

Monorestituição Digital: Uma Solução para Mapeamento em grandes Escalas

Eng. Marcos Benedito Schimalski ¹
 Prof. Dr. Edson Aparecido Mitishita ²

UFPR – Setor de Ciências da Terra
 Departamento de Geociências
 Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas
 Curitiba PR

¹ ✉ marcosbs@geoc.ufpr.br

Conteúdo	
	1 Introdução
	2 Conceituação Teórica
	2.1 Monorestituição Digital
	2.2 Princípio
	2.3 Equações de Colinearidade
	2.4 Equações de Colinearidade Inversa
	3. Material e Métodos Utilizados
	3.1 Definição da Área de Estudo
	3.2 Material
	4. Metodologia
	5. Resultados
	6. Conclusões
	7. Referências Bibliográficas

Resumo: O estágio atual da informática adicionado a necessidade de informações rápidas e precisas impulsionou uma diversidade de usos para os Sistemas de Informações Geográficas (SIG). No entanto, uma das primeiras etapas a ser alcançada para viabilizar a implantação de um SIG é a elaboração de bases cartográficas atuais. O aerolevanteamento é o meio mais utilizado para este fim, devido à precisão e rapidez na obtenção das informações. Dentro desta área, a Monorestituição Digital aparece como uma solução alternativa para a geração/atualização de bases cartográficas digitais. Este artigo retrata a utilização da Monorestituição Digital como ferramenta para a produção de informação cartográfica urbana, bem como os testes comparativos com a restituição convencional (estereorestituição).

Resumo: La etapa actual de la informática más la necesidad de informaciones rápidas y precisas generó una diversidad de aplicaciones para los sistemas de Información Geográfica (SIG). Por ende, una de las primeras etapas a ser logradas para viabilizar la implantación de un SIG es la elaboración de bases cartográficas actualizadas. El aerolevantamiento es el medio más utilizado para este propósito, debido a la precisión y rapidez en la obtención de las informaciones. Dentro de esta área, la Monorestitución Digital aparece como una solución alternativa para la creación/actualización de bases cartográficas digitales. Este artículo trata del empleo de la Monorestitución Digital como herramienta para la producción de información cartográfica urbana y también las pruebas comparativas con la restitución convencional (estereorestitución).

1 Introdução

Na sua luta pela vida, o homem procura adaptar-se ao meio e transformá-lo, delimitando o espaço onde desenvolverá a sua vida. Durante séculos, pouca importância se deu a este fato. Porém, o incrível incremento populacional de áreas urbanas e a maneira pouco ordenada com que estes espaços tem sido ocupados tem preocupado as autoridades responsáveis, gerando questões relacionadas ao planejamento e gerenciamento da ocupação de espaço urbano. Como então, manipular, diagnosticar e propor soluções para essa grande massa de dados? Como obter informações rápidas e precisas provenientes desta massa de dados?

O surgimento de questões desta ordem, aliado a outro fator decisivo: o desenvolvimento tecnológico alcançado pela informática, habilitou, mesmo para pequenas cidades, a utilização dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG).

Porém, a primeira etapa a ser alcançada no sentido de implantar um SIG será a disponibilidade de mapas digitais atuais. O Aerolevanteamento utilizando-se da estereorestituição é a solução ideal, contudo, não acessível a maioria das prefeituras brasileiras devido ao fator custo. A Monorestituição Digital aparece como solução, pois o custo relativamente baixo de programas e equipamentos envolvidos além da necessidade de pessoal com nível de qualificação inferior ao método estereofotogramétrico, constitui-se em técnica atraente para estas instituições.

2 Conceituação Teórica

2.1 Monorestituição Digital

A Monorestituição Digital é o processo pelo qual a obtenção de informações para a geração de mapas é feita a partir de uma

aerofoto. Para que este trabalho tenha a precisão exigida é necessário a utilização de uma formulação matemática, que foi inicialmente proposta por MAKAROVIC (1973) (figura 01).

MITISHITA(1997), em sua tese de doutoramento desenvolveu e utilizou um sistema baseado no modelo mostrado na figura 01, visando a obtenção de mapas para a aplicação na área florestal. Os resultados encontrados em sua pesquisa provaram a viabilidade deste sistema.

Comparado ao modelo proposto por MAKAROVIC, que previa a utilização de aerofotos em formato analógico (papel), a Monorestituição em formato digital apresenta vantagens relacionadas a manipulação das imagens. Isto resulta em facilidades, principalmente, em relação a fotointerpretação pois o sistema computacional permite a ampliação em várias vezes estas imagens. Porém, vale citar que a Monorestituição apresenta os problemas relacionados com a obtenção de informações a partir de uma aerofoto, que dizem respeito a falta de estereoscopia.

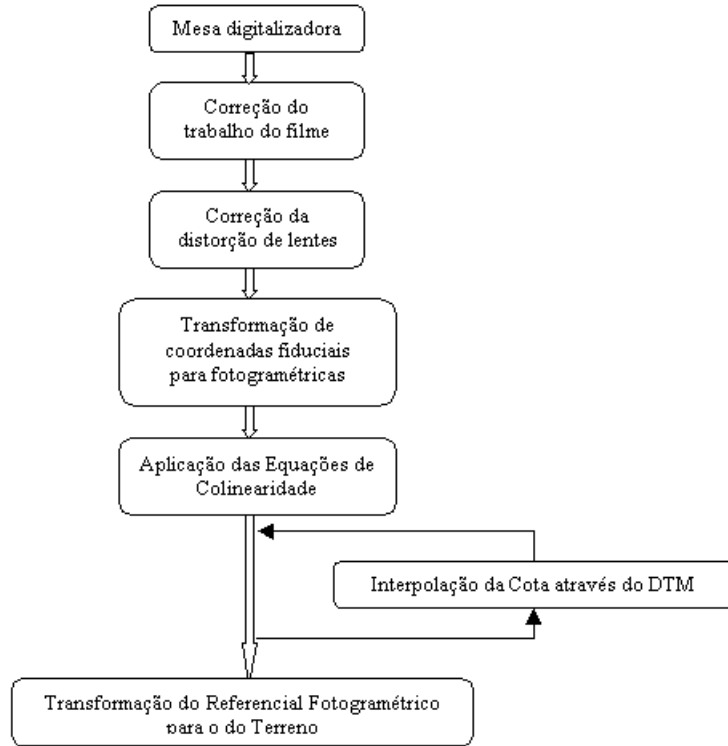


Fig. 1 : Metodologia proposta por MAKAROVIC

2.2 Princípio

Para a realização dos trabalhos propostos serão necessários:

- Representação altimétrica da área de interesse;
- Utilização de modelo matemático que relaciona observações obtidas na aerofoto e as suas respectivas coordenadas no terreno.

A informação altimétrica a ser utilizada será uma malha regular de pontos (grid) obtidos por interpolação matemática a partir de curvas de nível provenientes de mapeamento existente.

O modelo matemático funcional que será utilizado serão as consagradas equações de colinearidade.

2.3 Equações de Colinearidade

As equações de colinearidade satisfazem a hipótese básica de que o raio de luz propaga-se linearmente no espaço entre a câmara e objeto fotografado (Figura 02):

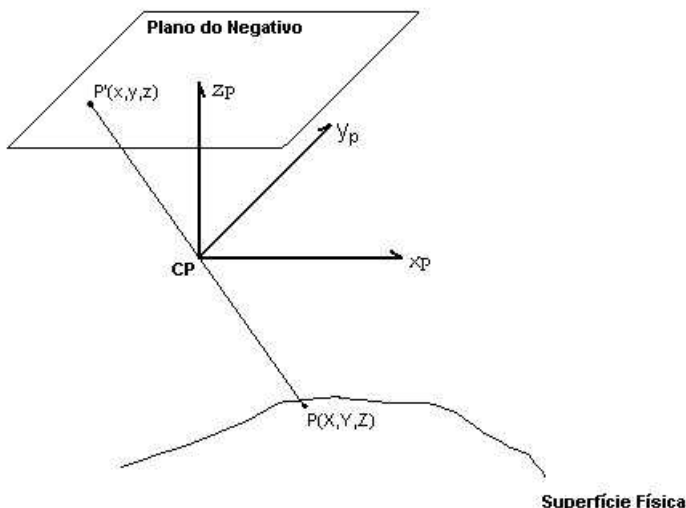


Fig. 2 : Hipótese básica das equações de colinearidade

onde:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$
 - Coordenadas do ponto P no espaço Objeto;

$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$ - Coordenadas do ponto P no espaço Imagem.

A dedução das equações de colinearidade é obtida através da equação da reta no espaço:

$$\frac{x}{X} = \frac{y}{Y} = \frac{z}{Z} \quad (1)$$

Na prática a colinearidade não ocorre devido aos erros sistemáticos:

- trabalho do filme;
- distorções das lentes;
- refração fotogramétrica.

Estes erros provocam um deslocamento do ponto imagem em relação a sua posição real. A correção dos erros sistemáticos pode ser feita com a parametrização ou a pré-correção destes erros, obtendo-se a condição de colinearidade. Baseado nas equações 01 obtêm-se duas equações linearmente independentes:

$$\left. \begin{aligned} x &= z \cdot \frac{X}{Z} \\ y &= z \cdot \frac{Y}{Z} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Para câmaras métricas z é constante para todos os pontos imagens no negativo. Este valor constante é igual a distância focal da câmara. Substituindo nas equações 02 resulta:

$$\left. \begin{aligned} x &= c \cdot \frac{X}{Z} \\ y &= c \cdot \frac{Y}{Z} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Porém, as coordenadas do espaço objeto estão referidas ao referencial fotogramétrico, o que para fins práticos deveria ser um referencial Geodésico Local (Figura 03).

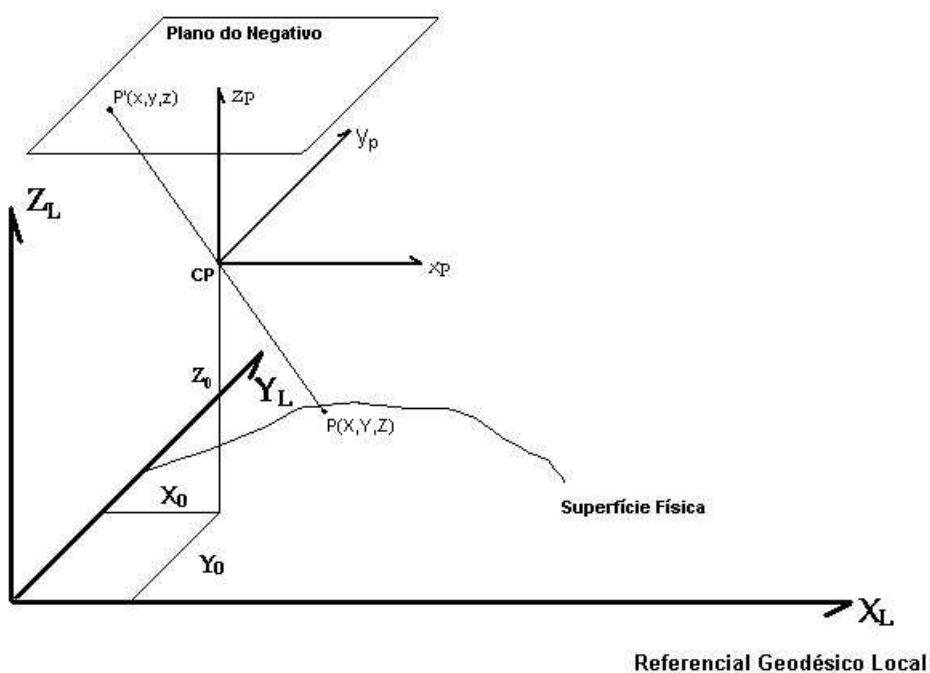


Fig. 3 : Relação entre o Referencial Geodésico Local e o Referencial Fotogramétrico

A partir da figura 03 e suas relações matemáticas obtêm-se:

$$\left. \begin{aligned} x &= c \cdot \frac{m_{11} \cdot (X - X_0) + m_{12} \cdot (Y - Y_0) + m_{13} \cdot (Z - Z_0)}{m_{31} \cdot (X - X_0) + m_{32} \cdot (Y - Y_0) + m_{33} \cdot (Z - Z_0)} \\ y &= c \cdot \frac{m_{21} \cdot (X - X_0) + m_{22} \cdot (Y - Y_0) + m_{23} \cdot (Z - Z_0)}{m_{31} \cdot (X - X_0) + m_{32} \cdot (Y - Y_0) + m_{33} \cdot (Z - Z_0)} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

As equações 04 relacionam coordenadas do espaço imagem com o espaço objeto (Equações de Colinearidade na forma direta).

2.4 Equações de Colinearidade Inversa

Foram apresentadas as equações de colinearidade na forma direta. Contudo, o que interessa são as coordenadas do espaço objeto (Referencial Geodésico Local) que podem ser obtidas pelas Equações de Colinearidade Inversa. As equações de Colinearidade Inversa relacionam coordenadas do espaço objeto em função de observações no referencial fiducial, dos parâmetros de orientação das aerofotos e de coordenadas Z no terreno:

$$X = f (c, \kappa, \varphi, \omega, X_0, Y_0, Z_0, x, y, Z) \quad (5)$$

$$Y = f (c, \kappa, \varphi, \omega, X_0, Y_0, Z_0, x, y, Z) \quad (6)$$

onde:

- [x,y]^T – Coordenadas no Referencial Fotogramétrico;
- [X,Y,Z]^T – Coordenadas no Referencial Geodésico Local.
- (κ, φ, ω, X₀, Y₀, Z₀) – Parâmetros de orientação exterior de uma aerofoto.
- c – distância focal da câmara.

MITISHITA (1997), apresenta as deduções necessárias para a obtenção das equações de Colinearidade Inversa. Abaixo são apresentadas estas equações:

$$\left. \begin{aligned} X &= X_0 + (Z - Z_0) \cdot \frac{m_{11} \cdot x + m_{12} \cdot y + m_{31} \cdot c}{m_{13} \cdot x + m_{23} \cdot y + m_{33} \cdot c} \\ Y &= Y_0 + (Z - Z_0) \cdot \frac{m_{21} \cdot x + m_{22} \cdot y + m_{32} \cdot c}{m_{13} \cdot x + m_{23} \cdot y + m_{33} \cdot c} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

As equações 07 permitem a determinação de coordenadas no referencial Geodésico Local em função das coordenadas no referencial Fotogramétrico, parâmetros de orientação exterior de uma aerofoto e informação altimétrica do terreno.

3. Material e Métodos Utilizados

3.1 Definição da Área de Estudo

A área de pesquisa pertence ao quadro urbano da cidade da Lapa, no Estado do Paraná, distante cerca de 77 Km da capital do Estado, Curitiba. Foram escolhidas duas quadras dispostas em uma posição central na aerofoto de modo a se beneficiar a fotointerpretação (Figura 04).



Fig. 4 : Quadras utilizadas para a obtenção de informação planimétrica

3.2 Material

Foram utilizados os seguintes materiais para a realização da pesquisa:

- Cópias heliográficas das fotografias aéreas em escala 1:8.000 da área urbana da cidade de Lapa;
- Fotografias aéreas em escala 1:8.000 em formato digital (.tif);
- Certificado de Calibração da Câmara Aérea;
- Arquivos de aerotriangulação contendo os pontos codificados com coordenadas UTM necessários as orientações;
- Arquivos digitais em escala 1:2.000, produzidos por restituição convencional contendo a informação altimétrica (necessária a geração da malha regular) e planimétrica (fonte de dados que serão utilizados como corretos para fins de comparação com os arquivos digitais gerados pela Monorestituição);
- Programa Microstation 95 com os aplicativos Geoterrain e Decartes;
- Programa Monorestituídor Digital;
- Microcomputador.

4. Metodologia

Os trabalhos foram desenvolvidos em duas etapas distintas que compreendem obtenção de informações provenientes da aerofoto digital (programa Microstation) e o processamento destas informações (programa Monorestituídor Digital). As etapas de trabalho foram as seguintes:

Aquisição das aerofotos no formato desejado: Para a realização dos trabalhos as aerofotos deverão estar no formato digital (raster), mas como não existe no Brasil nenhuma câmara métrica capaz de capturar as imagens neste formato, a transformação das aerofotos em formato digital será realizada com a utilização de "scanner" que produza imagens digitais e que atendam as precisões necessárias a realização dos trabalhos de mapeamento digital. Este equipamento deverá ser capaz de rasterizar toda a aerofoto, que tem dimensões de 230 x 230 mm.

Orientações necessárias das aerofotos: As orientações a serem realizadas serão:

- Orientação Interior;
- Orientação Espacial Aproximada;
- Orientação Espacial Exata.

N a *Orientação Interior* serão determinados os parâmetros necessários a obtenção de fotocoordenadas corrigidas dos erros sistemáticos da imagem. Serão necessários e indispensáveis os parâmetros da câmara utilizada na obtenção da aerofoto. Estes parâmetros constantes no certificado de calibração são:

- Distância Focal Calibrada;
- Coordenadas das Marcas Fiduciais;

- Coordenadas do Ponto Principal (PP);
- Parâmetros relacionados as distorções Radial Simétrica e Descentrada;
- Parâmetros para a correção da Refração Fotogramétrica.

A orientação Interior será realizada através das leituras das marcas fiduciais na aerofoto digital. Esta tarefa será realizada no programa Microstation, obtendo-se as coordenadas de máquina que estarão referidas ao plano gráfico do programa.

Com as leituras das marcas fiduciais no referencial de máquina e as respectivas coordenadas fiduciais no referencial fiducial e utilizando de técnicas de ajustamento, determinam-se os parâmetros necessários para realizar as transformações entre os dois sistemas de coordenadas. As diferenças entre o referencial fotogramétrico e o fiducial resumem-se a duas translações.

A *Orientação Espacial Aproximada* consiste em se utilizar um modelo matemático aproximado para transformar coordenadas fotogramétricas em coordenadas planas no Referencial Geodésico Local. A transformação projetiva consegue aproximar a superfície, apresentando resultados satisfatórios para regiões pouco acidentadas. Abaixo é apresentado este modelo matemático:

$$\left. \begin{aligned} X_L &= \frac{a_1 \cdot x_p + a_2 \cdot y_p + a_3}{a_4 \cdot x_p + a_5 \cdot y_p + 1} \\ Y_L &= \frac{a_6 \cdot x_p + a_7 \cdot y_p + a_8}{a_4 \cdot x_p + a_5 \cdot y_p + 1} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Onde:

- $(X_L, Y_L)^T$ – Coordenadas no Referencial Geodésico Local;
- $(x_p, y_p)^T$ – Coordenadas no Referencial Fotogramétrico;
- (a_1, a_2, \dots, a_8) – Parâmetros necessários a transformação entre os dois referenciais.

Para se resolver as equações (08) será necessário realizar as leituras no sistema Cadd (referencial instrumental) de pontos fotogramétricos que apresentem coordenadas no referencial Geodésico Local (obtidos através da aerotriangulação).

A *Orientação Espacial Exata* equivale a determinação dos parâmetros de orientação exterior de uma aerofoto, que são determinados utilizando-se as equações de Colinearidade.

A **Vetorização** das informações planimétricas será realizada com os recursos para a criação de entidades vetoriais disponibilizadas pelo programa Cadd. Estas entidades serão obtidas diretamente da aerofoto digital, visualizada no monitor do computador. Todas as entidades vetoriais criadas estarão referidas ao referencial gráfico do Cadd e na mesma projeção da aerofoto, ou seja, na projeção central.

A **transformações necessárias** para retificar o arquivo gráfico gerado transformarão as coordenadas da projeção central da aerofoto para uma projeção ortogonal referida ao referencial Geodésico Local.

5. Resultados

De maneira a realizar a comparação dos resultados obtidos com a Monorestituição foi criado um arquivo contendo informação planimétrica vetorizada (restituída), que correspondeu aos níveis: quadra definida, cercas\muros, edificações, árvores e acessos. (Figura 05)



Fig. 5 : Informação planimétrica vetorizada (restituída)

Este arquivo foi posteriormente retificado (Figura 06).

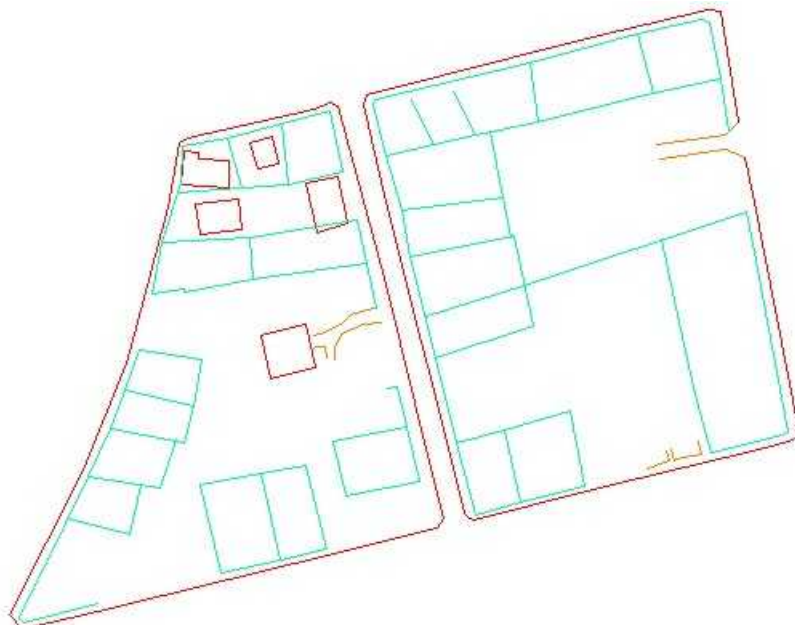


Fig. 6 : Arquivo digital retificado

Na etapa seguinte foram escolhidos 23 pontos bem definidos na fotografia. Estes pontos abrangeram objetos no solo (definição de quadra) e objetos mais elevados (intersecção de cercas/muros e cantos de edificações). Então foram coletadas as coordenadas destes pontos no arquivo obtido pela Monorestituição (Figura 06) e pela restituição convencional (Figura 07). Como é de se esperar, quanto mais afastado o elemento estiver em relação ao solo, maior será o erro.

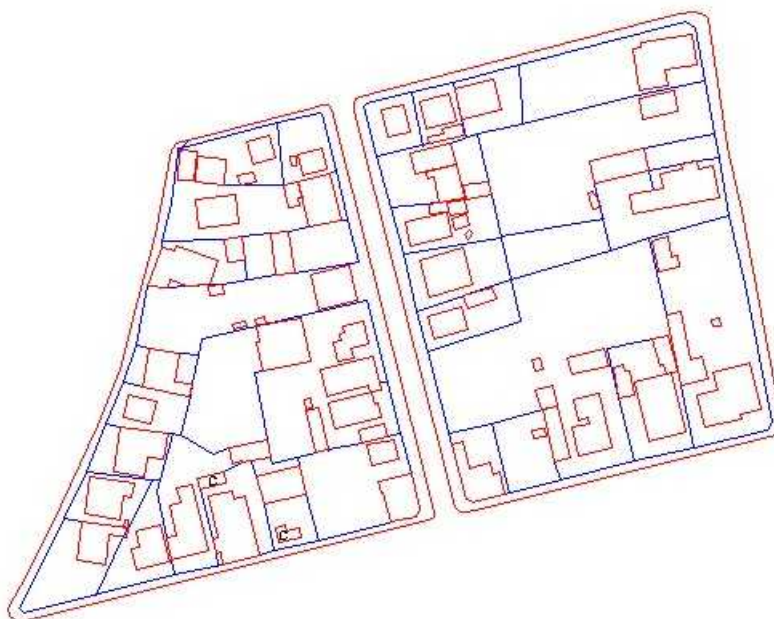


Fig. 7 : Arquivo gerado pela restituição convencional

Abaixo é apresentada uma tabela, contendo as respectivas coordenadas obtidas em ambos os processos e as variações de coordenadas do processo de Monorestituição para a Restituição Convencional.

Identificação dos pontos:

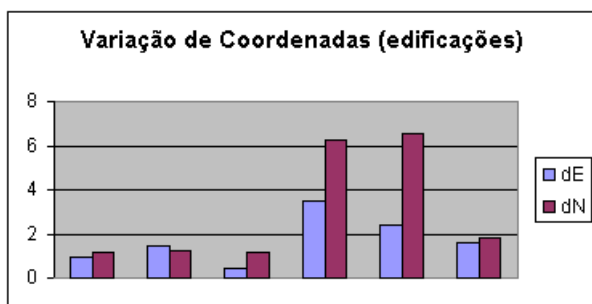
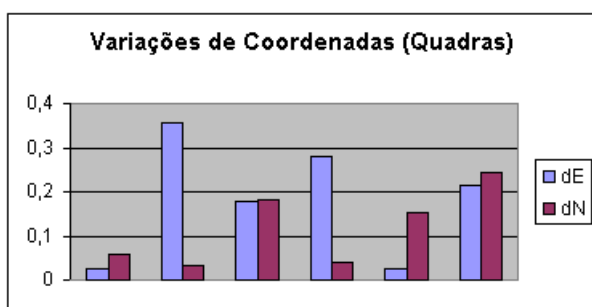
- ponto de intersecção de cerca/muro:	01,02,03,04,06,07,11,12,13,14,15,20,21
- canto de quadra:	05,16,22,23,24,25
- canto de edificações:	08,09,10,17,18,19

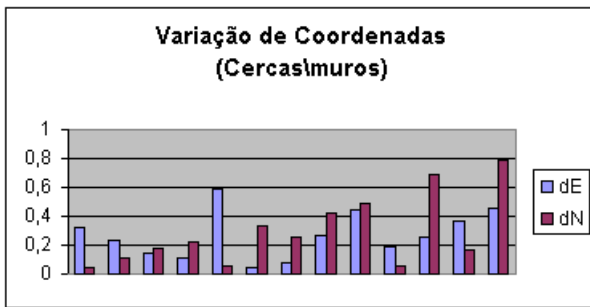
Tabela com as coordenadas obtidas nos dois arquivos digitais:

Nº do Ponto	Monorestituição		Estereorestituição		Diferenças (m)	
	E	N	E	N	ΔE	ΔN
01	628147.982	7148706.253	628148.300	7148706.300	0,318	0,047

02	628170.172	7148710.110	628170.400	7148710.000	0,228	0,11
03	628222.354	7148723.117	628222.500	7148723.300	0,146	0,183
04	628235.311	7148725.882	628235.200	7148726.100	0,111	0,218
05	628268.826	7148732.958	628268.800	7148732.900	0,026	0,058
06	628213.490	7148814.147	628212.900	8148814.200	0,59	0,053
07	628214.250	7148802.262	628214.300	7148802.600	0,05	0,338
08	628220.059	7148842.756	628221.000	7148843.900	0,941	1,144
09	628198.026	7148823.673	628199.500	7148824.900	1,474	1,227
10	628241.292	7148818.019	628241.700	7148819.200	0,408	1,181
11	628290.720	7148739.447	628290.800	7148739.700	0,08	0,253
12	628285.962	7148759.480	628285.700	7148759.900	0,262	0,42
13	628272.555	7148756.513	628273.000	7148757.000	0,445	0,487
14	628305.888	7148743.341	628305.700	7148743.400	0,188	0,059
15	628304.957	7148764.991	628304.700	7148764.300	0,257	0,691
16	628369.645	7148758.069	628370.000	7148758.100	0,355	0,031
17	628349.203	7148757.585	628345.700	7148751.300	3,503	6,285
18	628343.995	7148756.625	628341.600	7148750.100	2,395	6,525
19	628327.720	7148869.802	628329.300	7148871.600	1,58	1,798
20	628293.231	7148863.931	628293.600	7148864.100	0,369	0,169
21	628266.643	7148780.010	628267.100	7148780.800	0,457	0,79
22	628348.521	7148878.619	628348.700	7148878.800	0,179	0,181
23	628195.559	7148842.541	628195.280	7148842.500	0,279	0,041
24	628145.074	7148706.952	628145.100	7148706.700	0,026	0,152
25	628148.515	7148702.842	628148.300	7148702.600	0,215	0,242

A partir das variações de coordenadas foram criados gráficos que demonstram estas variações de coordenadas.





Como esperado, as maiores discrepâncias foram verificadas nos elementos mais afastados do solo, no caso, as edificações. Para as cercas/muros os resultados apresentaram-se satisfatórios com variações máximas na ordem de 80 cm, o que na escala 1:2.000 equivale a 0,4 mm. Para os pontos localizados no solo, a maioria das diferenças ficou abaixo dos 30 cm, ou seja, 0,15 mm na escala proposta.

6. Conclusões

- A Monorestituição Digital se mostrou eficiente na geração de informação planimétrica, porém, apresentando deficiência para a restituição de objetos afastados do solo, especialmente as edificações;
- Uma solução alternativa para suprir esta lacuna seria a utilização de símbolo cartográfico digital para a representação das edificações, o que além de evitar erros traria agilidade na geração de bases cartográficas digitais urbanas;
- A utilização de equipamentos e programas acessíveis adicionado ao processo de geração/retificação do arquivo digital, que mostrou-se bastante rápido e simplificado, viabiliza a utilização desta técnica por pequenas prefeituras;
- As precisões obtidas (comparando-se as coordenadas da Monorestituição com a Estereorestituição) apresentam solução suficiente, uma vez que a maioria das diferenças ficou abaixo de 1 metro, o que corresponde a um erro de 0,5 mm na escala de mapeamento 1:2.000.
- Deve-se, no entanto, destacar que as precisões obtidas são diretamente influenciadas pela informação altimétrica que deve ser suficiente para as precisões exigidas em cada trabalho.

7. Referências Bibliográficas

MAKAROVIC, B. Digital Mono-Ploters. *ITC Journal*, vol 4, 1973, pp. 583-599.

MITISHITA, EDSON A. **Monorestituição Digital de Aerofotos Associada com Sistema de Computação Gráfica C.A.D, para Fins de Mapeamento na Área Florestal**. Curitiba, 1997. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) Engenharia Florestal – Universidade Federal do Paraná.