELA 4.4.4.4 - Erros planimétricos nos pontos de verificação em função de erros na coordenada Z para o teste usando feições retas como controle -----	70
TABELA 4.4.4.5 - Precisão a ser mantida na interpolação da coordenada Z para o teste usando feições retas como controle de modo a garantir as especificações exigidas para o mapa -----	71
TABELA 4.5.3.1 - Resultados da resseção e análise estatística do ajustamento para o teste prático N ⁰ 1 ---	76
TABELA 4.5.3.2 - Valores das coordenadas aerotrianguladas e calculadas para os pontos de verificação no teste prático N ⁰ 1 -----	77
TABELA 4.5.3.3 - Discrepâncias Plani-Altimétricas e discrepâncias entre a coordenada Z aerotriangulada e a coordenada Z interpolada diretamente do DTM nos pontos de verificação (Teste prático N ⁰ 1) -----	78
TABELA 4.5.4.1 - Resultados da resseção e análise estatística do ajustamento para o teste prático N ⁰ 2 ---	80

TABELA 4.5.4.2 - Valores das coordenadas aerotrianguladas e calculadas para o teste prático N ^o 2 -----	81
TABELA 4.5.4.3 - Discrepâncias Plani-Altimétricas e discrepâncias entre a coordenadas Z aerotriangulada e a coordenada Z interpolada diretamente do DTM nos pontos de verificação (Teste prático N ^o 2) -----	82

LISTA DE FIGURAS

		Pg
FIG. 2.1.1	- Plano definido pela feição no espaço imagem e pela feição no espaço objeto -----	16
FIG. 2.2.2.1.1	- Padrão da Matriz A -----	19
FIG. 2.2.2.2.1	- Padrão da Matriz Peso com pseudo-observações correlacionadas -----	21
FIG. 2.2.2.3.1	- Padrão da Matriz N -----	23
FIG. 2.3.1	- Matriz A aumentada -----	26
FIG. 2.3.2	- Matriz N -----	26
FIG. 2.3.3	- Matriz Peso Completa -----	27
FIG. 2.5.1	- DTM representado na forma de uma malha regular -----	31
FIG. 2.5.2	- Sistema de coordenadas da célula -----	33
FIG. 3.1.1	- Configuração do Sistema de Atualização -----	35
FIG. 3.2.1.1	- Etapas envolvidas na transformação das coordenadas do sistema de máquina para o sistema geodésico local -----	39
FIG. 3.2.1.2	- Obtenção da cota Z por iteração -----	39
FIG. 4.2.1	- Sistema do espaço objeto utilizado para gerar os dados simulados -----	48
FIG. 4.3.1.1	- Distribuição dos pontos de controle e de verificação para o teste com pontos de controle -----	49
FIG. 4.3.2.1	- Distribuição das feições retas, pontos de controle e de verificação para o teste com	

	pontos e feições retas como controle -----	51
FIG. 4.3.3.1	- Distribuição das feições retas e pontos de verificação para o teste com feições retas como controle -----	54
FIG. 4.4.3.1	- Erros planimétricos nos pontos de verificação -----	66
FIG. 4.4.3.2	- Erros altimétricos nos pontos de verificação	66
FIG. 4.4.4.1	- Erros planimétricos nos pontos de verificação em função de um erro de 2,5m na coordenada Z destes pontos -----	72
FIG. 4.5.3.1	- Distribuição dos pontos de controle e de verificação na imagem (teste prático N ^o 1)	75
FIG. 4.5.4.1	- Distribuição dos pontos de controle e de verificação na imagem (teste prático N ^o 2)	79
FIG. 4.5.4.2	- Discrepâncias planimétricas entre as coordenadas aerotrianguladas e as coordenadas calculadas nos pontos de verificação -----	84
FIG. 4.5.4.3	- Discrepâncias altimétricas entre as coordenadas aerotrianguladas e as coordenadas calculadas nos pontos de verificação -----	84

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo testar um método para a atualização de mapas digitais. O método utiliza fotografias aéreas singulares e correspondente modelo digital do terreno. É estudada também, a contribuição das feições retas digitalizadas no resultado da atualização. Estas feições são utilizadas como complemento ou substituição total ao controle convencional, necessário à orientação de uma foto isolada a qual se constitui em uma das etapas mais importantes no método de atualização estudado. Programas em linguagem FORTRAN foram implementados em microcomputador. Testes com dados simulados e dados reais são efetuados, e os resultados apresentados e discutidos. Os resultados obtidos estão dentro das normas exigidas para as cartas classe A, mostrando a eficiência do método de atualização pesquisado.

ABSTRACT

This work presents and discusses a method through which digital maps are updated using single aerial photographs and the corresponding digital terrain model (DTM). The improvement of the digitized straight entities on the updating of maps is also studied. In the orientation of single aerial photographs, which is one of the most important procedures of the method under discussion, the conventional control is complemented or totally substituted by such entities. FORTRAN programs have been implemented to personal computers. Tests have been performed with real and simulated data. The results conform to class A map standards, a fact that attests the efficiency of the method.

1. Introdução

A ação do homem tem desempenhado um papel importante nas características da paisagem. A grande concentração da população em áreas urbanas cria a necessidade de construção de casas, edifícios, ruas, estradas, redes de abastecimento de água e esgoto, mudanças na vegetação natural, etc.. Aliadas a estas necessidades surgem problemas como planejamento de transporte e trânsito, erosão, controle da poluição da água e do ar, disposição de áreas verdes, etc.. Por outra parte, também existem regiões onde a ação do homem ainda é pequena ou inexistente, mas o aumento rápido da população, juntamente com a procura de minerais e novas áreas de cultivo, fazem com que as mesmas sejam cada vez menores no decorrer do tempo.

Os mapas tem contribuído de forma decisiva no progresso, no planejamento e na modernização. É a ferramenta de trabalho de planejadores e executores de obras, permite aos órgãos fiscais dos municípios a justa cobrança de taxas e impostos referentes a propriedade imobiliária e como função social, garante a existência física da propriedade imobiliária já registrada no Registro de Imóveis /24/.

No Brasil, como em muitos países, dispõe-se de uma boa quantidade de mapas topográficos e temáticos. A rápida mudança no conteúdo dos mesmos, bem como a necessidade de oferecer aos usuários produtos atualizados, tem levado os órgãos de produção a desenvolver métodos de atualização cada vez

mais eficientes. Para Zuylen /27/, a atualização de mapas é um dos tópicos mais importantes da Cartografia e na atualidade, talvez tenha maior relevância que um novo mapeamento.

Atualizar um mapa significa detectar a mudança no meio físico, medir as alterações e registrar a mudança. Para Kers /11/, os principais fatores envolvidos no processo de atualização de mapas são:

- " 1 - A coleta de dados das variações no conteúdo do mapa;
- 2 - a avaliação da quantidade modificada e a escolha do método para tratá-la;
- 3 - a execução técnica da atualização e a produção do mapa atualizado .

Estes fatores estão diretamente ligados ao tipo de atualização que deve ser aplicada;

Podem distinguir-se três tipos de atualização de mapas:

- Atualização rápida : somente a atualização dos elementos mais importantes do mapa.
- Atualização parcial : somente a atualização de algumas partes pré-selecionadas do mapa ou alguns elementos particulares deste.
- Atualização completa : atualização de todos os elementos modificados no mapa.

O último aspecto a ser considerado é o intervalo de tempo entre as atualizações de mapas; os três sistemas principais são:

- Atualização Contínua : toda mudança de conteúdo

é trabalhada no mapa original para mantê-lo em condição atualizada.

- Atualização Cíclica : a atualização é feita em intervalos pré-determinados (todo ano, cada cinco anos, etc.).

- Atualização Seletiva : a atualização está relacionada a uma ordem de prioridade, que é determinada pela urgência da demanda ou pela quantidade de mudança, e não por um período de tempo fixo".

Nas últimas décadas, a comunidade cartográfica tem direcionado pesquisas visando a criação de novos métodos e equipamentos a serem empregados na atualização de mapas. O crescente desenvolvimento tecnológico na área da computação eletrônica, tem permitido o armazenamento, processamento e reaproveitamento de grande quantidade de informações na forma de banco de dados, com isto, atenções especiais na atualização de mapas tem sido atribuídas as ortofotos, imagens de satélites e à cartografia digital /27/, /11/, /18/. Para Zuylen /27/, a Cartografia Digital abre novas possibilidades no processo de atualização de mapas.

A presente pesquisa tem por finalidade testar um método para a atualização de mapas digitais proposto originalmente por Makarovic em 1973 /17/. O método utiliza fotografias aéreas singulares e o correspondente modelo digital do terreno. Na utilização do método será estudada também, a contribuição do uso de um novo tipo de controle (feições retas digitalizadas) como complemento ou substituição total ao controle convencional,

necessário à orientação de uma foto isolada, a qual se constitui em uma das etapas mais importantes no método de atualização a ser estudado.

São objetivos desta pesquisa:

a - efetuar coleta de dados da imagem utilizando um monocomparador, e de dados de terreno utilizando cartas topográficas e (ou) pontos de controle previamente determinados na área de estudo;

b - implementar, através de programas para computador na linguagem FORTRAN, em microcomputador, modelos adaptados a pontos de controle e a feições retas como controle que, utilizando os dados coletados, calculem as coordenadas dos pontos a serem atualizados no sistema da carta;

c - testar os programas implementados utilizando dados simulados;

d - testar os programas implementados usando dados reais e apresentar os resultados obtidos na forma de tabelas e gráficos ilustrativos;

e - fazer comparações entre os resultados obtidos utilizando-se pontos de controle, com os obtidos utilizando-se feições retas como controle;

f - avaliar a funcionalidade do método de atualização e sugerir possíveis melhoras ao mesmo.

O assunto da presente dissertação é organizado em cinco capítulos. O capítulo 2, trata sobre os diversos conceitos teóricos utilizados na implementação dos programas computacionais.

O capítulo 3, descreve o sistema de atualização (Configuração, princípio de funcionamento, características).

O capítulo 4, apresenta as experiências numéricas realizadas bem como, os resultados alcançados em cada uma delas.

O capítulo 5, apresenta as conclusões e algumas recomendações para trabalhos futuros.

2 Conceitos Teóricos

2.1 O Modelo Matemático dos Planos Equivalentes

O modelo matemático dos planos equivalentes foi desenvolvido por Tommaselli em trabalho de dissertação de mestrado do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da UFPR /26/. Este modelo, estabelece uma relação funcional entre feições retas no espaço objeto e espaço imagem, prescindindo da correspondência ponto a ponto.

O modelo tem por base a equivalência entre os parâmetros do plano definidos pela feição imagem e o Centro Perspectivo (CP), no espaço imagem, e os parâmetros do plano definidos pela feição e o CP, no espaço objeto.

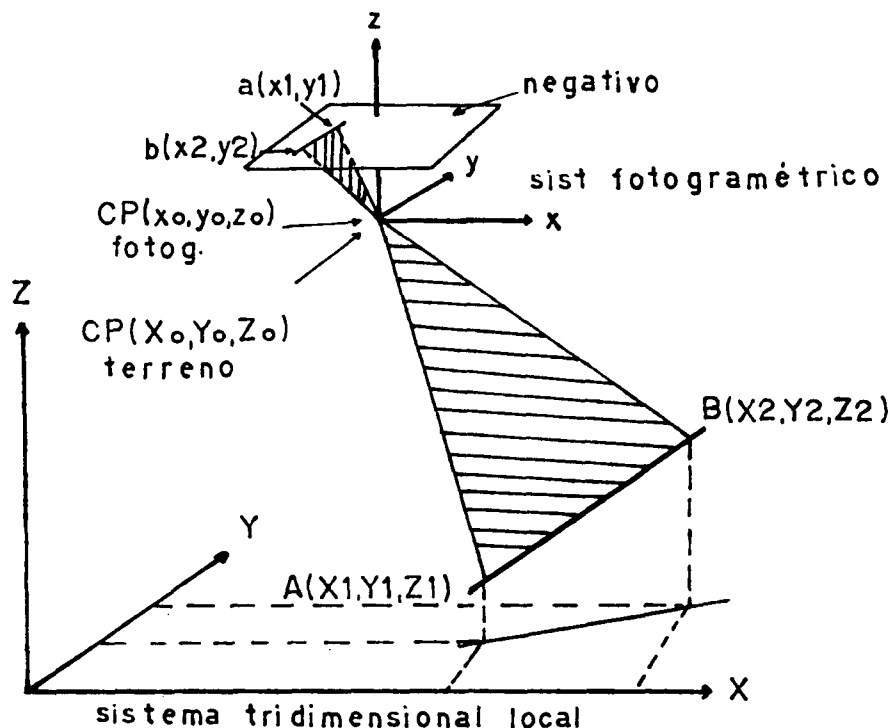


Fig. 2.1.1 Plano definido pela feição no espaço imagem e pela feição no espaço objeto.

2.1.1 Desenvolvimento Matemático

Dada uma feição reta no espaço objeto, esta poderá ser definida por dois de seus pontos com coordenadas conhecidas $(A(X_1, Y_1, Z_1); B(X_2, Y_2, Z_2))$ referidas a um sistema cartesiano tridimensional local no espaço objeto.

Esta feição poderá ser representada por sua equação paramétrica:

$$\begin{aligned} X &= X_1 + l.t \\ Y &= Y_1 + m.t \\ Z &= Z_1 + n.t \end{aligned} \tag{2.1}$$

onde:

l, m, n : são as componentes do vetor diretor \vec{r} definidas

por:

$$\begin{bmatrix} l \\ m \\ n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_2 - X_1 \\ Y_2 - Y_1 \\ Z_2 - Z_1 \end{bmatrix}$$

$X_1, Y_1, Z_1, X_2, Y_2, Z_2$: são as coordenadas de dois pontos pertencentes à reta;

X, Y, Z : é um ponto genérico;

t : é um parâmetro da reta.

Admitindo agora, uma fotografia em que foram eliminados os erros grosseiros e sistemáticos, pode-se, neste caso, considerar a imagem da feição reta como sendo também uma reta.

Na prática, as fotocoordenadas medidas na fotografia são corrigidas dos erros grosseiros e sistemáticos ficando eivadas

unicamente dos erros acidentais de leitura.

A feição no espaço objeto e a feição no espaço imagem definem um plano (Fig. 2.1.1). Pode-se determinar a equação deste plano no espaço imagem e no espaço objeto tendo em comum o Centro Perspectivo.

2.1.1.1 A Equação do Plano em Função da Feição Reta no Espaço Imagem

A equação de um plano é dada pela expressão:

$$AX + BY + CZ + D = 0 \quad (2.2)$$

sendo A, B, C, D os parâmetros que definem esta superfície.

Para definir uma superfície plana são necessários três (3) pontos não colineares. Sua equação poderá ser determinada através do desenvolvimento do determinante que envolve as coordenadas destes três pontos:

$$\begin{vmatrix} X - X_0 & Y - Y_0 & Z - Z_0 \\ X_1 - X_0 & Y_1 - Y_0 & Z_1 - Z_0 \\ X_2 - X_0 & Y_2 - Y_0 & Z_2 - Z_0 \end{vmatrix} = 0 \quad (2.3)$$

onde:

X_0, Y_0, Z_0 ; X_1, Y_1, Z_1 ; X_2, Y_2, Z_2 são as coordenadas dos pontos que definem o plano.

A equação do plano em função da feição reta no espaço imagem, e do centro perspectivo, será obtida desenvolvendo o determinante (2.3) que envolverá as coordenadas do CP no sistema fotogramétrico e as fotocoordenadas de dois pontos.

pertencentes à feição. Neste caso, as coordenadas do CP (origem do sistema fotogramétrico) serão:

$$X_0, Y_0, Z_0 = (0, 0, 0)$$

enquanto que as fotocoordenadas dos pontos 'a' e 'b' pertencentes à feição serão:

$$X_1, Y_1, Z_1 = x_1, y_1, f$$

e

$$X_2, Y_2, Z_2 = x_2, y_2, f.$$

Substituindo estes valores em (2.3), virá:

$$\begin{vmatrix} x & y & z \\ x_1 & y_1 & f \\ x_2 & y_2 & f \end{vmatrix} = 0 \quad (2.4)$$

Desenvolvendo o determinante, e fazendo o agrupamento de observações, chega-se à expressão:

$$Ax + By + Cz = 0 \quad (2.5)$$

onde:

$$A = f.y_1 - f.y_2 ;$$

$$B = f.x_2 - f.x_1 ;$$

$$C = x_1.y_2 - x_2.y_1 .$$

A equação (2.5) representa a equação do plano procurado no sistema de coordenadas fotogramétricas.

As quantidades A, B, C são denominadas por Tommaselli /26/ de pseudo-observações. Este termo é empregado para denominar um agrupamento de observações, com a finalidade de simplificar o modelo matemático.

Deve-se agora, referir a equação (2.5) ao sistema cartesiano tridimensional do espaço objeto.

A transformação de similaridade, converte-se na transformação ideal para realizar este objetivo. Seu modelo matemático é dado por /14/:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \lambda.M. \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

onde:

λ = fator de escala;

M = matriz rotação;

X_0, Y_0, Z_0 = coordenadas do centro perspectivo no referencial do terreno;

x, y, z = coordenadas fotogramétricas correspondentes a X, Y, Z .

Desenvolvendo a expressão (2.6) e substituindo em (2.5) chega-se à equação /26/:

$$A_1.X + B_1.Y + C_1.Z + D_1 = 0 \quad (2.7)$$

onde:

$$A_1, B_1, C_1, D_1 = F(k, \rho, w, \lambda, X_0, Y_0, Z_0, f, x_1, y_1, x_2, y_2).$$

A expressão (2.7) é a equação do plano gerado pela feição reta, no referencial do terreno, em função das fotocoordenadas.

2.1.1.2 Equação do Plano em Função da Feição Reta no Espaço Objeto

Considere-se o determinante dado pela expressão

(2.3). Subtraindo à terceira linha a segunda e colocando o resultado na terceira linha, tem-se:

$$\begin{vmatrix} X - X_0 & Y - Y_0 & Z - Z_0 \\ X_1 - X_0 & Y_1 - Y_0 & Z_1 - Z_0 \\ X_2 - X_1 & Y_2 - Y_1 & Z_2 - Z_1 \end{vmatrix} = 0 \quad (2.8)$$

Observa-se que os elementos da terceira linha são as componentes do vetor diretor da feição reta, logo, pode-se reescrever a (2.8) como:

$$\begin{vmatrix} X - X_0 & Y - Y_0 & Z - Z_0 \\ X_1 - X_0 & Y_1 - Y_0 & Z_1 - Z_0 \\ l & m & n \end{vmatrix} = 0 \quad (2.9)$$

onde:

X_0, Y_0, Z_0 = coordenadas do C.P. no referencial do terreno;

X_1, Y_1, Z_1 = coordenadas de um ponto pertencente à feição reta no espaço objeto;

l, m, n = vetor diretor da feição reta.

Desenvolvendo o determinante e agrupando os respectivos termos chega-se à expressão /26/:

$$A^* \cdot X + B^* \cdot Y + C^* \cdot Z + D^* = 0 \quad (2.10)$$

onde:

$$A^*, B^*, C^*, D^* = F(X_0, Y_0, Z_0, X_1, Y_1, Z_1, l, m, n).$$

A expressão (2.10) é a equação do plano gerado em função da feição reta, e das coordenadas do centro perspectivo no espaço objeto.

2.1.1.3 Forma Final do Modelo Matemático dos Planos Equivalentes

As equações do plano (2.7) e (2.10) definidas nos itens anteriores representam um mesmo plano em espaços diferentes. Verifica-se, que os coeficientes destes planos são múltiplos escalares, possibilitando gerar as equações do modelo proposto. Assim pode-se escrever:

$$\begin{aligned} A_1 - \lambda_1.A^* &= 0 \\ B_1 - \lambda_1.B^* &= 0 \\ C_1 - \lambda_1.C^* &= 0 \\ D_1 - \lambda_1.D^* &= 0 \end{aligned} \tag{2.11}$$

Dividindo as equações (2.11) por λ , obtem-se um fator de proporcionalidade λ_1/λ , que passa-se a denominar de λ .

Desenvolvendo as (2.11) levando em conta as considerações acima referidas, e fazendo as devidas simplificações, chega-se as /26/:

$$\begin{aligned} A.m_{11} + B.m_{21} + C.m_{31} - \lambda.n(Y_1 - Y_0) + \lambda.m(Z_1 - Z_0) &= 0 \\ A.m_{12} + B.m_{22} + C.m_{32} - \lambda.l(Z_1 - Z_0) + \lambda.n(X_1 - X_0) &= 0 \\ A.m_{13} + B.m_{23} + C.m_{33} - \lambda.m(X_1 - X_0) + \lambda.l(Y_1 - Y_0) &= 0. \end{aligned} \tag{2.12}$$

Tommaselli /26/, passa a definir ainda uma matriz anti-simétrica F, correspondente ao vetor diretor da feição reta :

$$F = \begin{bmatrix} 0 & n & -m \\ -n & 0 & l \\ m & -l & 0 \end{bmatrix} \tag{2.13}$$

Com isto, as (2.12) podem ser escritas em notação matricial da forma:

$$([A \ B \ C].M)^T + \lambda.F. \begin{bmatrix} X_1 - X_0 \\ Y_1 - Y_0 \\ Z_1 - Z_0 \end{bmatrix} = 0 \quad (2.14)$$

Levando em consideração as propriedades da matriz ortogonal M (matriz rotação), e efetuando as devidas operações matriciais, chega-se à expressão:

$$\begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = -\lambda.M.F. \begin{bmatrix} X_1 - X_0 \\ Y_1 - Y_0 \\ Z_1 - Z_0 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

onde:

$$M = M(k).M(\varphi).M(\omega).$$

A (2.15) é a forma final do modelo matemático procurado, denominado de **modelo dos planos equivalentes**.

2.2 A Resseção Espacial e as Feições Retas como Controle

2.2.1 Introdução

A Resseção Espacial consiste na determinação dos seis (6) elementos de orientação externa de uma fotografia ou câmara. Na solução clássica, estes parâmetros são calculados a partir das coordenadas de terreno dos pontos de controle, suas respectivas fotocoordenadas, distância focal calibrada e valores aproximados para os parâmetros. O modelo matemático utilizado é constituído das equações de colinearidade .

Tommaselli /26/, encontrou uma nova solução para o problema da Resseção Espacial valendo-se do modelo matemático dos planos equivalentes e as equações de colinearidade. Algumas considerações com relação a esta nova solução serão aqui discutidos.

2.2.2 O Modelo dos Planos Equivalentes e a Resseção Espacial

No modelo matemático dos planos equivalentes (2.15), tem-se pseudo-observações em função de parâmetros, isto é, $F(Xa) = La$. Para o caso de se ter superabundância de observações, o mesmo possibilita um ajustamento pelo Método dos Mínimos Quadrados utilizando o método paramétrico ou das equações de observação.

O modelo matemático linearizado do método dos parâmetros é dado por (19):

$$V = AX + L \quad (2.16)$$

onde:

V = vetor dos resíduos;

$A = \left. \frac{\partial F}{\partial X_a} \right|_{X_0}$ = matriz das derivadas parciais;

X = vetor correção;

$L = L_0 - L_b$;

$L_0 = F(X_0)$;

L_b = vetor dos valores observados;

X_0 = vetor dos valores aproximados dos parâmetros.

O vetor de correções aos parâmetros é calculado por:

$$X = -(A^T P A)^{-1} A^T P L \quad (2.17)$$

onde P é a matriz dos pesos.

A precisão dos parâmetros ajustados será dada por:

$$\sum X^2 = \hat{\sigma}_0^2 (A^T P A)^{-1} \quad (2.18)$$

onde $\hat{\sigma}_0^2$ é a variância da observação de peso unitário a posteriori.

Por ser a (2.16) um modelo linearizado, em que os termos de 2ª ordem e superiores na expansão com a fórmula de Taylor foram desprezados, e em que são usados inicialmente, valores aproximados para os parâmetros, se faz necessário o uso de iterações até se obter os valores mais prováveis para as incógnitas.

2.2.2.1 A Matriz das Derivadas Parciais A

Para o caso da resseção espacial utilizando feições retas como controle, tem-se:

- os seis (6) parâmetros de orientação da imagem (k , ρ , w , X_0 , Y_0 , Z_0);

- e mais sete (7) parâmetros por feição (λ , X_1 , Y_1 , Z_1 , l , m , n).

Assim, para uma imagem com NF feições retas, existirão $6 + 7.NF$ parâmetros.

Cada feição gerará três (3) linhas na matriz A, que pasará a ter $3.NF$ linhas e $6 + 7.NF$ colunas.

Derivando o modelo (2.15) com relação a cada um dos parâmetros acima referidos, tem-se /26/:

- Derivada com relação a k :

$$\frac{\partial}{\partial k} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = (-\lambda) \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} .M.F. \begin{bmatrix} X_1 - X_0 \\ Y_1 - Y_0 \\ Z_1 - Z_0 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

- Derivada com relação a ρ :

$$\frac{\partial}{\partial \rho} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = (-\lambda) \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\cos k \\ 0 & 0 & \sin k \\ \cos k & -\sin k & 0 \end{bmatrix} .M.F. \begin{bmatrix} X_1 - X_0 \\ Y_1 - Y_0 \\ Z_1 - Z_0 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

- Derivada com relação a w:

$$\frac{\partial}{\partial w} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = (-\lambda).M. \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} .F. \begin{bmatrix} X_1 - X_0 \\ Y_1 - Y_0 \\ Z_1 - Z_0 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

- Derivada com relação a X₀:

$$\frac{\partial}{\partial X_0} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = (-\lambda).M. \begin{bmatrix} 0 \\ n \\ -m \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

- Derivada com relação a Y₀:

$$\frac{\partial}{\partial Y_0} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = (-\lambda).M. \begin{bmatrix} -n \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

- Derivada com relação a Z₀:

$$\frac{\partial}{\partial Z_0} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = (-\lambda).M. \begin{bmatrix} m \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

- Derivada com relação a λ:

$$\frac{\partial}{\partial \lambda} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = -M.F. \begin{bmatrix} X_1 - X_0 \\ Y_1 - Y_0 \\ Z_1 - Z_0 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

- Derivada com relação a X_1 :

$$\frac{\partial}{\partial X_1} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \lambda.M. \begin{bmatrix} 0 \\ n \\ -m \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

- Derivada com relação a Y_1 :

$$\frac{\partial}{\partial Y_1} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \lambda.M. \begin{bmatrix} -n \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

- Derivada com relação a Z_1 :

$$\frac{\partial}{\partial Z_1} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \lambda.M. \begin{bmatrix} m \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

- Derivada com relação a l :

$$\frac{\partial}{\partial l} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \lambda.M. \begin{bmatrix} 0 \\ -Z_1 + Z_0 \\ -Y_1 + Y_0 \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

- Derivada com relação a m:

$$\frac{\partial \theta}{\partial m} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = -\lambda . M. \begin{bmatrix} -Z_1 + Z_0 \\ 0 \\ X_1 - X_0 \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

- Derivada com relação a n:

$$\frac{\partial \theta}{\partial n} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = -\lambda . M. \begin{bmatrix} Y_1 - Y_0 \\ -X_1 + X_0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

O padrão da matriz A é mostrado na Fig. (2.2.2.1.1)

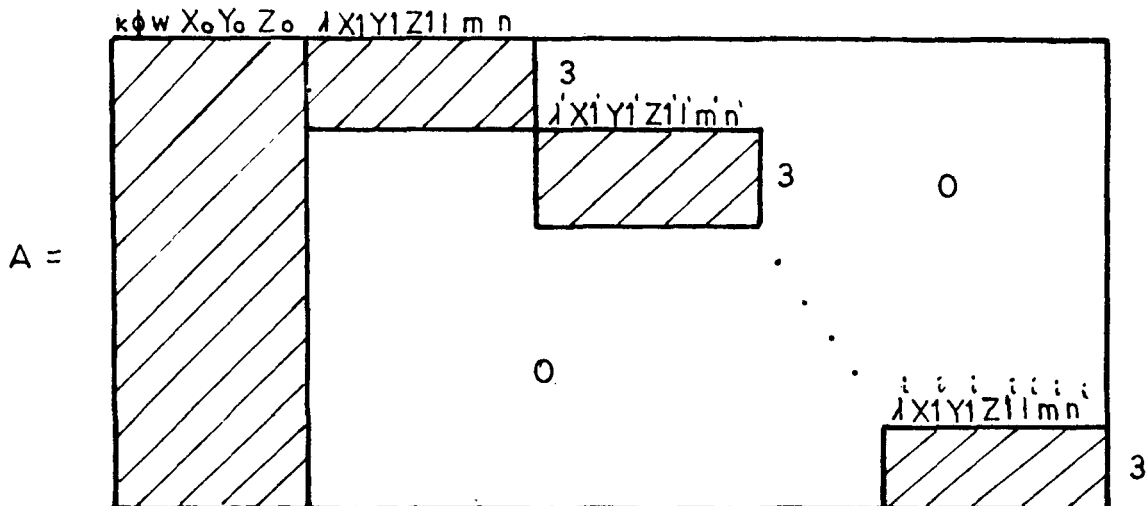


Fig. 2.2.2.1.1 Padrão da Matriz A

Os parâmetros (X_1, Y_1, Z_1, l, m, n) de cada feição são conhecidos, e serão fixados como injunção no ajustamento (item 2.4).

2.2.2.2 A Matriz dos Pesos P

A matriz dos pesos é definida pela expressão /09/:

$$P = \sigma_0^{-2} \Sigma Y^{-1} \quad (2.32)$$

onde:

σ_0^2 = é a variância da observação de peso unitário;

ΣY = é a matriz variância-covariância das quantidades observadas.

Para o caso das quantidades observadas serem independentes entre si, a matriz dos pesos se reduz a uma matriz diagonal, caso contrário, será uma matriz completa.

No modelo matemático dos planos equivalentes (2.15), as quantidades observadas foram agrupadas com o objetivo de simplificar o modelo. Este grupo de observações recebeu o nome de pseudo-observações.

Por serem conhecidas unicamente as variâncias das fotocoordenadas, torna-se necessário aplicar o procedimento de propagação das covariâncias e obter a matriz variância-covariância das pseudo-observações em função das fotocoordenadas.

A lei de propagação das covariâncias é dada por /09/:

$$\Sigma Y = D \Sigma X D^T \quad (2.33)$$

onde:

$\Sigma X =$ M.V.C das fotocoordenadas;

$\Sigma Y =$ M.V.C das pseudo-observações;

$D =$ matriz das derivadas parciais das funções que relacionam as pseudo-observações e as fotocoordenadas.

Desenvolvendo a (2.33) e admitindo-se as fotocoordenadas sem correlação, chega-se a /26/:

$$\Sigma Y = \begin{bmatrix} \begin{matrix} 2 & 2 \\ 2f & .6x \end{matrix} & 0 & -(x_2 + x_1) \delta x \cdot f \\ 0 & \begin{matrix} 2 & 2 \\ 2f & .6x \end{matrix} & -(y_2 + y_1) \delta x \cdot f \\ -(x_2 + x_1) \delta x \cdot f & -(y_2 + y_1) \delta x \cdot f & (y_2^2 + x_2^2 + y_1^2 + x_1^2) \delta x \end{bmatrix}$$

Esta expressão possibilitará o cálculo da matriz dos pesos utilizando a (2.32).

A estrutura da matriz dos pesos com as pseudo-observações correlacionadas entre si será dada conforme a Fig. (2.2.2.2.1).

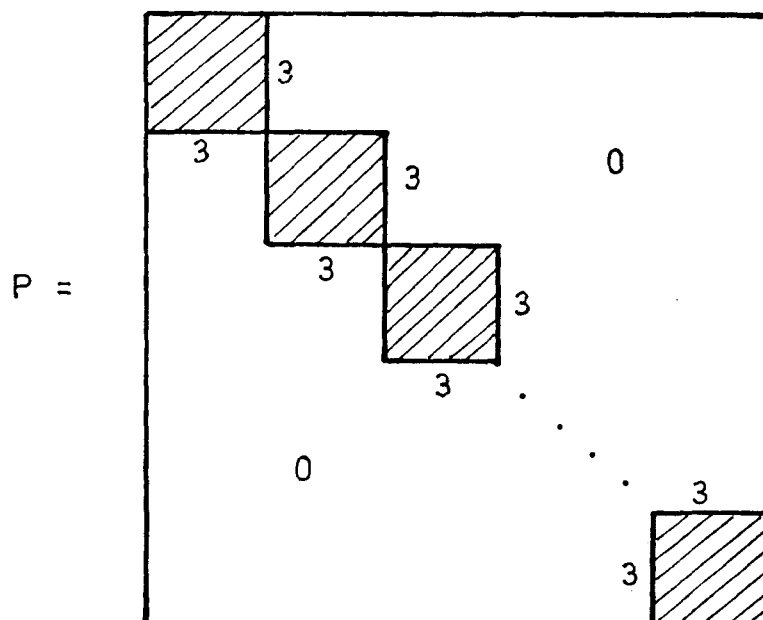


Fig. 2.2.2.2.1 Padrão da Matriz Peso com pseudo-observações correlacionadas.

Existe mais uma possibilidade com relação à formação da matriz dos pesos. Seria a de gerar uma matriz peso diagonal (pseudo-observações não correlacionadas), onde os pesos das pseudo-observações relativas a i -ésima feição seriam:

$$\begin{aligned} p(i) &= \frac{\sigma_0}{\sqrt{2 \cdot f \cdot \sigma_x^2}} \\ p(i+1) &= \frac{\sigma_0}{\sqrt{2 \cdot f \cdot \sigma_x^2}} \\ p(i+2) &= \frac{\sigma_0}{\sqrt{(y_2^2 + x_2^2 + y_1^2 + x_1^2) \cdot \sigma_x^2}} \end{aligned} \quad (2.34)$$

Neste caso, seriam armazenados unicamente os elementos da diagonal principal da matriz, obtendo-se grandes benefícios em termos da otimização dos recursos computacionais.

Tommaselli /26/, realizou testes considerando os dois tipos de matrizes verificando pouca discrepância nos resultados obtidos. Por este motivo, recomenda o uso da matriz peso diagonal tendo em vista o benefício na otimização computacional.

2.2.2.3 O Padrão da Matriz Normal N

O padrão da matriz A no ajustamento pelo método paramétrico, define o padrão da matriz normal N, pois:

$$N = A^T P A \quad (2.35)$$

Esta expressão, é utilizada tanto na solução (2.17), como na avaliação interna do ajustamento através da M.V.C dos parâmetros ajustados (2.18).

Uma vez que a matriz N deve ser invertida, a sua estrutura assume um grande interesse numérico nos trabalhos de otimização.

A Fig. (2.2.2.3.1) mostra o padrão desta matriz.

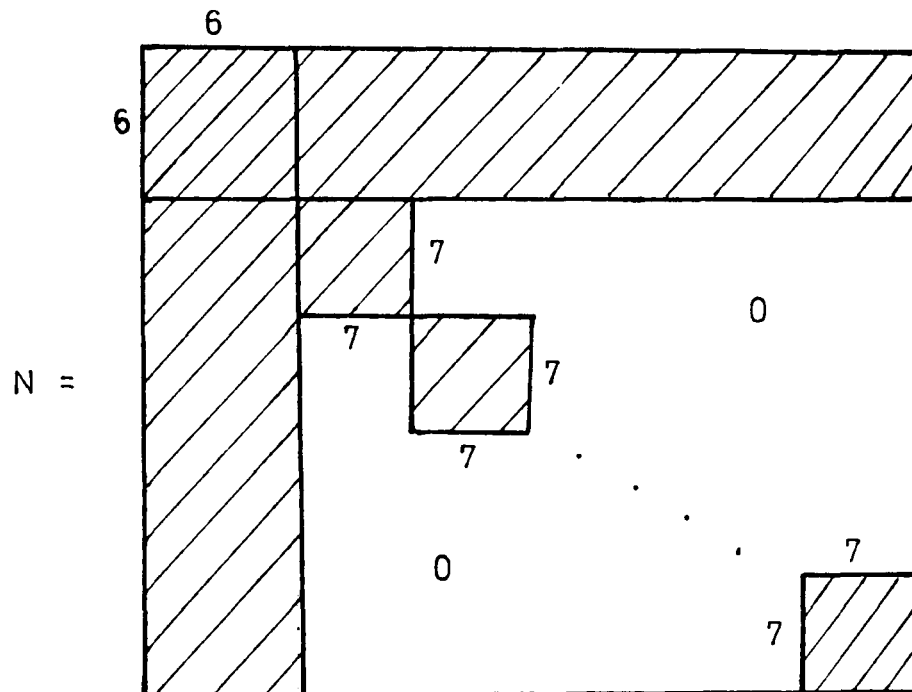


Fig. 2.2.2.3.1 Padrão da Matriz N

2.2.2.4 Parâmetros Aproximados

Os parâmetros aproximados no caso da resseção espacial com fotografias aéreas aproximadamente verticais podem ser gerados da seguinte forma:

- rotações w e ϕ iguais a zero;
- k dependerá da orientação planimétrica do sistema fotogramétrico em relação ao sistema de referência do espaço objeto (casos mais comuns: 0° , 180° ou $\pm 90^\circ$);
- Z_0 será a altitude de vôo (pode ser avaliada somando-se a altitude média da região à altura de vôo);
- X_0 , Y_0 podem ser obtidos de um mapa da região ou utilizando a forma inversa das equações de colinearidade (Veja item 3.2.1);
- X_1 , Y_1 , Z_1 , l , m , n são parâmetros conhecidos para cada feição e serão usados como injunção no ajustamento;
- λ será avaliado para cada feição através da seguinte expressão:

$$\lambda_0 = \frac{-(x_1 \cdot y_2 - x_2 \cdot y_1)}{[m(X_1 - X_0) - l(Y_1 - Y_0)]}, \quad (2.36)$$

a qual foi obtida empregando uma das equações da (2.15) e substituindo-se nesta, os valores aproximados dos demais parâmetros.

2.3 A Resseção Espacial utilizando Feições Retas e Pontos Simples como Controle

No item 2.2 foi utilizado o modelo matemático dos planos equivalentes para resolver o problema da resseção espacial usando feições retas como controle, onde seus parâmetros X_1 , Y_1 , Z_1 , l , m , n foram fixados através de injunções relativas de posição (veja item 2.4).

Na prática, principalmente em áreas urbanas estarão presentes, além das feições retas, pontos e em menor número feições curvas.

Fica evidente que a solução ideal para o problema seria aquela que aproveitasse ao máximo todas as entidades e pontos disponíveis.

Para utilizar simultaneamente pontos e feições retas como controle, basta adicionar às equações de observação provenientes do modelo dos planos equivalentes as equações de colinearidade envolvendo os pontos de controle. Neste caso, o modelo dos planos equivalentes envolverá os parâmetros de orientação e os parâmetros relativos as feições, enquanto que as equações de colinearidade, envolverão os mesmos parâmetros de orientação e as coordenadas tridimensionais dos pontos simples.

Para gerar a matriz A , é necessário introduzir as derivadas parciais do modelo de colinearidade relativas aos pontos simples à matriz A gerada utilizando o modelo dos planos equivalentes.

O padrão da matriz A neste caso será dado pela Fig.

2.3.1.

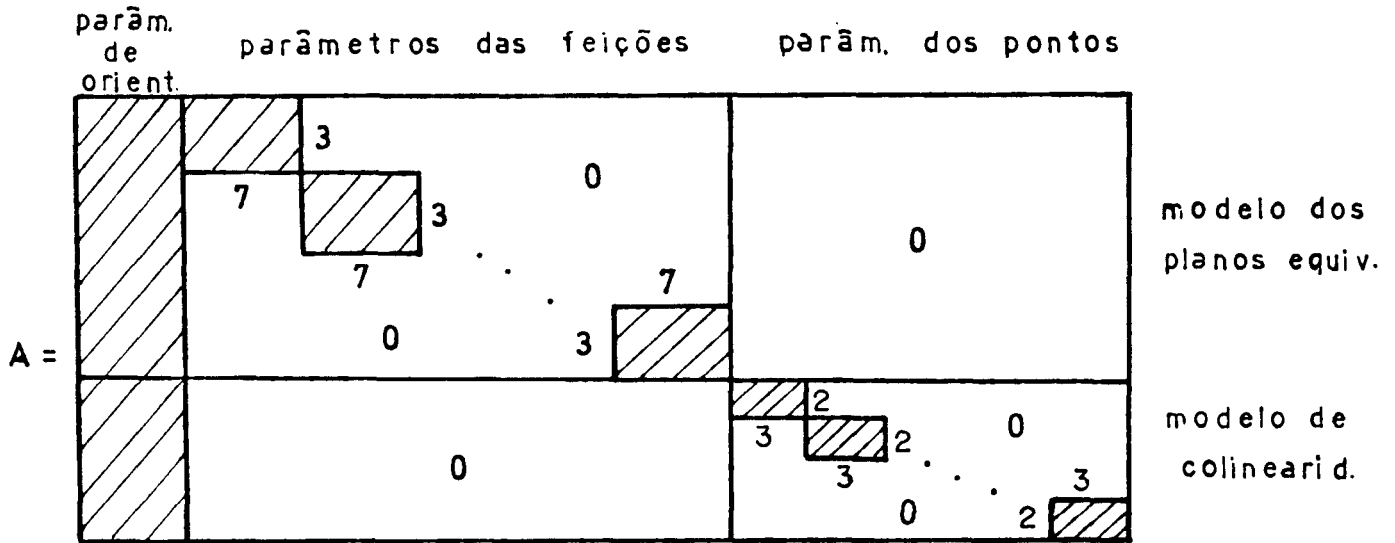


Fig. 2.3.1 Matriz A aumentada

Esta nova matriz A gerará um novo padrão para a matriz N

Fig. 2.3.2

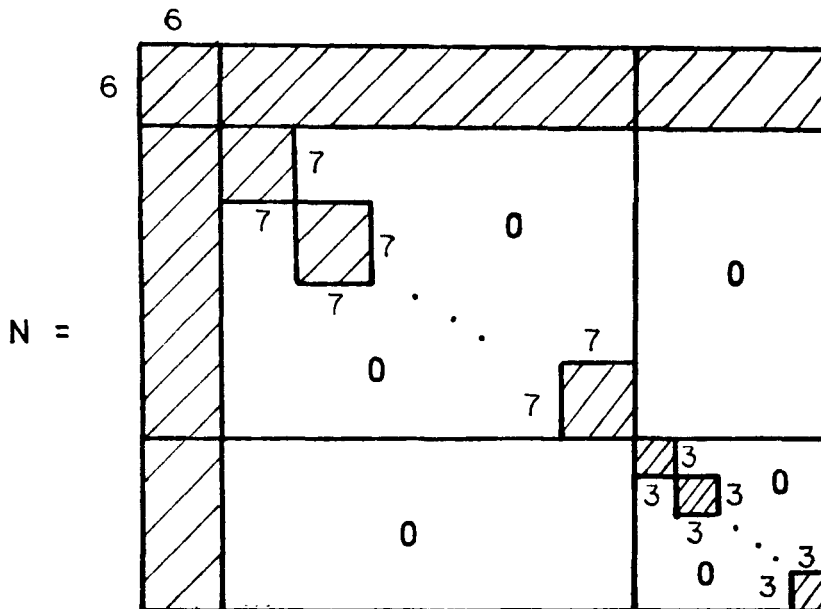


Fig. 2.3.2 Matriz N

O padrão da matriz peso neste caso será dado pela Fig.

2.3.3

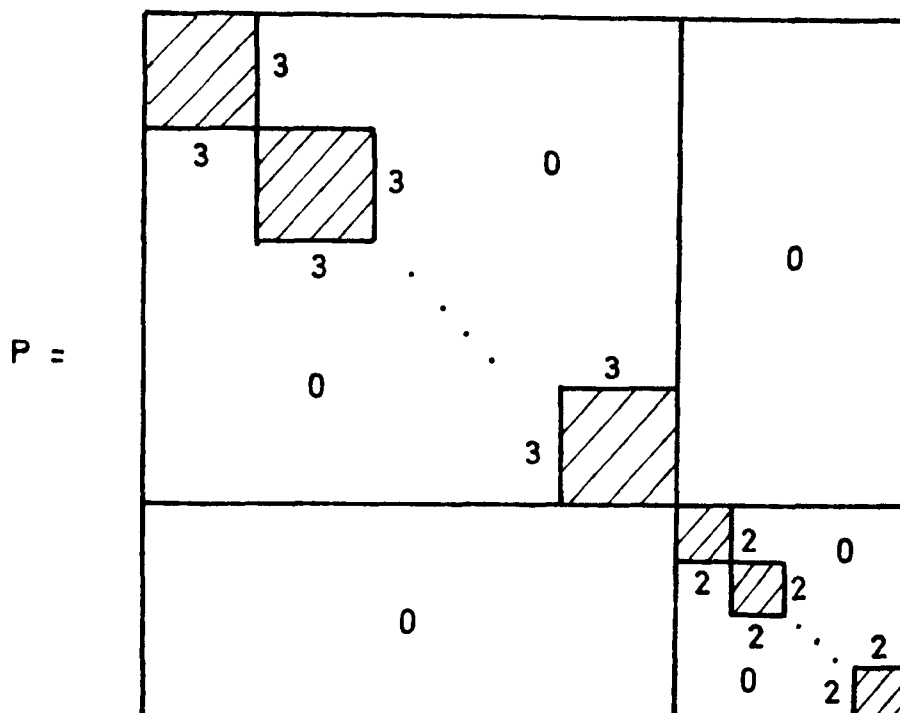


Fig. 2.3.3 Matriz Peso Completa

No caso da matriz peso, admitiu-se as fotocoordenadas relativas aos pontos simples como correlacionados entre si. Na prática são consideradas como isentas de correlação, reduzindo-se esta submatriz a uma diagonal.

2.4 Injunções Relativas de Posição

As injunções relativas de posição são um caso particular das injunções de peso /06/. As injunções de peso fazem com que os parâmetros das equações de observação atendam a uma determinada variância pré-fixada. No caso desta variância ser igual a zero as injunções serão ditas absolutas, caso contrário, serão ditas relativas.

No método dos parâmetros o modelo original é do tipo:

$$L_a = F(X_a) \quad (2.37)$$

As equações de injunção envolvendo o mesmo grupo de parâmetros serão dadas por:

$$L_x = G(X_a) \quad (2.38)$$

Linearizando as (2.37) e (2.38) tem-se:

$$AX + L = V \quad (2.39)$$

$$CX + L_c = V_c$$

A forma quadrática fundamental tomará a seguinte forma:

$$V^T P V = V^T P V + V_c^T P_c V_c \quad (2.40)$$

onde P_c é a matriz peso das injunções.

Substituindo as (2.39) na (2.40) e minimizando a expressão resultante, chega-se à solução

$$X = -(A^T P A + C^T P_c C)^{-1} (A^T P L + C^T P_c L_c) \quad (2.41)$$

A (2.41) representa o vetor correspondente as correções dos parâmetros aproximados sujeitos às restrições impostas pelas injunções.

As injunções relativas de posição permitirão a

introdução do controle existente (coordenadas dos pontos simples, feições conhecidas), definindo assim, o sistema do referencial do terreno e eliminando a deficiência de característica da matriz normal.

Este tipo de injunção estabelece um valor fixo para o parâmetro, isto é:

$$Lx = Xa \quad (2.42)$$

Com isto, a matriz C fica reduzida a uma matriz bloco identidade, levando à (2.41) a assumir a seguinte forma:

$$X = -(A^T P A + P_c)^{-1} (A^T P L + P_c L_c) \quad (2.43)$$

Pode-se concluir que para fixar determinado parâmetro basta somar, na posição correspondente da diagonal da matriz das equações normais, o peso da injunção e no vetor $A^T P L$ o produto $P_c L_c$.

2.5 O Modelo Digital do Terreno

Segundo F.LEBERL /12/, o estudo sobre o Modelo Digital do Terreno (DTM) iniciou por volta de 1955 quando o Massachusetts Institute of Technology tentava automatizar algumas fases referentes aos projetos de estradas.

O DTM é basicamente formado por:

- um grupo de pontos representativos da superfície do terreno armazenados na memória de um computador (*);
- um algoritmo para interpolar a coordenada Z de um ponto novo dadas suas coordenadas planimétricas.

O problema na interpolação de um DTM pode-se resumir nas seguintes etapas:

- dados P_i pontos conhecidos em um espaço de referência bidimensional;
- encontrar vetores incógnitos unidimensionais (cota Z) para P_k outros pontos em função dos vetores dos pontos conhecidos P_i .

A boa qualidade de um DTM depende principalmente dos seguintes fatores /12/:

- características do terreno (topografia);
- densidade e distribuição das medidas digitalizadas na superfície do terreno;

 (*) Estes pontos poderão ser determinados utilizando processos como: levantamento topográfico convencional, digitalização em modelos estéreo-fotogramétricos, ou digitalização de curvas de nível já existentes.

- método utilizado na interpolação dos pontos.

2.5.1 Interpolação da Coordenada Z

Na presente pesquisa, o DTM será apresentado como um conjunto de altitudes do terreno na forma de uma malha regular (Fig. 2.5.1), que poderá ser gerada utilizando interpoladores como: spline, bilinear, bicúbica e predição linear (*). Esta malha permitirá avaliar a coordenada Z de qualquer ponto definido planimetricamente dentro da mesma.

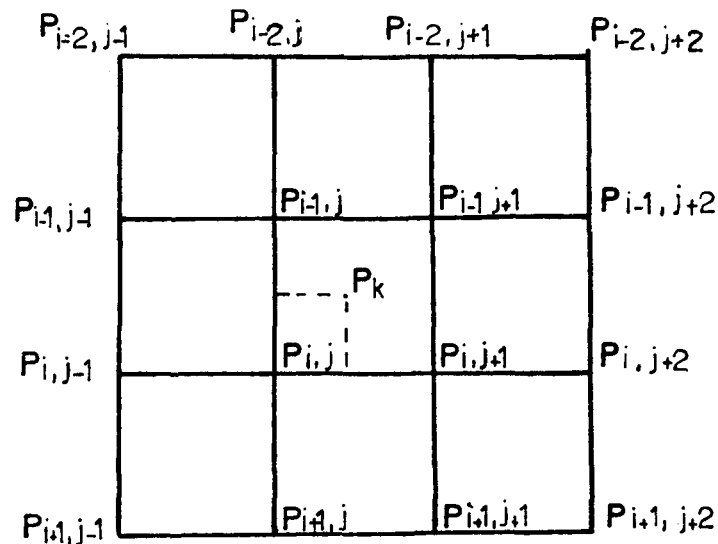


Fig 2.5.1 DTM representado na forma de uma malha regular.

 (*) São vários os trabalhos publicados nesta área. Aos interessados recomenda-se a leitura das referências /08/, /12/ /23/. Atualmente no Brasil, o mestrando, Júlio Cesar Menezes, está desenvolvendo pesquisa e software em trabalho de dissertação de mestrado do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da UFPR.

Quando um ponto P_k de coordenadas planimétricas conhecidas é locado no interior de uma célula que compõe esta malha (ver Fig. 2.5.1), sua coordenada Z poderá ser interpolada utilizando os quatro cantos (nós) que definem esta célula (pontos $P_{i-1,j}$; $P_{i-1,j+1}$; $P_{i,j}$; $P_{i,j+1}$). São vários os métodos de interpolação que poderão ser usados neste caso (quatro pontos conhecidos como referência), entre outros estão: Interpolador Bilinear, Predição Linear, Dupla Interpolação Linear.

Leberl / 12 / e Menezes /20/, após realizar testes envolvendo vários métodos de interpolação, em que foram avaliados critérios como precisão e esforço computacional, indicam a Interpolação Bilinear como apresentando excelentes resultados. Nesta dissertação foi escolhida como método de interpolação, a interpolação bilinear.

2.5.1.1 A Interpolação Bilinear

A interpolação bilinear resulta da aplicação de um polinômio bilinear de quatro termos que fica definido quando se tem quatro (4) pontos conhecidos como referência. Este polinômio é dado pela seguinte expressão:

$$Z = a_0 + a_1X + a_2Y + a_3XY \quad (2.44)$$

onde:

Z = altitude do ponto a ser interpolada;

X, Y = coordenadas planimétricas do ponto a ser interpolado no referencial do terreno;

a_0, a_1, a_2, a_3 = coeficientes do polinômio.

Os coeficientes a_0, \dots, a_3 são determinados para cada

célula através da solução de um sistema de quatro equações tipo (2.44), montadas a partir das coordenadas conhecidas dos quatro nós que definem cada célula da malha.

Uma solução numericamente mais atraente é a proposta por Schut /23/.⁰ Esta solução adota um sistema de coordenadas para cada célula da malha como mostra a Figura 2.5.2 e onde as coordenadas planimétricas dos quatro cantos da célula assumem os valores 0 ou 1. Com isto, a equação de interpolação poderá ser escrita como:

$$Z = Z_1 + (Z_2 - Z_1)X' + (Z_3 - Z_1)Y' + (Z_1 - Z_2 - Z_3 + Z_4)X'Y' \quad (2.45)$$

onde:

Z = altitude a ser interpolada;

Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 = altitudes correspondentes aos quatro cantos da célula;

X', Y' = coordenadas planimétricas do ponto a ser interpolado no sistema da célula e cujos valores variam entre 0 e 1.

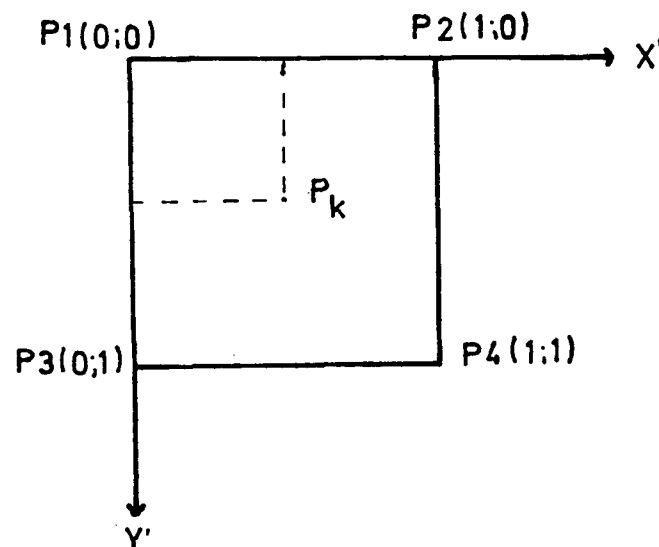


Fig. 2.5.2 Sistema de coordenadas da célula

Observa-se que o polinômio bilinear interpola linearmente ao longo dos limites de cada célula da malha, uma vez que neste caso, depende unicamente dos dois pontos que definem cada limite.

3 O SISTEMA DE ATUALIZAÇÃO

3.1 Configuração do Sistema

O sistema de atualização estudado nesta pesquisa compõe-se de três unidades básicas:

- a- uma unidade de medida (monocomparador);
- b- um computador digital com periféricos;
- c- uma unidade de saída (plotter).

Estas três unidades poderão operar tanto on-line como off-line. A Figura (3.1.1) mostra a configuração do sistema.

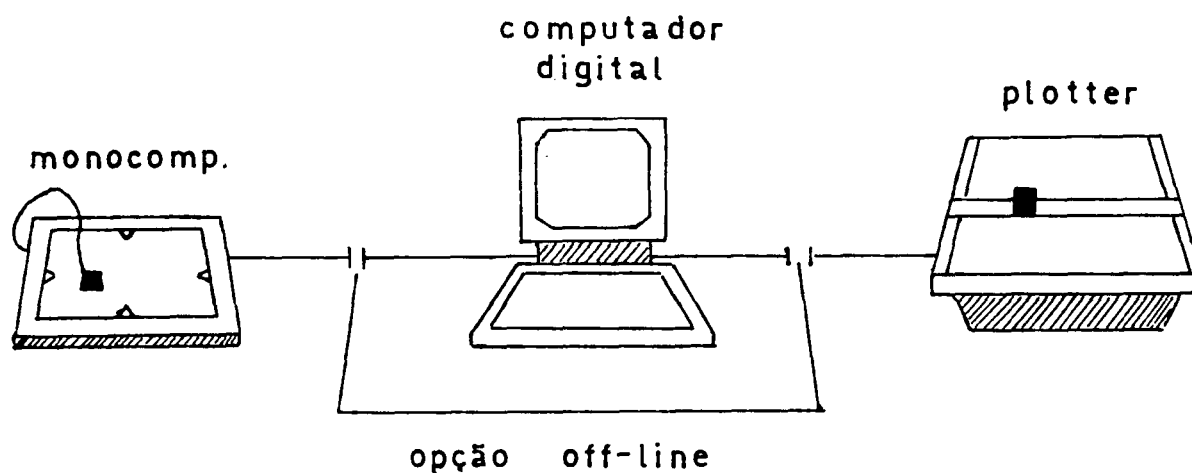


Fig. 3.1.1 Configuração do Sistema

3.2 Princípio de Funcionamento

O princípio de funcionamento do sistema consiste em transformar fotocoordenadas digitalizadas no monocomparador (sistema de máquina) em suas correspondentes coordenadas no sistema do mapa. Para isto se requer como dados de entrada:

- a- imagem da área (*);
- b- valores dos elementos de orientação interior e parâmetros aproximados da orientação exterior;
- c- o modelo digital do terreno (DTM) correspondente à área representada na imagem, na forma de uma malha regular;
- d- parâmetros que definem os diversos modelos matemáticos que se encarregam de corrigir os erros sistemáticos inerentes à imagem.

Definidos os dados de entrada, o computador digital do sistema desenvolverá duas tarefas básicas:

- a- cálculo dos parâmetros de orientação exterior da imagem;
- b- transformação das coordenadas de máquina da imagem em suas correspondentes coordenadas no sistema do mapa.

Os parâmetros de orientação externa serão calculados via resseção espacial utilizando pontos e (ou) feições retas como controle da forma descrita nos itens (2.2) e (2.3).

(*) Na presente pesquisa são utilizadas fotografias métricas verticais. Segundo Makarovic /17/, poderão ser usadas qualquer outro tipo de imagem (imagens de radar, satélite, sonar, etc) desde que seja levada em consideração sua respectiva geometria.

3.2.1 Transformação das coordenadas de máquina em coordenadas no sistema do mapa

3.2.1.1 Transformação das coordenadas de máquina em coordenadas no sistema geodésico local

De posse das fotocoordenadas refinadas dos pontos a serem transformados (*); do DTM referido ao sistema geodésico local; e dos parâmetros de orientação exterior, as coordenadas no sistema geodésico local de cada ponto medido na imagem serão calculados utilizando a forma inversa das equações de colinearidade dadas por /13/:

$$\begin{aligned} X &= \frac{m_{11}x + m_{21}y + m_{31}f}{m_{13}x + m_{23}y + m_{33}f} \cdot (Z - Z_0) + X_0 \\ Y &= \frac{m_{12}x + m_{22}y + m_{32}f}{m_{13}x + m_{23}y + m_{33}f} \cdot (Z - Z_0) + Y_0 \end{aligned} \quad (3.1)$$

onde:

m_{ij} = são os elementos da matriz rotação calculados pela própria resseção;

f = distância focal calibrada da câmara utilizada;

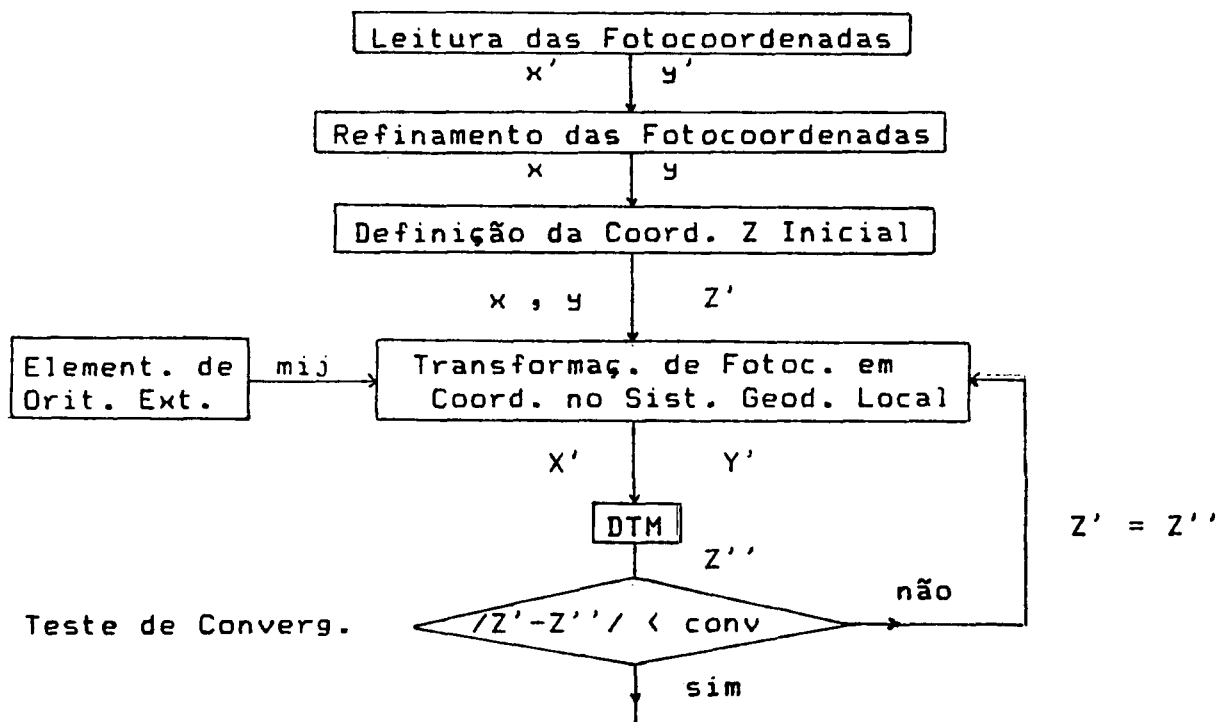
x, y = fotocoordenadas refinadas dos pontos a serem transformados;

X, Y, Z = coordenadas correspondentes a x, y no sistema do geodésico local.

X_0, Y_0, Z_0 = coordenadas do CP no sistema geodésico local dadas pela resseção.

 (*) Admite-se que as coordenadas de máquina tenham sido corrigidas dos erros sistemáticos e reduzidas ao sistema fotogramétrico (veja item 3.3).

O problema na utilização da Equação (3.1) está em determinar a coordenada Z correspondente a cada ponto medido na imagem. Esta coordenada é obtida fazendo uso de iterações (ver Fig.3.2.1.2) onde inicialmente parte-se de uma coordenada Z' aproximada para o ponto, que, substituída na Equação (3.1), gerará as coordenadas X' e Y' correspondentes a esta cota. Obtidas as X' e Y', entra-se na função de interpolação do DTM ($Z = f(X,Y)$) (Item 2.5.1.1) e calcula-se uma nova coordenada Z'' que será utilizada para gerar novas coordenadas X'' e Y'' via Equação (3.1). O processo repete-se até a diferença entre os dois últimos valores para a coordenada Z atinjam um determinado critério de convergência pré-estabelecido. Finalmente, tendo a coordenada Z calculada iterativamente, usa-se a Equação (3.1) para definir no sistema do geodésico local a posição do ponto medido na imagem (Coordenadas X, Y).



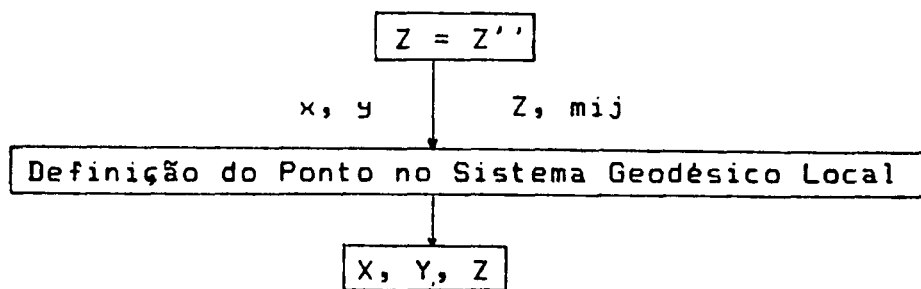


Fig. 3.2.1.1 Etapas envolvidas na Transformação das Coordenadas do Sistema de Máquina para o Sistema Geodésico Local.

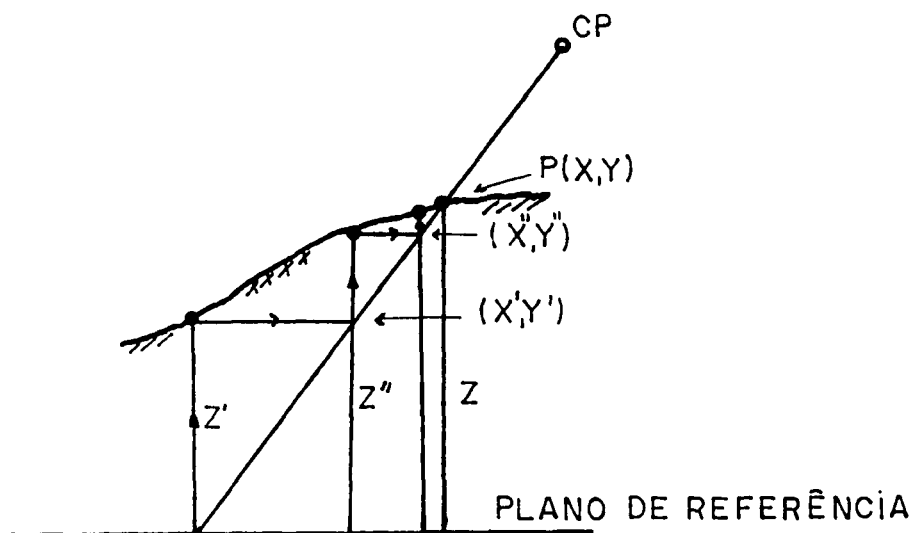


Fig. 3.2.1.2 Obtenção da cota Z por iteração

3.2.1.2 Cálculo das Coordenadas no Sistema do Mapa

Os mapas são construídos em sistemas bidimensionais, geralmente cartesianos, onde suas coordenadas são determinadas através de relações funcionais que ligam a superfície de referência (elipsóide) à superfície de projeção (mapa) (*).

Foi visto no item 3.2.1.1 que as Equações (3.1) determinam as coordenadas dos pontos a serem atualizados no sistema geodésico local. Torna-se necessário, transformar estas coordenadas para suas respectivas coordenadas no sistema do mapa. A transformação entre estes sistemas envolverá as seguintes etapas:

a- transformação das coordenadas do sistema geodésico local (X' , Y' , Z') para o sistema geodésico tridimensional (X , Y , Z);

b- transformação do sistema geodésico tridimensional para o sistema elipsoidal (λ , φ , H);

c- transformação do sistema elipsoidal para o sistema do mapa, no caso UTM (E , N).

Os sistemas de referências acima citados, bem como as transformações correspondentes poderam ser encontrados nas referências /10/ e /14/.

(*) No Brasil, é usualmente empregado no mapeamento topográfico em grandes escalas o sistema UTM (Universal Transverso Mercator) o qual é bem conhecido pela comunidade cartográfica.

O sistema de atualização estudado nesta dissertação faz uso de fotos singulares. Partindo-se do pressuposto que a curvatura da terra é desprezível neste tipo de imagem (área coberta limitada) e que o mapa a ser atualizado está no sistema UTM, pode-se substituir nas Equações (3.1), sem afetar a qualidade do mapa a ser atualizado, as coordenadas (X, Y) pelas correspondentes coordenadas no sistema do mapa (E, N) e a coordenada (Z) pela altitude (H) do ponto correspondente. Com isto, as Equações (3.1) assumirão a seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 E &= \frac{m_{11}x + m_{21}y + m_{31}f}{m_{13}x + m_{23}y + m_{33}f} \cdot (H - H_0) + E_0 \\
 N &= \frac{m_{12}x + m_{22}y + m_{23}f}{m_{13}x + m_{23}y + m_{33}f} \cdot (H - H_0) + N_0
 \end{aligned}
 \tag{3.2}$$

onde:

m_{ij} = são os elementos da matriz rotação calculados pela própria resseção (controle no sistema híbrido E, N, H);

f = distância focal calibrada da câmara utilizada;

x, y = fotocoordenadas refinadas dos pontos a serem transformados;

E, N = coordenadas no sistema UTM correspondentes a x, y ;

H = altitude geométrica (ortométrica) correspondentes a x, y ;

E_0, N_0 = coordenadas do CP no sistema UTM dado pela resseção;

H_0 = altitude geométrica (ortométrica) do CP dado pela

resseção.

As (3.2), fornecem as coordenadas dos pontos atualizados no sistema do mapa, prescindindo da transformação das coordenadas do sistema geodésico local para o sistema da carta (UTM). Experiências com as (3.2) são realizadas no item 4.5.

3.3 Refinamento das Fotocoordenadas

Na dedução das equações de colinearidade parte-se do pressuposto que o centro prespectivo, o ponto imagem e seu respectivo ponto objeto pertencem a uma linha reta. Na prática isto não acontece devido aos erros sistemáticos existentes. São eles: deformação do filme, distorções das lentes e refração fotogramétrica. Corrigidos estes erros, tem-se as imagens refinadas dos pontos do espaço imagem, podendo-se utilizar as equações acima mencionadas.

Os modelos matemáticos que corrigem convenientemente estes erros podem ser encontrados nas referências /05/, /06/, /21/.

3.4 Características do Sistema de Atualização

O Sistema de atualização apresentado tem as seguintes particularidades:

- utilização de fotografias aéreas singulares, livre da exigência de fotografar faixas contínuas, com recobrimentos, indispensáveis a formação de modelos estereoscópicos;

- esse tipo de fotografia é também mais econômico, exigindo planejamentos menos esmerados e em menor número nas áreas afetadas;

- a saída do sistema poderá ser dada de forma gráfica e (ou) digital (a saída digital torna-se atraente para fins de cadastro, aplicações na engenharia e na formação de bancos de dados para a Cartografia Digital);

- dependendo da capacidade de armazenamento e processamento do computador utilizado, o mesmo poderá assistir várias unidades de medida simultaneamente, gerando assim, dados para várias unidades de saída;

- o mesmo DTM poderá ser utilizado em futuras atualizações desde que não se verifiquem modificações na topografia;

- a maioria das operações envolvidas são automatizadas;

- as operações métricas, de fotointerpretação (entrada) e cartográfica (saída) são melhor definidas que nas compilações convencionais. Isto permite a utilização de pessoal experiente e especializado em cada uma das fases do processo, garantindo assim, um produto final de boa qualidade;

- o sistema também poderá ser utilizado na produção de mapas temáticos.

4 Testes e Resultados

4.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados testes realizados usando os programas implementados em microcomputador como exposto no Capítulo 3 , com dados simulados (ver item 4.2) e dados reais.

Os testes foram conduzidos em três fases diferentes: Na primeira são utilizados os dados simulados com o objetivo de verificar o bom funcionamento dos programas (*); na segunda, novos testes com dados simulados são efetuados com vistas a avaliar a qualidade dos resultados gerados pelos programas em função de: precisão das fotocoordenadas, geometria e tipo de controle utilizado na orientação da imagem e precisão do DTM; na terceira, são realizados os testes com os dados reais.

4.2 Geração dos dados simulados

Partiu-se inicialmente do pressuposto que se desejasse atualizar um mapa na escala 1:5000 com espaçamento entre curvas de nível igual a 5m, empregando uma fotografia aérea vertical na escala 1:9000 com distância focal de 153mm contendo

(*) Os testes com dados simulados permitem detectar a presença de erros de lógica e (ou) programação nos programas elaborados.

a área representada na carta. Para gerar esta imagem, empregou-se um programa para computador que tem como base teórica as equações de colinearidade que permitem relacionar coordenadas na imagem com suas homólogas no espaço objeto. Este programa tem como dados de entrada: a distância focal da câmara, os parâmetros da orientação exterior da imagem e as coordenadas no sistema do espaço objeto dos pontos cujas fotocoordenadas se quer determinar. Como saída, o programa apresenta as fotocoordenadas correspondentes aos pontos definidos no espaço objeto.

Admitiu-se para a geração da fotografia, uma área na qual estivessem presentes feições retas em diversos tamanhos, e distribuídas na imagem de tal forma a criar situações próximas a casos reais.

As coordenadas no sistema do espaço objeto (sistema do Mapa) estão referidas a um sistema cartesiano tridimensional definido conforme mostra a Fig. 4.2.1. O eixo das abscissas deste sistema admitiu-se como sendo paralelo à linha de vôo.

O DTM gerado para a área correspondente à foto na forma de uma malha regular quadrada tem lados de 300m (*) de comprimento e coordenadas Z para os nós de cada célula variando entre 140 e 160m. As coordenadas do DTM estão referidas ao sistema tridimensional do espaço objeto (Veja Fig. 4.2.1).

(*) A escolha deste valor foi feita visando a diminuição do esforço computacional requerido no cálculo das coordenadas.

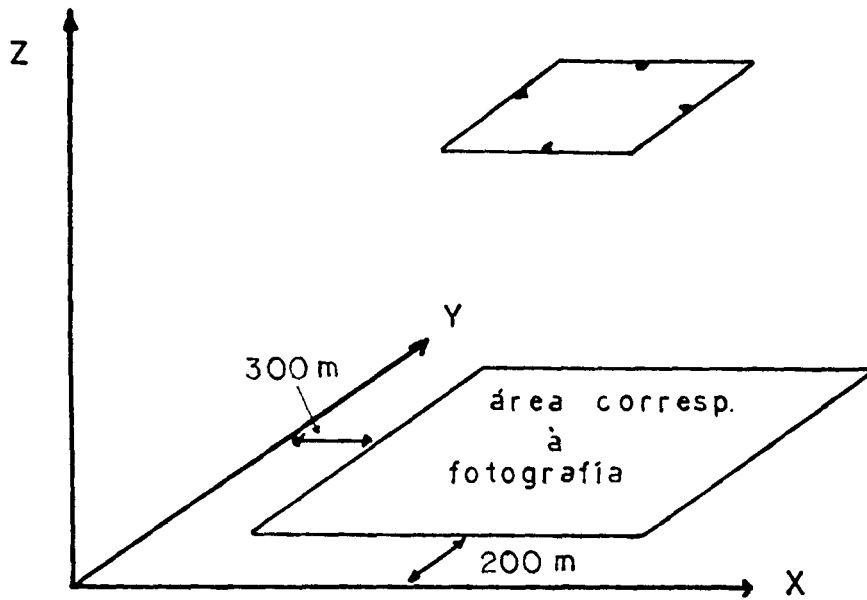
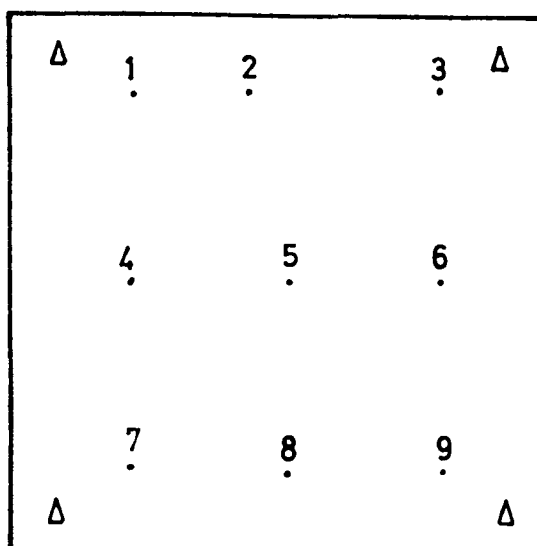


Fig. 4.2.1 Sistema do Espaço Objeto utilizado para gerar os dados simulados.

4.3 Testes com dados simulados

4.3.1 Teste utilizando pontos de controle

Foram gerados um total de treze (13) pontos dentre os quais quatro (4) são utilizados como controle e nove (9) como verificação. A distribuição destes pontos na imagem é dada conforme mostra a Fig. 4.3.1.1.



Δ ponto de controle

• ponto de verificação

Figura 4.3.1.1 - Distribuição dos pontos de controle e de verificação para o teste com pontos de controle.

Os resultados obtidos no teste são apresentados nas Tabelas 4.3.1.1 e 4.3.1.2 (*).

(*) Nos testes com dados simulados foram utilizadas as Equações (3.1).

Parâmetro	Valor Aprox.	Valor Real	Valor Ajustado
Xo (m)	1449,00	1450,00	1450,00
Yo	1349,00	1350,00	1350,00
Zo	1539,00	1540,00	1540,00
ϕ (rad)	0	-0,017453	-0,017453
w	0	0,017453	0,017453
k	0	0	0,000000

Tabela 4.3.1.1- Valores aproximados, reais e ajustados para os elementos de orientação externa usando pontos como controle

Ponto	Coord. Reais			Coord. Calculadas			Coord. Z (Aprox.)
	X (m)	Y (m)	Z (m)	Xc (m)	Yc (m)	Zc (m)	Zap (m)
1	700,00	2100,00	145,67	700,00	2100,00	145,67	100,00
2	1300,00	2100,00	148,22	1300,00	2100,00	148,22	100,00
3	2200,00	2100,00	150,47	2200,00	2100,00	150,47	100,00
4	700,00	1500,00	152,69	700,00	1500,00	152,69	100,00
5	1600,00	1500,00	158,31	1600,00	1500,00	158,31	100,00
6	2200,00	1500,00	157,53	2200,00	1500,00	157,53	100,00
7	700,00	600,00	152,34	700,00	600,00	152,34	100,00
8	1600,00	600,00	153,96	1600,00	600,00	153,96	100,00
9	2200,00	600,00	153,83	2200,00	600,00	153,83	100,00

Tabela 4.3.1.2 - Valores das coordenadas reais, calculadas e coordenada Z aproximada para os pontos de verificação

O teste apresentou convergência após 3 iterações. Observando-se os valores das coordenadas reais e calculadas para os pontos de verificação na Tabela 4.3.1.2, nota-se que os mesmos são idênticos. Pode-se concluir que o programa computacional implementado, utilizando pontos como controle está correto.

4.3.2 Teste utilizando pontos e feições retas como controle

Para a realização do teste foram geradas feições retas e pontos de controle conforme mostra a Fig. 4.3.2.1. As feições retas tem comprimentos de 900 e 1500m. Adotou-se os mesmos pontos de verificação utilizados no teste anterior.

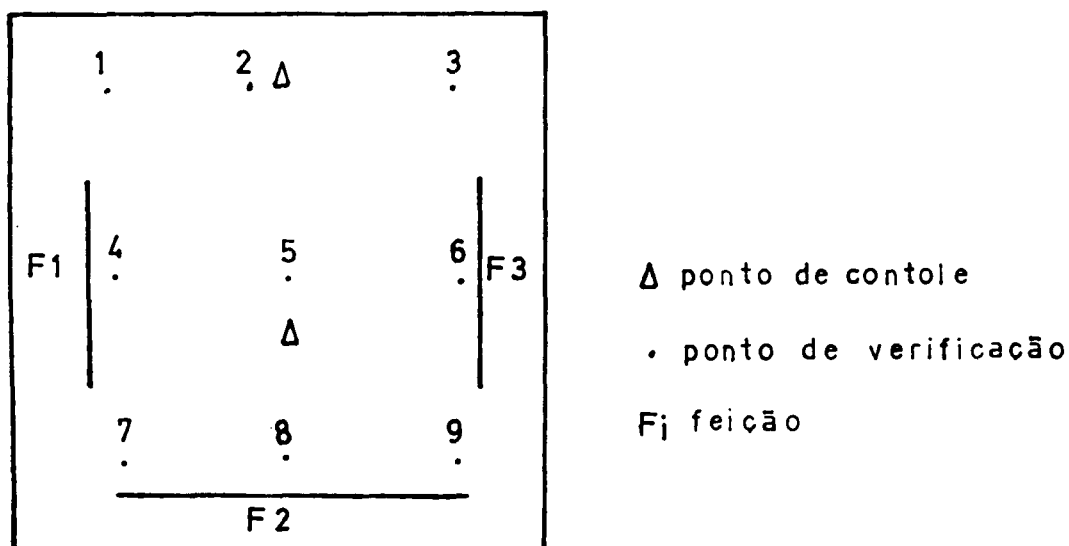


Figura 4.3.2.1 - Distribuição das feições retas, pontos de controle e de verificação para o teste com pontos e feições retas como controle.

Os resultados provenientes do teste estão expostos nas Tabelas 4.3.2.1 e 4.3.2.2 (*).

Parâmetro	Valor Inicial	Valor Real	Valor Ajustado
X ₀ (m)	1449,00	1450,00	1450,00
Y ₀	1349,00	1350,00	1350,00
Z ₀	1539,00	1540,00	1540,00
ϕ (rad)	0	-0,017453	-0,017453
w	0	0,017453	0,017453
k	0	0	0,000000

Tabela 4.3.2.1 Valores aproximados, reais e ajustados para os elementos de orientação externa usando pontos e feições retas como controle.

(*) Observa-se na Fig. 4.3.2.1 que a distribuição, bem como o comprimento das feições (muito longas), raramente ocorrerá na prática. A escolha das mesmas no presente trabalho está associada à limitação dos recursos computacionais disponíveis (microcomputador COBRA-PC). Na prática, a mesma qualidade no resultado final poderá ser obtida usando-se um número maior de feições (de menor comprimento) não alinhadas e não paralelas, entre si /26/.

Ponto	Coord. Reais			Coord. Calculadas			Coord. Z (Aprox.)
	X (m)	Y (m)	Z (m)	Xc (m)	Yc (m)	Zc (m)	Zap (m)
1	700,00	2100,00	145,67	700,00	2100,00	145,67	100,00
2	1300,00	2100,00	148,22	1300,00	2100,00	148,22	100,00
3	2200,00	2100,00	150,47	2200,00	2100,00	150,47	100,00
4	700,00	1500,00	152,69	700,00	1500,00	152,69	100,00
5	1600,00	1500,00	158,31	1600,00	1500,00	158,31	100,00
6	2200,00	1500,00	157,53	2200,00	1500,00	157,53	100,00
7	700,00	600,00	152,34	700,00	600,00	152,34	100,00
8	1600,00	600,00	153,96	1600,00	600,00	153,96	100,00
9	2200,00	600,00	153,83	2200,00	600,00	153,83	100,00

Tabela 4.3.2.2 Valores das coordenadas reais, calculadas e coordenada Z aproximada para os pontos de verificação.

O teste apresentou convergência após duas iterações. Observando-se os valores das coordenadas reais e calculadas nota-se que as mesmas são idênticas. Pode-se concluir que o programa implementado usando pontos e feições retas como controle está correto.

4.3.3 Teste utilizando feições retas como controle

Para este teste foram geradas 5 feições com distribuição na imagem como apresentado na Figura 4.3.3.1 . As feições geradas tem comprimentos variando entre 230 e 500m. Os pontos de verificação são os mesmos dos testes anteriores.

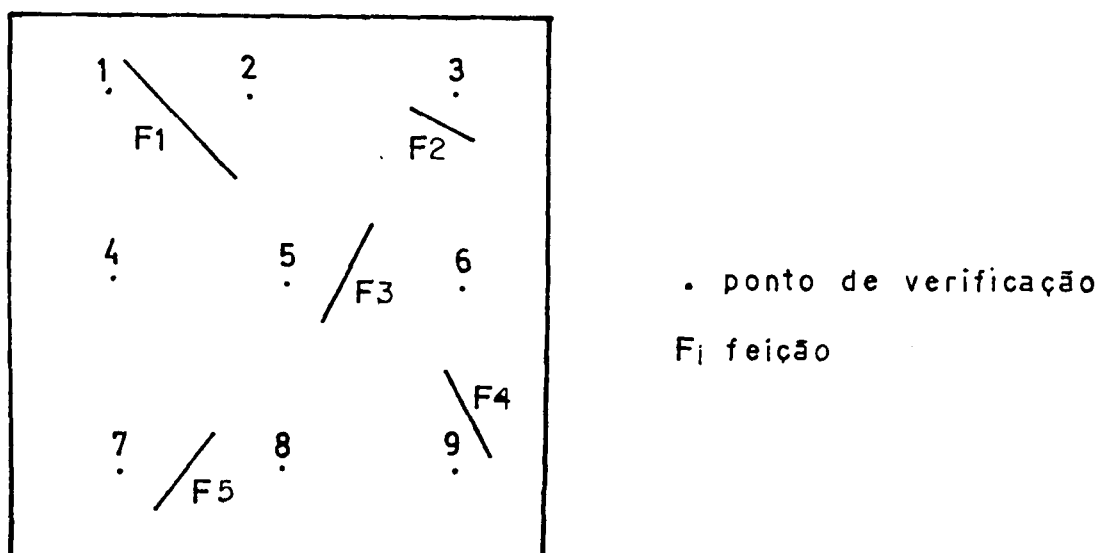


Figura 4.3.3.1 - Distribuição das feições retas e pontos de verificação para o teste com feições retas como controle.

Os resultados do teste são apresentados nas Tabelas 4.3.3.1 e 4.3.3.2 .

Parâmetro	Valor Aprox.	Valor Real	Valor Ajustado
Xo (m)	1449,00	1450,00	1450,00
Yo	1349,00	1350,00	1350,00
Zo	1539,00	1540,00	1540,00
ϕ (rad)	0	-0,017453	-0,017453
w	0	0,017453	0,017453
k	0	0	0,000000

Tabela 4.3.3.1 - Valores aproximados, reais e ajustados para os elementos de orientação externa usando feições retas como controle.

Ponto	Coord. Reais			Coord. Calculadas			Coord. Z (Aprox.)
	X (m)	Y (m)	Z (m)	Xc (m)	Yc (m)	Zc (m)	Zap (m)
1	700,00	2100,00	145,67	700,00	2100,00	145,67	100,00
2	1300,00	2100,00	148,22	1300,00	2100,00	148,22	100,00
3	2200,00	2100,00	150,47	2200,00	2100,00	150,47	100,00
4	700,00	1500,00	152,69	700,00	1500,00	152,69	100,00
5	1600,00	1500,00	158,31	1600,00	1500,00	158,31	100,00
6	2200,00	1500,00	157,53	2200,00	1500,00	157,53	100,00
7	700,00	600,00	152,34	700,00	600,00	152,34	100,00
8	1600,00	600,00	153,96	1600,00	600,00	153,96	100,00
9	2200,00	600,00	153,83	2200,00	600,00	153,83	100,00

Tabela 4.3.3.2 - Valores das coordenadas reais, calculadas e coordenada Z aproximada para os pontos de verificação.

O teste apresentou convergência após quatro iterações. Comparando-se os valores das coordenadas reais e calculadas observa-se que os mesmos são idênticos. Pode-se concluir que o programa implementado usando feições retas como controle está correto.

4.4 Análise da qualidade dos resultados apresentados pelos programas implementados

Esta fase de teste tem por objetivo avaliar a qualidade dos resultados gerados pelos programas implementados em função da: geometria e tipo de controle utilizado na orientação da imagem, precisão das fotocoordenadas e precisão do DTM. Esta análise permitirá fazer uma estimativa da qualidade dos dados a serem utilizados com vistas a manter os padrões de exatidão do mapa a ser atualizado.

Os dados simulados podem viabilizar um estudo dos programas sem a influência dos erros sistemáticos nas fotocoordenadas e com um DTM que represente a realidade física do terreno. Procedendo-se desta maneira, admite-se que, as diferenças entre as coordenadas resultantes no sistema do mapa para os pontos de verificação, sejam provenientes dos erros cometidos nas leituras das fotocoordenadas e da geometria e tipo de controle utilizado na orientação da imagem.

Para os testes que se seguem, admitiu-se para as fotocoordenadas um desvio padrão de 0,005mm. Com isto, introduziu-se nas fotocoordenadas simuladas erros randômicos equivalentes a três (3) vezes este desvio, ou seja, valores

aleatórios oscilando entre $\pm 0,015\text{mm}$, de modo a que as mesmas atendam a uma função densidade de probabilidade próxima a distribuição normal. Admitiu-se também, que as coordenadas dos pontos de controle tenham sido medidas com desvio padrão de $0,010\text{m}$ e que o DTM utilizado represente a realidade física do terreno.

4.4.1 Teste utilizando pontos como controle

A distribuição na imagem dos pontos de controle e verificação usados no teste é idêntica a utilizada para o teste apresentado no item 4.3.1. Os resultados obtidos estão nas Tabelas 4.4.1.1 e 4.4.1.2.

Parâmetro	Valor Real	Valor Ajustado	Desvio Padrão
Xo (m)	1450,00	1449,98	0,03
Yo	1350,00	1350,01	0,03
Zo	1540,00	1540,00	0,01
φ (rad)	-0,017453	-0,017481	0,0000
w	0,017453	0,017425	0,0000
k	0	0,000009	0,0000

- N de iterações até convergir = 3
- Variância da unidade de Pêso a priori : $\hat{\sigma}_0^2 = 1,0$
- Variância da unidade de Pêso a posteriori : $\hat{\sigma}_0^2 = 0,182$
- Graus de liberdade = 2
- Qui-quadrado calculado = 0,364
- Qui-quadrado teórico = 0,051 < χ^2 < 7,378

Tabela 4.4.1.1 Resultados da resseção e análise estatística do ajustamento usando pontos como controle.

Ponto	Coordenadas Reais			Coordenadas Calculadas		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	Xc (m)	Yc (m)	Zc (m)
1	700,000	2100,000	145,677	700,105	2099,882	145,679
2	1300,000	2100,000	148,223	1300,133	2099,849	148,226
3	2200,000	2100,000	150,476	2200,106	2099,899	150,478
4	700,000	1500,000	152,696	700,145	1499,856	152,698
5	1600,000	1500,000	158,318	1600,099	1499,902	158,319
6	2200,000	1500,000	157,538	2199,902	1500,119	157,537
7	700,000	600,000	152,341	699,942	600,052	152,342
8	1600,000	600,000	153,966	1599,966	600,030	153,967
9	2200,000	600,000	153,838	2199,988	600,027	153,839

Tabela 4.4.1.2 - Valores das coordenadas reais e calculadas para os pontos de verificação

A Tabela 4.4.1.1 mostra que o teste Qui-Quadrado (χ^2) a um nível de significância de 95%, não rejeita a hipótese básica $H_0 : \hat{\sigma}_o = \hat{\sigma}_o$.

A Tabela 4.4.1.3 apresenta os erros planimétricos (*) e altimétricos cometidos no cálculo das coordenadas para os pontos de verificação.

Os resultados obtidos no teste estão compatíveis com a precisão das observações.

(*) É denominado de erro planimétrico à resultante dos erros cometidos nas coordenadas X e Y.

Os erros apresentados na Tabela 4.4.1.3 são atribuídos à precisão mantida na leitura das fotocoordenadas, à geometria e tipo de controle utilizado na orientação da foto. O DTM não teve contribuição alguma já que admitiu-se que o mesmo representa a realidade física do terreno.

Ponto	Erro Planimétrico (m)	Erro Altimétrico (m)
1	0,158	-0,002
2	0,201	-0,003
3	0,146	-0,002
4	0,204	-0,002
5	0,139	-0,001
6	0,154	0,001
7	0,078	-0,001
8	0,045	-0,001
9	0,029	-0,001
Média dos erros	0,128	-0,001

Tabela 4.4.1.3 - Erros planimétricos e altimétricos nos pontos de verificação usando pontos como controle.

4.4.2 Teste utilizando pontos e feições retas como controle

A distribuição das feições e dos pontos de controle e verificação são idênticos aos utilizados no teste 4.3.2 . Os resultados para o teste são apresentados nas Tabelas 4.4.2.1 e 4.4.2.2 .

Parâmetro	Valor Real	Valor Ajustado	Desvio Padrão
Xo (m)	1450,000	1449,798	0,1877
Yo	1350,000	1349,769	0,1946
Zo	1540,000	1540,175	0,0816
ϕ (rad)	-0,017453	-0,017603	0,0001
w	0,017453	0,017588	0,0001
k	0	0,000127	0,0001

- $N^{\frac{D}{2}}$ de iterações até convergir = 3
- Variância da unidade de Pêso a priori : $\hat{\sigma}_0^2 = 1,0$
- Variância da unidade de Pêso a posteriori : $\hat{\sigma}_0^2 = 2,066$
- Graus de liberdade = 4
- Qui-quadrado calculado : $\chi_c^2 = 8,264$
- Qui-quadrado teórico : $0,484 < \chi < 11,143$

Tabela 4.4.2.1 - Resultados da resseção e análise estatística do ajustamento usando pontos e feições retas como controle.

Ponto	Coordenadas Reais			Coordenadas Calculadas		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	Xc (m)	Yc (m)	Zc (m)
1	700,000	2100,000	145,677	699,895	2099,882	145,678
2	1300,000	2100,000	148,223	1299,999	2099,960	148,224
3	2200,000	2100,000	150,476	2200,210	2100,175	150,473
4	700,000	1500,000	152,696	700,055	1499,760	152,698
5	1600,000	1500,000	158,318	1600,085	1499,922	158,319
6	2200,000	1500,000	157,538	2200,021	1500,216	157,536
7	700,000	600,000	152,341	700,035	599,970	152,341
8	1600,000	600,000	153,966	1600,041	599,991	153,966
9	2200,000	600,000	153,838	2200,131	600,017	153,839

Tabela 4.4.2.2 - Valores das coordenadas reais e calculadas para os pontos de verificação.

A análise estatística apresentada na Tabela 4.4.2.1, mostra que a hipótese $H_0 : \sigma_0^2 = \hat{\sigma}_0^2$ não é rejeitada para o teste Qui-quadrado (χ^2) a um nível de significância de 95%.

A Tabela 4.4.2.3 mostra os erros plani-altimétricos cometidos no cálculo das coordenadas para os pontos de verificação.

Ponto	Erro Planimétrico (m)	Erro Altimétrico (m)
1	0,158	-0,001
2	0,040	-0,001
3	0,273	0,003
4	0,246	-0,002
5	0,115	-0,001
6	0,217	0,002
7	0,046	0,000
8	0,042	0,000
9	0,132	-0,001
Média dos erros	0,141	-0,001

Tabela 4.4.2.3 - Erros planimétricos e altimétricos nos pontos de verificação usando pontos e feições retas como controle.

Os erros apresentados na Tabela 4.4.2.3 são atribuídos à precisão mantida na leitura das fotocoordenadas, à geometria e tipo de controle utilizado. Os resultados obtidos, também estão compatíveis com a precisão das observações utilizadas.

4.4.3 Teste utilizando feições retas como controle

A distribuição e o número de feições, bem como os pontos de verificação utilizados no teste são idênticos aos empregados no Teste 4.3.3 . Os resultados para o teste são apresentados nas Tabelas 4.4.3.1 e 4.4.3.2.

Parâmetro	Valor Real	Valor Ajustado	Desvio Padrão
Xo (m)	1450,000	1449,549	0,2871
Yo	1350,000	1349,485	0,4361
Zo	1540,000	1539,493	0,3554
ø (rad)	-0,017453	-0,017752	0,0002
w	0,017453	0,017920	0,0003
k	0	0,000045	0,0001

- \bar{O} de iterações até convergir = 3
- Variância da unidade de Pêso a priori : $\hat{O}_0^2 = 1,0$
- Variância da unidade de Pêso a posteriori : $\hat{O}_0^2 = 0,147$
- Graus de liberdade = 4
- Qui-quadrado calculado : $X_c^2 = 0,588$
- Qui-quadrado teórico : $0,484 < X < 11,143$

Tabela 4.4.3.1 - Resultado da resseção e análise estatística do ajustamento usando feições retas como controle

Ponto	Coordenadas Reais			Coordenadas Calculadas		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	Xc (m)	Yc (m)	Zc (m)
1	700,000	2100,000	145,677	700,209	2099,835	145,680
2	1300,000	2100,000	148,223	1300,069	2099,908	148,225
3	2200,000	2100,000	150,476	2200,056	2100,116	150,474
4	700,000	1500,000	152,696	700,426	1499,923	152,699
5	1600,000	1500,000	158,318	1599,987	1500,020	158,318
6	2200,000	1500,000	157,538	2199,705	1500,273	157,537
7	700,000	600,000	152,341	700,497	600,783	152,353
8	1600,000	600,000	153,966	1599,833	600,655	153,977
9	2200,000	600,000	153,838	2199,576	600,579	153,843

Tabela 4.4.3.2 - Valores das coordenadas reais e calculadas para os pontos de verificação

A análise estatística apresentada na Tabela 4.4.3.1 mostra que o teste Qui-quadrado a um nível de significância de 95%, não rejeita a hipótese $H_0 : \hat{\sigma}_o^2 = \hat{\sigma}_o^2$.

A Tabela 4.4.3.3 mostra os erros plani-altimétricos cometidos no cálculo das coordenadas dos pontos de verificação.

Ponto	Erro Planimétrico (m)	Erro Altimétrico (m)
1	0,158	-0,003
2	0,115	-0,002
3	0,129	0,002
4	0,433	-0,003
5	0,024	0,000
6	0,402	0,001
7	0,927	-0,012
8	0,457	-0,011
9	0,718	-0,005
Média dos erros	0,386	-0,004

Tabela 4.4.3.3 - Erros planimétricos e altimétricos cometidos nos pontos de verificação usando feições retas como controle

Os erros apresentados na Tabela 4.4.3.3 são atribuídos à precisão mantida na leitura das fotocoordenadas, à geometria e tipo de controle utilizado.

A média dos erros planimétricos e altimétricos se apresentou maior que a dos testes anteriores, isto indica que a geometria do controle na imagem é de qualidade inferior às utilizadas nos dois primeiros testes.

As Figuras 4.4.3.1 e 4.4.3.2 mostram graficamente, os erros planimétricos e altimétricos cometidos nos testes

realizados.

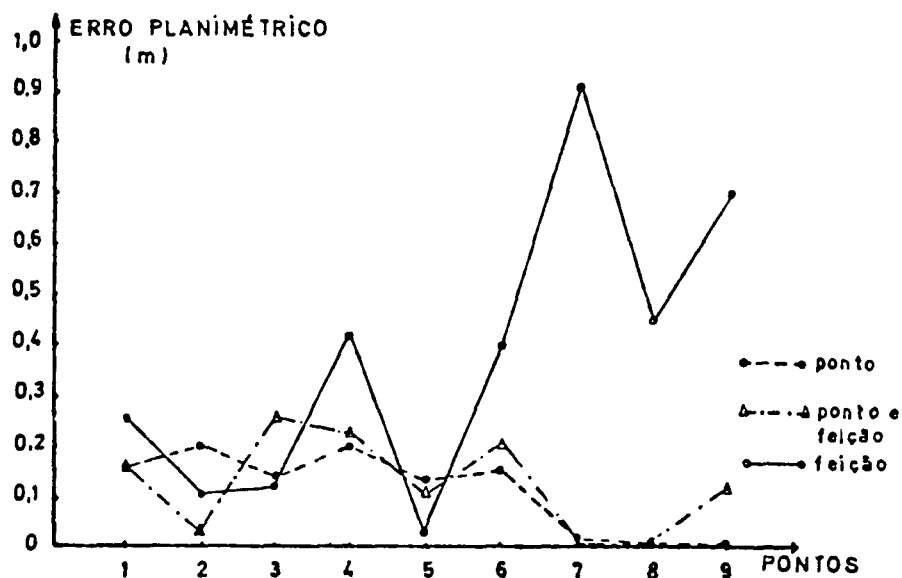


Fig. 4.4.3.1 Erros planimétricos nos pontos de verificação.

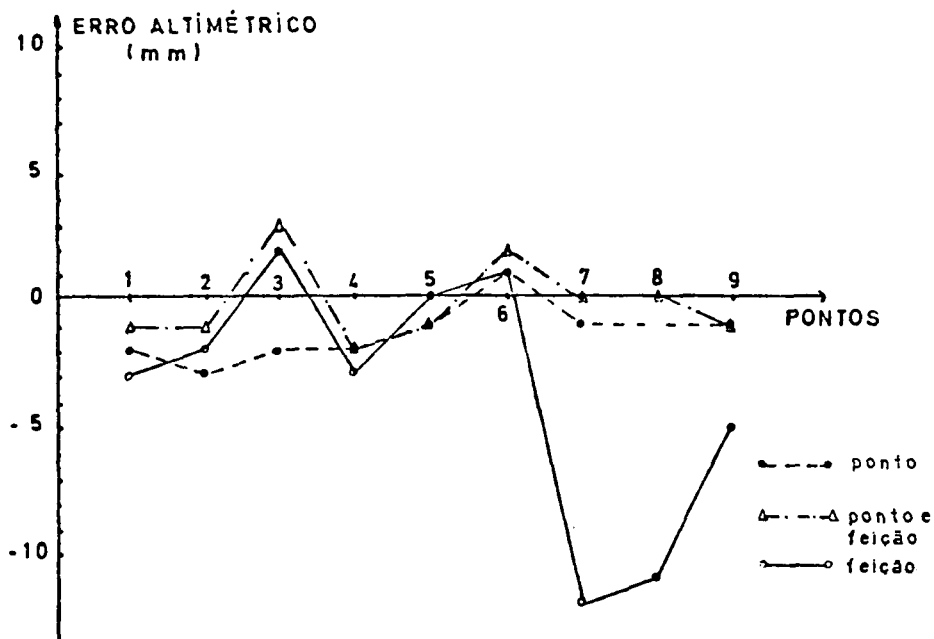


Fig. 4.4.3.2 Erros altimétricos nos pontos de verificação.

4.4.4 Contribuição da precisão das altitudes interpoladas pelo DTM no resultado dos programas

O objetivo desta fase de teste é estimar a qualidade dos resultados obtidos em função da precisão das altitudes interpoladas pelo DTM. A Tabela 4.4.4.1 apresenta os erros planimétricos nos pontos de verificação para o teste realizado no item 4.4.1, quando erros altimétricos (ΔZ) foram inseridos propositadamente na cota destes pontos. Observa-se que este tipo de erro afeta mais os pontos posicionados nos bordos da imagem, o que é justificado pela projeção cônica da fotografia.

Ponto	$\Delta Z=0m$	$\Delta Z=0,5m$	$\Delta Z=1,0m$	$\Delta Z=1,25m$	$\Delta Z=2,5m$	$\Delta Z=5,0m$
1	0,158	0,537	0,917	1,107	2,058	3,959
2	0,201	0,458	0,728	0,865	1,549	2,921
3	0,146	0,403	0,772	0,960	1,908	3,814
4	0,204	0,459	0,729	0,865	1,551	2,927
5	0,139	0,158	0,206	0,236	0,407	0,779
6	0,154	0,376	0,641	0,777	1,463	2,843
7	0,078	0,149	0,764	0,954	1,907	3,818
8	0,045	0,313	0,587	0,730	1,415	2,794
9	0,029	0,409	0,792	0,983	1,940	3,852
Média (m)	0,128	0,362	0,682	0,831	1,577	3,078
Erro Máx. (m)	0,204	0,537	0,917	1,107	2,058	3,959

Tabela 4.4.4.1 - Erros planimétricos nos pontos de verificação em função de erros na cota Z para o teste usando pontos como controle.

A Diretoria de Serviço Geográfico do Exército /07/ admite para as tolerâncias na restituição, as normas internacionais para as cartas classe A, as quais fixam que 90% dos elementos planimétricos bem definidos e testados devem estar posicionados com acuracidade superior a 0,5mm na escala final, se esta for igual ou menor que 1:20000, e 0,8mm em caso contrário. Para a altimetria, 90% das curvas de nível e pontos interpolados testados devem ter acuracidade superior à metade da equidistância, e os pontos cotados não devem exceder a quarta parte da mesma.

A partir dos erros planimétricos calculados na Tabela 4.4.4.1 e das especificações para as cartas classe A, a Tabela 4.4.4.2 apresenta a precisão com que deverá ser interpolada a coordenada Z de modo a manter a qualidade do mapa.

Mapa	Interv.C.	Erro Alt. Admis.	Erro Plmt.	Precis. Z	
	Nível (m)	P.Cot. (m)	P.Interp. (m)	Admis. (m)	P.Cot. P.Interp. (m) (m)
1:1000	1	0,25	0,5	0,8	0,25 0,50
1:2000	2	0,50	1,0	1,6	0,50 1,00
1:5000	5	1,25	2,5	4,0	1,25 2,50
1:10000	10	2,50	5,0	8,0	2,50 5,00

Tabela 4.4.4.2- Precisão a ser mantida na coordenada Z para o teste usando pontos como controle de modo a garantir as especificações exigidas para o mapa.

Da Tabela 4.4.4.2, observa-se que para preservar os padrões da carta 1:5000 (acuracidade horizontal e vertical) é necessário manter uma precisão na interpolação da coordenada Z

igual ou superior a 1,25m para os pontos cotados e para os pontos interpolados a mesma não deve ser inferior a 2,5m. Erros maiores na interpolação da coordenada Z poderão garantir a acuracidade horizontal exigida mas não a vertical (*).

A Tabela 4.4.4.3 mostra os erros planimétricos cometidos nos pontos de verificação para o teste realizado no item 4.4.2 quando erros altimétricos (ΔZ) foram inseridos propositadamente nas cotas destes pontos.

Ponto	$\Delta Z=0m$	$\Delta Z=0,5m$	$\Delta Z=1,0m$	$\Delta Z=1,25m$	$\Delta Z=2,5m$	$\Delta Z=5m$
1	0,158	0,419	0,785	0,972	1,917	3,814
2	0,040	0,314	0,589	0,726	1,413	2,787
3	0,273	0,114	0,494	0,685	1,639	3,548
4	0,246	0,438	0,689	0,821	1,495	2,865
5	0,115	0,136	0,188	0,220	0,396	0,772
6	0,217	0,299	0,534	0,663	1,338	2,713
7	0,046	0,338	0,769	0,960	1,915	3,824
8	0,042	0,262	0,536	0,674	1,363	2,741
9	0,132	0,319	0,692	0,881	1,834	3,745
Média (m)	0,141	0,299	0,586	0,733	1,479	2,979
Erro Máx. (m)	0,273	0,438	0,785	0,972	1,917	3,824

Tabela 4.4.4.3 - Erros planimétricos nos pontos de verificação em função de erros na coordenada Z para o teste usando pontos e feições retas como controle.

(*) Observa-se na Tabela 4.4.4.1 que um erro de até 5m na coordenada Z ainda pode preservar a precisão de 4m exigida para o mapa 1:5000.

Comparando-se os resultados das Tabelas 4.4.4.1 e 4.4.4.3, observa-se que para erros cometidos na interpolação da coordenada Z, o teste que utiliza pontos e feições retas como controle apresenta no resultado um erro planimétrico inferior. Este fato encontra justificativa na melhor distribuição do controle na imagem, no teste que utiliza pontos e feições retas.

A partir dos erros planimétricos calculados na Tabela 4.4.4.3, a Tabela 4.4.4.2 também apresenta a precisão com que deverá ser interpolada a coordenada Z de modo a manter a qualidade do mapa. As conclusões apresentadas no teste anterior verificam-se também, no presente teste.

A Tabela 4.4.4.4 apresenta os erros planimétricos cometidos nos pontos de verificação para o teste realizado no item 4.4.3 quando erros altimétricos (ΔZ), foram inseridos propositadamente na cota destes pontos.

Ponto	$\Delta Z=0m$	$\Delta Z=0,5m$	$\Delta Z=1,0$	$\Delta Z=1,25$	$\Delta Z=2,5m$	$\Delta Z=5m$
1	0,264	0,643	1,024	1,214	2,165	4,066
2	0,115	0,381	0,655	0,792	1,479	2,857
3	0,129	0,265	0,645	0,836	1,791	3,701
4	0,431	0,707	0,982	1,120	1,809	3,186
5	0,024	0,076	0,151	0,189	0,381	0,766
6	0,402	0,607	0,854	0,983	1,652	3,022
7	0,918	1,293	1,671	1,861	1,812	4,717
8	0,670	0,945	1,220	1,358	2,047	3,425
9	0,713	1,093	1,473	1,644	2,619	4,531
Média (m)	0,386	0,668	0,964	1,113	1,862	3,363
Erro Máx. (m)	0,918	1,293	1,671	1,861	2,812	4,717

Tabela 4.4.4.4 - Erros planimétricos nos pontos de verificação em função de erros na coordenada Z para o teste usando feições retas como controle.

Das três experiências realizadas, esta foi a que apresentou maior erro planimétrico. Evidencia-se assim, a influência da distribuição geométrica do controle no resultado dos programas.

A partir dos erros planimétricos mostrados na Tabela 4.4.4.4, é apresentada na Tabela 4.4.4.5 a precisão com que deverá ser interpolada a coordenada Z de modo a manter as especificações exigidas para o mapa.

Mapa	Interv.C.	Erro Alt. Admis.		Erro Plmt.		Precis. Z	
	Nível (m)	P.Cot. (m)	P.Interp. (m)	Admis. (m)	P.Cot. (m)	P.Interp. (m)	
1:1000	1	0,25	0,50	0,80	----	----	
1:2000	2	0,50	1,00	1,60	0,5	>1,0	
1:5000	5	1,25	2,50	4,00	1,25	2,5	
1:10000	10	2,50	5,00	8,00	2,50	5,0	

Tabela 4.4.4.5 - Precisão a ser mantida na interpolação da coordenada Z para o teste usando feições retas como controle de modo a garantir as especificações exigidas para o mapa.

A Tabela 4.4.4.5 mostra que para manter as especificações para o mapa 1:5000 é necessário obter uma interpolação na coordenada Z melhor ou igual que 1,25m para os pontos cotados e melhor ou igual que 2,5m para os pontos interpolados. Observa-se também, que o resultado do programa utilizando feições retas, compromete as especificações exigidas para o mapa 1:1000, isto porque um erro de 0m na altimetria contribui com um erro de até 0,918m na planimetria, valor maior

que o erro planimétrico admissível para a mesma.

Para garantir as especificações do mapa 1:2000 é necessário manter uma precisão igual ou superior a 0,5m na interpolação da coordenada Z para os pontos cotados e maior que 1m para os pontos interpolados.

A Fig. 4.4.4.1 mostra graficamente, os erros planimétricos cometidos nos pontos de verificação para cada teste realizado em função de um erro de 2,5m na coordenada Z destes pontos.

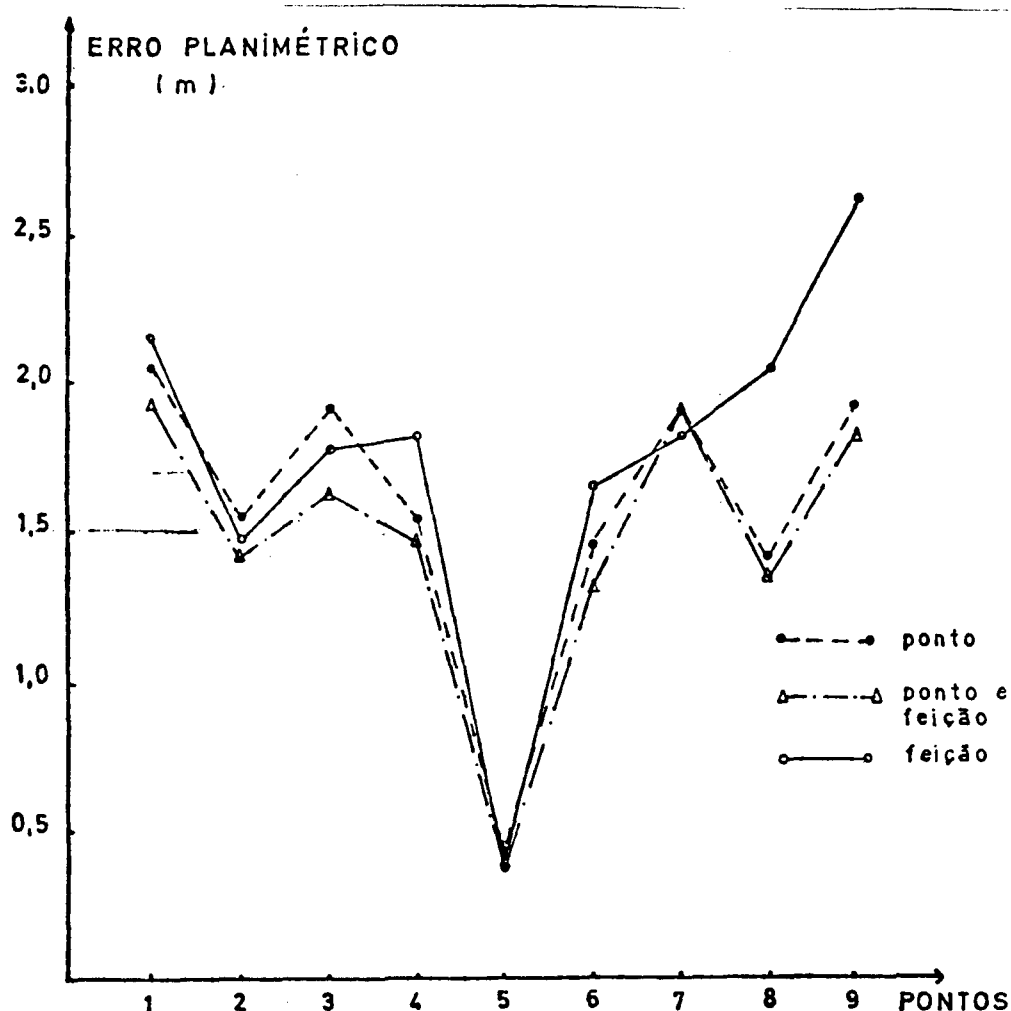


Fig. 4.4.4.1 Erros planimétricos nos pontos de verificação em função de um erro de 2,5m na coordenada Z destes pontos.

Após terminada esta fase de testes pode-se concluir que:

a - A qualidade dos resultados apresentados pelos programas estão dentro das normas exigidas pela DSG para as cartas classe A;

b - a distribuição geométrica e tipo de controle utilizado na orientação da imagem é de vital importância no resultados dos programas. Estudos mais pormenorizados a este respeito poderão ser encontrados nas referências /13/,/16/,/26/;

c - os pontos situados nas bordas da imagem, são mais afetados por erros na interpolação da coordenada Z;

d - a qualidade dos resultados utilizando feições retas como controle é compatível a obtida utilizando procedimentos clássicos.

4.5 Teste com dados reais

4.5.1 Introdução

Esta fase de teste apresenta os resultados obtidos quando utilizado dados reais, as equações (3.2) e controle convencional na orientação da fotografia.

Como área de teste foi utilizada uma região localizada ao sul-oeste do estado de Pernambuco nas proximidades da cidade de Orocó. Empregou-se uma fotografia aérea vertical com escala aproximada de 1:32000 contendo um total de 19 pontos aerotriangulados (*). As coordenadas de imagem foram medidas em um restituidor analítico BC-1 de propriedade da Empresa Aerosul S.A., com precisão na leitura das fotocoordenadas de 0,010mm. A precisão final na aerotriangulação foi de 0,322m na planimetria e de 0,344m para a altimetria. O DTM (no sistema híbrido E, N, H) correspondente a área, foi apresentado na forma de uma malha regular quadrada com lados de 50m de comprimento, gerado pelo programa SORA da Wild, a partir de dados obtidos da restituição estereo-fotogramétrica do modelo correspondente.

Com os dados utilizados nesta fase de teste, pretende-se produzir um mapa na escala 1:10 000, com intervalos entre curvas de nível igual a 10m.

Todos os dados utilizados foram gentilmente cedidos pela empresa Aerosul S.A..

(*). Coordenadas planimétricas no sistema de projeção cartográfica UTM e coordenada Z igual à altitude ortométrica.

4.5.2 Precisão do DTM

Para ter uma estimativa da precisão das altitudes (Coordenada H) interpoladas na malha do DTM, identificou-se na mesma, a célula correspondente a cada ponto aerotriangulado, foi aplicada a interpolação bilinear, e calculada a cota correspondente para o ponto. O resultado obtido para cada ponto é comparado com aquele proveniente da aerotriangulação. A maior discrepância encontrada foi de 6,061m e a menor de 0,394m.

4.5.3 Teste Prático N^o 1

Dentre os pontos aerotriangulados, 4 foram escolhidos como controle e 12 como verificação. Sua distribuição na imagem é apresentada na Figura 4.5.3.1.

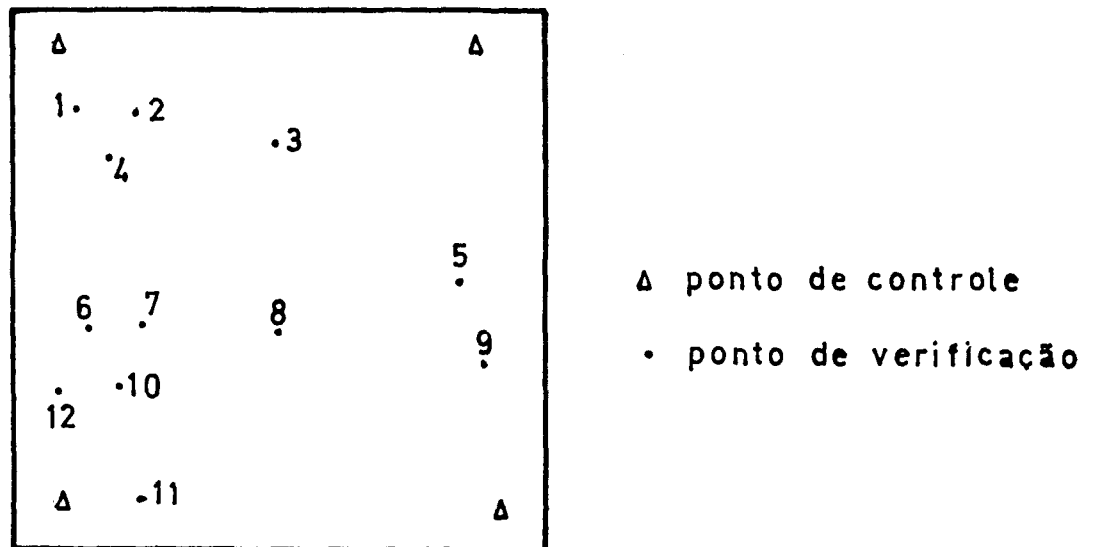


Figura 4.5.3.1 Distribuição dos pontos de controle e verificação na imagem (teste prático N^o 1)

Os resultados obtidos no teste são apresentados nas Tabelas 4.5.3.1 e 4.5.3.2 (*).

Parâmetro	Valor Ajustado	Desvio Padrão
E'o (m)	31116,2407	1,2022
N'o	6654,6867	1,2647
H ₀	5526,4710	0,4021
∅ (rad)	0,0003743	0,0002
w	-0,0051478	0,0002
k	1,6025632	0,0001

- N^o de iterações até convergir = 4
- Variância da unidade de Peso a priori : $\hat{\sigma}_0^2 = 1,0$
- Variância da unidade de Peso a posteriori : $\hat{\sigma}_0^2 = 1,425$
- Graus de liberdade = 2
- Qui-quadrado calculado = 2,85
- Qui-quadrado teórico = $0,051 < X < 7,378$

Tabela 4.5.3.1 Resultado da resseção e análise estatística do ajustamento para o teste prático N^o 1

(*) Com o objetivo de reduzir o número de dígitos necessários para expressar as coordenadas E e N durante o processamento, foi adotado um sistema cartesiano bidimensional auxiliar (E', N') com origem nas proximidades da área envolvida no processamento. Assim, as coordenadas (E, N) e (E', N') estão relacionadas por uma simples translação de origem: $E = E' + 400\ 000,000$ e $N = N' + 9\ 040\ 000,000$.

Ponto	Coordenadas Aerotriang.			Coordenadas		Calculadas
	E' (m)	N' (m)	H (m)	E' _c (m)	N' _c (m)	H _c (m)
1	28221,710	8525,844	376,474	28224,657	8524,551	382,147
2	28975,467	8406,974	373,573	28973,912	8408,193	372,745
3	31113,716	8254,133	382,537	31112,286	8254,983	384,492
4	28651,579	7892,069	362,723	28651,930	7892,205	365,846
5	33762,030	6852,089	336,389	33760,608	6853,707	338,113
6	28457,189	5614,239	348,846	28455,813	5614,945	349,292
7	29004,677	5636,375	344,106	29003,840	5637,156	345,193
8	31103,348	5019,633	339,646	31101,167	5018,542	336,007
9	33919,209	5035,729	335,340	33918,113	5035,811	336,008
10	28831,659	4942,150	336,446	28830,564	4941,829	336,054
11	29044,568	3524,082	338,835	29043,564	3524,224	339,440
12	28227,177	4831,672	339,861	28224,417	4830,058	336,358

Tabela 4.5.3.2 Valores das coordenadas aerotrianguladas e calculadas para os pontos de verificação no teste prático N^o 1

A Tabela 4.5.3.1 mostra que o teste Qui-quadrado (χ^2) a um nível de significância de 95%, não rejeita a hipótese básica $H_0 : \hat{\sigma}_o^2 = \hat{\sigma}_o^2$.

A Tabela 4.5.3.3 mostra as discrepâncias plani-altimétricas entre as coordenadas aerotrianguladas e as coordenadas calculadas bem como, a discrepância entre a coordenada H aerotriangulada e a coordenada H interpolada diretamente do DTM (veja item 4.5.2).

Ponto	Discrep. Planim. (m)	Discrep. Altm. (m)	Haerotg.-Hdtm (m)
1	3,218	-5,673	-6,061
2	1,975	0,828	0,888
3	1,660	-1,955	-2,013
4	0,376	-3,123	-3,126
5	2,150	-1,724	-1,692
6	1,550	-0,446	-0,396
7	1,145	-1,087	-1,088
8	2,438	3,639	3,646
9	1,099	-0,668	-0,603
10	1,141	0,392	0,394
11	1,014	-0,605	-0,603
12	3,197	3,503	3,493
média	1,747	-0,576	-0,601

Tabela 4.5.3.3 Discrepâncias Plani-Altimétricas e discrepâncias entre a coordenada H aerotriangulada e coordenada H interpolada diretamente do DTM nos pontos de verificação (Teste prático N^o 1).

Levando em consideração os padrões de exatidão do mapa 1:10000 (acuracidade planimétrica admissível de 8m, acuracidade altimétrica de 2,5m para os pontos cotados e de 5m para os pontos interpolados), observa-se na Tabela 4.5.3.3, que todos os pontos de verificação satisfazem a especificação planimétrica exigida. Dito (8) pontos satisfazem a discrepância altimétrica para os pontos cotados, e 11 dos 12 pontos de verificação se enquadram na tolerância dos pontos interpolados.

A Tabela 4.5.3.3 mostra também, que os pontos que não atendem as especificações altimétricas para os pontos cotados e interpolados, são aqueles que apresentaram maior

discrepância entre a coordenada H aerotriangulada e sua correspondente coordenada H interpolada do DTM. Com isto, verifica-se a importância da utilização de um DTM cuja precisão na interpolação venha a atender os padrões de exatidão exigidos para o mapa a ser atualizado.

4.5.4 Teste Prático N^o 2

Para o presente teste foram escolhidos 8 pontos como controle e 11 como verificação. A distribuição destes pontos é apresentada na Fig. 4.5.4.1.

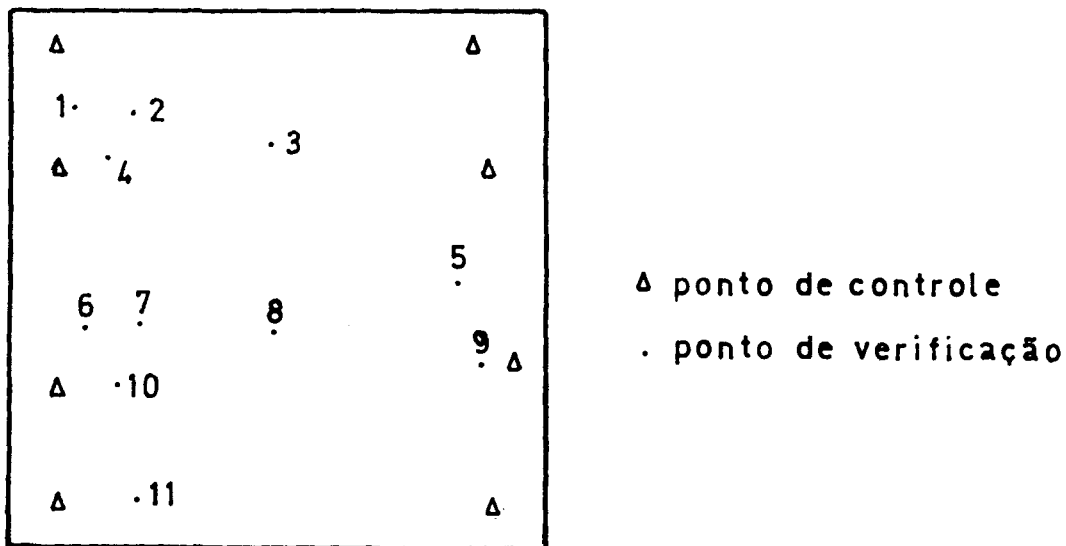


Figura 4.5.4.1. Distribuição dos pontos de controle e verificação na imagem (teste prático N^o 2)

Os resultados gerados no teste são apresentados nas Tabelas 4.5.4.1 e 4.5.4.2.

Parâmetro	Valor Ajustado	Desvio Padrão
E'o (m)	31115,9680	1,2230
N'o	6653,2853	1,0512
Ho	5525,8627	0,3583
θ (rad)	0,0003338	0,0002
w	-0,0049755	0,0002
k	1,6024938	0,0001

- $\frac{0}{N}$ de iterações até convergir = 4
- Variância da unidade de Peso a priori : $\sigma_0^2 = 1,0$
- Variância da unidade de Peso a posteriori : $\hat{\sigma}_0^2 = 1,935$
- Graus de liberdade = 10
- Qui-quadrado calculado = 19,35
- Qui-quadrado teórico : $3,247 < X < 20,483$

Tabela 4.5.4.1 Resultado da resseção e análise estatística do ajustamento para o teste prático $N \frac{0}{2}$

Ponto	Coordenada Aerotriang.			Coordenada Calculada		
	E' (m)	N' (m)	H (m)	E' _c (m)	N' _c (m)	H _c (m)
1	28221,710	8525,844	376,474	28224,937	8524,099	382,120
2	28975,467	8406,974	373,573	28974,119	8407,708	372,705
3	31113,716	8254,133	382,537	31112,335	8254,370	384,474
4	28651,579	7892,069	362,723	28652,203	7891,739	365,873
5	33762,030	6852,089	336,389	33760,325	6852,999	338,109
6	28457,189	5614,239	348,846	28456,134	5614,798	349,279
7	29004,677	5636,375	344,106	29004,064	5636,965	345,194
8	31103,348	5019,633	339,646	31100,995	5018,315	336,003
9	33919,209	5035,729	335,340	33917,520	5035,352	336,015
10	28831,659	4942,150	336,446	28830,824	4941,809	336,054
11	29044,568	3524,082	338,835	29043,777	3524,601	339,436

Tabela 4.5.4.2 Valores das coordenadas aerotrianguladas e calculadas para o teste prático N^o 2.

A Tabela 4.5.4.1 mostra que o teste Qui-quadrado (χ^2) a um nível de significância de 95%, não rejeita a hipótese básica $H_0 : \hat{\sigma}_0^2 = \hat{\sigma}_0^2$.

A Tabela 4.5.4.3 mostra as discrepâncias plani-altimétricas entre as coordenadas aerotrianguladas e as coordenadas calculadas bem como, a discrepância entre a coordenada H aerotriangulada e a coordenada H interpolada diretamente do DTM.

Ponto	Discrep. Planimt. (m)	Discrep. Altim. (m)	Haerot.-Hdtm (m)
1	3,668	-5,646	-6,061
2	1,535	0,868	0,888
3	1,401	-1,937	-2,013
4	0,706	-3,150	-3,126
5	1,932	-1,720	-1,692
6	1,194	-0,433	-0,396
7	0,851	-1,088	-1,088
8	2,697	3,643	3,646
9	1,731	-0,675	-0,655
10	0,902	0,392	0,394
11	0,946	-0,601	-0,603
média	1,597	-0,941	-0,973

Tabela 4.5.4.3 Discrepâncias Plani-altimétricas e discrepâncias entre as coordenada H aerotriangulada e a coordenada H interpolada diretamente do DTM nos pontos de verificação (Teste Prático N^o 2)

Observa-se da Tabela 4.5.4.3, que todos os pontos de verificação satisfazem a especificação planimétrica exigida para o mapa 1:10000. Oito (8) pontos satisfazem a discrepância altimétrica exigida pelo mapa para os pontos cotados, e dez (10) dos onze (11) pontos de verificação se enquadram na tolerância dos pontos interpolados. Como no teste prático N^o 1, observa-se também, que os pontos que não atendem as especificações altimétricas para os pontos cotados e interpolados foram aqueles que apresentaram maior discrepância entre a coordenada H aerotriangulada e a coordenada H interpolada diretamente do DTM.

Embora o grau de liberdade tenha aumentado no teste prático $N \frac{D}{2}$, não se verificaram mudanças significativas nos valores das coordenadas calculadas para os pontos de verificação.

As figuras 4.5.4.2 e 4.5.4.3 mostram graficamente as discrepâncias planimétricas e altimétricas encontradas nos testes práticos realizados.

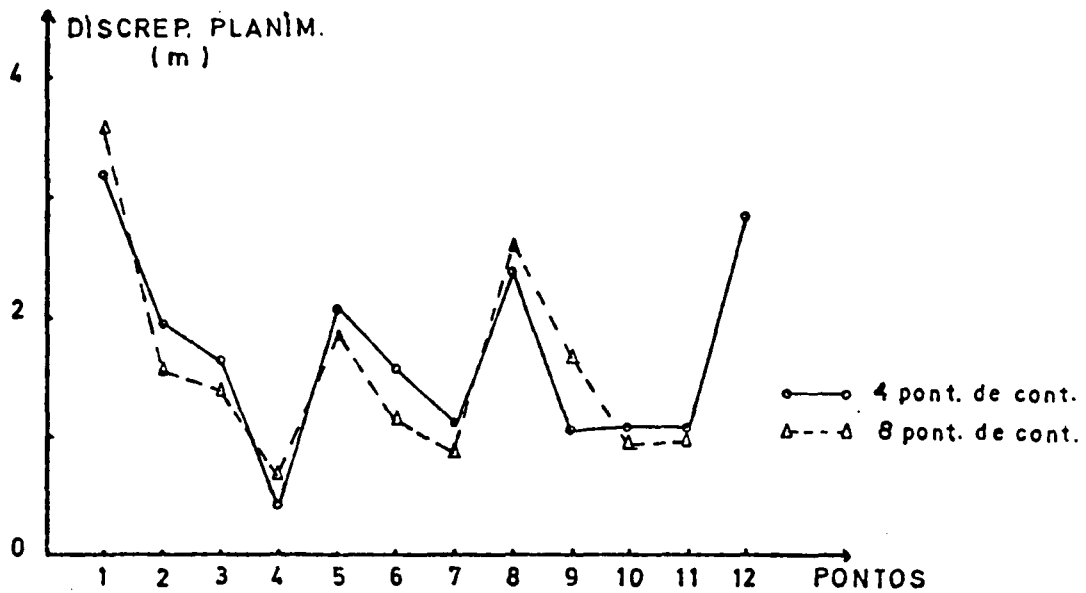


Fig. 4.5.4.2 Discrepâncias planimétricas entre as coordenadas aerotrianguladas e as coordenadas calculadas nos pontos de verificação.

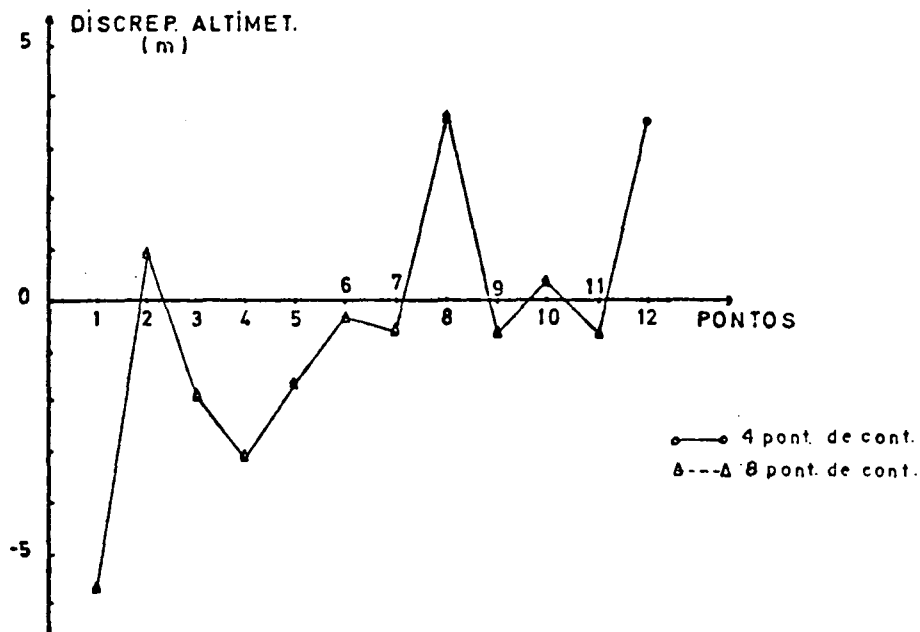


Fig. 4.5.4.3 Discrepâncias altimétricas entre as coordenadas aerotrianguladas e as coordenadas calculadas nos pontos de verificação.

5. Conclusões e Recomendações

5.1 Conclusões

Com base nos resultados obtidos nas várias experiências realizadas nesta dissertação podemos concluir que:

- O método de atualização testado funciona plenamente, apresentando resultados de qualidade, desde que feito um controle na qualidade das observações.

- Verificou-se no teste com dados reais, que as imposições feitas para gerar as equações (3.2) (Substituição das coordenadas X, Y, Z pelas coordenadas UTM (E, N) e a altitude H) no caso de fotos singulares, não afetam a qualidade do mapa a ser atualizado. Com isto, a atualização do mapa poderá ser feita, com vantagem de economia de tempo, diretamente no sistema UTM.

- A determinação dos elementos de orientação externa da imagem é uma das etapas mais importantes no processo de atualização de mapas utilizando fotos singulares. Surge a necessidade de se dispor de controle de campo em quantidade e qualidade suficiente em cada imagem a ser utilizada.

- Embora só testados com dados simulados, verificou-se que o uso de feições retas como controle na orientação da imagem, gera resultados na atualização compatíveis aos obtidos com o controle convencional. Se bem que o uso de feições retas contribui com um esforço computacional maior, as mesmas tem a seu favor, além da não correspondência um a um entre os pontos no espaço imagem e no espaço objeto, a vantagem de poderem ser

digitalizadas (*) e suas coordenadas poderem ser armazenadas em arquivos, tornando-se uma forma de controle quase que perene para futuros trabalhos de atualização. As feições retas são facilmente encontradas em regiões ocupadas pelo homem na forma de: arestas de edificações, eixos de estradas, rodovias, limites de propriedades, etc.. A utilização de feições retas digitalizadas constituem-se em uma atraente fonte de controle, na atualização de mapas digitais pelo método estudado.

- Com relação aos equipamentos que compõem o sistema de atualização, os mesmos são facilmente encontrados nas organizações que se encarregam da produção de mapas digitais, dispensando assim, a aquisição de novos equipamentos.

5.2 Recomendações

Apresenta-se como recomendações:

- Que sejam realizadas pesquisas empregando-se outros tipos de imagens, por exemplo: imagens da satélite, radar, fotos panorâmicas, fotos obtidas com câmaras de pequeno formato.

- Que sejam implementados programas para computador que utilizem além de pontos e feições retas, feições curvas como controle /16/, aumentando assim, as alternativas no que diz respeito ao aproveitamento do controle disponível na imagem.

(*) As coordenadas no espaço objeto de cada feição podem ser obtidas por: levantamentos geodésicos convencionais, digitalização em modelos estereoscópicos e digitalização em mapas já existentes.

- Que sejam realizados estudos que visem o controle de qualidade na geração da malha do DTM, pois dela depende a qualidade da atualização.

- Foi definida a atualização cartográfica como o processo de detectar, medir e registrar as mudanças no original cartográfico. Nesta dissertação foram tratadas as duas últimas etapas. Recomenda-se assim, que sejam realizadas pesquisas que visem a detecção das mudanças. Estudos a este respeito poderão ser encontrados nas referências /13/ e /19/.

- Que seja divulgado nos órgãos encarregados da produção cartográfica o método de atualização de mapas com fotos singulares bem como, os benefícios no uso de feições retas como controle.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- /01/ ALI, A. E. A Digital Monoplotting Experiment from Orbital Radar Imagery. *Australian Journal of Geodesy Photogrammetry and Surveying*, 44 (6):61-77,1986.
- /02/ ALMEIDA, J.F. *Ortofoto Digital*. Curitiba, Universidade Federal do Paraná. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, 1989. 100p. Dissertação de Mestrado.
- /03/ AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY. *Manual of Photogrammetry*, 4.ed. ASP, 1980.
- /04/ ANDRADE, J.B. Refração Fotogramétrica. *Boletim da Universidade Federal do Paraná*, Curitiba, 24 : 1-38,1980.
- /05/ ANDRADE, J.B. & OLIVAS, M.A.A. Calibração de Câmeras Aerofotogramétricas. *Boletim da Universidade Federal do Paraná*, Curitiba, 26: 1-40, 1981.
- /06/ DALMOLIN, Q. *Uma Alternativa para Contribuir no Apoio Cartográfico à Densificação Gravimétrica*. Curitiba, Universidade Federal do Paraná. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, 1988. 97p. Tese de Doutorado.
- /07/ D.S.G. *Restituição Fotogramétrica . Manual Técnico*, 1.ed. EME, 1976.
- /08/ EBNER, H. et alii. HIFI - A Minicomputer Program Package for Height Interpolation by Finite Elements. *International Archives of Photogrammetry*, Hamburg, 23 B9:532-545, 1980.
- /09/ GEMAEL, C. *Introdução ao Ajustamento de Observações: Aplicações Geodésicas*. Curitiba, Universidade Federal do Paraná. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas,

1984.

- /10/ ----- . Sistemas de Projeção. Curitiba, Universidade Federal do Paraná. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, 1976. 127p.
- /11/ KERS, A. Map revision: problems, equipment and methods. IIC Journal, 5:163-177, 1977.
- /12/ LEBERL, F. Interpolation in square grid DTM. IIC Journal, 5: 756-807, 1973.
- /13/ LUGNANI, J.B. Aprimoramentos para a Atualização Cartográfica. Curitiba, Universidade Federal do Paraná. Departamento de Geociências, 1985. 84p. Tese Professor Titular.
- /14/ ----- . Introdução à fototriangulação. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 1987, 134p.
- /15/ ----- . Introdução ao Ajustamento. Curitiba, Universidade Federal do Paraná. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, 1984.
- /16/ ----- . Using Digital Entities as Control. The University of New Brunswick. 1980. 159p. Thesis of Doctor of Philosophy.
- /17/ MAKAROVIC, B. Digital mono-plotters. IIC Journal, 4: 583-600, 1973.
- /18/ MASRY, S.E. Digital Mapping Using Entities: A New Concept. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 48 (11): 1561-1565, 1981.
- /19/ MASRY, S.E. & McLAREN, R.A. Digital Map Revision.

- Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 45(2):
193-200, 1979.
- /20/ MENEZES, J. C. Conversações Pessoais.
- /21/ MITISHITA, E.A. Detecção de erros grosseiros nas
aerotriangulações. Curitiba, Universidade Federal do
Paraná. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas,
1986. 245p. Dissertação de Mestrado.
- /22/ PONCIANO, E. ; CARNEIRO, J.; GRAJALES, P.E. Método de
Atualização de Mapas do Cadastro Urbano. Recife,
Universidade Federal de Pernambuco, 1988. 180p. Trabalho
de Graduação.
- /23/ SCHUT, G.H. Review of Interpolation Methods for Digital
Terrain Models. The Canadian Surveyor, 30(12):382-409,
1976.
- /24/ SILVA, T. Um Conceito de Cadastro Metropolitano. Curitiba,
Universidade Federal do Paraná. Curso de Pós-Graduação
em Ciências Geodésicas, 1979. 112p. Dissertação de
Mestrado.
- /25/ SOUZA, F.C.B. Orientação Absoluta de Modelos utilizando
Feições Digitalizadas como Controle. Curitiba,
Universidade Federal do Paraná. Curso de Pós-Graduação
em Ciências Geodésicas, 1982. 129p. Dissertação de
Mestrado.
- /26/ TOMMASELLI, A.M.G. Um Modelo Alternativo à Equação de
Colinearidade Utilizando Feições Retas. Curitiba,
Universidade Federal do Paraná. Curso de Pós-

Graduação em Ciências Geodésicas, 1988. 97p.
Dissertação de Mestrado.

/27/ VAN ZUYLEN, L. Map Revision. IIC Journal, 4: 490-502,
1976.

/28/ VIADANA, M.I.C.F. Modelos Matemáticos para Refinamento de
Imagens de Satélite IM Utilizando Feições Retas como
Controle. Curitiba, Universidade Federal do Paraná.
Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, 1989.
105p. Dissertação de Mestrado.