ELIANA EDÉRLE DIAS CHAVES

Cadastro dinâmico: modelo de implantação

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes – Área de Infraestrutura de Transportes.

Orientador: Prof. Associado Paulo César Lima Segantine

São Carlos
2013

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Chaves, Eliana Edérle Dias
C176c Cadastro dinâmico: modelo de implantação / Eliana
Edérle Dias Chaves; orientador Paulo Cesar Lima
Segantine. São Carlos, 2013.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Transportes e Área de Concentração em
Infra-Estrutura de Transporte -- Escola de Engenharia
de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2013.

1. cadastro dinâmico. 2. acurácia. 3. deformação.
I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **ELIANA EDÉRLE DIAS CHAVES**.

Título da tese: "Cadastro dinâmico: modelo de implantação".

Data da defesa: 07/03/2013

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Dr. **Irineu da Silva**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Dr. **Amilton Amorim**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP – campus de Presidente Prudente)

Aprovado

Prof^a. Dr^a. **Andrea Flávia Tenório Carneiro**
(Universidade Federal de Pernambuco/UFPE)

APROVADA

Prof. Dr. **Diógenes Cortijo Costa**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

APROVADA

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes:
Prof. Associado **Antônio Néelson Rodrigues da Silva**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

RESOLUÇÃO
do Conselho de Pós-Graduação
de 12 de março de 2013
nº 001/2013

DEDICATÓRIA

**Ao meu esposo João Carlos e às minhas filhas
Mariana e Carolina, com quem aprendi o que
é o amor de verdade.**

AGRADECIMENTOS

À Deus, por me ensinar que os caminhos difíceis são sólidos.

Ao meu esposo João Carlos e às minhas filhas Mariana e Carolina, a força para seguir em frente.

Ao orientador Prof. Associado Paulo Cesar Lima Segantine, pela confiança depositada em mim e presteza nas correções e sugestões.

Às secretárias do Departamento de Transportes da EESC-USP, Heloisa, Beth e Magali, pela competência e atenção dispensadas a mim.

Ao Prof. Dr. Amilton Amorim da FCT-UNESP, pela disponibilização dos dados para a parte experimental e pela atenção dedicada.

À minha mãe Ederle Marangoni Dias(*in memoriam*), sempre presente em minha vida.

Ao meu pai Lázaro Dias e à Joana, pelas palavras de incentivo e carinho.

Aos meus tios e padrinhos Adilson e Maria Regina, pelo exemplo de lealdade.

À Dona Yolanda, minha sogra e Tia Alzira, pelas constantes orações.

Aos colegas da Unoeste, especialmente aos amigos de longa data: Ivam, Lena e Maury.

A todos que contribuíram para a concretização deste trabalho

RESUMO

CHAVES, E.E.D. **Cadastro Dinâmico: modelo de implantação**. São Carlos, 2013. 101 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

A superfície terrestre está em movimentação contínua em decorrência das ações das forças tectônicas, dos processos climáticos ou de agentes atmosféricos, que podem causar deformações de origem espacial ou temporal, podendo afetar a infraestrutura geodésica de um país e por consequência a Rede de Referência Cadastral Municipal (RRCM) vinculada a ela, causando alterações nas coordenadas dos limites da parcela (unidade básica do Cadastro). A escolha do Modelo Geodésico de Monitoramento de Deformação (MGMD) adequado depende da localização e das dimensões da área de estudo. A quantificação dos parâmetros de deformação e o impacto destes nas coordenadas dos limites das parcelas caracterizam o Cadastro Dinâmico. Os modelos de deformações exigem a acurácia que não é contemplada em normas de levantamentos dos limites físicos vigentes no Brasil. Neste contexto, esta tese tem por objetivo fundamental conceber um modelo de cadastro dinâmico, validado por meio de simulações e com aplicações práticas, que possibilite o restabelecimento de coordenadas dos limites das parcelas que sofrem deformações. Para tanto, foram estudados os padrões de acurácia aplicados em diversos países e idealizados sete procedimentos, utilizando o aplicativo GAMIT no processamento dos dados GNSS, que conduziram ao estabelecimento da acurácia absoluta, com base em soluções globais, para uma RRCM já implantada. Foi selecionado um modelo espacial de deformação que fosse adequado à área estudada, o modelo *strain*, que tem como principal propriedade considerar a deformação homogênea na área afetada. Quatro experimentos foram concebidos e testados para estimar os parâmetros de deformação, sendo apontado novamente, o uso de soluções globais como o mais viável. O modelo temporal VEMOS2009 foi assumido no cálculo das deformações seculares e a combinação dos modelos espacial e temporal encerraram as ações propostas para a modelagem da deformação na RRCM. Um modelo para o restabelecimento das coordenadas submetidas ao MGMD foi planejado e executado, finalizando os procedimentos que convergiram para concepção do Cadastro Dinâmico. Trata-se de um tratamento inovador de um tema até então inexplorado.

Palavras chave: cadastro dinâmico, acurácia, deformação

ABSTRACT

CHAVES, E.E.D. **Dynamic Cadastre: implantation model**. São Carlos, 2013. 101 f. Thesis (Doctoral) – Engineering School of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, Brazil. 2013.

The surface is in continuous movement due to the action of tectonic forces, climatic processes or atmospheric agents that can cause deformation of spatial or temporal origin, affecting the geodetic infrastructure of a country and therefore the Municipal Cadastral Reference Network (RRCM) linked to it, causing changes in the coordinates of the boundaries of the parcel (the basic unit of the Cadastre). The choice of suitable model Geodetic Deformation Monitoring (MGMD) depends on the location and size of the study area. The quantification of deformation parameters and their impact on the coordinates of boundaries of parcels features Dynamic Cadastre. The deformation models require the accuracy that is not found in current standards for physical boundary surveying in Brazil. In this context, this thesis aims to develop a model of dynamic registration fundamentally, validated through simulations and practical applications, enabling the restoration of coordinates of boundaries of parcels that suffer deformations. Therefore, we studied the patterns of accuracy applied in various countries and idealized seven procedures using the application GAMIT in GNSS data processing, which led to the establishment of absolute accuracy, based on global solutions for a RRCM already deployed. We selected a model of spatial deformation that was appropriated for the study area, the model strain, whose main property considered homogeneous deformation in the affected area. Four experiments were designed and tested to estimate the parameters of deformation, being appointed again, the use of global solutions as the most viable. The temporal model VEMOS2009 was assumed in the calculation of secular deformation and the combination of spatial and temporal models closed the proposed actions for the modeling of deformation in RRCM. A model for the restoration of coordinated submitted to MGMD was planned and executed, ending the procedures that converged to design the Dynamic Cadastre. This is an innovative treatment of a subject until then unexplored.

Keywords: dynamic cadastre, accuracy, deformation

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	– O conceito de Cadastro. Fonte: adaptado de Wallace (2009).....	31
Figura 2.2	– Componentes do cadastro multifinalitário. Fonte: adaptado de Wallace (2009).....	34
Figura 2.3	– Evolução das visões de Cadastro. Fonte: adaptado de Erba, Oliveira e Lima Júnior (2005).....	36
Figura 2.4	– Aspectos jurídicos, fiscais e físicos do Cadastro territorial. Fonte: adaptado de Brandão (2003).....	37
Figura 2.5	– Visão espacial do limite. Fonte: Erba, Oliveira e Lima Júnior (2005).	40
Figura 2.6	– Confusão entre limites de posse e limites legais das propriedades. Fonte: Erba, Oliveira e Lima Júnior (2005).....	41
Figura 2.7	– As formas textual e gráfica de representação de limites. Fonte: adaptado de Carneiro (2010).....	42
Figura 2.8	– A forma numérica de apresentação de limites. Fonte: Carneiro (2010).....	43
Figura 2.9	– Determinação de limites por georreferenciamentos. Fonte: Carneiro (2010).....	43
Figura 3.1	– Modelo conceitual de cadastro. Fonte: adaptado de Fernandez (2003).....	46
Figura 3.2	– Levantamento cadastral por métodos topográficos.....	48
Figura 3.3	– Levantamentos geodésicos cadastrais.....	49
Figura 3.4	– Atualização cadastral com base em fotografias aéreas. Fonte: Engefoto (2012).....	49
Figura 3.5	– Imagens de satélite e a informação cadastral. Fonte: Carneiro (2010).	50
Figura 3.6	– RRCM da área central da cidade de São Paulo (SP). Fonte: http://www.prefeitura.sp.gov.br/arquivos/secretarias/planejamento/mapas/0002/	54
Figura 3.7	– Rede planimétrica brasileira do SGB. Fonte: http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/planimetrica.shtml	57

Figura 3.8	– Sistema Geodésico Local (SGL). Fonte: adaptado de Soler e Hothem (1998).....	58
Figura 3.9	– Sistema Topográfico Local (STL). Fonte: adaptado de NBR 14166/98.....	59
Figura 3.10	– Planta de parcelas cadastrais. Fonte: Effenberg (2001).....	63
Figura 3.11	– Planta de equipamentos urbanos. Fonte: Robison et al. (1995).....	64
Figura 3.12	– Distorções decorrentes da adoção de diferentes sistemas de projeções: na parte superior a projeção de Mollweide, no centro, a projeção de Mercator, na parte inferior a projeção cilíndrica equivalente com paralelo padrão de 30°. Fonte: Robison et al. (1995).....	66
Figura 4.1	– Relação entre acurácia e precisão. Fonte: Rutledge (2010).....	79
Figura 5.1	– Restabelecimento dos pontos limites. Fonte: adaptado de Jarroush e Even-Tzur (2007).....	102
Figura 5.2	– Redefinição e atualização do “datum” nacional. Fonte: Jarroush e Even-Tzur (2007).....	103
Figura 5.3	– Processo de restabelecimento do CDL dinâmico. Fonte: Adaptado de Jarroush e Even-Tzur (2007).....	107
Figura 6.1	– Interpretação geométrica dos parâmetros de deformação homogênea. Fonte: Adaptado de Caspary (2000).....	118
Figura 6.2	– Grade de deformação. Fonte: Adaptado de Winefield, Crook e Beavan (2010).....	120
Figura 6.3	– Estrutura de dados de um modelo de “patch”. Fonte: Adaptado de Stanaway e Roberts (2012).....	122
Figura 6.4	– Deformações intersísmicas. Fonte: Adaptado de Stanaway e Roberts (2012).....	122
Figura 6.5	– Grade regular de deformação com ponto analisado no centro.....	126
Figura 6.6	– Grade regular de deformação com ponto analisado próximo ao centro.....	127
Figura 6.7	– Grade regular de deformação com ponto analisado externamente.....	128
Figura 6.8	– Grade irregular de deformação com ponto analisado internamente.....	130
Figura 6.9	– Grade irregular de deformação com ponto analisado externamente....	132

Figura 7.1	– Localização do município de Taciba – SP. Fonte: http://www.camarataciba.sp.gov.br/	136
Figura 7.2	– Linhas de base do marco geodésico de precisão. Fonte: Santos et al. (2008).....	137
Figura 7.3	– Disposição dos marcos geodésicos da RRCM e configuração da rede processada. Fonte: Santos et al. (2008).....	139
Figura 7.4	– Limites das parcelas cadastrais. Fonte: Santos et al. (2008).....	140
Figura 7.5	– Vetores de deformação dos pontos da RRCM. Fonte: Adaptado de Santos et al. (2008).....	173
Figura 7.6	– Etapas para estabelecimento das coordenadas.....	178

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	–	Sistemas de projeções cartográficas.....	67
Tabela 4.1	–	Tolerância das acurácias do levantamento cadastral.....	85
Tabela 4.2	–	Padrões de acurácia para as redes de controle.....	86
Tabela 4.3	–	Acurácias para marcos de limites não coincidentes no levantamento.....	87
Tabela 4.4	–	Acurácias para marcos de limites no levantamento.....	87
Tabela 4.5	–	Tolerâncias para marcos testemunhos.....	88
Tabela 4.6	–	Distância entre ponto limite e marco da rede de levantamento.....	88
Tabela 4.7	–	Distância entre ponto limite e marco testemunho.....	88
Tabela 4.8	–	Distância entre marcos de referência permanente e ponto limite.....	89
Tabela 6.1	–	Coordenadas (m) do ponto analisado ($P_{1,1}$).....	125
Tabela 6.2	–	Coordenadas (m) dos pontos vizinhos.....	125
Tabela 6.3	–	Matriz A.....	126
Tabela 6.4	–	Coordenadas (m) do ponto analisado ($P_{1,1}$).....	127
Tabela 6.5	–	Matriz A.....	127
Tabela 6.6	–	Parâmetros de deformação.....	128
Tabela 6.7	–	Coordenadas (m) do ponto analisado ($P_{1,1}$).....	129
Tabela 6.8	–	Matriz A.....	129
Tabela 6.9	–	Parâmetros de deformação.....	129
Tabela 6.10	–	Coordenadas (m) do ponto analisado ($P_{1,1}$).....	130
Tabela 6.11	–	Coordenadas (m) dos pontos vizinhos.....	131
Tabela 6.12	–	Matriz A.....	131
Tabela 6.13	–	Parâmetros de deformação.....	131
Tabela 6.14	–	Coordenadas (m) do ponto analisado ($P_{1,1}$).....	132
Tabela 6.15	–	Matriz A.....	132
Tabela 6.16	–	Parâmetros de deformação.....	133
Tabela 7.1	–	Coordenadas cartesianas do M07 – SIRGAS2000 Fonte: Santos et al. (2008).....	138
Tabela 7.2	–	Coordenadas geodésicas do M07 – SIRGAS2000 Fonte: Santos et al. (2008).....	138

Tabela 7.3	– Coordenadas UTM do marco M07 – SIRGAS2000 Fonte: Santos et al. (2008).....	138
Tabela 7.4	– Coordenadas geodésicas do M01 ao M06 – SIRGAS2000 Fonte: Santos et al. (2008).....	139
Tabela 7.5	– Tolerâncias para o cálculo das poligonais topográficas Fonte: NBR 13133/94 e NBR 14166/98.....	140
Tabela 7.6	– Soluções (SIRGAS2000) com injunção finita <i>com as estações de referência</i> OURI, PPTE, ROSA.....	146
Tabela 7.7	– Soluções (SIRGAS2000) com injunção generalizada <i>com as estações de referência</i> OURI, PPTE, ROSA.....	147
Tabela 7.8	– Soluções (SIRGAS2000) com injunção generalizada e sem estações de referência.....	148
Tabela 7.9	– Soluções (SIRGAS2000) com injunção generalizada, sem estações de referência, e processando BRAZ.....	149
Tabela 7.10	– Soluções (SIRGAS2000) com injunção generalizada e estação de referência BRAZ.....	149
Tabela 7.11	– Soluções (SIRGAS2000) com injunção generalizada com as estações de referência BRAZ, CHPI.....	150
Tabela 7.12	– Soluções (SIRGAS2000) com injunção generalizada e <i>H-files</i> do MIT.....	151
Tabela 7.13	– Coordenadas cartesianas (SIRGAS2000) dos marcos geodésicos de apoio imediato (PROGRID).....	154
Tabela 7.14	– Coordenadas cartesianas (SIRGAS2000) dos marcos geodésicos de apoio imediato (GLOBK).....	155
Tabela 7.15	– Desvios-padrão das coordenadas cartesianas dos marcos geodésicos de apoio imediato (GLOBK).....	155
Tabela 7.16	– Matriz das derivadas dos deslocamentos (m) com relação aos parâmetros....	160
Tabela 7.17	– Matriz $(\underline{A}^T \underline{P} \underline{A})^{-1}$ para os marcos M07 e vizinhos (M01 a M06).....	161
Tabela 7.18	– O produto $(\underline{A}^T \underline{P} \underline{L})$	161
Tabela 7.19	– Parâmetros (2D) de deformação ($\underline{c}$) para os marcos M07 e vizinhos (M01 a M06).....	162
Tabela 7.20	– Matriz $(\underline{A}^T \underline{P} \underline{A})^{-1}$ para os marcos M07 e vizinhos (BRAZ, CHPI).....	164
Tabela 7.21	– Vetor $(\underline{A}^T \underline{P} \underline{L})$ para os marcos M07 e vizinhos (BRAZ, CHPI).....	164
Tabela 7.22	– Parâmetros (2D) de deformação ($\underline{c}$) para os marcos M07 e vizinhos (BRAZ, CHPI).....	164

Tabela 7.23	–	Parâmetros (3D) de deformação (c) para os marcos M07 e vizinhos (M01 a M06).....	168
Tabela 7.24	–	Parâmetros (3D) de deformação para os marcos M07 e estações IGS.....	169
Tabela 7.25	–	Coordenadas dos marcos geodésico de apoio imediato ITRF2005 (época 2008,66).....	172
Tabela 7.26	–	Parâmetros de deformação do MGMD.....	176
Tabela 7.27	–	Coordenadas e desvios-padrão do ponto analisado na primeira época.....	176
Tabela 7.28	–	Coordenadas e desvios-padrão do ponto analisado na segunda época.....	177
Tabela 7.29	–	Discrepâncias entre as coordenadas do ponto analisado.....	177
Tabela 8.1	–	Análise da acurácia absoluta das coordenadas do M07 (TACI).....	182
Tabela 8.2	–	Análise da acurácia absoluta das coordenadas dos marcos geodésicos.....	183
Tabela 8.3	–	Impactos da deformação espacial (2D) na RRCM.....	184
Tabela 8.4	–	Impactos da deformação espacial (3D) na RRCM.....	185
Tabela 8.5	–	Discrepâncias entre as coordenadas dos marcos geodésicos da RRCM de Taciba/SP obtidas por Santos et al. (2008) e com a modelagem espacial e temporal.....	186
Tabela 8.6	–	Discrepâncias entre as coordenadas dos marcos geodésicos da RRCM de Taciba/SP obtidas com o GLOBK (Tabela 7.14) e com a modelagem espacial e temporal.....	186

LISTA DE QUADROS

Quadro 4.1	– Tolerância posicional relacionada com levantamento cadastral. Fonte: Brandão (2003).....	83
Quadro 7.1	– Injunção finita (<i>sittbl.</i>).....	144
Quadro 7.2	– Parâmetros para injunção finita <i>com as estações de referência</i> OURI, PPTE, ROSA.....	146
Quadro 7.3	– Parâmetros para injunção generalizada <i>com as estações de referência</i> OURI, PPTE, ROSA.....	147
Quadro 7.4	– Parâmetros para injunção generalizada sem estações de referência.....	148
Quadro 7.5	– Parâmetros para injunção generalizada com estação de referência BRAZ.....	149
Quadro 7.6	– Parâmetros para injunção generalizada com as estações de referência BRAZ, CHPI.....	150
Quadro 7.7	– Parâmetros para injunção generalizada com <i>H-files</i> do MIT.....	151
Quadro 7.8	– Resultados da estabilização com injunção generalizada e <i>H-files</i> do MIT.....	152
Quadro 7.9	– Síntese dos critérios dos procedimentos e acurácia.....	153
Quadro 7.10	– Resultados da estabilização com <i>H-files</i> do MIT para o dia 241.....	156
Quadro 7.11	– Resultados da estabilização com <i>H-files</i> do MIT para o dia 242.....	156

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS
AJURGPS	Programa para ajustamento de redes GPS
BIH	Bureau International de l'Heure
BRAZ	Brasília
CDL	Cadastro Digital Legal
CfA	Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics
CHPI	Cachoeira Paulista
CONCAR	Comissão Nacional de Cartografia
CONPDEC	Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil
CPRM/SGB	Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais/ Serviço Geológico do Brasil
CTM	Cadastro Territorial Multifinalitário
DBDG	Diretório Brasileiro de Dados Geoespaciais
DDD	Dia do ano
e-PING	Programa de Interoperabilidade do Governo do Estado
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia
FGDC	Federal Geographic Data Committee
FIG	Federação Internacional de Geômetras
GAMIT	GPS Analysis at MIT
GLOBK	Global Kalman filter VLBI GPS analysis program
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GRS	Geodetic Reference System
IBGE	Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICA	Instituto de Cartografia Aeronáutica
IERS	International Earth Rotation & Reference Systems Service
IG	Informações Geoespaciais
IGS	International GPS Service
INCRA	Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária
INDE	Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais
INSS	Instituto Nacional do Seguro Social

IPTU	Imposto Predial e Territorial Urbano
IRIB	Instituto de Registro Imobiliário do Brasil
ITBI	Imposto sobre Transmissão de Bens Imóveis
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
ITRS	International Terrestrial Reference System
L.T.M.	Local Transversa de Mercator
MGMD	Modelo Geodésico de Monitoramento de Deformação
MIT	Massachusetts Institute of Technology
NBR	Norma Brasileira
NSDI	National Spatial Data Infraestruture
NZGD	“Datum” geodésico da Nova Zelândia
OURI	Nome abreviado da estação “Ourinhos” da Rede GNSS ativa do Estado de São Paulo
P.B.G	Projeção Brasileira de Gauss
PCM	Planta Cadastral Municipal
PGM	Planta Geral do Município
PNPDEC	Política Nacional de Proteção e Defesa Civil
PPM	Parte Por Milhão
PPTE	Nome abreviado da estação “Presidente Prudente” da Rede GNSS ativa do Estado de São Paulo
ProGriD	Programa de transformação de coordenadas
PVG	Planta de Valores Genéricos
R.T.M.	Regional Transversa de Mercator
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS
RGB	Rede Geodésica Brasileira
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
RMS	Root Mean Square (erro médio quadrático)
RN	Referência de Nível
ROSA	Nome abreviado da estação “Rosana” da Rede GNSS ativa do Estado de São Paulo
RRCM	Rede de Referência Cadastral Municipal
SAD	South American Datum
SCDL	Sistema Cadastral Digital Legal

SCN	Sistema Cartográfico Nacional
SGB	Sistema Geodésico Brasileiro
SGL	Sistema Geodésico Local
SICART	Sistema de Cadastro e Registro Territorial
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SINPDEC	Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil
SIO	Scripps Institution of Oceanography
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SIT	Sistema de Informações Territoriais
SLR	Satellite Laser Ranging
SOI	Survey of Israel
STL	Sistema Topográfico Local
T.M.	Projeção Conforme de Gauss
TGO	Trimble Geomatics Office
UTM	Universal Transverso de Mercator
VEMOS2009	Modelo de velocidade para a América do Sul e para o Caribe
VLBI	Very Long Baseline Interferometry
VT	Vértice
YY	Ano

LISTA DE SÍMBOLOS

$\Delta \vec{X}_i$	Correções para os vários efeitos de mudanças temporais
$\vec{X}_0$	Posição na época de referência t_0
$\vec{V}_0$	velocidade na época t_0
σ	Desvio padrão
$(\Delta e_i, \Delta n_i)$	Vetor deformação com relação à posição (e_i, n_i)
(a_1, a_2, b_1, b_2)	Parâmetros (incógnitas) de deformação
(u_i, n_i)	Deslocamento
$\sigma_{N0}, \sigma_{E0}, \sigma_{H0}$	Desvio padrão das coordenadas do ponto limite com relação a época t_0
(e, n, u)	Coordenadas geodésicas locais
(u, v, w)	Componentes dos deslocamentos nas direções (x, y, z)
$\bar{T}_k, \bar{D}_k, \bar{R}_k$	Derivadas temporais dos parâmetros de transformação entre as soluções (s) e $(comb)$
$\bar{X}_{comb}^i$	Velocidade estimada na combinação
T_k, D_k, R_k	Parâmetros de transformação entre as soluções (s) e $(comb)$
X_S^i	Posição da estação (i) na solução (s) obtida na época t_s
X_{comb}^i	Posição estimada da estação (i) na época t_{comb}
ε_{yx}	Distorção angular
A	Matriz das derivadas parciais
B	Matriz que contém as estações que definem o sistema de referência
C	Vetor dos parâmetros de deformação
FES2004	Modelo de carga oceânica
K_0	Fator de escala para o meridiano central
MMQ	Método dos Mínimos Quadrados
N_0, E_0, H_0	Coordenadas do ponto limite com relação a época t_0
$P_{0,0}, P_{0,2}, P_{2,0},$	Pontos vizinhos
$P_{2,2}$	
$P_{1,1}$	Ponto analisado
t_0	Época da combinação
ω	Rotação da rede

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	23
1.1 Considerações preliminares	23
1.2 Objetivos	25
1.3 Procedimento metodológico	26
1.4 Justificativa e relevância	26
1.5 Estrutura	27
 2 CADASTRO	 29
2.1 Introdução	29
2.2 Cadastro – Definições	29
2.3 Aspectos históricos do cadastro no contexto internacional e nacional	34
2.4 Aspectos jurídicos, fiscais e físicos do cadastro	36
2.5 A unidade territorial básica do cadastro e seus limites	38
2.6 O futuro do cadastro	43
2.7 Considerações finais	44
 3 CARTOGRAFIA CADASTRAL	 45
3.1 Introdução	45
3.2 Definições	45
3.3 Métodos de levantamentos dos limites das parcelas	47
3.3.1 Processamento de dados GNSS	51
3.3.2 Procedimentos para a definição dos limites das parcelas	53
3.4 Rede de Referência Cadastral Municipal (RRCM)	54
3.5 Sistema Geodésico Brasileiro (SGB)	55
3.6 Sistema Geodésico Local (SGL)	57
3.7 Sistema Topográfico Local (STL)	58
3.8 Representação dos limites das parcelas	60
3.8.1 Categorias de mapas	60
3.8.2 Mapas, cartas e plantas cadastrais	61
3.8.2.1 Planta de valores genéricos	63

3.8.2.2 Planta de equipamentos urbanos.....	64
3.9 Projeções cartográficas.....	65
3.9.1 Classificação das projeções.....	65
3.9.2 Sistemas de projeção cartográfica – propriedades e usos.....	66
3.9.3 Sistemas de projeção cartográfica para áreas urbanas.....	68
3.10 Considerações finais.....	73
 4 ACURÁCIA CADASTRAL.....	 77
4.1 Introdução.....	77
4.2 Conceitos de precisão e acurácia dos limites legais das parcelas.....	77
4.3 Padrões de acurácia em RRCM.....	80
4.4 Padrões de precisão e acurácia no contexto mundial.....	84
4.5 Procedimento metodológico previsto para esta pesquisa.....	89
4.6 Considerações finais.....	93
 5 CADASTRO DINÂMICO.....	 95
5.1 Introdução.....	95
5.2 Modelos dinâmicos de deformação da crosta terrestre.....	96
5.3 A experiência na Nova Zelândia.....	98
5.4 A experiência do Sistema de Cadastro Dinâmico de Israel.....	101
5.5 Considerações finais.....	108
 6 MODELO DE DEFORMAÇÃO DA REDE DE REFERÊNCIA CADASTRAL....	 109
6.1 Introdução.....	109
6.2 Sistema de referência cadastral.....	110
6.3 Deformação da rede (estrutura geodésica) de referência.....	111
6.4 Efeito da deformação da RRCM nas coordenadas da parcela cadastral.....	112
6.5 Modelo de deformação.....	114
6.5.1 Modelo espacial.....	114
6.5.2 Modelo temporal.....	120
6.5.2.1 Modelo para deformações seculares.....	121
6.5.2.2 Modelo para deformações não seculares.....	122
6.6 Modelo de deformação espacial: desempenho por meio de simulações.....	124

6.6.1 Primeira simulação: grade regular de deformação.....	125
6.6.1.1 Ponto de análise no centro da grade regular de deformação.....	125
6.6.1.2 Ponto de análise próximo ao centro da grade regular de deformação.....	126
6.6.1.3 Ponto de análise externo à grade regular de deformação.....	128
6.6.2 Segunda simulação: grade irregular de deformação.....	129
6.6.2.1 Ponto de análise interno à grade irregular de deformação.....	130
6.6.2.2 Ponto de análise externo à grade irregular de deformação.....	132
6.7 Considerações finais.....	133
 7 MODELO DE CADASTRO DINÂMICO.....	 135
7.1 Introdução.....	135
7.2 Área do experimento.....	136
7.3 Determinação dos limites das parcelas: métodos, equipamentos e resultados.....	137
7.4 Acurácia da RRCM de Taciba/SP – Considerações preliminares.....	140
7.4.1 Tolerância da acurácia da RRCM.....	141
7.4.2 Materialização da RRCM.....	141
7.4.3 Estratégia de processamento de dados GNSS da RRCM.....	142
7.4.4 Acurácia absoluta das coordenadas do marco geodésico de precisão (M07).....	145
7.4.5 Acurácia das coordenada dos marcos geodésico de apoio imediato (M01, ..., M06)	153
7.5 Deformação da RRCM de Taciba/SP.....	157
7.5.1 Modelo espacial da RRCM.....	157
7.5.2 Modelo temporal.....	170
7.5.3 Solução combinada (espacial e temporal).....	172
7.6 Cadastro dinâmico – Solução para o restabelecimento de coordenadas.....	173
7.6.1 Exemplo de aplicação do modelo de cadastro dinâmico.....	176
7.7 Fluxograma das etapas.....	177
7.8 Considerações finais.....	178
 8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	 181
8.1 Introdução.....	181
8.2 Conclusões parciais.....	181
8.3 Conclusões gerais.....	187
8.4 Recomendações.....	188

REFERÊNCIAS..... 189

APÊNDICE..... 199

1 INTRODUÇÃO

O presente capítulo traz o contexto em que se encontra o tema tratado nesta tese. Em seguida, são apresentados os objetivos fundamental e específicos, almejados quando da idealização da mesma. A justificativa, relevância e contribuição do trabalho são mostradas na sequência. Posteriormente, são explanados, o método científico aplicado, a hipótese levantada e os procedimentos adotados para confirmá-la ou não. Culminando com o relato de uma síntese dos capítulos constantes no texto.

1.1 Considerações preliminares

Mundialmente, a grande concentração de habitantes em áreas urbanas ($\cong 80\%$) (<http://www.ipea.gov.br/desafios/>) conduz à reflexão sobre as consequências desta ocupação, geralmente desordenada, desigual e sem planejamento. Gerir os problemas econômicos, legais e sociais encontrados nessas áreas é muitas vezes, tarefa difícil, dispendiosa e morosa.

O empenho em encontrar soluções para as questões urbanas levou a necessidade do conhecimento e organização de toda informação possível dos habitantes e do espaço ocupado por essas áreas. Neste contexto, surgiu o Cadastro, inicialmente com fins de tributação, evoluindo para o Cadastro Territorial Multifinalitário (CTM), conceitualmente mais abrangente e com finalidade de auxiliar decisões relativas aos problemas urbanos e rurais. O CTM é considerado o arcabouço de uma gestão municipal ou territorial tecnicamente fundamentada. Sua importância é ressaltada como uma ferramenta de apoio às mais variadas decisões, nas áreas de atuação, dos poderes público e privado. É impraticável a dissociação do CTM dos avanços tecnológicos e de pesquisas científicas que proporcionem mais rapidez, acurácia e segurança nas informações coletadas, processadas e disponibilizadas para cada finalidade específica.

O CTM tem por unidade básica a parcela, da qual devem existir dentre outras informações: do proprietário, das coordenadas limítrofes, do tipo de uso, características sócio-econômicas dos ocupantes (nem sempre encontrada na base do CTM), caso seja ocupada, bem como produtos cartográficos associados a ela. A parcela pode ser definida por seus limites legais (de propriedade) e físicos (de posse), muitas vezes não coincidentes. Todas estas

informações devem estar vinculadas a um único código identificador. Os métodos de levantamentos planimétricos indicados para a determinação das coordenadas dos limites das parcelas incluem os topográficos clássicos (ex: poligonação, irradiação) e tecnologias recentes como *Global Navigation Satellite System* (GNSS), que propiciam maior rapidez e acurácia. Em um CTM, no Brasil, segundo as recomendações da NBR 14166/98, a Rede de Referência Cadastral Municipal (RRCM) deve ser referenciada a uma única origem (Sistema Geodésico Brasileiro - SGB), ou seja, deve estar ligada a uma rede nacional, p. ex., a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC), mantida pela Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), concretizando a adoção de um único referencial, o SGB, subentendo-se que as coordenadas definidoras dos limites das parcelas devem estar vinculadas à RRCM.

O advento da tecnologia de posicionamento por satélites artificiais, como em outras áreas do conhecimento, foi extremamente impactante na área de levantamentos das coordenadas dos limites das parcelas. Assim, erros antes admissíveis, agora, devido ao rigor técnico na coleta das observações, não são mais permitidos. Portanto, levantamentos e métodos onde eram minimizados erros grosseiros e aleatórios atendiam às exigências quanto à qualidade geométrica dos mesmos. Recentemente é exigida a acurácia dos levantamentos, com tratamento de erros aleatórios e sistemáticos. Esse fato conduz a um questionamento: como adaptar os levantamentos já existentes à nova realidade? O objetivo desta pesquisa consiste em apresentar um método para avaliar a acurácia de uma Rede de Referência Cadastral Municipal (RRCM) já implantada.

Independente dos métodos, tecnologias e acurácias dos levantamentos das coordenadas dos limites das parcelas empregados, estas sempre foram sujeitas como imutáveis ao longo do tempo e do espaço. As ciências relacionadas ao estudo do comportamento da superfície da Terra como Geofísica, Geodésia e Geologia, bem como, pesquisas atuais, contribuíram para a constatação de que as coordenadas dos limites das parcelas sofrem alterações temporais (deformações intra ou inter placas tectônicas) ou espaciais (ex: deformações devido a fenômenos naturais locais). Surgiram então, modelos de deformação da superfície terrestre, de acordo com a dimensão da área a ser investigada, finalidade da aplicação dos mesmos e a acurácia exigida. Os estudos pioneiros foram realizados em regiões suscetíveis a acidentes naturais como terremotos e tsunamis, por exemplo, na Austrália e Nova Zelândia. No Brasil, não são observados fenômenos de tal intensidade, mas, considera-se, nesta tese, que a movimentação dos limites das parcelas não pode ser desprezada, pois altera as coordenadas desses limites. Mediante este contexto, um

modelo de deformação específico foi aplicado nas coordenadas de uma RRCM no experimento realizado neste trabalho, o que garantiu a quantificação das possíveis deformações, sejam elas temporais ou espaciais. De acordo com as especificações técnicas do levantamento e as acurácias pertinentes, pode ou não acontecer alteração das coordenadas. Para tanto, foi simulada uma deformação homogênea na RRCM de estudo.

Com a mudança das coordenadas dos limites das parcelas provenientes dos modelos de deformação da superfície terrestre, sejam elas espaciais ou temporais, veio a necessidade do estabelecimento de procedimentos que consentissem o restabelecimento das coordenadas das parcelas, caso as alterações devido ao emprego dos modelos fossem significativas. Este procedimento caracteriza a essência do Cadastro Dinâmico, onde é admitida a possibilidade de mudança de coordenadas oriunda de deformações na superfície.

1.2 Objetivos

O objetivo fundamental desta tese é propor e verificar um método de Cadastro Dinâmico, cuja validação é alcançada por intermédio de simulações e de um experimento real, com a finalidade de propiciar o restabelecimento das coordenadas dos limites das parcelas, considerando a movimentação espacial e temporal da superfície terrestre e torná-lo exequível em CTMs.

Os objetivos específicos diretamente correlacionados ao objetivo geral são:

- Investigar sobre a acurácia posicional em levantamentos cadastrais, planejando e validando estratégias para a obtenção da mesma em rede através de um experimento;
- Definir os modelos de deformação espacial e temporal da superfície terrestre e aplicá-lo, por intermédio de simulações e dados reais na RRCM da área de estudo;
- Estabelecer procedimentos para restabelecer as coordenadas dos limites das parcelas, considerando os modelos adotados.

1.3 Procedimento metodológico

Vargas (1985) afirma que a conjectura, ou simples pensamento sobre um assunto, quando aceita, passa a ser uma hipótese. Esta é comprovada ou não, de acordo com resultados experimentais. Assim, esta tese tem por hipótese:

As coordenadas limítrofes das parcelas sofrem mudanças devido a deslocamentos ao longo do tempo e do espaço, causadas pela deformação da superfície terrestre e é possível modelar esta movimentação com a finalidade de analisar o comportamento da mesma, bem como apresentar um método que permita o restabelecimento destas coordenadas, se esta movimentação for significativa, confirmando ou não a hipótese levantada.

Esta pesquisa é do tipo indutiva, segundo conceitos de Vargas (1985), pois é uma pesquisa experimental precedida de análises e conclusões sobre o tema proposto. Para tanto, inicialmente foi realizada uma revisão bibliográfica sobre: Cadastro Territorial Multifinalitário e sua unidade territorial (parcelas); a Cartografia Cadastral, suas definições e os métodos de concepção de uma RRCM; a acurácia dos levantamentos cadastrais e procedimentos metodológicos adotados para determiná-la; Cadastro Dinâmico, através de experiências de eficácia comprovada; as deformações sofridas pela superfície terrestre e seus modelos. Foi executado um experimento, na área de estudo do município de Taciba-SP, que consistiu em: estabelecimento de estratégias e análises da acurácia da RRCM, submissão da RRCM a um modelo de deformação e um procedimento para o restabelecimento das coordenadas, as análises e conclusões concernentes a este experimento.

1.4 Justificativa e relevância

Nos dias atuais, há a necessidade de geração e troca de informações nas mais diversas áreas do conhecimento. Especial ênfase se dá às informações espaciais ou geoinformação que, associadas aos progressos tecnológicos, tornam-se instrumentos importantes de gestão. Esforços têm-se concentrado, no meio científico, no sentido de se obter cada vez mais geoinformações de melhor qualidade (acurácia), que permitam a interoperabilidade com dados de outra natureza, de fácil acesso, e atualizações (coordenadas), quando necessárias.

Nesta conjuntura encontram-se os CTMs, que tratam da aquisição, armazenamento e atualização da geoinformação, entre outras tantas atribuições. Particularmente, nesta tese, assumiu-se a parcela e as coordenadas de seus limites como o objeto de estudo no domínio da geoinformação.

As normas vigentes no Brasil acerca de levantamentos dos limites das parcelas, da qualidade geométrica destes levantamentos, NBR 13133/94 e NBR 14166/98 não contemplam a acurácia da RRCM, nem tampouco a possível deformação decorrente da movimentação local ou global da superfície da Terra e por consequência a inadmissão da existência do Cadastro Dinâmico. Vale salientar que, no Brasil, há 5565 municípios, IBGE (2012), destes, 1468 municípios, segundo a CPRM/SGB (2011), estão suscetíveis a deslizamentos e enchentes. Tais municípios sofrem deformações heterogêneas na superfície, que necessitam de estudos aprofundados da geofísica, geologia e meteorologia local, não previstos nesta pesquisa. Tratar-se-á aqui, da deformação homogênea da superfície, das alterações nos limites das parcelas decorrentes desta deformação e de como proceder na validação ou não destas alterações.

A contribuição pretendida com este trabalho é iniciar um processo de discussões e investigações sobre o tema: Cadastro Dinâmico, definições, conceitos e procedimentos metodológicos. Trata-se de uma iniciativa pioneira no país, já que, em países onde há histórico de movimentação da crosta terrestre, provenientes de terremotos ou tsunamis, de efeitos tão devastadores, como no Japão, onde se dizimou todos os marcos da Rede de Monitoramento Contínuo de uma região, observa-se o desenvolvimento de teorias e aplicativos na busca de minimizar estes efeitos no CTM.

Considera-se assim de crucial relevância a elaboração desta tese, que além de partir da hipótese que as coordenadas dos limites das parcelas não são fixas, propõe-se um modelo de restabelecimento destas coordenadas.

1.5 Estrutura

Este texto é composto de oito capítulos. Além da Introdução (Capítulo 1), os seguintes capítulos compreendem:

- Capítulo 2: As definições, os aspectos históricos, físicos, jurídicos e fiscais do Cadastro, a definição da parcela, dos aspectos físicos e legais relacionados aos seus limites e formas de representação da mesma.
- Capítulo 3: A Cartografia Cadastral e a sua importância na estrutura do Cadastro; as projeções cartográficas, seus elementos, características e classificação; a Rede de Referência Cadastral Municipal (RRCM); o Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) e os métodos de determinação dos limites das parcelas.
- Capítulo 4: A precisão e acurácia dos limites das parcelas; os padrões de acurácia da RRCM no Brasil e no mundo, e o procedimento metodológico para a determinação da acurácia previsto neste trabalho.
- Capítulo 5: O Cadastro Dinâmico; os Modelos Geodésicos de Monitoramento de Deformação (MGMD); as experiências de Cadastros Dinâmicos na Nova Zelândia e Israel.
- Capítulo 6: O Modelo de Deformação da RRCM; o efeito da deformação da RRCM nas coordenadas das parcelas; os modelos de deformação espacial e temporal.
- Capítulo 7: A descrição do experimento, da área de estudo, os levantamentos de campo e resultados; a avaliação da acurácia em rede e local; as estratégias de processamento dos dados em um aplicativo científico; o processamento dos dados da RRCM; a determinação dos parâmetros de deformação espacial e temporal da RRCM; o modelo de Cadastro Dinâmico.
- Capítulo 8: As conclusões gerais do trabalho e recomendações para futuras pesquisas.

2 CADASTRO

2.1 Introdução

A presente pesquisa tem por tema central o Cadastro Dinâmico, cujas coordenadas podem ser alteradas devido à movimentação da superfície terrestre. Portanto, é conveniente o conhecimento dos conceitos, dos aspectos históricos, estruturais e operacionais pertinentes ao tema Cadastro. Este capítulo inclui: as diversas definições de Cadastro conforme as suas competências, o conjunto de atividades envolvidas e as suas finalidades. Em seguida é mostrada a evolução do conceito de Cadastro e são abordados os seus aspectos jurídicos, fiscais e físicos na sequência. Então, o conceito de parcela é estabelecido e enfim, são relatadas, sucintamente, as perspectivas para o Cadastro do Futuro.

2.2 Cadastro – Definições

São inúmeras as definições encontradas para o termo Cadastro, muitas delas relativas às especialidades do mesmo, como por exemplo, as associadas à descrição, listas, relações, registros, cadastro de clientes de um banco, de contribuintes do Instituto Nacional do Seguro Social (INSS), cadastro nacional de veículos, cadastro de bens patrimoniais de uma instituição, cadastro de consumidores de concessionárias de serviços públicos, cadastro de endereços e cadastro de imóveis, segundo Brandão (2003). Dantas (2009) relata que ao longo do tempo, as atribuições do Cadastro foram estendidas e criadas novas denominações. Encontram-se assim, os seguintes tipos de Cadastro: Técnico, Geométrico, Imobiliário, Fiscal, Napoleônico, Temático, Multifinalitário, de contribuintes, de alunos, entre outros.

Ferreira (1988) define Cadastro como o “registro público dos bens imóveis de um território ou registro que bancos ou empresas mantêm de seus clientes”, ainda, que Cadastro deriva do termo francês “cadastre” e corresponde ao registro público dos bens imóveis de determinado território, que compreende ainda, o registro de bens privados de um determinado indivíduo.

Em Çagdas e Stubkjaer (2008), são encontradas diferentes definições e seus elementos definidores (objeto de registro, conteúdo e atributos, situação e estrutura e abrangência), referidas a seguir.

Cadastro é um inventário público de dados metodicamente organizados relativos a propriedades, dentro de um país ou distrito, baseado em um levantamento de seus limites, conforme Henssen e Willianson (1990).

Para Ting¹ (2002 apud Çagdas e Stubkjaer, 2008), Cadastros são registros de direitos e atributos de uma área definível de terra.

Já para Steudler² (2004 apud ÇAGDAS; STUBKJAER, 2008), Cadastro é uma descrição sistemática de unidades de terra, dentro de uma área.

Em Dalrymple³ (2005 apud ÇAGDAS; STUBKJAER, 2008) é encontrado: Cadastro é simplesmente um inventário de parcelas de terra descritas por componentes textuais (certificados de títulos) e espaciais (mapas), pertencentes ao proprietário e interesses de uso.

De acordo com Silva⁴ (2005 apud ÇAGDAS; STUBKJAER, 2008), Cadastro é uma descrição oficial e sistemática de todas as parcelas de terra dentro de uma jurisdição, baseado predominantemente em um levantamento de seus limites, representado em mapas, os quais incluem, para cada parcela, um único identificador.

Segundo Nkwae⁵ (2006 apud ÇAGDAS; STUBKJAER, 2008), um Cadastro é um registro público de direitos da terra e os registros de Cadastro consistem de duas partes: a descrição gráfica e a descrição textual.

Quanto à origem da palavra, Antunes e Brandalize (2009) relacionam como possíveis origens: Capistratum e Catastrum, do latim, cujo significado é registro das unidades de taxação territorial; Capitatio (latim): captação e Katastikhon* (bizantina) com o significado de

¹ TING, L. A. **Principles for an integrated land administration system to support sustainable development**. Ph.D. Dissertation. University of Melbourne. 2002.

² STEUDLER, D. **A framework for the evaluation of land administration systems**. Ph.D. Thesis. University of Melbourne. 2004.

³ DARLYMPLE, K. **Expanding rural land tenures to alleviate poverty**. Ph.D. Dissertation. University of Melbourne.

⁴ SILVA, M. A. **Modelling causes of cadastral development – cases in Portugal and Spain during the last two decades**. Ph.D. Dissertation. Aalborg University. 2005.

⁵ NKWAE, B. **Conceptual framework for modeling and analysing periurban land problems in Southern Africa**. Ph.D. Dissertation. University of New Brunswick.

lista ou livro de registros. Segundo Erba, Oliveira e Lima Júnior (2005), o termo *katsicou* (do grego - *Catastichon* = lista, agenda) é o que mais se aproxima da definição atual.

Antunes e Brandalize (2009) citam ainda, as traduções da palavra em alguns países como: Catasto (Itália); Catastro (Espanha); Kataster (Alemanha); Cadastre (França e Inglaterra); Cadaster (EUA); Cadastro Técnico (Brasil).

Há uma aceitação com relação ao termo cadastro, sendo o mesmo definido pela *Federação Internacional de Geômetras* (FIG) na Declaração do Cadastro 2014 da seguinte forma:

[...] Cadastro consiste num sistema de informação territorial atualizado, baseado em parcelas, contendo um registro de interesses relacionados ao território (por exemplo, direitos, restrições e responsabilidades). Normalmente, inclui uma descrição geométrica das parcelas em conjunto com outros registros que descrevem a natureza dos interesses, a propriedade ou controle desses interesses, e freqüentemente o valor da parcela e suas benfeitorias.

A Figura 2.1 ilustra a definição de Cadastro, o caminho percorrido pelas informações cadastrais e a integração destas.

Figura 2.1 – O conceito de Cadastro. Fonte: adaptado de Wallace (2009).

No que diz respeito à finalidade do Cadastro, Larsson (1991), descreve inicialmente como para tributação, direcionada ao financiamento do setor público e base para avaliação de

imóveis e como registro público de limites. Em seguida, com propósitos legais relativos à propriedade imobiliária, destinado ao setor privado como garantia de propriedade. As designações de Cadastro atribuídas ao cadastro da propriedade imobiliária incluem: “cadastro técnico”, “cadastro imobiliário” ou “cadastro fiscal”. Com o decorrer do tempo, ao conceito de Cadastro foram incluídos os vários interesses sobre a terra e de planejamento e gestão territorial, expostos em Pelegrina (2009). Pode-se, também, entender que cadastro de propriedade equivale a cadastro legal.

Para Souza (2011), a multiplicidade de informações sobre um imóvel, evidencia o caráter multifinalitário do Cadastro. Este autor relata que este conceito está alicerçado sobre os pilares:

- Legal: incluindo as leis, decretos e normas, dando respaldo jurídico ao Cadastro.
- Econômico: com relação aos recursos financeiros necessários.
- Técnico: inclui os aspectos técnicos do Cadastro (levantamentos, material de consumo, softwares).
- Político: aspectos relativos ao poder público e à população.

Em Moura (2007), é afirmado que do ponto de vista legal, no cadastro deve haver a identificação das parcelas e seus limites com precisão, fornecendo ao poder público informações geométricas confiáveis, juntamente com as informações de quem as possui, incluindo entre outras, informações sobre os direitos e obrigações sobre a terra, a natureza, a superfície e o valor.

Já, Erba, Oliveira e Lima Júnior (2005) mencionam que nos países do Mercosul, é empregado o Cadastro Territorial, um registro público sistematizado dos bens imóveis de uma jurisdição contemplado nos três aspectos fundamentais: econômico, geométrico e jurídico.

Atualmente, há uma aceitação geral quanto à multifinalidade do Cadastro, abordada em Loch; Erba (2007), associando-o às funções de tributação, retratação da ocupação territorial, complemento do Sistema de Registro de Títulos, fiscalização da função social da propriedade, base para o ordenamento do planejamento territorial (rural e urbano) e para questões ambientais, observando-se o aumento significativo de sua utilização e destaque.

Ainda, em relação à função de multifinalidade do Cadastro, Dantas (2009), destaca que na ECO 92, Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento realizada no Rio de Janeiro, enfatizou-se a importância da informação ambiental confiável como apoio aos processos de tomada de decisões para a preservação do

meio ambiente e promoção do desenvolvimento sustentável. Assim, as informações cadastrais devem garantir eficiência na fiscalização, preservação e prevenção da degradação ambiental.

De acordo com Loch (1998), o Cadastro Técnico Multifinalitário é uma área de pesquisa intradisciplinar que engloba conhecimentos desde as medidas cartográficas até o nível dos imóveis, a legislação vigente da ocupação do solo e também a avaliação rigorosa da melhor forma de ocupação deste espaço.

Blachut (1979) afirma que por CTM entende-se um sistema de registro da propriedade imobiliária, feito de forma geométrica e descritiva, que fornece parâmetros para modelo de planejamento, levando-se em conta a estruturação e funcionalidade.

Para Lima (1999), o CTM é um complexo de informações gráficas e descritivas de uma fração da superfície terrestre, incluindo as propriedades imobiliárias georreferenciadas, que propicia o detalhamento dos aspectos levantados, com o pretexto de contribuir com a gestão ambiental.

Brandão; Santos Filho (2008) esclarecem que o estabelecimento de um cadastro territorial multifinalitário ou multipropósito tem o intuito de atender as necessidades de natureza legal, fiscal e administrativa que envolvam a ocupação e a forma de domínio do território. Segundo os autores, a necessidade legal ou jurídica é relativa à garantia da propriedade; à necessidade fiscal; à cobrança de impostos sobre o uso do solo; à necessidade administrativa que diz respeito às atividades relacionadas ao planejamento e à gestão do território. Os componentes do cadastro multipropósito são mostrados na Figura 2.2.

Figura 2.2 – Componentes do cadastro multifinalitário. Fonte: adaptado de Wallace (2009).

Para Loch e Erba (2007) a inserção do Cadastro na estrutura administrativa dos estados, é uma prova contundente da sua universalidade no sistema de publicidade territorial de um país, uma consequência da identificação correta do imóvel.

2.3 Aspectos históricos do cadastro no contexto internacional e nacional

Há indícios da existência de documentos de terras para tributação e outras contribuições para o estado, já no Egito antigo de 3.000 a. C., em uma menção aos registros de terras relatados em Larsson (1991).

O Cadastro Napoleônico, criado na Revolução Francesa (final do séc. XVIII), foi o precursor dos sistemas cadastrais atuais. Foi a partir do Código Napoleônico (1804-1810), marco da reestruturação da administração pública dos direitos civis, que foi instituída a igualdade e o direito a propriedade pelos cidadãos. Assim, grandes propriedades foram parceladas e distribuídas. Da necessidade de organização das informações sobre as parcelas e os respectivos proprietários foi criado um sistema cadastral.

Concebido para fins fiscais, mas segundo Williamson⁶ (1983 apud BRANDÃO, 2003), devido à falta de precisão, o Cadastro Napoleônico, não pôde ser utilizado para fins legais. No Cadastro Napoleônico não foi previsto a desatualização das plantas cadastrais com o passar do tempo, culminando em uma reforma no antigo cadastro.

No Brasil, de acordo com Pires (2005), inicialmente, o rei de Portugal detinha o título de posse das terras. Concomitantes às atividades de colonização, existiam as de escravidão, exploração e ocupação do território, surgindo como consequência a exigência da delimitação da extensão de cada gleba. Foi então, adotado o regime de sesmarias, caracterizado por doações do domínio público para o privado e com duração até a independência do Brasil, em 1822.

Em 1846 foi criado o Registro Geral de Hipotecas, a partir do qual se originou o atual sistema de registro de imóveis e dando origem em 1864 ao chamado Registro Geral, que em 1916 passou a ser o Registro de Imóveis. Em 1854, foi legitimada a aquisição pela posse, registrada em paróquias, com o propósito declaratório, separando o domínio público do particular. Era o registro do vigário, cuja prática gerava incertezas e não amparavam as transações comerciais.

O precursor do sistema de registro de imóveis no Brasil, segundo Pires (2005), foi o registro imobiliário alemão, que propiciava o desenvolvimento econômico mediante segurança jurídica. Pires (2005) relata que num contexto atual destaca-se a existência dos princípios registrais: a prioridade, a especialidade, a legalidade, continuidade, unitariedade, instância que tem por propósito a segurança jurídica e reforçam a idéia da parcela definida por coordenadas e suas precisões.

Da necessidade de organizar e administrar as informações contidas no registro de imóveis foram criados os primeiros sistemas cadastrais, visando a tributação e o comércio de imóveis. A diversidade de informações sobre os imóveis, as exigências relativas à organização destas informações e a troca das mesmas, caracterizou o surgimento do Cadastro Técnico Multifinalitário. Amorim, Souza e Dalaqua (2004) afirmam que, ainda nos dias atuais, tais informações são desatualizadas, causando danos à arrecadação municipal e à justiça fiscal.

⁶ WILLIAMSON, I. Surveying and Mapping Legislation – Lessons Learnt. In: UNITED NATIONS REGIONAL CARTOGRAPHIC CONFERENCE FOR THE AMERICAS, 6th., New York, 1997. **Proceedings**...1997.

A Figura 2.3 apresenta a evolução das visões de Cadastro concomitante com a evolução dos métodos de avaliação, de planejamento e administração.

Figura 2.3 – Evolução das visões de Cadastro. Fonte: adaptado de Erba, Oliveira e Lima Júnior (2005).

2.4 Aspectos jurídicos, fiscais e físicos do cadastro

Brandão (2003) descreve que a ocupação territorial deve ser fielmente retratada por modelos da realidade atendendo às necessidades legais ou jurídicas (garantia de propriedade), fiscais (cobrança de impostos sobre o uso do solo) e administrativas (outras atividades ligadas ao planejamento e gerenciamento territorial). Outro aspecto tratado pelo autor sobre a ocupação territorial é o físico, que é relativo à delimitação geométrica dos direitos sobre o domínio e referente à caracterização espacial, localização e dimensões, objetos desta tese. Ainda, o autor explica que os jurídicos pertencem ao sistema de registro territorial, enquanto os aspectos físicos se inserem no sistema de cadastro territorial e os fiscais ao sistema tributário sobre o uso da terra. A Figura 2.4 sintetiza estes conceitos, estabelecendo as correlações entre os mesmos.

Figura 2.4 – Aspectos jurídicos, fiscais e físicos do Cadastro territorial. Fonte: adaptado de Brandão (2003).

Algumas variações destes aspectos podem ser encontradas, em Erba, Oliveira e Lima Júnior (2005), em função da evolução dos métodos de avaliação dos imóveis e das prerrogativas destes aspectos. Assim, os autores relatam que o Cadastro Econômico registrava o valor da parcela e com base no qual era calculado o imposto territorial, para efeito de tributação. Ao Cadastro Geométrico (ou Cadastro Físico) associa-se a aplicação de métodos de avaliação por meio de processos construtivos, localização forma e dimensões dos terrenos. Finalmente, o Cadastro Jurídico era organizado como complemento aos registros de imóveis.

Definidos e implementados os diferentes tipos de Cadastro, surgiu a necessidade de que houvesse troca das informações entre eles, essencial para a eficiência dos sistemas cadastrais. Moura (2007) propôs que houvesse um intercâmbio sistemático de informações entre os diferentes tipos de cadastros relatados anteriormente. Para que isto aconteça, o princípio de especialidade que preconiza que o imóvel deve ser descrito individualmente e de maneira inequívoca, deve ser atendido, propiciando informações confiáveis. O não atendimento a este princípio, ou a ausência de intercâmbio entre o cadastro e o registro, induz a situações que impedem o exercício do direito de propriedade, dificultando ou impedindo um processo de regularização fundiária.

Na prática, a interligação entre as informações, é muitas vezes ausente ou ineficiente e tem sido objeto de pesquisas, como pode ser visto em Carneiro (2000), que cita como exemplos de sucesso, o sistema Torrens, adotado na Austrália, onde o cadastro e registros são reunidos em uma organização. Na Alemanha e Suíça, onde, apesar de estarem separados os sistemas de registro e de cadastro, há interligação entre os mesmos. A autora discorre que alguns países como França, Portugal e Itália encontram-se no processo de interligação e Argentina, Espanha, Costa Rica, Porto Rico, El Salvador, Panamá tem concentrado esforços no sentido de promover o intercambio de informações cadastrais.

No Brasil, segundo Brandão (2003), o problema consiste na distinção entre as instituições ligadas aos sistemas de cadastro e de registro, prejudicando a interligação entre os mesmos. O autor ressalta que, com a Lei 10.267/2001, o Decreto N° 4.449/2002 e as discussões promovidas pelo IRIB – Instituto de Registro Imobiliário do Brasil, é possível vislumbrar melhorias na troca de informações. Trabalhos científicos como os desenvolvidos por Carneiro (2001) nos municípios de São Paulo (SP) e Santo André (SP), também são importantes para a efetivação do intercâmbio de informações cadastrais. Mais recentemente, a Portaria 511/2009, de 07 de dezembro de 2009, do Ministério das Cidades (BRASIL, 2009), também orienta os municípios neste sentido.

2.5 A unidade territorial básica do cadastro e seus limites

Desde o Cadastro Napoleônico denomina-se parcela, a porção da superfície da terra delimitada fisicamente, sujeita ao mesmo uso e encargos e possuída pela mesma pessoa.

Henssen e McLaughlin⁷ (1986 apud LARSSON, 1991) definem parcela cadastral como uma porção contínua de terra com única posse. A parcela cadastral deve envolver uma área contínua e um interesse contínuo. No mapa, a parcela cadastral é formada pelas linhas de limite, que tem uma única identificação. Ainda em UN⁸ (1985 apud LARSSON, 1991) usam a seguinte definição: uma parcela, conhecida em alguns países como lote, plot ou ainda um plat,

⁷ HENSSEN, J. L. G.; McLAUGHLIN, J. D. The development of a conceptual framework for the study of cadastral systems. In: INTERNATIONAL FEDERATION OF SURVEYORS – FIG CONGRESS, XVIII, Toronto, 1986. **Proceedings...**1986.

⁸ UNITED NATIONS. Conventional and Digital Cadastral Mapping. In: Meeting of the Ad Hoc Group of experts on Cadastral Surveying and Land Information Systems. **Proceedings...**1985.

é uma área de terra na qual se identifica a separação de outras áreas que deve ser definida pelo limite de direitos legais, pela responsabilidade de pagamentos de tributos ou pelo uso.

A declaração sobre cadastro da FIG considera a parcela como sendo a unidade territorial básica do cadastro, correspondente a uma determinada extensão territorial com uma determinada característica, ou seja, uma porção do território com condições homogêneas de domínio.

Pelegrina (2009) apresenta a definição de parcela cadastral como a menor unidade do cadastro, definida como uma parte contígua da superfície terrestre com regime jurídico único, condizente com a definição da FIG. Erba, Oliveira e Lima Júnior (2005) discorrem que no Brasil a unidade de registro é o lote, mas na maioria dos países o termo usado é parcela, como por exemplo, na Argentina e nos países do Cone Sul, não acontecendo em alguns países europeus. Para Carneiro, Erba e Augusto (2012), a unidade de registro (matrícula) é o imóvel, enquanto a unidade de cadastro pode ser o lote em áreas urbanas (mas, inseridos no lote podem existir outras unidades cadastradas, como, p.ex., os apartamentos).

O conceito de Cadastro 2014 descrito por Kaufmann e Steudler (1998), declara a unidade de registro como o objeto territorial, definido como a porção de território na qual existem condições homogêneas dentro de seus limites.

Para que se tenha melhor compreensão de uma parcela é necessário o entendimento da sua delimitação na superfície obtida por seus limites materializados. Assim, Bianco⁹ (1986 apud ERBA, OLIVEIRA e LIMA JÚNIOR, 2005) conceitua como limites os entes culturais concebidos pela razão de quem interpreta um documento ou os fatos materiais existentes no território. Brandão (2003) afirma que os limites consistem na delimitação geométrica dos direitos relacionados ao domínio territorial.

Nos documentos cartográficos, os limites são representados por linhas que correspondem às projeções dos planos sobre a superfície de referência, como pode ser observado na Figura 2.5.

⁹ BIANCO, C. **Introducción al Catastro Territorial**. UNR, 1979, 35p.

Figura 2.5 – Visão espacial do limite. Fonte: Erba, Oliveira e Lima Júnior (2005).

Quanto aos tipos de limites, Haar¹⁰ (1992 apud ERBA, OLIVEIRA e LIMA JÚNIOR, 2005) apresenta o limite legal (linha imaginária que não se pode localizar no terreno e com necessidade do conhecimento dos títulos da parcela e das vizinhas a ela) e o limite de posse (determinado pelo uso do imóvel e materializado).

Erba, Oliveira e Lima Júnior (2005) afirmam que geralmente são determinados os limites de posse, sem considerar os limites legais das propriedades, culminando na situação de confusão de limites e sobreposição de títulos das propriedades, como ilustra a Figura 2.6.

¹⁰ HAAR, V.H. **El Catastro y la Cartografía**. UNC, 1992.

Figura 2.6 – Confusão entre limites de posse e limites legais das propriedades. Fonte: Erba, Oliveira e Lima Júnior (2005).

Brandão (2003) refere-se às formas de apresentar os limites territoriais como:

- a) na forma textual, que descreve os limites e confrontantes da parcela, sem caracterizá-los e sem bases matemáticas;
- b) na forma gráfica, por meio de cartas cadastrais e considerada pelo autor como um complemento à forma numérica; e;
- c) na forma numérica ou matemática, que traz a descrição geométrica das linhas de limites (direções e distâncias) ou coordenadas dos pontos, referenciados ao SGB, que definem os limites da parcela, caracterizando o georreferenciamento das mesmas.

As três formas de demonstrar os limites são vistas nas Figuras 2.7 e 2.8.

Forma textual

... um terreno de esquina denominado lote 4 da quadra A do Loteamento Vale Verde, com área de 288,00 m² com as seguintes medidas: 12,00m de frente para a Rua 1; 12,00m de fundos ; na lateral direita 24,00m e a lateral esquerda 24,00 m ...

Forma gráfica

Figura 2.7 – As formas textual e gráfica de representação de limites. Fonte: adaptado de Carneiro (2010).

"Partindo do marco E1, segue-se por uma linha seca no rumo de 58 59' SE, e distância de 144,18 metros, dividindo com o prolongamento da rua Rio Bonito, até encontrar o marco E2; daí seguiu-se por uma linha seca no rumo de 48 00' NE e distância de 304,40 metros, dividindo com a rua Projetada, até encontrar o marco E-3;.... até encontrar o marco E1, ponto de partida."

Figura 2.8 – A forma numérica de apresentação de limites. Fonte: Carneiro (2010).

A determinação de limites através do georreferenciamento, outra forma de representação numérica das parcelas, é de acordo com Carneiro (2010), caracterizada pela representação inequívoca destas. Um exemplo é visto na Figura 2.9.

" Terreno localizado na Rua Ernesto, quadra 15, lote 18, com a seguinte descrição: inicia-se o perímetro da área junto ao ponto P1 com coordenadas UTM SAD69 N 9.364.542m e E 254.294m com azimuth 102°18, distância de 15m, confrontando com a Rua 5, chega-se ao ponto P2, coordenadas UTM SAD69 N 9.364.542m e E 254.708m, deste com azimuth 283°08..."

Figura 2.9 – Determinação de limites por georreferenciamentos. Fonte: Carneiro (2010).

2.6 O futuro do cadastro

Em 1994, um novo sistema cadastral foi proposto pela Comissão 7 da FIG, disponível em www.fig.net, cujo alicerce foram as reformas cadastrais e o objetivo era identificar as

tendências para os vinte anos seguintes, denominado de Cadastro 2014, propondo um cadastro moderno e embasado no levantamento dos limites de todos os objetos territoriais legais de determinado país ou distrito e a sua organização em um inventário público.

Os princípios do cadastro 2014, como podem ser encontrados em <http://www.fig.net/cadastrre2014/> (acesso em 16/05/2010), têm alicerces nas seguintes declarações: no futuro o cadastro exibirá a situação legal completa do território incluindo o direito público e as restrições; será extinta a separação entre os registros gráficos (cartografia) e os alfanuméricos (atributos); a modelagem cartográfica substituirá a cartografia tradicional; todo o sistema de informação será digital; haverá uma grande participação do setor privado no cadastro (privatização parcial ou inclusive total); dados serão comercializados à usuários interessados, o que possibilitará novos investimentos direcionados a atualização melhoria do sistema cadastral.

Neste contexto, Bennett et al. (2010) enfatizam a necessidade de constante modernização e adequação do cadastro às novas tecnologias de informação e às teorias de sustentabilidade. Ainda, que as teorias e modelos cadastrais desenvolvidos nos últimos trinta anos exigem uma avaliação no contexto contemporâneo. Para os futuros sistemas de cadastros, os autores propõem seis elementos conceituais: os cadastros de levantamentos acurados, 3D/4D, em tempo real, globais, orientados ao objeto e os orgânicos.

2.7 Considerações finais

Neste capítulo, buscou-se com uma revisão bibliográfica, a familiarização com conceitos do domínio do cadastro. Portanto, o conhecimento da diversidade e especificidade do cadastro, suas origens, evolução e principais elementos, como por exemplo, a parcela (características físicas e legais), são considerados primordiais ao desenvolvimento deste trabalho. Dentre os elementos conceituais propostos para o cadastro do futuro, encontra-se o cadastro de levantamento acurado. Um dos objetivos almejados neste trabalho é o da avaliação da acurácia da RRCM, atendendo aos anseios de serem iniciadas investigações nesta área.

3 CARTOGRAFIA CADASTRAL

3.1 Introdução

A parcela, definida no Capítulo 2, é a unidade básica do CTM e a sua descrição deve ser feita de maneira inequívoca e com localização definida no município. Para que isso aconteça, é necessária a determinação dos limites das parcelas em um sistema de coordenadas oficial vindo do georreferenciamento das mesmas. Este procedimento implica na vinculação dos pontos da parcela a uma rede de pontos municipal, a Rede de Referência Cadastral Municipal (RRCM), que por sua vez, deve estar referenciada a um Sistema Geodésico de Referência, no Brasil, o Sistema Geodésico Brasileiro (SGB). A representação da parcela georreferenciada é efetivada em uma carta cadastral. Trata-se da representação da superfície de referência, na superfície plana (no caso, uma carta cadastral) que requer a escolha de uma superfície intermediária, denominada, projeção cartográfica. Essa necessidade, diante de muitas proposições de projeções existentes, faz com que a seleção da mesma, seja ainda um grande desafio à comunidade científica. Todas estas considerações envolvem os conhecimentos intrínsecos da Cartografia Cadastral e é sobre esta área que este capítulo versa. O capítulo apresenta a sequência de assuntos: os conceitos de Cartografia Cadastral; os métodos de levantamento dos limites das parcelas, incluindo o processamento de dados GNSS com software científico GAMIT; a RRCM; o SGB e as representações dos limites das parcelas.

3.2 Definições

Cartografia Cadastral é a ciência e arte de fazer mapas cadastrais (BLACHUT, 1979).

Definida em IBGE (1998), como uma subdivisão da Cartografia Geral, a Cartografia Cadastral tem como objetivo primordial o conhecimento da superfície topográfica nos seus fatos concretos, os acidentes geográficos naturais e as feições realizadas pelo homem. Dentre os exemplos encontram-se as plantas de cidades, onde são localizadas as parcelas e seus atributos.

Conforme Fernandez (2003), numa alusão ao cadastro espanhol, o cadastro e o registro de imóveis são sistemas relacionados, que utilizam a mesma referência cadastral como a chave de identificação da situação real e direcionados a usar a Cartografia Cadastral como um suporte territorial para a identificação, localização e descrição das parcelas. Cabe aqui comentar, que na prática, isso não ocorre geralmente, pois na grande maioria dos municípios brasileiros a integração entre os sistemas não é alcançada, de acordo com Amorim, Souza e Dalaqua (2004).

A Figura 3.1 ilustra a função e importância da Cartografia Cadastral na estrutura do modelo conceitual apresentado por Fernandez (2003), como sendo elemento de embasamento e ligação entre os componentes do mesmo, atentado como ideal.

Figura 3.1 – Modelo conceitual de cadastro. Fonte: adaptado de Fernandez (2003).

Com relação às competências, a Cartografia Cadastral deve representar as parcelas geometricamente acuradas juntamente com feições que forem de interesse aos planejamentos urbano e rural. Como exemplo da abrangência das feições importantes, Boscatto e Oliveira (2006) apresenta casos, como no município de São Paulo em que são previstos usos do subsolo e espaço aéreo contemplando a necessidade da Cartografia Cadastral 3D e, como consequência, a exigência de regulamentação da mesma.

Ramos, Câmara e Monteiro (2007) discorrem sobre a Cartografia Cadastral estar primordialmente associada às escalas grandes, que permitem o detalhamento exigido nas gestões territorial urbana ou rural, e ao sistema de projeção adotado no país. Ainda, tem como produto as Cartas Cadastrais, com limites de imóveis, rede hidrográfica, sistema viário e edificações.

Na realidade, o que se encontra é a inexistência de legislação e ausência de normas para o mapeamento cadastral urbano, fato que compromete a qualidade da informação e por consequência nas aplicações em problemas concernentes ao meio urbano.

No Brasil, existem 5.565 municípios, segundo IBGE (2012), distribuídos em uma extensão territorial de proporções continentais, vivenciando realidades distintas e com cadastros técnicos também distintos. Os levantamentos topográficos dos limites físicos feitos no país contam com as normas NBR 13133/94 e NBR 14166/98, que estabelecem critérios para a implantação da RRCM, definição de origem no SGB, Sistema de Projeção Cartográfica; mas, nelas não são considerados procedimentos que avaliem a acurácia dos levantamentos e o dinamismo da superfície terrestre, propostos nesta pesquisa.

3.3 Métodos de levantamentos dos limites das parcelas

Erba, Oliveira e Lima Júnior (2005) consideram que em países onde a parcela é utilizada como a unidade dos sistemas cadastrais à identificação dos seus limites por métodos de levantamentos e à representação dos mesmos em cartas cadastrais devem ser dedicadas atenção especial, no que diz respeito ao rigor técnico empregado nestes procedimentos. Por exemplo, a não identificação dos limites entre parcelas podem ocasionar problemas como sobreposição das mesmas, acarretando problemas legais para os proprietários.

Como as coordenadas dos limites físicos das parcelas são dados espaciais georreferenciados, os métodos e equipamentos adotados na obtenção dessas coordenadas incluem, de acordo com Segantine (2001), levantamentos topográficos, geodésicos, fotogramétricos, por Sensoriamento Remoto ou pela transformação de dados existentes.

Quanto aos levantamentos topográficos, ainda segundo Segantine (2001), destaca-se serem de importância na aquisição de informações cadastrais em áreas urbanas, cujos levantamentos de campo são efetuados com estações totais. Após o processamento e armazenagem dos dados coletados, é possível a elaboração de cartas ou mapas cadastrais representando os limites e as coordenadas dos vértices. A ilustração de um levantamento topográfico de limites de parcelas e a locação de obras é vista na Figura 3.2.

Figura 3.2 – Levantamento cadastral por métodos topográficos.

Em seguida, Segantine (2001), aponta o *Global Navigation Satellite System* (GNSS), como uma poderosa ferramenta na determinação de posicionamento de pontos, aplicável também às coordenadas dos limites das parcelas. Trata-se de um sistema cujo funcionamento é baseado no princípio da trilateração, que permite o conhecimento do posicionamento de um conjunto de satélites relativo a um referencial inercial e por consequência a posição de qualquer ponto em relação a este sistema.

Com relação às informações espaciais, já que se propõe o seu uso nesta pesquisa, é pertinente a inserção do conhecimento do GNSS, sua utilização no meio urbano, restrições e soluções apresentadas para estas restrições. Dentre os Sistemas que compõem o GNSS, será considerado apenas o Sistema GPS (Global Positioning System).

O GPS, de acordo com Segantine (2001), é um sistema de multipropósitos, que permite aos usuários determinar suas posições expressas em latitude, longitude e altura geométrica, por coordenadas (X, Y, Z) em relação ao centro de massa da Terra. A grande vantagem desse sistema é a sua capacidade de integração com outros. Associado a mapas digitais, ou, a um Sistema de Informações Geográficas (SIG) e a um sistema de comunicação produz um sistema de controle. A Figura 3.3 mostra a obtenção de coordenadas dos limites das parcelas usando o GNSS. Observa-se, aqui, a constatada limitação do uso desta tecnologia em áreas muito adensadas.

Figura 3.3 – Levantamentos geodésicos cadastrais.

Segantine (2001) descreve ainda, como meio da determinação de limites das parcelas, o uso de fotografias ou imagens raster usando a técnica da Fotogrametria, que possibilita o estudo e definição das formas, dimensões e posicionamentos dos limites físicos (Figura 3.4).

Figura 3.4 – Atualização cadastral com base em fotografias aéreas. Fonte: Engefoto (2012).

Destaca então, a utilização da técnica do Sensoriamento Remoto, que consiste na observação à distância de objetos através da emissão ou reflexão de ondas eletromagnéticas, tendo como produto, imagens posteriormente usadas na obtenção de informações geométricas de objetos, como as parcelas cadastrais (Figura 3.5). Neste contexto, atenta-se para possíveis limitações geométricas na utilização desta técnica. Por fim, a transformação de dados pode ser realizada por intermédio de suas próprias conversões, analógicos em digitais, e pelo uso de scanner ou vetorização das informações.

Figura 3.5 – Imagens de satélite e a informação cadastral. Fonte: Carneiro (2010).

A eficácia no emprego dos produtos cartográficos cadastrais advindos de imagens oriundas de sensores de alta resolução espacial é comprovada em experiências como em Mvranza e Argialas (2007), onde são descritas técnicas de detecção de limites para extração de informações lineares em ambiente urbano, observa-se, aqui, tratar-se de identificações de feições urbanas e não dos limites das parcelas.

Amorim, Camargo e Miyashita (2010) relata uma pesquisa que avalia o potencial das imagens QUICKBIRD ortorretificadas para o mapeamento de propriedades na área de expansão e vazios urbanos. Os resultados apontaram para um Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) satisfatório às necessidades cadastrais e para um produto de custo acessível, quando comparado a outros métodos de levantamento e para uma escala máxima de 1: 3.000.

Loch e Erba (2007) relatam sobre a aplicação das geotecnologias em CTM, podendo utilizar todas, ficando a escolha da mesma vinculada geralmente à escala e ao fator econômico. O autor disserta sobre a importância da Cartografia Cadastral desde a concepção do cadastro, com produtos cartográficos como Base Cartográfica, composta pela estrutura

fundiária e altimetria, e as cartas temáticas dependentes do número de cadastros setoriais que compõem o CTM. Tais cartas temáticas podem ser obtidas por imagens de satélite, aerofotografias ou censos socioeconômicos. Concluindo, devido às limitações geométricas da técnica de Sensoriamento Remoto supracitadas, não se cogitou a aplicação da mesma nessa pesquisa.

3.3.1 Processamento de dados GNSS

Os programas científicos GAMIT/GLOBK utilizados nesta pesquisa foram, segundo Herring, King e McClusky (2010), desenvolvidos pelo Massachusetts Institute of Technology (MIT), Scripps Institution of Oceanography (SIO) e Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics (CfA) para estimar velocidades e coordenadas de estações, representações funcionais ou estocásticas de deformação pós-sísmica, atrasos atmosféricos, órbitas de satélites e parâmetros de orientação da Terra.

Estes programas são disponibilizados pelo Dr. Robert W. King para universidades e órgãos governamentais para qualquer propósito não comercial. O programa GAMIT (GPS Analysis at MIT) corresponde a um conjunto de aplicativos que processam as observáveis GPS (fase da portadora e pseudodistância) para fins de estimar as posições tridimensionais de estações terrestres e órbitas dos satélites artificiais, os atrasos atmosféricos e os parâmetros de orientação da Terra. O GLOBK (Global Kalman filter VLBI GPS analysis program) é um filtro de Kalman que combina as soluções geodésicas de vários experimentos, tais como, GPS, VLBI (Very Long Baseline Interferometry), SLR (Satellite Laser Ranging) e observações terrestres (distâncias), além das chamadas “quase-observações” (matrizes covariâncias dos ajustamentos).

O processamento dos dados GNSS foi realizado com o GAMIT e, posteriormente, com o GLOBK realizou-se a combinação das soluções obtidas no processamento com outras, p.ex., as do MIT (arquivo H-file), para a realização do sistema.

A preparação dos dados para realizar o processamento inicia-se com a criação do diretório do experimento (/home/usuário/expt) e a execução do script sh_setup, o qual copia para o subdiretório (/home/usuário/expt/tables) os arquivos de controle (p.ex.: o arquivo process.defaults que contém nomes de diretórios e alguns controle de processamento) e vincula os arquivos de natureza global (p.ex.: arquivo rcvant.dat que relaciona os nomes de

receptores e antenas no arquivo RINEX (Receiver Independent Exchange Format) com os correspondentes códigos no GAMIT). Alguns arquivos de controle devem ser editados para atender as necessidades do experimento, p.ex.: no arquivo `process.defaults`, a taxa de observação (30 segundos) e número de épocas (2880); no arquivo `sestbl.`, o tipo de experimento (BASELINE.) e a escolha da observável (LC_AUTCLN). Outros três subdiretórios foram criados, um para armazenar os dados GNSS que devem ser processados (`/home/usuário/expt/rinex`), outro para as efemérides transmitidas (`/home/usuário/expt/brdc`) e outro para as efemérides precisas (`/home/usuário/expt/igs`). As soluções do GAMIT estarão no subdiretório de cada dia processado (p.ex., `/home/usuário/expt/001`), enquanto as do GLOBK em um subdiretório específico (`/home/usuário/expt/gsoln`).

A execução do GAMIT se faz com o script `sh_gamit`, enquanto a do GLOBK com o `sh_glred`. Estes scripts proporcionam aos iniciantes um recurso imediato para a obtenção das soluções desejadas com os respectivos programas.

No GAMIT, o arquivo (h-file) que contém as estimativas e as covariâncias das soluções fracamente injuncionadas é denominado com o seguinte formato: `hexpt.YYDDD`; sendo `expt` o nome do experimento, `YY` e `DDD` o ano e o dia dos dados processados, respectivamente. Esta injunção fraca (“*loose constraint*”) corresponde a um desvio-padrão a priori das coordenadas das estações de um metro ($\sigma = \pm 1$ m), conforme orientações do Sistema SIRGAS aos seus Centros de Análise (http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Guias/2011_07_Guidelines_for_SIRGAS_Analysis_Centers.pdf).

No GLOBK, a solução encontra-se no arquivo com o seguinte formato: `globk_comb.org`. A realização do sistema (“estabilização”, no jargão do GLOBK, segundo Herring, King e McClusky (2010)) é obtida após a execução do GLOBK, com o arquivo de controle `glorg_comb.cmd` relacionando as estações para a estabilização. De acordo com Herring, King e McClusky (2010), a definição e a realização de um referencial terrestre preciso se faz com a aplicação de injunções de uma ou mais estações na rede considerada. O aplicativo GLOBK tem dois procedimentos: o primeiro, com a adoção de “injunção finita” que pode distorcer a rede, se as injunções associadas não são corretas para as coordenadas a priori e para os dados; o segundo, com o uso de injunções mínimas, onde as coordenadas das estações que definem o referencial são ajustadas, enquanto se estima translação, rotação e escala. Para Herring, King e McClusky (2010), a maneira mais simples para a realização do referencial é incorporar em sua solução dez ou mais estações que têm suas coordenadas

estimadas na mais recente solução do ITRF (International Terrestrial Reference Frame) e inclusas no arquivo itrYYYY.apr, sendo YY o ano correspondente à respectiva solução.

Assim, foram processados os dados GNSS, no GAMIT, com o modo BASELINE e combinou-se, no GLOBK, os arquivos h-files do experimento com os arquivos H-files disponibilizados pelo MIT.

3.3.2 Procedimentos para a definição dos limites das parcelas

Brandão (2003) relata que, ao levantamento cadastral, compete a obtenção dos limites de parcelas territoriais sem que necessariamente coincidam com as feições do terreno. Considera então, o conceito de levantamento cadastral, recomendado pela FIG, o qual consiste em procedimentos usados para caracterizar os pontos que definem os limites das parcelas e propõe as seguintes ações a serem efetuadas:

- a) Descrição das estremas (linhas de limite) com as características legais, jurídicas e administrativas, das linhas de limites das parcelas territoriais.
- b) Identificação das estremas no campo.
- c) Demarcação das estremas no campo, se necessário.
- d) Medição das estremas de acordo com as exigências técnicas vigentes.
- e) Representação gráfica da parcela através de um mapa ou planta cadastral.
- f) Restabelecimento de estremas perdidas ou danificadas.
- g) Resolução de disputas judiciais e administrativas envolvendo os limites.
- h) Cálculo de áreas ou outras grandezas pertinentes às linhas de limites das parcelas.
- i) Realizar medições técnicas relacionadas aos limites das parcelas.

Salienta ainda, que os sistemas cadastrais devem ter os limites de cada parcela definidos por suas coordenadas, denominando-se “cadastro de coordenadas”, um conceito que abrange além das coordenadas dos limites das parcelas o aspecto jurídico e o valor legal dessas coordenadas.

De acordo com Carneiro (2010), as necessidades do cadastro urbano ainda não são atendidas pela rede geodésica, fazendo-se necessária a implantação de novas redes referenciadas ao SGB, possibilitando assim, a atualização da carta cadastral e intercâmbio de informações. A autora relata também que uma RRCM deve possuir densidade de pontos suficiente para a cobertura, se possível, de todo território municipal, inclusive a área rural e fornecendo uma estrutura de pontos de controle uniforme para posteriores densificações.

Além da insuficiência de pontos da rede, destacam-se, também, exigências quanto a rigidez dessa rede e a abordagem de possíveis deformações espaciais ou temporais, contrapondo-se à hipótese levantada neste trabalho. Estas questões e as especificações técnicas das normas sobre RRCM serão discutidas com detalhes nos próximos capítulos.

3.5 Sistema Geodésico Brasileiro (SGB)

A identificação geométrica das parcelas territoriais proveniente do levantamento cadastral deve ser referenciada ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), segundo o Art. 10 da Portaria 511/2009 (BRASIL, 2009), para áreas urbanas, e conforme a Lei 10.267, de 28 de agosto de 2001, para áreas rurais. Assim, torna-se relevante a definição do SGB.

A definição, implantação e manutenção do SGB é responsabilidade do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), de acordo com a Resolução do Presidente da Fundação IBGE, R.PR – 1/2005, de 25 de fevereiro de 2005 (IBGE, 2005). Esta Resolução estabelece o referencial geodésico para o SGB e para o Sistema Cartográfico Nacional (SCN). Para ambos os sistemas, segundo IBGE (2005), adota-se o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS), em sua realização do ano 2.000 (SIRGAS2000). Sistemas antigos (SAD 69 e Córrego Alegre), onde SAD corresponde ao South American Datum podem ser adotados em concomitância com o novo referencial, durante um período de transição, não superior a dez anos, ou seja, até 24 de fevereiro de 2015, segundo a mesma Resolução. No caso específico do SGB, neste período, pode-se utilizar tanto SAD 69 quanto o SIRGAS2000.

A materialização (realização) do SIRGAS2000, em território brasileiro, se faz com base na estrutura (geodésica) constituída por 21 estações da rede continental SIRGAS2000, conforme IBGE (2005). Assim, todas as estações que compõem a Rede Geodésica Brasileira (RGB) e que são implantadas com base nas estações de referência, materializam o novo

referencial geodésico para o SBG, ou seja, o SIRGAS2000. Um esclarecimento sobre esta terminologia é encontrado na Resolução de São Paulo (IBGE, 2003), que traz o significado dos termos equivalentes “Realização” ou “Materialização” ou “Estrutura Básica” que corresponde a:

[...] A realização de um sistema geodésico traduz de uma forma prática a definição desse sistema com vistas a permitir seu uso. Desta forma usa-se o termo REALIZAÇÃO OU MATERIALIZAÇÃO, na Resolução de São Paulo, para denominar um conjunto de estações geodésicas e suas respectivas coordenadas de referência e velocidades.

O *South American Datum of 1969* (SAD 69) é definido com base nos parâmetros do Elipsóide Internacional de 1967 (semi-eixo maior igual a 6378160 m; achatamento igual a 1/298,25), o qual é posicionado e orientado com relação à Terra segundo uma orientação geocêntrica (eixo de rotação do elipsóide paralelo ao eixo de rotação da Terra, plano do meridiano do elipsóide origem paralelo ao plano meridiano de Greenwich definido pelo *Bureau International de l'Heure* (BIH) e uma orientação topocêntrica (o vértice de triangulação Chuá é o ponto origem dos levantamentos planimétricos, tendo coordenadas geodésicas distintas das coordenadas astronômicas, ondulação geoidal nula e azimute geodésico deste vértice para o VT-Uberaba).

O SIRGAS2000 adota como sistema geodésico de referência o Sistema de Referência Terrestre Internacional – ITRS (*International Terrestrial Reference System*), utilizando o Elipsóide do Sistema Geodésico de Referência de 1980 (*Geodetic Reference System 1980 – GRS80*) como figura geométrica para a Terra, com origem geocêntrica e orientação definida pelo BIH. A materialização do SIRGAS2000 em território nacional se faz com base nas coordenadas conhecidas de 21 estações de referência da rede continental SIRGAS2000 para a época 2.000,4.

Para atualizar as coordenadas de uma estação da rede planimétrica brasileira (Figura 3.7), a qual é constituída por vértices da rede de triangulação, por estações da rede GPS, por estações poligonais e por estações Doppler, em virtude da geodinâmica, deve-se utilizar o campo de velocidades disponibilizado para a América do Sul no site <http://www.ibge.gov.br/sirgas>, de acordo com IBGE (2005). As redes altimétricas e gravimétricas do SGB não foram tratadas nessa pesquisa, assim não serão abordadas.

do respectivo ponto, neste Sistema, corresponde ao terno de coordenadas (e, n, u) , conforme Figura 3.8, definido por Soler e Hothem (1988) como:

- Origem: qualquer ponto referido a um específico elipsóide.
- Eixo-u: contém a normal (reta perpendicular ao elipsóide de referência) do ponto origem, positivo para o zênite geodésico (direção “up”).
- Eixo-e: perpendicular ao eixo-u e ao plano do meridiano geodésico do ponto origem, positivo na mesma direção de crescimento da longitude geodésica, ou seja, para a direção leste.
- Eixo-n: ortogonal aos eixos “e” e “u”, tornando o sistema dextrógiro, positivo na mesma direção de crescimento da latitude geodésica, ou seja, para a direção norte.

A superfície de referência utilizada nos cálculos geodésico é o elipsóide de revolução (biaxial).

Figura 3.8 – Sistema Geodésico Local (SGL). Fonte: adaptado de Soler e Hothem (1998).

3.7 Sistema Topográfico Local (STL)

Para o posicionamento de pontos localizados na superfície da Terra decorrente de levantamentos topográficos, por definição, deve-se estabelecer uma origem e orientar os eixos que constituem o STL (ver Figura 3.9), proporcionando um par de coordenadas plano-retangulares (X, Y) . Segundo NBR 14166/98, tem-se:

- Origem: qualquer ponto de coordenadas geodésicas conhecidas.
- Eixo-Y: contém a meridiana geográfica (linha norte-sul), no ponto de tangência entre o plano topográfico do STL (elevado a uma altitude ortométrica média) com a superfície de referência adotada pelo SGB, orientado, positivamente, para o norte geográfico.
- Eixo-X: perpendicular ao eixo-Y, orientado, positivamente, para o leste.

A superfície de referência para os cálculos no STL, de acordo com a NBR 14166/98 é a esfera de adaptação de Gauss.

Figura 3.9 – Sistema Topográfico Local (STL). Fonte: adaptado de NBR 14166/98.

3.8 Representação dos limites das parcelas

A representação dos limites das parcelas determinados por métodos descritos na subseção 3.3 e vinculados a RRCM (subseção 3.4) e ao SGB (subseção 3.5), é concretizada em um produto cartográfico (carta cadastral). Na elaboração de cartas cadastrais (superfície de referência plana) é exigido o estabelecimento de uma superfície intermediária (projeção cartográfica) para representar os limites das parcelas. O conhecimento de conceitos sobre os produtos cartográficos gerais, os destinados à representação de levantamentos cadastrais, bem como as especificações técnicas dos sistemas de projeção, essenciais a este trabalho são apresentadas a seguir.

3.8.1 Categorias de mapas

De acordo com Skelton (1972), um mapa tem muitas funções e muitas características, e cada uma é vista por nós com diferentes percepções, que se enquadram nas seguintes categorias: quanto à sua escala, sua função e assunto.

Pela escala: A razão entre as dimensões do mapa e aquelas da realidade é chamada de escala do mapa. Quando um mapa é usado para mostrar uma área grande, este mapa é descrito como de escala pequena. Se um mapa mostra somente uma área restrita da realidade, ele é descrito como um mapa de escala grande. Não há consenso nos limites quantitativos dos termos escalas pequena, média e grande, assim, alguns cartógrafos atribuem a escalas grandes, as menores que 1:50.000, e escalas pequenas menores que 1:500.000.

Pela função: São reconhecidas três classes de funções: os mapas de referência geral, os temáticos e as cartas. Os mapas de referência geral têm por objetivo mostrar a localização de diferentes feições, tais como corpos de água, linhas costeiras e rodovias.

Os mapas temáticos ou mapas de propósitos especiais concentram a distribuição de um atributo simples ou a relação entre dois ou mais atributos, como mapas de precipitação, temperatura, população, pressão atmosférica.

As cartas são, segundo IBGE (1998), representações no plano, em escala média ou grande, dos aspectos artificiais e naturais de uma área tomada de uma superfície planetária, subdividida em folhas delimitadas por linhas convencionais - paralelos e meridianos - com a finalidade de possibilitar a avaliação de pormenores, com grau de precisão compatível com a escala.

Por assunto: A diversidade de fenômenos geográficos, a infinidade de usos e combinações entre estes, acarretam também inúmeros novos produtos cartográficos. Neste trabalho enfatizam-se os mapas cadastrais (produtos cartográficos que acompanham o cadastro-lista oficial de proprietários e títulos de terras), que serão abordados a seguir.

Ainda, segundo Skelton (1972), deve-se atentar para o fato de não haver limites para o número de classes de mapas a serem criadas pela combinação de outras, de acordo com o assunto. Assim, há mapas de solo, geológicos, climáticos, de população, transportes, econômicos, estatísticos.

3.8.2 Mapas, cartas e plantas cadastrais

Blachut (1979) define Mapa cadastral como um mapa que mostra as dimensões, forma, localização e extensão de cada parcela em uma área geográfica prescrita. Em IBGE (1993), encontra-se ao conceito de Carta Cadastral como sendo a representação em escala conveniente, geralmente planimétrica, com o objetivo de delimitar o parcelamento da propriedade territorial. Para Loch (2006), uma Carta Cadastral inclui os limites das propriedades, sistemas viários, rede hidrográfica e edificações. Em virtude da diversidade de sistemas projeção, escala e superfície de referência (*datum*) adotados, os esforços nesta área tem-se concentrado na geração de normas para a Cartografia Cadastral, como por exemplo, em Fernandes e Loch (2007).

Segundo IAAO (2004), os Mapas Cadastrais devem ser vistos como uma sobreposição de mapas base, como um instrumento de tributação, mostrando as dimensões e posição de cada parcela em relação às outras propriedades, corpos d'água, vias e outras feições geográficas, produzidos em escalas apropriadas e contendo limites, dimensões ou áreas, identificadores de parcelas e outras informações legais e descritivas pertinentes. No que diz respeito à identificação das parcelas, o autor sugere que deve ser atribuída um único número

identificador para cada parcela, com arquivos contendo dados como: proprietário, valor, uso e zoneamento.

De acordo com NBR 14.166/98, as Plantas Cadastrais são definidas da seguinte maneira:

A planta planimétrica do município para gestão municipal integrante dos cadastros técnicos municipais, apresentando, no seu conteúdo básico, hidrografia, o sistema viário, com sua denominação, a codificação de zonas, de quadras para amarração do Sistema Cadastral Imobiliário, sendo nela locados todos os novos loteamentos aprovados e as alterações do sistema viário, quando então, a partir destas modificações, serão alteradas ou criadas novas plantas de quadras do Cadastro Imobiliário Fiscal.

Algumas questões são cabíveis sobre esta definição: este conceito não contempla a representação altimétrica, contrapondo-se as expectativas de produtos cartográficos 3D; não impõe a inserção dos limites e dimensões das parcelas; não considera as possíveis deformações decorrentes das movimentações temporais e espaciais dos limites das parcelas. São observações importantes que compreendem futuros estudos e atualizações na definição. Na Figura 3.10, pode-se visualizar uma carta cadastral de um município e seus elementos constituintes.

Figura 3.10 – Planta de parcelas cadastrais. Fonte: Effenberg (2001).

3.8.2.1 Planta de valores genéricos

De acordo com NBR 14166/98, Planta de Valores Genéricos (PVG) é a planta integrante do Cadastro Imobiliário Fiscal, obtida de uma Planta de Referência Cadastral do Município, onde estão registrados os valores de terreno diferenciados pela sua posição nas quadras e nos segmentos de logradouros e pelos equipamentos urbanos à sua disposição, em geral na escala de 1:5.000 ou 1:10.000.

Conforme EMPLASA¹¹ (2005 apud DALAQUA, 2007), Plantas de valores genéricos (PVG) são:

[...] plantas de zona urbana ou zona de expansão urbana, nas quais são apostos, em cada face de quadra da malha urbana, os valores básicos do metro quadrado dos terrenos devidamente homogeneizados, quanto aos seus diversos atributos, inclusive temporalmente, atendendo aos critérios técnicos e uniformes para toda a cidade. Objetiva a formação de valores venais dos imóveis, base de cálculo do IPTU e ITBI.

3.8.2.2 Planta de equipamentos urbanos

Tendo com base a planta de referência cadastral, mostrando a distribuição dos equipamentos urbanos na área, como por exemplo: rede elétrica, telefonia, galerias de águas fluviais, redes de esgoto, coleta de lixo. A Figura 3.11 traz uma área de mapeamento de equipamentos urbanos (exemplo de rede elétrica).

Figura 3.11 – Planta de equipamentos urbanos. Fonte: Robinson et al. (1995).

¹¹ EMPLASA – Empresa Metropolitana de Planejamento da Grande São Paulo SA. **Planta de Valores Genéricos**. São Paulo, 2005.

3.9 Projeções cartográficas

Como já mencionado na subseção 3.1, a representação cartográfica de uma área é realizada utilizando-se um sistema de projeção cartográfica. De acordo com Robinson et al. (1995), todos os mapas são constituídos de dois elementos da realidade: localização e atributos. Localização são posições no espaço em dimensões ou em um sistema de coordenadas enquanto atributos são qualidades ou magnitudes, relativas a estas localizações. Os autores afirmam ainda que, todos os mapas, envolvem transformações geométricas. Tais transformações sistemáticas são chamadas projeções e a escolha de uma projeção interfere intimamente na utilização do produto cartográfico.

Uma superfície irregular não pode ser transformada em um plano sem que haja modificações na sua geometria. Existe um grande número de transformações que mantêm uma ou mais qualidades geométricas. Cada vez mais propriedades estatísticas das distorções resultantes das transformações são de grande interesse dos usuários, pois, com o uso das mesmas, é possível minimizar distorções.

As qualidades geométricas a serem mantidas dependem da extensão da região a ser mapeada, ficando alguns sistemas de projeção indicados para representações de todo o planeta, com enfoque especial nas relações topológicas globais tais como azimutes e distâncias. Por outro lado, nos mapas de áreas pequenas, devem ser consideradas qualidades geométricas que minimizem a variação de escala do mapa.

3.9.1 Classificação das projeções

É primordial o entendimento, por parte do profissional, dos efeitos que diferentes tipos de projeção têm na representação de ângulos, áreas, distâncias e direções, na escolha do sistema de projeção adequado. Frequentemente, informações de uma projeção são transferidas para outra projeção, portanto, o conhecimento das distorções de cada uma é necessário com o intuito da manutenção da acurácia durante o processo de transferência.

Robinson et al. (1995) sugerem que se deve ter em mente, algumas regras, durante o processo de escolha. A primeira é considerar a propriedade principal da projeção, tais como: conformidade, equivalência, azimutalidade. Atributos das projeções, tais como paralelismo

dos paralelos, distorção de área e existência de coordenadas retangulares podem ser fatores preponderantes na escolha. A segunda é a dimensão e a distribuição da distorção. A Figura 3.12 ilustra as representações de uma mesma superfície em diferentes sistemas de projeção, proporcionando a compreensão das distorções.

Figura 3.12 – Distorções decorrentes da adoção de diferentes sistemas de projeções: na parte superior a projeção de Mollweide, no centro, a projeção de Mercator, na parte inferior a projeção cilíndrica equivalente com paralelo padrão de 30°. Fonte: Robinson et al. (1995).

3.9.2 Sistemas de projeção cartográfica – propriedades e usos

Nas Diretrizes Nacionais para o Cadastro Territorial Multifinalitário, encontradas em www.planalto.gov.br (2001), no Artigo 12, tem-se que: “o CTM utilizará o sistema de projeção Universal Transverso de Mercator (UTM), até que seja definida uma projeção específica”. Um dos critérios essenciais na escolha da projeção correta é o conhecimento de suas propriedades. Nas Tabelas 3.1 e 3.2, construídas de acordo com Robinson et al. (1995), apresenta-se uma síntese dos sistemas de projeções mais usados atualmente, suas

propriedades e aplicações. De posse destas informações é possível ao profissional iniciar o processo de escolha da projeção para as finalidades as quais serão destinadas. No caso específico desta pesquisa, visa-se a escolha do melhor produto para fins cadastrais.

Tabela 3.1 – Sistemas de projeções cartográficas.

PROJEÇÕES	PROPRIEDADES	APLICAÇÕES
Conforme	relações angulares, análise, orientação ou registro de movimentos	cartas de navegação marítima ou de aviação, meteorológicas e mapas topográficos
Conforme – Mercator	relações angulares, análise, orientação ou registro de movimentos	cartas para navegação náutica
Conforme – Transversa de Mercator	relações angulares, análise, orientação ou registro de movimentos	pequenas áreas ao longo do meridiano central, mapas topográficos e como base para o sistema de coordenadas plano UTM
Cônica conforme de Lambert com dois paralelos padrão	relações angulares, análise, orientação ou registro de movimentos	navegação aérea, mapas topográficos, cartas meteorológicas em latitudes médias.
Equivalente	Equivalência	mapas geral de referência de escalas pequenas
Equivalente de Albert	Equivalência	estudo das distribuições geográficas
Equivalente de Lambert	Equivalência	para áreas que tem dimensões leste-oeste e norte-sul aproximadamente iguais
Equivalente cilíndrica e projeção sinusoidal	Equivalência	região a ser mapeada fica na região central da projeção
Equivalente de Mollweide	Equivalência	distribuições mundiais quando a área de interesse está entre latitudes médias
Homolosine Goode - combinação das duas acima	Equivalência	Áreas sem restrições de abrangência
Azimutais	Os azimutes que partem ou chegam ao centro de projeção são corretos	áreas que tem mais ou menos dimensões iguais em cada direção
Azimutal eqüidistante	Os azimutes que partem ou chegam ao centro de projeção são corretos	representação da esfera inteira
Azimutal ortográfica	Os azimutes que partem ou chegam ao centro de projeção são corretos	preparação de mapas onde a esfericidade do globo é o mais importante
“continua”		

“continuação”		
PROJEÇÕES	PROPRIEDADES	APLICAÇÕES
Azimutal Gnomonica	Os azimutes que partem ou chegam ao centro de projeção são corretos	navegação marítima
Outras projeções: Cartas planas	Equidistância	para plantas de cidades e mapas base de pequenas áreas
Outras projeções: policônica	Todas as distorções minimizadas	padrão de mapeamento topográfico nos EUA
Outras projeções: de Robinson	Distorções angulares e de área minimizadas	representa a área total do globo
Outras projeções: espaço oblíqua de Mercator	relações angulares, análise, orientação ou registro de movimentos	para recepção de dados vindos de sistemas com imageadores orbitais.
Fonte: Robinson et al. (1995)		

É importante ressaltar que dos sistemas de projeção presentes na Tabela 3.1, aqueles que preservam as características da forma e área, como Transversa de Mercator, cartas planas e policônica, podem ser recomendadas para o uso com finalidades cadastrais.

A justificativa deste argumento se deve ao tratamento dos elementos da cartografia cadastral, descritos na subseção 3.8, uma vez que na planta genérica de valores bem como equipamentos urbanos, a forma e área das parcelas cadastrais é fator relevante.

3.9.3 Sistemas de projeção cartográfica para áreas urbanas

Após a definição de sistemas de projeção e descrição de características e propriedades das mesmas, um levantamento dos tipos destinados às áreas urbanas é primordial, tanto para estudo do estado da arte, quanto para considerações que podem ser adotadas neste trabalho.

Segundo Rocha (1998), há sistemas de projeções que se adéquam melhor que outros, a determinadas finalidades, ou, que oferecem a vantagem, de uma construção simples e rápida. A nenhum, pode-se conceder a qualidade de sistema ideal, capaz de proporcionar solução geral ao problema cartográfico. Desta solução parcial, surgem inúmeras projeções cartográficas, cada qual preservando uma finalidade específica em função dos trabalhos a serem executados.

Para uma escolha eficiente de projeção, devem-se considerar características como a localização da superfície que será representada, sua forma e área.

Além destas, de acordo com Blachut (1979), um sistema de projeção para aplicações em áreas urbanas deverá possuir as seguintes características gerais:

- As correspondências biunívocas entre as superfícies (elipsóide e plano) conforme, deverá ser expressa em termos de fórmulas matemáticas que permitam cálculos numéricos com uma precisão pré-determinada.
- As distorções de ângulos e distâncias deverão ser minimizadas e de fácil cálculo.
- Deve-se usar como superfície de referência um elipsóide e não uma esfera.

As normas cartográficas brasileiras prescrevem a projeção UTM para ser utilizada no mapeamento sistemático, cobrindo as escalas de 1:250.000 à 1:25.000. Os mapeamentos executados nas escalas maiores que 1:25.000 não foram contemplados, deixando um hiato a ser preenchido pelos Estados e Municípios, nas suas cartas em escalas maiores (ROCHA, 1998).

Quanto às especificações sobre o mapeamento de escalas grandes (na qual se enquadra o cadastro), serão descritas, a seguir, as projeções L.T.M. (*Local Transversa de Mercator*), R.T.M. (*Regional Transversa de Mercator*) e P.B.G. (*Projeção Brasileira de Gauss*). Além dessas, serão abordadas as projeções utilizadas nos municípios de Porto Alegre/RS (*Gauss-Krüger*) e Rio de Janeiro/RJ (LTM-RJ), bem como nos estados do Rio Grande do Sul (RTM-RS) e do Paraná (RTM-PR).

- **Projeção L.T.M.**

A projeção L.T.M. foi proposta por Carvalho¹² (1984 apud ROCHA, 1998) e adotada posteriormente pelo Instituto de Cartografia Aeronáutica (ICA) para mapeamento de aeroportos e regiões de estratégia (escala 1:2.000).

De acordo com Rocha (1998), suas características são:

- O sistema L.T.M. adota a Projeção Conforme de Gauss (T.M.).
- Fusos de 1 grau de amplitude.
- Fator de escala para o meridiano central: $K_0 = 0,999995$
- Norte (N) = $N' + 5.000.000$ m
- Leste (E) = $E' + 200.000$ m

¹² CARVALHO, F. R. Cadastro Geoambiental Polivalente, Projeção TM (Conforme de Gauss). **Informativo COCAR especial**. Presidência da República, Secretaria de Planejamento, Comissão de Cartografia, Brasília, 1984.

- Distorção no meridiano central = 1:200.000
- Utilizado na cartografia aeronáutica para cartas nas escalas 1:2.000.

Nesta projeção, seu fator de escala é de 0,999995 e apresenta uma distorção no meridiano central de 1:200.000. Como ela apresenta fusos de 1° de amplitude, sua distorção no extremo do fuso, no equador apresenta distorção relativa de 1:35.000 (ROCHA, 1998).

- **Projeção R.T.M.**

Projeção também proposta por Carvalho (1984 apud ROCHA, 1998), como uma variação regional da projeção L.T.M. e intuito de evitar tanto a redução quanto duplicidade de fusos.

De acordo com Rocha (1998), suas características são:

- Projeção Cilíndrica, Transversa, secante, conforme.
- Fusos de 2 graus.
- $K_0 = 0,999995$ e distorção linear no meridiano central = 1:200.000.
- $N = N' + 5.000.000 \text{ m}$
- $E = E' + 400.000 \text{ m}$
- Distorção linear máxima: 1:200.000 no meridiano central e 1:9.000 no extremo do fuso.

Esta projeção apresenta o mesmo fator de escala 0,999995 da projeção L.T.M., apresentando a mesma distorção relativa de 1:200.000. Por apresentar um fuso de 2° de amplitude, seus valores para distorção linear no equador e paralelo 30° sul são respectivamente: 1:6.741 e 1:9.106 (ROCHA, 1998).

- **Projeção P.B.G.**

No ano de 1997, Philips¹³ (1997 apud ROCHA, 1998) desenvolveu uma projeção cartográfica para aplicação cadastral no território brasileiro. De acordo com Rocha (1998), suas características são:

- O sistema P.B.G. adota a Projeção de Gauss (cilíndrica transversa e conforme).

¹³ PHILIPS, J. Uma projeção geodésica para o cadastro imobiliário brasileiro.

- Fusos: numeração de dois em dois graus, sem sobreposição.
- $K_0 = 0,99994$
- Coordenadas: GX = 10.000.000 no equador.
- Coordenadas GY= 500.000 no meridiano central, acrescido pelo número do fuso em milhões (CIM).
- Distorção linear de 1:16.667 a 1:20.000. Para São Paulo.

Definida para utilização no território nacional. Seu fator de escala é 0,99994, com fuso de 2 ° de amplitude. Distorção no meridiano central = 16.670. Distorção no extremo do fuso: No equador: 1:10.752 Na latitude 30° = 1:18.181 (ROCHA, 1998).

- **Projeção *Gauss-Kruger***

Esta projeção foi adotada na região metropolitana de Porto Alegre-RS, nos anos 70, para mapeamentos nas escalas de 1:15.000, 1:5.000 e 1:1.000. Suas principais características, de acordo com Rocha (1998) são:

- Adota a projeção Transversa de Mercator com fusos de três graus de amplitude em longitude e cilindro tangente.
- Projeção conforme (preserva os ângulos de pequenas regiões).
- Origem das coordenadas Norte no equador.
- Origem das coordenadas Leste no meridiano central de 51° Oeste de Greenwich.
- Unidade de medida – metro.
- N = 5.000.000 metros.
- E = 200.000 metros.
- Fator de escala para o meridiano central (K_0) igual a 1 (cilindro tangente no meridiano central).

Por ser uma projeção tangente, seu fator de escala (K_0) é igual a 1. Neste caso, ela não apresenta distorção linear na região do meridiano central. Para um fuso de 3° de amplitude, tem-se um valor de 1° e 30' de distância máxima ao meridiano central. Para este caso a distorção de escala apresenta o valor de 0,156 metros para cada 1.000 metros medidos. O valor poderá ser mais bem interpretado pela distorção relativa de 1:6.410 (ROCHA, 1998).

- **Projeção L.T.M./RJ**

Para o município do Rio de Janeiro/RJ, Pedro et al.¹⁴ (1995 apud ROCHA, 1998) apresentam a adaptação da projeção L.T.M. correspondente às aplicações cadastrais, e, respectivas características, citadas a seguir:

- Sistema TM.
- Fusos de 1 grau de amplitude.
- Meridiano central 43°30' WGr.
- Fator de escala $K_0 = 0,99998$
- Distorção linear máxima: 1:50.000

Por apresentar o fator de escala de 0,99998, possui os valores máximos de distorção no meridiano central e no extremo do fuso de 1:50.000.

As próximas projeções representam adaptações para minimização das distorções, na representação das regiões do Rio Grande do Sul e Paraná, respectivamente.

- **Projeção R.T.M./RS**

Rocha¹⁵ (1994 apud ROCHA, 1998) desenvolve um estudo sobre aplicações das projeções na cartografia em grandes escalas, apresentando a projeção RTM/RS como solução de minimização das distorções lineares, a ser aplicadas nas escalas cadastrais no território Gaúcho. Apresentam-se, a seguir, as especificações da projeção RTM/RS.

- Projeção Cilíndrica, Transversa, secante.
- Conformidade.
- Fusos de 2° de amplitude.
- $K_0 = 0,999945$
- Distorção Linear máxima: 1:18.000 no meridiano central 1:17.000 no final do fuso.
- Divisão do Território do RS em 5 fusos de 2° de amplitude.

¹⁴ PEDRO, L. S. et al. Proposta de um sistema de projeção cartográfica para o cadastro técnico do município do Rio de Janeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, XVII, Salvador, 1995. **Anais...** Salvador: CBC, 1995.

¹⁵ ROCHA, R. S. **Proposta de definição de uma projeção cartográfica para mapeamento sistemático em grande escala para o Estado do Rio Grande do Sul.** Dissertação (Mestrado – Ciências Geodésicas) - Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1994.

Desenvolvida para aplicação no Estado do RS, possui o fator de escala de 0,999945 e com fuso de 2° de amplitude. Seus valores máximos de distorção apresentam-se no meridiano central do fuso de 1:18.000 e, no final do fuso com 1:17.000 (ROCHA, 1998).

- **Projeção R.T.M./PR**

Com o objetivo de representar as características do estado do Paraná, Bueno¹⁶ (1995 apud ROCHA, 1998) propôs um sistema de projeção intitulado R.T.M/PR. Suas principais características dizem respeito à:

- Fusos com amplitude de 2° e 15'.
- $K_0 = 0,999915$
- Divisão do estado do Paraná em três fusos.

Sobre as deformações máximas, tem-se:

- No meridiano central: 1:11.764
- No final do fuso: 1:12.500

A representação dos limites da parcela cadastral é consolidada por meio de Sistemas de Projeção Cartografias. Procurou-se mostrar que a escolha do sistema de projeção compatível aos anseios do profissional é tarefa árdua devido à vastidão de opções, e que também são necessárias pesquisas nesta área.

3.10 Considerações finais

A Portaria 511/2009 (BRASIL, 2009) estabelece as diretrizes para a criação, instituição e atualização do Cadastro Territorial Multifinalitário (CTM), nos municípios brasileiros. O capítulo II desta portaria trata especificamente sobre a Cartografia Cadastral. Este capítulo contém os artigos de N° 10 e no 15 que descrevem que o município que adotar o CTM deve implantar, conservar e manter os marcos municipais referenciados ao Sistema

¹⁶ BUENO, D. M. et al. Sugestão de uma projeção cartográfica para mapeamentos em escalas grandes do Estado do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, XVII, 1995, Salvador. **Anais...** Salvador: CBC, 1995.

Geodésico Brasileiro, os quais servirão de apoio para os levantamentos cadastrais, para locações de obras e novos levantamentos. Esta diretriz é muito importante para a Cartografia Nacional, pois os levantamentos estarão num único sistema de referência.

Um problema cartográfico comparece no Artigo 12, o qual trata do sistema de projeção cartográfica para o CTM. O município pode adotar o sistema de projeção Universal Transverso de Mercator (UTM), ou, admitir outra projeção até a adoção da nova projeção. A situação crítica com esta definição, é que haverá necessidade de transformações de coordenadas, entre sistemas adotados pelo município e o estabelecido pelo CTM.

O Artigo 13 trata da “precisão adequada” para definir os limites de cada parcela cadastral, a qual é constituída por uma figura geométrica fechada. Qual é o valor dessa precisão para atender esta definição? No cadastro rural adota-se 0,5m. Para o levantamento das parcelas, no âmbito do cadastro urbano, muito se tem pesquisado no sentido de se chegar a um valor coerente para esta finalidade, tendo em vista os métodos estabelecidos para a definição dos limites físicos das parcelas. Por exemplo, conforme Miyashita (2008) que adotou as dimensões do menor lote (5m x 25m), segundo o artigo 4 do Capítulo II da Lei No. 6.677, de 19 de dezembro de 1979 (BRASIL, 1979), para calcular o erro máximo tolerável para cada componente planimétrica, deve ser de: 0,245m para probabilidade de 1σ ; 0,123m para probabilidade de 2σ , e; 0,082m para probabilidade de 3σ .

As considerações feitas acima sobre a Portaria 511/2009 (BRASIL, 2009) apontam para algumas questões importantes: não foi encontrada citação sobre a acurácia necessária exigida e nem levantados problemas sobre a possibilidade de movimentação da superfície, quantificação desta e os efeitos nas coordenadas, indicando o caráter inovador da pesquisa.

A determinação dos limites das parcelas, o referenciamento destes limites a uma rede de pontos municipal (RRCM) e posteriormente a uma rede nacional que compõe o Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) e a representação das informações são do âmbito da Cartografia Cadastral, descrita no presente capítulo. Nele foi destacada a importância da Cartografia Cadastral com respeito à identificação inequívoca das parcelas e como um agente de integração entre os sistemas cadastrais. Em seguida, os métodos de levantamentos dos limites físicos, assim como as especificações técnicas (vinculação a RRCM e ao SGB), sistemas geodésico local e topográfico local, foram abordados. Culminou-se com um relato sobre a representação das informações espaciais em cartas cadastrais, com ênfase aos sistemas de projeção cartográficos. Os elementos relacionados, até agora, são considerados de extrema importância para o desempenho deste trabalho, já que trata do estabelecimento da acurácia

pertinentes aos levantamentos da RRCM e da modelagem das deformações ocorridas nos pontos desta rede em virtude da movimentação da superfície.

4 ACURÁCIA CADASTRAL

4.1 Introdução

A preocupação com a determinação dos limites das parcelas nos remete ao Cadastro Napoleônico, apresentado no capítulo 2, e Blachut et.al (1979) atentam para o fato de que o mapa cadastral deve ser suficientemente acurado e completo de tal modo que possam ser determinados os limites entre as propriedades para prevenir litigações. Este capítulo apresenta os conceitos concernentes à acurácia cadastral, os padrões de acurácia adotados e a determinação da acurácia em Redes de Referência Cadastral, de extrema importância na determinação dos limites das parcelas, culminando com a proposta de combinar soluções almejando-se obter um método inovador para a determinação da acurácia no Cadastro Territorial Multifinalitário, não prevista nas diretrizes nacionais atuais.

4.2 Conceitos de precisão e acurácia dos limites legais das parcelas

O Cadastro Territorial Multifinalitário (CTM) é baseado no levantamento dos limites de cada parcela cadastral contida na superfície territorial do município. A identificação geométrica das parcelas territoriais deve ser referenciada ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), conforme a Portaria 511/2009 (BRASIL, 2009); e, segundo o Artigo 11 da respectiva Portaria, os municípios que adotarem o CTM implantarão, conservarão e manterão a inviolabilidade dos marcos municipais vinculados ao SGB, os quais servirão de apoio aos novos loteamentos e para locações e levantamentos de obras. O conjunto destes marcos municipais constitui a Rede de Referência Cadastral Municipal (RRCM) que é a estrutura fundamental para o levantamento de informações da superfície territorial do município.

O Artigo 13 da Portaria 511/2009 (BRASIL, 2009), estipula que “os vértices que definem os limites de cada parcela devem constituir uma figura geométrica fechada e que os limites legais das parcelas devem ser obtidos, com precisão adequada, por meio de levantamentos topográficos e geodésicos”. Lembrando que, por limites legais entende-se serem aqueles que constam dos títulos.

Há uma recomendação para os municípios sobre a exigência da demarcação dos vértices dos imóveis nos novos parcelamentos, georreferenciados ao SGB, além de promover a gradativa demarcação dos imóveis que ainda não possuem algum tipo de demarcação física. No que diz respeito aos limites físicos das parcelas, os mesmos podem ser obtidos por métodos topográficos, geodésicos, fotogramétricos, por sensoriamento remoto ou pela conversão de dados com precisões compatíveis, vistos no terceiro capítulo.

Assim, torna-se necessário e relevante a definição e materialização da Rede de Referência Cadastral Municipal (RRCM), ou seja, o estabelecimento do conjunto de marcos municipais referenciados ao SGB para fins de levantamento cadastral dos vértices que delimitam legalmente cada parcela, disponibilizando suas coordenadas e suas precisões.

Vale recordar que cada parcela do CTM deve ter um código único e estável, contendo informações que ao se correlacionarem com as do Registro de Imóveis (RI), constituem o Sistema de Cadastro e Registro Territorial (SICART). As demais unidades, por exemplo, lotes, glebas, vias públicas, praças, lagos e rios, são modeladas por uma ou mais parcelas. Quando um conjunto de informações específicas do CTM for acrescida ao SICART, constitui-se o Sistema de Informações Territoriais (SIT). Tanto o CTM quanto estes sistemas de informações são multifinalitários, atendendo várias necessidades, dentre elas, as sociais e as ambientais.

Ainda, que o CTM contém todos os dados relacionados com as parcelas cadastrais e as representações cartográficas do levantamento sistemático territorial do município. A projeção cartográfica a ser adotada no CTM, em princípio, pode ser a Universal Transverso de Mercator (UTM), ou, a utilizada pelo município, até a definição de uma nova projeção para o CTM (BRASIL, 2009).

Uma situação que merece ser investigada é a encontrada nas áreas de transição entre os meios urbano e rural, as áreas de expansão urbana ou de vazios urbanos. Pesquisas que buscam alternativas para solucionar este problema têm sido realizadas, como pode ser visto em Miyashita (2008).

Para estabelecer a precisão adequada para os limites legais das parcelas cadastrais, se faz-se necessário esclarecer os termos precisão e acurácia. Para tanto, considerando a realização de uma medida e ao analisar a sua acurácia, compara-se a sua média com o valor de referência considerado como verdadeiro. A análise da precisão da respectiva medida se faz com base no seu desvio padrão. A relação entre acurácia e precisão é ilustrada na Figura 4.1, extraída de Rutledge (2010), representando o resultado estatístico proveniente dos dados GPS acumulados em 96 horas (para a componente vertical), onde a média e o desvio padrão foram utilizados para gerar uma curva com distribuição perfeitamente randômica, exemplificando

uma acurácia interna.

Figura 4.1 – Relação entre acurácia e precisão. Fonte: Rutledge (2010).

Rutledge (2010) complementa sua análise lembrando que a melhora da acurácia ocorre com o aumento do número de medições, desde que a distribuição das mesmas seja normal. Assim, a acurácia interna é função do desvio padrão e da distribuição de frequência, obtendo-se uma acurácia melhor quando há uma diminuição no erro padrão da média. A componente associada ao erro randômico está presente tanto na acurácia interna quanto na externa. Numa medida GNSS, além deste erro, há uma tendência que requer uma acurácia externa para sua detecção.

Para Gemael (1994), o termo precisão se relaciona com a dispersão das observações, onde se considera os efeitos aleatórios; enquanto acurácia trata dos efeitos aleatórios e sistemáticos. Há problema quando se relaciona os conceitos de acurácia e precisão, interpretando-se de forma errônea que acurácia considera somente a tendência. Assim, quando se tem a acurácia de uma grandeza, tem-se o valor de sua precisão, pois os efeitos aleatórios são considerados na obtenção do valor da acurácia (MONICO et al., 2009). Quando não existir erros sistemáticos nas medidas realizadas, não há distinção entre estes termos.

De agora em diante, será designado o termo acurácia para a análise dos levantamentos cadastrais, ou seja, tratar-se-á das acurácias cadastrais das parcelas relacionadas com o CTM. Quando se referir à precisão adequada dos limites legais das parcelas, conforme artigo 13 da Portaria 511/2009 (BRASIL, 2009), pode-se entender que o mesmo trata da acurácia dos respectivos limites, pois ao obter a acurácia tem-se também a precisão. No que diz respeito aos levantamentos cadastrais de áreas rurais, encontra-se na Lei 10.267/2001 que o padrão de

precisão tem como indicador da precisão posicional para cada par de coordenadas um limite de 0,5 m, conforme definido pela Portaria INCRA/P/nº. 954/2002.

4.3 Padrões de acurácia em RRCM

Segundo a NBR 14166/98, a RRCM atende às seguintes finalidades:

- planta cadastral municipal;
- serviços topográficos.

A RRCM consiste de um conjunto de pontos materializados no terreno, na qual se realizam todas as medições de levantamentos planimétrico e altimétrico. Estes pontos devem ser referenciados ao SGB, possibilitando a vinculação de todos os trabalhos de Topografia e Cartografia relacionados com a construção e a manutenção da Planta Cadastral Municipal (escala 1:1.000 ou maior) e Planta Geral do Município (escala 1:5.000 ou 1:10.000).

O conjunto de documentos cartográficos elaborados com base na RRCM do município constitui-se no Sistema Cartográfico Municipal (SCM), o qual contém folhas da Carta Topográfica do Município, da Planta Cadastral Municipal, da Planta de Referência Cadastral, das Plantas de Equipamentos Urbanos, da Planta de Valores Genéricos de Terreno e das Plantas de Quadra. O enquadramento, o desdobramento e a codificação destas plantas tem origem na Carta Topográfica do Município, que por sua vez se refere às folhas de carta do Sistema Cartográfico Nacional.

Os elementos estruturais da RRCM, segundo a NBR 14166/98, são:

- marcos geodésicos de precisão;
- marcos geodésicos de apoio imediato;
- marcos referenciadores de divisas estaduais e municipais;
- referências de nível de precisão;
- referências de nível de apoio imediato;
- referências de nível topográficas;
- pontos topográficos;
- pontos de referência de segmentos de logradouros;
- pontos de esquina;
- pontos de referência de quadras;

- pontos de referência para estrutura fundiária;
- pontos de referência de glebas.

A classificação dos pontos planimétricos, seguindo uma hierarquia em ordem decrescente, conforme a NBR 14166/98, se apresenta da seguinte forma:

- marco geodésico de precisão;
- marco geodésicos de apoio imediato;
- ponto topográfico principal;
- ponto topográfico secundário;
- ponto de referência para estrutura fundiária;
- ponto de esquina;
- pontos de referência (quadra, glebas e de segmento de logradouro).

Analogamente, para os pontos altimétricos, tem-se:

- referência de nível de precisão;
- referência de nível de apoio imediato;
- referência de nível topográfico;
- ponto topográfico (principal e secundário);
- ponto de segurança.

Para a certificação de imóveis rurais, associada com a Lei 10.267/2001, os elementos estruturais para o seu georreferenciamento, seguem as especificações técnicas editadas e revisadas pelo Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA).

O Artigo 13 da Portaria 511/2009 (BRASIL, 2009), estabelece que “os limites legais das parcelas devem ser obtidos, com precisão adequada, por meio de levantamentos topográficos e geodésicos”. Assim, torna-se essencial e oportuno a adoção de uma acurácia cadastral para estas parcelas, com base nos levantamentos supracitados.

Da classificação hierárquica dos pontos planimétricos da RRCM, tem-se que as coordenadas de uma parcela cadastral dependem da determinação dos marcos geodésicos de apoio imediato, os quais podem ser estimados, conforme NBR 14166/98, pelos seguintes métodos de levantamento: “poligonal (classe IP da NBR 13133/94) ou rastreamento de satélites do sistema GPS, no método diferencial; triangulação ou trilateração ou outro método, deste que em termos de exatidão, seja igual ou melhor que a obtida por essa classe de poligonal”. Quando utilizar-se do sistema GPS, a NBR 14166/98 estabelece que:

[...] os vetores independentes da rede de pontos de controle devem passar por ajustamento vetorial pelo método dos mínimos quadrados, empregando-se como injunções os pontos de apoio do SGB, sendo que a precisão final, relativa aos pontos do SGB, deve ser da ordem de 10 ppm (1:100.000) ou superior, considerando-se 95% de nível de confiança.

Nota-se neste item, que ao se injuncionar, existe a possibilidade de analisar as deformações ocorridas ao longo do tempo, de acordo com sua magnitude.

Os marcos geodésicos de apoio imediato terão suas coordenadas estimadas com base nos pontos da rede de controle, os quais são injuncionados no ajustamento, resultando numa “precisão” (relativa) de 20 ppm (1:50.000) ou superior, considerando-se 95% de confiabilidade. A referência de nível para este elemento estrutural da RRCM é obtida com base na referência de nível de precisão da rede básica do IBGE, utilizando-se do método de nivelamento geométrico (classe IN da NBR 13133/94).

As coordenadas dos pontos topográficos obtidas por GPS e com base nos marcos geodésicos de apoio imediato, resultam numa “exatidão” igual ou melhor que 50 ppm (1:20.000), com 95% de confiabilidade. Estes pontos podem ser levantados com poligonais (classe I PRC ou IIP da NBR 13133/94). A referência de nível, para este tipo de ponto (topográfico) é determinada com base nas referências de nível de apoio imediato, por meio de nivelamento geométrico (classe IIN da NBR 13133/94).

Para o levantamento planimétrico dos pontos de esquina, utiliza-se poligonais auxiliares da classe II PRC ou IIIP da NBR 13133/94). A altimetria destes pontos pode ser determinada com base no nivelamento geométrico simples com precisão igual a 16 mm vezes a raiz quadrada da distância nivelada em quilômetros.

Como estabelecido no Art. 10 da Portaria 511/2009 (BRASIL, 2009), “o levantamento cadastral para a identificação geométrica das parcelas territoriais deve ser referenciado ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB)”. Esta identificação é garantida, neste tipo de levantamento, segundo Brandão (2003), com a adoção de uma “precisão posicional relativa” com relação aos pontos do próprio levantamento, e de uma “precisão posicional absoluta”, tanto em relação aos pontos da rede de referência cadastral quanto ao SGB, garantindo, desta forma, a uniformidade da descrição geométrica do conjunto de parcelas. Brandão (2003), em sua revisão bibliográfica sobre tolerância posicional relacionada com levantamento cadastral

(conforme Quadro 4.1), não encontrou demonstrações dos procedimentos e dos critérios estabelecidos por cada país.

PAÍS	TOLERÂNCIA POSICIONAL		
Canadá (algumas províncias)	Áreas de grande exploração e alto preço	6 cm	Exatidão posicional
	Áreas de média exploração	10 cm	
	Áreas agrícolas	16 cm	
	Áreas de montanhas, pastos e florestas	40 cm	
USA – 1997	Áreas urbanas	2 cm + 50ppm	Precisão posicional relativa
	Áreas suburbanas	4 cm + 100ppm	
	Áreas rurais	8 cm + 200ppm	
	Áreas de pântanos e montanhas	20 cm + 200ppm	
USA – 1999	Para todo o país	2 cm + 50ppm	Precisão posiciona absoluta
Holanda	Áreas rurais	40√2 cm (56,6 cm)	
	Áreas urbanas	20√2 cm (28,3 cm)	
	Áreas urbanas especiais com medições de campo	6√2 cm (8,5 cm)	
Israel	Projeto de cadastro para todo o país	5 cm	Exatidão posicional
Suíça	Áreas urbanas	3 cm	Exatidão posicional
	Áreas suburbanas	9 cm	
	Áreas rurais	30 a 60 cm	

Quadro 4.1 – Tolerância posicional relacionada com levantamento cadastral. Fonte: Brandão (2003)

Brandão (2003) adotou, em sua pesquisa, um valor de “tolerância posicional” nas medições cadastrais no Brasil, com base no Código Civil brasileiro, o qual “estabelece um erro máximo de 5% na determinação da extensão ou área de um imóvel nos contratos de compra e venda”. Além disto, teve que considerar, no caso de parcelas territoriais em áreas urbanas, uma dimensão mínima para parcelamento do solo, equivalente a um lote de 125 m² com 5 m de frente para uma via de acesso (conforme Lei 6.766/1979), resultando numa “precisão posicional” do levantamento cadastral de +/- 3 cm.

Miyashita (2008), após tratamentos estatísticos em dados oriundos de métodos e tecnologias recentes, conclui que há necessidade de adotar novos parâmetros de precisão posicional, como foi descrito na subseção 3.10.

Quanto à integração das informações provenientes de CTMs no Brasil, tem-se que o Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão lançou em 08 de abril de 2010, em Brasília, a Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE), <http://www.inde.gov.br/>, instituída pelo Decreto No. 6.666 de 27/11/2008. Com este evento, entra em operação o Portal Brasileiro de Dados Geoespaciais – SIG Brasil, disponibilizando e compartilhando o acesso a dados e Informações Geoespaciais (IG), através de uma rede de servidores integrados à Internet, denominada Diretório Brasileiro de Dados Geoespaciais (DBDG). A integração de dados geoespaciais das instituições do governo brasileiro ocorrerá conforme as normas da Comissão Nacional de Cartografia (CONCAR) e do Programa de Interoperabilidade do Governo do

Estado (e-PING). A exemplo da National Spatial Data Infrastructure (NSDI) dos EUA, a INDE também pode colaborar com a aquisição, o processamento, o armazenamento, a distribuição e a utilização de dados geoespaciais para fins de coleta de informações para identificação, localização geográfica e caracterização de aspectos naturais ou artificiais, bem como seus limites. Assim, os padrões de acurácia posicional dos dados geoespaciais da INDE devem ser estabelecidos pelo Ministério responsável por esta Infraestrutura.

4.4 Padrões de precisão e acurácia no contexto mundial

Nos tópicos seguintes, estão relatados os padrões praticados em alguns países.

Os padrões de acurácia de levantamento cadastral utilizados nos Estados Unidos da América do Norte (EUA) são inadequados e necessitam de alterações, de maneira a refletir nos levantamentos modernos que se utilizam de dados geoespaciais, conforme Craig e Wahl (2003). Uma das possíveis causas seria a autonomia dos estados, observada naquele país, permitindo a prática de diferentes acurácias. Em 1994, nos EUA, numa iniciativa de promover o intercâmbio de informações espaciais, criou-se a Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (NSDI) para aquisição, processamento, armazenamento, distribuição e utilização de dados geoespaciais. Este órgão, ou seja, esta Infraestrutura, é coordenado pelo *Federal Geographic Data Committee (FGDC)* (<http://www.fgdc.gov/>) que define os padrões de acurácia posicional dos dados geoespaciais.

Nos EUA, os padrões de acurácia do posicionamento geoespacial, segundo o FGDC podem ser acessados em <http://www.fgdc.gov/standards/>; e, segundo Craig e Wahl (2003), este órgão adota dois tipos de padrões de acurácia para os dados geoespaciais: acurácia em rede e acurácia local. O primeiro tipo trata da acurácia do ponto de controle, cujo valor representa a incerteza de suas coordenadas com relação ao referencial geodésico adotado, considerando-se uma confiabilidade de 95%. Desta forma, a acurácia deste tipo de ponto se relaciona, neste caso, com a acurácia da rede nacional. Enquanto a acurácia local representa o valor da incerteza das coordenadas do ponto de controle com relação a outro ponto, também de controle, para um nível de confiança de 95%.

Na Holanda, de acordo com Oosteron et al. (2006), cerca de sete milhões de limites de parcelas cadastrais estão representadas nas bases de dados espaciais do país. A acurácia destes dados depende do tipo de região representada. Os dados cadastrais originais estão nas escalas

1:1.000 e 1:2.000. O conjunto de dados topográficos tem acurácia de 1:2.000 para áreas rurais e 1:1.000 e 1:500 para áreas urbanas.

Os padrões de acurácia israelenses são descritos em Steinberg e Even-Tzur (2004). Segundo os autores, a meta a ser alcançada pelo SOI (Survey of Israel) é de 5 cm de acurácia para os limites das parcelas cadastrais com 95% de confiança. Para tanto, inicialmente foi realizado o reajustamento das observações geodésicas clássicas, obtendo-se um desvio padrão de 10 cm, valor que não atende a meta proposta. Esforços na busca de melhorar o controle geodésico ainda são necessários.

As experiências realizadas na Austrália e na Nova Zelândia são exemplos atuais que tratam da acurácia cadastral, segundo Bennett et al. (2010). No caso específico da Austrália, as tolerâncias das acurácias cadastrais baseiam-se no fechamento do perímetro, na conexão com os monumentos com coordenadas conhecidas e na acurácia posicional. Os levantamentos cadastrais são divididos em “área central”, “área comercial”, “área urbana” e “área rural”. A Tabela 4.1 contém informações sobre as tolerâncias das acurácias dos vários tipos de áreas, conforme <http://www.landservices.sa.gov.au/default.asp> (acessado em 11 de maio de 2010).

Tabela 4.1 – Tolerância das acurácias do levantamento cadastral			
Zona de Acurácia	Distância	Ângulo	Posição
Região central da Cidade de Adelaide	2 cm + 1:15.000	15” + 2 cm	2 cm
Região da rede residencial e comercial da Cidade de Adelaide	2 cm + 1:10.000	20” + 2 cm	3 cm
Urbana	3 cm + 1:10.000	20” + 3 cm	5 cm
Rural	10 cm + 1:5.000	40” + 10 cm	15 cm

Fonte: <http://www.landservices.sa.gov.au/default.asp>

A tolerância posição horizontal unidimensional se obtém em função da distância e do ângulo, no caso da acurácia relativa. Para a acurácia absoluta, utiliza-se a tolerância horizontal bidimensional, ou seja, a posição.

O fechamento linear de uma poligonal passível de verificação, bem como o erro associado ao perímetro de um polígono qualquer num plano, não deve exceder os limites para uma distância estabelecida. Para o fechamento angular, segundo “*Cadastral Survey Guidelines*”(http://www.sa.gov.au/upload/franchise/Housing,%20property%20and%20land/L_SG/CSG/CSG_Section_13.pdf, acesso em 9 set. 2010) a convenção adotada é $15(n)^{1/2}$ segundos de arco (n: número de lados).

Na Nova Zelândia, os padrões de acurácia dos dados geoespaciais são estabelecidos com base na acurácia em rede (absoluta), segundo Donnelly e Amos (2010), e na acurácia local (relativa). A acurácia absoluta é descrita por estações de referência utilizadas como pontos de amarrações (*tiers*), no posicionamento horizontal de pontos de controle, abrangendo três classificações e com acurácias equivalentes a 5 cm, 10 cm e 15 cm. A acurácia local é descrita por classes, cada uma contendo uma componente para o posicionamento horizontal de pontos de controle, abrangendo de 0,01 mm/km até 50 mm/km, dependendo dos limites de distância entre os pontos de mesma classe ou inferior. As coordenadas dos pontos de amarrações e das classes são classificadas em ordens, conforme Tabela 4.2, pertencendo a seis tipos de redes de controle, dentre elas, as destinadas aos levantamentos cadastrais (controle horizontal e controle vertical).

Tabela 4.2 – Padrões de acurácia para as redes de controle

Ordem	Acurácia <i>tier</i> horizontal (cm)	Acurácia classe horizontal (mm, ppm)	Acurácia <i>tier</i> vertical (cm)	Acurácia classe vertical (mm, ppm)	Objetivo da ordem
0	5	3 + 0.03	5	3 + 0,03	Rede de referência Nacional
1	5	3 + 0.1	10	3 + 0,3	Rede de Monitoramento de deformação Nacional
2	10	3 + 1	25	3 + 3	Rede de Monitoramento de deformação Regional
3	10	10 + 3	35	10 + 10	-
4	15	10 + 10	35	10 + 50	Rede de Monitoramento de deformação local
5	15	10 + 50	35	20 + 100	Controle cadastral horizontal Rede geoespacial básica
1V	-	-	25	3 + 3	Rede Altimétrica Nacional
2V	-	-	35	10 + 10	-
3V	-	-	35	20 + 100	Controle Cadastral Vertical

Fonte: adaptado de Donnelly e Amos (2010).

Na Nova Zelândia, as regras para o levantamento cadastral foram revisadas e passaram a vigorar a partir de 24 de maio de 2010. A interpretação dos padrões de acurácia dos limites da parcela cadastral e da orientação e conexão do levantamento com os “data” oficiais proporcionam esclarecimentos sobre os novos termos adotados, complementando as próprias regras para o levantamento cadastral, as quais se encontram disponíveis no site <http://www.linz.govt.nz/survey-titles/cadastral-surveying/index.aspx>, acessado em 10 de maio de 2010. Com estes novos padrões de acurácia das informações (geo)espaciais da parcela cadastral, o proprietário tem uma melhor confiabilidade no tamanho e na forma que identifica

os limites de sua unidade territorial municipal, além de facilitar, no futuro, uma reocupação dos pontos identificadores do limite da parcela, segundo LINZG65700 (2010). Para os pontos que não coincidem com o limite da parcela, têm-se as seguintes acurácias (Tabela 4.3):

Tabela 4.3 – Acurácias para marcos de limites não coincidentes no levantamento

Acurácia horizontal e vertical entre	Não deve exceder
Todos os marcos antigos e novos não limítrofes	$\sqrt{0.025^2 + (dist \times 0.0001)^2} m$, com nível de confiança de 95%
Quaisquer dois marcos não limítrofes, incluindo marcos não limítrofes adotados	$0,03 m + dist * x 0,00015$
Quaisquer dois novos ou antigos marcos não limítrofes	0,50 m

**dist* é a distância horizontal entre os pontos, em metros.

Fonte: LINZ (2010)

Para os limites da parcela, as acurácias são estabelecidas em quatro classes, as quais estão contidas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Acurácias para marcos de limites no levantamento

Classe do limite	Acurácia horizontal e vertical entre...	Não deve exceder
I A	Todos os pontos limites dentre os outros adotados, independente de serem materializados ou não.	$\sqrt{0.04^2 + (dist \times 0.0001)^2} m$ com 95% de nível de confiança
II A	Qualquer ponto limite e qualquer outro ponto limite, incluindo pontos adotados e independente destes pontos serem materializados ou não.	$0,06 m + dist \times 0,00015 m$
III B	Todos os pontos limites, dentre os outros adotados, independente destes pontos serem materializados ou não.	$\sqrt{0.20^2 + (dist \times 0.0004)^2} m$ com 95% de nível de confiança
IV B	Qualquer ponto limite e qualquer ponto limite, incluindo pontos adotados e independente destes pontos serem materializados ou não	$0,30 m + dist \times 0,0006 m$
V C	Todos os pontos limite, dentre os pontos adotados, independente desses pontos serem materializados ou não	$\sqrt{0.60^2 + (dist \times 0.002)^2} m$ com 95% de nível de confiança
VI C	Qualquer ponto limite e qualquer outro ponto limite, incluindo os pontos adotados, independente destes serem materializados ou não	$1,00 m + dist \times 0,003 m$
VII D	Não especificado	

Fonte: LINZ (2010)

A tolerância (horizontal e vertical) entre um ponto limite e todos os outros (antigos e novos) fora do limite da parcela não deve exceder uma tolerância estabelecida, como p.ex., a adotada na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Tolerâncias para marcos testemunhos

Classe do ponto limite	Tolerância (cm)
A	4
B	20
C	60
D	Não aplicável

Fonte: LINZ (2010)

O “datum” horizontal utilizado no levantamento cadastral é orientado com base no referencial geodésico oficial. Os limites da parcela são conectados aos vértices da rede de levantamento cadastral, em função da distância entre os respectivos vértices, como exemplificado na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Distância entre ponto limite e marco da rede de levantamento

Classe do ponto limite	Distância (m)
A	500
B	1.000
C	2.000
D	Não aplicável

Fonte: LINZ (2010)

O levantamento altimétrico dos pontos limites da parcela cadastral é realizado com base na distância entre estes e a Referência de Nível (RN) oficial que dista 200 m, no caso da Classe A, e de 500 m para a Classe B. Não sendo contemplada nenhuma destas situações, adota-se um referencial altimétrico arbitrário.

Os pontos limites da parcela, dependendo do tipo de classe, devem estar distantes de marcos testemunhos (RRCM), p. ex., ver Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Distância entre ponto limite e marco testemunho

Classe do ponto limite	Distância (m)
A	150
B	500
C	1.000
D	Não aplicável

Fonte: LINZ (2010)

Para cada classe, os pontos limites da parcela devem estar distantes de dois marcos de referência permanente, como indicado na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Distância entre marcos de referência permanente e ponto limite

Classe do ponto limite	Distância (m)
A	300
B	500
C	1.000
D	Não aplicável

Fonte: LINZ (2010)

4.5 Procedimento metodológico previsto para esta pesquisa

Desta revisão bibliográfica sobre padrões de acurácia para levantamentos cadastrais, nota-se a concentração de esforços para a adequação das mesmas às novas tecnologias (ex: GNSS), sem desprezar os trabalhos já realizados. Ainda, observa-se um detalhamento maior das pesquisas implementadas na Nova Zelândia e em vigor desde 24 de maio de 2010, que servirão de base para esta pesquisa. Há duas redes específicas para cadastro, uma horizontal e uma vertical, dentre um total de seis tipos de redes de controle destinadas à conexão com o referencial geodésico oficial adotado pelo referido país.

O grande desafio para o estabelecimento da rede horizontal se relaciona com o número insuficiente de pontos de controle existentes para fins cadastrais, pois os monumentos existentes têm coordenadas provenientes de ajustamentos por mínimos quadrados de poligonais referidas a quinta ordem (Tabela 4.2).

Segundo Donnelly e Amos (2010), embora estas poligonais tenham acurácia suficiente para os propósitos originais, suas coordenadas não são exatas o suficiente para proporcionar as exigências atuais para os levantamentos de controle, quando, p. ex., tratar da acurácia local entre dois pontos sem realizar medidas entre os mesmos. Os autores concluem que, neste caso, os monumentos não são acurados suficientemente para realizar os controles cadastrais.

Todos os pontos obtidos desta forma são reavaliados como de sexta ordem, tornando-se úteis para os levantamentos cadastrais. Os pontos observados com GNSS são classificados como de quinta ordem e com acurácia suficiente para os levantamentos cadastrais.

Na Nova Zelândia, a rede de controle horizontal em áreas rurais tem uma menor densidade, em virtude da boa visibilidade de satélites artificiais, o que torna o GNSS muito utilizado nos levantamentos cadastrais.

O outro tipo de rede cadastral, a de controle vertical, utiliza-se de alturas elipsoidais (geométricas), as quais são transformadas para o referencial altimétrico oficial, obtendo-se altitude ortométrica, baseada num geóide específico. Esta rede não é densa o suficiente na maioria das áreas urbanas, optando-se, portanto, em conectar os levantamentos cadastrais com o “datum” altimétrico do país somente com pontos de controle vertical não distantes a mais de 200 m da área levantada.

No caso brasileiro, de acordo com Brandão (2003), ao consultar o site do www.ibge.gov.br, há inexistência de redes de referência cadastral para cobrir todo território brasileiro; o que se constata, também, em Carneiro (2010), relatando que “a rede geodésica brasileira não possui densidade suficiente para o georreferenciamento de parcelas urbanas”.

Desta forma, pensando-se nos exemplos de redes de controle para levantamentos cadastrais na Nova Zelândia, propõe-se, nesta pesquisa, comparar os procedimentos para estimar as posições das estações de uma RRCM, para fins de análise de acurácia absoluta das mesmas. Como a RRCM deve-se vincular ao SGB, ou seja, p.ex., à RBMC, dois procedimentos são testados para a materialização da RRCM, conforme sub-subseção 3.3.1. Primeiramente, com o uso de injunção finita, adotando-se os desvios padrão das estações de referência selecionadas, tendo resultados satisfatórios para redes “pequenas”. No outro procedimento, adota-se a injunção mínima, a qual se obtém em duas etapas; a primeira, realizando-se uma combinação das soluções regional e global com o GLOBK¹⁷, que considera as soluções sequenciais, combinando-as com uma anterior, além de aplicar uma injunção fraca em todos os parâmetros estimados; e, finaliza com uma injunção generalizada com o aplicativo GLORG, expressa pela seguinte equação:

$$\begin{pmatrix} A \\ B \end{pmatrix} X_{mc} = \begin{pmatrix} Obs \\ BX_0 \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

$$\begin{pmatrix} \Sigma_{obs}^{-1} & 0 \\ 0 & \Sigma_{\theta}^{-1} \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

¹⁷ Software científico desenvolvido pelo MIT (Massachusetts Institute of Technology).

onde a matriz A (derivadas parciais) é obtida pelo GLOBK e a matriz B contém as estações que definem (estabelecem) o sistema de referência. Os aspectos estruturais e operacionais dos softwares empregados nesta tese, serão discutidos no sétimo capítulo. Para não haver conflito em relação à terminologia associada à injunção mínima, doravante, adotar-se-á o termo injunção generalizada como sinônimo da mesma.

Os dados GNSS são processados com o programa GAMIT do MIT, disponível para fins acadêmicos, com uma estratégia que adota, dentre vários critérios, os seguintes:

- taxa de coleta: 30 segundos
- ângulo de elevação: 3°
- órbita/eop: igs final, eop semanal
- modelo de carga oceânica: FES2004
- variação do centro de fase: absoluta
- solução diária: injunção fraca de 1 m nas coordenadas
- tipo de experimento: relax
- tipo de observável: LC_AUTCLN.

Dentre os arquivos gerados com o GAMIT, tem-se o *H-file* que contém a solução/completa do ajustamento, ou seja, as coordenadas estimadas e a matriz variância-covariância dos parâmetros ajustados. As coordenadas de todas as estações são injuncionadas com 1 m, portanto, não fixando fortemente nenhuma estação com coordenadas conhecidas, o que poderia distorcer a rede analisada. Quando se fixa coordenadas de algumas estações para estabelecer o referencial, ou seja, definir a estrutura (geodésica) básica, denomina-se este procedimento por injunção finita, implementado tanto no GAMIT como no GLOBK. Portanto, este tipo de injunção que estabelece os valores para as coordenadas de algumas estações não é recomendado, pois um valor incorreto ao ser adotado para um ponto pode causar uma distorção em toda rede geodésica. Isto ratifica, novamente, a afirmação na sub-subseção 3.3.1. Quando se utiliza do método de injunção mínima, o qual emprega “injunções generalizadas”, disponibilizado no aplicativo *glorg*, o mesmo não causa nenhuma alteração na estrutura investigada.

Desta forma, as soluções geradas pelo GAMIT correspondem aos dados de entrada no modelo combinado com o *glorg*, o qual produz um arquivo com extensão *.org, contendo as informações da respectiva combinação, coordenadas estimadas e variância-covariância de todos os parâmetros ajustados.

Admitindo-se que uma rede global (nacional ou estadual) tem suas soluções disponibilizadas para todas estações processadas, é possível realizar a combinação deste tipo de solução (global) com as de uma rede regional (municipal). A combinação entre estes tipos de soluções, global e regional, se faz, na prática, com o aplicativo *glorg*, tendo como equação fundamental a apresentada por Calais (2010):

$$X_S^i = X_{comb}^i + (t_{comb} - t_S)\bar{X}_{comb}^i + T_k + D_k X_{comb}^i + R_k X_{comb}^i + (t_{comb} - t_S)[\bar{T}_k + \bar{D}_k X_{comb}^i + \bar{R}_k X_{comb}^i] \quad (4.3)$$

sendo, X_S^i corresponde à posição da estação (i) na solução (s) obtida na época t_S ; X_{comb}^i a posição estimada da estação (i) na época t_{comb} ; $\bar{X}_{comb}^i$ a velocidade estimada na combinação; T_k , D_k , R_k os parâmetros de transformação entre as soluções (s) e ($comb$); $\bar{T}_k$, $\bar{D}_k$, $\bar{R}_k$ as derivadas temporais dos respectivos parâmetros.

Para se obter o valor da solução combinada, impõe-se que as coordenadas/soluções (global e regional) sejam estimadas com base num mesmo conjunto de estações (estáveis) de referência. No jargão do GLOBK, este procedimento é denominado por “estabilização”. Segundo Calais (2010), não se injunciona fortemente, ou seja, uso de injunção finita, um subconjunto de estações com posições a priori; impõe-se que suas posições sejam expressas numa estrutura (“*frame*”) conhecida, através de uma transformação de similaridade obtida quando se aplica injunção generalizada.

Assim, para cada i -ésima estação em uma determinada solução “ s ” (regional ou global), estimam-se, simultaneamente, a posição combinada na época “ t_0 ” (época da combinação), a velocidade combinada e os 14 parâmetros de transformação entre a solução individual e a combinada, com base na equação 4.3.

Nesta pesquisa, a solução global corresponde às soluções vinculadas à rede geodésica brasileira, especificamente, as derivadas dos processamentos com dados GNSS; enquanto a solução regional consiste dos resultados dos cálculos com as observações, também GNSS, coletadas nos vértices de uma Rede de Referência Cadastral Municipal (RRCM). A acurácia horizontal absoluta destes vértices da RRCM deve atender uma tolerância estabelecida, por exemplo, 15 cm, conforme exemplo da revisão bibliográfica sobre os novos padrões de levantamentos cadastrais na Nova Zelândia (Tabela 4.2).

Portanto, esta pesquisa analisa os resultados obtidos com os dois procedimentos mencionados para a obtenção da solução final de uma estação pertencente a uma RRCM, ou

seja, o método que se utiliza de uma injunção finita e o que adota uma injunção mínima. Com isto, pode-se comparar os valores encontrados para a acurácia horizontal absoluta com cada tipo de injunção, verificando qual atende a tolerância recomendada na Nova Zelândia, para este tipo de rede de controle horizontal destinada ao levantamento cadastral dos limites de parcelas territoriais. Uma vez que se tem a aceitação da acurácia absoluta para a RRCM, utilizam-se os vértices desta rede para a análise da acurácia local entre os mesmos e os vértices limites da parcela cadastral, seguindo as tolerâncias estabelecidas. Com a consideração do dinamismo da rede a ser avaliada, na pesquisa vigente será analisada a acurácia absoluta da mesma e a propagação dessa movimentação em relação a cada parcela.

4.6 Considerações finais

A avaliação da acurácia em redes vem sendo discutida pela comunidade científica. Já a aplicação deste método em RRCMs tem sido pouco explorada e é um dos objetivos específicos desta pesquisa. Assim, o objetivo deste capítulo foi apresentar uma revisão bibliográfica sobre precisão e acurácia acerca dos padrões de precisão e acurácia praticados para a RRCM no Brasil e no âmbito internacional. A contribuição expressiva deste capítulo se deve à apresentação e discussão de acurácias para determinação de limites cadastrais e sua relação com a RRCM, bem como a um procedimento adotado no experimento desta pesquisa. Neste procedimento, uma solução final é prevista para análise da acurácia absoluta das estações de uma RRCM em relação à RBMC, utilizando aplicativos científicos do MIT (GAMIT e GLOBK), com os quais é possível minimizar os erros devido aos efeitos da carga atmosférica, modelos da carga oceânica (FES2004), modelos de centros de fase da antena, entre outros. O intuito de se estabelecer e validar este procedimento é o de contribuir para a instituição de padrões de acurácia no país.

5 CADASTRO DINÂMICO

5.1 Introdução

Os fenômenos naturais, como terremotos e tsunamis, ocorridos nos últimos anos, causaram movimentos na crosta terrestre, capazes de alterar as posições de pontos que materializam os limites das parcelas cadastrais de propriedades localizadas, seja em regiões próximas aos encontros de placas litosféricas (interplacas), ou, entre elas (intraplacas). Assim, sistemas de registro de títulos de propriedades, baseados nos monumentos com coordenadas estimadas e nas medições dos aspectos físicos e geométricos que definem os respectivos limites, são afetados por tais desastres, necessitando de uma nova realização do cadastro. O tsunami ocorrido no Japão, no início de 2011, destruiu todos os monumentos e os pontos de referência, nas regiões atingidas por este fenômeno. Há, portanto, a necessidade de reintegrar ou restabelecer os limites das parcelas cadastrais destruídas ou alteradas.

Não há ocorrência no Brasil deste tipo de fenômenos com tal intensidade, no entanto, tendo ocorrido grandes acidentes naturais oriundos de intensas precipitações pluviométricas em meses chuvosos, como nos estados de Santa Catarina (2008), Rio de Janeiro (2010) e em Minas Gerais (2011). As consequências, além dos importantes aspectos sociais, implicam inclusive na perda dos limites físicos originais dos imóveis.

Não se pretende, nesta tese, estudar os efeitos destes fenômenos nas coordenadas dos limites das parcelas. Isto implicaria em um aprofundamento nos estudos geofísicos, geológicos e meteorológicos, entre outros, não previstos aqui. A intenção é iniciar um processo investigativo a partir da formulação de um modelo de cadastro dinâmico, assumindo uma deformação homogênea na RRCM.

Este capítulo discorre inicialmente sobre os modelos dinâmicos de deformação da crosta terrestre, aos quais as coordenadas dos limites das parcelas devem ser submetidas e, na sequência, as experiências de Cadastro Dinâmico vivenciadas na Nova Zelândia e Israel, países onde são observados avanços significativos nesta área.

5.2 Modelos dinâmicos de deformação da crosta terrestre

Com relação aos modelos dinâmicos, os quais consideram tanto as variações espaciais quanto as temporais, de acordo com Grant e Pearse (1995), tem-se:

- a) **Modelos espaciais:** a deformação é estimada com base nas medições dos pontos geodésicos, onde a dinâmica do sistema de coordenadas dos usuários do “datum” é definida com base num conjunto de pontos, ou seja, numa densidade de pontos que estabelecem os limites das parcelas cadastrais, podendo ser interpolado por uma função espacial, p.ex.:
 - a.1) *modelo de deformação (“strain”)*: apropriado para áreas limitadas a um estudo específico. Quando for o caso de adequar este modelo para toda extensão territorial de um país, necessita-se de um modelo de ordem superior, com densidade uniforme de observações geodésicas. A tentativa de aplicar um único modelo para todo país se traduz em problemas com a deformação, as observações geodésicas, as condições do relevo do terreno e as acurácias exigidas. Pode haver áreas onde a deformação é muito heterogênea, onde se exige uma melhor acurácia espacial, e onde o controle geodésico é denso e frequentemente deve ser medido. Para superar estes problemas ou dificuldades, pode-se dividir o país por regiões, tendo um modelo de deformação heterogênea adequado para cada região, porém, geram-se descontinuidades entre os limites destas regiões.
 - a.2) *movimento de bloco discreto*: uma área é dividida em vários blocos, podendo-se estimar os parâmetros de transformações entre estes, seja no que diz respeito a translação, rotação e deformação homogênea, incluindo-se os movimentos decorrentes dos terremotos. Este modelo é adequado para a dinâmica de redes geodésicas de grandes extensões. Portanto, não sendo apropriado para modelar a dinâmica de uma densa rede de controle cadastral ou o próprio cadastro. A alta densidade de monumentos cadastrais conduz a um raciocínio de que muitos destes podem estar nos limites de vários blocos, tornando ambíguas as coordenadas, pois ora pode pertencer a um bloco, ora a outro.
 - a.3) *modelo de elementos finitos*: este modelo pode ser aplicado de forma similar ao de bloco discreto, mas a deformação em cada bloco é injuncionada pela deformação determinada nos limites do mesmo.
 - a.4) *método de colocação por mínimos quadrados*: este método se utiliza de funções de covariância, as quais dependem normalmente das distâncias entre os pontos. Funções de covariância podem ser projetadas para fornecer um modelo estocástico da deformação,

com base nos conhecimentos da Geologia e da Geofísica da superfície física que abrange os limites territoriais. As covariâncias podem depender não somente das distâncias, mas também do espaçamento entre as estações e a região de falha, bem como, da magnitude esperada da deformação.

- b) **Modelos temporais:** os pontos geodésicos movimentam-se em decorrência da dinâmica das placas tectônicas (litosféricas) e, conseqüentemente, as coordenadas destes pontos não são iguais quando se considera sua variação temporal. Tem-se:
 - b.1) *velocidade constante*: para estações distantes dos limites da placa tectônica, pode assumir que suas velocidades são constantes. Este modelo é utilizado na definição do ITRF.
 - b.2) *outras funções determinísticas*: a desvantagem destas funções é que exige-se dados suficientes de re-observações de redes geodésicas, possibilitando a escolha da melhor função. Outra desvantagem se refere à dificuldade de distinguir entre os erros associados ao modelo e aqueles relacionados às observações geodésicas. Como a função determinística não é estocástica, qualquer falha desta função para modelar o comportamento atual, resultará em grandes resíduos nas observações geodésicas. Um exemplo de função determinística é o modelo de velocidade constante.
 - b.3) *Filtro de Kalman*: se utiliza de um modelo dinâmico determinístico (p.ex., o modelo de velocidade constante) e de uma estimativa da incerteza deste modelo (erros do modelo dinâmico que fornecem a componente estocástica). No caso da deformação da crosta terrestre, os erros do modelo dinâmico baseiam-se na informação geofísica.

As coordenadas no sistema cadastral dinâmico sofrem alterações em suas posições, tanto espacialmente quanto temporalmente, não somente em decorrência da deformação da crosta terrestre, mas também em virtude das melhorias de evidências da estrutura cadastral, segundo Grant e Pearse (1995). Exemplo disto, segundo estes autores, ocorre quando marcos confiáveis apresentarem discrepâncias com as coordenadas da base de dados cadastrais, ou, se observações previamente aceitas forem encontradas com erros. Assim, a estrutura cadastral (“cadastral fabric”) deve ser redefinida e as coordenadas alteradas. Com a adoção do cadastro de coordenadas dinâmicas, os profissionais habilitados a realizar os levantamentos das parcelas cadastrais serão solicitados a atualizar as coordenadas da base de dados oficiais. Quando o sistema for implementado, acessos on-line serão tarefas rotineiras destes profissionais para alimentar a respectiva base de dados em função das observações coletadas no campo. Para Grant e Pearse (1995), as coordenadas sumarizam as evidências na geometria

do cadastro e complementam com o pensamento de que as lentas mudanças nas coordenadas não agregam desvantagens para aqueles que realizam os levantamentos cadastrais, refletindo, simplesmente, uma melhoria no cadastro. Assim, neste tópico, foram expostos sucintamente os modelos de deformação da crosta e suas principais características. No capítulo 6 este assunto é retomado, já com fins específicos para aplicação em RRCM.

5.3 A experiência na Nova Zelândia

A Nova Zelândia localiza-se entre as placas Australiana e do Pacífico, portanto, numa região dinâmica, pois está sujeita aos movimentos da crosta e de grandes terremotos, segundo Blick e Grant (1997), além de atividades vulcânicas e de subsidência em decorrência da extração de energia geotérmica. Os movimentos da crosta terrestre conduzem a distorções no “datum” geodésico da Nova Zelândia, o NZGD49, tornando as observações de novos levantamentos incompatíveis com a sua acurácia. Outro fato gerado em consequência desta movimentação se relaciona com o movimento dos marcos geodésicos de limite cadastral, pois suas coordenadas, quando fixadas a um cadastro de coordenadas, tornam-se incoerentes com a posição dos marcos da rede de controle nacional. Nesse país, as coordenadas dos limites das parcelas cadastrais são alteradas, em consequência dos movimentos da crosta terrestre, neste caso, de aproximadamente 5 cm/ano, segundo Blick e Grant (1997). Em 50 anos, esta quantidade equivale a 2,5 m, distorcendo o “datum” e deteriorando sua acurácia, tornando as novas observações incompatíveis com o referencial adotado pelo país. Como estes movimentos podem resultar nas alterações dos monumentos que delimitam as parcelas cadastrais, isto ocorre quando as coordenadas dos limites das propriedades estão vinculadas a um cadastro de coordenadas, gerando um conflito com as posições dos pontos que pertencem à rede geodésica deste cadastro (BLICK; GRANT, 1997). Assim, os autores consideram que um cadastro onde as coordenadas alteradas dos limites das parcelas cadastrais representam suas posições verdadeiras, corresponde a um *cadastro de coordenadas dinâmicas*, exigindo, portanto, uma modelagem dos movimentos da superfície terrestre.

A definição espacial do sistema cadastral da Nova Zelândia baseia-se nos marcos físicos implantados no terreno e nas observações de ângulos de orientações (azimutes, rumos) e de distâncias entre os monumentos envolvidos, e não em coordenadas. Os marcos testemunhos são materializados próximos aos limites e utilizados para verificar a localização

dos pontos que representam os limites da propriedade, ou, para reocupação destes pontos quando destruídos ou perdidos. Segundo Blick e Grant (1997), como a distância entre o marco testemunho e o marco de limite é pequena (dezenas de metros), este sistema é muito robusto, acomodando as distorções no “datum” e os efeitos do movimento da crosta terrestre, pois estas distorções em áreas pequenas não são significativas. Quando há movimentos catastróficos, estas distorções não podem ser desprezadas e pode ser necessário realizar novos levantamentos. As distorções nas redes de controle geodésico e na rede de referência cadastral são significativas e novos procedimentos metodológicos devem ser investigados para a avaliação e a acomodação destas distorções.

A rede de triangulação geodésica na Nova Zelândia iniciou-se em 1909, sendo complementada em 1949, constituindo-se na rede de primeira ordem. As estações desta rede servem como referência para o sistema cadastral, mas em virtude das limitações desta rede em relação à acurácia das novas tecnologias, p.ex., o GNSS, e também pela necessidade de unificar os SIGs para grandes áreas, as acurácias exigidas requerem a consideração dos movimentos da crosta terrestre, segundo Blick e Rowe (1997). Assim, uma nova rede geodésica foi estabelecida na Nova Zelândia, para um novo “datum”, o NZGD 2.000, sendo considerado a priori, um “datum dinâmico”, o qual mantém uma relação com o Sistema utilizado pelo *International Earth Rotation Reference Systems Service* (IERS), ou seja, o *International Terrestrial Reference System* (ITRS), e também acomoda a deformação da crosta terrestre dentro dos limites territoriais da Nova Zelândia. Além deste tipo de “datum”, dinâmico, há mais outros dois, segundo Blick e Grant (1997): “datum fixo” e “datum semi-dinâmico”. O NZGD49 é um “datum fixo” e não adequado, pois se degrada com o tempo, em virtude, p.ex., dos efeitos da deformação da crosta terrestre.

Têm-se o conhecimento das velocidades das estações que pertencem a um “datum geodésico dinâmico”, permitindo o cálculo de coordenadas com relação a uma época no futuro ou no passado. Portanto, este tipo de “datum” requer um modelo de velocidade, possibilitando que as coordenadas dos pontos de controle se alterem regularmente (semanalmente, mensalmente ou anualmente). Um “datum” híbrido, ou seja, entre o estático (fixo) e o dinâmico, pode ser denominado por “datum semi-dinâmico”, onde as coordenadas estão referenciadas a uma determinada época. No caso da Nova Zelândia, para o NZGD49, tem-se a época de 1949, mantendo um modelo de velocidade não nulo para este “datum”, o qual é acessado e mantido usando transformações dinâmicas. Pode-se definir um “datum novo” para uma época de referência, p.ex., primeiro de janeiro de 2.000, com um modelo de velocidade baseado em observações atuais da deformação da crosta terrestre. Assim, para

observações coletadas em outra época, p.ex., em 2011, convertem-se as coordenadas de 2.000 para esta nova data, utilizando as estações com coordenadas comuns em ambas as épocas, e posteriormente, transformando as coordenadas de todas as novas estações para a data de referência (neste caso, para o ano 2.000). Ao relacionar as observações para as coordenadas das estações, numa época comum, garante-se que os efeitos da deformação da crosta terrestre sejam considerados. Segundo Blick e Grant (1997), isto não cessa o processo de distorção da rede física, mas evita distorções no “datum”. É possível monitorar e manter as mudanças que ocorrem entre a rede física materializada pelos monumentos (marcos) e as coordenadas do “datum”, as quais são utilizadas nos cálculos.

O sistema cadastral, na Nova Zelândia, se conecta com a rede geodésica nacional, permitindo a associação entre as coordenadas dos limites da parcela com as coordenadas geodésicas da rede de controle geodésico do país. Quando as coordenadas de uma rede dinâmica de controle geodésico são associadas com as deformações da crosta terrestre, estas se propagam para as coordenadas dos limites das parcelas cadastrais (cadastro de coordenadas dinâmicas). Grant e Pearse (1995) tratam da proposta de um “datum dinâmico” para a rede geodésica da Nova Zelândia, incluindo modelos de velocidade junto com os reajustamentos periódicos, onde a acurácia espacial do “datum” é mantida em função da deformação da crosta terrestre.

Segundo Grant e Pearse (1995), quando não há “grandes” terremotos, pode-se assumir uma acurácia de 50 cm e atualizações das coordenadas são necessárias a cada dez anos; considerando áreas nos limites da placa litosférica, para períodos de duas ou três décadas é necessário realizar uma transformação; nas outras situações onde acurácia centimétrica é exigida, as transformações devem ser atualizada a cada ano. Dentre as cinco opções para conectar o “datum” da Nova Zelândia com o sistema de referência do IERS, ou seja, com o ITRS, Grant e Pearse preferem a alternativa que relaciona as orientações dos eixos do “datum novo” com as dos eixos do *International Terrestrial Reference Frame* (ITRF), onde as coordenadas e as velocidades de estações tectonicamente estáveis na região da Nova Zelândia são utilizadas para estimar as coordenadas e as velocidades das estações nos limites territoriais da Nova Zelândia, resultando em coordenadas consistentes com as do ITRF. As posições das estações do ITRF são estimadas, de acordo com McCarthy (1992), pela seguinte expressão:

$$\vec{X}(t) = \vec{X}_0 + \vec{V}_0(t - t_0) + \sum_i \Delta \vec{X}_i(t), \quad (5.1)$$

sendo $\Delta \vec{X}_i$ as correções para os vários efeitos de mudanças temporais, $\vec{X}_0$ é a posição na época de referência t_0 , e $\vec{V}_0$ a velocidade na época t_0 .

5.4 A experiência do Sistema de Cadastro Dinâmico de Israel

Para Jarroush e Even-Tzur (2007), o rápido crescimento da população, neste século 21, é um dos principais fatores que contribuem com a deficiência do uso da terra, elevando o custo do terreno e, conseqüentemente, exigindo uma homogeneização e uma melhor acurácia da materialização e da reocupação dos limites das parcelas do terreno, ou seja, dos limites das parcelas cadastrais. Um sistema cadastral é denominado de Sistema Cadastral Digital Legal (SCDL), quando as coordenadas dos pontos limites servem como um registro legal, ou seja, um sistema de cadastro de coordenadas. Uma tecnologia adequada para o desenvolvimento de um cadastro de coordenadas é a que se utiliza de sinais de satélites GNSS rastreados pelas antenas de estações permanentes, as quais se baseiam em sistema de coordenadas dinâmicas (em conseqüência do movimento e da deformação da crosta terrestre), causando mudanças nas posições dos pontos limites, requerendo, assim, uma transição para um sistema de cadastro dinâmico.

A conversão de um sistema cadastral clássico para um sistema cadastral moderno digital legal, este baseado numa acurada rede dinâmica de controle, necessita, segundo Jarroush e Even-Tzur (2007), de uma investigação dos possíveis problemas geodésicos. Estes autores iniciam esta análise realçando duas das principais tarefas problemáticas:

- i) o restabelecimento dos pontos limites da parcela cadastral: o profissional que realiza o levantamento cadastral tem acesso às coordenadas do ponto limite, armazenadas na base de dados do Cadastro Digital Legal (CDL), a fim de materializá-las no campo.
- ii) a atualização da base de dados do Cadastro Digital Legal: para o estabelecimento de novas entidades cadastrais, seja com um novo acordo de registro, ou, com uma nova divisão/união de registro.

A execução da primeira tarefa se faz com as coordenadas dos pontos limites contidas no CDL, conforme a Figura 5.1.

Figura 5.1 – Restabelecimento dos pontos limites. Fonte: adaptado de Jarroush e Even-Tzur (2007).

Havendo um deslocamento entre os vértices obtidos na base de dados e os provenientes de levantamentos cadastrais, e sendo superior à acurácia declarada na base de dados do CDL, existe um problema, de acordo com Jarroush e Even-Tzur (2007), pois as coordenadas do ponto limite do CDL descrevem uma posição incorreta no campo, constituindo-se numa falha do sistema. Há duas possíveis causas para esta falha: o ponto limite autêntico moveu-se em virtude da deformação da crosta terrestre, ou, pela diferença entre as acurácias do ponto limite autêntico, as quais são derivadas da rede de controle nacional e do restabelecimento.

Dois problemas cadastrais podem ser associados com a primeira causa: movimentos locais (p.ex., desmoronamento de encostas) e movimentos globais (p.ex., placas litosféricas). No primeiro tipo de problema, segundo Jarroush e Even-Tzur (2007), a deformação não muda a forma da Terra, não sendo necessário uma nova transformação no “datum” nacional que estabelece a rede de controle. Embora em tal caso o “datum” mudará, particularmente se os pontos que materializam este “datum” estão na área que sofreu movimentação. Portanto, o deslocamento dos pontos limites autênticos não deve ser considerado no sistema cadastral. No segundo tipo de problema, a forma da Terra é alterada, necessitando de uma mudança na definição do “datum” nacional da rede de controle. Jarroush e Even-Tzur (2007) observam que deformações podem ocorrer em decorrência de movimentos integrados (local e global), alterando as coordenadas dos limites cadastrais, as quais devem ser atualizadas e armazenadas na base de dados do CDL. Estes autores ilustram estes problemas com base na representação de um país como um bloco (ver Figura 5. 2), onde a situação A indica uma mudança no “datum” nacional, bem como nas coordenadas, enquanto a outra situação, B, o “datum” não se altera, mas se a área deformada for grande, compensa uma mudança nos limites cadastrais (JARROUSH; EVEN-TZUR, 2007).

Figura 5.2 – Redefinição e atualização do “datum” nacional. Fonte: Jarroush e Even-Tzur (2007).

No passado, na era do cadastro convencional, estas situações existiram, mas foram tratadas localmente. Na era do CDL, todas as situações terão de ser tratadas com base na estrutura geodésica que estabelece o sistema de coordenadas cadastrais.

A segunda tarefa problemática surge com um novo processo de registro, ou, um processo de divisão e união, onde o profissional que realiza as medições e a integração das mesmas com a rede de controle nacional, segue os princípios e as normas estabelecidas pelo país. A precisão obtida a 30 anos atrás era de qualidade inferior as atualmente obtidas, com uma tendência a continuar a melhorar no futuro, de acordo com Jarroush e Even-Tzur (2007). Assim, há uma motivação para regulamentar os levantamentos associados com o CDL, procurando inspecionar o valor calculado para a acurácia de um ponto limite.

Jarroush e Even-Tzur (2007) apresentam uma proposta para solucionar os problemas geodésicos mencionados, discutindo, inicialmente, duas questões:

- As coordenadas atualizadas do ponto limite atendem a acurácia da base de dados do CDL?
- Assumindo-se que a acurácia e a confiabilidade dos instrumentos de levantamento e da tecnologia melhoram no futuro, há necessidade de atualizar as coordenadas do ponto limite restabelecido na base de dados do CDL?

Estas duas questões realçam os problemas legais relacionados com o sistema cadastral, pois qualquer atualização de uma coordenada no CDL torna-se legalmente obrigatória, para Jarroush e Even-Tzur (2007); os quais apresentam uma solução baseada em três princípios:

- Qualquer ponto limite proveniente do campo, encontra-se num nível de acurácia superior à base de dados do CDL.

- A base de dados do CDL pode ser dinâmica, na forma de um “Modelo Geodésico de Monitoramento de Deformação (MGMD)” que mudará e atualizará as coordenadas da base de dados do CDL, descrevendo corretamente a posição dos pontos limites em cada época. Este princípio foi mencionado por Blick e Grant (1997), os quais sugeriram um conceito de um sistema de cadastro dinâmico para países que têm alterações de posicionamento geodésico relacionados com a deformação da crosta terrestre, em decorrência dos movimentos das placas litosféricas/tectônicas.
- A forma da parcela cadastral e sua área atualizada devem ser exatamente as mesmas provenientes dos cálculos com as coordenadas da base de dados do CDL. Estes dois parâmetros, segundo Jarroush e Even-Tzur (2004, 2007), são importantes para os engenheiros de zoneamentos (planejadores), pois um dos principais objetivos do futuro sistema CDL é que o mesmo seja adequado para os propósitos de zoneamento.

Sobre estes princípios, Jarroush e Even-Tzur (2007) comentam que a simplicidade do primeiro é sua principal vantagem e que a desvantagem se relaciona com os monumentos no campo não perdurarem por um longo tempo. Se estes monumentos existem no campo, há dúvida se os mesmos foram afetados por alguma deformação local. Sobre o uso de um MGMD para o sistema cadastral dinâmico, trata-se de um princípio novo que garantirá a sustentabilidade do sistema CDL, além de resolver as tarefas relacionadas com os problemas geodésicos mencionados anteriormente. O estabelecimento deste MGMD é de custo elevado, mas pode ser útil para outros interesses e propósitos, como p.ex., interesses relacionados com geodinâmica de um país. Entretanto, o modelo deve ser compatível com a acurácia do futuro CDL, caso contrário, os resultados com acurácia melhor podem ser incompatíveis e resultaria numa falha do sistema.

Os aspectos legais envolvendo estes princípios são discutidos por Jarroush e Even-Tzur (2007). O primeiro princípio não requer nova legislação, pois se assemelha com o princípio cadastral do sistema clássico existente. O segundo princípio requer uma nova legislação, pois sua imposição legal diz respeito às coordenadas do ponto limite, mesmo se um monumento autêntico for encontrado no campo. Além disso, o MGMD do sistema cadastral requer uma atenção, pois as coordenadas da base de dados do CDL podem não descrever de forma correta o ponto no campo, em qualquer época. Em ambos os casos, Jarroush e Even-Tzur enfatizam que a área da parcela registrada deve ser atualizada por lei.

Jarroush e Even-Tzur (2007) apresentam uma solução integrada, de acordo com os três princípios mencionados e os aspectos legais descritos, cujo esboço é relacionado a seguir:

- I. Usuários consultam o sistema CDL, num tempo t_1 , sobre os dados para restabelecer os limites da parcela.
- II. O sistema CDL informa:
 - i. Para a época de referência t_0 onde os dados foram medidos.
 - ii. As coordenadas do ponto limite com relação a época t_0 : (N_0, E_0, H_0) .
 - iii. O desvio padrão destas coordenadas do ponto limite: $(\sigma_{N0}, \sigma_{E0}, \sigma_{H0})$.
- III. As coordenadas (N_0, E_0, H_0) e seus desvios padrão $(\sigma_{N0}, \sigma_{E0}, \sigma_{H0})$, bem como a época t_0 , são os dados de entrada do MGMD, o qual calcula as coordenadas atualizadas (N_1, E_1, H_1) e seus desvios padrão $(\sigma_{N1}, \sigma_{E1}, \sigma_{H1})$ para a época t_1 , sinalizando pequenas deformações locais.
- IV. Se os desvios padrão $(\sigma_{N1}, \sigma_{E1}, \sigma_{H1})$ atendem a acurácia da base de dados do CDL, então as coordenadas do ponto na época t_1 são validadas legalmente.
- V. O profissional responsável pelo levantamento cadastral deve verificar a existência de monumentos autênticos na área. Assim, tem-se:
 - i. Se não existir nenhum monumento:
 - Se há uma validade legal para as coordenadas, elas são validadas.
 - Se não há uma validade legal para as coordenadas, os pontos limites devem ser remedidos para atualizar a base de dados do CDL, de acordo com as normas vigentes, para então serem consideradas válidas legalmente.
 - ii. Se existir monumentos e não houver sinalização de pequenas deformações locais:
 - As coordenadas derivadas do sistema CDL devem ser ajustadas de acordo com os monumentos existentes. Este ajuste se faz de duas maneiras:
 1. Se o projeto cadastral foi medido por redes independentes de controle local, e as medidas foram salvas na base de dados do CDL, então as novas coordenadas dos monumentos na rede nacional de controle serão fixadas na rede local. O ajustamento deve ser realizado pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ).
 2. Se não for possível diferenciar as medidas locais como uma rede independente de controle local, então as transformações de

coordenadas espaciais (se for um cadastro 3D) ou planas são realizadas com o MMQ, sem nenhum fator de escala, para fins de preservar a área calculada. Se houver um número inferior ao necessário para realizar o cálculo com o MMQ, estimam-se os parâmetros de translação.

- Verificar a acurácia do novo ajustamento:

1. Se as coordenadas obtidas atendem a acurácia da base de dados do CDL, as mesmas são validadas legalmente e atualizadas na respectiva base.
2. Se as coordenadas obtidas não atendem a acurácia da base de dados do CDL, tem-se:
 - I. Se as coordenadas têm uma validade legal por certo tempo, deve-se finalizar e atualizar a base de dados do CDL.
 - II. Se as coordenadas não têm uma validade legal por certo tempo, a acurácia melhor deve ser validada e finalizada legalmente, para a atualização da base de dados do CDL.
- iii. Se existir monumentos e há sinalização de pequenas deformações locais:
 - Ignorar os monumentos e retornar para a etapa V(i).

Esta estrutura deste sistema CDL é denominada por Jarroush e Even-Tzur (2007) de “Sistema CDL Dinâmico”. A Figura 5.3 ilustra o processo de restabelecimento do CDL dinâmico.

Figura 5.3 – Processo de restabelecimento do CDL dinâmico. Fonte: Adaptado de Jarroush e Even-Tzur (2007).

Se as parcelas cadastrais estão localizadas em áreas onde não há deformação, dois parâmetros não serão alterados: a forma da parcela e a área atualizada, de acordo com Jarroush e Even-Tzur (2007). Estes dois parâmetros são muito importantes para os propostos de zoneamento. O planejamento pode utilizar a base de dados do CDL sem necessitar dos profissionais que realizam os levantamentos cadastrais, mas quando for para executá-lo, necessita-se destes profissionais para realizar o projeto, especialmente em áreas dinâmicas que requerem um sistema CDL dinâmico. Jarroush e Even-Tzur (2007) testaram um MGMD, usando um modelo simples para uma superfície tectônica, com simulações e cálculos, demonstrando a eficiência do mesmo.

5.5 Considerações finais

O conceito de uma Terra estática já é, a algum tempo, ultrapassado. A busca por um modelo de deformações ocorridas na crosta terrestre tem sido objeto de estudo de vários pesquisadores, principalmente em países suscetíveis a movimentações locais ou globais. Neste contexto, encontra-se o Cadastro Dinâmico, cuja menor unidade é a parcela cadastral e cujos limites são definidos por suas coordenadas. Se estas são atingidas pela movimentação da crosta terrestre, torna-se necessário um Sistema Cadastral Dinâmico que se adéqüe a estas alterações. Nota-se que as experiências relatadas neste capítulo (Nova Zelândia e Israel), mesmo que destinadas às áreas onde são encontradas intensas atividades que ocasionam deformações na superfície terrestre, contribuem de maneira expressiva para o desempenho desta pesquisa, pois foi possível idealizar o modelo de cadastro dinâmico adequado às condições vivenciadas no Brasil.

6 MODELO DE DEFORMAÇÃO DA REDE DE REFERÊNCIA CADASTRAL

6.1 Introdução

Sistemas geodésicos ignoram, na maioria das vezes, o efeito da deformação decorrente do movimento entre placas litosféricas, seja um movimento tectônico secular, ou, de efeitos localizados, segundo Denys, Winefield e Jordan (2007). Para estes autores, o posicionamento geodésico com tecnologias modernas, p.ex., GNSS, desconsidera os efeitos de deformação que ocorrem na superfície terrestre, tanto em escala territorial (processos tectônicos) quanto em escala local (deslizamentos); e, concluem que nos projetos de engenharia em escala local, onde movimentos relativos entre os pontos de controle são mínimos, não se pode desprezar o movimento relativo causado pelos efeitos de deformação em posicionamento relativo de bases longas com GNSS, pois o movimento relativo pode ser maior do que o resíduo da medição.

O sistema cadastral na Nova Zelândia, na sua definição espacial, segundo Grant e Pearse (1995), é considerado um sistema dinâmico, pois as medições são realizadas com base em pontos de controle que estão sujeitos à deformação da superfície terrestre. De acordo com estes autores, é importante que o cadastro considere esta deformação, para garantir que os limites (limites físicos) e os bens “fixos” (limites legais) dos proprietários de terra movem-se entre si.

Assim, pode-se formular a seguinte questão: O sistema cadastral considera a deformação que ocorre nos pontos de controle? Se sim, garante ao proprietário da parcela cadastral que seus limites movem-se com relação aos pontos de controle e às parcelas adjacentes.

Outra pergunta a ser respondida: Qual é a acurácia local do sistema cadastral? A acurácia local do sistema cadastral deve garantir a reposição de um limite da parcela cadastral, quando este for destruído, seja em áreas urbanas ou rurais.

Finalmente, outro questionamento: Qual é a acurácia absoluta do sistema cadastral? A acurácia das coordenadas dos limites das parcelas cadastrais deve ser inferior a qual ordem de grandeza? Para uma rede (horizontal) cadastral, segundo Winefield, Crook e Beavan (2010), a acurácia absoluta (rede) de uma coordenada em relação ao “datum” deve ser de 15 cm, enquanto a acurácia relativa (local) entre dois pontos deve ser de $0,01 \text{ m} \pm 5 \times 10^{-5}$, ou seja, 1

cm $\pm$ 50 ppm, na Nova Zelândia. Estas acurácias devem atender uma confiabilidade de 95%. Estas questões poderão ser respondidas conhecendo-se a fundamentação teórica sobre a RRCM, sua realização, e os tipos de deformação aos quais a rede está suscetível. Portanto, este capítulo traz primeiramente, o Sistema de Referência Cadastral e sua realização e em seguida os tipos de deformação que esta pode sofrer, pela exposição dos modelos espacial e temporal.

6.2 Sistema de referência cadastral

Para estabelecer um sistema de referência é necessário, primeiramente, apresentar sua definição e, em seguida, expor sua realização.

- **Definição**

O sistema de referência cadastral, ou simplesmente, referencial cadastral, é definido com base no Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), conforme subseção 3.4. O SGB é apresentado na subseção 3.5, onde comparece a sua caracterização com relação ao sistema geodésico de referência, neste caso, o ITRS.

No SGB, a superfície de referência para a realização dos cálculos geodésicos é o GRS80 que representa a figura geométrica da Terra. Este referencial é o mesmo utilizado no SIRGAS2000 (subseção 3.5).

O elipsóide de referência tem sua origem coincidente com o centro de massa da Terra, tornando este sistema geodésico geocêntrico. Os eixos principais deste elipsóide estão orientados com base na definição do BIH, ou seja, o eixo menor coincidindo com o eixo médio de rotação da Terra, o eixo primário contém o plano do Equador e a longitude geodésica nula. O terceiro eixo torna o sistema dextrógiro, por convenção. A época de referência 2.000,4 corresponde à data na qual se tem as coordenadas das estações de referência utilizadas para a materialização (realização) deste sistema.

- **Realização**

O referencial definido é acessível quando se disponibiliza um conjunto de coordenadas conhecidas (rede/estrutura geodésica) no sistema definido, tornando-o viável para seus usuários. Neste caso, a realização ocorre com base na seleção das estações de referência.

Esta estrutura é a base para a determinação das coordenadas geodésicas das demais estações que pertencem a esta rede de referência.

6.3 Deformação da rede (estrutura geodésica) de referência

A geometria de uma estrutura geodésica sofre variações, ou seja, deformações, em decorrência de esforços que agem sobre a mesma. Considerando um referencial terrestre, Stanaway et al. (2012) apresentam a seguinte classificação de deformação:

- **Deformação aparente:** um recurso da análise geodésica, portanto, não representa a real deformação do monumento e está sujeito a várias fontes de erros quando se estimam posições e velocidades, p.ex., medida incorreta da altura da antena do receptor, modelos de calibração do centro de fase da antena, modelos troposféricos e ionosféricos, multicaminhos entre outros.
- **Deformação real:** podendo ser de natureza periódica, específica ao local ou tectônica.
 - *Deformações periódicas* são provenientes dos efeitos das marés terrestres (<550 mm), oceânicas (<180 mm) e atmosféricas (<2 mm), sendo passíveis de serem modeladas e preditas. Quando não se consegue esta predição, há necessidade de coletar dados meteorológicos, gravimétricos e altimétricos para estimar certos efeitos de carregamento, p.ex., carga atmosférica não perturbada (<10 mm), carga hidrológica (<30 mm) e carga oceânica (<10 mm) não perturbada.
 - *Deformações específicas ao local* decorrentes dos efeitos associados à antena do receptor e à construção dos monumentos (“marcos”/pilares) geodésicos. Alguns exemplos destes efeitos são a instabilidade da antena e do pilar, ação de ventos no pilar ou na construção que abriga o conjunto receptor/antena,

expansão termal do monumento, subsidência, compactação do solo, entre outros.

- *Deformações tectônicas*, podendo ser secular (movimento da placa rígida e deformação intersísmica) e não secular (efeitos episódicos, não lineares e não preditos), descritas a seguir:
 - Deformações seculares são consideradas lineares e preditas nas estações localizadas dentro das placas tectônicas rígidas, mas nos limites das mesmas, as taxas de deformação podem distorcer as redes geodésicas. Este tipo de deformação pode ser modelado num referencial local, tendo como causas alguns exemplos, como o movimento da placa tectônica rígida (<100 mm/ano) e deformação intersísmica (<50 mm/ano).
 - Deformações não seculares correspondem às causas decorrentes de natureza episódica e não linear, como as atividades sísmicas e vulcânicas. Alguns exemplos deste tipo de deformação são a exploração de água do subsolo em bacias sedimentares e áreas urbanas (< 250 mm/ano), vulcanismo (<10.000 mm/ano), deformação cosísmica (<10.000 mm/ano) e deformação pós-sísmica (<1.000 mm/ano).

6.4 Efeito da deformação da RRCM nas coordenadas da parcela cadastral

A superfície terrestre está, continuamente, sendo alterada, seja em resposta às forças tectônicas, aos processos climáticos e com relação às ações de agentes atmosféricos. A infraestrutura geodésica pode degradar-se em consequência da deformação interna (instantânea ou de longo prazo) causada por fenômenos naturais, tais como terremotos, vulcões e deslizamentos (DENYS; WINEFIELD; JORDAN, 2007). Os recursos tecnológicos disponíveis permitem estimar a distorção das redes geodésicas, auxiliando, desta forma, na determinação correta das posições dos limites das parcelas cadastrais localizadas em regiões, principalmente, sujeitas a movimentações do terreno. Assim, terremotos, deslizamentos e atividades vulcânicas são exemplos de alguns fenômenos naturais que podem causar certos efeitos no sistema cadastral, p.ex., alteração nos valores das posições dos limites das parcelas cadastrais.

A estrutura (rede) da referência cadastral baseia-se num conjunto de pontos implantados na área do município, envolvendo todas as parcelas cadastrais a serem levantadas por métodos geodésicos. Se a superfície terrestre movimenta-se, as coordenadas das estações que compõem a rede de referência cadastral também variam com o tempo e com o espaço. Desta forma, as coordenadas dos limites das parcelas cadastrais referenciadas às coordenadas das estações da rede de referência cadastral não correspondem às “novas coordenadas” desta rede.

As áreas consideradas estáveis, no passado, se movem e se deformam, em virtude do movimento da placa tectônica (litosférica). Na Nova Zelândia, este movimento chega a 5 cm/ano. Num período de dez anos, a deformação nacional acumulada alcança a ordem de grandeza de 50 cm, segundo Winefield, Crook e Beavan (2010). Associado ao sistema geodésico nacional da Nova Zelândia, encontra-se o modelo de deformação nacional, de acordo com Denys, Winefield e Jordan (2007), o qual considera a velocidade secular e o movimento localizado. Este modelo nacional tem por objetivo combinar dados antigos e novos, de maneira que as coordenadas da rede de referência sejam determinadas de forma exata em qualquer época.

Segundo Blick et al. (2011), a deformação da crosta terrestre, em geral, não afeta o posicionamento relativo para pequenas distâncias, da ordem de 1 a 2 km. Porém, quando se utiliza do GNSS e realiza-se posicionamento relativo para fins de amarração com um sistema geodésico, com base em pontos de controle (estações GNSS ativas) distantes de centenas de quilômetros (p.ex., acima de 100 km), obtêm-se resultados com boa acurácia, nos quais os efeitos da deformação da crosta devem ser considerados em algumas circunstâncias, p.ex.:

- quando utilizar pontos de controle GNSS distantes e em épocas superior à época de referência do sistema geodésico adotado;
- quando considerar dados de várias épocas.

Para Blick et al. (2011), a acurácia entre os pontos de limite da parcela cadastral e o marco de controle geodésico com base no qual são obtidas as coordenadas relativas dos limites da parcela não pode exceder 5 cm e 15 cm de acurácia horizontal e vertical, respectivamente. Os erros nas coordenadas obtidas e no modelo de deformação utilizado devem ser exatos o suficiente para garantir estas exigências. Onde as posições obtidas de marcos geodésicos de controle utilizam diferentes modelos de deformação, deve-se refinar o respectivo modelo para fins de obter a acurácia desejada.

Na Nova Zelândia, os sistemas geodésico e cadastral são referenciados a um mesmo *datum*, neste caso, ao NZGD2000, segundo Blick (2010). O cadastro pode ser considerado um cadastro geodésico, embora não exista um cadastro legal de coordenadas, cujas coordenadas acuradas dos marcos cadastrais melhorem a eficiência dos levantamentos cadastrais, permitindo que estes dados sejam utilizados em várias aplicações. Em virtude do sistema cadastral se conectar com o sistema geodésico, torna-se necessário o alinhamento espacial destes sistemas, p.ex., quando a rede de controle geodésico for reajustada em decorrência de novos levantamentos, ou, de eventos decorrentes de movimentação da superfície terrestre em consequência de terremoto ou fenômeno local.

Segundo Donnelly e Amos (2010), a Nova Zelândia tem duas redes de referência cadastral:

- Rede cadastral de controle horizontal: contém um conjunto de pontos de controle que garante aos levantamentos cadastrais serem conectados ao sistema geodésico oficial do país. A acurácia exigida para esta rede garante que 98% de todos os novos levantamentos são capazes de gerar coordenadas com acurácia absoluta de 15 cm e acurácia relativa de 3 cm.
- Rede cadastral de controle vertical: garante aos levantamentos cadastrais dos pontos limites sejam eficientemente e acuradamente referenciados ao *datum* vertical oficial do país (Tabela 4.2).

6.5 Modelo de deformação

Os modelos espaciais e temporais para análise de deformação da crosta terrestre (subseção 5.2) são utilizados para modelar a estrutura geodésica de referência cadastral.

6.5.1 Modelo espacial

Dentre os vários tipos de modelos espaciais, adota-se, nesta pesquisa, o modelo de “*strain*” (subseção 5.2.a.1) que é apropriado para áreas limitadas a um estudo específico. No caso de adequá-lo a toda extensão territorial de um país, necessita-se de um modelo de ordem

superior (muito acima de segunda ordem) e com densidade uniforme de observações geodésicas, de acordo com Grant e Pearse (1995). A tentativa de aplicar um único modelo para todo país se traduz em problemas com a deformação, com as observações geodésicas, com a topografia e com as acurácias exigidas. Podem haver áreas onde a deformação é muito heterogênea, onde se exige uma melhor acurácia espacial, e onde o controle geodésico é denso e freqüentemente deve ser medido. Para superar estes problemas ou dificuldades, pode-se dividir o país por regiões, tendo um modelo de deformação heterogênea adequado para cada região, porém geram-se descontinuidades entre os limites destas regiões.

Para a análise de deformação da Rede de Referência Cadastral Municipal, adotar-se-á um modelo de deformação homogênea. Portanto, a situação específica de cada município é modelada de forma independente, estimando-se os parâmetros de deformação da RRCM e propagando-os para todos os limites da parcela cadastral.

Os modelos de deformação, na Nova Zelândia, segundo Grant e Pearse (1995), podem ser classificados em:

- Modelo de deformação de âmbito nacional: a acurácia absoluta, neste caso, equivale a 5 cm, enquanto a relativa a 3 mm +/- 0,1 ppm.
- Modelo de deformação de âmbito regional: a acurácia absoluta, neste caso, equivale a 10 cm, enquanto a relativa a 3 mm +/- 1 ppm.
- Modelo de deformação de âmbito local: a acurácia absoluta, neste caso, equivale a 15 cm, enquanto a relativa a 10 mm +/- 1 ppm.

Se a estrutura geodésica (conjunto de pontos com coordenadas geodésicas conhecidas) que constitui a RRCM sofrer alguma mudança em suas dimensões, sua forma e sua posição, gera uma deformação na RRCM. Segundo Sokolnikoff (1956), os parâmetros básicos de deformação são a translação do corpo rígido, a rotação do corpo rígido (ou translação e rotação relativa de um “bloco” com relação a outro), o tensor de deformação (“*strain tensor*”) e componentes diferenciais de rotação. De acordo com Chen (1983) e Chrzanowski, Chen e Secord (1983), estes parâmetros de deformação podem ser obtidos quando se conhece o campo de deslocamento. Segundo Kuang (1996), este campo se ajusta a um modelo de deformação, com base nos deslocamentos determinados em pontos discretos, p. ex.:

$$d(x, y, z; t - t_0) = A(x, y, z; t - t_0)c \quad (6.1)$$

sendo o lado esquerdo desta equação o deslocamento (vetor d) das estações da rede de referência entre os instantes t e t_0 ; enquanto os elementos do outro lado desta igualdade correspondem a uma matriz (A) das derivadas dos deslocamentos com relação aos coeficientes (parâmetros) de deformação (vetor c), o qual é estimado com o uso do Método dos Mínimos Quadrado (MMQ) para uma matriz peso (P) associada ao deslocamento obtido:

$$\hat{c} = (A^T P_d A)^{-1} A^T P_d d. \quad (6.2)$$

O modelo matemático (deformação), segundo Kuang (1996), pode ser escrito da seguinte forma:

$$d = \begin{pmatrix} u(x, y, z; t - t_0) \\ v(x, y, z; t - t_0) \\ w(x, y, z; t - t_0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_u(x, y, z; t - t_0)c \\ A_v(x, y, z; t - t_0)c \\ A_w(x, y, z; t - t_0)c \end{pmatrix} \quad (6.3)$$

sendo (u, v, w) as componentes dos deslocamentos nas direções (x, y, z) , respectivamente, e também são funções tanto da posição, quanto do tempo. Desta expressão, Kuang (1996) deriva o tensor de deformação não translacional fornecido pela seguinte equação:

$$E = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial w}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial y} & \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

e as componentes “*normal strains*” (distorção linear), “*shear strains*” (distorção angular) e as rotações diferenciais ao redor dos eixos x, y, z , respectivamente, são:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u}{\partial x}, \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{\partial v}{\partial y}, \\ \varepsilon_{zz} &= \frac{\partial w}{\partial z}, \end{aligned} \quad (6.5)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xy} &= \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) / 2, \\ \varepsilon_{xz} &= \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) / 2, \end{aligned} \quad (6.6)$$

$$\varepsilon_{yz} = \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) / 2.$$

Quando se considera as rotações do corpo rígido, as mesmas podem ser expressas, segundo Kuang (1996), por:

$$\begin{aligned}\omega_x &= \left(\frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial y} \right) / 2, \\ \omega_y &= \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) / 2, \\ \omega_z &= \left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right) / 2.\end{aligned}\tag{6.7}$$

Deve-se ressaltar que este modelo é válido, segundo Caspary (2000), em aplicações geodésicas onde as deformações são consideradas pequenas com relação ao tamanho da rede. Assim, as deformações podem ser modeladas com base nas relações diferenciais entre os pontos vizinhos à rede analisada, quando os deslocamentos desta estrutura como um corpo rígido sejam removidos. Portanto, deve-se assumir que as deformações são homogêneas. Caspary (2000) relata que esta consideração faz com que a análise de deformação seja inadequada para muitos problemas de deformação. Para o mesmo autor, é possível tornar menos rígida esta restrição, na prática, dividindo a rede em elementos finitos, p.ex., decompondo a rede em elementos triangulares. Desta forma, a exigência de homogeneidade fica condicionada somente ao interior dos triângulos.

No modelo de deformação, a interpretação de homogeneidade pode ser entendida quando linhas retas permanecem retas e linhas paralelas permanecem paralelas. Assim, o tensor de deformação infinitesimal independe de translações, mas seus elementos referem-se ao sistema de coordenadas utilizado (CASPARY, 2000).

Para melhor compreender a interpretação geométrica dos parâmetros de deformação deste tensor, adota-se o caso bidimensional (Figura 6.1), onde as rotações diferenciais da rede como um corpo rígido são representadas por ω_{xy} e ω_{yx} . O ângulo β entre os eixos primários dos sistemas original (X) e deformado (X') corresponde à resultante de ω (rotação da rede) e ε_{yx} (distorção angular). Analogamente, o ângulo α entre os eixos secundários dos respectivos sistemas corresponde à resultante de ω e ε_{xy} . No sistema deformado, as distorções lineares ao longo de cada eixo (X', Y') são representadas, respectivamente, por ε_{xx} e ε_{yy} . Assim, um

fator de escala $(1+\varepsilon_{xx})$ é aplicado a todas as linhas paralelas ao eixo X. Analogamente, para o eixo Y.

Figura 6.1 – Interpretação geométrica dos parâmetros de deformação homogênea. Fonte: Adaptado de Caspary (2000).

Ainda, segundo Caspary (2000), um exemplo de modelo linear de deformação para estimar os parâmetros de deformação homogênea para um ponto específico (x_i, y_i) , posteriormente à separação de deslocamento da rede como uma estrutura rígida, é dado por:

$$\begin{pmatrix} \Delta x_i \\ \Delta y_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 \\ b_1 & b_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix}. \quad (6.8)$$

Quando o deslocamento da rede como uma estrutura rígida for calculado simultaneamente com os parâmetros de deformação, há necessidade de acrescentar dois termos de translação (t_x, t_y) . Portanto, seis parâmetros seriam estimados e um mínimo de três pontos é necessário para esta determinação. A expressão final, neste caso, é fornecida por:

$$\begin{pmatrix} \Delta x_i \\ \Delta y_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & \omega_{xy} \\ \omega_{yx} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix}. \quad (6.9)$$

O impacto de um movimento na rede analisada é quantificado pelo comprimento da componente horizontal do vetor deformação. Segundo Winefield, Crook e Beavan (2010), na acurácia relativa, este impacto é analisado derivando o vetor deformação com relação à

posição. Para um ponto específico e desconsiderando os deslocamentos e as rotações diferenciais da estrutura como um corpo rígido, o efeito do vetor deformação (d_{x_i}, d_{y_i}) pode ser dado por:

$$\begin{pmatrix} d_{x_i} \\ d_{y_i} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}. \quad (6.10)$$

Quando se trata da acurácia relativa (local), entende-se que o erro se relaciona com a distância entre os pontos considerados, variando com o azimuth deste alinhamento, segundo Winefield, Crook e Beavan (2010), e expresso da seguinte forma:

$$d = \sqrt{\left(\frac{A'+B'}{2}\right)^2 + \left(\frac{A'-B'}{2}\right)^2 + C'^2}, \quad (6.11)$$

sendo

$$A' = \varepsilon_{xx} \cdot \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yx} \cdot \varepsilon_{yx} = (a_1)^2 + (b_1)^2, \quad (6.12)$$

$$B' = \varepsilon_{xy} \cdot \varepsilon_{xy} + \varepsilon_{yy} \cdot \varepsilon_{yy} = (a_2)^2 + (b_2)^2, \quad (6.13)$$

$$C' = \varepsilon_{xx} \cdot \varepsilon_{xy} + \varepsilon_{yx} \cdot \varepsilon_{yy} = a_1 a_2 + b_1 b_2. \quad (6.14)$$

Uma rede de referência cadastral deve ter uma acurácia local da ordem de 50 ppm (WINEFIELD; CROOK; BEAVAN, 2010).

Para um modelo de deformação de uma área específica (“*patch*”), Winefield, Crook e Beavan (2010) estabelecem uma acurácia absoluta (rede) é da ordem de 5 cm e uma acurácia relativa de 0,1 ppm. Um questionamento apresentado por Winefield, Crook e Beavan (2010) diz respeito ao quanto de deformação uma coordenada pode tolerar sem comprometer sua acurácia. Para melhor compreender esta questão, os autores exemplificam o caso de um modelo de deformação regional na Nova Zelândia, onde a acurácia absoluta é especificada por 10 cm com 95% de confiabilidade. Se a deformação é levantada com uma acurácia de 8 cm (95% de confiança), então o ponto desviou-se de 0,37 vezes a tolerância (3,7 cm) e ainda estará com uma confiabilidade de 95% de que o ponto estará dentro de 10 cm da coordenada não ajustada.

Winefield, Crook e Beavan (2010) apresentam um procedimento metodológico para determinar a resolução do modelo “*patch*” de deformação, o qual é ilustrado na Figura 6.2 por uma grade de área igual a d^2 . Assim, a área do ponto considerado $(p_{1,1})$ representa uma área da grade de $d^2/4$.

Figura 6.2 – Grade de deformação. Fonte: Adaptado de Winefield, Crook e Beavan (2010).

A resolução necessária para representar a deformação de um ponto ($p_{1,1}$) numa grade preliminar, considerando seus pontos vizinhos ($p_{0,0}$, $p_{0,2}$, $p_{2,0}$, $p_{2,2}$), depende da discrepância (δ) entre a deformação atual e a interpolada. Se este valor for superior à acurácia que se deseja obter (“ t ”), deve-se reduzir o tamanho da grade (d_{acc}), visando a acurácia pretendida:

$$d_{acc} = \sqrt{\frac{t}{\delta}} \cdot d, \quad (6.15)$$

sendo a acurácia que se deseja é a mesma utilizada na determinação da extensão do “*patch*”, isto é, 2 cm e 0,04 ppm (WINEFIELD; CROOK; BEAVAN, 2010). Pode-se estimar o número de pontos que um “*patch*” triangulado requer para se obter esta acurácia. Nesta área, a triangulação terá um espaçamento de d_{acc} , onde cada ponto do triângulo abrange uma área de $0,75 d_{acc}^2$. Dividindo-se a área do ponto considerado ($d^2/4$) pela área abrangida por um ponto da triangulação ($0,75 d_{acc}^2$), obtém-se o número aproximado de pontos de triangulação $d^2/(3 \cdot d_{acc}^2)$.

6.5.2 Modelo temporal

Dentre os vários tipos de modelos temporais, adota-se, nesta pesquisa, o modelo de velocidade constante (subseção 5.2.b.1) para as deformações seculares e não seculares.

6.5.2.1 Modelo para deformações seculares

As deformações reais de natureza tectônica são classificadas como seculares, segundo Stanaway e Roberts (2012), quando o movimento da placa rígida e a deformação intersísmica em áreas de deformação são considerados. Para períodos superiores a 100 anos, a deformação geofísica é considerada linear e previsível, pois está associada com o movimento rígido da placa litosférica. A velocidade de estações localizadas no interior desta placa é linear, enquanto nos limites da placa, em decorrência do acúmulo de distorções lineares e atividades sísmicas dos movimentos relativos entre as placas, não há uma linearidade na série temporal destas estações. As deformações seculares são espacialmente distribuídas e podem ser modeladas com base num referencial local. Alguns exemplos fornecidos por Stanaway e Roberts (2012) de causas seculares são movimento da placa rígida (<100 mm/ano), diapirismo (<20 mm/ano) e deformação intersísmica (<10 mm/ano).

Em regiões localizadas no interior das placas rígidas, um modelo de deformação com 14 parâmetros pode ser utilizado para realizar a transformação entre o ITRF e o referencial local. As velocidades das estações localizadas na placa rígida podem ser estimadas com base nas velocidades $(\dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z})$ e nos parâmetros de rotação $(\Omega_X, \Omega_Y, \Omega_Z)$ da placa rígida, pela seguinte equação, de acordo com Stanaway e Roberts (2012):

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Omega_Y Z - \Omega_Z Y \\ \Omega_Z X - \Omega_X Z \\ \Omega_X Y - \Omega_Y X \end{bmatrix} \cdot 10^{-6}. \quad (6.16)$$

Stanaway e Roberts (2012) enfatizam que esta estratégia não deve ser utilizada quando há grandes diferenças entre as épocas de referência e de medição, ou, para componentes não rígidas da placa. O modelo secular é utilizado para propagar as coordenadas cinemáticas (p.ex.: ITRF) para uma época específica de um referencial local, de maneira que as coordenadas locais parecem estar estáticas, embora estejam sujeitas à deformação em escala regional.

6.5.2.2 Modelo para deformações não seculares

As deformações reais de natureza tectônica são classificadas como não seculares, segundo Stanaway e Roberts (2012), quando se consideram os efeitos de deformações imprevisíveis, não lineares (p.ex.: atividades vulcânicas) e episódicas (p.ex.: atividades sísmicas). O comportamento espacial destes efeitos varia com o tempo, causando mudanças no referencial local, caso a deformação ultrapasse a tolerância estabelecida para as atividades de posicionamento em áreas sujeitas a tais deformações. O processo de atualização de coordenadas garante que a conformidade seja mantida nas áreas onde a deformação é significativa. Alguns exemplos de causas relacionadas com deformações não seculares são deformação cosísmica (<10.000 mm/ano), deformação pós-sísmica (<1.000 mm/ano) e exploração de aquíferos (<250 mm/ano). Para Stanaway e Roberts (2012), eventos localizados como deslizamentos e subsidência são significativos em áreas sedimentares e urbanas. Uma ilustração (Figura 6.3) da estrutura de dados de um modelo de “*patch*” de grade sísmica para acomodar uma deformação localizada numa área urbana de 4.000 km^2 é fornecida por Stanaway e Roberts (2012):

Figura 6.3 – Estrutura de dados de um modelo de “*patch*”. Fonte: Adaptado de Stanaway e Roberts (2012).

Um modelo não secular ou “*patch*” sísmico corresponde à soma de todas as correções episódicas entre as épocas de referência e de medição. Este modelo é representado por uma grade (“*grid*”) de distorção, indicando a deformação da rede geodésica original desde a época

de referência, considerando todas as deformações intersísmicas, conforme ilustrado na Figura 6.4.

Figura 6.4 – Deformações intersísmicas. Fonte: Adaptado de Stanaway e Roberts (2012).

O posicionamento com GNSS é realizado com base no referencial do ITRF e uma análise da série temporal de estações com operações contínuas neste sistema pode identificar deformações não lineares, p.ex., deformações cosísmica, intersísmica e “slow slip” (deformações não lineares em profundidade). Estas deformações são adicionadas com as deformações sísmicas, as quais são atualizadas após cada evento sísmico. Um evento significativo é aquele que resulta em deformação não secular que excede as tolerâncias de posicionamento para o referencial considerado. Para a época de referência, segundo Stanaway e Roberts (2012), tem-se:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{t_0} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_t + \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} \cdot (t_0 - t) - \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix}_{PATCH}, \quad (6.17)$$

sendo t_0 a época de referência (em fração de anos), t a época de medição (em fração de anos) e $(X, Y, Z)_{t_0}$ as coordenadas calculadas na época de referência, $(X, Y, Z)_t$ são as

coordenadas cinemáticas em ITRF na época de medição, $(\dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z})$ são as velocidades ITRF interpoladas do modelo intersísmico (m/ano), $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)_{PATCH}$ é a deformação (m) sísmica acumulada entre as épocas de referência e de medição, interpolada do modelo sísmico “*patch*”.

Após um evento, p.ex., um terremoto, a atualização é obtida por:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{t_{PATCH}} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_t + \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} \cdot (t_0 - t), \quad (6.18)$$

sendo $(X, Y, Z)_{t_{PATCH}}$ as coordenadas calculadas após o “*patch*” ser aplicado (m).

A integridade do modelo de deformação é avaliada para cada estação da rede analisada, ao comparar as coordenadas na época de referência obtidas pela equação (6.17) com as coordenadas da estação para a época de referência. Quando a diferença entre estes valores exceder uma tolerância (p.ex., 15 mm), dispara-se um alerta. Isto significa que um evento está prestes a acontecer. Caso não ocorra, há necessidade de rever o modelo de velocidade intersísmica, procurando atualizá-lo com base na análise de série temporal das estações em operações contínuas. Stanaway e Roberts (2012) concluem que a repetição de observações em toda rede geodésica, mesmo as estações passivas, podem ser utilizadas para verificar e melhorar a precisão do atual modelo de deformação.

6.6 Modelo de deformação espacial: desempenho por meio de simulações

Com o intuito de aplicar o modelo de deformação estabelecido na equação (6.1) para estimar os parâmetros de deformação (equação 6.2) de um ponto analisado ($P_{1,1}$) com seus pontos vizinhos ($P_{0,0}$, $P_{0,2}$, $P_{2,0}$, $P_{2,2}$), conforme ilustrado na Figura 6.2, apresenta-se, a seguir, simulações para esta finalidade. Cabe a observação de que a grandeza esperada para a deformação estimada é de acordo com Teixeira (2005) o microstrain ($\mu\text{m} = 10^{-6}$ m), atribuído às discrepâncias e que os parâmetros de deformação são adimensionais.

6.6.1 Primeira simulação: grade regular de deformação

Considerar os valores para as coordenadas (X, Y) dos pontos envolvidos (analisado e vizinhos), em duas épocas (t_1 , t_2), conforme as Tabelas 6.1 e 6.2. O sistema de coordenadas adotado é o STL, cujas coordenadas têm como unidade linear o metro. Os desvios-padrão de todas as coordenadas equivalem a 2,5 cm (metade do valor da acurácia absoluta para os limites da parcela, isto é, 5 cm, conforme Tabela 4.1). Para o deslocamento do ponto analisado, utiliza-se, também, como valor de referência a metade da acurácia absoluta, ou seja, 2,5 cm. Os pontos vizinhos não sofrem deslocamentos entre as épocas consideradas. A grade de deformação tem um espaçamento regular de um quilômetro.

6.6.1.1 Ponto de análise no centro da grade regular de deformação

As Tabelas 6.1 e 6.2 contêm as coordenadas dos pontos analisado e vizinhos, respectivamente, para esta simulação, representado na Figura 6.5.

Tabela 6.1 – Coordenadas (m) do ponto analisado ($P_{1,1}$)

$X_{1,1}(t_1)$	150.500,000
$Y_{1,1}(t_1)$	250.500,000
$X_{1,1}(t_2)$	150.500,025
$Y_{1,1}(t_2)$	250.500,025

Tabela 6.2 – Coordenadas (m) dos pontos vizinhos

$X_{0,0}(t_1)$	150.000,000	$X_{0,2}(t_1)$	151.000,000
$Y_{0,0}(t_1)$	251.000,000	$Y_{0,2}(t_1)$	251.000,000
$X_{0,0}(t_2)$	150.000,000	$X_{0,2}(t_2)$	151.000,000
$Y_{0,0}(t_2)$	251.000,000	$Y_{0,2}(t_2)$	251.000,000
$X_{2,0}(t_1)$	150.000,000	$X_{2,2}(t_1)$	151.000,000
$Y_{2,0}(t_1)$	250.000,000	$Y_{2,2}(t_1)$	250.000,000
$X_{2,0}(t_2)$	150.000,000	$X_{2,2}(t_2)$	151.000,000
$Y_{2,0}(t_2)$	250.000,000	$Y_{2,2}(t_2)$	250.000,000

Figura 6.5 – Grade regular de deformação com ponto analisado no centro.

A matriz das derivadas (A) dos deslocamentos com relação aos parâmetros de deformação apresentou os resultados mostrados na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 – Matriz A			
-500	-500	0	0
0	0	-500	-500
-500	500	0	0
0	0	-500	500
500	500	0	0
0	0	500	500
500	-500	0	0
0	0	500	-500

Pela configuração dessa grade de deformação, com o ponto a ser analisado no centro da mesma, os parâmetros de deformação resultantes da solução da equação (6.2) são nulos.

6.6.1.2 Ponto de análise próximo ao centro da grade regular de deformação

Nesta simulação, o ponto de análise ($P_{1,1}$) encontra-se a um metro do centro da grade de deformação, sendo suas coordenadas assumidas conforme os valores da Tabela 6.4. A representação gráfica é vista na Figura 6.6.

Figura 6.6 – Grade regular de deformação com ponto analisado próximo ao centro.

Tabela 6.4 – Coordenadas (m) do ponto analisado ($P_{1,1}$)

$X_{1,1}(t_1)$	150.499,000
$Y_{1,1}(t_1)$	250.499,000
$X_{1,1}(t_2)$	150.499,025
$Y_{1,1}(t_2)$	250.500,025

As coordenadas dos pontos vizinhos não foram alteradas, portanto, são as mesmas da Tabela 6.2. Isto também se repete nas próximas simulações. A matriz das derivadas (A) apresentou os resultados mostrados na Tabela 6.5.

Tabela 6.5 – Matriz A

-499	-499	0	0
0	0	-499	-499
-499	501	0	0
0	0	-499	501
501	501	0	0
0	0	501	501
501	-499	0	0
0	0	501	-499

O vetor dos parâmetros de deformação é obtido com base na equação (6.2), cujos valores são ilustrados na Tabela 6.6.

Tabela 6.6 – Parâmetros de deformação

a1	$-1 \cdot 10^{-7}$
a2	$-1 \cdot 10^{-7}$
b1	$-1 \cdot 10^{-7}$
b2	$-1 \cdot 10^{-7}$

O efeito de deformação para um ponto específico, p.ex., para o $P_{2,0}$, com coordenadas $X_{2,0}$ (150.000 m) e $Y_{2,0}$ (250.000 m) é quantificado pela equação (6.10). Neste caso, resulta nos seguintes valores: $X_{2,0} = 149.999,960$ m e $Y_{2,0} = 249.999,960$ m (Figura 6.6). Assim, é importante esclarecer que, os parâmetros de deformação foram analisados para o ponto $P_{1,1}$ e o efeito destes parâmetros para o ponto $P_{2,0}$, e além de proceder-se da mesma maneira nas simulações seguintes, as representações gráficas das Figuras 6.6 à 6.9, também seguem este modelo.

6.6.1.3 Ponto de análise externo à grade regular de deformação

Nesta simulação, o ponto de análise ($P_{1,1}$) encontra-se externamente à grade de deformação, como pode ser visto na Figura 6.7, sendo suas coordenadas assumidas conforme os valores da Tabela 6.7.

Figura 6.7 – Grade regular de deformação com ponto analisado externamente.

Tabela 6.7 – Coordenadas (m) do ponto analisado ($P_{1,1}$)

$X_{1,1}(t_1)$	149.000,000
$Y_{1,1}(t_1)$	250.400,000
$X_{1,1}(t_2)$	149.000,025
$Y_{1,1}(t_2)$	250.400,025

A matriz das derivadas (A) apresentou os resultados mostrados na Tabela 6.8.

Tabela 6.8 – Matriz A

1.000	-400	0	0
0	0	1.000	-400
1.000	600	0	0
0	0	1.000	600
2.000	600	0	0
0	0	2.000	600
2.000	-400	0	0
0	0	2.000	-400

O vetor dos parâmetros de deformação é obtido com base na equação (6.2), cujos valores são ilustrados na Tabela 6.9.

Tabela 6.9 – Parâmetros de deformação

a1	$-1,49 \cdot 10^{-5}$
a2	$-9,96 \cdot 10^{-7}$
b1	$-1,49 \cdot 10^{-7}$
b2	$-9,96 \cdot 10^{-7}$

De maneira análoga à simulação anterior, o efeito de deformação para um ponto $P_{2,0}$ resulta nos seguintes valores: $X_{2,0} = 149997,510$ m e $Y_{2,0} = 249997,510$ m (Figura 6.7).

Uma conclusão parcial indica que, se comparado aos valores obtidos nas outras simulações, entende-se que a localização do ponto de análise com relação aos vizinhos interfere diretamente nos resultados dos parâmetros de deformação.

6.6.2 Segunda simulação: grade irregular de deformação

Duas situações são investigadas: ponto de análise interno e externo à grade irregular de deformação.

As considerações realizadas na primeira simulação (grade de deformação regular) sobre o sistema de coordenadas adotado, unidade linear, e desvios-padrão são também encontradas na segunda simulação.

O deslocamento do ponto analisado ($P_{1,1}$) também corresponde à metade da acurácia absoluta (2,5 cm) e os pontos vizinhos não sofrem deslocamentos entre as épocas consideradas. Contudo, a grade de deformação tem um espaçamento irregular.

6.6.2.1 Ponto de análise interno à grade irregular de deformação

As Tabelas 6.10 e 6.11 contêm as coordenadas dos pontos analisado ($P_{1,1}$) e vizinhos, respectivamente, para esta simulação. A Figura 6.8 retrata esta situação.

Figura 6.8 – Grade irregular de deformação com ponto analisado internamente.

Tabela 6.10 – Coordenadas (m) do ponto analisado ($P_{1,1}$)

$X_{1,1}(t_1)$	150.500,000
$Y_{1,1}(t_1)$	250.500,000
$X_{1,1}(t_2)$	150.500,025
$Y_{1,1}(t_2)$	250.500,025

Tabela 6.11 – Coordenadas (m) dos pontos vizinhos

$X_{0,0}(t_1)$	149.000,000	$X_{0,2}(t_1)$	150.000,000
$Y_{0,0}(t_1)$	250.400,000	$Y_{0,2}(t_1)$	251.600,000
$X_{0,0}(t_2)$	149.000,000	$X_{0,2}(t_2)$	150.500,000
$Y_{0,0}(t_2)$	250.400,000	$Y_{0,2}(t_2)$	251.600,000
$X_{2,0}(t_1)$	150.000,000	$X_{2,2}(t_1)$	151.200,000
$Y_{2,0}(t_1)$	250.000,000	$Y_{2,2}(t_1)$	250.555,000
$X_{2,0}(t_2)$	150.000,000	$X_{2,2}(t_2)$	151.200,000
$Y_{2,0}(t_2)$	250.000,000	$Y_{2,2}(t_2)$	250.555,000

A matriz das derivadas (A) apresentou os resultados mostrados na Tabela 6.12.

Tabela 6.12 – Matriz A

-500	-500	0	0
0	0	-500	-500
-1.500	-100	0	0
0	0	-1.500	-100
0	1.100	0	0
0	0	0	1.100
700	55	0	0
0	0	700	55

O vetor dos parâmetros de deformação é obtido com base na equação (6.2), cujos valores são ilustrados na Tabela 6.13.

Tabela 6.13 – Parâmetros de deformação

a1	$1,28 \cdot 10^{-5}$
a2	$-1,28 \cdot 10^{-5}$
b1	$1,28 \cdot 10^{-5}$
b2	$-1,28 \cdot 10^{-5}$

De maneira análoga à simulação anterior, o efeito de deformação para um ponto $P_{2,0}$ resulta nos seguintes valores: $X_{2,0} = 149998,613$ m e $Y_{2,0} = 249998,613$ m.

Novamente, observa-se que os valores obtidos estão intimamente relacionados com a distribuição dos pontos na rede.

6.6.2.2 Ponto de análise externo à grade irregular de deformação

Esta consideração é mostrada na Figura 6.9. A Tabela 6.14 contém as coordenadas dos pontos analisado ($P_{1,1}$), para esta simulação.

Figura 6.9 – Grade irregular de deformação com ponto analisado externamente.

Tabela 6.14 – Coordenadas (m) do ponto analisado ($P_{1,1}$)

$X_{1,1}(t_1)$	149.000,000
$Y_{1,1}(t_1)$	250.400,000
$X_{1,1}(t_2)$	149.000,025
$Y_{1,1}(t_2)$	250.400,025

As coordenadas dos pontos vizinhos, nesta simulação, correspondem aos mesmos valores contidos na Tabela 6.11.

A matriz das derivadas (A) apresentou os resultados mostrados na Tabela 6.15.

Tabela 6.15 – Matriz A

1.000	-400	0	0
0	0	1.000	-400
0	0	0	0
0	0	0	0
1.500	1.200	0	0
0	0	1.500	1.200
2.200	155	0	0
0	0	2.200	155

O vetor dos parâmetros de deformação é obtido com base na equação (6.2), cujos valores são ilustrados na Tabela 6.16.

Tabela 6.16 – Parâmetros de deformação

a1	$-1,48 \cdot 10^{-5}$
a2	$1,13 \cdot 10^{-6}$
b1	$-1,48 \cdot 10^{-5}$
b2	$1,13 \cdot 10^{-6}$

De maneira análoga à simulação anterior, o efeito de deformação para um ponto $P_{2,0}$ resulta nos seguintes valores: $X_{2,0} = 149998,067$ m e $Y_{2,0} = 249998,067$ m.

Nota-se, nesta simulação, a confirmação da influência da configuração da rede, implicando na determinação de parâmetros com valores notadamente maiores dos que os observados em grade regular de deformação. Ressalta-se aqui a importância desses procedimentos, pois por intermédio de simulações foi possível obter valores dos parâmetros de deformação para diferentes configurações de rede, que permitirão a padronização de valores para posteriores aplicações em situações reais.

6.7 Considerações finais

Este capítulo foi essencial ao desenvolvimento desta pesquisa, visto que as deformações pressupostamente existentes e que causam as mudanças das coordenadas dos limites das parcelas, devem seguir modelos. Tais modelos podem ser espaciais e temporais e as deformações ocorridas em uma RRCM são resultantes da associação destes modelos. Enfoque especial é dado ao modelo que melhor se adapta as exigências do estudo de deformações da RRCM, e as simulações desempenhadas com a finalidade de analisar a funcionalidade do modelo e suas restrições. Uma aplicação com dados reais (RRCM de Taciba/SP) é apresentada no capítulo 7.

7 MODELO DE CADASTRO DINÂMICO

7.1 Introdução

Neste capítulo, é relatado o experimento realizado com vistas à validação do modelo proposto nos capítulos predecessores. Assim, visto o embasamento teórico sobre cadastro, dos métodos de determinação dos limites das parcelas, da apreciação da acurácia destes limites, dos cadastros que consideram o dinamismo da superfície terrestre e dos modelos de deformação empregados neste caso, investigou-se uma área de estudo para a aplicação prática dos procedimentos propostos. Obteve-se acesso aos dados da RRCM do município de Taciba/SP, implantado por Santos et al. (2008) e disponibilizados pelo Departamento de Cartografia da Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT) da UNESP, Campus de Presidente Prudente.

Optou-se pela adoção de uma área cuja obtenção das coordenadas dos limites das parcelas seguisse os preceitos das Normas da NBR 13133/94 e NBR 14166/98 para levantamentos topográficos e cadastrais. Assim, buscou-se a possibilidade de adequação de redes de referência cadastrais já implantadas ao novo modelo proposto nesta tese, não descartando os trabalhos já existentes, o que acarretaria custos e tempo adicionais ao projeto de cadastro do município. Prosseguindo, é feita uma descrição da área (subseção 7.2) e em seguida, dos métodos, equipamentos e resultados da determinação das coordenadas dos limites das parcelas (subseção 7.3). Todas estas informações baseiam-se na documentação disponibilizada para esta pesquisa.

Parte-se, então, para o experimento propriamente dito, obedecendo a sequência:

- 1) avaliações das acurácias absoluta e relativa do levantamento, usando os aplicativos científicos GAMIT e GLOBK;
- 2) Submissão do conjunto de dados a um modelo de deformação MGMD, apresentado e selecionado no capítulo 6 para a área de estudo, com posterior associação dos modelos espacial e temporal;
- 3) Estabelecimento de procedimentos para restabelecimento das coordenadas, considerando a deformação da superfície terrestre.

A descrição destas etapas está inclusa nas subseções restantes deste capítulo. Assim, na subseção 7.4 são apresentadas, inicialmente, considerações sobre: o padrão de acurácia

almejado para a RRCM; os métodos e equipamentos empregados na materialização da RRCM executada por Santos et al. (2008); as tarefas para a materialização da rede previstas nesta pesquisa; as especificações do processamento de dados GNSS (escolha do aplicativo científico, emprego de injunções, estações de referência). Esta subseção também traz os sete experimentos idealizados para a determinação da acurácia absoluta das coordenadas do ponto M07 (marco geodésico de precisão), seguindo as especificações do processamento, bem como os resultados e conclusões parciais vindos destes experimentos. Como etapa final desta subseção são determinadas as acurácias das coordenadas dos marcos de apoio imediato (M01,M03,M04,M05 e M06) com base na acurácia das coordenadas do M07. Na subseção 7.5 são apresentados: o modelo de deformação espacial selecionado para esta pesquisa e o tipo de deformação assumida (homogênea); os experimentos desempenhados para a análise da deformação do M07, resultados e conclusões;o modelo de deformação temporal utilizado, sua aplicação prática ao ponto M05 da RRCM e em todos os pontos da rede; a solução combinada (espacial e temporal), os resultados e conclusões. O capítulo é encerrado com a subseção 7.6, que mostra: a solução para restabelecer as coordenadas dos pontos que foram atingidos por deformações, por meio de ações validadas em um exemplo prático e organizadas em um fluxograma.

7.2 Área do experimento

Localizado no oeste do estado de São Paulo, como visto na Figura 7.1, e tendo como confrontantes os municípios de Regente Feijó, Martinópolis, Iepê, Anhumas e Narandiba, o município de Taciba integra a 10ª Região Administrativa do Estado de São Paulo.

Figura 7.1 – Localização do município de Taciba – SP. Fonte: <http://www.camarataciba.sp.gov.br/>

O Cadastro Territorial Multifinalitário de Taciba foi elaborado por Santos et.al (2008) e constituído das seguintes etapas:

- Reconhecimento;
- Estruturação e Implantação da Rede de Referência Cadastral;
- Levantamento topográfico e cadastral;
- Geração da planta cadastral e altimétrica da área urbana;
- Informatização cadastral; Utilização de um SIG, neste caso, o ArcGIS.

Por tratar-se de etapas de interesse deste estudo, a seguir serão descritas somente a estruturação e implantação da Rede de Referência Cadastral Municipal (RRCM) e em seguida os procedimentos do levantamento topográfico. Os dados da RRCM implantada foram disponibilizados para a execução desta pesquisa.

7.3 Determinação dos limites das parcelas: métodos, equipamentos e resultados

Inicialmente, conforme a NBR 14166/98, a RRCM deve estar referenciada a um marco geodésico de precisão do SBG em uma área de 3 km² e como a área a ser mapeada era de 2 km², atendeu-se a recomendação da respectiva norma. Numa fase posterior, foi elaborado o adensamento da rede, incluindo seis pontos de apoio imediato, distribuídos na área.

Tendo como referência as estações Presidente Prudente (PPTE), Rosana (ROSA) e Ourinhos (OURI) da Rede GNSS Ativa do Estado de São Paulo (Figura 7.2), foi realizado o transporte de coordenadas para o marco geodésico de precisão (M07), com equipamento Topcon Hiper GGD de dupla frequência (precisão horizontal: 3 mm + 0,5 ppm; precisão vertical: 5 mm + 0,5 ppm). As distâncias entre as linhas de base das estações são superiores a 20 km.

Figura 7.2 – Linhas de base do marco geodésico de precisão. Fonte: Santos et al. (2008).

De acordo com Santos et al. (2008), as coordenadas do marco M07 resultam do processamento dos dados coletados com um período de quatro horas e taxa de quinze segundos, com o programa Trimble Geomatics Office (TGO), no sistema SIRGAS2000, e do ajustamento de rede GPS com o programa AJURGPS (MONICO e SILVA, 2006) (disponível em http://www.fct.unesp.br/Home/Pesquisa/GEGE/SoftwareSetup_AJURGPS_1_1.zip), no qual é possível realizar a transformação de coordenadas cartesianas (X, Y, Z) para geodésicas (φ , λ , h) e no sistema de projeção UTM (E, N), utilizando-se do Sistema Geodésico de Referência de 1980 (GRS80), e com propagação de covariâncias. Assim, para o marco M07, as coordenadas e seus desvios padrão estão nas Tabelas 7.1, 7.2 e 7.3.

Tabela 7.1 – Coordenadas cartesianas do M07 – SIRGAS2000

	Coordenadas cartesianas	Desvios padrão
X	3.691.009,095 m	$1,4785 \times 10^{-02}$ m
Y	-4.604.140,792 m	$1,7914 \times 10^{-02}$ m
Z	-2.413.591,132 m	$1,0233 \times 10^{-02}$ m

Fonte: Santos et al. (2008)

Tabela 7.2 – Coordenadas geodésicas do M07 – SIRGAS2000

	Coordenadas geodésicas	Desvios padrão
φ	-22,380448392°	$2,2734 \times 10^{-03}$ m
λ	-51,281838215°	$1,2445 \times 10^{-03}$ m
h	447,511 m	$1,5042 \times 10^{-02}$ m

Fonte: Santos et al. (2008)

Tabela 7.3 – Coordenadas UTM do marco M07 – SIRGAS2000

	Coordenadas UTM (MC -51°, Fuso 22S)	Desvios padrão
E	470.986,573 m	$3,4351 \times 10^{-03}$ m
N	7.525.034,588 m	$3,2626 \times 10^{-03}$ m

Fonte: Santos et al. (2008)

Quanto aos marcos geodésicos de apoio imediato (M01, M02, M03, M04, M05 e M06), realizou-se o rastreo com taxa de coleta de 15 segundos e tempo de ocupação por ponto de 30 minutos, adotando o método de posicionamento relativo estático, simultaneamente com o M07, tomado como estação de referência. No processamento, como as linhas de base tinham distâncias inferiores a 20 km, utilizou-se somente receptor com uma frequência (L1), realizando-se o processamento dos dados coletados com o programa TGO e obtendo-se a solução fixa para as ambigüidades.

Os resultados das coordenadas dos marcos geodésicos de apoio imediato no SIRGAS2000 estão na Tabela 7.4, segundo Santos et al. (2008), porém, sem seus desvios padrão.

Tabela 7.4 – Coordenadas geodésicas do M01 ao M06 – SIRGAS2000

Ponto	φ	λ	h
M01	22° 23' 07,738" S	51° 17' 09,535" W	400,432 m
M02	22° 23' 20,914" S	51° 17' 40,680" W	404,122 m
M03	22° 23' 34,825" S	51° 16' 58,932" W	382,471 m
M04	22° 23' 17,045" S	51° 17' 19,759" W	378,805 m
M05	22° 23' 18,300" S	51° 17' 22,002" W	378,617 m
M06	22° 23' 40,717" S	51° 17' 42,195" W	437,514 m

Fonte: Santos et al. (2008)

A disposição dos marcos geodésicos de apoio de precisão e de apoio imediato na área é representada na Figura 7.3. Nota-se, aqui, que a rede tem a configuração irregular e com o ponto de análise, onde se verifica a acurácia de suas coordenadas, sendo o vértice da mesma, correspondendo à configuração da rede encontrada na sub-subseção 6.6.2.2. Outro exemplo de RRCM com grade irregular é encontrado na Figura 3.6.

Figura 7.3 – Disposição dos marcos geodésicos da RRCM e configuração da rede processada. Fonte: Santos et al. (2008).

No que diz respeito ao levantamento topográfico, procedeu-se através de levantamentos de poligonais planialtimétricas, partindo-se de dois pontos de coordenadas conhecidas e chegando-se nos mesmos (poligonal topograficamente e geometricamente fechada), ou, em outros pontos de coordenadas conhecidas (poligonal enquadrada), referenciados ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), com o intuito de controlar a precisão

do levantamento. Seguindo a recomendação da NBR 13133/94, realizou-se uma série de leituras conjugadas.

Para o cálculo das poligonais, foram adotadas as tolerâncias, para os erros, indicadas na Tabela 7.5, adotando respectivas NBRs. Mais detalhes sobre estes elementos podem ser encontrados nas seções/subseções também indicadas na tabela.

Tabela 7.5 – Tolerâncias para o cálculo das poligonais topográficas

Erro	Tolerância	NBR adotada	Seção/subseção
Angular	$1' \times N^{1/2}$	13133/94	6.5.7
Planimétrico	1:5.000	14166/98	5.1

Fontes: NBR 13133/94, NBR 14166/98.

Santos et al. (2008) apresentam uma ilustração (Figura 7.4) dos limites das parcelas cadastrais levantadas com o método de irradiação, com base nos vértices de oito poligonais.

Figura 7.4 – Limites das parcelas cadastrais. Fonte: Santos et al. (2008).

7.4 Acurácia da RRCM de Taciba/SP – Considerações preliminares

Um dos objetivos específicos desta tese trata da determinação da acurácia absoluta das coordenadas dos vértices que compõe a RRCM, visando o estabelecimento de parâmetros para esta grandeza, a ser empregada posteriormente nos procedimentos para o restabelecimento das coordenadas que tenham sofrido deformações.

Nesta subseção, são abordados os principais conceitos, tecnologia, métodos e padrões que possibilitaram a concretização das ações que conduziram a instituição da acurácia das coordenadas dos vértices da RRCM¹⁸.

7.4.1 Tolerância da acurácia da RRCM

No Brasil, em virtude da inexistência de indicadores para a acurácia absoluta das coordenadas dos vértices utilizados na implantação da RRCM, pelos órgãos competentes, esta pesquisa investigou valores destes indicadores, como os encontrados na subseção 4.4, Tabela 4.1, mostrando que na Austrália, pratica-se a tolerância da acurácia do levantamento cadastral de 5 cm para áreas urbanas. Já, na Nova Zelândia (subseção 4.4, Tabela 4.2), assume-se 15 cm. Nesta pesquisa, adotou-se o valor de 15 cm, baseando-se na experiência da Nova Zelândia, como uma primeira aproximação e com o refinamento dos procedimentos de novas tecnologias em pesquisas futuras, pretende-se alcançar o valor de 5 cm.

7.4.2 Materialização da RRCM

Segundo a NBR 14166/98, a materialização desta rede baseia-se nos marcos geodésicos de precisão e de apoio imediato. O marco de precisão destina-se ao transporte de coordenadas geodésicas do SGB para as proximidades e/ou interior da área do município em questão. O marco de apoio imediato é destinado a densificar o apoio geodésico básico, com base no marco geodésico de precisão. A densidade de apoio imediato, em áreas urbanas, deve ser de um para cada 3 km², enquanto em áreas rurais, de um para cada 16 km² a 50 km², dependendo da “densidade demográfica de interferência e do uso e ocupação do solo” (NBR 14166/98).

A RRCM utilizada como estudo de caso nesta pesquisa, foi implantada por Santos et al. (2008) no município de Taciba (SP). Nesta rede, o marco geodésico de precisão, localiza-

¹⁸ A expressão “acurácia das coordenadas dos vértices da RRCM” é expressa, doravante, por “acurácia da RRCM”.

se na caixa d'água principal da SABESP (identificado como M07) e tem coordenadas estimadas no SIRGAS2000, em função do processamento de dados GNSS coletados com receptor Topcon HIPER GGD, por um período de quatro horas no dia 28/08/2008, com taxa de coleta de 15 segundos, juntamente com os dados GNSS das estações PPTE, ROSA e OURI da Rede Ativa GNSS do Estado de São Paulo. Devido ao fato deste marco geodésico de precisão ser a ligação entre a RRCM e o SGB, com base na acurácia do mesmo, estima-se a acurácia das coordenadas dos marcos de apoio imediato, que compõem a respectiva rede.

Para a tarefa da materialização da RRCM, prevista, nesta pesquisa, utilizou-se os procedimentos adotados por Herring (2012), Herring, King e McClusky (2010) e Dong, Herring e King (1998), ou seja, injunções finita e generalizada. Tais procedimentos foram aplicados até a presente pesquisa em redes geodésicas deformáveis e agora são sugeridos para o Cadastro Dinâmico, com a finalidade de definir padrões de acurácia das coordenadas dos pontos que constituem as redes de referência cadastral municipal.

7.4.3 Estratégia de processamento de dados GNSS da RRCM

A determinação da acurácia absoluta das coordenadas de um ponto em uma rede é alcançada, entre outros meios, p.ex., da abundância de observações, por intermédio de estratégias existentes em aplicativos científicos para processamento de dados GNSS, que possibilitam o tratamento de alguns efeitos sistemáticos (p.ex., carga oceânica, carga atmosférica e centro de fase da antena do receptor) indisponíveis, normalmente, em aplicativos comerciais.

Segundo Herring, King e McClusky (2010), os aplicativos GAMIT e GLOBK permitem o tratamento mencionado e estão disponíveis para fins científicos sem custo. Estas características foram decisivas na escolha destes aplicativos a ser empregado nos experimentos. Portanto, optou-se pelo uso destes aplicativos.

Em função dos dados GNSS disponibilizados, realizou-se o processamento dos mesmos com o GAMIT (subseção 3.3.1) do marco geodésico de precisão. Uma ação preliminar importante foi a edição da altura da antena (1,420 m) no arquivo *station.info*, para evitar o erro relacionado com esta medição. Sete procedimentos foram desempenhados (subseção 7.4.4), incluindo adoção ou não de estações de referência, com injunções finita ou generalizada e incorporação de soluções geradas pelo MIT.

As coordenadas estimadas no SIRGAS2000 estão referenciadas ao ITRF2000 e à época 2.000,4 (<http://www.sirgas.org/index.php?id=53&L=2>, acesso em 18/03/2012), mesma época de referência das coordenadas adotada no novo referencial geodésico brasileiro (IBGE, 2005).

Em relação às estações de referência adotadas, estas seguem as especificações da NBR 14166/98, a qual estabelece que os pontos com coordenadas planialtimétricas que constituem a RRCM devem ser referenciados ao SGB e a uma mesma representação cartográfica. De maneira análoga, a Portaria 511/2009 (BRASIL, 2009) recomenda que o levantamento cadastral para identificação geométrica das parcelas territoriais deve ser referenciado ao SGB.

Uma particularidade em relação às estações de referência é decorrente do movimento da placa litosférica, onde as mesmas estão situadas, devendo-se inserir a velocidade das estações como uma importante variável (subseção 6.5.2.1). Portanto, a acurácia da posição da estação depende diretamente da confiabilidade do modelo de velocidade, segundo consta na página do Sistema SIRGAS no site <http://www.sirgas.org/index.php?id=54&L=2> (acesso em 18/03/2012). Assim, o modelo de velocidade para a América do Sul e para o Caribe (VEMOS2009) (<http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Vemos2009.zip>, acesso em 18/03/2012) pode ser utilizado para atualizar as coordenadas de uma estação da época de referência 2.000,4 para qualquer outra, e vice-versa (IBGE, 2005). Os aspectos concernentes às estações de referência, abordados nos parágrafos anteriores, contribuem para o entendimento da materialização da RRCM.

De acordo com os procedimentos previstos na subseção 4.5, inicialmente, nos processamentos realizados com o programa GAMIT, aplicam-se injeção finita (p.ex.: desvios-padrão de 5 mm para posição e de 1 mm/ano para velocidade), ou, injeção mínima (soluções iniciais com injeção fraca contendo desvios-padrão de 1 m para posição e de 10 cm/ano para velocidade e injeção generalizada para estabilização). Neste último procedimento, há combinações de soluções locais, regionais e/ou globais, para que o sistema de referência seja definido. Segundo Dong, Herring e King (1998), uma injeção deve ser aplicada para evitar a singularidade da matriz das equações normais, impossibilitando a determinação de sua inversa, devendo a mesma ser “fraca” o suficiente para não afetar a estimativa dos parâmetros, e, também, não tão “fraca” que cause erros de arredondamento nos cálculos. Assim, as soluções obtidas da estratégia de adoção de injeções fracas são combinadas com outras soluções, gerando uma única solução. As injeções generalizadas impostas, tanto nas posições quanto nas velocidades, definem um sistema de referência uniforme (DONG; HERRING; KING, 1998).

Embora as efemérides dos satélites GNSS (p. ex., GPS) forneçam uma estrutura (básica) dinâmica para a Geodésia baseada em levantamentos terrestres, de acordo com Herring, King e McClusky (2010), as observáveis (distância entre as antenas do satélite e do receptor) da fase da portadora não fixam uma estação terrestre à constelação orbital com uma incerteza de 1 mm para fins de estudos científicos. Como exemplo desta afirmação, pode-se verificar a acurácia das efemérides precisas do IGS (*International GPS Service*) que é de 2,5 cm, conforme consta no seguinte link <http://igsb.jpl.nasa.gov/components/prods.html> (acessado em 28/10/2012). A materialização de uma RRCM ocorre com a aplicação da injunção de uma ou mais estações que pertencem à rede geodésica terrestre. A materialização é mencionada por Herring, King e McClusky (2010) como estabilização ou filtragem espacial. Esta tarefa é desempenhada no aplicativo *glorg*, que consiste em especificar um conjunto de estações para os quais as coordenadas a priori são conhecidas com uma acurácia que se espera para a estrutura definida e, também, para os parâmetros que se deseja estimar, a fim de minimizar o ajustamento das coordenadas para estas estações. Para Herring, King e McClusky (2010), isto corresponde a uma acurácia de 1 a 2 mm nas componentes horizontal (e, n) e de dois a 5 mm na vertical (u). Se um arquivo *apr* estiver incluso no arquivo de comando do *glorg*, suas coordenadas substituirão aquelas utilizadas no GAMIT ou GLOBK, portanto, não sendo necessário usar as mesmas coordenadas a priori para todos os três programas. Para o *glorg*, as coordenadas que interessam são aquelas relacionadas com as estações de estabilização (estações de referência) que materializam o sistema definido.

Herring (2012) não recomenda o uso de injunção finita (p.ex., desvios padrão das coordenadas de 5 cm), pois, novamente, pode distorcer as posições e as velocidades das estações da rede investigada, se as injunções associadas não estão corretas para as coordenadas a priori e os dados em sua solução. Este procedimento é útil quando se tem uma ou duas estações de referência. Tanto no GAMIT quanto no GLOBK é possível ter este tipo de injunção. No GAMIT, as injunções são impostas no arquivo *sittbl*, conforme Quadro 7.1.

SITE	FIX	--COORD.CONSTR.--			
<< default for regional stations >>					
ALL	NNN	100.	100.	100.	
<< IGS core stations >>					
FORT	FORT_GPS	NNN	0.050	0.050	0.05
BRAZ	BRAZ_GPS	NNN	0.050	0.050	0.05
KOUR	KOUR_GPS	NNN	0.050	0.050	0.05

Quadro 7.1 – Injunção finita (*sittbl*.)

Para definir a estrutura básica, quando o processamento for realizado com o GAMIT, deve-se utilizar valores reais para as injunções das estações de referência (“estabilização”) no arquivo *sittbl.*, associado com as colunas denotadas no cabeçalho por --COORD.CONSTR.--. As injunções, em unidades de metros, correspondem as coordenadas geodésicas locais (n, e, u), ou seja, norte, este e up (HERRING; KING; MCCLUSKY, 2010). Se no planejamento for usado o GLOBK para definição da materialização, pode-se utilizar no arquivo *sittbl.* um valor que seja o suficiente para permitir a resolução de ambigüidades, aproximadamente 5 cm. No caso da estação selecionada não estar disponível no dia do processamento, é possível injuncionar outra estação. Um exemplo desta situação, também utilizado no GAMIT, é aplicar no arquivo de controle do GLOBK uma incerteza a priori nas coordenadas (posições e velocidades) de uma ou mais estações.

No Apêndice, são encontrados exemplos de trechos dos arquivos (sh_gamit.log, H-file e glorg) gerados após o processamento dos dados GNSS utilizando o GAMIT.

Os avanços científicos permitem o tratamento de erros advindos de predições anteriormente impraticáveis. Portanto, numa iniciativa inovadora, propõe-se a determinação da acurácia de uma RRCM já consolidada, com vistas ao estabelecimento de um padrão de acurácia que poderá vir a ser um parâmetro para análise de deformação de uma RRCM, apresentada na subseção 7.4.4.

7.4.4 Acurácia absoluta das coordenadas do marco geodésico de precisão (M07)

Com a intenção de determinar a acurácia absoluta das coordenadas do marco geodésico de precisão (M07), são mostrados, a seguir, os sete experimentos realizados para tal finalidade, com base nos dois tipos de injunções (finita e generalizada), estações de referência e soluções globais.

Estes sete procedimentos visam a determinação da acurácia absoluta, ou seja, da acurácia das coordenadas do marco geodésico de precisão TACI com relação a pontos selecionados da RBMC (OURI, PPTE, ROSA), IGS (BRAZ, CHPI) e soluções globais (*H-files*) do MIT. A relevância destes procedimentos para esta tese, é atribuída ao fato de que para se conceber um Cadastro Dinâmico é necessário um estabelecimento prévio da acurácia absoluta das coordenadas dos vértices da RRCM, a qual, será um parâmetro para a aplicação dos procedimentos de restabelecimento das coordenadas neste modelo de cadastro.

- *1º Procedimento: injunção finita com as estações de referência OURI, PTTE, ROSA*

Este primeiro procedimento implica na adoção de injunção finita das estações de referência selecionadas (OURI, PPTE e ROSA) para a materialização da RRCM, considerando os desvios padrão das coordenadas destas estações provenientes do relatório de informação de estação da Coordenação de Geodésia da Diretoria de Geociências do IBGE. O ponto M07 foi renomeado para TACI e corresponde ao marco geodésico de precisão para o município de Taciba/SP. Para tanto, edita-se o arquivo *globk_comb.cmd* com os parâmetros, conforme Quadro 7.2.

```
apr_file ../tables/itrf00.apr
apr_neu all 1 1 1 .1 .1 .1
apr_neu ouri .003 .004 .002 .000 .000 .000
apr_neu ppte .002 .002 .001 .000 .000 .000
apr_neu rosa .003 .004 .002 .000 .000 .000
```

Quadro 7.2 – Parâmetros para injunção finita *com as estações de referência* OURI, PPTE, ROSA

As soluções provenientes deste procedimento encontram-se no arquivo *globk_tacb_08241.prt* podem ser visualizadas na Tabela 7.6.

Tabela 7.6 – Soluções (SIRGAS2000) com injunção finita *com as estações de referência* OURI, PPTE, ROSA

TACI	Coordenadas cartesianas (m)	Desvio padrão (cm)
X	+3.691.009,072	1,2
Y	-4.604.140,772	1,4
Z	-2.413.591,114	0,9

Como conclusão parcial, visualiza-se na Tabela 7.6 que a acurácia pretendida (15 cm) é alcançada neste procedimento, confirmando-se apropriado às redes pequenas (compatível com a área de estudo). Entretanto, o mesmo pode acarretar a distorção nas posições e nas velocidades das estações pertencentes à rede, ou que o torna inadequado ao modelo proposto.

- *2º Procedimento: injunção generalizada com as estações de referência OURI, PTTE, ROSA*

Trata-se do procedimento mais rigoroso para a realização da estrutura básica e é o que se utiliza de injunções generalizadas, que minimiza os resíduos das coordenadas das estações que definem o “frame” (rede), enquanto estima a translação, a rotação e a escala (HERRING; KING; MCCLUSKY, 2010). Neste procedimento, todas as coordenadas das estações de referência são livres para se ajustar podendo transladar e rotacionar, mas, não distorcer a rede.

Nesta pesquisa, este procedimento com injunção generalizada foi realizado selecionando-se as estações OURI, PPTE e ROSA para realizar a estabilização da estrutura básica, editando-se o arquivo *glorg_comb.cmd* com os parâmetros conforme Quadro 7.3. O comando *stab_site* com as estações *ouri*, *ppte* e *rosa*, define as estações de referência.

```
apr_file ../tables/itr00.apr
stab_site clear
stab_site ouri ppte rosa
stab_site -taci
cnd_hgtv 10 10 3. 3.
```

Quadro 7.3 – Parâmetros para injunção generalizada com as estações de referência OURI, PPTE, ROSA

As soluções provenientes deste procedimento estão no arquivo *globk_tacb_08241.org* estão contidas na Tabela 7.7.

Tabela 7.7– Soluções (SIRGAS2000) com injunção generalizada com as estações de referência OURI, PPTE, ROSA

TACI	Coordenadas cartesianas (m)	Desvio padrão (cm)
X	+3.691.009,072	1,2
Y	-4.604.140,772	1,3
Z	-2.413.591,113	0,9

Neste procedimento, os desvios padrão são próximos aos do primeiro procedimento, com discrepância de 1 mm em Y, apontando para o atendimento da acurácia desejada, sem a desvantagem de distorcer a rede.

- *3º Procedimento: injunção generalizada sem estações de referência*

Considerando o mesmo tipo de injunção do segundo procedimento (injunção generalizada), mas não selecionando estações de referência para realizar a estabilização, com o propósito de investigar se a ausência destas pode afetar a estimação da acurácia da RRCM. Para tanto, edita-se o arquivo *glorg_comb.cmd*, conforme os parâmetros definidos no Quadro 7.4. Observa-se, neste quadro, que o comando (instrução) *stab_site clear* indica a ausência da relação de estações de referência.

```
apr_file ../tables/itrf00.apr
stab_site clear
cnd_hgtv 10 10 3. 3.
```

Quadro 7.4 – Parâmetros para injunção generalizada sem estações de referência

A Tabela 7.8 contém as soluções provenientes deste procedimento, as quais estão no arquivo *globk_tacb_08241.org*.

Tabela 7.8 – Soluções (SIRGAS2000) com injunção generalizada e sem estações de referência

TACI	Coordenadas cartesianas (m)	Desvio padrão (cm)
X	+3.691.009,591	57,7
Y	-4.604.140,352	57,3
Z	-2.413.591,159	48,5

Nota-se que os valores atingidos dos desvios-padrão são maiores, não atendendo a acurácia pretendida de 15 cm, indicando um procedimento ineficaz para o estabelecimento da mesma e confirmando a necessidade da seleção de estações de referência no processamento.

- *4º Procedimento: injunção generalizada sem estações de referência e processando BRAZ (estação IGS)*

Neste caso, o mesmo tipo de injunção do segundo e do terceiro procedimentos foi adotado, e outra consideração realizada com este procedimento de injunção generalizada é a não seleção de estações de referência para a estabilização, e incluindo a estação BRAZ (Brasília) que pertence à rede *International GPS Service* (IGS) no processamento, editando-se o arquivo *glorg_comb.cmd* com os mesmos parâmetros estabelecidos no Quadro 7.4.

As soluções provenientes deste procedimento (Tabela 7.9) estão no arquivo *globk_tacb_08241.org*.

Tabela 7.9 – Soluções (SIRGAS2000) com injeção generalizada, sem estações de referência, e processando BRAZ

TACI	Coordenadas cartesianas (m)	Desvio padrão (cm)
X	+3.691.009,046	22,5
Y	-4.604.140,802	24,3
Z	-2.413.590,886	31,2

Aqui, observa-se a redução nos valores dos desvios-padrão, comparando-se ao terceiro procedimento, sem estação de referência, mas processando com a estação BRAZ, apontando que este tipo de procedimento não atende a exigência para a determinação dos padrões de acurácia estipulado. Isto reforça a necessidade de inserir estações de referência no processamento.

- *5º Procedimento: injeção generalizada com estação de referência BRAZ*

Se a estação BRAZ for selecionada como estação de referência para a realização da RRCM, novamente, para uma injeção generalizada, edita-se o arquivo *glorg_comb.cmd* com os parâmetros relacionados no Quadro 7.5.

```
apr_file ../tables/itrf00.apr
stab_site clear
stab_site braz
cnd_hgtv 10 10 3. 3.
```

Quadro 7.5 – Parâmetros para injeção generalizada com estação de referência BRAZ

Obtêm-se as soluções (Tabela 7.10) no arquivo *globk_tacb_08241.org*.

Tabela 7.10 – Soluções (SIRGAS2000) com injeção generalizada e estação de referência BRAZ

TACI	Coordenadas cartesianas (m)	Desvio padrão (cm)
X	+3.691.009,022	21,5
Y	-4.604.140,773	23,1
Z	-2.413.591,003	6,2

Na Tabela 7.10, são mostrados desvios-padrão maiores do que os encontrados nas Tabelas 7.6 e 7.7 e menores do que os das 7.8 e 7.9, tornando o procedimento ineficaz ao alcance da acurácia pretendida para os valores de X e Y, implicando na exigência da inserção de mais de uma estação de referência no processamento.

- *6º Procedimento: injunção generalizada com as estações de referência BRAZ, CHPI*

Além da estação BRAZ, inseriu-se mais uma, que também pertence à rede IGS, identificada por CHPI e que se localiza em Cachoeira Paulista/SP. Esta inclusão atende a recomendação da NBR 14166/98 (sub-subseção 6.3.2.c da respectiva NBR), ou seja, que haja no mínimo dois pontos geodésicos de primeira ordem do SGB como estações de referência para a realização da RRCM. Assim, editando-se o arquivo *glorg_comb.cmd*, conforme os parâmetros do Quadro 7.6, onde encontram-se os comandos para estabelecer as duas estações (BRAZ, CHPI).

```
apr_file ../tables/itrff00.apr
stab_site clear
stab_site braz chpi
cnd_hgtv 10 10 3. 3.
```

Quadro 7.6 – Parâmetros para injunção generalizada com as estações de referência BRAZ, CHPI

As soluções obtidas no arquivo *globk_tacb_08241.org* estão na Tabela 7.11.

Tabela 7.11 – Soluções (SIRGAS2000) com injunção generalizada com as estações de referência BRAZ, CHPI

TACI	Coordenadas cartesianas (m)	Desvio padrão (cm)
X	+3.691.009,077	1,5
Y	-4.604.140,798	1,5
Z	-2.413.591,020	1,7

Comparando os desvios-padrão obtidos com a adoção de duas estações estáveis no processamento com os do procedimento anterior, pode-se concluir que as duas estações (IGS) de referência proporcionaram uma melhora sensível na estimativa da acurácia almejada, o que caracteriza a eficácia do procedimento.

- 7º Procedimento: *injunção generalizada com H-files do MIT*

Para Herring, King e McClusky (2010), um método simples e robusto para a realização de uma rede geodésica consiste em incorporar à solução do experimento 10 ou mais estações cujas coordenadas tenham pequenas incertezas no arquivo *apr* da versão mais atual ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*). Estes autores recomendam processar juntamente com os dados GNSS da RRCM e das estações de referência (3 ou 4 estações IGS) os arquivos com as soluções globais (*H-files*) gerados, p.ex., pelo MIT.

Com base neste procedimento, considerou-se as estações (IGS) BRAZ e CHPI e as soluções do MIT (H08241_MIT.GLX) para o dia do experimento (28/08/2008), editando-se o arquivo *glorg_comb.cmd* com os parâmetros contidos no Quadro 7.7.

```
apr_file ../tables/itrf00.apr
# List of stations for stabilization (default is 'all')
stab_site clear
source ../tables/stab_site.igs
```

Quadro 7.7 – Parâmetros para injunção generalizada com *H-files* do MIT

O arquivo *globk_tacb_08241.org* contém as soluções (Tabela 7.12) com este procedimento.

Tabela 7.12 – Soluções (SIRGAS2000) com injunção generalizada e *H-files* do MIT

TACI	Coordenadas cartesianas (m)	Desvio padrão (cm)
X	+3.691.009,073	1,3
Y	-4.604.140,796	1,4
Z	-2.413.591,008	0,9

Na Tabela 7.12, foram encontrados valores dos desvios-padrão considerados adequados à determinação da acurácia absoluta, encerrando-se assim, os testes com a série de procedimentos, de onde se escolheu um (que atingisse o menor desvio padrão) como o condizente com os resultados esperados. Buscou-se, com estes procedimentos, explorar as potencialidades oferecidas nos aplicativos, na determinação da acurácia absoluta das coordenadas do M07.

Os resultados da estabilização (rotação, translação e 28 estações de referência) com a combinação das soluções do experimento e do MIT são informados, conforme arquivo *globk_tacb_08241.org* (Quadro 7.8).

Starting Position stabilization iteration 4 L0808281200_tacb.glx										
For 28 sites in origin, min/max height sigma 6.37 12.59 mm; Median 8.33 mm,										
Tol 15.00 mm L0808281200_tacb.glx										
Position system stabilization results										

X Rotation (mas)	-0.10925 +- 0.02349	Iter 4 L0808281200_tacb.glx								
Y Rotation (mas)	0.15066 +- 0.02282	Iter 4 L0808281200_tacb.glx								
Z Rotation (mas)	0.98663 +- 0.02653	Iter 4 L0808281200_tacb.glx								
X Translation (m)	-0.00139 +- 0.00069	Iter 4 L0808281200_tacb.glx								
Y Translation (m)	-0.00545 +- 0.00070	Iter 4 L0808281200_tacb.glx								
Z Translation (m)	0.00356 +- 0.00075	Iter 4 L0808281200_tacb.glx								
Sites and relative sigmas used in stabilization										
VILL_4PS 1.05	MAS1_3PS 0.96	CHPI_GPS 0.93	KELY_2PS 0.93	STJO_6PS 0.93	KOUR_3PS 1.09					
OHI3_GPS 0.99	OHI2_GPS 0.99	CRO1_3PS 0.96	SCH2_2PS 0.97	SCUB_2PS 1.03	CHUR_5PS 0.95					
DUBO_4PS 0.99	MDO1_3PS 1.01	YELL_4PS 0.96	KOKB_5PS 1.07	CHAT_2PS 0.96	MCM4_3PS 0.95					
YAKT_5PS 0.97	SHAO_4PS 1.07	NRIL_GPS 0.97	IISC_2PS 1.05	POL2_2PS 1.03	KIRU_2PS 1.04					
BOR1_2PS 1.04	GRAZ_4PS 1.07	ONSA_2PS 0.99	BRUS_2PS 0.94							
For 84 Position Iter 4 Pre RMS 0.0104 m; Post RMS 0.00228 m L0808281200_tacb.glx										
For 28 sites in origin, min/max NE sigma 1.98 3.85 mm; Median 2.81 mm, Tol 2.48 mm L0808281200_tacb.glx										

Quadro 7.8 – Resultados da estabilização com injeção generalizada e *H-files* do MIT

A intenção de realizar estes procedimentos é de estabelecer uma estratégia para a determinação da acurácia absoluta das coordenadas do marco geodésico de precisão, para então adotá-la aos marcos de apoio imediato, como é exposto na próxima subseção.

Portanto, com base nestes resultados, escolhe-se a estratégia do sétimo processamento, em decorrência dos desvios padrão alcançados e por usar soluções combinadas, atingindo uma solução globalizada. Assim, utiliza-se da estratégia do 7º. procedimento para estimar a acurácia absoluta das coordenadas das estações de uma RRCM. O Quadro 7.9 sintetiza os critérios adotados e as acurácias obtidas em cada procedimento. Finalizados os procedimentos, procede-se a determinação da acurácia das coordenadas de todos os pontos da RRCM de Taciba/SP.

Procedimento	Injunção	Estações de referência	Estações IGS	Solução global	Acurácia absoluta (cm)
1º	Finita	OURI, PPTE, ROSA	-	-	2,1
2º	Generalizada	OURI, PPTE, ROSA	-	-	2,0
3º	Generalizada	-	-	-	94,7
4º	Generalizada	-	BRAZ	-	45,5
5º	Generalizada	BRAZ	BRAZ	-	32,2
6º	Generalizada	BRAZ, CHPI	BRAZ, CHPI	-	2,7
7º	Generalizada	BRAZ, CHPI	BRAZ, CHPI	MIT	2,0

Quadro 7.9 – Síntese dos critérios dos procedimentos e acurácia

7.4.5 Acurácia das coordenadas dos marcos geodésico de apoio imediato (M01, ..., M06)

Inicialmente, foi constatado que os sistemas de coordenadas do marco de precisão e dos marcos de apoio imediato eram distintos, havendo necessidade de transformações. Portanto, as coordenadas dos marcos geodésico de apoio imediato (ver Tabela 7.4), os quais constituem a Rede de Referência Cadastral, obtidas por Santos et al. (2008), com base nos dados GNSS (GPS) coletados com taxa de coleta de 15 segundos e um tempo de 30 minutos de ocupação em cada ponto, estão no Sistema SIRGAS2000.

Estando as coordenadas do marco geodésico de precisão no sistema cartesiano, houve a necessidade de transformar as coordenadas geodésicas (φ , λ , h) em cartesianas (X , Y , Z), utilizando-se do programa de transformação de coordenadas, ProGrid, do IBGE, obtendo-se os seguintes valores, conforme Tabela 7.13, salientando-se que o respectivo programa não fornece a precisão das transformações realizadas.

Tabela 7.13 – Coordenadas cartesianas (SIRGAS2000) dos marcos geodésicos de apoio imediato (PROGRID)

Marco	X (m)	Y (m)	Z (m)
M01	3.690.516,098	-4.604.208,101	-2.414.088,719
M02	3.689.726,454	-4.604.647,493	-2.414.464,883
M03	3.690.543,861	-4.603.757,793	-2.414.852,326
M04	3.690.207,186	-4.604.290,332	-2.414.345,198
M05	3.690.147,797	-4.604.318,857	-2.414.380,834
M06	3.689.566,819	-4.604.517,592	-2.415.040,865
M07	3.691.009,094	-4.604.140,794	-2.413.591,132

Algumas peculiaridades sobre o processamento de dados GNSS merecem destaque: o aplicativo GAMIT é executado com base no *script sh_gamit*, junto ao diretório do experimento, neste caso, */tacb*, conforme exemplo do comando abaixo:

```
sh_gamit -expt tacb -d 08 241 242 >&! sh_gamit.log
```

O processamento com o respectivo *script* para os dias 241 e 242 de 2008 geram soluções que são combinadas com os arquivos *H-files* do MIT (procedimento testado e selecionado para a determinação da acurácia absoluta das coordenadas dos vértices da RRCM), em função dos parâmetros editados no arquivo de controle *globk_comb.cmd* e *glorg_comb.cmd*, os quais estão no diretório */gsoln*, além do arquivo *stab_site.igs* contido em */tables*. Na edição do arquivo *glorg_comb.cmd* estabelece-se que as estações para estabilização correspondem às que estão no arquivo indicado (*stab_site.igs*), conforme já apresentado no Quadro 7.7.

Dentre os processamentos realizados, o ponto M02 não teve suas coordenadas estimadas no GAMIT, em virtude de muitas perdas de ciclo (*cycle slip*), pois o valor do erro médio quadrático (*RMS - Root Mean Square*) deste ponto, no arquivo *sh_gamit_241.summary*, tem valor nulo, o que indica a causa mencionada, segundo Herring, King e McClusky (2010).

Neste processamento, dados das estações BRAZ e CHPI também foram incluídos no diretório */rinex*, juntamente com os dados dos marcos geodésicos de apoio imediato da RRCM. O aplicativo GLOBK é executado com o *script sh_glred*, conforme linha de comando abaixo:

```
sh_glred -expt tacb -s 2008 241 2008 242 -local /home/eliana/tacb/glb/ -opt H LC G E >&! sh_glred.log
```

Da execução deste *script*, obtêm-se as coordenadas cartesianas (Tabela 7.14) com seus desvios-padrão (Tabela 7.15), contidos nos arquivos *globk_tacb_08241.org* e *globk_tacb_08242.org*, respectivamente, para cada dia processado.

Uma restrição encontrada foi quanto aos dados das estações dos marcos de apoio imediato. Estes foram coletados em apenas uma época: no dia 241 de 2008 (28/08), os marcos geodésicos M01, M03 e M06; no dia 242, os marcos geodésicos M04 e M05. Somente o marco geodésico de precisão (M07 ou TACI) tem dados coletados nas duas épocas (241 e 242).

Tabela 7.14 – Coordenadas cartesianas (SIRGAS2000) dos marcos geodésicos de apoio imediato (GLOBK)

Marco	X (m)	Y (m)	Z (m)
M01/241	3.690.543,843	-4.603.757,740	-2.414.852,191
M03/241	3.690.516,139	-4.604.208,096	-2.414.088,597
M04/242	3.690.203,936	-4.604.290,706	-2.414.348,900
M05/242	3.690.147,639	-4.604.318,790	-2.414.380,617
M06/241	3.689.566,526	-4.604.517,623	-2.415.040,681
TACI/241	3.691.009,069	-4.604.140,794	-2.413.591,007
TACI/242	3.691.009,051	-4.604.140,779	-2.413.591,002

Tabela 7.15 – Desvios-padrão das coordenadas cartesianas dos marcos geodésicos de apoio imediato (GLOBK)

Marco	σ_X (cm)	σ_Y (cm)	σ_Z (cm)
M01/241	36,1	27,7	17,0
M03/241	16,5	10,3	6,8
M04/242	21,7	21,5	12,6
M05/242	30,4	50,7	29,7
M06/241	59,3	10,6	12,5
TACI/241	1,0	1,1	0,7
TACI/242	1,8	1,9	1,2

Os resultados da estabilização com a combinação das soluções do experimento e do MIT são informados (Quadros 7.10 e 7.11), conforme arquivos *globk_tacb_08241.org* e *globk_tacb_08242.org*, notando-se para o dia 241 que foram utilizadas 31 estações de referência na estabilização e para o dia 242, 29 estações.

```

Starting Position stabilization iteration 4 L0808281200_tacb.glx
For 31 sites in origin, min/max height sigma 6.65 13.76 mm; Median 8.43 mm, Tol
15.00 mm L0808281200_tacb.glx

Position system stabilization results
-----
X Rotation (mas) -0.04489 +- 0.03019 Iter 4 L0808281200_tacb.glx
Y Rotation (mas) -0.05944 +- 0.02977 Iter 4 L0808281200_tacb.glx
Z Rotation (mas) -0.14189 +- 0.03423 Iter 4 L0808281200_tacb.glx
X Translation (m) -0.00100 +- 0.00090 Iter 4 L0808281200_tacb.glx
Y Translation (m) -0.00480 +- 0.00091 Iter 4 L0808281200_tacb.glx
Z Translation (m) 0.00518 +- 0.00096 Iter 4 L0808281200_tacb.glx

Sites and relative sigmas used in stabilization
VILL_4PS 1.04 MAS1_3PS 0.95 BRAZ_2PS 0.93 KELY_2PS 0.93 STJO_6PS 0.93 KOUR_3PS 1.07
OHI3_GPS 0.98 OHI2_GPS 0.99 CRO1_3PS 0.95 SCH2_2PS 0.96 SCUB_2PS 1.02 CHUR_5PS 0.94
DUBO_4PS 0.98 MDO1_3PS 1.00 YELL_4PS 0.95 KOKB_5PS 1.06 CHAT_2PS 0.96 MCM4_3PS 0.95
YAKT_5PS 0.96 SHAO_4PS 1.06 NRIL_GPS 0.96 SELE_2PS 1.15 POL2_2PS 1.02 METS_GPS 1.05
KIRU_2PS 1.03 BOR1_2PS 1.03 GRAZ_4PS 1.06 POTS_GPS 0.99 WTZR_GPS 1.03 ONSA_2PS 0.98
BRUS_2PS 0.93
For 93 Position Iter 4 Pre RMS 0.0048 m; Post RMS 0.00296 m L0808281200_tacb.glx
For 31 sites in origin, min/max NE sigma 2.00 4.57 mm; Median 2.86 mm, Tol
2.59 mm L0808281200_tacb.glx

```

Quadro 7.10 – Resultados da estabilização com *H-files* do MIT para o dia 241

```

Starting Position stabilization iteration 4 L0808291200_tacb.glx
For 29 sites in origin, min/max height sigma 6.58 13.32 mm; Median 8.98 mm, Tol
15.00 mm L0808291200_tacb.glx

Position system stabilization results
-----
X Rotation (mas) -0.12563 +- 0.03129 Iter 4 L0808291200_tacb.glx
Y Rotation (mas) 0.04257 +- 0.03195 Iter 4 L0808291200_tacb.glx
Z Rotation (mas) -0.08121 +- 0.03427 Iter 4 L0808291200_tacb.glx
X Translation (m) -0.00614 +- 0.00096 Iter 4 L0808291200_tacb.glx
Y Translation (m) -0.00073 +- 0.00094 Iter 4 L0808291200_tacb.glx
Z Translation (m) 0.00021 +- 0.00097 Iter 4 L0808291200_tacb.glx

Sites and relative sigmas used in stabilization
VILL_4PS 1.01 MAS1_3PS 0.92 KELY_2PS 1.01 STJO_6PS 0.96 KOUR_3PS 1.05 OHI2_GPS 1.04
OHI3_GPS 1.08 CRO1_3PS 0.97 SCH2_2PS 0.97 SCUB_2PS 0.94 CHUR_5PS 0.92 DUBO_4PS 0.96
MDO1_3PS 1.02 YELL_4PS 0.98 THTI_2PS 1.22 KOKB_5PS 1.10 CHAT_2PS 0.96 MCM4_3PS 0.95
TSKB_4PS 1.15 YAKT_5PS 1.02 SHAO_4PS 0.98 SELE_2PS 1.02 POL2_2PS 1.02 KIRU_2PS 1.02
BOR1_2PS 1.00 GRAZ_4PS 1.00 POTS_GPS 0.97 ONSA_2PS 0.91 BRUS_2PS 0.91
For 87 Position Iter 4 Pre RMS 0.0040 m; Post RMS 0.00305 m L0808291200_tacb.glx
For 29 sites in origin, min/max NE sigma 1.78 5.23 mm; Median 3.05 mm, Tol
3.82 mm L0808291200_tacb.glx

```

Quadro 7.11– Resultados da estabilização com *H-files* do MIT para o dia 242

A acurácia absoluta das coordenadas dos vértices da RRCM do município de Taciba/SP foi estabelecida, baseada nos procedimentos usualmente adotados para estudos de determinação de acurácias em redes consideradas estáveis como a RBMC. A aplicação em RRCM é inédita e os procedimentos realizados foram concebidos nesta pesquisa, na procura daquele que possibilitasse resultados satisfatórios quanto aos padrões de acurácia a serem adotados. O valor da acurácia absoluta das coordenadas dos vértices da RRCM servirá como parâmetro na análise da deformação da RRCM.

7.5 Deformação da RRCM de Taciba/SP

A análise de deformação da RRCM foi realizada com base no modelo de “*strain*” (subseção 5.2.a.1), adequado para áreas limitadas a um estudo específico, no caso de estudo para a análise de deformação da RRCM de um município. Os parâmetros de deformação estimados são aplicados para todas as estações contidas na RRCM, considerando uma deformação homogênea (subseção 6.5.1). A geometria da grade de deformação assumida é apresentada na subseção 6.6.2.2, que trata de uma grade irregular com o ponto a ser analisado fora da mesma, com parâmetros de deformação com uma ordem de grandeza pré-definida, conforme a Tabela 6.15.

Para Caspary (2000), no caso de deformação homogênea, determina-se os parâmetros para um ponto e o tensor de deformação (eq. 6.4) é aplicado em toda área.

Dependendo da situação específica de cada município, se p.ex., ocorrerem acidentes naturais, a deformação da RRCM é modelada de forma independente, estimando seus parâmetros de deformação e propagando-os para todos os limites da parcela cadastral. O modelo ora proposto deve ser investigado no estabelecimento de soluções para problemas em municípios que estão em áreas de risco e de muito importância para futuros estudos.

Portanto, para modelar a estrutura geodésica básica de referência cadastral aplicam-se os modelos (espacial e temporal) destinados à análise de deformação da crosta terrestre (subseção 5.2).

7.5.1 Modelo espacial da RRCM

Quando a estrutura básica que constitui a RRCM do município sofre alguma mudança (dimensões, forma e posição) produz uma deformação na respectiva rede de referência. Conhecendo-se o deslocamento (u_i, v_i) dos pontos que pertencem à RRCM, estimam-se os parâmetros (incógnitas) de deformação (a_1, a_2, b_1, b_2) , conforme Kuang (1996) e Caspary (2000) (sub-subseção 6.5.1).

Considerando o modelo linear de deformação para estimar os parâmetros de deformação homogênea para um ponto específico, segundo Caspary (2000), onde há somente deformação, obtém-se:

$$\begin{bmatrix} u(e_1, n_1) \\ v(e_1, n_1) \\ \vdots \\ u(e_i, n_i) \\ v(e_i, n_i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u(e_1, n_1)}{\partial a_1} & \frac{\partial u(e_1, n_1)}{\partial a_2} & \frac{\partial u(e_1, n_1)}{\partial b_1} & \frac{\partial u(e_1, n_1)}{\partial b_2} \\ \frac{\partial v(e_1, n_1)}{\partial a_1} & \frac{\partial v(e_1, n_1)}{\partial a_2} & \frac{\partial v(e_1, n_1)}{\partial b_1} & \frac{\partial v(e_1, n_1)}{\partial b_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial u(e_i, n_i)}{\partial a_1} & \frac{\partial u(e_i, n_i)}{\partial a_2} & \frac{\partial u(e_i, n_i)}{\partial b_1} & \frac{\partial u(e_i, n_i)}{\partial b_2} \\ \frac{\partial v(e_i, n_i)}{\partial a_1} & \frac{\partial v(e_i, n_i)}{\partial a_2} & \frac{\partial v(e_i, n_i)}{\partial b_1} & \frac{\partial v(e_i, n_i)}{\partial b_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}. \quad (7.1)$$

Segundo Santos (1999), no processo de deformação de uma estrutura geodésica, nesta pesquisa a RRCM, admite-se que a mesma possa ser tratada conforme fundamentação sobre as teorias de deformação homogênea e infinitesimal, ou seja, a ordem de grandeza dos deslocamentos relativos de dois vértices vizinhos é pequena, em comparação com a distância que os separa. Embora, as condições impostas sejam restritivas, levando à adoção de um modelo simplificado para análise de deformação, o mesmo é assumido nesta pesquisa, como uma primeira investigação para a identificação do modelo espacial da RRCM em questão, até então não explorado. Acatando as condições impostas, idealizou-se quatro experimentos cujo procedimento é o mesmo, porém utilizando diferentes estratégias para estimar os parâmetros de deformação e verificar o efeito na deformação para um ponto considerado, expostos a seguir.

1º Experimento - Análise da Deformação do marco TACI (M07) em relação aos marcos M01, M03, M04, M05 e M06 para coordenadas geodésicas locais 2D (e,n)

Considera-se um ponto, p.ex., o TACI (M07), como vértice a ser analisado, em relação aos cinco pontos vizinhos (M01, M03, M04, M05 e M06). As coordenadas geodésicas locais (e, n, u) , definidas na subseção 3.6, advindas dos processamentos com os programas GAMIT e GLOBK, neste último, arquivos com extensão *org*, p.ex., *globk_tacb_08241.org* e *globk_tacb_08242.org*, são utilizadas para a determinação dos parâmetros de deformação. Utilizando-se do modelo da equação 6.9; porém, substituindo o sistema cartesiano pelo sistema (e, n) e considerando que a estrutura não sofre rotação e translação, somente deformação. Admitindo-se ainda, que u e v são as componentes dos deslocamentos nas direções e e n , respectivamente, conforme equação 6.3, para o caso planimétrico (e, n) , estes parâmetros podem ser estimados com base no seguinte polinômio de primeira ordem, segundo Santos (1999):

$$u = u(e, n) = a_1(e_i - e_o) + a_2(n_i - n_o) + a_o, \quad (7.2)$$

$$v = v(e, n) = b_1(e_i - e_o) + b_2(n_i - n_o) + b_o, \quad (7.3)$$

sendo (e_i, n_i) correspondente às coordenadas dos vértices vizinhos e (e_o, n_o) às coordenadas do ponto analisado. Como foram calculadas as diferenças entre as coordenadas dos vértices vizinhos e do vértice analisado, assume-se que o vértice analisado se constitui na origem de um sistema local de coordenadas (SANTOS, 1999), neste estudo, o ponto TACI. Os coeficientes a_o e b_o são estimados como funções das coordenadas do ponto analisado.

Considerando-se o número (“n”) de vértices vizinhos ao ponto analisado, tem-se um conjunto de “2n” equações a 4 incógnitas (parâmetros de deformação). Portanto, exigindo-se um número mínimo de dois pontos vizinhos para a solução deste sistema de equações. Quando houver um número superior a este mínimo exigido, pode-se realizar o ajustamento pelo método dos mínimos quadrados. Para a RRCM de Taciba/SP, tem-se um ponto analisado (M07) e cinco pontos vizinhos (M01, M03, M04, M05, M06), portanto, conjunto de dez equações ($2n = 2*5=10$) a quatro (4) incógnitas (a_1, a_2, b_1, b_2). O sistema de equações específicas para este caso é dado pelas seguintes expressões:

$$u(e_{M01}, n_{M01}) = a_1(e_{M01} - e_{M07}) + a_2(n_{M01} - n_{M07}) + a_o, \quad (7.4)$$

$$v(e_{M01}, n_{M01}) = b_1(e_{M01} - e_{M07}) + b_2(n_{M01} - n_{M07}) + b_o, \quad (7.5)$$

...

$$u(e_{M06}, n_{M06}) = a_1(e_{M06} - e_{M07}) + a_2(n_{M06} - n_{M07}) + a_o, \quad (7.6)$$

$$v(e_{M06}, n_{M06}) = b_1(e_{M06} - e_{M07}) + b_2(n_{M06} - n_{M07}) + b_o. \quad (7.7)$$

As componentes dos deslocamentos nas direções e e n , agora, são representadas pelo vetor d , que na forma matricial, correspondem às seguintes equações:

$$\underline{d} = \begin{bmatrix} u(e_{M01}, n_{M01}) \\ v(e_{M01}, n_{M01}) \\ \vdots \\ u(e_{M06}, n_{M06}) \\ v(e_{M06}, n_{M06}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u(e_{M01}, n_{M01})}{\partial a_1} & \frac{\partial u(e_{M01}, n_{M01})}{\partial a_2} & \frac{\partial u(e_{M01}, n_{M01})}{\partial b_1} & \frac{\partial u(e_{M01}, n_{M01})}{\partial b_2} \\ \frac{\partial v(e_{M01}, n_{M01})}{\partial a_1} & \frac{\partial v(e_{M01}, n_{M01})}{\partial a_2} & \frac{\partial v(e_{M01}, n_{M01})}{\partial b_1} & \frac{\partial v(e_{M01}, n_{M01})}{\partial b_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial u(e_{M06}, n_{M06})}{\partial a_1} & \frac{\partial u(e_{M06}, n_{M06})}{\partial a_2} & \frac{\partial u(e_{M06}, n_{M06})}{\partial b_1} & \frac{\partial u(e_{M06}, n_{M06})}{\partial b_2} \\ \frac{\partial v(e_{M06}, n_{M06})}{\partial a_1} & \frac{\partial v(e_{M06}, n_{M06})}{\partial a_2} & \frac{\partial v(e_{M06}, n_{M06})}{\partial b_1} & \frac{\partial v(e_{M06}, n_{M06})}{\partial b_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_o \\ b_o \\ \vdots \\ a_o \\ b_o \end{bmatrix} \quad (7.8a)$$

$$\underline{d} = \begin{bmatrix} (e_{M01} - e_{M07}) & (n_{M01} - n_{M07}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (e_{M01} - e_{M07}) & (n_{M01} - n_{M07}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ (e_{M06} - e_{M07}) & (n_{M06} - n_{M07}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (e_{M06} - e_{M07}) & (n_{M06} - n_{M07}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_o \\ b_o \\ \vdots \\ a_o \\ b_o \end{bmatrix} \quad (7.8b)$$

$$\underline{d} = \underline{A}\underline{c} + \underline{t} \quad (7.8c)$$

Calculando a matriz das derivadas ($\underline{A}$) dos deslocamentos com relação aos coeficientes (parâmetros) de deformação ($\underline{c}$), obtém os resultados abaixo, conforme Tabela 7.16.

Tabela 7.16 – Matriz das derivadas dos deslocamentos (m) com relação aos parâmetros

-3.395,530	-1.398,030	0,000	0,000
0,000	0,000	-3.395,530	-1.398,030
-1735,108	-560,410	0,000	0,000
0,000	0,000	-1.735,108	-560,410
-2.684,652	-852,424	0,000	0,000
0,000	0,000	-2.684,652	-852,424
-2.746,111	-886,992	0,000	0,000
0,000	0,000	-2.746,111	-886,992
-4.632,682	-1.580,206	0,000	0,000
0,000	0,000	-4.632,682	-1.580,206

A solução do sistema de equações com base no método dos mínimos quadrados, segundo Gemael (1994), é obtida pela equação 6.2, com as devidas adequações de nomenclatura:

$$\underline{c} = -(\underline{A}^T \underline{P} \underline{A})^{-1} (\underline{A}^T \underline{P} \underline{L}), \quad (7.9)$$

sendo ($\underline{L}$) correspondente aos deslocamentos do ponto analisado (M07) entre as épocas consideradas (dias 241 e 242 de 2008) e ($\underline{P}$) refere-se à matriz peso associada aos deslocamentos dos pontos vizinhos (M01, M03, M04, M05 e M06). Considerando a não correlação dos pontos vizinhos nas diferentes épocas analisadas (KUANG, 1996), a matriz peso ($\underline{P}$) é composta pelos valores das variâncias e covariâncias do descolamento de cada ponto vizinho e corresponde a:

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} \sigma_{u(e_{M01}, n_{M01})}^2 & \sigma_{uv} & \dots & 0 \\ \sigma_{vu} & \sigma_{v(e_{M01}, n_{M01})}^2 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \sigma_{u(e_{M06}, n_{M06})}^2 & \sigma_{uv} \\ & & \sigma_{vu} & \sigma_{v(e_{M06}, n_{M06})}^2 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} 0,11118 & 0,2024 & \dots & 0 \\ 0,2024 & 0,35577 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0,04174 & 0,5382 \\ & & 0,5382 & 0,49596 \end{bmatrix}. \quad (7.10)
 \end{aligned}$$

Resolvendo os valores de $(\underline{A}^T \underline{P} \underline{A})^{-1}$, tem-se a Tabela 7.17:

Tabela 7.17 – Matriz $(\underline{A}^T \underline{P} \underline{A})^{-1}$ para os marcos M07 e vizinhos (M01 a M06)

$$\begin{vmatrix} 0,003 & -0,008 & -0,002 & 0,004 \\ -0,008 & 0,023 & 0,004 & -0,013 \\ -0,002 & 0,004 & 0,001 & -0,002 \\ 0,004 & -0,013 & -0,002 & 0,007 \end{vmatrix}$$

O cálculo de $(\underline{A}^T \underline{P} \underline{L})$ se faz com os valores da matriz das derivadas ($\underline{A}$) (Tabela 7.16), da matriz peso ($\underline{P}$) (equação 7.10) e do vetor dos deslocamentos ($\underline{L}$) do ponto analisado (M07) entre as épocas consideradas, ou seja, os dias 241 (Tabela 7.12) e 242 (Tabela 7.14) de 2008.

Tabela 7.18 – O produto $(\underline{A}^T \underline{P} \underline{L})$

$$\begin{vmatrix} 20,124 \\ 7,033 \\ 38,286 \\ 13,361 \end{vmatrix}$$

Portanto, os parâmetros de deformação (c), com base nos resultados apresentados, são apresentados na Tabela 7.19:

Utilizando-se a equação (7.9) e os valores de $(\underline{A}^T \underline{P} \underline{A})^{-1}$ (Tabela 7.17) e $(\underline{A}^T \underline{P} \underline{L})$ (Tabela 7.18), estima-se os parâmetros de deformação (c), conforme Tabela 7.19.

Tabela 7.19 – Parâmetros (2D) de deformação (c) para os marcos M07 e vizinhos (M01 a M06)

a1	$-1,48 \cdot 10^{-5}$
a2	$3,98 \cdot 10^{-5}$
b1	$6,10 \cdot 10^{-6}$
b2	$-2,07 \cdot 10^{-5}$

Baseando-se no modelo linear de deformação utilizado para estimar os parâmetros de deformação homogênea, pode-se aplicá-lo para um ponto específico $P_i(e_i, n_i)$, de acordo com Caspary (2000), desconsiderando o deslocamento do corpo rígido (translação), visto na equação 6.8:

$$\begin{pmatrix} \Delta_{e_i} \\ \Delta_{n_i} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 \\ b_1 & b_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_i \\ n_i \end{pmatrix}. \quad (7.11)$$

Uma vez estimados os coeficientes dos parâmetros de deformação e de maneira análoga ao sistema de coordenadas locais (e_i, n_i) , o mesmo modelo é reescrito em função das coordenadas cartesianas de um ponto específico, p.ex., $P_i(X_i, Y_i)$:

$$\begin{pmatrix} \Delta_{X_i} \\ \Delta_{Y_i} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 16,8 \cdot 10^{-5} & -5,82 \cdot 10^{-5} \\ -9,20 \cdot 10^{-5} & 3,01 \cdot 10^{-5} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \end{pmatrix}. \quad (7.12)$$

Em função do comprimento da componente horizontal do vetor deformação é possível verificar o impacto de um movimento na rede analisada, de acordo com Winefield, Crook e Beavan (2010). Este impacto é analisado derivando o vetor deformação $(\Delta_{e_i}, \Delta_{n_i})$ com relação à posição (e_i, n_i) . Para um ponto específico, o efeito do vetor deformação pode ser obtido da expressão geral (6.10) por:

$$\begin{pmatrix} e'_i \\ n'_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_i \\ n_i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \varepsilon_{ee} & \varepsilon_{en} \\ \varepsilon_{ne} & \varepsilon_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_i \\ n_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_i \\ n_i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta_{e_i} \\ \Delta_{n_i} \end{pmatrix}, \quad (7.13)$$

onde ε_{ee} corresponde ao parâmetro de deformação $\frac{\partial u}{\partial e}$, ou seja, ao coeficiente a_1 . De maneira análoga, ε_{nn} corresponde ao parâmetro de deformação $\frac{\partial u}{\partial n}$, ou seja, ao coeficiente b_2 . Assim, ε_{en}

equivale ao coeficiente a_2 e ε_{ne} ao coeficiente b_1 . A interpretação de ε_{ee} se relaciona com a distorção linear ao longo do eixo “e”, enquanto ε_{nn} à distorção linear ao longo do eixo “n”.

Os outros elementos, ε_{en} e ε_{ne} à distorção angular entre os eixos envolvidos. As novas coordenadas do ponto específico são “ e'_i ”, “ n'_i ”.

Analogamente, para as coordenadas cartesianas:

$$\begin{pmatrix} X'_i \\ Y'_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta_{X_i} \\ \Delta_{Y_i} \end{pmatrix}. \quad (7.14)$$

Segundo a NBR 14166/98, os elementos (p.ex.: pontos de esquina, pontos de referência de quadras) da RRCM podem ter suas coordenadas plano-retangulares determinadas nos Sistemas Transverso de Mercator (UTM, RTM, LTM) como no Sistema Topográfico Local (STL).

Quando utilizar o STL, apresentado na subseção 3.7, a origem deste sistema corresponde às coordenadas (0, 0) do seu sistema de coordenadas plano-retangulares (X, Y) adicionados os termos constantes de 150.000 m e 250.000 m para a abscissa (X) e para a ordenada (Y), respectivamente. Este sistema proporcionou uma melhor percepção dos impactos causados pela deformação, nas coordenadas dos pontos.

Considerando os valores estimados para os parâmetros de deformação do ponto M07 da RRCM de Taciba/SP, com base nos pontos M01, M03, M04, M05 e M06, e aplicando nas coordenadas da origem do STL, observa-se o seguinte impacto (considerando cinco casas decimais para melhor ilustração dos resultados):

$$\begin{pmatrix} X'_o \\ Y'_o \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 150.000 \\ 250.000 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 16,8 \cdot 10^{-5} & -5,82 \cdot 10^{-5} \\ -9,20 \cdot 10^{-5} & 3,01 \cdot 10^{-5} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 150.000 \\ 250.000 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 150.007,72754 \text{ m} \\ 249.995,75032 \text{ m} \end{pmatrix}. \quad (7.15)$$

Uma conclusão parcial obtida deste 1º. experimento aponta para a aproximação na ordem de grandeza dos resultados (10^{-6} a 10^{-5}) recomendados por Teixeira (2005) e o impacto nas coordenadas com grandezas na ordem de 10^{-6} m (1 μ m (micrometro) = um milionésimo do metro), ou seja, aproximadamente de +7,7 m em X e de -4,3 m em Y. Numa análise preliminar, constatou-se que os impactos causados nas coordenadas pela deformação foram muito grandes, já que não houve movimentação significativa na área de estudo, neste período, mostrando possível fragilidade no procedimento.

2º Experimento - Análise da Deformação do marco TACI (M07) em relação às estações IGS (BRAZ, CHPI) para coordenadas geodésicas locais 2D (e,n)

Com os dados processados da RRCM e das estações de referência BRAZ e CHPI e partindo-se do princípio que a adoção das estações de referência trouxe como consequência a melhoria nos valores das acurácias, aplicou-se este procedimento também para a definição dos parâmetros de deformação para análise do M07, obtendo-se os valores para $(\underline{A}^T \underline{P} \underline{A})^{-1}$ (Tabela 7.20).

Tabela 7.20 – Matriz $(\underline{A}^T \underline{P} \underline{A})^{-1}$ para os marcos M07 e vizinhos (BRAZ, CHPI)

$$\begin{bmatrix} -6,38 \cdot 10^{-12} & 1,42 \cdot 10^{-11} & 9,84 \cdot 10^{-11} & -2,20 \cdot 10^{-10} \\ 1,42 \cdot 10^{-11} & -3,72 \cdot 10^{-11} & -2,20 \cdot 10^{-10} & 5,72 \cdot 10^{-10} \\ 9,84 \cdot 10^{-11} & -2,20 \cdot 10^{-10} & -5,93 \cdot 10^{-12} & 1,33 \cdot 10^{-11} \\ -2,20 \cdot 10^{-10} & 5,72 \cdot 10^{-10} & 1,33 \cdot 10^{-11} & -3,43 \cdot 10^{-11} \end{bmatrix}$$

Neste caso, os valores de $(\underline{A}^T \underline{P} \underline{L})$ são (Tabela 7.21):

Tabela 7.21 – Vetor $(\underline{A}^T \underline{P} \underline{L})$ para os marcos M07 e vizinhos (BRAZ, CHPI)

$$\begin{bmatrix} -192,707 \\ -59,588 \\ -258,812 \\ -80,134 \end{bmatrix}$$

Os parâmetros de deformação são apresentados na Tabela 7.22:

Tabela 7.22 – Parâmetros (2D) de deformação ($\underline{c}$) para os marcos M07 e vizinhos (BRAZ, CHPI)

$$\begin{array}{l} \underline{a1} \quad 7,48 \cdot 10^{-9} \\ \underline{a2} \quad -1,05 \cdot 10^{-8} \\ \underline{b1} \quad 5,40 \cdot 10^{-9} \\ \underline{b2} \quad -7,58 \cdot 10^{-9} \end{array}$$

Assim, com os coeficientes dos parâmetros de deformação estimados, o modelo de deformação em função das coordenadas cartesianas de um ponto específico, p.ex., $P_i (X_i, Y_i)$ é apresentado a seguir:

$$\begin{pmatrix} \Delta_{X_i} \\ \Delta_{Y_i} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -7,58 \cdot 10^{-9} & -1,05 \cdot 10^{-8} \\ 5,40 \cdot 10^{-9} & 7,48 \cdot 10^{-9} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \end{pmatrix}. \quad (7.16)$$

De maneira análoga, com os valores dos parâmetros estimados com BRAZ e CHPI, tem-se o seguinte impacto nas coordenadas da origem do STL:

$$\begin{pmatrix} X'_o \\ Y'_o \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 150.000 \\ 250.000 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -7,58 \cdot 10^{-9} & -1,05 \cdot 10^{-8} \\ 5,40 \cdot 10^{-9} & 7,48 \cdot 10^{-9} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 150.000 \\ 250.000 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 149.999,99850 \text{ m} \\ 249.999,99891 \text{ m} \end{pmatrix}. \quad (7.17)$$

Numa conclusão associada aos resultados da expressão 7.17 tem-se que os valores dos coeficientes de deformação determinados são da ordem de 10^{-9} m (1 nm (nanômetro) = um bilionésimo do metro), correspondendo a um impacto nas coordenadas em X e em Y de, aproximadamente, -2,5 mm e -2,1 mm, respectivamente.

Diante dos resultados obtidos nos 1º e 2º experimentos, em função do impacto menor nas coordenadas serem atribuídos ao segundo experimento, faz-se a análise da acurácia relativa para este, com a finalidade de enriquecer este estudo.

A acurácia relativa, ou seja, acurácia local, associa o erro relacionado com a distância entre os pontos considerados e sua variação com o azimuth do alinhamento constituído por estes pontos, segundo Winefield, Crook e Beavan (2010), e expresso da seguinte forma (reescrevendo as equações 6.11 a 6.14 para melhor entendimento):

$$d = \sqrt{\left(\frac{A'+B'}{2}\right) + \sqrt{\left(\frac{A'-B'}{2}\right)^2 + C'^2}}, \quad (7.18)$$

sendo

$$A' = \varepsilon_{xx} \cdot \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yx} \cdot \varepsilon_{yx} = (a_1)^2 + (b_1)^2, \quad (7.19)$$

$$B' = \varepsilon_{xy} \cdot \varepsilon_{xy} + \varepsilon_{yy} \cdot \varepsilon_{yy} = (a_2)^2 + (b_2)^2, \quad (7.20)$$

$$C' = \varepsilon_{xx} \cdot \varepsilon_{xy} + \varepsilon_{yx} \cdot \varepsilon_{yy} = a_1 a_2 + b_1 b_2. \quad (7.21)$$

Assim, para os parâmetros de deformação estimados em função de BRAZ e CHPI, tem-se:

$$A' = (a_1)^2 + (b_1)^2 = 8,51 \cdot 10^{-17}, \quad (7.22)$$

$$B' = (a_2)^2 + (b_2)^2 = 1,68 \cdot 10^{-16}, \quad (7.23)$$

$$C' = a_1 a_2 + b_1 b_2 = -1,20 \cdot 10^{-16}. \quad (7.24)$$

$$d = \sqrt{\left(\frac{A'+B'}{2}\right) + \sqrt{\left(\frac{A'-B'}{2}\right)^2 + C'^2}} = 80 \text{ ppm}. \quad (7.25)$$

De acordo com Winefield, Crook e Beavan (2010), numa rede de referência cadastral, a acurácia relativa (local) deve ser da ordem de 50 ppm, portanto, o valor obtido na equação (7.25) é superior ao estipulado, assim, não atendendo esta recomendação. Os mesmos autores estabelecem a ordem de grandeza de 5 cm para a acurácia absoluta (rede) de um modelo de deformação de uma área. Com base nas variâncias obtidas com o GLOBK para a análise da acurácia absoluta das coordenadas do ponto TACI (M07), obtém-se o valor 2,5 cm para a resultante das componentes (Tabela 7.11). Portanto, a acurácia absoluta das coordenadas do ponto analisado atende a acurácia absoluta estabelecida por Winefield, Crook e Beavan (2010).

Um aspecto importante está relacionado ao número de pontos necessários na obtenção da acurácia. Winefield, Crook e Beavan (2010) apresentam um procedimento metodológico que depende da discrepância (δ) entre a deformação atual e a interpolada. Para estimar o número de pontos que um “*patch*” triangulado requer para se obter esta acurácia, divide-se a área do ponto considerado ($d^2/4$) pela área abrangida por um ponto da triangulação ($0,75 d_{acc}^2$), obtendo-se o número aproximado de pontos de triangulação, ou seja, $d^2/(3 \cdot d_{acc}^2)$. No presente estudo, tanto este aspecto, quanto o da definição da acurácia relativa das coordenadas dos vértices da RRCM, não serão abordados integralmente, mas seguramente são recomendados como tema de pesquisas futuras.

- *3º Experimento-Análise da Deformação do marco TACI (M07) em relação aos marcos M01, M03, M04, M05 e M06 para coordenadas cartesianas (X,Y,Z)-3D*

De maneira similar ao procedimento realizado para o caso bidimensional (2D), para estimar os parâmetros de deformação em função das coordenadas geodésicas locais (e, n), pode-se realizar para a situação tridimensional (3D), com base nas coordenadas cartesianas (X, Y, Z), utilizando o Sistema Geodésico Local (SGL), de acordo com a subseção 3.6. Assim, utilizando-se do conceito de Caspary (2000) para representar a deformação da estrutura básica, tem-se:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & Y & Z \\ X & Y & Z \\ X & Y & Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix}. \quad (7.26)$$

Para este caso 3D, os parâmetros podem ser estimados com base no seguinte polinômio de primeira ordem, segundo Santos (1999):

$$u = u(X, Y, Z) = a_1(X_i - X_o) + a_2(Y_i - Y_o) + a_3(Z_i - Z_o) + a_o, \quad (7.27)$$

$$v = v(X, Y, Z) = b_1(X_i - X_o) + b_2(Y_i - Y_o) + b_3(Z_i - Z_o) + b_o, \quad (7.28)$$

$$w = w(X, Y, Z) = c_1(X_i - X_o) + c_2(Y_i - Y_o) + c_3(Z_i - Z_o) + c_o. \quad (7.29)$$

Para a RRCM de Taciba/SP, considerando-se cinco vértices vizinhos (M01, M03, M04, M05, M06) ao ponto analisado (M07), tem-se um conjunto de quinze equações a nove incógnitas, $(a_1, a_2, \dots, c_2, c_3)$, estabelecendo-se o sistema abaixo:

$$u(X_{M01}, Y_{M01}, Z_{M01}) = a_1(X_{M01} - X_{M07}) + a_2(Y_{M01} - Y_{M07}) + a_3(Z_{M01} - Z_{M07}) + a_o \quad (7.30)$$

$$v(X_{M01}, Y_{M01}, Z_{M01}) = b_1(X_{M01} - X_{M07}) + b_2(Y_{M01} - Y_{M07}) + b_3(Z_{M01} - Z_{M07}) + b_o \quad (7.31)$$

$$w(X_{M01}, Y_{M01}, Z_{M01}) = c_1(X_{M01} - X_{M07}) + c_2(Y_{M01} - Y_{M07}) + c_3(Z_{M01} - Z_{M07}) + c_o \quad (7.32)$$

.

.

.

$$u(X_{M06}, Y_{M06}, Z_{M06}) = a_1(X_{M06} - X_{M07}) + a_2(Y_{M06} - Y_{M07}) + a_3(Z_{M06} - Z_{M07}) + a_o \quad (7.33)$$

$$v(X_{M06}, Y_{M06}, Z_{M06}) = b_1(X_{M06} - X_{M07}) + b_2(Y_{M06} - Y_{M07}) + b_3(Z_{M06} - Z_{M07}) + b_o \quad (7.34)$$

$$w(X_{M06}, Y_{M06}, Z_{M06}) = c_1(X_{M06} - X_{M07}) + c_2(Y_{M06} - Y_{M07}) + c_3(Z_{M06} - Z_{M07}) + c_o \quad (7.35)$$

Que na forma matricial, são expressas por:

$$\begin{bmatrix} u(X_{M01}, Y_{M01}, Z_{M01}) \\ v(X_{M01}, Y_{M01}, Z_{M01}) \\ w(X_{M01}, Y_{M01}, Z_{M01}) \\ \vdots \\ u(X_{M06}, Y_{M06}, Z_{M06}) \\ v(X_{M06}, Y_{M06}, Z_{M06}) \\ w(X_{M06}, Y_{M06}, Z_{M06}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u(X_{M01}, Y_{M01}, Z_{M01})}{\partial a_1} & \dots & \frac{\partial u(X_{M01}, Y_{M01}, Z_{M01})}{\partial c_2} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial u(X_{M06}, Y_{M06}, Z_{M06})}{\partial a_1} & \dots & \frac{\partial u(X_{M06}, Y_{M06}, Z_{M06})}{\partial c_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ c_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_o \\ b_o \\ c_o \\ \vdots \\ a_o \\ b_o \\ c_o \end{bmatrix}, \quad (7.36)$$

ou seja,

$$\underline{d} = \underline{A} \underline{c} + \underline{t}. \quad (7.37)$$

Encontrando os seguintes parâmetros de deformação ($\underline{c}$) (Tabela 7.23).

Tabela 7.23 – Parâmetros (3D) de deformação ($\underline{c}$) para os marcos M07 e vizinhos (M01 a M06)

a1	$-9,02 \cdot 10^{-5}$
a2	$1,04 \cdot 10^{-4}$
a3	$5,03 \cdot 10^{-5}$
b1	$7,09 \cdot 10^{-5}$
b2	$-8,20 \cdot 10^{-5}$
b3	$-3,90 \cdot 10^{-5}$
c1	$2,76 \cdot 10^{-5}$
c2	$-3,19 \cdot 10^{-5}$
c3	$-1,52 \cdot 10^{-5}$

Aplicando-se o modelo linear de deformação para um ponto da RRCM, por ex., $P_i(X_i, Y_i, Z_i)$, tem-se:

$$\begin{bmatrix} \Delta_{X_i} \\ \Delta_{Y_i} \\ \Delta_{Z_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix}, \quad (7.38)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta_{X_i} \\ \Delta_{Y_i} \\ \Delta_{Z_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -9,02 \cdot 10^{-5} & 1,04 \cdot 10^{-4} & 5,03 \cdot 10^{-5} \\ 7,09 \cdot 10^{-5} & -8,20 \cdot 10^{-5} & -3,90 \cdot 10^{-5} \\ 2,76 \cdot 10^{-5} & -3,19 \cdot 10^{-5} & -1,52 \cdot 10^{-5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix}. \quad (7.39)$$

Seguindo o mesmo raciocínio desenvolvido para sistemas 2D, pode-se calcular o efeito do vetor deformação, para o ponto específico $P_i(X_i, Y_i, Z_i)$, ou seja, aplicando nas coordenadas da origem (150.000 m, 250.000 m) do STL e considerando a terceira componente como a associada à altitude média do terreno (NBR 13133/98), para a região Taciba/SP, variando de 378,6172 m a 447,5120 m (SANTOS et al., 2008), ou seja, uma

altitude média de aproximadamente 413 m, observa-se o seguinte impacto (considerando cinco casas decimais para ilustrar o referido impacto):

$$\begin{bmatrix} X'_o \\ Y'_o \\ Z'_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 150.000 \\ 250.000 \\ 413 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -9,02 \cdot 10^{-5} & 1,04 \cdot 10^{-4} & 5,03 \cdot 10^{-5} \\ 7,09 \cdot 10^{-5} & -8,20 \cdot 10^{-5} & -3,90 \cdot 10^{-5} \\ 2,76 \cdot 10^{-5} & -3,19 \cdot 10^{-5} & -1,52 \cdot 10^{-5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 150.000 \text{ m} \\ 250.000 \text{ m} \\ 413 \text{ m} \end{bmatrix}, \quad (7.40)$$

$$\begin{bmatrix} X'_o \\ Y'_o \\ Z'_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 150.000 \\ 250.000 \\ 413 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 12,44827 \\ -9,88664 \\ -3,83604 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 150.012,448 \text{ m} \\ 249.990,113 \text{ m} \\ 409,164 \text{ m} \end{bmatrix}. \quad (7.41)$$

Conclui-se que os efeitos nas coordenadas X, Y e Z são de aproximadamente +12,4 m, -9,9 m e -3,8 m, respectivamente, analogamente aos impactos encontrados na expressão 7.15, o que torna o procedimento ineficaz ao cálculo dos parâmetros de deformação.

- *4º Experimento - Análise da Deformação do marco TACI (M07) em relação às estações da rede IGS (BRAZ, BRFT, CHPI, UFPR, SAVO) e arquivos H-files do MIT para coordenadas cartesianas (X,Y,Z)-3D*

Com base nos resultados dos processamentos e combinações, encontram-se os seguintes parâmetros de deformação (Tabela 7.24).

Tabela 7.24 – Parâmetros (3D) de deformação para os marcos M07 e estações IGS

a1	$-2,53 \cdot 10^{-8}$
a2	$9,00 \cdot 10^{-8}$
a3	$-2,73 \cdot 10^{-9}$
b1	$-1,99 \cdot 10^{-8}$
b2	$-2,37 \cdot 10^{-9}$
b3	$8,57 \cdot 10^{-9}$
c1	$-1,56 \cdot 10^{-9}$
c2	$-2,99 \cdot 10^{-10}$
c3	$7,11 \cdot 10^{-10}$

Similar ao experimento anterior, pode-se calcular o efeito do vetor deformação, para o ponto específico nas coordenadas da origem (150.000 m, 250.000 m) do STL, observa-se o seguinte impacto (considerando cinco casas decimais para ilustrar o referido impacto):

$$\begin{bmatrix} X'_o \\ Y'_o \\ Z'_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 150.000 \\ 250.000 \\ 413 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -2,53 \cdot 10^{-8} & 9,00 \cdot 10^{-8} & -2,73 \cdot 10^{-9} \\ -1,99 \cdot 10^{-8} & -2,37 \cdot 10^{-9} & 8,57 \cdot 10^{-9} \\ -1,56 \cdot 10^{-9} & -2,99 \cdot 10^{-10} & -7,11 \cdot 10^{-10} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 150.000 \text{ m} \\ 250.000 \text{ m} \\ 413 \text{ m} \end{bmatrix}, \quad (7.42)$$

$$\begin{bmatrix} X'_o \\ Y'_o \\ Z'_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 150.000 \\ 250.000 \\ 413 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,01871 \\ -0,00357 \\ -0,00031 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 150.000,019 \text{ m} \\ 249.999,996 \text{ m} \\ 412,999 \text{ m} \end{bmatrix}. \quad (7.43)$$

Os impactos nas coordenadas X, Y e Z são de aproximadamente +1,87 cm, -0,36 cm e -0,031 cm, respectivamente.

Portanto, os resultados alcançados apontam para que seja uma recomendação na determinação dos parâmetros de deformação que os mesmos possam ser calculados com base em um marco geodésico de precisão da RRCM, em relação a estações IGS e com combinação de soluções globais.

7.5.2 Modelo temporal

Para o cálculo das deformações seculares (sub-sub-subseção 6.5.2.1), utiliza-se o modelo VEMOS2009, propagando-se as coordenadas para uma época específica e sujeitas a deformações em escala regional, p.ex., SIRGAS (DREWES e HEIDBACH, 2009). A interpolação proveniente do programa VEMOS2009 resulta em velocidades tridimensionais no Sistema ITRF2005. Os resultados obtidos com este aplicativo para o ponto M05, por exemplo, cujas coordenadas geocêntricas, latitude e longitude, em graus decimais, formato assumido no respectivo programa, equivalem a -22,390° e -51,290°, respectivamente, são: $V_x(\text{m/a}) = 0,0008$; $V_y(\text{m/a}) = -0,0052$ e $V_z(\text{m/a}) = 0,0111$.

Em virtude das velocidades estarem no Sistema ITRF2005 e as soluções do GLOBK no ITRF2000, torna-se necessário realizar a transformação entre estes sistemas, ou seja, do ITRF2000 (época de referência 1997) para ITRF2005 (época de referência 2000), seguindo as expressões disponibilizadas pelo *Institut Géographique National* (IGN, França) (<http://itrf.ensg.ign.fr/>):

$$X_2 = X_1 + T + DX_1 + RX_1, \quad (7.44)$$

$$T = \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{pmatrix}, \quad (7.45)$$

$$R = \begin{pmatrix} 0 & -R3 & R2 \\ R3 & 0 & -R1 \\ -R2 & R1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (7.46)$$

sendo T , D e R os parâmetros de translação, escala e rotação, respectivamente, entre os sistemas envolvidos.

As coordenadas obtidas com as expressões acima e os valores dos parâmetros disponibilizados em http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2005/tp_05-00.php são:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{t=2000,0}^{ITRF2005} = \begin{bmatrix} 3.690.147,540 \text{ m} \\ -4.604.317,992 \text{ m} \\ -2.414.374,818 \text{ m} \end{bmatrix}. \quad (7.47)$$

De acordo com Stanaway e Roberts (2012), as coordenadas decorrentes das deformações seculares são determinadas pela seguinte equação:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{t_1} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{t_0} + \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} (t_1 - t_0). \quad (7.48)$$

com estes elementos definidos na equação 6.16.

Substituindo as coordenadas transformadas em ITRF2005 e os valores das velocidades advindas do VEMOS2009, considerando as épocas de medição (28/08/2008 = 2008,66 anos) e de referência do ITRF2005 (2.000,0), tem-se:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{2008,66}^{ITRF2005} = \begin{bmatrix} 3.690.147,5405 \\ -4.604.317,9918 \\ -2.414.374,8180 \end{bmatrix}_{t=2000,0}^{ITRF2005} + \begin{bmatrix} 0,0008 \\ -0,0052 \\ 0,0111 \end{bmatrix}_{t=2000,0}^{ITRF2005} (2008,66 - 2000,0) \quad (7.49)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{2008,66}^{ITRF2005} = \begin{bmatrix} 3.690.147,547 \text{ m} \\ -4.604.318,037 \text{ m} \\ -2.414.374,722 \text{ m} \end{bmatrix}. \quad (7.50)$$

Com a inserção das deformações seculares, obtêm-se as coordenadas atualizadas do ponto M05 e, analogamente, para os outros pontos que constituem a RRCM.

7.5.3 Solução combinada (espacial e temporal)

Com relação às deformações espaciais (não-seculares) tratadas na sub-sub-subseção 6.5.2.2, Stanaway e Roberts (2012) consideram a deformação entre as épocas de referência e de medição, interpoladas de um modelo sísmico “patch”, ou, de um modelo de “strain”. Este último foi estimado, nesta pesquisa, em função dos parâmetros de deformação contidos na Tabela 7.24, obtendo-se para o ponto M05, os seguintes valores:

$$\begin{bmatrix} \Delta_{x_o} \\ \Delta_{y_o} \\ \Delta_{z_o} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2,53 \cdot 10^{-8} & 9,00 \cdot 10^{-8} & -2,73 \cdot 10^{-9} \\ -1,99 \cdot 10^{-8} & -2,37 \cdot 10^{-9} & 8,57 \cdot 10^{-9} \\ -1,56 \cdot 10^{-9} & -2,99 \cdot 10^{-10} & -7,11 \cdot 10^{-10} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 3690147,540 \text{ m} \\ -4604317,992 \text{ m} \\ -2414374,818 \text{ m} \end{bmatrix}. \quad (7.51)$$

Portanto, adicionando-se estes valores (deformação espacial) aos da atualização de coordenadas (deformação temporal) decorrentes da deformação secular, tem-se:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{2008,66}^{ITRF2005} = \begin{bmatrix} 3690147,5474 \\ -4604318,0369 \\ -2414374,7219 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0,501 \\ -0,083 \\ -0,003 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3690147,046 \text{ m} \\ -4604318,120 \text{ m} \\ -2414374,722 \text{ m} \end{bmatrix}. \quad (7.52)$$

A solução combinada de cada marco geodésico de apoio imediato da RRCM encontra-se na Tabela 7.25, no Sistema ITRF2005 (época 2008,66), considerando os dois modelos, espacial e temporal, tratados nesta pesquisa.

Tabela 7.25 – Coordenadas dos marcos geodésico de apoio imediato ITRF2005 (época 2008,66)

Marco	X (m)	Y (m)	Z (m)
M01	3690543,250	-4603757,070	-2414846,298
M03	3690515,541	-4604207,426	-2414082,705
M04	3690203,343	-4604290,036	-2414343,008
M05	3690147,046	-4604318,120	-2414374,725
M06	3689565,933	-4604516,953	-2415034,789
M07	3691008,476	-4604140,124	-2413585,115

Aplicando-se a solução combinada nos seis pontos da RRCM, obteve-se as coordenadas atualizadas (deformação temporal) e restabelecidas (deformação espacial), caracterizando a submissão da RRCM ao MGMD proposto nesta pesquisa.

A Figura 7.5 apresenta os vetores de deformação estimados neste estudo, da ordem de grandeza de aproximadamente 5,5 cm, notando que, a escala assumida para a representação destes é diferente da escala do mapeamento obtido por Santos et al. (2008).

Figura 7.5 – Vetores de deformação dos pontos da RRCM. Fonte: Adaptado de Santos et al. (2008).

7.6 Cadastro dinâmico – Solução para o restabelecimento de coordenadas

Conforme Jarroush e Even-Tzur (2007), exposto na subseção 5.4, no Cadastro Digital Legal (CDL), as questões pertinentes ao restabelecimento de coordenadas devem ser tratadas adotando-se um MGMD, que poderá mudar e atualizar as coordenadas, descrevendo corretamente a posição dos pontos limites para cada época. Os autores mencionam que o

estabelecimento do MGMD é de custo elevado, mas, que pode atender a outros propósitos como dos levantamentos geodinâmicos do país, por exemplo. Ainda abordam também as questões legais envolvidas com a adoção do Cadastro Dinâmico, já que, possíveis alterações nos limites das parcelas teriam consequências legais. Nesta pesquisa, esses aspectos do Cadastro Dinâmico não são investigados, o que exigiria a inserção do mesmo em mais de uma área do conhecimento. Desenvolveu-se aqui então, uma solução para restabelecimento das coordenadas dos limites das parcelas, adotando-se o MGMD apresentado na subseção 7.5.

As etapas a serem cumpridas, visando o restabelecimento de coordenadas seriam:

- iv. Determinar a acurácia absoluta das coordenadas dos vértices da RRCM, usando o 7º procedimento para o marco geodésico de precisão (sub-subseção 7.4.4).
- v. Verificar se a acurácia absoluta das coordenadas está dentro do padrão estabelecido (subseção 7.4). Se sim, não alterar a base de dados do Sistema Cadastral. Se não, seguir para a próxima etapa.
- vi. Estabelecer o MGMD adequado à situação vigente.
- vii. Recuperar na base de dados do Sistema Cadastral as coordenadas e os desvios-padrão do ponto analisado para a primeira época.
- viii. Submeter as coordenadas e seus desvios-padrão, da primeira época, ao MGMD, para o cálculo das coordenadas e seus desvios padrão, para a segunda época.

Conhecidos os parâmetros de deformação do MGMD, determinam-se as coordenadas e suas variâncias, para a segunda época, pela Lei de Propagação das Covariâncias (GEMAEL, 1994), conforme as equações 7.53 a 7.60.

$$e_1^{t_2} = e_1^{t_1} + a_1 e_1^{t_1} + a_2 n_1^{t_1}, \quad (7.53)$$

$$\sigma_{e_1^{t_2}}^2 = \Sigma_{e_1^{t_2}} = D(\Sigma_{a_1, a_2, e_1^{t_1}, n_1^{t_1}})D^T, \quad (7.54)$$

$$D = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_1^{t_2}}{\partial a_1} & \frac{\partial e_1^{t_2}}{\partial a_2} & \frac{\partial e_1^{t_2}}{\partial e_1^{t_1}} & \frac{\partial e_1^{t_2}}{\partial n_1^{t_1}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1^{t_1} & n_1^{t_1} & (1 + a_1) & a_2 \end{bmatrix}, \quad (7.55)$$

$$\Sigma_{a_1, a_2, e_1^{t_1}, n_1^{t_1}} = \begin{bmatrix} \sigma_{a_1}^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \sigma_{n_1^{t_1}}^2 \end{bmatrix}. \quad (7.56)$$

$$n_1^{t_2} = n_1^{t_1} + b_1 e_1^{t_1} + b_2 n_1^{t_1}, \quad (7.57)$$

$$\sigma_{n_1^{t_2}}^2 = \Sigma_{n_1^{t_2}} = D(\Sigma_{b_1, b_2, e_1^{t_1}, n_1^{t_1}})D^T, \quad (7.58)$$

$$D = \begin{bmatrix} \frac{\partial n_1^{t_2}}{\partial b_1} & \frac{\partial n_1^{t_2}}{\partial b_2} & \frac{\partial n_1^{t_2}}{\partial e_1^{t_1}} & \frac{\partial n_1^{t_2}}{\partial n_1^{t_1}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1^{t_1} & n_1^{t_1} & b_1 & (1 + b_2) \end{bmatrix}, \quad (7.59)$$

$$\Sigma_{b_1, b_2, e_1^{t_1}, n_1^{t_1}} = \begin{bmatrix} \sigma_{b_1}^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \sigma_{n_1^{t_1}}^2 \end{bmatrix}. \quad (7.60)$$

ix. Analisar as discrepâncias entre as coordenadas do ponto analisado para as épocas distintas e os desvios-padrão, obedecendo as seguintes considerações:

- Se estas discrepâncias não atendem o padrão estabelecido para a acurácia absoluta, mas os desvios-padrão das coordenadas do ponto analisado na segunda época atendem o respectivo padrão, as coordenadas na base de dados do Sistema Cadastral são alteradas.
- Se estas discrepâncias atendem o padrão estabelecido para a acurácia absoluta e os desvios-padrão das coordenadas do ponto analisado na segunda época atendem o respectivo padrão, as coordenadas na base de dados do Sistema Cadastral não são alteradas.
- Se estas discrepâncias atendem o padrão estabelecido para a acurácia absoluta, mas os desvios-padrão das coordenadas do ponto analisado na segunda época não atendem o respectivo padrão, um novo levantamento deve ser realizado e retornar à etapa ii.
- Se estas discrepâncias não atendem o padrão estabelecido para a acurácia absoluta, bem como os desvios-padrão das coordenadas do ponto analisado na segunda época, um novo levantamento deve ser realizado e retornar à etapa ii.

7.6.1 Exemplo de aplicação do modelo de cadastro dinâmico

Para exemplificar a aplicação do modelo de cadastro dinâmico da RRCM de Taciba/SP, utilizam-se as coordenadas obtidas do ponto M07, conforme Tabela 7.12, seguindo as etapas relacionadas na subseção 7.6:

- i. Determinar a acurácia absoluta das coordenadas dos vértices da RRCM, usando o 7º. procedimento para o marco geodésico de precisão (sub-subseção 7.4.4).

A acurácia absoluta das coordenadas dos vértices da RRCM de Taciba/SP, neste exemplo, é representada pela acurácia absoluta das coordenadas do M07 (conforme valores contidos na Tabela 7.12), o que equivale a 2,1 cm.

- ii. Verificar se a acurácia absoluta das coordenadas está dentro do padrão estabelecido (subseção 7.4).

Analisando o valor obtido (2,1 cm) com a acurácia estabelecida (15,0 cm), verifica-se que a mesma atende o valor estabelecido.

- iii. Estabelecer os parâmetros de deformação do MGMD, neste exemplo, os valores obtidos na Tabela 7.22 e reapresentados na Tabela 7.26.

Tabela 7.26 – Parâmetros de deformação do MGMD

a1	$7,48 \cdot 10^{-9}$
a2	$-1,05 \cdot 10^{-8}$
b1	$5,40 \cdot 10^{-9}$
b2	$-7,58 \cdot 10^{-9}$

- iv. Recuperar na base de dados do Sistema Cadastral as coordenadas e os desvios-padrão do ponto analisado para a primeira época. Neste exemplo, as coordenadas correspondem à origem do STL e os desvios padrão são obtidos no arquivo *globk_tacb_08241.org*. A Tabela 7.27 contém os respectivos valores, com cinco casas decimais para melhor ilustrar os efeitos da deformação do MGMD.

Tabela 7.27 – Coordenadas e desvios-padrão do ponto analisado na primeira época

	Coordenadas	Desvio-padrão
e ₁ (m)	150.000,00000	0,004
n ₁ (m)	250.000,00000	0,005

- v. Considerando os parâmetros de deformação do MGMD como os obtidos na Tabela 7.26 e as coordenadas e os desvios-padrão do ponto analisado, na primeira época, conforme Tabela 7.27, determinam-se as coordenadas e seus desvios-padrão (Tabela 7.28), para a segunda época, conforme as equações 7.53 a 7.60.

Tabela 7.28 – Coordenadas e desvios-padrão do ponto analisado na segunda época

	Coordenadas	Desvio-padrão
e_2 (m)	149.999,99850	0,04646
n_2 (m)	249.999,99891	0,04851

- vi. Analisar as discrepâncias (Δe , Δn) entre as coordenadas do ponto analisado para as épocas consideradas (Tabela 7.29).

Tabela 7.29 – Discrepâncias entre as coordenadas do ponto analisado

Δe (m)	-0,00150
Δn (m)	-0,00109

Quanto às discrepâncias entre as coordenadas (Δe , Δn) do ponto analisado para as épocas distintas, as mesmas não excedem o padrão estabelecido para a acurácia absoluta (15 cm). No que diz respeito aos desvios-padrão, o mesmo acontece, não sendo necessária a realização de um novo.

7.7 Fluxograma das etapas

Fazendo uma analogia ao fluxograma encontrado na subseção 5.4, contudo sem atentar para as questões legais dos Sistemas Cadastrais e realizando as adaptações cabíveis à proposta da pesquisa, o fluxograma das etapas a serem cumpridas para o restabelecimento das coordenadas é apresentado na Figura 7.6.

Figura 7.6 – Etapas para estabelecimento das coordenadas.

7.8 Considerações finais

Desenvolver um modelo de Cadastro Dinâmico e aplicá-lo em uma área experimental foi a proposta deste capítulo, permitindo a validação prática do mesmo.

Com o embasamento teórico necessário, inicialmente foram obtidos os dados da área de estudo eleita, da RRCM de Taciba/SP, por uma concessão do Departamento de Cartografia da FCT/UNESP e descritos os métodos, equipamentos e especificações técnicas empregados no levantamento cadastral.

A etapa seguinte compreendeu a determinação da acurácia absoluta das coordenadas do marco geodésico de precisão, com o intuito de estabelecer a acurácia absoluta da RRCM. Para tanto, fez-se uso de um aplicativo científico de processamento de dados GNSS e de estratégias que permitiram o processamento dos dados adotando injunções (finita e generalizada), com ou sem estações de referência e soluções globais, almejando sempre os resultados de menor desvio padrão. Tais estratégias foram empregadas em sete procedimentos, cujos resultados indicam para a sugestão de que o processamento de dados de uma RRCM com o objetivo de estabelecer a acurácia absoluta seja feito usando as soluções globais, como no 7º procedimento, cujos desvios padrão foram os menores, mas prevalecendo a condição de manter a robustez do sistema. Ficou assim, estabelecido um padrão de acurácia para a RRCM de estudo.

A próxima fase cumprida foi a análise da deformação da RRCM, assumindo-se o modelo de deformação espacial homogêneo, em função de quatro experimentos, onde o ponto analisado foi o marco geodésico de precisão (M07/TACI). Os dois primeiros analisam as deformações no espaço bidimensional, variando as estações de referência. Como resultado, obteve-se os parâmetros de deformação, com o segundo experimento (solução global e estações IGS) apresentando o menores impactos nas coordenadas analisadas. Analogamente, os outros dois experimentos implicaram na análise de deformação no espaço tridimensional, tendo como resultados satisfatórios para os impactos, o quarto experimento.

No que diz respeito à deformação temporal, utilizou-se o modelo VEMOS2009 que considera a velocidade constante, resultando no cálculo da deformação secular. Uma associação destes dois modelos na solução combinada foi aplicada e obteve-se assim, as coordenadas submetidas ao MGMD.

A etapa derradeira constou de uma solução para o restabelecimento de coordenadas, gerando uma sequência de ações que resultaram num modelo de Cadastro Dinâmico, considerando o dinamismo da superfície terrestre.

8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

8.1 Introdução

Quando a posição (coordenadas) de um ponto materializado na superfície terrestre é alterada, em decorrência de movimentos causados por fenômenos naturais (p.ex.: terremotos, tsunamis, deformações inter e intra placas litosféricas), exige do usuário deste ponto uma atualização no seu sistema de registro de títulos de propriedades, o qual se baseia nos monumentos com coordenadas estimadas e nas medições dos aspectos físicos e geométricos que definem os limites da sua parcela cadastral.

Assim, a formulação da implantação de um modelo de deformação (homogênea) para uma Rede de Referência Cadastral Municipal (RRCM) associada a um cadastro dinâmico, é a proposta do processo investigativo desta tese.

O objetivo fundamental desta tese foi atingido em função de etapas cumpridas com o intuito de alcançar os objetivos específicos. Assim, este capítulo consta de: conclusões parciais incluindo as etapas executadas para atingir os objetivos específicos; conclusões gerais vinculadas ao objetivo fundamental, incluindo as restrições do método desempenhado e contribuições almejadas e finalmente as recomendações que visam à continuidade deste e concepção de novos projetos sobre o tema investigado.

8.2 Conclusões parciais

O objetivo fundamental desta pesquisa visou conceber um modelo de Cadastro Dinâmico, que considerasse a movimentação espacial e temporal da RRCM, com a finalidade de restabelecer as coordenadas dos limites das parcelas. Desse modo, foram cumpridas etapas relacionadas aos objetivos específicos, que uma vez atingidos, propiciaram o alcance do objetivo fundamental, descritas a seguir.

Na primeira etapa, planejou-se a determinação de um padrão de acurácia para a RRCM, já que com base na revisão bibliográfica sobre o assunto, não foram encontrados padrões de acurácia para RRCM no Brasil, empenhando um caráter inovador à pesquisa. O

uso de programas científicos (GAMIT e GLOBK) no processamento e análise da acurácia da RRCM, também tem o mesmo caráter, já que tratam de efeitos sistemáticos não tratados normalmente em aplicativos comerciais. Ainda nesta etapa, constou da idealização e a execução de sete procedimentos para a obtenção da acurácia da RRCM, onde adota-se um valor de quinze centímetros como referência para estimar a acurácia absoluta da RRCM.

A área de estudo destinada à investigação científica desta pesquisa é constituída pelo conjunto de pontos materializados no município de Taciba/SP (SANTOS et al., 2008), o qual estabelece a estrutura básica do sistema de referência cadastral, ou seja, a Rede de Referência Cadastral Municipal (RRCM). Para a análise da acurácia absoluta das coordenadas do marco geodésico de precisão (M07, denominado nos processamentos por TACI), localizado na caixa d'água principal da SABESP, em Taciba/SP, realizaram-se sete procedimentos, conforme descritos na sub-subseção 7.4.4, com dois tipos de injunções (finita e generalizada), diferentes estações de referência (OURI, PPTE, ROSA, BRAZ, CHPI) e combinando soluções disponibilizadas pelo MIT (H-files). Com base nos resultados obtidos (Tabelas 7.6 a 7.12), obteve-se o desvio padrão resultante para cada procedimento (Tabela 8.1). O uso de soluções globais na estabilização do sistema de referência é uma estratégia, até então, pouco explorada.

Tabela 8.1 – Análise da acurácia absoluta das coordenadas do M07 (TACI)

Procedimento	Desvio padrão resultante (cm)
1º	2,1
2º	2,0
3º	94,7
4º	45,5
5º	32,2
6º	2,7
7º	2,0

Analisando os valores apresentados na Tabela 8.1, tem-se que o segundo procedimento (injunção generalizada com as estações de referência OURI, PPTE, ROSA) obteve o menor valor do desvio padrão resultante (0,020 m). As discrepâncias entre o primeiro e o segundo procedimentos (0,14 mm) e entre o sétimo e o segundo procedimentos (0,52 mm) são menores do que um (1) milímetro. Deve-se destacar a solução do sétimo procedimento, que combina soluções do MIT (H-files) com as soluções do experimento realizado nesta pesquisa. O MIT processa, aproximadamente, 300 estações IGS, contidas em seis sub-redes com 50 estações IGS cada uma. Assim, a solução obtida no sétimo procedimento é, de fato, uma solução global, pois as MVCs dos processamentos realizados pelo MIT para cada sub-rede são combinadas com a MVC do experimento. Tanto o segundo

procedimento quanto o sétimo são realizados com inunção generalizada, onde se constatou pelos resultados da estabilização do sistema (quarta iteração), com a combinação das soluções do experimento com as do MIT, conforme Quadro 7.8, p.ex., que 28 estações foram utilizadas pelo programa GLOBK para estimar translação e rotação. Com base nestes resultados, optou-se como estratégia de processamento e combinação pela inunção generalizada e combinação de soluções do MIT. As coordenadas cartesianas e os desvios-padrão das estações que compõe a RRCM, os marcos geodésicos de apoio imediato (M01, M03, M04, M05, M06) e de precisão (M07/TACI), estão, respectivamente, nas Tabelas 7.14 e 7.15. Com base nos resultados obtidos, obtém-se o desvio padrão resultante para cada marco geodésico (Tabela 8.2).

Tabela 8.2 – Análise da acurácia absoluta das coordenadas dos marcos geodésicos

Marco geodésico	Desvio padrão resultante (cm)
M01/241	48,5
M03/241	20,6
M04/242	33,0
M05/242	66,2
M06/241	50,4
TACI/241	1,6
TACI/242	2,9

Somente as coordenadas do marco geodésico de precisão (TACI) tem acurácia absoluta inferior a quinze centímetros (15 cm), atendendo o indicado por Winefield, Crook e Beavan (2010). Este fato pode ser um indicador de que os padrões precisão dos levantamentos cadastrais devem ser revistos. Dentre as coordenadas dos marcos geodésicos de apoio imediato, o M03 tem acurácia absoluta inferior a 21 cm; o maior valor obtido foi no M05 com, aproximadamente, 66 cm. Ressalta-se que a estratégia utilizada nesta pesquisa, ou seja, com inunção generalizada e combinando soluções globais do MIT, para fins de implantação de RRCM no Brasil, é inédita, mediante as literaturas consultadas durante esta pesquisa.

A etapa seguinte foi destinada á definição de um modelo de deformação espacial, averiguando-se os modelos existentes, características e áreas de aplicação, e a constatação de que os mesmos não são aplicados em RRCM. Dentre os modelos existentes, optou-se pelo modelo *strain*, caracterizado pelo condicionamento de uma deformação homogênea na área, como uma primeira investigação para a análise do comportamento da superfície e seu efeito nas coordenadas dos pontos.

Visando a determinação dos parâmetros de deformação advinda de simulações, foram implementados experimentos com diferentes tipos de grades de deformação (regulares e

irregulares), considerando o ponto analisado em diferentes localizações (no centro da grade, próximo ao centro da grade, externamente/internamente à área de abrangência da grade). Dos resultados obtidos em cada simulação (Tabelas 6.6, 6.9, 6.13, 6.16), é possível estabelecer padrões de grandezas a serem assumidas para essas deformações e aplicá-las em casos reais.

Ainda, nesta etapa, foram projetados e implementados quatro experimentos visando o cálculo dos parâmetros de deformação do modelo espacial escolhido, com dados reais da RRCM de Taciba/SP. Os dois primeiros experimentos trataram com as coordenadas (bidimensionais) no sistema geodésico local, analisando as componentes norte (*n*) e este (*e*). Os outros dois experimentos analisam as coordenadas (tridimensionais) geodésicas cartesianas (*X,Y,Z*). Os parâmetros de deformação do ponto M07 foram estimados nos dois primeiros experimentos e estão contidos nas Tabelas 7.19 e 7.22, respectivamente. Aplicando estes valores nas coordenadas da origem do Sistema Topográfico Local (STL), observou-se as seguintes discrepâncias (*DX, DY*), conforme Tabela 8.3, entre os impactos causados nas respectivas coordenadas:

Tabela 8.3 – Impactos da deformação espacial (2D) na RRCM

Experimento	DX (m)	DY (m)
1º.	7,7000	-4,3000
2º.	-0,0025	-0,0021

Pode-se concluir, destes dois primeiros experimentos, que na estratégia para estimar os parâmetros de deformação espacial da RRCM, recomenda-se a inserção de estações IGS (BRAZ, CHPI), que é o caso do segundo experimento, onde se obteve discrepâncias inferiores a um milímetro. No primeiro experimento, as estações utilizadas para estimar os parâmetros de deformação são as que pertencem à RRCM (M01, M03, M04, M05, M06), proporcionando discrepâncias (absolutas) superiores a seis metros. Novamente aqui é sugerida a revisão dos procedimentos seguidos da NBR 14166 para levantamentos cadastrais.

O terceiro experimento utilizou as mesmas estações da RRCM para estimar os parâmetros de deformação do M07 (Tabela 7.23). O quarto experimento, considera, além das estações BRAZ e CHPI, mais três estações IGS (BRFT, UFPR, SAVO), em virtude da necessidade de, no mínimo, cinco estações para estimar os nove parâmetros de deformação (Tabela 7.24). De forma análoga às análises realizadas nos dois primeiros experimentos, aplicam-se os valores obtidos nas coordenadas da origem do STL, observando-se as seguintes discrepâncias (*DX, DY, DH*), conforme Tabela 8.4, entre os impactos causados nas respectivas coordenadas:

Tabela 8.4 – Impactos da deformação espacial (3D) na RRCM

Experimento	DX (m)	DY (m)	DH (m)
3°.	12,4483	-9,8866	-3,8360
4°.	0,0187	-0,0036	-0,0003

A conclusão, destes dois últimos experimentos na análise de deformação espacial (3D) da RRCM, apontou para a sugestão do uso de estações IGS para estimar os parâmetros de deformação, onde se obtém discrepâncias absolutas da ordem de 1,9 cm em X, 0,3 cm em Y e 0,03 cm em H (altitude média do terreno). Quando se utilizou os valores decorrentes das estações da RRCM, as discrepâncias, em valor absoluto, são superiores a 3 m em H, 9 m em Y e 12 m em X.

Enfatiza-se, aqui, que a deformação espacial do marco geodésico de precisão foi determinada com base nos marcos de apoio imediato e nas estações da RBMC e do IGS.

Além da movimentação espacial da RRCM, tratou-se, também, da temporal. Dentre os modelos revisados, optou-se pela adoção de um modelo de velocidade constante, pois, no caso brasileiro, os pontos que materializam as parcelas estão distantes dos limites das placas litosféricas. A velocidade da estação da RRCM é estimada com base no modelo VEMOS2009, que é um modelo consagrado e adequado à situação brasileira. As soluções obtidas com este programa estão no Sistema ITRF2005.

O desempenho do modelo temporal foi testado, aplicando-se o modelo para um ponto e considerando a época de aquisição dos dados. Assim, para o ponto M05, estimou-se a velocidade com o programa VEMOS2009, cujas soluções estão no Sistema ITRF2005. As soluções do GLOBK estão no Sistema ITRF2000. Portanto, houve necessidade de realizar uma transformação entre os respectivos Sistemas. Posteriormente, atualizaram-se suas coordenadas do ponto considerado, conforme equação 7.50. Em decorrência da área de abrangência da RRCM de Taciba/SP ser de aproximadamente de 3 km², considera-se o mesmo modelo temporal para as estações pertencentes a esta rede.

Combinando as soluções dos modelos espacial e temporal para um ponto específico da RRCM, considerando a deformação entre as épocas de referência e de medição, interpoladas com base no modelo de “strain”, e adicionando a estes valores os obtidos com o modelo temporal, obtêm-se as coordenadas de cada marco geodésico de apoio imediato da rede de referência cadastral analisada. No caso de Taciba/SP, os valores das coordenadas dos marcos geodésicos de apoio imediato e de precisão estão contidos na Tabela 7.25, no sistema ITRF2005 (época 2008,66). A Tabela 8.5 apresenta as discrepâncias entre os valores obtidos por Santos et al. (2008) (Tabela 7.13) e os provenientes desta pesquisa (Tabela 7.25).

Tabela 8.5 – Discrepâncias entre as coordenadas dos marcos geodésicos da RRCM de Taciba/SP obtidas por Santos et al. (2008) e com a modelagem espacial e temporal

Marco geodésico	DX (m)	DY (m)	DZ (m)
M01	-27,771	-450,313	763,376
M03	-789,710	-439,349	-376,382
M04	339,900	532,962	-503,521
M05	59,521	28,507	35,323
M06	581,246	198,814	659,751
M07	-1442,276	-376,749	-1449,959

A Tabela 8.6 apresenta as discrepâncias entre os valores obtidos com o GLOBK sem realizar a modelagem espacial e temporal (Tabela 7.14) e os provenientes desta pesquisa com as respectivas modelagens (Tabela 7.25).

Tabela 8.6 – Discrepâncias entre as coordenadas dos marcos geodésicos da RRCM de Taciba/SP obtidas com o GLOBK (Tabela 7.14) e com a modelagem espacial e temporal

Marco geodésico	DX (cm)	DY (cm)	DZ (cm)
M01	-2,6	4,9	-9,6
M03	-2,6	4,9	-9,6
M04	-2,6	4,9	-9,6
M05	-2,6	4,9	-9,6
M06	-2,6	4,9	-9,6
M07	-2,6	4,9	-10,2

Das discrepâncias obtidas, têm-se valores absolutos inferiores, aproximadamente, de 3 cm para X, 5 cm para Y e 10 cm para Z.

Na última etapa, tratou-se da elaboração de um método de restabelecimento das coordenadas do Sistema Cadastral, levando em conta a deformação espacial causada pela movimentação da superfície terrestre. Este modelo foi inspirado no da subseção 5.4, a qual trata do CDL. Neste último, a acurácia das coordenadas é pré-estabelecida e os aspectos legais são apreciados. Uma adequação do modelo pesquisado à realidade encontrada nos CTMs brasileiros foi concebida, inserindo ações como cálculo da acurácia absoluta das coordenadas dos vértices da RRCM e estabelecimento de padrões para as discrepâncias de coordenadas em diferentes épocas. Caracterizando, em fim, procedimentos inéditos da pesquisa.

8.3 Conclusões gerais

Partindo-se da hipótese levantada, concluiu-se que é possível modelar as deformações (espacial e temporal) e aplicá-las no Sistema Cadastral, por intermédio do método desenvolvido nesta pesquisa.

Os experimentos realizados contribuíram sobremaneira com o estabelecimento de procedimentos para a determinação de padrões, no caso de acurácia absoluta e discrepâncias, e a imposição de restrições quanto ao tipo de injunção, à seleção de estações de referência e soluções globais ao de processamento de dados GNSS idealizado e implantado. Assim, para estimar a acurácia da RRCM, confirmou-se que a escolha pela injunção do tipo generalizada gera soluções com aprimoramento dos valores dos desvios-padrão das estações de referência. Da mesma forma que o uso de estações IGS e soluções globais também corroboram para a melhoria dos resultados da acurácia absoluta das coordenadas dos vértices da RRCM.

As simulações e as aplicações com dados reais de modelos de deformações (espacial e temporal) comprovam que é possível determinar o restabelecimento das coordenadas das estações de uma RRCM, quando se monitora movimentações na respectiva rede.

O modelo de *strain* considerado é válido para deformações homogêneas, o que restringe seu uso quando movimentações não possuem esta mesma propriedade.

O modelo temporal considerado nesta pesquisa se utiliza de velocidades constantes e isto pode limitar a aplicação em áreas cuja dinâmica não permite tal restrição.

Esta pesquisa aborda um assunto até então desconsiderado no Brasil, que é o Cadastro Dinâmico no sentido de considerar as movimentações espaciais e temporais nas coordenadas das estações de referência da RRCM que se propagam para os limites das parcelas cadastrais.

Como as questões relativas aos CTMs são tratadas tanto no âmbito científico quanto na sociedade de uma maneira geral, anseia-se que esta pesquisa contribua com ambos.

8.4 Recomendações

As principais recomendações são:

- Testar em outras RRCMs os procedimentos e experimentos, com a finalidade de estabelecer comparações, padrões de acurácia e de parâmetros de deformação.
- Averiguar a possibilidade de inserção destes procedimentos e experimentos em aplicativos computacionais, destinados à gestão municipal (por ex. SIGs), atendendo não só a comunidade científica, como também a sociedade de uma maneira geral.
- Testar outros modelos para estimar os parâmetros de deformação, p.ex., modelo de elementos finitos e de colocação por mínimos quadrados.
- Recomendar a aplicação do MGMD, apresentada neste trabalho, para atender a Lei 12.608 de 10 de abril de 2012, a qual trata da Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC) e que dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil (SINPDEC) e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil (CONPDEC), autorizando a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres, conforme o seguinte link: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12608.htm.
- Investigar padrões de acurácia e novos procedimentos para a implantação de RRCMs.

REFERÊNCIAS²

AMORIM, A.; SOUZA, G. H. B.; DALAQUA, R. R. Uma metodologia alternativa para a otimização da entrada de dados em sistemas cadastrais. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 56, n.1, p. 47-54, 2004.

AMORIM, A.; CAMARGO, P. O.; MIYASHITA, P. M. Avaliação do potencial das imagens quickbird ortorretificadas para o mapeamento das propriedades localizadas na área de expansão e vazios urbanos. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 16, n. 3, p. 456-474, 2010.

ANTUNES, A. F. B. A.; BRANDALIZE, M. C. B. **Cadastro Técnico e Planejamento Urbano (parte 1)**. Curitiba: Engenharia Cartográfica 30 anos, 2009. Disponível em: <<http://people.ufpr.br/~felipe/parte1.pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13133**: Execução de Levantamento Topográfico. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14166**: Rede de Referência Cadastral Municipal – Procedimento. Rio de Janeiro, 1998.

BENNETT, R.; RAJABIFARD, A.; KALANTARI, M.; WALLACE, J.; WILLIAMSON, I. Cadastral futures: building a new vision for the nature and role of cadastres. In: FIG CONGRESS, 2010, Sidney, Australia. **Proceedings of Facing the Challenges – Building the Capacity**. Sidney: Fédération Internationale des Géomètres, 2010.

BLACHUT, J.T.; CHRZANOSKI, A.; SAASTAMOJNEN, J.H. **Urban surveying and mapping**. New York: Springer Verlag, 1979.

BLICK, G. The geodetic infrastructure in Australia and New Zealand: differences and similarities. In: FIG CONGRESS, 2010, Sidney, Australia. **Proceedings of Facing the Challenges – Building the Capacity**. Sidney: Fédération Internationale des Géomètres, 2010.

² De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6023.

BLICK, G.; GRANT, D. Possibility of a dynamic cadastre for a dynamic nation. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ABOUT ADVANCES IN POSITIONING AND REFERENCE FRAMES OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION OF GEODESY, 118., 1997, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rio de Janeiro: IAG, 1997, p. 107-113.

BLICK, G.; ROWE, G. Progress towards a new geodetic datum for New Zealand. **Journal of the New Zeland Institute of Surveyors**, n. 287, p. 255-29, 1997.

BLICK, G.; BEAVAN, J.; CROOK, C.; DONNELLY, N. **The impact of the 2010 Darfield (Canterbury) Earthquake on the Geodetic Infrastructure in New Zealand**. International Federation of Surveyors. FIG, Article of the Month. 2011. 12 p.

BOSCATTO, F.; OLIVEIRA, F. H. Cartografia Cadastral Urbana e os Certificados de Potencial Adicional de Construção – CEPAC. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO, COBRAC 2006, 2006, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: UFSC. p. 1-8.

BRANDÃO, A. C. **Cadastro Territorial**. Disponível em: <<http://www.geodesia.ufba.br/Arquivos/ENG763%202008.ppt>>. Acesso em: 27 set. 2009.

_____. **O princípio da vizinhança geodésica no levantamento cadastral de parcelas territoriais**. 2003. 128p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 23/04/2003.

BRANDÃO, A. C.; SANTOS FILHO, A.V. Sistema de cadastro territorial georreferenciado em áreas urbanas. **VeraCidades**, v. 3, p. 1-27, 2008.

BRASIL. Lei n. 6.766, de 19 de dezembro de 1979. Dispõe sobre o Parcelamento do Solo Urbano e dá outras Providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 20 dez. 1979. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L6766.htm>. Acesso em: 10 out. 2010.

BRASIL. **Ministério das Cidades**: Portaria N. 511, de 7 de dezembro de 2009. Dispõe sobre as diretrizes para a criação, instituição e atualização do Cadastro Técnico Multifinalitário (CTM) nos municípios brasileiros. Publicada no Diário Oficial da União – Seção 1, n. 234, p.75, 8 dez. 2009.

ÇAGDAS, V.; STUBKJAER, E. Doctoral research on cadastral development. **Land Use Policy**, Elsevier, out. 2008. doi:10.1016/j.landusepol.2008.10.012.

CALAIS, E. **Terrestrial Reference System and Frame: Datum transformations.**

Disponível em: <http://web.ics.purdue.edu/~ecalais/teaching/gps_geodesy/>. Acessado em: 01 nov. 2010.

CARNEIRO, A. F. T. **Uma proposta de reforma cadastral visando a vinculação entre Cadastro e Registro de Imóveis.** 2000. 88 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós_Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

_____. Cadastro e registro de imóveis em áreas rurais e urbanas: a Lei 10.267/2001 e experiências nos municípios de São Paulo e Santo André. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 53/01, p. 73-81, 2001.

_____. Cartografia Cadastral. In: SEMINÁRIO REGIONAL SUDESTE “DIRETRIZES NACIONAIS PARA O CADASTRO TERRITORIAL MULTIFINALITÁRIO”, 2010. **Programa Nacional de Capacitação das Cidades.** Vila Velha: Ministério da Cidade, 2010.

CARNEIRO, A.; ERBA, D.A.; AUGUSTO, E.A.A. Cadastro multifinalitário 3D: conceitos e perspectivas de implantação no Brasil. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 64/2, p. 257-271, 2012.

CASPARY, W. F. **Concepts of network and deformation analysis.** Monograph 11. Sydney: Ed. School of Geomatic Engineering, University of New South Wales, 2000. 183 p.

CHEN, Y. Q. **Analysis of Deformation Survey: A Generalized Method.** Technical Report 94., Fredericton: Ed. Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick, 1983. 262 p.

CHYZANOWSKI, A.; CHEN, Y. Q.; SECORD, J. M. On the strain analysis of tectonic movements using fault-crossing micro-geodetic surveys. **Tectonophysics**, n. 97, p. 297-315, 1983.

CPRM/SGB – COMPANHIA DE PESQUISA E RECURSOS MINERAIS/SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Ministério de Minas e Energia: Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. **Seleção de municípios críticos a deslizamentos:** nota explicativa. Rio de Janeiro: CPRM, out. 2011.

CRAIG, B. A.; WAHL, J. L. Cadastral Survey Accuracy Standards. **Surveying and Land Information Science**, v. 63, n. 2, p. 87-106, 2003.

DALAUQA, R. R.; AMORIM, A.; FLORES, E. F. Utilização de métodos combinados de avaliação imobiliária para a elaboração da planta de valores genéricos. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 16, n. 2, p. 232-252, 2010.

DANTAS, Y. M. V. **Diretrizes para a integração do Cadastro Nacional de Imóveis Rurais – CNIR com o Cadastro Estadual Florestal de Imóveis Rurais – CEFIR e sua implicação no processo de averbação da Reserva Legal, no âmbito da Lei No. 10.267/01**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2009.

DENYS, P.; WINEFIELD, R.; JORDAN, A. Incorporing localized deformation events in dynamic datums. In: FIG WORKING WEEK 2007. **Proceedings of Strategic Integration of Surveying Services**. Hong Kong: SAR, 2007.

DONG, D.; HERRING, T. A.; KING, R. W. Estimating regional deformation from a combination of space and terrestrial geodetic data. **Journal of Geodesy**, n. 72, p. 200-214, 1998.

DONNELLY, N.; AMOS, M. Implemetation of a New Survey Control Standard for New Zealand. In: FIG CONGRESS, 2010, Sidney, Australia. **Proceedings of Facing the Challenges – Building the Capacity**. Sidney: Fédération Internationale des Géomètres, 2010.

ENGEFOTO – Engenharia de Geomática e Engenharia de Transportes. **Bases Cartográficas para Cadastramentos Urbanos e Rurais**. Curitiba: ENGEFOTO, 2012. Disponível em: <<http://www.engefoto.com.br/visualizar/133/bases-cartograficas-para-cadastramentos-urbanos-e-rurais>>. Acesso em: 20 jan. 2012.

ERBA, D. A.; OLIVEIRA, F. L.; LIMA JUNIOR, P. N. (Org.) **Cadastro multifinalitário como instrumento de política fiscal e urbana**. Rio de Janeiro, 2005.

EFFENBERG, W. **Spatial Cadastral Information Systems: The maintenance of digital cadastral maps**. Ph.D. (Doctor of Philosophy) – Department of Geomatics, University of Melbourne, Melbourne, 2001.

FERNANDES, V. O.; LOCH, R. E. N. Proposta para padronização da cartografia cadastral urbana em meio digital. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 59/03, p. 280-287, 2007.

FERNANDEZ, C. El sistema de información catastral español. Situación actual y estrategias de renovación informática y telemática. **Revista CT/Catastro**, n. 48, p. 31-48, 2003.

FERREIRA, A. B. H. **Dicionário Aurélio Básico da Língua Portuguesa**. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1988. 687 p.

GEMAEL, C. **Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas**. Curitiba: Ed. UFPR, 1994. 319 p.

GRANT, D. B.; PEARSE, M. Proposal for a dynamic national geodetic datum for New Zealand. In: IUGG, XXI, 1995, Boulder, Colorado. **Proceedings of IUGG XXI General Assembly**. Boulder: International Union of Geodesy and Geophysics, 1995. p. 01-17.

HENSSEN, J. L. G.; WILLIAMSON, I. P. Land registration, cadastre and interaction – a world perspective. In: FIG XIX CONGRESS, 1990, Helsinki, Finland. **Proceedings...** Helsinki: FIG, 1990. p. 14-43. Disponível em: <http://www.csdila.unimelb.edu.au/publication/misc/anthology/article/artic5.htm>. Acesso em: 5 jul. 2010.

HERRING, T. A. Reference Frame Realization. In: WORKSHOP MONTSERRAT VOLCANO OBSERVATORY, 2012, Montserrat. **Anais eletrônicos...** Montserrat: MVO, 2012. Disponível em: < <http://www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgk/Montserrat12/Index.htm> >. Acesso em 03 fev. 2012.

HERRING, T. A.; KING, R.W.; MCCLUSKY, S. C. **Introduction to GAMIT/GLOBK**. Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences. Massachusetts Institute of Technology. 2010.

IAAO - INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ASSESSING OFFICERS. **Standard on Digital Cadastral Maps and Parcel Identifiers**. Chicago, 2004.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Especificações e Normas Gerais para Levantamentos Geodésicos em território brasileiro**. Resolução do Presidente: R.PR – 22/1983, de 21/7/1983. Rio de Janeiro, 1983.

_____. **Especificações e Normas Gerais para Levantamentos GPS: versão preliminar**. Resolução do Presidente: R.PR – 5/1993, de 31/3/1993. Rio de Janeiro, 1993.

_____. **Noções Básicas de Cartografia**. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **Resolução de São Paulo**. Rio de Janeiro, 2003

_____. **Altera a caracterização do Sistema Geodésico Brasileiro.** Resolução do Presidente: R.PR – 1/2005, de 25/2/2005. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **IBGE divulga as estimativas populacionais dos municípios em 2012.** Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_visualiza.php?id_noticia=2204&id_pagina=1>. Acesso em: 08 set. 2012.

JARROUSH, J.; EVEN-TZUR, G. Constructive solid geometry as the basis of 3D future cadastre. In: FIG WORKING WEEK 2004, 2004, Atenas, Grécia. **Proceeding...** Athens: Fédération Internationale des Géomètres, 2004. p. 22-27.

JARROUSH, J., EVEN-TZUR, G. The need for a dynamic cadastre system in the modern digital legal cadastre. **Geomatica**, v. 61, n. 1, p. 9-18, 2007.

KAUFMANN, J.; STEUDLER, D. **Cadastre 2014: a vision for a future cadastral system.** 1998.

KUANG, S. **Geodetic network analysis and optimal design: concepts and applications.** Michigan: Ann Arbor Press, 1996.

LARSSON, G. **Land registration and cadastral systems.** 1991.

LIMA, O.P. **Proposta metodológica para o uso do Cadastro Técnico Multifinalitário na Avaliação de Impactos Ambientais.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Florianópolis, 147 p. 1999.

LINZG65700 – LAND INFORMATION NEW ZEALAND. **Interpretation guide to Rules for Cadastral Survey.** Disponível em: <<http://www.linz.govt.nz/>>. Acessado em: 07 ago. 2010.

LOCH, C. **Cadastro Técnico Multifinalitário Rural e Urbano.** Florianópolis, UFSC, 1998.

LOCH, C. A. Realidade do Cadastro Técnico Urbano no Brasil. In: SEMINÁRIO SOBRE LOS CATASTROS LATINOAMERICANOS EN INTERNET. **Anais...** Lisboa, 2007.

LOCH, C.; ERBA, E. **Cadastro Técnico Multifinalitário: rural e urbano.** Cambridge: Lincoln Institut of Land Policy, 2007.

LOCH, R. E. N. **Cartografia: representação, comunicação e visualização de dados espaciais**. Florianópolis: Editora UFSC. 2006, 314 p.

MAVRANTZA, O. D.; ARGIALAS, D. P. Identification of urban features using object-oriented image analysis. In: Photogrammetric Image Analysis, PIA07, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, XXXVI, 2007, Munich. **Proceedings...** Munich: ISPRS, 2007, p. 101-106.

McCARTHY, D. D. **IERS Standards**, IERS Technical Note 13. Paris: Observatoire de Paris, 1992.

MIYASHITA, P. M. **Avaliação de uma metodologia de baixo custo para o cadastro de propriedades em áreas de expansão e vazios urbanos**. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente, 2008.

MONICO, J. F. G.; SILVA, H. A. **Adequação de softwares comerciais à Lei 10.267/2001**. Relatório de iniciação científica, 2006. Disponível em: gege.prudente.unesp.br/downloads.

MONICO, J. F. G.; POZ, A. P. D.; GALO, M.; SANTOS, M. C.; OLIVEIRA, L. C. Acurácia e precisão: revendo os conceitos de forma acurada. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 15, n. 3, 2009.

MOURA, E. M. **Análise do papel do cadastro multifinalitário no processo de legalização de imóveis urbanos**. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007

OOSTERON, P. J. M. et al. The core cadastral domain model. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 30, n. 5, 2006.

PELEGRINA, M.A. **Diagnóstico para a gestão do Imposto Predial e Territorial Urbano**. 2009. 99p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

PIRES, A. A. C. Registro de imóveis, cancelamento e bloqueio de matrícula. **Boletim Eletrônico IRIB**, n. 1779, 2005.

RAMOS, F. R.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. **Territórios Digitais Urbanos**. In: ALMEIDA, C. M., CÂMARA, G., MONTEIRO, A. M. V., Geoinformação em Urbanismo: Cidade Real x Cidade Virtual. Oficina de Textos, São Paulo, 2007.

ROBINSON, A. H. et al. **Elements of Cartography**. Estados Unidos, 6 ed. 1995.

ROCHA, R. S. Algumas considerações sobre as Projeções Cartográficas utilizadas no Brasil para Mapeamentos em grandes Escalas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO, COBRAC 98, 1998, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: UFSC. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/397086/023>>. Acesso em: 12 fev. 2010.

RUTLEDGE, D. Accuracy versus Precision. **GPS World**, may 2010.

SANTOS, M. C. **Estabilidade das estruturas geodésicas**. Curitiba: UFRPR, 1999. 79 p.

SANTOS, A. S.; CRUZ, A. C.; ANDRADE JUNIOR, D. A.; CAMPOS, L. O. F. **Elaboração do Cadastro Territorial Multifinalitário da cidade de Taciba – SP**. 2008. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Cartográfica) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, UNESP, Presidente Prudente, 2008.

SEGANTINE, P. C. L. **Estudo do sinergismo entre os sistemas de informação geográfica e o de posicionamento global**. Tese (Livre-Docência) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

SKELTON, R. A. **Maps: a historical survey of their study and collecting**. University of Chicago Press, 1972. 138 p.

SOKOLNIKOFF, L. S. **Mathematical theory of elasticity**. New York: McGraw-Hill, 1956.

SOLER, T.; HOTHEM, L. D. Coordinate systems used in geodesy: basic definitions and concepts. **Journal of Surveying Engineering**, v. 114, n. 2, p. 84-97, 1988.

SOUZA, G. H. B. **Método de modelagem da parcela espacial para o cadastro tridimensional**. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente, 2011. 96 p.

STANAWAY, R.; ROBERTS, C.; BLICK, G.; CROOK, C. Four Dimensional Deformation Modelling, the link between International, Regional and Local Reference Frames. In: FIG WORKING WEEK 2012, Roma, Itália. **Proceeding...** Roma: Fédération Internationale des Géomètres, 2012.

STEINBERG, G.; EVEN-TZUR, G. A state-of-the-art national grid based on the permanent GPS stations of Israel. In: FIG WORKING WEEK 2004, 2004, Atenas, Grécia. **Proceeding...** Athens: Fédération Internationale des Géomètres, 2004.

TEIXEIRA, N. N. **Análise geodésica de deformações da crosta em regiões de grandes barragens a partir de deslocamentos tridimensionais obtidos pelo sistema de posicionamento global.** Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

VARGAS, M. **Metodologia da pesquisa tecnológica.** Rio de Janeiro, Ed. Globo, 1985.

WALLACE, J. **Modern cadastre and land administration.** Centre for SDIs and Land Administration, Department of Geomatics, The University of Melbourne, 2009.

WINEFIELD, R.; CROOK, C.; BEAVAN, J. The application of a localized deformation model after an earthquake. In: FIG CONGRESS, 2010, Sidney, Australia. **Proceedings of Facing the Challenges – Building the Capacity.** Sidney: Fédération Internationale des Géomètres, 2010.

APÊNDICE

TRECHO DO ARQUIVO SH_GAMIT.LOG

Input options -expt tacb -d 2008 241 sh_gamit.log

Processing 2008 241 GPS week 1494 4 Using node: chaves Started at: 12_06_25_00:21:37

Processing directory: /home/chaves/tacb/241

Disk Usage: 916627 Free 158025 Mbyte. Used 86%

Number of stations used 4 Total xfiles 4

Postfit RMS rms, total and by satellite

RMS IT Site All 02 03 04 05 06 07 08 09 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 32

RMS 20 ALL 6.5 61 62 82 0 58 0 69 64 68 73 76 61 66 33 87 31 54 67 68 58 67 66 62 0 55 61 62 73 56 67

Best and Worst two sites:

RMS 20 OUR1 5.4 5 5 7 0 5 0 6 6 6 5 7 5 5 3 6 3 4 7 6 5 6 5 5 0 5 5 5 0 4 5

RMS 20 TACI 5.4 0 5 0 0 5 0 0 0 0 0 0 0 5 0 6 0 4 7 0 6 3 0 5 0 0 0 0 7 8 9

RMS 20 PPTE 6.8 6 6 7 0 6 0 6 7 8 7 8 6 7 4 10 3 6 7 7 6 7 7 0 6 6 6 8 6 7

RMS 20 ROSA 7.6 7 7 10 0 7 0 8 7 7 9 0 7 8 0 11 0 6 6 8 6 8 8 7 0 6 7 7 0 6 7

Double difference statistics

Prefit nrms: 0.65998E+00 Postfit nrms: 0.21991E+00

Prefit nrms: 0.65767E+00 Postfit nrms: 0.22172E+00

Prefit nrms: 0.65998E+00 Postfit nrms: 0.21968E+00

Prefit nrms: 0.65767E+00 Postfit nrms: 0.22149E+00

Number of double differences: 8262

Phase ambiguities (Total WL-fixed NL-fixed): 58 58 57 AUTCLN (Total Expected) 58 58

Phase ambiguities WL fixed 100.0% NL fixed 98.3%

List of sites updated in the tables lfile. based on adjustments to coordinates > .3 m in the Prefit Solution

TACI GEOC LAT 0.5272

TACI GEOC LONG -0.3973

TACI RADIUS -0.4941

Processing 2008 241 GPS week 1494 4 Using node: chaves Finished at: 12_06_25_00:22:36

TRECHO DO ARQUIVO H-FILE

```

GAMIT H-file Version 2.0
Parallel Q-file: qtacba.241
SOLVE version: 10.42 2010/11/04 13:00 (Linux)
Running time: 2012/ 6/25  0:22:35
Owner: MIT Operator: chaves
M-file name: mtacba.241
Datum: geocentric coordinates
Models: SP E-rot IERS96  7 SE-tide IERS03 23 O-load FES2004E 3 Atm-load      0 Atm-tide      0 Hydrol-load      0
Atm models: DryMap GMFH WetMap GMFW
      user soln diff phase constraints biases      parameters      h-file
keys: DEFLT FULL DBLE LC NOION NOATM FREE STN NOORB ZEN NOCLK GLR NOEOP GRD
Assumed stn obs errors OURI PPTE ROSA TACI
Assumed elev model: elev elev elev elev
Assumed con std dev mm: 3.6 3.6 5.6 1.4
Assumed elv std dev mm: 3.7 4.9 5.1 5.4
Assumed sat obs errors  2  3  4  5  6  7  8  9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
25 26 27 28 29 30 32
Assumed std dev mm:  0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
Assumed ionosphere error: 0.0 mm + 0.00 ppm
Number of sessions: 1
Number of stations: 4
Number of svcs: 30
Ephemeris files:
  1 tigsf8.241      Tabular ephemeris file generated from gigsf8.241      25-6-2012 0:21:54 15
Name of track stations  Obs Receiver type  Serial number  Rcvr swver  Ant type  Dome  Serial number
1 OURI OURI      7846 TRIMBLE NETRS  -Unknown-    TRM 1.20 TRM41249.00 +UNKN
2 PPTE PRESIDENTE P 14854 TRIMBLE NETRS  4427235643    TRM 1.20 TRM41249.00 +NONE 12379370
3 ROSA ROSA      8822 TRIMBLE NETRS  4650K03473    TRM 0.00 TRM55971.00 +NONE 30336552
4 TACI TACI      1526 TPS HIPER_GGD  8QVBK4URHM    TPS 0.00 TPSHIPER_GGD +UNKN 000
Data files:
      code  C-file      Offset(U,N,E for ARP  Offset(U,N,E for L1)  Offset(U,N,E for L2)  Ant mod  Elev cut  Num Zen
Atm load (N E U mm)  Hydro load (N E U mm)
1 OURI couric.241      0.0080 0.0000 0.0000 0.0633 -0.0001 0.0006 0.0654 -0.0001 0.0004 IGS05_1602 AZEL 10.0 13
0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00

```

TRECHO DO ARQUIVO GLORG

Globk Analysis

```
+++++
+ GLORG      Version 5.16 +
+++++
```

Stabilization with 50.0% constant, 50.0% site dependent weighting.

Delete sites with 2.5-sigma condition.

Height variance factor 10.00 Position, 10.00 Velocity

For Position: Min dH sigma 0.0050 m; Min RMS 0.0030 m, Min dNE sigma 0.00050 m

For Velocity: Min dH sigma 0.0050 m/yr; Min RMS 0.0030 m/yr, Min dNE sigma 0.00010 m/yr

Sigma Ratio to allow use: Position 3.00 Velocity 3.00

Starting Position stabilization iteration 1 L0808281200_tacb.glx

For 48 sites in origin, min/max height sigma 6.37 19.80 mm; Median 8.49 mm, Tol 15.00 mm L0808281200_tacb.glx

Position system stabilization results

```
-----
X Rotation (mas) -0.02426 +- 0.05562 Iter 1 L0808281200_tacb.glx
Y Rotation (mas) 0.10145 +- 0.05239 Iter 1 L0808281200_tacb.glx
Z Rotation (mas) 0.94736 +- 0.05555 Iter 1 L0808281200_tacb.glx
X Translation (m) 0.00079 +- 0.00159 Iter 1 L0808281200_tacb.glx
Y Translation (m) -0.00618 +- 0.00165 Iter 1 L0808281200_tacb.glx
Z Translation (m) 0.01007 +- 0.00161 Iter 1 L0808281200_tacb.glx
Condition Sigmas used 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000
```

Sites and relative sigmas used in stabilization

```
VILL_4PS 1.00 MAS1_3PS 1.00 BRFT_3PS 1.00 CHPI_GPS 1.00 BRAZ_2PS 1.00 KELY_2PS 1.00
STJO_6PS 1.00 KOUR_3PS 1.00 OHI3_GPS 1.00 OHI2_GPS 1.00 CRO1_3PS 1.00 SCH2_2PS 1.00
BOGT_5PS 1.00 SCUB_2PS 1.00 MANA_2PS 1.00 NLIB_GPS 1.00 CHUR_5PS 1.00 DUBO_4PS 1.00
MDO1_3PS 1.00 PIE1_5PS 1.00 YELL_4PS 1.00 THTI_2PS 1.00 KOKB_5PS 1.00 CHAT_2PS 1.00
AUCK_2PS 1.00 MCM4_3PS 1.00 TSKB_4PS 1.00 USUD_3PS 1.00 YAKT_5PS 1.00 DAEJ_GPS 1.00
SHAO_4PS 1.00 IRKT_GPS 1.00 NRIL_GPS 1.00 IISC_2PS 1.00 SELE_2PS 1.00 POL2_2PS 1.00
```