

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**INVESTIGAÇÕES METODOLÓGICAS SOBRE O
MONITORAMENTO DA SUBSIDÊNCIA DO SOLO
DEVIDO À EXTRAÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA –
CASO DA REGIÃO METROPOLITANA DE RECIFE**

Orientadores:

Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral
Prof. Dr. Gerd Günter Seeber

Co-orientadores:

Prof. Dr. Ivaldo Dário da Silva Pontes Filho
Profa. Dra. Verônica Maria Costa Romão

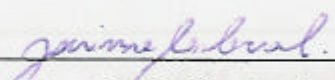
Recife, PE, Brasil

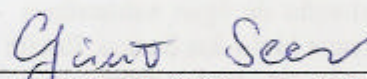
INVESTIGAÇÕES METODOLÓGICAS SOBRE O MONITORAMENTO DA SUBSIDÊNCIA DO SOLO DEVIDO À EXTRAÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA – CASO DA REGIÃO METROPOLITANA DE RECIFE

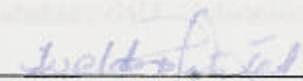
SYLVANA MELO DOS SANTOS

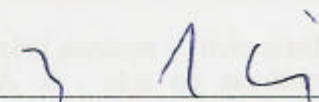
TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DO PROGRAMA
DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE FEDERAL
DE PERNAMBUCO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por:

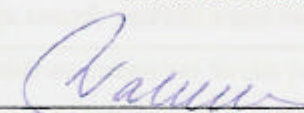

Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral

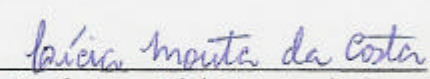

Prof. Dr. Prof. H.c. Gerd Günter Seeber


Prof. Dr. Ivaldo Dário da Silva Pontes Filho


Prof. Dr. José Luiz Albuquerque Filho


Prof. Dr. Tarcísio Ferreira Silva


Prof. Dr. Waldir Duarte Costa


Profa. Dra. Licia Mouta da Costa

Recife, PE, Brasil

Agosto de 2005

Santos, Sylvana Melo dos .

Investigações metodológicas sobre o monitoramento da subsidência do solo devido à extração de água subterrânea - caso da Região Metropolitana de Recife / Sylvana Melo dos Santos. Recife : O Autor, 2005.
xxviii, 231 p. : il., fig., graf. e fotos.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Engenharia Civil, 2005.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia civil – recursos hídricos. 2. GPS – Sistema de Posicionamento Global -Subsidência do solo . 3. Águas subterrâneas – extração – Região Metropolitana do Recife. I. Título.

624

CDD (22.ed.)

UFPE .
BCTG/2006-003

A Deus.

*Aos meus queridos Pais,
ao meu amado marido e aos meus queridos irmãos,
onde eu encontrei forças para chegar até aqui,
dedico todas as páginas deste trabalho.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me mostrar a melhor maneira para superar os momentos difíceis.

Aos meus amados pais, João Noé e Neríndice, pelo amor, pelo grande apoio, pelos ensinamentos, pela compreensão de minha ausência, pelo exemplo de força de vontade e integridade que demonstraram toda vida, e pelo sempre constante incentivo em todos os momentos. Sei que poucos na vida conhecem a felicidade de ter pais assim, sem vocês eu não teria chegado até aqui. Esse trabalho é um sonho de vocês também.

Ao meu amado marido e melhor amigo, Eduardo agradeço de forma muito especial pelo carinho, pelo amor, pela compreensão e pelo companheirismo nas horas difíceis, e por sempre ter me encorajado. A realização desse trabalho não é apenas minha, mas com certeza uma vitória nossa.

À toda a minha família, em especial aos meus queridos irmãos Roberto, Eduardo, João Carlos e à minha querida irmã Sandra, ao meu cunhado Josafá, à minha cunhada Wilter, aos meus tios e tias e ao meu sogro Guillermo, pela eterna torcida.

Ao professor e orientador Jaime Cabral, pela orientação deste trabalho, pela dedicação e empenho na realização dos trabalhos, pelo grande apoio recebido e pela amizade.

Ao professor Gerd Günter Seeber, pela orientação e pelos grandes ensinamentos, pela paciência, pela acolhida e pelas condições de trabalho, cuja colaboração foi fundamental no desenvolvimento desta tese.

Ao professor Ivaldo Pontes Filho, pela orientação, pelo constante incentivo, pelo apoio e pela amizade.

À professora Verônica Romão, pela orientação, por todo o conhecimento transmitido, pela paciência e pela inestimável ajuda em momentos tão decisivos.

Ao professor Jürgen Müller pela oportunidade de realizar os experimentos em excelentes condições de trabalho que me foram proporcionadas do *Institut für Erdmessung* da Universidade de Hannover.

Ao colegas Olaf Bielenberg pela grande contribuição na realização dos experimentos e pela ajuda com os processamentos, e Olga Gitlein e Insa Wolf pelo carinho e pela prestatividade.

Aos meus amigos, Maria Odete Mariano, Raimundo Ferreira, Thaisa Alcoforado, Luis e Claudia Temporal, Lorival e Stela Fucale pelos momentos de descontração, pela amizade e pelo apoio.

À Sra Gisela Seeber pelo carinho e pela atenção constante em minha estada em Hannover.

À “família Hannoverina” (Pablo, Fafá, Geovana, Giorgio, Herculano e Sandro) pelas grandes risadas, pelos momentos divididos e pelos domingos em “família”. Aos demais colegas encontrados na Alemanha, de várias nacionalidades, pelos momentos de angústias, descobertas, saudades e alegrias, que passamos juntos.

Aos demais professores, funcionários e colegas da UFPE (Grupo de Recursos Hídricos e Geotecnia) em especial Clebenilson e Leidjane por tornarem o ambiente de trabalho tão agradável, e do *Institut für Erdmessung* da Universidade de Hannover pelo convívio e pela amizade.

À professora Maria do Carmo Sobral pelo grande incentivo em realizar parte dos estudos na Alemanha. Aos professores Leonardo Guimarães e Lícia Costa pela ajuda com o programa CODE_BRIGHT.

Ao CNPq, à CAPES e ao DAAD pelo suporte financeiro.

INVESTIGAÇÕES METODOLÓGICAS SOBRE O MONITORAMENTO DA SUBSIDÊNCIA DO SOLO DEVIDO À EXTRAÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA – CASO DA REGIÃO METROPOLITANA DE RECIFE

SYLVANA MELO DOS SANTOS

Orientadores: Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral, Gerd Günter Seeber, Ivaldo Dário da Silva Pontes Filho e Verônica Maria Costa Romão

RESUMO¹:

A subsidência do solo é um fenômeno preocupante que consiste no rebaixamento da superfície do terreno devido à remoção de fluido do subsolo e conseqüente redução da capacidade de suporte. Vários centros urbanos contabilizam prejuízos devido à ocorrência de subsidência. Existem registros de casos na literatura científica, em um grande número de países, relacionados com a exploração demasiada dos recursos hídricos subterrâneos em aquíferos sedimentares e cársticos, e alguns estudos, inclusive, já vêm acompanhando o fenômeno por dezenas de anos.

Neste trabalho foi analisada a utilização do Sistema de Posicionamento Global (GPS) como instrumento de monitoramento de pequenos deslocamentos verticais da superfície do solo, como os experimentados quando na ocorrência inicial de subsidência. A utilização do GPS, com grande precisão, como estratégia de acompanhamento para verificação de tais ocorrências, uma vez implantada a infra-estrutura necessária, permite a realização de monitoramento com os levantamentos de campo, com mais rapidez e menores custos.

Inicialmente, apresenta-se uma revisão dos conhecimentos relacionados com a subsidência do solo devido à exploração de água subterrânea, como tipos de ocorrência, casos investigados no mundo e ferramentas que podem ser utilizadas para investigação do processo físico. Apresenta-se, também, uma descrição da área de estudo no bairro de Boa Viagem na Região Metropolitana do Recife – RMR sobre os aspectos climatológicos, geológicos, hidrogeológicos e de exploração da água subterrânea por poços.

Em seguida, apresenta-se uma revisão dos conhecimentos relacionados com os métodos geodésicos para o monitoramento da subsidência do solo e descrevem-se os

¹ Tese apresentada para a obtenção do grau de Doutor em Ciências pelo Programa de Engenharia Civil da UFPE em Agosto de 2005

experimentos realizados na Alemanha para controle de altitude utilizando equipamentos e técnicas GPS de alta precisão. Os resultados desses experimentos são discutidos e, com base nas conclusões, ao final do trabalho, propõe-se uma rede de monitoramento da subsidência do solo para a área de Boa Viagem na RMR, utilizando os pontos objeto instalados durante a realização dessa pesquisa.

MONITORING METHODOLOGY FOR SOIL SUBSIDENCE DUE TO GROUNDWATER EXPLOITATION - CASE STUDY IN RECIFE METROPOLITAN REGION

SYLVANA MELO DOS SANTOS

Advisors: Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral, Gerd Günter Seeber, Ivaldo Dário da Silva Pontes Filho and Verônica Maria Costa Romão

ABSTRACT²:

Soil subsidence is a serious phenomenon that consists in ground settlement caused by fluid removal from the soil and underneath layers with reduction of the soil support capacity. Several metropolitan regions have damage due to subsidence occurrence. Many countries have registered subsidence cases due to groundwater overexploitation in sedimentary and carst aquifers, and in some research projects these studies have been carried out for several decades.

Within this investigation the Global Positioning System (GPS) was studied to be used for monitoring of small ground settlement, as the settlements occurred in soil at the beginning of land subsidence. The use of high precision GPS as a monitoring strategy for verifying the soil subsidence occurrence, once the necessary infra-structure has been totally established, allows a faster and cheaper monitoring than topographic survey techniques.

A topical review related to soil subsidence due to groundwater exploitation is presented in this work, including occurrence types, investigated cases around the world and tools for investigation of the physical phenomenon. A description about the study area, located at Boa Viagem area in Recife city, is given and topics related to climate of the region, to geology, to hydrogeology and to groundwater exploitation are explained.

It follows a topical review at geodetic methods that are applied for monitoring soil subsidence. Two experiments realized in Germany for the height control using high precision GPS are described. The results are analysed in detail and provide an important basis for the implantation of a monitoring network for soil subsidence in Boa Viagem, in the Recife Metropolitan Region.

² Thesis submitted in August 2005 to Department of Civil Engineering of UFPE. A partial fulfillment of the requirement for the degree of Doctor of Science.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	XII
ÍNDICE DE TABELAS.....	XVIII
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XIX
LISTA DE SIGLAS	XXVII
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	- 1 -
1.1 RELEVÂNCIA DO TEMA.....	- 1 -
1.2 OBJETIVOS	- 3 -
1.2.1 Objetivo Geral	- 3 -
1.2.2 Objetivos Específicos	- 3 -
1.3 METODOLOGIA	- 3 -
1.4 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS	- 5 -
CAPÍTULO 2 - SUBSIDÊNCIA DO SOLO	- 7 -
2.1 INTRODUÇÃO.....	- 7 -
2.2 TIPOS DE SUBSIDÊNCIA.....	- 8 -
2.3 SUBSIDÊNCIA EM AQÜÍFEROS CÁRSTICOS	- 13 -
2.4 SUBSIDÊNCIA EM AQÜÍFEROS SEDIMENTARES	- 15 -
2.5 CASOS DE SUBSIDÊNCIA NO MUNDO	- 17 -
2.5.1 Casos de subsidência na América do Norte	- 18 -
2.5.2 Casos de subsidência na Ásia e Nova Zelândia	- 21 -
2.5.3 Casos de subsidência na Europa	- 26 -
2.6 CASOS DE SUBSIDÊNCIA NO BRASIL	- 27 -
2.7 COMENTÁRIOS FINAIS	- 29 -
CAPÍTULO 3 - SUBSÍDIOS PARA ANÁLISE DA POSSIBILIDADE DE RISCO DE SUBSIDÊNCIA.....	- 30 -
3.1 INTRODUÇÃO.....	- 30 -
3.2 FATORES QUE CONTRIBUEM PARA O AUMENTO DA POSSIBILIDADE DE RISCO DE SUBSIDÊNCIA.....	- 31 -
3.3 ROTEIRO PARA O LEVANTAMENTO DA SUSCEPTIBILIDADE À SUBSIDÊNCIA	- 33 -
3.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE A SIMULAÇÃO NUMÉRICA.....	- 35 -
3.4.1 Considerações sobre o fluxo da água	- 35 -
3.4.2 Relações Constitutivas.....	- 40 -
3.4.3 Modelo Constitutivo Hidráulico.....	- 40 -
3.4.4 Modelos Constitutivos Mecânicos	- 45 -
3.4.5 Programas computacionais aplicados à análise de subsidência	- 56 -
3.5 COMENTÁRIOS FINAIS	- 61 -
CAPÍTULO 4 - DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	- 64 -
4.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	- 64 -
4.2 ASPECTOS CLIMÁTICOS	- 64 -
4.3 GEOLOGIA E ESTRATIGRAFIA	- 66 -
4.3.1 Embasamento Cristalino.....	- 66 -
4.3.2 Bacias Sedimentares Cretáceas	- 67 -
4.3.3 Grupo Barreiras	- 68 -
4.3.4 Sedimentos Quaternários	- 69 -
4.4 HIDROGEOLOGIA	- 69 -

4.5 SEÇÕES LITOLÓGICAS	- 72 -
4.5.1 Seção litológica S1	- 73 -
4.5.2 Seção litológica S2	- 74 -
4.5.3 Seção litológica S3	- 75 -
4.6 ABASTECIMENTO POR POÇOS	- 76 -
4.7 COMENTÁRIOS FINAIS	- 85 -
CAPÍTULO 5 - MÉTODOS GEODÉSICOS PARA O MONITORAMENTO DA SUBSIDÊNCIA DO SOLO	- 86 -
5.1 CONCEITOS GEODÉSICOS BÁSICOS.....	- 86 -
5.1.1 Introdução	- 86 -
5.1.2 A posição de um ponto na superfície da Terra	- 87 -
5.1.3 Determinação da altitude ortométrica	- 90 -
5.1.4 Altitudes elipsoidais ou Altura geométrica	- 92 -
5.2 O SISTEMA DE POSICIONAMENTO GLOBAL (GPS).....	- 93 -
5.2.1 Introdução	- 93 -
5.2.2 Influência dos Erros e Precisão	- 97 -
5.2.3 Posicionamento Relativo	- 111 -
5.2.4 Determinação das Ambigüidades	- 114 -
5.3 ANÁLISE DE DEFORMAÇÃO	- 116 -
5.3.1 Ajustamento	- 116 -
5.3.2 Teste da hipótese linear	- 119 -
5.3.3 Testes estatísticos para análise de deformação	- 121 -
5.3.4 Localização da deformação	- 122 -
CAPÍTULO 6 - USO DO GPS NO MONITORAMENTO DA SUBSIDÊNCIA DO SOLO. -	- 125 -
6.1 DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS	- 125 -
6.1.1 Experimento 1	- 125 -
6.1.2 Experimento 2	- 128 -
6.2 PROCESSAMENTO DAS OBSERVAÇÕES	- 131 -
6.2.1 Software GEONAP	- 131 -
6.2.2 Estratégia utilizada no processamento	- 133 -
6.3 DETERMINAÇÃO DAS ALTITUDES COM GPS	- 133 -
6.3.1 Experimento 1	- 134 -
6.3.1.1 Solução padrão GPS	- 134 -
6.3.1.2 Análise do tempo de observação	- 135 -
6.3.1.3 Análise do comprimento da linha de base	- 137 -
6.3.1.4 Análise do número de estações de referência	- 140 -
6.3.1.5 Comparação com altitudes ortométricas	- 149 -
6.3.2 Experimento 2	- 152 -
6.3.2.1 Solução padrão GPS	- 152 -
6.3.2.2 Análise do tempo de observação	- 155 -
6.3.2.3 Análise da distância até a estação de referência	- 158 -
6.3.2.4 Análise do número de estações de referência	- 162 -
6.3.2.5 Análise da limitação na capacidade de detecção de deslocamentos verticais sub-centimétricos	- 170 -
6.3.2.6 Análise de obstrução	- 172 -
6.3.3 Resumo	- 183 -
6.4 ANÁLISE DE DEFORMAÇÃO	- 186 -
6.4.1 Software PANDA	- 187 -
6.4.2 Resultados da análise de deformação	- 188 -
CAPÍTULO 7 - DISCUSSÃO SOBRE UMA REDE DE CONTROLE PARA RECIFE.....	- 191 -

7.1 INTRODUÇÃO.....	- 191 -
7.2 ESTUDOS ANTERIORES	- 191 -
7.3 ESTABELECIMENTO DE UMA REDE DE REFERÊNCIA GPS	- 193 -
7.3.1 Conceitos Básicos.....	- 193 -
7.3.2 As Estações de Referência	- 193 -
7.3.3 Os Pontos Objeto	- 197 -
7.3.4 Planejamento da Rede de Monitoramento.....	- 205 -
CAPÍTULO 8 - SÍNTESE CONCLUSIVA.....	- 210 -
8.1 CONCLUSÕES	- 210 -
8.1.1 Geologia e Hidrogeologia	- 210 -
8.1.2 Gestão dos recursos hídricos na área de estudo.....	- 211 -
8.1.3 Simulação numérica	- 211 -
8.2 SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS.....	- 214 -
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	- 216 -

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Classificação da subsidência de acordo com a origem do fenômeno.	- 8 -
Figura 2.2: Importância da informação sobre a subsidência do solo.	- 8 -
Figura 2.3: Diferentes tipos de aquíferos de acordo com a porosidade.	- 11 -
Figura 2.4: Tipos de aquíferos de acordo com a pressão de água	- 12 -
Figura 2.5: Esquema de um aquífero cárstico.	- 14 -
Figura 2.6: Modelo conceitual dos mecanismos de subsidência.	- 14 -
Figura 2.7: Colapso em aquífero cárstico.	- 15 -
Figura 2.8: Aquífero sedimentar não-confinado	- 16 -
Figura 2.9: Aquífero sedimentar confinado.	- 16 -
Figura 2.10: Colapso em Sete Lagoas, em Minas Gerais, no ano de 1988	- 28 -
Figura 2.11: Colapso em Cajamar, em São Paulo, no ano de 1986	- 28 -
Figura 3.1: Bloco de controle ilustrando as condições de contorno.	- 37 -
Figura 3.2: Curvas de retenção típicas.	- 44 -
Figura 3.3: Estado crítico.	- 48 -
Figura 3.4: Superfície de plastificação.	- 49 -
Figura 3.5: Relação entre as tensões de pré-adensamento.	- 50 -
Figura 3.6: Relação entre as tensões de pré-adensamento.	- 51 -
Figura 3.7: Superfícies de escoamento no espaço (p, q, s)	- 54 -
Figura 3.8: Esquema do perfil considerado na simulação.	- 58 -
Figura 3.9: Malha de elementos finitos adotada	- 59 -
Figura 3.10: Distribuição de pressão de água, valores em MPa.	- 59 -
Figura 3.11: Vetores de fluxo mostrando o bombeamento do aquífero inferior.	- 60 -
Figura 3.12: Deslocamentos verticais nas proximidades do poço bombeado.	- 61 -
Figura 4.1: Localização da área de estudo.	- 64 -
Figura 4.2: Médias mensais de precipitação, evaporação e insolação na Estação Meteorológica do Recife.	- 65 -
Figura 4.3: Médias mensais de temperatura na Estação Meteorológica do Recife, para 30 anos de dados.	- 65 -
Figura 4.4: Mapa Hidrogeológico de Recife e adjacências, com a posição aproximada do lineamento Pernambuco.	- 67 -
Figura 4.5: Diagrama esquemático dos aquíferos Beberibe, Cabo e Boa Viagem.	- 71 -
Figura 4.6: Localização das seções litológicas analisadas.	- 73 -
Figura 4.7: Seção Litológica S1, no bairro de Boa Viagem, direção oeste-leste.	- 74 -

Figura 4.8: Seção Litológica S2, no bairro de Boa Viagem, na direção oeste-leste	- 74 -
Figura 4.9: Seção Litológica S3, no bairro de Boa Viagem, na direção oeste-leste	- 75 -
Figura 4.10: Poços perfurados na RMR até o ano de 2002 - informações do banco de dados HIDROREC II – Costa et al. (2002)	- 76 -
Figura 4.11: Gráfico do crescimento populacional da Região Metropolitana do Recife.	- 77 -
Figura 4.12: Precipitação anual de 1994 a 2001- informações do banco de dados HIDROREC II – Costa et al. (2002).....	- 77 -
Figura 4.13: Frequência de profundidade dos poços cadastrados - informações do banco de dados HIDROREC II – Costa et al. (2002).	- 78 -
Figura 4.14: Comparação entre as superfícies potenciométricas dos aquíferos Beberibe e Cabo na Planície do Recife, entre os períodos de 1988/1991.....	- 79 -
Figura 4.15: Comparação entre as superfícies potenciométricas dos aquíferos Beberibe e Cabo na Planície do Recife, entre os períodos de 1998/2001.....	- 80 -
Figura 4.16: Mapa de Zoneamento Explotável dos Aquíferos Beberibe, Cabo, e Barreiras na Região do Projeto HIDROREC II	- 81 -
Figura 4.17: Ampliação do Mapa Potenciométrico do Aquífero Cabo na Zona “A” de Boa Viagem.	- 82 -
Figura 4.18: Foto da praia urbana de Boa Viagem	- 83 -
Figura 4.19: Trecho da RMR do Recife que compreende a área de Boa Viagem.	- 84 -
Figura 4.20: Mapas da área de Boa Viagem.	- 84 -
Figura 5.1: A posição de um ponto P sobre a superfície da Terra definida por suas coordenadas geodésicas.....	- 87 -
Figura 5.2: Relação entre as altitudes e as superfícies de referência.	- 89 -
Figura 5.3: Ilustração das técnicas de nivelamento.	- 92 -
Figura 5.4: Sistema GPS.	- 93 -
Figura 5.5: Localização das estações de monitoramento e <i>Master Control Station</i>	- 95 -
Figura 5.6: Fluxo de dados para determinação das efemérides transmitidas.	- 95 -
Figura 5.7: Principais componentes de um receptor GPS.	- 97 -
Figura 5.8: Esquema de montagem de uma antena <i>choke ring</i>	- 105 -
Figura 5.9: Soluções que alteram o efeito do PCV no posicionamento.	- 108 -
Figura 5.10: Variação da discrepância média na altitude, com relação à solução padrão, durante um período de 24 horas.	- 110 -
Figura 5.11: Estações da RBMC, situação em 2004.	- 113 -
Figura 5.12: Observações derivadas.....	- 114 -

Figura 5.13: Diferença entre as altitudes com ambigüidades fixas e sem ambigüidades fixadas em diferentes períodos de observação.....	- 116 -
Figura 6.1: Mapa de localização da região montanhosa de Harz destacando a posição de todas as estações, móveis e fixa.....	- 126 -
Figura 6.2: Foto da antena TRIMBLE modelo TRM33429.20+GP TCWD e da estação da rede SAPOS 0651 localizada em Harz (http://www.lgn.de/produkte/sapos/sender/station/cl.htm - acessada em 18 de agosto de 2004).	- 127 -
Figura 6.3: Foto da antena TRIMBLE modelo TRM33429.20+GP.	- 127 -
Figura 6.4: Cronograma de estações observadas de 20 a 24 de outubro de 2003.	- 127 -
Figura 6.5: Distribuição espacial das estações utilizadas no experimento 1.....	- 128 -
Figura 6.6: Fotos do receptor ASHTECH modelo Z-XII.....	- 129 -
Figura 6.7: Disposição das antenas utilizadas no experimento 2.	- 129 -
Figura 6.8: Cronograma das observações realizadas entre 10 e 21 de setembro de 2004.	- 130 -
Figura 6.9: Estações de referência localizadas no Estado da Niedersachsen (Alemanha).- ...	- 130 -
Figura 6.10: Variação da altitude da antena msd2 para simulação da subsidência.....	- 131 -
Figura 6.11: Desvio padrão das coordenadas referentes à solução padrão do experimento 1- ...	- 135 -
Figura 6.12: Discrepância média em altitude para diferentes períodos de observação.....	- 136 -
Figura 6.13 Desvio padrão na altitude com diferentes períodos de observação.	- 136 -
Figura 6.14: Estações utilizadas na análise sobre comprimento da linha de base.	- 138 -
Figura 6.15: Desvio padrão com diferentes comprimentos de linha de base – processamento em linhas de base de duas horas de observação.	- 138 -
Figura 6.16: Discrepância na altitude entre a solução padrão e o processamento com 2 horas de observação para diferentes comprimentos de linha de base e o processamento em rede.- ...	- 139 -
Figura 6.17: Distribuição das estações consideradas em cada uma das estratégias para análise do número de estações de referência.	- 142 -
Figura 6.18: Discrepância na altitude entre a solução padrão e o processamento com 96 horas de observação com diferentes números de estações de referência.	- 142 -
Figura 6.19: Discrepância entre a solução padrão e o processamento com 96 horas de observação para diferentes números de estações de referência (estratégias 1R, 2R1 e 3R).- ...	- 143 -
Figura 6.20: Desvio padrão com 96 horas de observação para diferentes números de estações de referência (estratégias 1R, 2R1 e 3R).	- 144 -
Figura 6.21: Discrepância da altitude entre a solução padrão e o processamento com 96 horas de observação em relação à distância até a estação de referência 0130 (estratégia 1R)...- ...	- 145 -

Figura 6.22: Discrepância da altitude entre a solução padrão e o processamento com 96 horas de observação em relação à altitude da estação (estratégia 1R).....	- 145 -
Figura 6.23: Distribuição das estações consideradas nas estratégias 2R1 e 2R2.	- 146 -
Figura 6.24: Para cada estação observada: discrepância na altitude entre a solução padrão e o processamento com 96 horas de observação (estratégias 1R, 2R1 e 2R2), distância até as estações de referência consideradas e altitude das estações observadas.	- 147 -
Figura 6.25: Desvio padrão da altitude com diferentes números de estações de referência com 96 horas de observação.	- 148 -
Figura 6.26: Valores da ondulação geoidal obtidos do quase-geóide EGG97.....	- 150 -
Figura 6.27: Altitudes determinadas por nivelamento.	- 151 -
Figura 6.28: Comparação da altitude determinada com GPS e os dados de nivelamento.	- 151 -
Figura 6.29: Comparação entre as altitudes esperadas e as obtidas com a solução padrão.	- 153 -
Figura 6.30: Esquema de posições da antena msd2.	- 153 -
Figura 6.31: Desvio padrão das coordenadas referentes à solução padrão do experimento 2.	- 155 -
Figura 6.32: Altitudes da antena msd2 obtidas com diferentes períodos de observação e 7 estações de referência.	- 156 -
Figura 6.33: Diferenças de altitudes da antena msd2 obtidas com diferentes períodos de observação e 7 estações de referência.	- 157 -
Figura 6.34: Desvio padrão na altitude da antena msd2 obtido com diferentes períodos de observação e 7 estações de referência.	- 157 -
Figura 6.35: Discrepância na altitude entre a solução padrão e o processamento com 24 horas de observação, em cada uma das 5 posições, para diferentes comprimentos de linha de base.	- 158 -
Figura 6.36: Discrepância entre a solução padrão e o processamento com 24 horas de observação, em cada uma das 5 posições, para diferentes comprimentos de linha de base....	- 159 -
Figura 6.37: Desvio padrão na altitude com 24 horas de observação para diferentes comprimentos de linha de base.	- 159 -
Figura 6.38: Desvio padrão com 24 horas de observação para diferentes comprimentos de linha de base.	- 160 -
Figura 6.39: Diferenças de altitude da antena msd2 com 24 horas de observação para diferentes comprimentos de linha de base.....	- 161 -
Figura 6.40: Distribuição das estações consideradas nas estratégias 7R, 3R, 2R e 1R.	- 163 -
Figura 6.41: Altitudes da antena msd2 obtidas com diferentes quantidades de estações de referência.	- 164 -

Figura 6.42: Desvio padrão com diferentes quantidades de estações de referência e períodos de observação.	- 166 -
Figura 6.43: Desvio padrão na altitude com diferentes quantidades de estações de referência e períodos de observação.	- 166 -
Figura 6.44: Diferenças de altitudes da antena msd2 obtidas com diferentes quantidades de estações de referência para um período de observação de 4 horas.	- 167 -
Figura 6.45: Diferenças de altitudes da antena msd2 obtidas com diferentes quantidades de estações de referência para um período de observação de 12 horas.	- 167 -
Figura 6.46: Diferenças de altitudes da antena msd2 obtidas com diferentes quantidades de estações de referência para um período de observação de 24 horas.	- 168 -
Figura 6.47: Discrepâncias na altitude com relação à solução padrão para diferentes períodos de tempo e quantidade de estações de referência.	- 169 -
Figura 6.48: Desvios padrão na altitude para diferentes períodos de tempo e quantidade de estações de referência.	- 170 -
Figura 6.49: Altitudes da antena msd1 obtidas com diferentes períodos de observação e 7 estações de referência.	- 171 -
Figura 6.50: Desvio padrão da altitude (antena msd1) com diferentes períodos de observação e 7 estações de referência.	- 171 -
Figura 6.51: Informações do almanaque para Hannover num período de 24 horas.	- 174 -
Figura 6.52: Informações do almanaque para Recife num período de 24 horas.	- 175 -
Figura 6.53: Esquemas gráficos para entendimento do cenário simulado.	- 176 -
Figura 6.54: Diagrama de visibilidade para Recife num período de 2 horas.	- 177 -
Figura 6.55: Desvio padrão das coordenadas obtidas com duas horas de observação (horário local: 14h00 às 16h00) e três estações de referência.	- 178 -
Figura 6.56: Discrepâncias na altitude entre a solução padrão e o processamento com 2 horas de observação (horário local: 14h00 às 16h00) sem obstrução e com obstrução de 28% e três estações de referência.	- 178 -
Figura 6.57: Desvio padrão das coordenadas obtidas com duas horas de observação (horário local: 08h50 às 10h50) e três estações de referência.	- 179 -
Figura 6.58: Discrepâncias na altitude sem obstrução e com obstrução de 28% com duas horas de observação (horário local: 08h50 às 10h50) e três estações de referência.	- 179 -
Figura 6.59: Gráfico de PDOP, para 28% de obstáculos e um período de 24 horas.	- 180 -
Figura 6.60: Gráficos para análise de um período de 2 horas de observação.	- 181 -

Figura 6.61: Resultados obtidos com duas horas de observação (horário local: 10h50 às 12h50), obstrução de 28% e três estações de referência.	- 181 -
Figura 6.62: Desvio padrão da altitude para diferentes períodos de observação e três estações de referência.	- 182 -
Figura 6.63: Discrepâncias na altitude para diferentes períodos de observação e três estações de referência.	- 182 -
Figura 7.1: Rede de referência GPS instalada na RMR e utilizada no projeto desenvolvido em novembro de 2000.	- 192 -
Figura 7.2: Esquema mostrando a disposição dos pontos de referência e dos pontos objeto numa rede de referência.	- 193 -
Figura 7.3: Rede de referência GPS instalada na RMR que pode ser utilizada na aplicação da metodologia proposta nesta Pesquisa.	- 194 -
Figura 7.4: Marco localizado na rua Muribeca, em frente à Igreja Nossa Senhora do Rosário. .-	- 195 -
Figura 7.5: Localização da Rua Muribeca no distrito de Muribeca, município de Jaboatão dos Guararapes, na RMR.	- 195 -
Figura 7.6: Detalhamento do projeto do marco implantado na Muribeca.	- 196 -
Figura 7.7: Dimensões do bloco piramidal e corte AB mostrando a posição do bloco com relação ao nível do terreno.	- 196 -
Figura 7.8: Detalhe da cavidade na parte superior do bloco piramidal e posição do pino com relação à cavidade.	- 197 -
Figura 7.9: Execução do marco externo.	- 198 -
Figura 7.10: Mapa de situação dos pontos objeto em Boa Viagem.	- 199 -
Figura 7.11: Esquema de marco de referência.	- 199 -
Figura 7.12: Detalhamento do projeto dos marcos implantados em Boa Viagem.	- 200 -
Figura 7.13: Execução dos pontos objeto.	- 202 -
Figura 7.14: Localização dos marcos implantados em Boa Viagem.	- 205 -

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1: Tipos de subsidência.	- 10 -
Tabela 2.2: Escala de tempo e dimensão horizontal associados à subsidência.....	- 10 -
Tabela 2.3: Valores de subsidência registrados na América do Norte.....	- 22 -
Tabela 2.4: Valores de subsidência registrados na Ásia e na Nova Zelândia	- 26 -
Tabela 2.5: Casos de subsidência registrados na Europa	- 27 -
Tabela 3.1: Roteiro para levantamento de áreas de risco de subsidência	- 35 -
Tabela 3.2: Valores adotados para os parâmetros hidráulico e mecânicos.	- 59 -
Tabela 4.1: Coeficiente Hidrodinâmicos.....	- 72 -
Tabela 4.2: Balanço de entrada e saída dos aquíferos Beberibe, Cabo e Boa Viagem.	- 79 -
Tabela 4.3: Informações sobre quantitativos de poços da zona sul.	- 83 -
Tabela 5.1: Sinais dos satélites GPS.	- 94 -
Tabela 5.2: Possibilidades de agrupamento dos receptores GPS.	- 96 -
Tabela 5.3: Parâmetros fundamentais do WGS 84	- 98 -
Tabela 5.4: Contabilidade dos erros associados à determinação da altitude.....	- 110 -
Tabela 5.5: Algumas combinações lineares das fases portadoras	- 115 -
Tabela 6.1: Distância aproximada das estações móveis em relação à estação fixa.	- 126 -
Tabela 6.2: Distância aproximada das estações de referência em relação à estação msd2. ...	- 131 -
Tabela 6.3: Coordenadas no WGS84 da solução padrão (experimento 1).....	- 135 -
Tabela 6.4: Coordenadas no WGS84 das estações consideradas de referência	- 141 -
Tabela 6.5: Valores e diferenças de desvio padrão da altitude (estratégias 1R, 2R1 e 3R) .	- 149 -
Tabela 6.6: Coordenadas no WGS84 das estações de referência.....	- 152 -
Tabela 6.7: Coordenadas no WGS84 da solução padrão (experimento 2).....	- 154 -
Tabela 6.8: Análise dos deslocamentos detectados com 24 horas de observação para diferentes comprimentos de linha de base	- 162 -
Tabela 6.9: Discrepâncias na altitude em relação à solução padrão, em cm.	- 165 -
Tabela 6.10: Discrepâncias em relação à solução padrão, em cm.	- 169 -
Tabela 6.11: Comprimentos das linhas de base conforme a estratégia utilizada	- 185 -
Tabela 6.12: Estatística aplicada na análise de sensibilidade – 2 horas	- 189 -
Tabela 6.13: Estatística aplicada na análise de sensibilidade – 24 horas	- 189 -
Tabela 7.1: Coordenadas aproximadas dos pontos objeto	- 203 -

LISTA DE SÍMBOLOS

Capítulo 2:

Símbolo	Descrição	Dimensão
D	Profundidade do ponto analisado	$[L]$
n	Porosidade	$[-]$
p	Pressão no poro com fluido	$[ML^{-1}T^{-2}]$
S	Grau de saturação	$[-]$
d_{ij}	Função Delta de Kronecker	
g	Peso específico do solo saturado	$[ML^{-2}T^{-2}]$
s'_{ij}	Componente do tensor de tensões efetivas	$[ML^{-1}T^{-2}]$

Subscritos:

Símbolo	Descrição
g	Gás
w	Água

Capítulo 3:

Símbolo	Descrição	Dimensão
A	Área da seção transversal atravessada pelo fluido	$[L^2]$
a	Constante apresentada por Gardner (1958)	$[L^{-1}]$
a^*	Constante da relação proposta por Lloret e Alonso (1985)	$[-]$
a'	Constante da relação proposta por Lloret e Alonso (1985)	$[-]$
b^*	Constante da relação proposta por Lloret e Alonso (1985)	$[-]$
b'	Constante da relação proposta por Lloret e Alonso (1985)	$[-]$
c^*	Constante da relação proposta por Lloret e Alonso (1985)	$[-]$
b	Forças de massa por unidade de volume	$[ML^{-2}T^{-2}]$
D	Coeficiente definido mediante o emprego de uma lei constitutiva não-linear que relaciona tensão e deformação	$[ML^{-2}T^{-2}]$
d'	Constante da relação proposta por Lloret e Alonso (1985)	$[-]$

de_v^p	Incremento de deformação volumétrica plástica total	$[L^3]$
de_{vp}^p	Incremento de deformação volumétrica plástica devido à variação da tensão para um valor de sucção constante	$[L^3]$
de_{vs}^p	Incremento de deformação volumétrica plástica devido à variação da sucção para um valor de tensão constante	$[L^3]$
de_s^p	Incremento de deformação cisalhante plástica	$[L]$
e	Índice de vazios	$[-]$
E	Módulo de elasticidade definido em relação à variação de tensão normal (Young)	$[ML^{-1}T^{-2}]$
f	Termo fonte/sumidouro	$[ML^{-3}T^{-1}]$
F	Coeficiente definido mediante o emprego de uma lei constitutiva não-linear que relaciona deformação e tensão	$[M^{-1}L^2T^2]$
g	Aceleração da gravidade	$[LT^{-2}]$
G	Módulo cisalhante dentro do domínio elástico	$[ML^{-1}T^{-2}]$
h	Potencial matricial	$[L]$
H	Módulo de elasticidade definido em relação à variação de sucção	$[ML^{-1}T^{-2}]$
J	Fluxo de massa	$[ML^{-2}T^{-1}]$
k	Permeabilidade específica ou intrínseca	$[L^2]$
$\mathbf{k}$	Tensor permeabilidade intrínseca	$[L^2]$
K	Condutividade hidráulica	$[LT^{-1}]$
k^*	Parâmetro do modelo proposto por Alonso (1990)	$[-]$
k_{rl}	Permeabilidade relativa	$[-]$
L	Comprimento do reservatório (lei de Darcy)	$[L]$
m	Parâmetro de Van Genuchten (1980)	$[-]$
M	Inclinação da linha de estados críticos (modelo Cam-Clay)	$[-]$
n	Porosidade	$[-]$
N	Volume específico inicial	$[-]$
n'	Parâmetro de ajuste (Arbhabhira e Kridakorn, 1968)	$[-]$
n''	Parâmetro de Van Genuchten (1980)	$[-]$
p	Pressão	$[ML^{-1}T^{-2}]$

P	Volume de fluido extraído por unidade de área de meio poroso por unidade de tempo	$[LT^{-1}]$
p'	Tensão média efetiva	$[ML^{-1}T^{-2}]$
p^c	Pressão num estado de tensão de referência em que $v = N(s)$	$[ML^{-1}T^{-2}]$
p_0	Tensão de pré-adensamento, condição não saturada	$[ML^{-1}T^{-2}]$
p_0^*	Tensão de pré-adensamento, condição saturada	$[ML^{-1}T^{-2}]$
p_s	Resistência coesiva do solo não saturado	$[ML^{-1}T^{-2}]$
q	Tensão desviatória	$[ML^{-1}T^{-2}]$
q	Descarga de fluido por unidade de área	$[LT^{-1}]$
Q	Fluxo	$[L^3T^{-1}]$
r	Constante do modelo proposto por Alonso (1990)	$[-]$
s	Sucção matricial	$[ML^{-1}T^{-2}]$
S	Grau de saturação	$[-]$
t	Tempo	$[T]$
U	Volume	$[L^3]$
v	Volume específico	$[-]$
x_i	Sistema de coordenadas	$[L]$
z	Elevação do ponto	$[L]$
a	Constante da relação entre a permeabilidade relativa e o grau de saturação	$[-]$
a'	Parâmetro de Van Genuchten (1980)	$[L^{-1}]$
a^*	Parâmetro que indica a condição de associatividade na lei de plasticidade	$[-]$
b	Parâmetro do modelo proposto por Alonso (1990)	$[M^{-1}LT^2]$
d_{ij}	Função Delta de Kronecker	
e	Deformação total	$[L]$
f	Carga piezométrica	$[L]$
g	Peso específico	$[ML^{-2}T^2]$
g'	Deformação cisalhante	$[L]$

l	Parâmetro característico que corresponde à distribuição do tamanho dos grãos	$[-]$
l'	Coeficiente do modelo proposto por Alonso (1990)	$[-]$
l_s	Coeficiente do modelo proposto por Alonso (1990)	$[-]$
k	Coeficiente do modelo proposto por Alonso (1990)	$[-]$
k_s	Coeficiente do modelo proposto por Alonso (1990)	$[-]$
m	Viscosidade dinâmica	$[ML^{-1}T^{-1}]$
m^*	Deslocamento vertical	$[L]$
r	Densidade (massa específica)	$[ML^{-3}]$
s	Tensão total	$[ML^{-1}T^{-2}]$
s'	Tensão efetiva	$[ML^{-1}T^{-2}]$
σ	Tensor de tensões totais	$[ML^{-1}T^{-2}]$
s_{ij}	Componente do tensor de tensões totais	$[ML^{-1}T^{-2}]$
q	Umidade volumétrica	$[L^3L^{-3}]$
t	Tensão cisalhante	$[ML^{-1}T^{-2}]$
u	Coeficiente de Poisson	$[-]$
v	Velocidade do fluxo	$[LT^{-1}]$
Θ	Função da umidade	$[-]$
Δ	Variação ou incremento	
∇	Operador diferencial nabla	
∂	Derivada parcial	

Subscritos / sobrescritos:

Símbolo Descrição

a	Fase gasosa (ar)
atm	Atmosfera
f	Fluido
ls	Valor máximo
p	Ponto qualquer

r	Residual
ref	Valor de referência
rl	Relativa
s	Fase sólida (solo)
sat	Saturada
w	Fase líquida (água)
ws	Fase líquida em relação à fase sólida
o	Valor inicial
1	Direção principal maior
2	Direção principal intermediária
3	Direção principal menor

Capítulo 5:

Símbolo	Descrição	Dimensão
a	Semi-eixo maior da elipse	$[L]$
A	Matriz dos coeficientes das equações de observação, conhecida como <i>Design</i>	$[-]$
b	Semi-eixo menor da elipse	$[L]$
C_C	Correção da curvatura terrestre	$[L]$
C_R	Correção da refração atmosférica	$[L]$
d	Atraso na propagação do sinal GPS	$[L]$
$\mathbf{d}$	Vetor deslocamento	$[L]$
e	Erros remanescentes	$[L]$
f	Achatamento da elipse	$[-]$
f^*	Graus de liberdade	$[-]$
f_i	Frequências dos sinais L_i , sendo $i = 1, 2$	$[T^{-1}]$
GM	Constante gravitacional geocêntrica da Terra	$[L^3 T^{-2}]$
g_m	Valor médio da aceleração da gravidade	$[L T^{-2}]$
h	Altitude geodésica ou altura geométrica	$[L]$
H	Altitude ortométrica	$[L]$

h^*	Graus de liberdade	$[-]$
h_a	Altura do alvo	$[L]$
h_i	Altura do instrumento	$[L]$
H, H_i	Altitude ortométrica no ponto i , sendo $i = A, B$	$[L]$
H^N	Altitude normal	$[L]$
H_0	Hipótese nula	
H_a	Hipótese alternativa	
k	Número de épocas	$[-]$
k^*	Distância entre extremos nivelados	$[L]$
k_R	Coeficiente de refração	$[-]$
$\mathbf{l}$	Vetor das observações que contém as coordenadas	$[L]$
$L_1, L_2, C/A, P$	Informações dos sinais GPS	
L_Δ	Combinação dos sinais L_1 e L_2 , conhecida como <i>Wide Lane</i>	
L_Σ	Combinação dos sinais L_1 e L_2 , conhecida como <i>Narrow Lane</i>	
L_0	Combinação dos sinais L_Δ e L_Σ , conhecida como sinal livre da ionosfera	
L_I	Combinação dos sinais L_Δ e L_Σ , conhecida como sinal ionosférico	
L_{54}, L_{43}, L_X	Combinações lineares dos sinais L_1 e L_2	
m	Funções de mapeamento da troposfera	$[-]$
n	Número de observações	$[-]$
N	Ondulação geoidal	$[L]$
$\mathbf{N}$	Matriz dos coeficientes das incógnitas das equações normais	$[-]$
p	Quantidade de pontos numa rede de observação	$[-]$
P_i	Pseudo-distâncias medidas dos sinais L_i , sendo $i = 1, 2$	$[L]$
$\mathbf{P}$	Matriz dos pesos das observações	$[-]$
q	Quantidade de desníveis	$[-]$

q_i	Número de graus de liberdade, corresponde a [–] quantidade de observações excedentes	
$\mathbf{Q}$	Matriz dos co-fatores dos pesos das observações	[–]
R	Sobretaxa da soma do quadrado dos resíduos	$[L^2]$
R_i	Leitura na mira ré do ponto i	$[L]$
R_T	Raio da Terra	$[L]$
t	Tempo	$[T]$
V_i	Leitura na mira vante do ponto i	$[L]$
S	Distância inclinada	$[L]$
$\mathbf{v}$	Vetor dos resíduos das observações	$[L]$
$\hat{\mathbf{x}}$	Vetor das coordenadas estimadas dos pontos	$[L]$
Z	Ângulo zenital	$[\text{Ângulo}]$
α	Nível de significância	[–]
e	Ângulo de elevação	$[\text{Ângulo}]$
f	Latitude geodésica	$[\text{Ângulo}]$
l	Longitude geodésica	$[\text{Ângulo}]$
l^*	Parâmetro de não-centralização da distribuição normal	[–]
s_0^2	Variância arbitrada <i>a priori</i>	$[L^2]$
$\hat{s}_0^2$	Variância <i>a posteriori</i>	$[L^2]$
$\bar{s}_0^2$	Variância <i>a posteriori</i> única entre as campanhas	$[L^2]$
$E\{ \}$	Esperança matemática	
V	Altitude anômala	$[L]$
Δ	Variação ou incremento	
Ω_i	Somatório do quadrado dos resíduos	$[L^2]$
Σ	Somatório	
Σ_{xx}	Matriz Variância-Covariância das observações para todas as épocas	$[L^2]$
c_q^2	Representa a distribuição da estatística qui- quadrado c^2	
w_e	Velocidade angular da Terra	$[T^{-1}]$

Subscritos / sobrescritos:

Símbolo	Descrição
B	Ponto considerado não-estável
F	Ponto considerado estável
h	Componente seca da atmosfera
i	Época em que foram coletadas as observações
ion	Ionosférico
T	Corresponde ao emprego da transposta
$trop$	Troposférico
w	Componente úmida da atmosfera
z	Direção do zênite
0	Valor inicial
$+$	Corresponde ao emprego da pseudo-inversa
1	Corresponde ao sinal GPS L_1
2	Corresponde ao sinal GPS L_2

LISTA DE SIGLAS

Siglas	Descrição
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AdV	<i>Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland</i> (Associação de Agências Geodésicas dos Estados da República Federal da Alemanha)
AII	<i>Accuracy Improvement Initiative</i>
BBM	<i>Barcelona Basic Model</i>
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico
CGED	Coordenação de Geodésia
CSL	<i>Critical State Line</i>
COMPESA	Companhia Pernambucana de Saneamento
DISME	Distrito de Meteorologia do INMET
DGPS	<i>Differential Global Positioning System</i>
DOP	<i>Dilution of Precision</i>
EGG	<i>Europäische Gravimetrische Quasigeoid</i> (Quase-geóide Gravimétrico Europeu)
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
GA	<i>Ground Antennas</i>
GEONAP	<i>Geodätische NAVSTAR Positionierung</i> (Posicionamento NAVSTAR Geodésico)
GIAREC	Gerenciamento Integrado dos Aquíferos da Região Metropolitana do Recife
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GRS	<i>Geodetic Reference System</i>
HIDROREC	Estudo Hidrogeológico de Recife e cidades vizinhas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IGS	<i>International GPS Service</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
LC	<i>Loading Collapse</i>
MCS	<i>Master Control Station</i>

MS	<i>Monitor Station</i>
MVC	Matriz Variância-Covariância
NAVSTAR	<i>Navigation System with Time and Ranging</i>
NIMA	<i>National Imagery and Mapping Agency</i>
PCV	<i>Phase center variations</i>
PDOP	<i>Positional Dilution of Precision</i>
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
RINEX	<i>Receiver Independent Exchange Format</i>
RF	Radiofrequência
RMR	Região Metropolitana do Recife
SAD	<i>South American Datum</i>
SAPOS	<i>Satellite Positioning Service</i>
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i>
SCA	Sistema de Controle Ativo
SI	<i>Suction Increase</i>
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para a América do Sul
TEC	<i>Total Electron Content</i>
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
WGS	<i>World Geodetic System</i>
3 ^a DL	3 ^a Divisão de Levantamentos do Exército Brasileiro

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Os fenômenos de subsidência do solo têm ocorrido em diversos países do mundo devido à extração de água, petróleo ou gás do subsolo. Em geral, os processos são da ordem de alguns centímetros por ano, no entanto a médio e longo prazo os efeitos vão se acumulando e podem atingir valores significativos.

1.1 Relevância do Tema

A subsidência é um fenômeno de rebaixamento da superfície do terreno devido a alterações ocorridas nas camadas subterrâneas, ou seja, redução do nível do terreno devido à remoção de suporte subterrâneo. As causas mais comuns de ocorrência de subsidência estão relacionadas às intervenções humanas, e sugerem um uso indiscriminado dos recursos naturais.

A disponibilidade de água para oferta às populações é uma questão preocupante nos principais centros urbanos do mundo e a situação torna-se mais crítica em países que apresentam escassez hídrica absoluta (tais como Kuwait, Egito, Arábia Saudita e Cabo Verde). O Brasil, apesar de ser um dos países mais ricos em água no mundo, também apresenta um quadro de escassez de água em algumas regiões, como é o caso do semi-árido nordestino.

Além disso, a água, quando contaminada, constitui um veículo natural para diversos tipos de doenças. Em estudos recentes realizados pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico - BNDES, no Brasil, 90% dos esgotos são lançados in natura, ou seja, sem qualquer tratamento, nos solos e rios. Além disso, a situação física em que se encontra atualmente a rede existente não é boa. O resultado desse quadro é que cerca de 45% das águas tratadas distribuídas são desperdiçadas (BNDES, 1996).

Assim sendo, diante deste quadro mundial de escassez e degradação da água doce disponível, a água subterrânea vem assumindo um papel cada vez maior como fonte de abastecimento e constituindo uma alternativa eficaz, principalmente quando são empregados poços bem localizados, bem construídos e quando são consideradas as interferências que ocorrem quando dois ou mais poços estão situados dentro do mesmo compartimento hidrogeológico e estão afastados de uma pequena distância. A falta, ou o não cumprimento, de instrumentos legais

que permitam a eficácia e o controle racional da exploração¹ dos recursos hídricos subterrâneos, vem colocando, cada vez mais, em risco a existência de muitos aquíferos. Sérios problemas podem ser associados à ocorrência de superexploração dos recursos hídricos subterrâneos:

- utilização de poços para situações que exigem uma demanda superior à disponibilidade do reservatório subterrâneo, como o abastecimento de cidades e irrigações, podendo levar o poço à exaustão;
- ocorrência de contaminação do aquífero por intrusão salina, em poços construídos em regiões litorâneas;
- rebaixamento do nível do solo, devido à compactação de camadas subjacentes porosas, devido à extração de água em quantidade superior à capacidade de recarga do aquífero – esse fenômeno é conhecido como subsidência do solo.

Cidades que têm experimentado crescimento populacional acelerado nas últimas décadas têm sido obrigadas a administrar o inevitável dilema que advém do desenvolvimento urbano, promover o abastecimento público sem comprometer os recursos naturais esgotáveis. Neste contexto, verifica-se uma necessidade cada vez maior dos gestores públicos de se recorrer aos recursos hídricos subterrâneos para garantir o suprimento das necessidades básicas e a manutenção da qualidade de vida da população. Por esse motivo, a exploração de água dos reservatórios subterrâneos tem sido a principal causa da ocorrência de subsidência em áreas urbanas e circunvizinhanças.

A subsidência do solo devido à extração de fluido traz diversos problemas ambientais e, por vezes, acumulam prejuízos materiais, em muitas localidades no mundo. O desenvolvimento de áreas de pesquisa para o melhor entendimento do modelo físico de compactação dos reservatórios subsuperficiais e a subsidência do solo como consequência da extração de fluido visando a obtenção de ferramentas apropriadas para a simulação, monitoramento, prevenção, correção e/ou mitigação, constitui um importante passo na redução dos prejuízos oriundos da ocorrência do fenômeno.

Tal como acontece em algumas capitais do Brasil, a Região Metropolitana do Recife – RMR tem uma grande demanda de água. O montante dessa demanda é de aproximadamente $14\text{m}^3/\text{s}$ e, onde cerca de $6\text{m}^3/\text{s}$ é obtida pela captação de água subterrânea, e desta captação, cerca de $4\text{m}^3/\text{s}$ é explorado por mais de 10.000 poços rasos e profundos perfurados por particulares

¹ Exploração – apesar de não constar nos dicionários de português, a palavra exploração, é de uso corrente entre os hidrogeólogos, significando extração de água, para diferenciar de exploração no sentido de prospecção de minérios.

(Farias, 2003). Dada a grande concentração de atividades comerciais, industriais e turísticas, e a exploração imobiliária que caracterizam o bairro de Boa Viagem, diante de uma expectativa de aumento na quantidade de poços perfurados nesta região, originou-se a motivação em realizar estudos para maior entendimento do comportamento hidromecânico, bem como o desenvolvimento de metodologia para investigação sobre a ocorrência de deslocamentos verticais do solo no local.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Aprofundar os conhecimentos dos processos de subsidência de solos devido à exploração de água do subsolo, pesquisando as causas gerais, os fatores intervenientes, os procedimentos de investigação e a possibilidade de ocorrência no bairro de Boa Viagem em Recife, bem como analisar os métodos de detecção e monitoramento.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Estudar o processo físico e identificar o comportamento hidromecânico nos diferentes tipos de aquíferos.
- Estudar a formulação matemática que descreve o processo físico de compactação do solo devido à extração de fluido.
- Identificar ferramentas que podem subsidiar a identificação de áreas com risco de subsidência.
- Estudar os conceitos fundamentais relacionados com a técnica GPS e verificar a capacidade de detecção de pequenos deslocamentos verticais com o emprego dessa técnica.
- Propor uma metodologia para detecção de pequenos deslocamentos verticais utilizando os pontos de controle localizados na área de estudo.

1.3 Metodologia

A metodologia utilizada para atingir os objetivos específicos explicitados anteriormente está discriminada no fluxograma apresentado na Figura 1.1

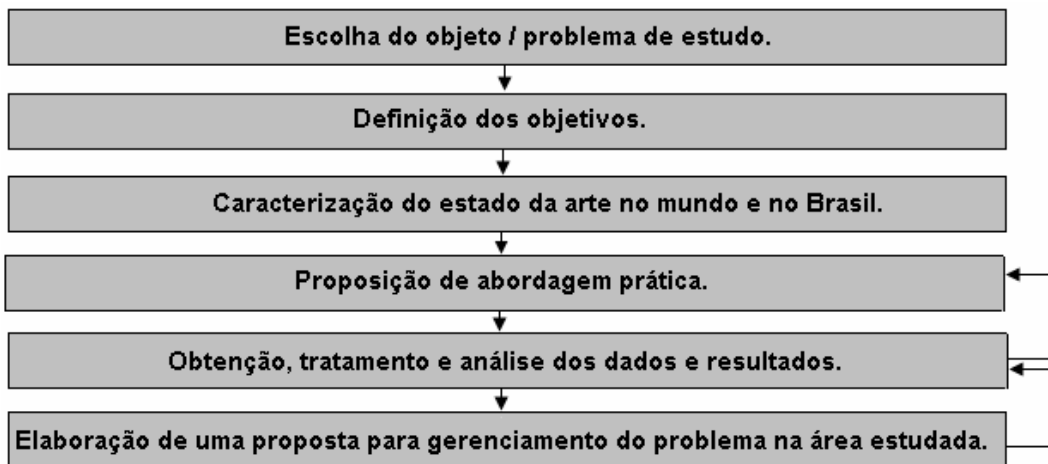


Figura 1.1: Fluxograma da metodologia empregada nessa Pesquisa.

De acordo com a metodologia apresentada na Figura 1, foram realizadas as seguintes atividades:

- Pesquisa bibliográfica sobre os conceitos fundamentais relacionados com o processo físico, considerando tanto as teorias envolvidas no processo de fluxo como no comportamento mecânico do solo.
- Pesquisa bibliográfica sobre os casos de subsidência ocorridos no mundo e registrados na literatura científica, buscando identificar fatores comuns, as principais características das áreas atingidas e os avanços científicos relacionados com o tema.
- Pesquisa bibliográfica sobre os recursos já utilizados em outros trabalhos visando a investigação quanto à vulnerabilidade de uma área em desenvolver subsidência devido à extração de água.
- Consulta a documentos (Mapas, Relatórios, Teses e Artigos) para investigação dos dados climatológicos e geológicos da área de estudo.
- Consulta a documentos (Bancos de dados, Relatórios, Teses e Artigos) para investigação dos aspectos hidrogeológicos da área de estudo.
- Estudo da fundamentação teórica sobre os diversos aspectos relacionados com o emprego da tecnologia GPS, desde a concepção do funcionamento até um estudo aprofundado sobre os fatores condicionantes da precisão.
- Realização de experimentos com GPS para controle de altitude, na Universidade de Hannover (Alemanha), com o objetivo de verificar a capacidade de detecção de pequenos deslocamentos da superfície do solo e identificar os procedimentos adequados para minimização ou eliminação das fontes de erro.

- Treinamento para utilização do software de processamento das observações GPS, explorando as várias ferramentas disponíveis no software e as várias estratégias de ajustamento.
- Identificação das estratégias de investigação dos resultados e processamento das observações coletadas nos dois experimentos.
- Apresentação e discussão dos resultados, identificando as características mais relevantes ao posicionamento vertical preciso.
- Apresentação de uma proposta de procedimento a ser aplicado nos pontos de controle localizados na área de Boa Viagem, na Região Metropolitana de Recife - RMR.

1.4 Descrição dos Capítulos

Os estudos e análises desenvolvidos são apresentados em sete capítulos.

No Capítulo 2 apresenta-se a caracterização do fenômeno de subsidência do solo, identificando os tipos de subsidência existentes com enfoque maior na subsidência como consequência da exploração de água subterrânea. A seguir faz-se um levantamento de alguns casos reais de ocorrência de subsidência registrados em literatura científica, no Brasil e no mundo.

No Capítulo 3 discutem-se alguns aspectos relacionados aos subsídios para análise da possibilidade de risco de subsidência – estudos de investigação e simulação numérica. Alguns aspectos relacionados com os fatores que contribuem para o aumento da possibilidade de risco de subsidência e, nesse sentido, constituem subsídios para o levantamento da susceptibilidade à subsidência são apresentados. Além disso, apresentam-se considerações sobre a realização de simulação numérica e, consequentemente, sobre o acoplamento hidromecânico (tais como a não linearidade da permeabilidade e a histerese da curva de retenção). Apresentam-se, sucintamente duas ferramentas computacionais existentes que vêm sendo utilizadas para simulação do fenômeno de subsidência.

O Capítulo 4 destina-se à descrição da área de estudo (trecho da praia de Boa Viagem, na RMR) e aspectos relacionados com a geologia, hidrologia e hidrogeologia, e o crescimento da exploração dos aquíferos locais são considerados. Além disso, são apresentadas seções litológicas da área de estudo. Aspectos relacionados com o quadro atual de exploração da água subterrânea na área de estudo também são abordados.

No Capítulo 5 apresentam-se os conceitos básicos para o posicionamento geodésico, além de uma breve apresentação dos métodos geodésicos mais utilizados no monitoramento da

subsidência, o nivelamento geométrico e o GPS. Os principais aspectos relacionados com a determinação da altura de um ponto utilizando-se GPS – principais fontes de erro, características do posicionamento relativo e determinação das ambigüidades - também são discutidos nesse capítulo. Apresenta-se ainda uma descrição da análise de deformação realizada.

Os resultados obtidos dos experimentos realizados com o GPS são apresentados no Capítulo 6. Nesse capítulo descrevem-se os experimentos realizados no *Institut für Erdmessung* da Universidade de Hannover (Alemanha) e discute-se a qualidade dos resultados obtidos sob diversos aspectos (tempo de observação, comprimento da linha de base, quantidade de estações de referência e comparação com dados obtidos do nivelamento geométrico).

Algumas considerações sobre a rede de controle para monitoramento da subsidência a ser implantada na área de estudo em Recife são apresentadas no Capítulo 7. Os principais aspectos discutidos neste capítulo são: a localização e o número de estações de referência que deverão ser utilizadas na área de estudo para que a rede de controle permita a detecção de pequenos deslocamentos verticais do solo.

Finalmente, no Capítulo 8 apresentam-se as conclusões e as sugestões para futuras pesquisas.

CAPÍTULO 2

SUBSIDÊNCIA DO SOLO

2.1 Introdução

As águas subterrâneas representam mais de 95% das reservas de água doce líquida disponível do planeta. Pela boa qualidade e custos de obtenção relativamente baixos, quando comparados aos mananciais de superfície, as águas subterrâneas constituem uma alternativa barata e segura para o abastecimento público e/ou particular. De acordo com Nadal et al. (2001), estima-se que no Brasil esse recurso seja responsável pelo abastecimento de 51% da população, captado através de mais de 200 000 poços tubulares e quase um milhão de poços amazonas (cacimbas) escavados.

A demanda por recursos hídricos subterrâneos tende a aumentar cada vez mais em localidades que apresentam alta concentração demográfica e expansão econômica. Consequentemente os aquíferos sofrem os efeitos da exploração descontrolada por poços e da ocupação indisciplinada do solo, que põem em risco tanto a qualidade quanto a quantidade das águas e, também, a região no entorno à exploração. É normalmente nessas localidades que acontecem um fenômeno de rebaixamento do solo chamado de subsidência.

A subsidência é um fenômeno de rebaixamento da superfície do terreno devido a alterações ocorridas nas camadas subterrâneas, ou seja, redução do nível do terreno devido à remoção de suporte subterrâneo. As causas mais comuns de ocorrência de subsidência estão relacionadas às intervenções humanas, e sugerem um uso indiscriminado dos recursos naturais. Esse fenômeno pode ocorrer devido a várias origens. Segundo Prokopovich (1978) de acordo com a origem, a subsidência pode ser classificada em dois grandes grupos: endogênica e exogênica, Figura 2.1.

De forma geral pode-se relacionar, segundo a classificação proposta por Prokopovich (1978), a subsidência exogênica como um processo que se origina próximo à superfície da Terra, como por exemplo, a atividade humana de extração de fluido das reservas subterrâneas. De forma análoga, à subsidência endogênica estão associados os processos que se originam no interior da crosta terrestre.

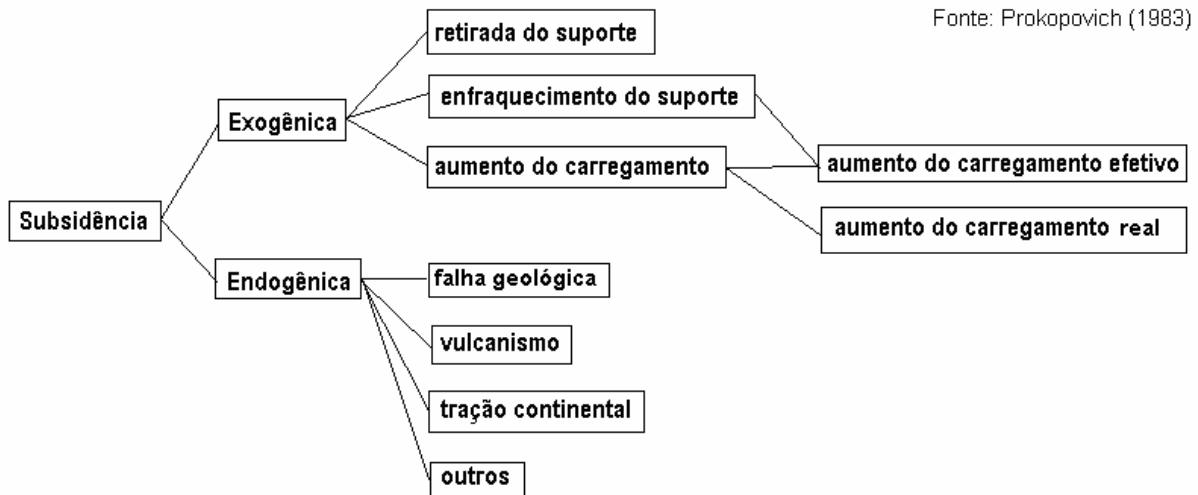


Figura 2.1 Classificação da subsidência de acordo com a origem do fenômeno.

A importância em se conhecer profundamente o fenômeno de forma a reconhecer sua ocorrência e aplicar medidas de prevenção e mitigação é evidente (Figura 2.2).



Figura 2.2: Importância da informação sobre a subsidência do solo.

A subsidência é, portanto, um fenômeno que preocupa pesquisadores e comunidades de todo o mundo, seja pelo grande número de casos registrados em localidades reconhecidamente susceptíveis ao fenômeno, seja pelo surgimento, recente, de indícios do início do processo.

2.2 Tipos de Subsidiência

Do ponto de vista do mecanismo causador da subsidência do solo, segundo Mingorance (2000), pode-se subdividir as ocorrências em cinco grupos:

- devido à atividade mineira;
- devido à hidrocompactação;
- devido à dissolução de rochas e sais;

- devido à extração de água subterrânea; e
- devido à extração de petróleo ou gás.

Dependendo da origem do processo, os diferentes tipos de subsidência têm características distintas com relação à extensão do fenômeno, condições geológicas favoráveis à sua ocorrência e máximas magnitudes atingidas. Descreve-se a seguir sucintamente as principais características de cada um dos grupos e a Tabela 2.1 apresenta algumas informações gerais extraídas de um estudo realizado por Mingorance (2000).

- Subsidência devido à atividade mineira: ocorre devido ao colapso de materiais rochosos consolidados e/ou não consolidados, dentro das galerias subterrâneas. Por ser consequência da retirada do suporte subterrâneo em grandes proporções, a componente vertical do rebaixamento do solo é proporcional à altura da área de extração. O fenômeno não está relacionado a um tipo específico de solo, mas sim à presença de água, seja em forma de circulação ou pela flutuação de seu nível, em localidades de escavação de minas.
- Subsidência devido à hidrocompactação (ou colapsividade): compreende um fenômeno de saturação rápida em depósitos finos não saturados e mal compactados, ou seja, com estrutura instável. Nesses materiais, ocorre uma re-orientação das partículas do solo devido à adição de água. O solo então perde sua capacidade de suporte resultando numa consolidação – adensamento e diminuição de volume - devido a seu peso próprio. É um processo que pode atingir algumas dezenas de metros de profundidade, comum em ambientes desérticos e em regiões semi-áridas. Normalmente é provocada por atividades humanas como irrigação, construção de reservatórios artificiais de água, construção de canais, entre outros.
- Subsidência devido à dissolução de rochas e sais: ocorrido por um fenômeno chamado carstificação. A carstificação é o processo do meio físico que consiste na dissolução de rochas pelas águas subterrâneas e superficiais, que resulta no processo de formação de cavernas subterrâneas. A carstificação é o processo mais comum de dissolução de rochas calcárias ou carbonáticas (calcário, dolomito, mármore), evaporitos (halita, gipsita, anidrita) e, menos comumente, rochas silicáticas (granito, quartzito).
- Subsidência devido à extração de água subterrânea: resultante do bombeamento da água que reduz a pressão dos poros que ajudam a suportar as camadas subjacentes de solo. Essa redução de pressão dos poros é consequência do rebaixamento do nível da água.

- Subsidência devido à extração de petróleo e gás: ocorre quase da mesma forma que o fenômeno relacionado com a extração de água. A pressão dos poros é reduzida pela extração de fluidos, à medida que a carga da rocha sobrejacente é gradualmente transferida às rochas do reservatório produzindo sua compactação. O colapso diferencial é o efeito superficial mais comum associado a esse processo e tem origem praticamente no centro da área de produção, tal como acontece com um poço profundo.

Tabela 2.1: Tipos de subsidência.

Mecanismo	Ocorrências	Extensão	Registros máximos
Atividade mineira	Minas com presença de água	local	34.5 m em horas - Ohio
Hydrocompactação	Siltes arenosos ou depósitos argilosos	local	1 - 4.5 m em horas/dias - Califórnia
Dissoluções	Rochas sólidas solúveis	local	34m em 48 horas – Texas
Exploração de água	Sedimentos finos (siltes e argilas)	local	9 m em 52 anos – Califórnia
Exploração de petróleo e gás	Áreas de produção de petróleo e/ou gás	regional	8.7 m em 44 anos – Califórnia

Fonte: Mingorance (2000).

A subsidência do solo pode, portanto, ocorrer em várias dimensões e envolver áreas de poucos metros até extensões quilométricas, em períodos variados. Scott (1979) relacionou escalas de tempo e dimensão dessas áreas para vários mecanismos de subsidência (Tabela 2.2). Conforme a escala de tempo e dimensão apresentada, devido aos maiores valores de extensão, a extração de água subterrânea está entre os agentes causadores resultantes da atuação do homem.

Tabela 2.2: Escala de tempo e dimensão horizontal associados à subsidência.

Dimensão (km)	Tempo (anos)	Mecanismo
$10^2 - 10^3$	10^4	Ajustes isostáticos da crosta
	$10 - 10^2$	Placas tectônicas
	$10 - 10^2$	Exploração de água em grande escala
	$10^{-7} - 10^{-6}$	Terremoto
$10 - 10^2$	$10 - 10^2$	Exploração de petróleo e gás
$10^0 - 10^1$	$10 - 10^2$	Extração de sólidos
$10^{-1} - 10^0$	$10 - 10^2$	Carregamento da superfície, consolidação, hidrocompactação
$10^{-1} - 10^0$	$10^{-7} - 10^{-6}$	Densificação por vibração
$10^{-2} - 10^{-1}$	10^{-1}	Compactação

Fonte: Scott (1979).

Os aquíferos representam uma grande opção de armazenamento e circulação de água. A litologia do aquífero, ou seja, a sua constituição geológica que combina características como porosidade e/ou permeabilidade intergranular ou de fissuras é que irá determinar a velocidade da água em seu meio. Essa litologia é decorrente da sua origem geológica, que pode ser

fluvial, lacustre, eólica, glacial e aluvial (rochas sedimentares), vulcânica (rochas fraturadas) e metamórfica (rochas calcáreas), determinando os diferentes tipos de aquíferos. Junto com a condutividade hidráulica e o coeficiente de armazenamento, a porosidade constitui um dos principais parâmetros envolvidos no fluxo em meio contínuo.

Nesse contexto, os aquíferos podem ser classificados em contínuos, de porosidade primária, é o caso das rochas sedimentares (Figura 2.3a), e descontínuos, de porosidade secundária, rochas ígneas (Figura 2.3b) e metamórficas (Figura 2.3c). A porosidade primária corresponde à porosidade devido aos vazios originais da rocha e a porosidade secundária é resultante das fissuras e cavidades de dissolução que se desenvolvem após a formação da rocha. Apesar de ser de origem sedimentar, o calcário apresenta porosidade secundária.

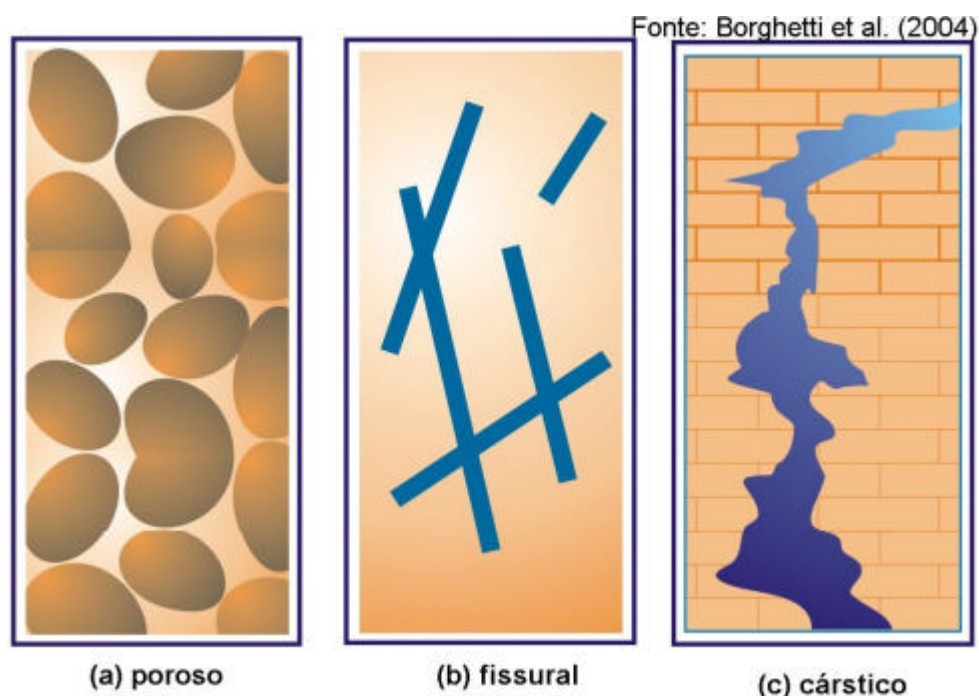


Figura 2.3: Diferentes tipos de aquíferos de acordo com a porosidade.

Os aquíferos sedimentares ou porosos são constituídos por rochas sedimentares consolidadas, sedimentos inconsolidados ou por solos arenosos, tal que os poros formados entre os grãos constituem o espaço de circulação de água. Esse tipo de reservatório subterrâneo é, geralmente, responsável pelo armazenamento de grandes volumes de água, daí a grande demanda no que se refere ao abastecimento público. Ocorre em bacias sedimentares e em várzeas com acumulação de sedimentos arenosos.

Os aquíferos fissurais ou fraturados têm esse nome por serem formados de rochas ígneas, metamórficas ou cristalinas, onde a circulação da água ocorre entre as fraturas, fendas e falhas que existem devido a movimentos tectônicos ocorridos anteriormente. Esses aquíferos

geralmente não constituem reservatórios tão generosos quanto os sedimentares uma vez que a capacidade de acúmulo de água desses é limitada pela quantidade de fraturas, aberturas e intercomunicações existentes. Ocorre na presença de basaltos e granitos, entre outros.

Os aquíferos cársticos são constituídos por rochas calcáreas ou carbonáticas, onde a circulação da água ocorre entre as aberturas, de dimensões variadas, resultantes da dissolução do carbonato pela água circulante. Ocorrem em calcários, dolomitos e mármore.

Além da porosidade, os aquíferos podem ser caracterizados conforme a pressão da água. Nesse contexto, os aquíferos podem ser de dois tipos (Figura 2.4): aquífero freático ou livre e aquífero confinado ou artesiano. O aquífero livre é constituído por uma formação geológica permeável e superficial, totalmente aflorante em toda a sua extensão, e limitado na base por uma camada impermeável. Nesse conjunto geológico, a superfície superior da zona saturada se comunica livremente e com a pressão atmosférica e está em equilíbrio com a mesma. Considerando que a água precipitada atinge diretamente o reservatório livre, pode-se concluir que o nível da água no mesmo varia segundo a quantidade de chuva. Correspondem ao tipo de aquífero mais comum e mais explotado para abastecimento público. O aquífero confinado é constituído por uma formação geológica permeável, confinada entre duas camadas impermeáveis ou semipermeáveis. Observa-se, então, uma situação onde a pressão no topo da zona saturada é superior à pressão atmosférica, de modo que a água se movimenta, no poço, para cima além da zona aquífera. Como não há comunicação com a superfície do solo, a recarga do mesmo através de precipitação ocorre, preferencialmente, nos locais onde a formação aflora à superfície.

Fonte: Borghetti et al. (2004)

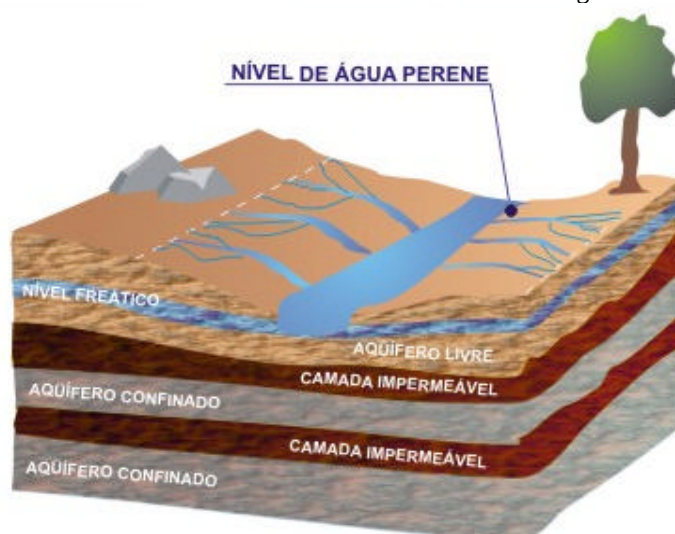


Figura 2.4: Tipos de aquíferos de acordo com a pressão de água.

Pode-se definir ainda um terceiro tipo de aquífero, trata-se do aquífero semi-confinado. Nesse tipo de aquífero verifica-se que há limitação na base, ou no topo, ou em ambos, por camadas cuja permeabilidade é menor do que a do próprio aquífero, geralmente muito mais baixa. O nível d'água nestes aquíferos estão, ainda assim, submetidos à pressão maior que a atmosférica.

Independente do tipo de reservatório, a superexploração da água subterrânea pode desencadear um processo de subsidência. Assim sendo, é fundamental a utilização de fontes e vertentes de forma racional tal que o seu uso não comprometa o uso futuro desses recursos. A exploração desses reservatórios subterrâneos deve estar vinculada, portanto, à compatibilização com as leis naturais que governam a sua ocorrência e reposição e com a proteção das áreas de recarga.

Em valores financeiros, a subsidência por exploração de água subterrânea pode resultar em danos muito graves, uma vez que é a de maior ocorrência em regiões urbanizadas, quando pode acarretar danos aos pavimentos de vias públicas, e às edificações, causando rachaduras ou inviabilizando seu uso. Os casos mais frequentes de subsidência registrados na literatura científica acontecem em áreas urbanas e dizem respeito à presença de aquíferos sedimentares. Casos de subsidência associados à ocorrência de aquíferos cársticos são menos frequentes, até mesmo porque essas localidades apresentam, naturalmente, restrições para assentamentos urbanos, em função dos referidos processos de dissolução das rochas carbonáticas.

2.3 Subsidência em aquíferos cársticos

A água presente num aquífero do tipo cárstico é encontrada preenchendo as fraturas abertas por dissolução dos calcários, a carstificação (Figura 2.5). Os problemas ambientais mais comuns associados aos relevos cársticos são a poluição da água subterrânea e os problemas de fundação (recalque diferencial, erosão subsuperficial e colapso da superfície do terreno dentro das cavidades subterrâneas). De acordo com a definição apresentada anteriormente, pode-se concluir que o fenômeno se origina na presença da água percolante dentro do aquífero, entretanto, a água da chuva, em combinação com o gás carbônico da atmosfera, constitui um meio ácido que tem a propriedade de dissolver, entre outras, as rochas compostas de carbonatos.

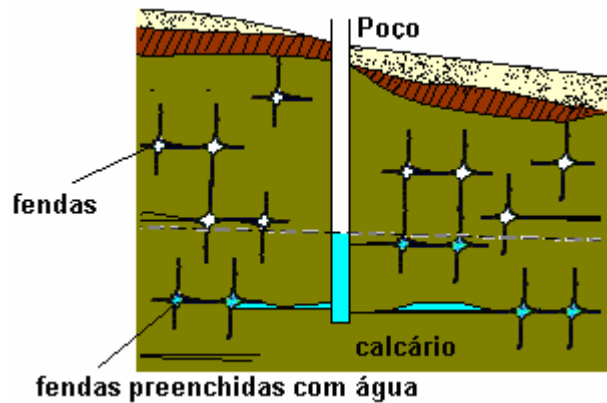
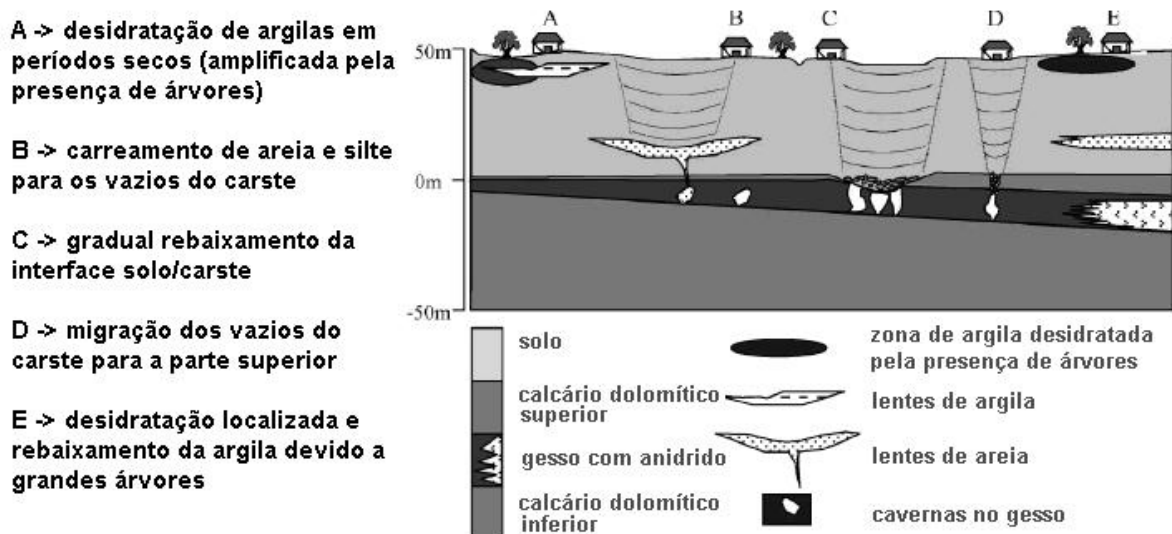


Figura 2.5: Esquema de um aquífero cárstico.

A carstificação é um fenômeno natural e freqüente em regiões de ocorrência de geologia cárstica, inclusive em algumas partes do mundo com essa característica, como no sudoeste dos Estados Unidos, onde, por exemplo, vários colapsos de superfície ocorrem num ano (Scott, 1979). Com relação às condições de armazenamento e fluxo d'água de um aquífero cárstico, esse fatores são decorrentes da dissolução da massa carbonática ao longo dos seus planos de fraturamento. Por esse motivo e, ao contrário dos demais aquíferos, apresenta variação no volume de armazenamento, ao longo do tempo, a medida que acontece desgaste da massa carbonática pelos processos de dissolução.

O processo de subsidência em aquíferos cársticos é discutido amplamente por pesquisadores de todo o mundo. Lamont-Black et al. (2002) realizaram um estudo sobre os problemas de subsidência potencialmente atribuídos à carstificação do calcário e apresentaram um esquema para o modelo conceitual dos mecanismos de subsidência, Figura 2.6.



Fonte: Lamont-Black et al. (2002)

Figura 2.6: Modelo conceitual dos mecanismos de subsidência.

De acordo com Lamont-Black et al. (2002), a dissolução do calcário acontece quando estão presentes simultaneamente os seguintes componentes: calcário, não saturação de água, energia para movimentação da água através do sistema, abastecimento de água. Assim, os frequentes colapsos das superfícies em ambientes cársticos constituem sérios problemas ambientais tanto em áreas rurais como em áreas urbanas.

Do ponto de vista do processo físico, a subsidência de um aquífero cárstico acontece, normalmente, após um rebaixamento excessivo do nível d'água que resulta num agravamento das condições naturais e aumento na dissolução da rocha, queda da pressão da água subterrânea e conseqüente aceleração do carreamento de grãos do solo. Essa seqüência de acontecimentos pode resultar, em alguns casos, no desabamento do teto das cavidades seguido do rebaixamento do solo da superfície (Figura 2.7).

Essas cavidades podem ter tamanhos variados, o que torna a “dimensão” do possível rebaixamento de difícil previsão, podendo resultar em desmoronamentos de camadas sobrejacentes e surgimento de cavidades superficiais de alguns metros de profundidade e de algumas dezenas de metros de diâmetro.

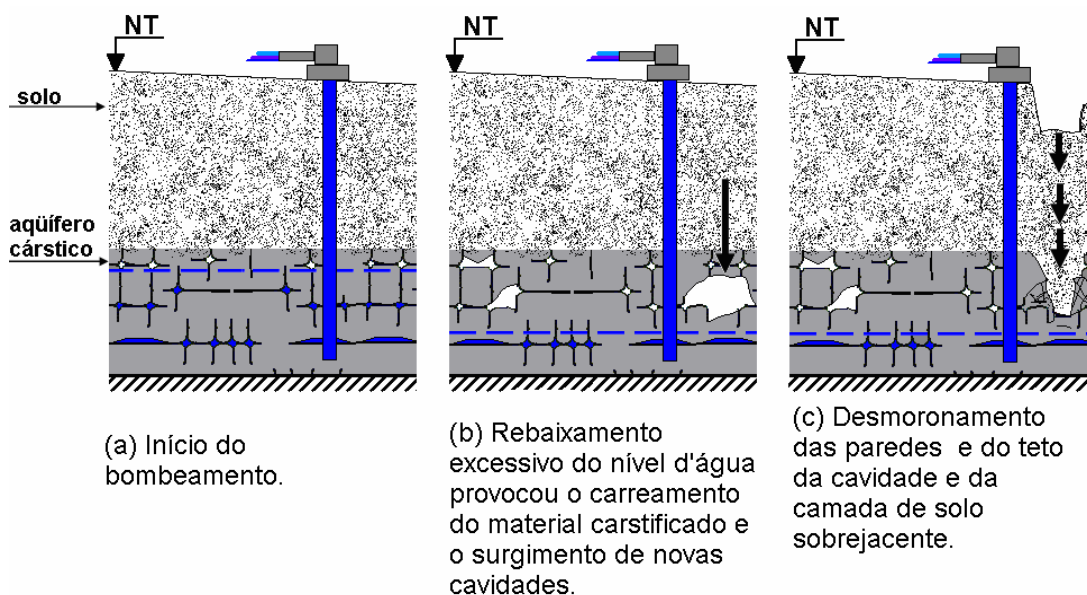


Figura 2.7: Colapso em aquífero cárstico.

2.4 Subsidência em aquíferos sedimentares

A ocorrência de subsidência em aquíferos sedimentares geralmente afeta grandes áreas, e compreende a forma mais extensa e custosa de subsidência, devido à atuação do homem, em nível mundial. O mecanismo de subsidência que ocorre em aquíferos sedimentares devido à exploração dos recursos hídricos subterrâneos é de fácil compreensão quando se considera

que num cubo de solo, em que atua constantemente uma carga geostática, vale o Princípio das Tensões Efetivas proposto por Terzaghi (1925):

$$s'_{ij} = s_{ij} - d_{ij} p \quad (2.1)$$

onde:

s'_{ij} é uma componente do tensor de tensões efetivas;

s_{ij} é uma componente do tensor de tensões totais;

d_{ij} é a função Delta de Kronecker; e

p é a pressão no poro com fluido.

Considerando uma camada de solo saturada, em que os poros estão totalmente preenchidos com água, a pressão total num determinado ponto dessa camada é distribuída entre a estrutura sólida e a parte fluida do solo. Com a ocorrência de bombeamento ou drenagem lateral da água subterrânea, a pressão da água é reduzida e, considerando que a magnitude da pressão total não se altera, a pressão não mais suportada pela parte fluida é totalmente transferida para os grãos do solo, isto pode acontecer tanto em aquíferos não-confinados (Figura 2.8) quanto em aquíferos confinados (Figura 2.9). Este aumento na tensão efetiva resulta na compressão do solo e conseqüente subsidência.

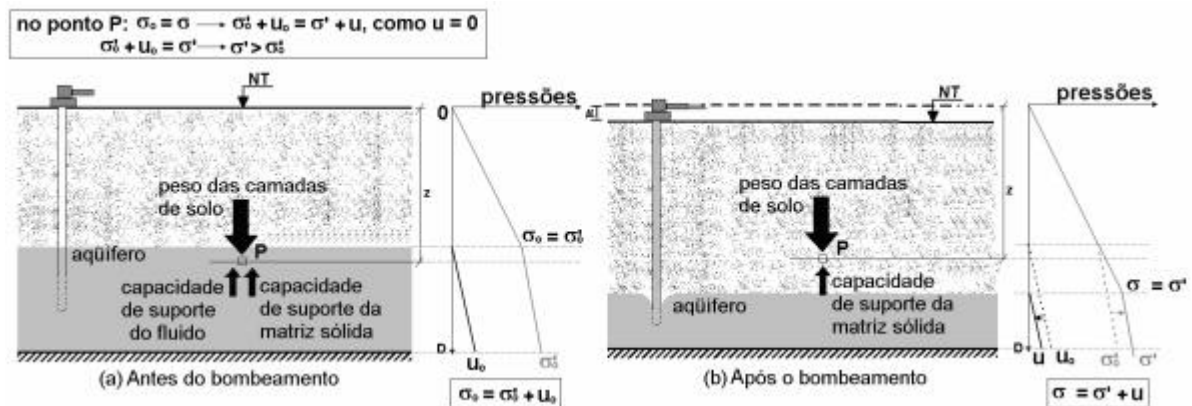


Figura 2.8: Aquífero sedimentar não-confinado.

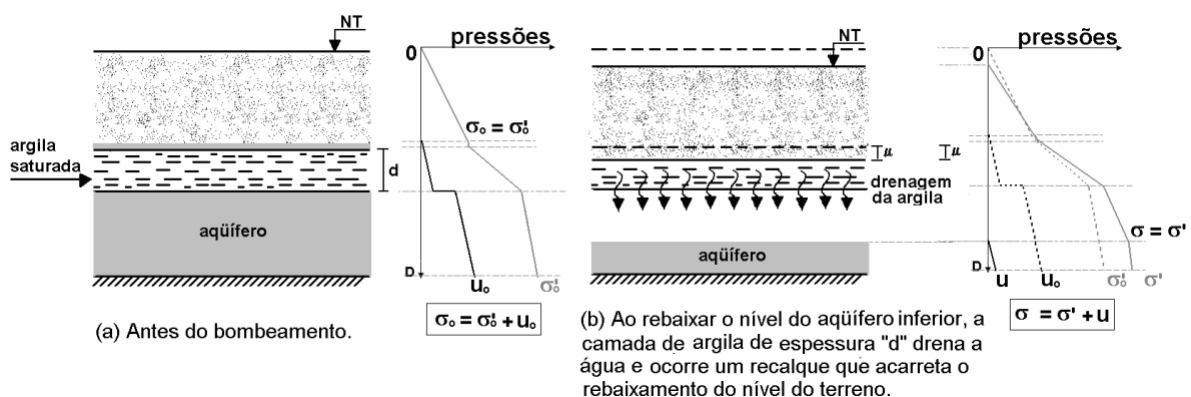


Figura 2.9: Aquífero sedimentar confinado.

De acordo com Scott (1979), considerando que a contração volumétrica de materiais granulares é quase irrecuperável, a superfície de subsidência que ocorre como resultado da redução na pressão do fluido em uma camada subjacente pode raramente ser revertida.

Os solos de granulação fina, por outro lado, têm um comportamento mais complexo. Este tipo de solo registra “na memória” as máximas tensões experimentadas por sua estrutura, que são comumente conhecidas como tensão de pré-consolidação. Quando a tensão efetiva reduz e a pressão neutra aumenta o solo apresenta um comportamento previsível e expande elasticamente. Por outro lado, quando a tensão efetiva aumenta e a pressão neutra diminui, duas situações podem ser esperadas: a tensão efetiva é inferior à tensão de pré-consolidação e o aquífero experimenta um deslocamento vertical recuperável ou elástico, ou, ao contrário, a tensão efetiva é superior à tensão de pré-consolidação e o aquífero experimenta um significativo re-arranjo que resulta num deslocamento vertical irrecuperável ou inelástico.

A complexa situação que envolve a combinação fluxo e deformações volumétricas compreende o conjunto de equações:

$$s = g \times D \quad (2.2)$$

$$s' = f(n) \quad (2.3)$$

$$s' = F(S_g + S_w = 1) \quad (2.4)$$

onde:

g é o peso específico do solo;

D é a profundidade do ponto analisado;

n é a porosidade; e

S_g, S_w correspondem ao grau de saturação do gás e da água, respectivamente.

O fluxo num aquífero sedimentar compreende, portanto, a movimentação da água através de seus poros e, as deformações volumétricas observadas neste maciço, resultam da variação da porosidade que, por sua vez, afeta a distribuição de pressões, que também está associada à condutividade hidráulica. A quantidade de subsidência em uma determinada área está, portanto, relacionada com a magnitude do rebaixamento do nível d'água, a porcentagem de argila presente no aquífero e ao período de tempo em que o nível d'água foi mantido rebaixado (Mingorance, 2000).

2.5 Casos de subsidência no mundo

Vários centros urbanos contabilizam prejuízos devido à ocorrência de subsidência. Existem registros de casos na literatura científica, em toda parte do mundo, relacionados com a

exploração sem controle ou gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos em aquíferos sedimentares e cársticos, alguns estudos, inclusive, já vêm sendo realizados há anos. A partir desses estudos pode-se ter uma idéia da velocidade de evolução do processo e da gravidade das conseqüências quando não são tomadas medidas mitigadoras em tempo hábil.

2.5.1 Casos de subsidência na América do Norte

Na base da Força Aérea Edwards, localizada no Vale Antelope, na Califórnia, a exploração de água subterrânea, para fins de agricultura e abastecimento da população, reduziu o nível do lençol freático em mais de 45 m e provocou um rebaixamento do nível do terreno de aproximadamente 1.20 m (Sneed e Galloway, 2000).

O vale San Joaquim, localizado na Califórnia, compreende uma área de intensa atividade agrícola que chegou a apresentar subsidência da ordem de 8.8 m ao longo de várias décadas de bombeamento (Larson et al., 2001). A área que tem sido objeto de estudo já há algum tempo e continua chamando a atenção de alguns pesquisadores, pois ali se observa que em alguns momentos a situação é muito crítica e em outros preocupantes. Ao final de 1970, por exemplo, a conclusão de um aqueduto foi responsável por uma redução de 50 a 70% da taxa de subsidência e estudos recentes apontam para crescente redução nesta taxa nas últimas três décadas. Entretanto, períodos de seca, casos anteriores de subsidência e ausência da devida preocupação por parte da administração pública conferem à região um alto grau de risco de novas ocorrências do fenômeno.

No Vale Las Vegas, Nevada, o processo que se iniciou em 1935 resultou em rebaixamentos do nível d'água superiores a 90 m e em subsidência da ordem de 2 m (Bell, 1997). Sobre a subsidência ocorrida no Vale Las Vegas, Hoffmann et al. (2001) realizaram um estudo em que compararam os deslocamentos medidos com extensômetros locados em várias partes de Lorenzi e os resultados mostram concordância tanto na direção quanto na magnitude da subsidência. Os autores afirmaram que medições dessa natureza oferecem grande potencial para investigações futuras sobre o sistema aquífero e a heterogeneidade da estrutura do sistema e as propriedades do material, bem como para o monitoramento da compactação do sistema aquífero e da subsidência do solo.

Leake (1997) apresentou dados de valores máximos de subsidência, até 1997, para algumas localidades no sudoeste dos Estados Unidos, que variaram de menos de 30 cm em Tucson, Arizona, até 8.84 m no sudoeste de Mendota, na Califórnia.

Wilson e Gorelick (1996) apresentaram um estudo realizado no Vale Santa Clara, na Califórnia, utilizando o modelo computacional MODFLOW em que compara a subsidência resultante do esquema de bombeamento constante e do bombeamento envolvendo períodos

alternados de bombeamento e recuperação do poço com o objetivo de determinar as possíveis vantagens da segunda estratégia para redução da subsidência do solo. A estratégia utilizada foi de ajustar a velocidade de bombeamento tal que o volume de água extraído fosse o mesmo dentro do período considerado, que variou de 4 a 90 dias. Os resultados de todas as simulações mostraram que o bombeamento alternado causou uma subsidência maior próximo ao poço de teste que o bombeamento constante. Considerando uma determinada distância do poço, que depende das propriedades do aquífero e das camadas, e da estratégia de bombeamento alternado, verificou-se um ponto de transição em que o bombeamento alternado e o bombeamento constante produzem os mesmos valores de subsidência. Analisando locais mais afastados do poço, verificou-se que o bombeamento alternado produziu subsidência menor que o bombeamento constante. De forma geral, todas as estratégias de bombeamento alternado produziram um volume de subsidência maior que o bombeamento constante. Os autores concluíram que o bombeamento alternado pode ser usado como uma estratégia para gerenciamento do problema de subsidência do solo, desde que o poço de bombeamento esteja localizado numa área pouco desenvolvida próximo à cidade, uma vez que a subsidência nas proximidades do poço é um fator limitante.

A subsidência do solo associada ao rebaixamento do nível da água subterrânea foi reconhecida como um problema potencial no Vale Coachella, Califórnia, desde o início dos anos 20 devido ao bombeamento excessivo de água destinado à agricultura, ao abastecimento público municipal e ao consumo doméstico. De acordo com Sneed et al. (2002), essa exploração excessiva resultou num rebaixamento do nível da água subterrânea de mais de 15 metros até o final dos anos 40. Os autores afirmam que em 1949, iniciou-se a importação da água do Rio Colorado para o Vale Coachella, o que resultou numa redução no bombeamento da água subterrânea e numa recuperação do nível da água durante os anos 50 até os anos 70, quando aumentou a necessidade por água e houve novamente um aumento na quantidade bombeada. Esse aumento na exploração da água subterrânea resultou no rebaixamento do nível da água e, conseqüentemente, ocorreu um aumento no potencial da subsidência do solo devido à compactação do sistema aquífero. A localização, extensão e magnitude das variações verticais da superfície do solo no Vale Coachella, entre os anos de 1998 e 2000, foram determinadas com o emprego do GPS e interferometria. As medições com GPS realizadas em 15 monumentos geodésicos indicaram uma movimentação vertical da superfície do solo da ordem de -34 a +60 mm (± 45 mm) durante o período de dois anos. Verificou-se uma flutuação sazonal mas, segundo os autores, razoavelmente estável, que indica uma relação entre os níveis da água dentro de uma faixa elástica de tensão que não ultrapassou a tensão de

pré-consolidação do sistema aquífero, neste período de dois anos. Por outro lado, todas as áreas que rebaixaram coincidem com as (ou são próximas das) áreas onde o nível da água subterrânea rebaixou entre 1998 e 2000.

Na área de Albuquerque, Novo México, foram utilizadas imagens de radar de abertura sintética (SAR) da área metropolitana na Bacia Albuquerque que indicaram mudanças na elevação da superfície do solo (Heywood et al., 2002). Essas alterações na superfície do solo foram identificadas como subsidência e foram correlacionadas com alterações no nível da água. A magnitude da subsidência observada sugere que a deformação do aquífero resultante da exploração de água subterrânea na área de Albuquerque permaneceu na área elástica, e, portanto recuperável, de julho de 1993 até setembro de 1999. Os autores afirmam que existem evidências de rebaixamentos inelásticos do solo, que são irrecuperáveis, mas a relação com a compactação do aquífero não é conclusiva devido à insuficiência de dados sobre o nível da água.

Sneed et al. (2003) apresentaram o caso de subsidência do solo associada ao rebaixamento do nível da água ocorrido no Deserto Mojave, na Califórnia, onde a água subterrânea constitui a fonte primária de abastecimento de água para uso doméstico, para a agricultura e para os habitantes do município no deserto desde o começo dos anos 90. De acordo com os autores, o bombeamento do reservatório subterrâneo das bacias do Rio Mojave e Morongo, ambas localizadas no Deserto Mojave, foi responsável pelo rebaixamento no nível da água subterrânea de mais de 30 metros entre os anos 50 e 90. Para o monitoramento da superfície do solo foi realizado um levantamento com GPS utilizando-se uma rede geodésica para determinar a localização, extensão e a magnitude dos deslocamentos verticais na localidade. Segundo os autores, os levantamentos realizados em 1998 indicaram que ocorreu uma subsidência de cerca de 600 mm entre 1969 e 1998 em três monumentos enquanto que em outros sete monumentos ocorreu um pequeno ou nenhum deslocamento. Entre os anos de 1970 e 1998, o nível da água na área em que ocorreu a subsidência rebaixou 15 metros. Também foram utilizados métodos interferométricos para caracterizar as variações verticais na superfície do solo da área das bacias do Rio Monjave e Morongo. Os resultados da aplicação desses métodos indicaram que ocorreu uma subsidência de 45 a 90 mm em quatro áreas destas duas bacias (Sneed et al., 2003).

O caso do aquífero do Vale de Toluca, localizado no plano elevado do México, foi discutido por Esteller e Diaz-Delgado (2002), e compreende uma área de aproximadamente 900 km², é um importante centro industrial e uma área com intensa atividade agrícola. Além disso, de acordo com o último censo, em 2000, a população no vale já atingiu 1.6 milhões de

habitantes, sendo que 65% moram em áreas urbanas e 35% em áreas rurais. Esses fatores têm contribuído para que o Vale venha sofrendo os efeitos da intensa exploração para atender a necessidade de água no próprio Vale e parte da cidade do México (Esteller e Diaz-Delgado, 2002). Observou-se, nessa região, a ocorrência de problemas como rebaixamento da superfície piezométrica² (de até 15 m em 13 anos), subsidência, diminuição no fluxo de rios. Esteller e Diaz-Delgado (2002) apresentaram ainda a situação hídrica da região e as medidas mitigadoras que já foram implantadas até o momento, como construção de novos reservatórios nas redondezas, mas que não resultaram na recuperação do aquífero e que, por isso, é necessário aplicar outras medidas como por exemplo, direcionar a exploração da água subterrânea do poços para outras fontes de recursos (água superficial, água poluída tratada), redução da vazão de bombeamento e recarga artificial. González-Morán et al. (1999) afirmaram que a subsidência do solo na bacia do México não pode ser totalmente interrompida, mas apenas controlada, uma vez que o sistema de abastecimento de água da cidade do México depende da água subterrânea do aquífero profundo. De acordo com as autoridades locais (Gerência de Águas do Vale do México) a ocorrência de subsidência nos últimos 100 anos já resultou num rebaixamento na parte central da área urbana de mais que 7.5m. González-Morán et al. (1999) afirmaram ainda que, em algumas áreas, verificou-se uma subsidência superior a 15m devido a grande retirada de água subterrânea e a grande espessura das camadas de argila. Esteller e Andreu (2005) realizaram um estudo para determinar em que grau esta intensiva exploração é capaz de afetar e modificar a química da água. De acordo com os autores é realizado um monitoramento pelo Comitê Nacional de Água através de uma rede piezométrica que conta com 50 poços de monitoramento. Os autores aplicaram técnicas estatísticas e dados históricos de alguns parâmetros físico-químicos e concluíram que a superexploração não causou deteriorização significativa na qualidade da água do aquífero, mas apenas uma alteração nas suas características químicas.

A Tabela 2.3 apresenta alguns valores de subsidência registrados na América do Norte que estão associados à exploração excessiva dos recursos hídricos subterrâneos.

2.5.2 Casos de subsidência na Ásia e Nova Zelândia

Thu e Fredlund (2000) apresentaram vários exemplos de cidades e países expostos ao fenômeno da subsidência e destacaram a modelagem realizada em Hanoi, Vietnam. O processo de extração de água do aquífero se iniciou em 1909 e, atualmente, com uma população superior a 4 milhões de habitantes, utiliza uma demanda de aproximadamente

² Superfície piezométrica é a linha que limita superiormente a zona de saturação.

450000 m³/dia. Sérios problemas estruturais em edificações locais têm sido observados nos arredores dos poços bombeados como resultado do rebaixamento do solo nessas áreas. A região composta de solo compressível, a grande quantidade de água explotada e a variação horizontal e vertical do coeficiente de permeabilidade compõem características suficientes para justificar a taxa de subsidência determinada no estudo, 20 a 35 mm/ano.

Tabela 2.3: Valores de subsidência registrados na América do Norte

Localidade	Tempo de monitoramento	Subsidência	Fonte de informação
Vale Antelope, Califórnia	66 anos	1.20 m	Sneed & Galloway (2000)
Vale San Joaquim, Califórnia	52 anos	8.8 m	Larson et al. (2001)
Vale Las Vegas, Nevada	57 anos	2 m	Bell (1997)
Tucson, Arizona	-	0.30 m	Leake (1997)
Mendota, Califórnia	-	8.84 m	Leake (1997)
Vale Coachella, Califórnia	2 anos	0.06 m	Sneed et al. (2002)
Deserto Mojave, Califórnia	-	0.05 a 0.09 m	Sneed et al. (2003)
Eloy, Arizona	-	4.57 m	Leake (1997)
Phoenix, Arizona	-	5.49 m	Leake (1997)
Bacias Mimbres, Novo México	-	0.61 m	Leake (1997)
Lancaster, Califórnia	-	1.83 m	Leake (1997)
Davis, Califórnia	-	1.22 m	Leake (1997)
Vale Santa Clara, Califórnia	-	3.66 m	Leake (1997)
Ventura, Califórnia	-	0.61 m	Leake (1997)
El Paso, Texas	-	0.30 m	Leake (1997)
Houston, Texas	-	2.74 m	Leake (1997)
Cidade do México, México	100 anos	15 m	González-Morán et al. (1999)

Abidin et al. (2001) relataram a ocorrência de subsidência em Jakarta na Indonésia. Várias localidades na cidade têm mostrado um rebaixamento a diferentes velocidades. Além do uso de extensômetros para medição da subsidência e do acompanhamento do nível da água subterrânea, têm sido implantados na região sistemas de monitoramento geodésicos, como o tradicional nivelamento e recursos mais recentes como o sistema de posicionamento global – GPS. Utilizando resultados de nivelamentos realizados em 1982, 1991 e 1997, e de campanhas com GPS conduzidas em 1997 e 1999, foram detectadas subsidências acima de 80 cm durante o período de 1982 a 1991, e acima de 160 cm entre 1991 e 1997. Os resultados da campanhas com GPS, por sua vez, apontaram uma subsidência superior a 20 cm, de 1997 a 1999. Segundo os autores, a comparação com os dados hidrológicos mostrou que a subsidência do solo está fortemente relacionada com a excessiva exploração da água subterrânea.

Shearer (1998) utilizou o modelo computacional chamado de *Interbed Drainage Package* desenvolvido no âmbito do modelo MODFLOW na simulação da porção de Hangu, na China, e os resultados foram utilizados no gerenciamento do problema da subsidência do solo. A

origem do problema está associada basicamente à exploração demasiada dos mananciais subterrâneos em aquíferos sedimentares não consolidados. De acordo com o autor, a formação geológica contém significantes camadas de argilas, de baixa permeabilidade, que provocam retardos entre a extração da água subterrânea e a subsidência resultante. O modelo computacional também foi utilizado para as condições da cidade de Tianjin, pela *Tianjin Bureau of Geology and Mineral Resources*, e o autor garante que nos dois casos foram obtidos dados adequados e podem, portanto, ser empregado em simulação de cenários futuros. Na cidade de Suzhou, localizada na provincial de Jiangsu, na China verificou-se a ocorrência de rebaixamento do solo numa região que, segundo estudos hidrogeológicos e geológicos, um sistema aquífero composto de várias camadas de argila de origens distintas (marinhas e lacustres). De acordo com Chen et al. (2003), examinando os registros dos níveis de água subterrânea e as informações sobre o rebaixamento do solo, verifica-se uma associação entre a subsidência do solo e o contínuo aumento na exploração dos recursos hídricos subterrâneos do aquífero confinado. Os autores acreditam que a consolidação das camadas de argila, especialmente a terceira camada que é grossa e próxima ao principal aquífero bombeado. No âmbito desse estudo foi desenvolvido um modelo numérico de diferenças finitas tridimensional representando o sistema aquífero com várias camadas para simulação do rebaixamento do solo em resposta à extração de água. As saídas dos modelos apresentaram boa correspondência com os resultados observados e indicam que o modelo numérico pode reproduzir o processo dinâmico tanto do fluxo d'água quanto da consolidação do solo.

Em Taiwan, nos arredores do rio Choshui, fenômeno de subsidência do solo aumentou rapidamente ao longo de quatro décadas devido à grande exploração de água subterrânea (Liu et al., 2004). Em mais esse caso, os autores confirmam a relação entre subsidência do solo e a variação no nível da água subterrânea. Foi realizado um monitoramento da compressão e foram identificadas as camadas com maior deformação, compostas de argila e areia. Segundo os autores, foram estudados modelos conceituais de compressão para argilas e areias baseados em resultados de campo. Verificou-se, então, que as camadas de areia sofreram uma deformação volumétrica irreversível e exibiram um comportamento mecânico elastoplástico. Ao relatar o estudo realizado no Condado de Yunlin, em Taiwan, Chang (2000) ressaltou a eficiência do emprego do GPS no monitoramento da subsidência, uma vez que, além de rápida essa técnica não é cara e permite a obtenção de resultados com alta precisão. Com o objetivo de determinar o conjunto de dados da primeira época de medições e investigar a praticabilidade do monitoramento da subsidência local com GPS foi instalada uma rede de monitoramento com 52 estações GPS. O autor ressaltou a importância do

conhecimento preciso da altura geoidal quando se utiliza a técnica combinada de nivelamento com GPS, uma vez que esse parâmetro constitui o *datum* entre os dois sistemas, influenciando na confiabilidade da subsidência obtida com essa integração. Por outro lado, as variações na altura geométrica entre dois conjuntos de soluções podem ser tratadas como subsidência do solo sem requerer qualquer informação sobre altitude geoidal. A combinação dessas duas técnicas, entretanto, é particularmente interessante em localidades que já vêm utilizando o nivelamento por um longo tempo para o monitoramento da superfície do solo e pretende-se realizar um primeiro conjunto de medições de altitude com GPS. Os resultados GPS foram obtidos de uma campanha realizada em 4 dias com sessões de observação de 2 horas e mostraram basicamente que ocorreu uma subsidência significativa (que indica uma velocidade superior a 10 cm/ano) na área monitorada, sendo necessário mais períodos de observação GPS para identificar claramente esse fato, ficando claro que séries de tempo maiores de monitoramento, usando levantamentos repetidos com GPS são muito úteis.

Na cidade de Ojiya, no Japão, a subsidência do solo causada pela compressão das camadas de argila foram medidas com o emprego do sistema de posicionamento global – GPS, entre 1 de abril de 1996 e 31 de dezembro de 1998 (Sato et al, 2003). Três linhas de base foram selecionadas nas redondezas da cidade e foram medidas as diferenças de altitude, com referência ao elipsóide WGS-84, para cada linha de base. No que se refere à precisão, as medições apresentaram um desvio padrão de 9.5 mm. Complementarmente à realização das observações GPS, foram observados os níveis d'água em um poço próximo à estação GPS. O valor da subsidência detectado com as observações foi de 7 cm num período de 3 anos. Os resultados indicaram que o GPS é uma boa ferramenta para o monitoramento diário contínuo da subsidência para longos períodos. Na área estudada, verificou-se ainda uma boa correlação entre o nível da água subterrânea e a diferença de altitude.

Em Bangkok, na Tailândia, a subsidência do solo devido a superexploração da água subterrânea constitui um dos dilemas ambientais mais urgentes e tem sido objeto de estudo de alguns pesquisadores. De acordo com Phien-wej et al. (1998), a recarga artificial tem sido proposta como uma forma adicional de recuperar os níveis piezométricos e mitigar a subsidência do solo. Dentro do processo de recarga do sistema aquífero, foi realizada uma experiência de campo com o objetivo de investigar as características particulares da recarga do aquífero superior. Segundo os autores a operação foi realizada com sucesso de outubro de 1993 a junho de 1994 e permitiu a construção de um procedimento padrão, tal que os dados de monitoramento e as análises que foram realizadas poderão ser aplicados em outras localidades em condições similares. Concluiu-se, portanto, que a recarga artificial pode ser

uma alternativa efetiva de mitigação da subsidência do solo quando é aplicada dentro do contexto do gerenciamento integrado dos recursos hídricos para o abastecimento público. Giao et al. (1999) apresentaram um estudo desenvolvido com modelagem quase tri-dimensional para análise do fluxo da água subterrânea em um aquífero com várias camadas visando a modelagem da recarga artificial. A área de estudo foi um aquífero localizado na cidade de Bangkok e foram analisados os resultados que envolveram a combinação de fluxo e consolidação. A escolha dessa área de estudo aconteceu devido à ocorrência de subsidência na região como resultado da exploração de água subterrânea e à realização de estudos no local que recomendam a recarga artificial como uma medida suplementar de mitigação.

A ocorrência de subsidência na Arábia Saudita está associada basicamente à retirada de água subterrânea para áreas de agricultura ou para o umedecimento de solos instáveis que tem resultado no desenvolvimento de vazios subterrâneos pela dissolução de rochas calcáreas. Amin e Bankher (1997) propuseram que os diferentes tipos de perigos geológicos estejam associados a diferentes tipos de subsidência do solo na Arábia Saudita. Estes perigos incluem carstificação, dissolução de sais e solos instáveis. Essas informações ressaltam a importância em controlar a exploração desenfreada, especialmente em regiões que apresentam perigos geológicos evidentes.

Atapour e Aftabi (2002) relataram o caso ocorrido na cidade de Kerman, no Irã. De clima semi-árido e com uma precipitação anual da ordem de 158 mm, a região de Kerman compreende uma camada superficial de depósitos aluvionares cobrindo um calcário Cretáceo altamente fraturado. Os estudos hidrogeológicos apresentados pelos autores alertam para uma situação preocupante associada ao bombeamento excessivo, uma vez que o nível da água subterrânea apresentou um rebaixamento de cerca de 80 cm/ano e taxa de subsidência de 6 cm/ano.

No campo Wairakei, em Nova Zelândia, que já vem sendo monitorado há 45 anos e sobre o qual existe um grande acervo, de casos registrados na bibliografia, de ocorrência de subsidência. Allis (2000) relatou a história do processo de subsidência na região devido à exploração de água subterrânea a altas temperaturas, em que os efeitos do fenômeno foram atribuídos à compactação das camadas do solo e o solo rebaixou 14.0 m ao longo de 45 anos.

A Tabela 2.4 apresenta alguns valores de subsidência registrados na Ásia que estão associados à exploração excessiva dos recursos hídricos subterrâneos.

Tabela 2.4: Valores de subsidência registrados na Ásia e na Nova Zelândia

Localidade	Tempo de monitoramento	Subsidência	Fonte de informação
Hanói, Vietnam	6 anos	0.30 m	Thu e Fredlund (2000)
Jakarta, Indonésia	-	0.20 m	Abidin et al. (2001)
Suzhou , China	14 anos	1 m	Chen et al. (2003)
Condado de Yunlin, Taiwan	-	0.10 m/ano	Chang (2000)
Ojiya, Japão	3 anos	0.07 m	Sato et al, 2003
Kerman, Irã	-	0.06 m/ano	Atapour e Aftabi (2002)
Wairakei, Nova Zelândia	45 anos	14.0 m	Allis (2000)

2.5.3 Casos de subsidência na Europa

A Itália também tem sofrido com os efeitos da subsidência. Bitelli et al. (2000) apresentaram resultados de campanhas de nivelamento conduzidas por várias autoridades, ou agências realizadas, no Vale Po, que compreende as cidades de Veneza, Bologna e Ravena, para acompanhamento da evolução do processo. Além do nivelamento, foram realizadas campanhas com técnica GPS ao longo da linha da costa. Os autores chamam a atenção sobre a problemática que envolve a homogeneidade dos dados, uma vez que esses apresentam diferentes origens, diferentes períodos e as campanhas foram realizadas utilizando-se diferentes *benchmarks* de referência. Para solucionar esse problema os autores propuseram uma rede de nivelamento cobrindo a área do vale, tal que essa rede deve funcionar como uma estrutura para referência espacial e temporal de todas as medições realizadas anteriormente e das atuais. O caso de subsidência ocorrido na bacia sedimentar da planície Po foi relatado por Carminati e Martinelli (2002). De acordo com os autores, além da ocorrência de subsidência associada à atividade tectônica no local, outros fenômenos de rebaixamento do solo recentes foram verificados na área que podem ter sido induzidas pelas atividades humanas. Particularmente na segunda metade do século 20 verificou-se um grande aumento na exploração dos recursos hídricos subterrâneos como consequência do grande crescimento populacional na região. Nesse contexto, Carminati e Martinelli (2002) sugeriram que o principal fator para controle da subsidência recente, que apresentou uma taxa de 0 a 70 mm/ano, é a extração de água subterrânea. As comparações entre os mapas de velocidade de subsidência e os mapas de fluxo indicaram uma correlação bem definida entre esses dois acontecimentos. Segundo Lewis e Schrefler (1987), a subsidência induzida pelo homem na área de Marghera, em Veneza, iniciou com o desenvolvimento da zona industrial por volta de 1925. No período de 1952 a 1969 a extração de água subterrânea para essa região resultou num rebaixamento de 10 cm. Outros fatores naturais como o rebaixamento do solo devido a consolidação natural de depósitos de granulação fina e, principalmente, o levantamento

eustático do nível do mar também são citados pelos autores como os fatores que têm contribuído para o rebaixamento de Veneza e arredores com relação ao nível do mar.

Casos de subsidência também foram registrados na área costeira da Holanda, e Kooi (2000) realizou modelagem numérica para estudar o processo e prever a taxa de subsidência atual do local. O modelo utilizado baseia-se na lei de Darcy para o cálculo do fluxo de água e a compactação é governada pelo princípio da tensão efetiva de Terzaghi (Equação 2.1). Um outro estudo foi realizado na Holanda por Van der Meij e Minnema (1999) sobre possíveis variações na superfície da água e nos sistemas de água subterrânea da Província de Friesland. Os estudos foram conduzidos com o emprego de modelagem numérica para avaliação dos efeitos simultâneos de subsidência do solo e avanço do mar na zona costeira da Província de Friesland. Com esse propósito, o código computacional utilizado mostrou-se capaz de gerar um claro entendimento dos efeitos envolvidos no sistema hidrológico.

A segunda maior cidade na Grécia, Thessaloniki, também tem histórias relacionadas à ocorrência de subsidência do solo. Stiros (2001) atribuiu o rebaixamento do solo em Thessaloniki, a uma velocidade de 10 cm/ano, além da consolidação dos sedimentos próximos à superfície devido ao rebaixamento do nível piezométrico como resposta à superexploração dos recursos hídricos subterrâneos, à soma de outros fatores, como oxidação da turfa localizada nas zonas não saturadas e consolidação de sedimentos profundos.

A Tabela 2.5 apresenta alguns valores de subsidência registrados na Europa que estão associados à exploração excessiva dos recursos hídricos subterrâneos.

Tabela 2.5: Casos de subsidência registrados na Europa

Localidade	Fonte de informação	Observações
Holanda	Kooi (2000) Van der Meij e Minnema (1999)	Realização de modelagem aplicada à subsidência.
Thessaloniki, Grécia	Stiros (2001)	Taxa de subsidência de 0.10 m/ano.
Veneza, Bologna e Ravena, na Itália	Bitelli et al. (2000) Carminati e Martinelli (2002) Lewis e Schrefler (1987)	Subsidência de 0.10m medidas em 17 anos em Veneza. Taxa de subsidência de 0 a 70 mm/ano no Vale Po.

2.6 Casos de subsidência no Brasil

As águas subterrâneas no Brasil estão armazenadas em diferentes tipos de reservatórios (porosos, fissurados e cársticos). Os sistemas porosos, que são formados por rochas sedimentares, ocupam cerca de 42% da área total do país e compõem cinco sistemas

sedimentares: Amazonas, Paraná, Parnaíba-Maranhão, Centro-Oeste e Costeira. Pertencem aos sistemas fissurados, que ocupam 53.8% do território nacional, as formações hidrogeológicas dos escudos Setentrional, Central, Oriental e Meridional. Os sistemas cársticos brasileiros são formados pelo sistema cárstico-fissural da Província Hidrogeológica do São Francisco, distribuindo-se ao longo dos Estados da Bahia, Goiás e Minas Gerais.

Sabe-se que em vários núcleos urbanos no Brasil o abastecimento público é feito por meio de poços que exploram a água subterrânea de forma exclusiva ou complementar. Importantes cidades do país dependem integral ou parcialmente da água subterrânea para abastecimento, como, por exemplo: Ribeirão Preto (SP), Mossoró e Natal (RN), Maceió (AL), Região Metropolitana de Recife (PE) e Barreiras (BA). No Maranhão, mais de 70% das cidades são abastecidas por águas subterrâneas, e em São Paulo e no Piauí esse percentual atinge 80%. Além disso, atualmente, a água mineral é amplamente usada pelas populações dos centros urbanos, por sua qualidade.

Apesar do amplo uso dos mananciais hídricos subterrâneos, existem poucos registros de subsidência devido à extração de água no Brasil, essa ausência de documentos, entretanto, não deve se traduzir em inexistência do fenômeno. Considerando que em algumas regiões do país a situação de exploração dos aquíferos já resultou em rebaixamentos muito grandes no nível da água, faz-se necessário um monitoramento, nessas localidades, para detecção de possíveis deslocamentos verticais da superfície do solo.

Os aquíferos cársticos, por sua vez, quando sujeitos à subsidência são responsáveis por grandes catástrofes mundiais. No Brasil, os casos de maior repercussão foram os de Sete Lagoas em Minas Gerais (Figura 2.10), em 1988, o de Cajamar no estado de São Paulo (IPT, 1986 - Figura 2.11), e o de Mairinque, também em São Paulo, em 1981.

Fonte: Silva, 1995.



Figura 2.10: Colapso em Sete Lagoas, em Minas Gerais, no ano de 1988.

Fonte: Dr. José Luiz Albuquerque Filho do IPT/SP)



Figura 2.11: Colapso em Cajamar, em São Paulo, no ano de 1986.

Os valores são significativos, em Sete Lagoas foi aberta uma cratera de 20 m de diâmetro por 5 m de profundidade, em plena área urbana, e em Cajamar formou-se uma cratera de 31 metros de diâmetro por 13 metros de profundidade. Em ambos os casos, as áreas são geologicamente caracterizadas pela ocorrência de rochas calcárias, assim sendo, os colapsos refletem, na superfície, a evolução ascendente dos bolsões, ou cavernas, do subsolo (Silva, 1995).

2.7 Comentários finais

A subsidência do solo é um fenômeno preocupante que pode ocorrer em diversas localidades do mundo. Apenas nos Estados Unidos mais que 44.000 km² em 45 estados têm sido diretamente afetadas pela subsidência causada pela acomodação do sistema aquífero, drenagem de solos orgânicos, minas subterrâneas e hidrocompactação, compactação de reservatórios de petróleo, dentre outros processos (Hoffmann et al., 2003). Mingorance (2000) apresentou os registros máximos, observados nos Estados Unidos, e mostrou em escala mundial a disparidade em velocidade e magnitude entre a subsidência superficial resultante da exploração de água (caso típico de regiões com aquíferos sedimentares) e a subsidência superficial atribuída à dissolução de rochas ou sais. De acordo com o autor, no primeiro caso o registro máximo foi da ordem de 9m em 52 anos (Califórnia), e no segundo caso, foi de 34m em 48 horas. Esse rebaixamento relativamente lento próprio de aquíferos sedimentares facilita o acompanhamento do desenvolvimento do fenômeno, permitindo, em alguns casos, o emprego de medidas mitigadoras e a redução de prejuízos. O caráter brusco, típico da subsidência em aquíferos cársticos, por sua vez, implica numa atuação mais devastadora.

CAPÍTULO 3

SUBSÍDIOS PARA ANÁLISE DA POSSIBILIDADE DE RISCO DE SUBSIDÊNCIA

3.1 Introdução

Considerando as demandas existentes e a disponibilidade dos recursos hídricos subterrâneos é necessário realizar a gestão adequada desses recursos para que a captação da água dos aquíferos seja realizada de forma compatível com a capacidade de recuperação do mesmo. Caso contrário é necessário avaliar os riscos geotécnicos resultantes da exploração dessa área.

A exploração da água subterrânea pode ser considerada demasiada quando ocorre extração em limites superiores à capacidade de produção do aquífero, provocando danos ao meio ambiente ou para o próprio recurso, como aumento nos custos de bombeamento, escassez de água, indução de água contaminada e problemas geotécnicos de subsidência.

A estratégia de prevenção do esgotamento dos mananciais consiste basicamente na delimitação da ocupação da área, baseada em mapas de graus de vulnerabilidade natural dos sistemas aquíferos e de riscos potenciais de poluição associados à carga contaminante presente na superfície, e no zoneamento de áreas de riscos potenciais, de áreas críticas que sirvam de base ao planejamento para ações governamentais e de controle e proteção de aquíferos (Nadal et al., 2001 apud Foster et. al, 1988). Nesse momento, dois importantes conceitos devem ser distinguidos: risco e vulnerabilidade. Artuso et al. (2004, apud Lobo Ferreira e Cabral, 1991) apresentaram o conceito de vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas como sendo “a sensibilidade da qualidade das águas subterrâneas a uma carga poluente, função apenas das características intrínsecas do aquífero”. Segundo os autores, o risco de poluição depende não apenas da vulnerabilidade mas também da existência de cargas poluentes que possam poluir o meio subterrâneo.

No que se refere aos cuidados com a exploração desordenada dos recursos hídricos, considerando a gravidade dos riscos envolvidos na sua ocorrência, uma outra susceptibilidade que deve ser considerada refere-se à ocorrência de subsidência. De maneira análoga pode-se considerar a vulnerabilidade à subsidência como as

características geológicas que predispõe o aquífero a desenvolver o processo. Caso o aquífero vulnerável não seja explorado demasiadamente pode não sofrer deslocamentos verticais. Caso contrário, o aquífero, já sendo vulnerável, pode estar sob o risco de subsidência.

Duas ferramentas podem ser utilizadas no levantamento de subsídios para análise da possibilidade de risco de subsidência: a identificação de áreas que podem sofrer o fenômeno baseada na situação atual de ocupação da área e nos estudos geológicos e hidrogeológicos já realizados, e a modelagem numérica da exploração do aquífero para simulação de cenários futuros, que deve considerar uma estimativa de crescimento da demanda por recursos hídricos subterrâneos.

3.2 Fatores que contribuem para o aumento da possibilidade de risco de subsidência

Para identificação de uma determinada região quanto à vulnerabilidade à subsidência é necessário um conhecimento adequado sobre as características locais. Alguns fatores, podem ser indicados como contribuintes para o aumento da possibilidade de risco de subsidência, e estão relacionados com a utilização do solo, a geologia e a hidrogeologia.

- **Utilização do solo**

Existem alguns casos de ocorrência de subsidência em regiões com grande atividade agrícola, como foi descrito anteriormente na Califórnia – no Vale Antelope (Sneed e Galloway, 2000), no Vale San Joaquin (Larson et al., 2001), Vale Coachella (Sneed et al., 2002), Deserto Mojave (Sneed et al., 2003) e outros lugares, como na Arábia Saudita (Amin e Bankler, 1997). Nessas localidades, geralmente, acontece exploração de água subterrânea em grande quantidade para fins de irrigação.

Grandes centros urbanos também estão sujeitos à possibilidade de ocorrência de subsidência do solo devido à grande extração de água destinada ao abastecimento urbano. São exemplos de localidades com essas características que sofreram com a ocorrência do fenômeno: Hanói, no Vietnã (Thu e Fredlund, 2000); Bangkok, na Tailândia (Phien-wej et al., 1998; Giao et al., 1999), Vale Po, na Itália (Bitelli et al., 2000; Carminati e Martinelli, 2002). De forma geral, verifica-se a ocorrência simultânea de dois fatores que podem contribuir para o rebaixamento do solo: a presença de carregamento constante do solo devido à grande concentração de edificações na localidade e a exploração demasiada resultante do grande crescimento

populacional e da distribuição desordenada da população. O próprio surgimento de fissuras em edificações e pavimentos podem ser indicadores de má utilização dos recursos subterrâneos e não devem ser desprezados quando na ocasião de investigação de subsidência.

- **Geologia**

O conhecimento geológico é fundamental como subsídio para analisar a possibilidade de risco de subsidência. Assim sendo, as investigações associadas à geologia devem ser direcionadas, principalmente, para identificação de ocorrência de material argiloso entre as camadas de solo, e/ou para identificação de carste coberto.

No que se refere à ocorrência de material argiloso no perfil de solo, fatores como distribuição espacial e espessuras das camadas quando acompanhadas de informações hidrológicas referentes aos aquíferos podem contribuir para o aumento ou a redução dos indícios sobre a possibilidade de ocorrência de rebaixamento do solo.

Com relação à presença de carste coberto, alguns aspectos podem ser investigados sobre a existência de drenagens secas, sumidouros, ressurgências, dolinas, entre outros. Associados a esses fatores deve-se investigar possíveis alterações na topografia da região, principalmente associadas a movimento descendente da superfície do solo.

- **Hidrogeologia**

O conhecimento das peculiaridades hidrológicas dos solos tem uma grande importância quando se verifica a possibilidade de rebaixamento do solo. Características como armazenamento e circulação de água são peças-chaves para identificação de áreas que podem apresentar problemas e, nesse contexto, é muito importante a realização de um monitoramento de longo prazo. Além disso, sempre que possível, deve-se priorizar o estudo da hidrogeologia em detalhe, visando o refinamento dos conhecimentos das características dos aquíferos presentes na área de investigação, e o levantamento dos poços existentes e das vazões bombeadas, atendendo preferencialmente a séries históricas no período de observação. Nesse contexto, a velocidade de bombeamento, o volume armazenado e a capacidade de

recarga são indicadores da capacidade de resposta do aquífero e da necessidade ou não de restrição de exploração numa determinada área.

Regiões com grande crescimento populacional tendem a utilizar os mananciais subterrâneos em quantidades e velocidades acima da capacidade de recuperação dos mesmos e podem levar o reservatório até mesmo a exaustão. Assim sendo, é fundamental o conhecimento e o acompanhamento dos níveis potenciométricos da região com vistas a identificar localidades em situação precária que tenham experimentado grandes rebaixamentos num curto intervalo de tempo.

3.3 Roteiro para o levantamento da susceptibilidade à subsidência

Para avaliação de riscos geotécnicos em áreas que apresentam potencial de rebaixamento superficial é necessária uma ação preventiva no sentido de evitar a ocupação inadequada do solo nessas áreas.

Baseado nas sugestões apresentadas por Nadal et al. (2001) sobre os passos para o levantamento de uma carta de risco de área urbanizada apresentam-se, a seguir, os critérios que podem ser considerados na avaliação da susceptibilidade de uma determinada área de desenvolver subsidência.

O processo preventivo pode ser baseado nos passos seguintes:

1. Levantamento e análise dos dados disponíveis com relação à topografia, geologia e hidrogeologia, considerando os diversos mapas existentes (topográficos, geológicos, hidrológicos, potenciométricos e uso e ocupação do solo), as informações com relação à evolução do rebaixamento dos níveis d'água e o balanço entre as entradas e as saídas de água nos aquíferos.

O objetivo principal desse levantamento é identificar ocorrências anteriores de movimentação do solo na área de investigação buscando associações com as características pluviométricas e a evolução do quadro de exploração local (quantidade de poços, mapas potenciométricos, balanços hídricos, dados de perfuração e regimes de operação).

2. Investigações específicas e orientadas de geologia e geomorfologia que denunciem a eventual existência de carste coberto. Essas investigações devem permitir a identificação da natureza do carste e a localização espacial dos calcários na área. Alguns indicadores que devem ser considerados para um

levantamento mais cuidadoso da região sobre a existência de um carste coberto são: drenagens secas, sumidouros, ressurgências, dolinas, entre outros.

3. Investigações diretas e indiretas para obter informações sobre os aquíferos: métodos elétricos de levantamento geofísico (método indireto), e sondagens ou de informações de poços existentes (método direto). O objetivo dessas investigações é identificar a presença de calcários com cavidades em subsuperfície, espessura e características do material de cobertura, identificação do perfil do solo local, com atenção especial à investigação sobre a presença e extensão de cavidades, natureza e comportamento da águas no subsolo.
4. Acompanhamento de evolução de cavidades próximas à superfície através de registros sismográficos, e de variações do nível piezométrico por meio de ensaios de bombeamento e instalação de piezômetros.
5. Determinação da velocidade de escoamento de água e do volume armazenado. Nessa etapa é de fundamental importância a aplicação da modelagem matemática computacional, para que seja possível o entendimento mais abrangente e integrado dos problemas.
6. Acompanhamento das mudanças locais em frentes de topografia regular (surgimentos de depressões circulares, saliências e reentrâncias, dentre outros), tipo de vegetação (coloração e distribuição), estreitamento no leito dos cursos de água e nos vales.
7. Acompanhamento das mudanças locais no nível da superfície do solo, podendo ser indicado, por exemplo, pelo surgimento de rachaduras em edificações, ou desnível em pavimentos.
8. Levantamento atualizado dos poços existentes e das vazões bombeadas.
9. Definição do modelo conceitual de circulação da água subterrânea e suas conexões com as águas superficiais.

A realização das investigações sugeridas (itens 2 – 9) deve estar vinculada à necessidade de informações atualizadas, uma vez que as informações levantadas no item 1 já podem conter esses dados atuais. Além disso, é importante ressaltar que a realização de novas investigações não diminui a importância e a relevância em se considerar dados históricos. Essas informações são especialmente importantes quando se considera áreas urbanas onde se verifica uma variação muito grande no cenário local,

como construção recente de obras hidráulicas (reservatórios, adutoras, rede de drenagem de águas pluviais, entre outras).

A Tabela 31 apresenta as atividades que devem ser conduzidas conforme o tipo de aquífero considerado, sedimentar ou cárstico.

Tabela 3.1: Roteiro para levantamento de áreas de risco de subsidência

Atividades	Aquífero	
	Sedimentar	Cárstico
1) Levantamento e análise dos dados disponíveis.	X	X
2) Investigações específicas para identificação de carste coberto.		X
3) Investigações sobre os aquíferos.	X	X
4) Acompanhamento de evolução de cavidades.		X
5) Acompanhamento do escoamento de água e do volume.		X
6) Acompanhar mudanças locais (topografia, vegetação, etc.).		X
7) Acompanhar mudanças em edificações locais.	X	
8) Levantamento atualizado dos poços existentes.	X	X
9) Definição do modelo conceitual de circulação da água.	X	X

3.4 Considerações sobre a simulação numérica

Com uma reflexão sobre o número de ocorrências de subsidência no mundo, tal como descrito no Capítulo 2, é possível avaliar a necessidade de se investir em ferramentas capazes de auxiliar a ação de medidas mitigadoras pré ou pós-fenômeno. Por esse motivo, é cada vez maior o investimento de tempo, conhecimento e recursos financeiros no desenvolvimento de programas computacionais que sejam capazes de simular a compactação do solo devido à extração de fluido. Por tratar-se de um problema hidromecânico com muitas variáveis envolvidas e, considerando o processo físico, envolvendo cálculos de grande complexidade recomenda-se a utilização de um código computacional que apresente um bom desempenho na resolução de problemas geotécnicos envolvendo compactação de solo.

3.4.1 Considerações sobre o fluxo da água

Considerando que solos não saturados são meio porosos compostos de três fases, não é difícil imaginar a complexidade em descrever o comportamento desses solos em termos de tensões. Nesse sentido, as combinações que se mostraram mais eficientes na descrição do comportamento desses solos envolvem a tensão total, s , a pressão de

água, p_w , e a pressão de ar, p_a , e são conhecidas como tensão excedente sobre a pressão de ar, $(s - p_a)$, e sucção, $(p_a - p_w)$. Alterações nessas variáveis de tensões induzem deformações volumétricas, que alteram o grau de saturação e, conseqüentemente, influenciam o processo de fluxo. Uma simulação computacional que envolva fluxo e deformação exige, portanto, a utilização de um modelo hidromecânico completamente acoplado. Várias têm sido as tentativas no sentido de encontrar um modelo que satisfaça tais exigências.

Chilingarian et al. (1995) desenvolveram um estudo sobre a subsidência de reservatórios onde cita os princípios fundamentais da modelagem da extração de fluido de um meio poroso compressível, onde devem ser incorporadas as equações referentes aos seguintes princípios fundamentais:

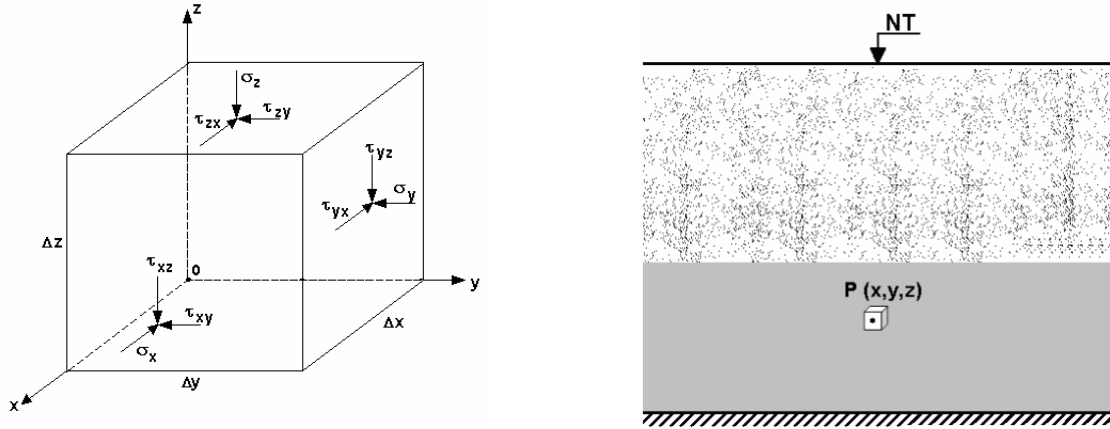
- continuidade para a matriz sólida e para a fase líquida;
- relação da viscosidade entre o fluido e a matriz sólida;
- tensão efetiva;
- relações constitutivas para as partículas da matriz sólida e para a fase líquida;
- variação da porosidade com relação à tensão efetiva, ao tempo e à permeabilidade do meio poroso;
- transferência de energia entre a matriz sólida e a fase líquida, exemplo calor;
- a relação de equilíbrio entre o campo de tensões na matriz sólida com o campo de fluxo da fase líquida.

De fato, a análise do acoplamento exige a consideração das equações de continuidade do ar e da água, relativas aos problemas de fluxo, e das equações de equilíbrio para o problema tensão-deformação.

De acordo com Lloret e Alonso (1980), o fluxo simultâneo de ar e de água pode ser considerado uma combinação de fluxo miscível, que corresponde ao ar dissolvido na água e ao vapor d'água presente no ar, e imiscível, onde cada fluido é admitido como contínuo e ocupa totalmente o domínio do fluxo. O vapor d'água tem importância especial quando há elevado gradiente de temperatura e baixo grau de saturação, assim sendo, não será considerado a presença de vapor d'água aqui, uma vez que o presente trabalho trata apenas de formulação isotérmica.

Numa visão microscópica, considerando um bloco diagrama para ilustrar as condições de contorno (Figura 3.1a), com forma de um paralelepípedo retangular de dimensões

Δx , Δy e Δz , cujo centro localiza-se em um ponto $P(x,y,z)$ sob o domínio de um aquífero, Figura 3.1b, e que possui forma e posição fixos durante o fluxo.



(a) Notação das tensões atuantes num cubo de solo, devendo-se considerar que as dimensões referentes a altura, comprimento e largura deste cubo aproximam-se de zero.

(b) Localização do cubo de solo.

Figura 3.1: Bloco de controle ilustrando as condições de contorno.

A diferença de fluxo de fluido (considerar-se-á como fluido, nesse caso, apenas a água) que entra e sai, da “caixa”, durante um intervalo de tempo Δt , na direção paralela a x , pode ser expressa por:

$$\Delta t \left\{ \mathbf{J}_x \Big|_{x-\frac{\Delta x}{2}, y, z} - \mathbf{J}_x \Big|_{x+\frac{\Delta x}{2}, y, z} \right\} \Delta y \Delta z, \quad (3.1)$$

onde:

$\mathbf{J}$ é o fluxo de massa, ou seja, a massa por unidade de área por unidade de tempo, de água, tal que

$$\mathbf{J} = r_w \mathbf{q}, \quad (3.2)$$

sendo:

r_w é a densidade da água,

$\mathbf{q}$ é a descarga de fluido total, que é dada por:

$$\mathbf{q} = n \mathbf{n}_{ws}, \quad (3.3)$$

onde:

n representa a velocidade e o índice ws corresponde a “fluida em relação à sólida”,

n é a porosidade.

De forma análoga, pode-se obter as expressões para determinação da diferença de fluxo de água, para o mesmo intervalo de tempo Δt , nas direções paralelas a y e z . A diferença de fluxo de água que entra e sai da “caixa” de controle, no intervalo de tempo Δt , pode ser expressa como:

$$\Delta t \left\{ \frac{\mathbf{J}_x|_{x-\frac{\Delta x}{2},y,z} - \mathbf{J}_x|_{x+\frac{\Delta x}{2},y,z}}{\Delta x} + \frac{\mathbf{J}_y|_{x,y-\frac{\Delta y}{2},z} - \mathbf{J}_y|_{x,y+\frac{\Delta y}{2},z}}{\Delta y} + \frac{\mathbf{J}_z|_{x,y,z-\frac{\Delta z}{2}} - \mathbf{J}_z|_{x,y,z+\frac{\Delta z}{2}}}{\Delta z} \right\} \Delta x \Delta y \Delta z, \quad (3.4)$$

onde:

$\Delta x \Delta y \Delta z$ é o volume da “caixa” de controle e pode ser expresso por ΔU .

Dividindo-se a expressão (3.4) por ΔU e por Δt obtém-se a diferença de fluxo de água que entra e sai da “caixa” de controle por unidade de volume por unidade de tempo, que pode ser expressa pelo divergente do vetor fluxo, ou seja:

$$-\left(\frac{\partial \mathbf{J}_x}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{J}_y}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{J}_z}{\partial z} \right) \text{ ou } -\text{div} \mathbf{J} (\equiv -\nabla \cdot \mathbf{J}). \quad (3.5)$$

Considerando que, em um meio poroso saturado, a massa de água presente em um volume de meio poroso é expressa por nr_w , tal que n é a porosidade volumétrica do meio. A taxa de variação da massa de fluido por unidade de volume do meio poroso é:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{(nr_w)|_{t+\Delta t} - (nr_w)|_t}{\Delta t} = \frac{\partial nr_w}{\partial t}. \quad (3.6)$$

A combinação das Equações (3.2), (3.5) e (3.6) resultam em:

$$-\nabla \cdot r_w \mathbf{q} = \frac{\partial nr_w}{\partial t}. \quad (3.7)$$

A consideração de um ponto de extração de fluido transforma a Equação (3.7) em:

$$-\nabla \cdot r_w \mathbf{q} - r_w P_w(x, y, z, t) = \frac{\partial nr_w}{\partial t}, \quad (3.8)$$

onde:

$P_w(x, y, z, t)$ é o volume de fluido extraído por unidade de área de meio poroso por unidade de tempo.

Arrumando os termos da Equação (3.7), chega-se a equação clássica para continuidade da fase líquida:

$$\frac{\partial n r_w}{\partial t} + \nabla \cdot r_w \mathbf{q} = f, \quad (3.9)$$

onde:

f é o termo fonte/sumidouro e, sem prejuízo de significado, substitui o termo $r_w P_w(x, y, z, t)$.

Assim, considerando a relação apresentada em (3.3) e, de forma análoga à fase líquida, pode-se escrever o balanço de massa para a fase sólida:

$$\frac{\partial (1-n) r_s}{\partial t} + \nabla \cdot \{r_s (1-n) \mathbf{n}_s\} = 0, \quad (3.10)$$

onde:

r_s é a densidade da fase sólida.

As Equações (3.10) e (3.9) correspondem, respectivamente, às equações de continuidade para a matriz sólida e para a fase fluida.

Com relação às equações de equilíbrio para o problema tensão-deformação, considera-se que, na ausência de efeitos inerciais, as equações de equilíbrio podem ser tomadas como:

$$-\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{b} = 0, \quad (3.11)$$

onde:

$\boldsymbol{\sigma}$ é o tensor de tensões totais, positivo no caso de compressão,

$\mathbf{b}$ representa as forças de massa que atuam diretamente sobre cada uma das partículas do meio poroso que, segundo Bear e Verruijt (1987) é dado pela equação: $\mathbf{b} = -\{r_w n + r_s (1-n)\} g \nabla z$.

Considerando o Princípio das Tensões Efetivas proposto por Terzaghi (1925) representado pela Equação (2.1), pode-se re-escrever a Equação (3.11), como:

$$\frac{\partial (s_{ij} - d_{ij} p_a)}{\partial x_i} + \frac{\partial p_a}{\partial x_i} + b_i = 0, \quad (3.12)$$

onde:

s_{ij} é uma componente do tensor de tensões totais,

x_i representa o sistema de coordenadas,

d_{ij} é a função Delta de Kronecker.

3.4.2 Relações Constitutivas

Leis ou relações constitutivas são modelos matemáticos que descrevem nossas idéias sobre o comportamento de um material (Desai e Siriwardane, 1984).

Tratando-se de um problema hidromecânico, onde o meio poroso é deformável e analisa-se o fluxo unicamente de água e as equações resolvidas, na simulação da subsidência são:

- Conservação da massa de água:

$$\frac{\partial n r_w}{\partial t} + \nabla \cdot r_w \mathbf{q} = f . \quad (3.9)$$

- Equilíbrio mecânico:

$$-\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{b} = 0 . \quad (3.11)$$

A resolução dessas equações implica na utilização de relações constitutivas relacionando, direta ou indiretamente, as variáveis que aparecem nas equações de conservação com as incógnitas do problema.

3.4.3 Modelo Constitutivo Hidráulico

Para simulação de fluxos em meios porosos é necessário considerar um meio contínuo de dimensões muito superiores aos valores dos tamanhos dos poros. Sob esta condição, pode-se distinguir dois importantes conceitos envolvidos na modelagem do fenômeno, porosidade e permeabilidade. A porosidade média de um cubo de solo é a razão entre o volume de vazios e o volume total do cubo e corresponde à medida da capacidade do meio em armazenar fluido (óleo, água ou gás). A permeabilidade, por sua vez, corresponde ao grau de facilidade do fluido em penetrar e fluir através do meio poroso.

A análise do fluxo de água em meios porosos não saturados baseia-se nas mesmas leis do fluxo em meios saturados, lei de conservação de massa e na Lei de Darcy, sendo a água um meio contínuo e não considerando o vapor tal que $p_a = cte$. A Lei de Darcy é uma lei empírica, para o fluxo horizontal de fluido monofásico, que relaciona a taxa de variação de fluido (o fluxo) através de uma amostra do meio poroso com as dimensões da amostra:

$$Q = KA \frac{(f_1 - f_2)}{L}, \quad (3.13)$$

onde:

Q é o fluxo de fluido, ou seja, o volume de fluido por unidade de tempo,

A é a área da seção transversal atravessada pelo fluido,

f_1 e f_2 correspondem às cargas piezométricas na entrada e na saída, respectivamente, do reservatório, tal que, para um ponto qualquer do

filtro: $f = z + \frac{p_p}{g_f}$, sendo: z corresponde à elevação do ponto, p_p é a pressão no

ponto e g_f é o peso específico do fluido,

L é o comprimento do reservatório,

K é a constante de proporcionalidade ou condutividade hidráulica.

A permeabilidade depende tanto das propriedades da matriz sólida quanto do fluido. As propriedades relevantes que influenciam na permeabilidade do solo, e dizem respeito às propriedades do fluido percolante, são a densidade, r , e a viscosidade, m . Por outro lado, com relação às propriedades da matriz sólida, percebe-se que a distribuição do tamanho dos grãos e poros, a forma dos grãos e poros, a tortuosidade, a superfície específica e a porosidade são os fatores determinantes. Neste contexto, pode-se definir a condutividade hidráulica como sendo:

$$K = \frac{kr_g}{m}, \quad (3.14)$$

onde:

k é a permeabilidade específica ou intrínseca do meio poroso e depende unicamente das propriedades da matriz sólida.

Considerando a relação para a condutividade hidráulica apresentada na Equação (3.14), pode-se re-escrever a Equação (3.13) da seguinte forma:

$$Q = -\frac{kr_g A}{m} \left[\frac{(f_1 - f_2)}{L} \right]. \quad (3.15)$$

O sinal negativo na Equação (3.15) indica que a pressão diminui na direção do fluxo, ou seja, o fluxo acontece do ponto de carga piezométrica maior para o menor, ou ainda, no sentido da redução da carga que corresponde ao aumento na pressão.

Considerando os efeitos gravitacionais e a validade da relação que relaciona a velocidade média com o fluxo do fluido: $\mathbf{q} = \mathbf{Q}/A$; e admitindo que a direção da aceleração da gravidade coincide com o eixo z (crescendo para cima), a lei de Darcy pode-ser generalizada de forma diferencial, passando a ser:

$$\bar{\mathbf{q}} = -\frac{k}{m}(\nabla p + r\bar{\mathbf{g}}), \quad (3.16)$$

onde:

$\bar{\mathbf{q}}$ corresponde ao vetor velocidade aparente;

∇ é operador diferencial nabla utilizado para determinação do gradiente (taxa de variação de uma grandeza escalar ao longo de cada um dos eixos);

p é a pressão.

Várias fórmulas relacionando o coeficiente de permeabilidade com as várias propriedades da matriz sólida estão apresentadas na literatura. De acordo com Fredlund et al. (1994) o coeficiente de permeabilidade depende da umidade volumétrica, que depende da sucção do solo, que, tal como foi dito anteriormente, é uma das duas variáveis do estado de tensões que controla o comportamento dos solos não saturados. Bear e Verruijt (1987) afirmam que para um meio poroso isotrópico, é conveniente aplicar o conceito de permeabilidade relativa, definida como sendo a taxa de permeabilidade efetiva para a correspondência permeabilidade e saturação. Para determinação da permeabilidade considera-se a relação expressa na Equação (3.17).

$$K = \frac{\mathbf{k}k_{rl}}{m}, \quad (3.17)$$

onde:

$\mathbf{k}$ é o tensor de permeabilidade intrínseca,

k_{rl} é a permeabilidade relativa, que corresponde ao coeficiente de permeabilidade para cada grau de saturação quando expresso em relação ao coeficiente de permeabilidade na condição saturada, ou seja:

$$k_{rl} = \frac{k_w}{k_{sat}}, \text{ sendo que } 0 \leq k_{rl} \leq 1. \quad (3.18)$$

Os valores extremos do coeficiente de permeabilidade correspondem à condição saturada ($k_w = k_{sat} \rightarrow k_{rl} = 1$) e à condição de solo seco ($k_w = 0 \rightarrow k_{rl} = 0$).

A permeabilidade intrínseca e a porosidade relacionam-se através da seguinte equação:

$$\mathbf{k} = \mathbf{k}_{ref} \frac{n^3(1 - n_{ref})^2}{(1 - n)^2 n_{ref}^3}, \quad (3.19)$$

onde:

$\mathbf{k}_{ref}$ é a permeabilidade intrínseca para a porosidade de referência,

n_{ref} é a porosidade de referência.

A relação entre a permeabilidade relativa e o grau de saturação pode ser expressa por:

$$k_{rl} = S^a, \quad (3.20)$$

onde:

a é uma constante.

Um solo não saturado tem poros de tamanhos diferentes que, considerando o processo de drenagem do solo, irão esvaziar sob diferentes níveis de sucção. Bear e Verruijt (1987) descrevem essa relação entre a capacidade de retenção da água no solo e a sucção experimentada pelo mesmo. Segundo os autores, os poros maiores irão esvaziar à sucção menores que os de dimensões mais reduzidas.

O coeficiente de permeabilidade é convencionalmente determinado usando-se o coeficiente de permeabilidade saturado e a curva característica de retenção solo-água, que relacionam pressão e grau de saturação, durante a drenagem, e mostram a quantidade de água retida no solo por forças capilares que atuam contra a gravidade. A forma da curva de retenção (Figura 3.2) depende da distribuição, do tamanho e do formato dos poros e da composição mineralógica da fração fina que compõem o meio poroso.

Resultados experimentais apontam a ocorrência de histerese nas curvas características de retenção solo-água que ocorre de forma não linear e depende da trajetória de umedecimento e secagem seguida.

Vanapalli e Lobbezoo (2002) afirmam que todos os parâmetros que influenciam no comportamento da curva de retenção característica solo-água também influenciam o comportamento do coeficiente de permeabilidade dos solos não saturados.

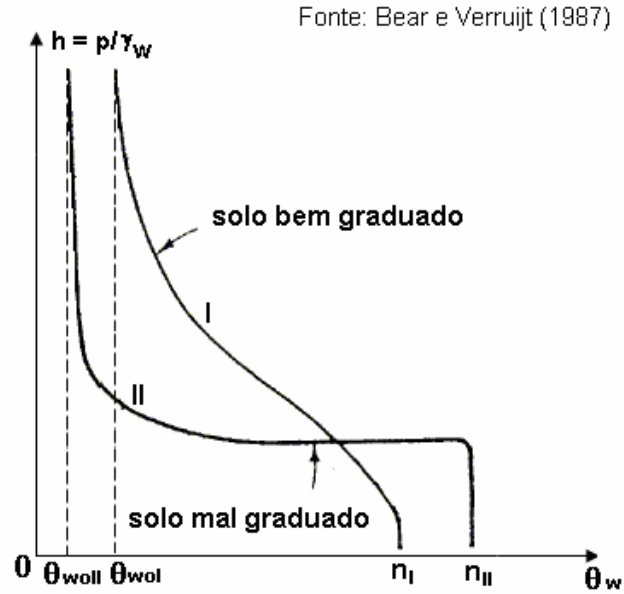


Figura 3.2: Curvas de retenção típicas.

Alguns autores propuseram funções para expressar analiticamente as curvas de retenção:

- Brooks e Corey (1964):

$$\Theta = \frac{q - q_r}{q_{sat} - q_r} = \left[\frac{p_a / rg}{p / rg} \right]^l \quad (3.21)$$

onde:

$\frac{p_a}{rg}$ é a pressão de borbulhamento (crítica) a partir da qual a água começa a ser

drenada do solo previamente saturado;

q é a umidade volumétrica;

l é um parâmetro característico do solo e os índices $_{sat}$ e $_r$ indicam os valores de umidade na saturação e residual, respectivamente.

- Gardner (1958):

$$k_w = k_{sat} \exp(ah), \quad (3.22)$$

onde:

k_{sat} é a condutividade hidráulica saturada;

a é um parâmetro constante para determinado tipo de solo; e

h é o potencial matricial.

- Arbhahhirama e Kridakorn (1968):
$$k_w = \frac{k_{sat}}{\left[\frac{(p_a - p_w)}{(p_a - p_w)_b} \right]^{n'} + 1}, \quad (3.23)$$

onde:

$(p_a - p_w)$ é a sucção;

$(p_a - p_w)_b$ é a sucção de entrada de ar; e

n' é um parâmetro de ajuste.

- Van Genuchten (1980) apresentou a seguinte expressão para curva de retenção:

$$\Theta = \frac{q - q_r}{q_{sat} - q_r} = \frac{1}{\left[1 + \left(a' \left| \frac{p}{rg} \right| \right)^{n''} \right]^m}, \quad (3.24)$$

sendo: $m = 1 - \frac{1}{n''}$

onde:

a', n'', q_r, m são parâmetros independentes que devem ser estimados pelo ajuste dos dados observados.

De acordo com Vanapalli e Lobbezoo (2002) a equação proposta por Van Genuchten (1980) é útil para a previsão do coeficiente de permeabilidade de solos não saturados para uma faixa de sucção entre 0 e 1500 kPa.

3.4.4 Modelos Constitutivos Mecânicos

A Equação de equilíbrio para os solos não saturados (3.11) explicitada em (3.12) requer a utilização de uma lei constitutiva para sua resolução. Lloret et al. (1987), considerando a Equação (2.1), propõem uma relação tensão-deformação que considera o comportamento dos solos não saturados:

$$ds' = D\Delta(e - e_0), \quad (3.25)$$

onde:

e_0 representa as variações de deformação devido às variações de sucção e pode ser determinada empregando-se: $e_0 = F\Delta(p_a - p_w)$,

D e F são coeficientes que dependem da história de tensão e sucção experimentada pelo solo e são definidos mediante o emprego de um modelo constitutivo.

Segundo Alonso (1993), os modelos constitutivos disponíveis para solos não saturados podem ser agrupados na seguinte classificação:

- expressões analíticas (Salas e Serratosa, 1957; Aitchinson e Martin, 1973; Lytton, 1977; Johnson, 1978; Justo et al., 1984)
- superfícies de estados (Burland, 1965; Blight, 1965; Aitchinson, 1965; Matyas e Radhakrisna, 1968; Fredlund, 1979; Lloret e Alonso, 1985)
- modelos elásticos (Coleman, 1962; Fredlund, 1979; Alonso et al., 1988)
- modelos elasto-plásticos (Josa, 1988; Alonso et al., 1990; Gens e Alonso, 1992; Wheeler e Sivakumar, 1995; Bolzon et al., 1996; Cui et al., 1995)

3.4.4.1 Modelos Elásticos

Um material exhibe comportamento elástico quando após um processo de carga/descarga retorna à sua forma original. Nesta situação pode-se considerar que o material obedece a um comportamento linear ou não linear.

Fredlund e Rahardjo (1993) apresentaram algumas expressões para descrição do comportamento de um material isotrópico e elástico linear:

$$e_x = (s_x - p_a) - \frac{u}{E}(s_y + s_z - 2p_a) + \frac{(p_a - p_w)}{H}, \quad (3.26a)$$

$$e_y = (s_y - p_a) - \frac{u}{E}(s_x + s_z - 2p_a) + \frac{(p_a - p_w)}{H}, \quad (3.26b)$$

$$e_z = (s_z - p_a) - \frac{u}{E}(s_x + s_y - 2p_a) + \frac{(p_a - p_w)}{H}, \quad (3.26c)$$

$$g'_{ij} = \frac{t_{ij}}{G} \text{ para } ij = xy, xz, yz, \quad (3.27)$$

onde:

u é o coeficiente de Poisson,

E é o módulo de elasticidade definido em relação à variação de tensão normal,

H é o módulo de elasticidade definido em relação à variação de sucção $(p_a - p_w)$,

G é o módulo cisalhante e pode ser determinado por: $G = \frac{E}{2(1+u)}$.

Modelos constitutivos não lineares também foram desenvolvidos, e Lloret e Alonso (1985) sugeriram a seguinte relação para o índice de vazios e para o grau de saturação:

$$e = e_0 + a * \log(s - p_a) + b * \log(p_a - p_w) + c * \log(s - p_a) \log(p_a - p_w), \quad (3.28)$$

$$S = 1 - [a' + d'(s - p_a)] \tanh(b'(p_a - p_w)), \quad (3.29)$$

onde:

$a^*, a', b^*, b', c^*, d'$ são constantes.

As Equações (3.28) e (3.29) podem ser utilizadas na reprodução do comportamento colapso/expansão dos solos não saturados.

Alguns autores mostram que trajetórias que envolvem inicialmente um aumento na sucção (secagem) e subsequente aumento na tensão aplicada, ou o processo inverso, com as mesmas condições iniciais e finais de tensões, apresentam variações de volume distintas.

Os modelos elásticos, lineares ou não, são muito limitados uma vez que não permitem a reprodução do fenômeno das deformações irreversíveis, que os solos não saturados apresentam, e a influência das trajetórias de tensão. Daí a necessidade em se utilizar modelos elastoplásticos na representação do comportamento dos solos não saturados.

3.4.4.2 Modelos Elastoplásticos

Um material exibe comportamento elastoplástico quando após um processo de carga/descarga sofre deformações recuperáveis seguidas de permanentes. Nesse contexto, existe uma região de comportamento elástico limitada por uma superfície de escoamento, ou seja, utiliza-se uma função de plastificação para indicar o início da plastificação, cujas variáveis independentes são os seis componentes do tensor (simétrico) de tensões. A tensão que indica o início da plastificação, também conhecida como tensão limite de escoamento, pode aumentar (diz-se que ocorreu endurecimento) ou diminuir (diz-se que ocorreu amolecimento), como resultado da ocorrência de deformações plásticas, e a lei que descreve esse comportamento é conhecida como Lei de Endurecimento.

O modelo elastoplástico Cam-clay foi desenvolvido para a argila de Cambridge na Inglaterra, Roscoe et al. (1958) e basea-se na teoria da elastoplasticidade e na teoria do estado crítico. O estado crítico é definido como aquele em que não há variação de volume nem de tensões. Esse comportamento pode ocorrer em solos pré-adensados (índice de vazios aumenta) ou em solos em adensamento (índice de vazios diminui), que após a ocorrência de deformações consideráveis experimenta o estado crítico. A Figura 3.3 apresenta a variação do índice de vazios - e , como função da deformação axial - e_a , de um corpo de prova submetido a um estado unidimensional de tensões.

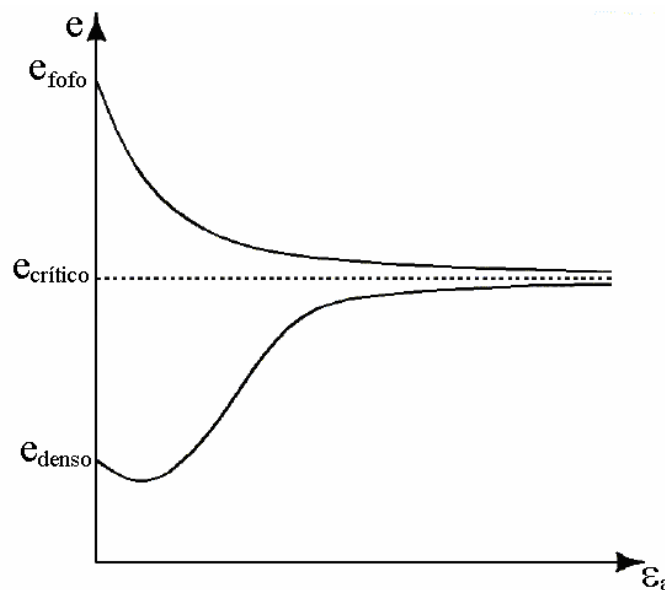


Figura 3.3: Estado crítico.

Como consequência desse fenômeno, a resistência dos solos densos atinge um pico de tensão que diminui para uma situação residual, amolecimento, enquanto que nos solos fofos ocorre o aumento gradual da resistência até que o estado crítico é atingido, endurecimento.

O modelo Cam-clay prevê a ruptura do material para uma relação entre a tensão total média excedente sobre a pressão do ar - p' , e a tensão desvio - q :

$$\frac{q}{p'} = M, \quad (3.30)$$

onde:

M é a inclinação da linha do estado crítico no plano $(q \times p')$.

O modelo Cam-clay é bastante versátil, pois possui poucos parâmetros de fácil obtenção, mas, por outro lado, possui a desvantagem de limitar-se à condição axissimétrica de tensões e deformações. Além disso, o modelo Cam-clay apresenta dificuldades em reproduzir algumas características típicas do comportamento dos solos saturados, a saber:

- a descontinuidade na primeira derivada que existe na superfície de escoamento quando $q = 0$, isso implica em deformações cisalhantes não nulas diante de variações exclusivas de tensões médias; e
- para alguns tipos de incrementos de deformações, o modelo pode produzir variações de tensões muito altas.

Devido a essas insuficiências do modelo original foi proposto o modelo Cam-clay modificado (Roscoe e Burland, 1968; Schofield e Wroth, 1968). O modelo Cam-clay modificado foi inicialmente desenvolvido para estados de tensões típicos dos ensaios triaxiais e, posteriormente, foi generalizado por Wood (1984) para estados 3D de sollicitação. A principal modificação implementada foi na superfície de plastificação (Figura 3.4). Uma completa descrição do modelo elastoplástico necessita da definição da superfície de plastificação e das leis de fluxo e de endurecimento. A superfície de plastificação divide o espaço das tensões em duas regiões, definindo a existência, ou não, de deformações plásticas (Silveira, 1992). No interior da superfície de plastificação os incrementos de tensão resultam em deformações elásticas. Acréscimos de tensão que conduzem o estado de tensões para fora da superfície originam deformações elastoplásticas.

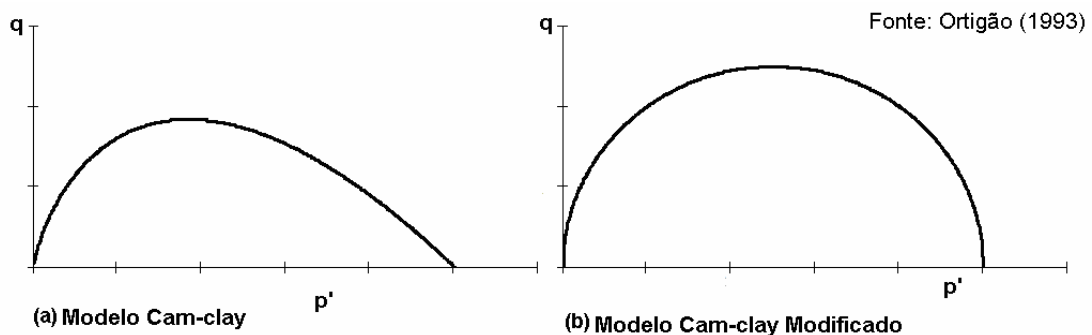


Figura 3.4: Superfície de plastificação.

Josa et al. (1987) realizaram alguns ensaios de consolidação isotrópica com o objetivo de observar o comportamento elastoplástico de um solo não saturado. E em 1990,

Alonso et al. propuseram o primeiro modelo elastoplástico para descrição do comportamento dos solos não saturados que atualmente é conhecido como BBM – *Barcelona Basic Model*.

A superfície de plastificação do modelo de Alonso et al. (1990) está apresentada na Figura 3.5 e é definida a partir de duas superfícies: a curva LC (*Loading Collapse*) e o plano SI (*Suction Increase*). A superfície LC transforma-se na superfície do modelo Cam-Clay modificado quando o solo está saturado ($s = 0$).

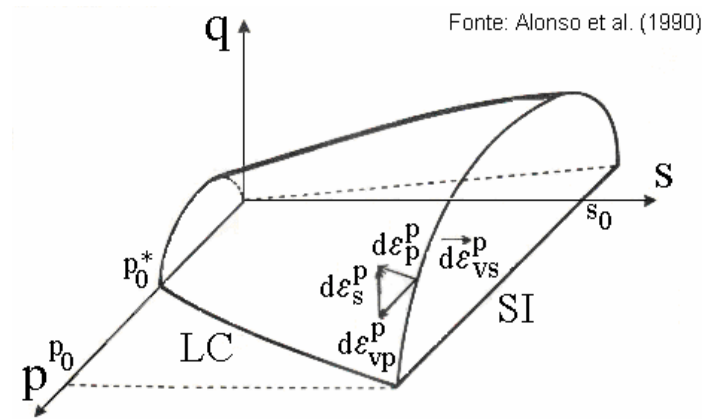


Figura 3.5: Relação entre as tensões de pré-adensamento.

As quatro variáveis de estado adotadas no modelo BBM valem para a condição isotrópica e são - p, s, q, v - descritas a seguir:

$$p = \frac{s_1 + s_2 + s_3}{3} - p_a, \quad (3.31)$$

$$s = p_a - p_w, \quad (3.32)$$

$$q = (s_1 - s_3), \quad (3.33)$$

$$v = N(s) - l'(s) \ln \frac{p}{p^c}, \quad (3.34)$$

onde:

s é a sucção,

v é o volume específico,

s_i tensão na direção principal $i = 1, 2, 3$,

N é o volume específico inicial,

l' é o parâmetro de compressão virgem para um determinado valor de sucção s , tal que o aumento do mesmo corresponde a uma maior rigidez do solo nos intervalos de tensão utilizados :

$$l'(s) = l'(0)[(1-r)\exp(-bs) - r] ,$$

sendo que:

$l'(0)$ é o parâmetro de compressão virgem para a condição saturada, onde $s = 0$,

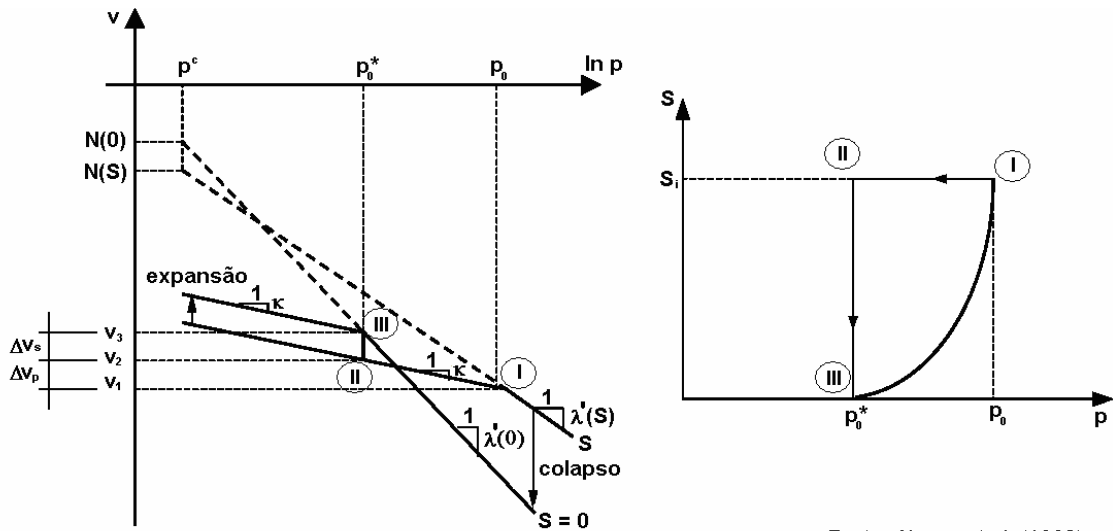
b é um parâmetro que controla a velocidade do aumento de rigidez do solo com o aumento da sucção,

r é a constante relacionada com a rigidez máxima do solo, tal que:

$$r = \lim_{s \rightarrow \infty} \left(\frac{l(s)}{l(0)} \right) ,$$

p^c corresponde a um estado de tensão de referência em que $v = N(s)$.

As deformações plásticas podem ser decorrentes do aumento da sucção ou da tensão total. O comportamento de duas amostras de solo sob sucções diferentes ($s = 0$ e $s = s_1$) e carregamento isotrópico é representado na Figura 3.6.



Fonte: Alonso et al. (1990)

Figura 3.6: Relação entre as tensões de pré-adensamento.

Para a mostra saturada ($S = 1$ e $s = 0$) a tensão de escoamento é p_0^* , que corresponde à tensão de pré-adensamento saturada, enquanto que, para a amostra sob sucção s_1 , o

escoamento (ou plastificação) se dará a uma tensão p_0 maior. Para cada valor de sucção existe um valor de tensão de escoamento correspondente. Para dois pontos pertencentes à mesma curva de escoamento, tais como os pontos 1 e 3 da Figura 3.6b, é possível estabelecer uma relação entre p_0^* e p_0 , através de volumes específicos do solo nesses pontos.

Analisando a trajetória de tensões 1-2-3 (Figura 3.6b), em que o solo é inicialmente descarregado de p_0 para p_0^* , sob sucção constante (trecho 1-2) e depois submetido a uma redução na sucção de s_1 à zero, sob a tensão constante p_0^* (trecho 2-3), simultaneamente com a Figura (3.6a), chegamos a Equação (3.35).

O descarregamento com sucção constante (trecho 1-2) encontra-se na região elástica, onde vale a expressão:

$$dv = -\kappa \frac{dp}{p}, \quad (3.35)$$

onde:

κ é o parâmetro de rigidez elástica para a variação da tensão p .

O umedecimento indicado do ponto 2 ao 3 também ocorre no domínio elástico e a deformação volumétrica resultante desse procedimento pode ser expressa por:

$$dv = -\kappa_s \frac{ds}{(s + p_{atm})}, \quad (3.36)$$

onde:

p_{atm} é a pressão atmosférica (foi acrescida à expressão visando evitar valores infinitos para a variação de volume quando a sucção aproxima-se de zero),

κ_s é o parâmetro de rigidez elástica para a variação da tensão s .

Relacionando-se os volumes específicos dos pontos 1 e 3 chega-se a:

$$v_1 + \Delta v_p + \Delta v_s = v_3. \quad (3.37)$$

Substituindo as Equações (3.34), (3.35) e (3.36) na Equação (3.37) pode-se chegar à expressão que relaciona p_0^* e s e representa a equação da curva de plastificação:

$$\left(\frac{p_0}{p^c} \right) = \left(\frac{p_0^*}{p^c} \right)^{\frac{[I'(0)-k]}{[I'(s)-k]}}. \quad (3.38)$$

A Equação (3.38) define o aumento na tensão de escoamento isotrópica, p_0^* com o aumento da sucção e o fenômeno de colapso observado na trajetória de umedecimento. Por esse motivo, a curva resultante da aplicação da Equação (3.38) é chamada de curva de escoamento carregamento-colapso.

Considerando que um aumento na sucção para valores acima da sucção máxima já sofrida pelo solo pode induzir deformações irreversíveis, definimos com isso, uma outra superfície de escoamento denominada *suction increase* – SI, que é definida por:

$$s = s_0. \quad (3.39)$$

Estas duas superfícies, LC e SI, Figura 3.6, definem o campo de tensões que limitam uma região elástica. Josa et al. (1987) mostraram que a movimentação da curva SI afeta a resposta do solo com relação à curva LC.

Considerando as duas superfícies de escoamento definidas para os parâmetros de endurecimento p_0^* e s , pode-se entender que a deformação volumétrica plástica total compreende a soma das parcelas de deformação devido à variações da tensão e da sucção separadamente:

$$de_v^p = de_{vp}^p + de_{vs}^p, \quad (3.40)$$

onde:

de_v^p é o incremento de deformação volumétrica plástica total,

de_{vp}^p é o incremento de deformação volumétrica plástica devido à variação da tensão para um valor de sucção constante, tal que:

$$d\varepsilon_{vp}^p = \frac{\lambda'_s - \kappa}{V} \frac{dp_0}{p_0}, \quad (3.41)$$

de_{vs}^p é o incremento de deformação volumétrica plástica devido à variação da sucção para um valor de tensão constante:

$$d\varepsilon_{vs}^p = \frac{\lambda_s - \kappa_s}{V} \frac{ds_0}{(s_0 + p_{atm})}, \quad (3.42)$$

sendo que:

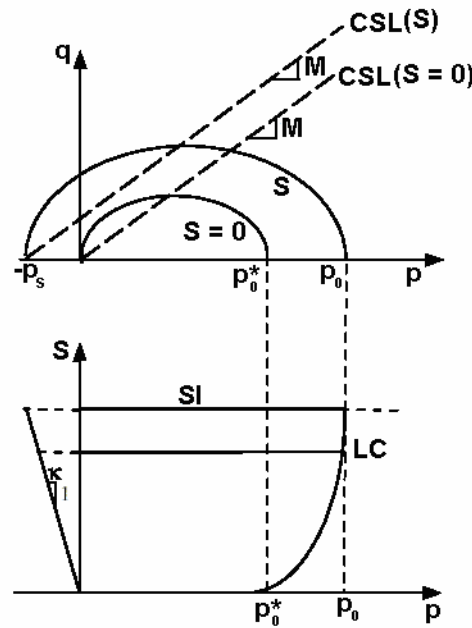
l_s é o coeficiente de compressibilidade para aumento de sucção em estado virgem.

À Equação (3.40) está associada ao acoplamento das duas equações independentes das curvas de escoamento LC - Equação (3.38), e SI - Equação (3.39). As leis de endurecimento associadas a esse acoplamento podem ser expressas pelas Equações (3.43) e (3.44).

$$\frac{dp_0^*}{p_0^*} = \frac{v}{\lambda'(0) - \kappa} d\varepsilon_v^p, \quad (3.43)$$

$$\frac{ds_0}{s_0 + p_{atm}} = \frac{v}{\lambda_s - \kappa_s} d\varepsilon_v^p. \quad (3.44)$$

O parâmetro q definido pela Equação (3.33) é responsável pelo efeito de cisalhamento. Para a condição saturada o modelo fica reduzido ao modelo Cam-Clay modificado e a superfície de escoamento para um determinado valor de sucção em termos de (p, q, s) é descrita por uma elipse, com tensão de pré-adensamento isotrópica previamente definida na curva LC, Figura 3.7.



Fonte: Alonso et al. (1990)

Figura 3.7: Superfícies de escoamento no espaço (p, q, s) .

Admitindo-se que o efeito da sucção resulta num aumento da coesão, pode-se verificar a ocorrência desse efeito mantendo a mesma inclinação para a linha do estado crítico – CSL na condição saturada. Além disso, supondo que o aumento na coesão segue uma relação linear com a sucção, as elipses que indicam a superfície de plastificação, Figura 3.7, interceptam o eixo p em um ponto dado pela expressão:

$$p = -p_s = -k^* s, \quad (3.45)$$

onde:

k^* é uma constante.

O eixo maior da elipse, para uma determinada sucção s , atravessará o segmento $-p_s$ a p_0 e a equação que define essa superfície de plastificação é dada por:

$$q^2 - M^2(p + p_s)(p_0 - p) = 0. \quad (3.46)$$

A direção do incremento de deformação, no caso unidimensional, é a mesma do único componente de tensão. Em outras situações, define-se uma lei de fluxo que corresponde a uma equação evolutiva relacionando incrementos de deformação com gradientes da função potencial plástico. A função potencial plástico deve ser determinada experimentalmente, mas pode, também, ser a própria função de plastificação e, neste caso, tem-se um modelo constitutivo que utiliza lei de fluxo associada. No âmbito do modelo BBM, sugere-se uma lei de fluxo não associada nos planos $s = cte$. O potencial plástico no plano $p \times q$ é dado pela seguinte expressão:

$$\frac{de_s^p}{de_{vp}^p} = \frac{2qa^*}{M^2(2p + p_s - p_0)}, \quad (3.47)$$

onde:

de_s^p é o incremento de deformação plástica devido à variação da tensão desvio,

a^* é um parâmetro que indica a condição de associatividade na lei de plasticidade, sendo que:

para $a^* = 1$ tem-se plasticidade associada,

para $a^* \neq 1$ tem-se plasticidade não associada.

Com relação às deformações que ocorrem dentro da região elástica, vale as seguintes expressões:

$$de_s^e = \frac{dq}{3G}, \quad (3.48)$$

$$d\varepsilon_v^e = \frac{\kappa}{v} \frac{dp}{p} + \frac{\kappa_s}{v} \frac{ds}{(s + p_{atm})}, \quad (3.49)$$

onde:

G é o módulo cisalhante que varia de acordo com a expressão: $G = \frac{3(1-2u)}{2(1+u)} \frac{p(1+e)}{k}$,

u é o coeficiente de Poisson, que corresponde a um parâmetro do material.

Os parâmetros envolvidos na modelagem proposta por Alonso et al.(1990) podem ser determinados de uma série de ensaios, assim, de acordo com Costa (2000) pode-se utilizar ensaios de compressão isotrópica drenados (carregamento e descarregamento), sob vários valores de sucção constante, para determinação de p^c , p_0^* , $l'(0)$, k , r , b ; ensaios de ciclos de umedecimento-secagem para uma determinada tensão aplicada, para determinação de s_0 , l_s , k_s ; ensaios de cisalhamento drenados, sob diferentes valores de sucção, para determinação de G , M e k .

De acordo com Silveira (1992) o modelo proposto por Alonso et al.(1990), apesar de ser capaz de descrever as principais características do comportamento dos solos não saturados, possui algumas hipóteses simplificadoras que deverão ser melhoradas à medida que mais dados experimentais sobre o comportamento dos solos não saturados estiverem disponíveis.

3.4.5 Programas computacionais aplicados à análise de subsidência

As ferramentas de simulação para entendimento do processo e previsão do fenômeno de subsidência compreendem a resposta do aquífero às tensões impostas pela movimentação da água subterrânea e são muito úteis como subsídio para o gerenciamento dos recursos hídricos. De acordo com Hoffmann et al. (2003), o processo de compactação do sistema aquífero não é, geralmente, incorporado aos modelos de fluxo da água. Alguns pesquisadores têm desenvolvido ferramentas computacionais capazes de simular a compactação do sistema aquífero e subsidência do solo. Nesse sentido, apresentam-se a seguir, de forma sucinta, algumas considerações sobre dois

programas computacionais que podem ser úteis na simulação do processo físico associado à subsidência do solo: o CODE_BRIGHT e o MODFLOW.

A escolha adequada dos princípios físicos e das variáveis dependentes e independentes que descrevem o comportamento de um fenômeno é de fundamental importância e o ponto de partida da resolução numérica. Daí, a modelagem computacional consiste em identificar os fatores que influenciam de maneira relevante no fenômeno que se deseja simular e obter a solução do modelo matemático. Os métodos numéricos constituem, atualmente, a ferramenta mais usual e eficaz na obtenção das referidas soluções, e, nesse contexto, podemos destacar o Método das Diferenças Finitas e o Método dos Elementos Finitos. O Método das Diferenças Finitas foi criado com o objetivo de resolver sistemas de equações diferenciais e o Método dos Elementos Finitos, criado inicialmente para análise estrutural, teve suas aplicações estendidas à problemas que envolvem a mecânica dos fluidos tornando-se um método mais geral de solução de equações diferenciais parciais.

A formulação apresentada nos itens 3.4.4.1 e 3.4.4.2 é adotada no modelo BBM – *Barcelona Basic Model* e foi implementada no programa de elementos finitos CODE_BRIGHT, que foi desenvolvido na Universidade Politécnica de Catalunha. Neste programa, todas as equações acopladas, quando discretizadas, são resolvidas simultaneamente pelo método de Newton-Raphson.

O modelo BBM é aplicável a solos não saturados leve a moderadamente expansivos e é capaz de reproduzir a maioria dos aspectos relacionados com o comportamento de solos não saturados, onde pode-se destacar:

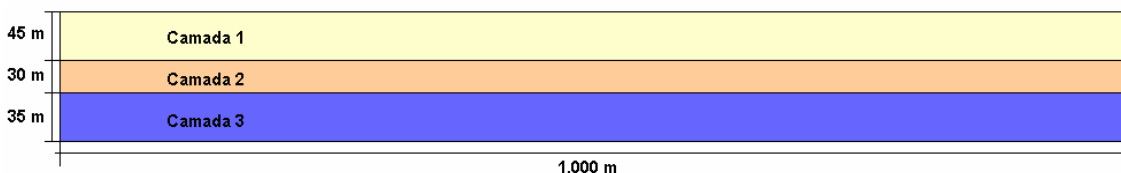
- fatores resultantes do aumento de sucção, secagem, como aumento da rigidez do solo, resistência ao cisalhamento e pressão de pré-adensamento;
- ocorrência de colapso ou expansão;
- deformação volumétrica resultante das variações de sucção, de tensões iniciais e finais, e trajetórias de tensões seguidas.

As limitações observadas no modelo BBM, com relação à reprodução do comportamento dos solos não saturados, correspondem a não consideração da anisotropia e da existência de um colapso máximo. Essas limitações têm motivado vários pesquisadores a sugerir novos modelos a partir do modelo original BBM.

Apesar de recente, o CODE_BRIGHT (Olivella, 1995) vem sendo testado e aplicado com êxito em problemas reais de engenharia (Gens et al., 1995; Thomas et al., 1995;

Gens et al., 1996; Gens et al., 1998; Costa, 2000; Costa et al., 2000, entre outros) tendo sido aplicado em estudos preliminares do fenômeno na área de estudo desta pesquisa (Cabral et al., 2003; Cabral et al., 2002; Cabral et al., 2001).

No estudo preliminar realizado por Cabral et al. (2002) foi investigada uma situação existente em várias localidades da região costeira brasileira, onde um aquífero livre é separado do aquífero inferior por uma camada semi-permeável. Analisou-se o comportamento hidro-mecânico resultante do fluxo d'água através do meio poroso como consequência do bombeamento do aquífero inferior. Na simulação realizada utilizou-se a idéia de uma trincheira perpendicular ao plano simulado na Figura 3.8, com o objetivo de representar um conjunto de poços, onde os poços estariam distribuídos na trincheira e distantes entre si de 1.0 m. Cada poço permaneceu bombeando 5.0 m³/h durante um período de 30 meses. Na Figura 3.8 apresenta-se a geometria e os distintos materiais empregados na simulação numérica realizada, onde se considerou estado de deformação plana. A trincheira de poços está localizada no canto esquerdo do aquífero inferior (camada 3) da Figura 3.8.



Fonte: Cabral et al. (2002)

Figura 3.8: Esquema do perfil considerado na simulação

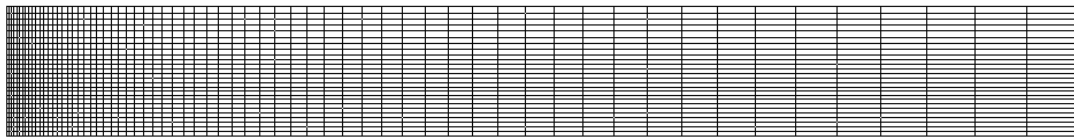
Conforme indicado na Figura 3.8, o perfil de solo que foi considerado é composto de três camadas que, por tratar-se de uma seção genérica, têm seus parâmetros aproximados e os valores adotados como propriedade hidráulica dos materiais estão apresentados na Tabela 3.2. No que se refere ao modelo mecânico, considerou-se que todas as camadas apresentam comportamento elástico e os parâmetros adotados foram baseados em valores típicos da literatura, conforme Tabela 3.2. Para o coeficiente de Poisson, ν , adotou-se o valor médio igual a 0.3 para todas as camadas

Tabela 3.2: Valores adotados para os parâmetros hidráulico e mecânicos.

Camada	Parâmetro hidráulico	Parâmetros mecânicos		
	K (m ²)	E (kgf/cm ²)	u	Descrição do tipo de solo
Camada 1	1x10 ⁻¹²	460	0.3	Areia fofa à compacta
Camada 2	1x10 ⁻¹⁶	80	0.3	Argila média
Camada 3	1x10 ⁻¹⁰	1160	0.3	Areia compacta

Fonte: Cabral et al. (2002)

Na simulação numérica utilizou-se a malha de elementos finitos ilustrada na Figura 3.9, com 1782 elementos quadriláteros e 1690 nós.



Fonte: Cabral et al. (2002)

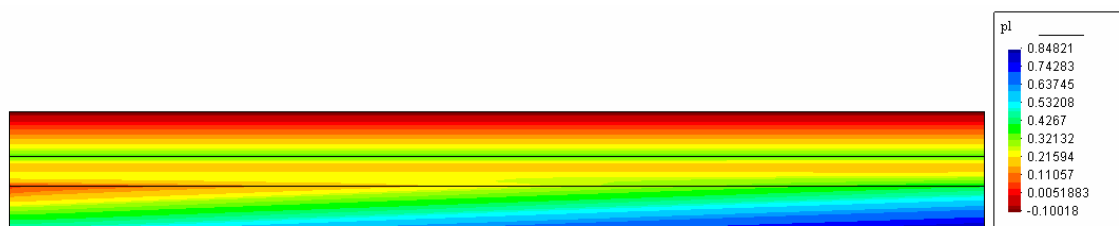
Figura 3.9: Malha de elementos finitos adotada

De acordo com os autores, os resultados do programa computacional CODE_BRIGHT para a situação simulada apresentaram uma boa correspondência qualitativa com o comportamento real esperado, como pode ser observado na distribuição da pressão de água inicial e no final do bombeamento (Figura 3.10). Além da redução das pressões de água na região próxima a ponteira, pôde-se observar a influência da camada semi-permeável entre os aquíferos.



Fonte: Cabral et al. (2002)

(a) Situação inicial.



Fonte: Cabral et al. (2002)

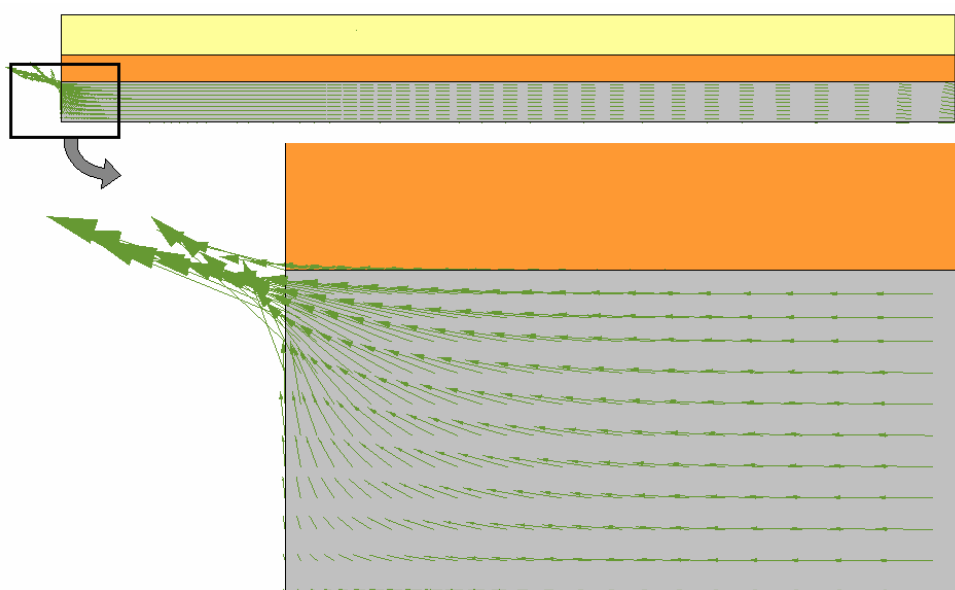
(b) Situação após 30 meses de bombeamento contínuo.

Figura 3.10: Distribuição de pressão de água, valores em MPa.

De acordo com os resultados apresentados por Cabral et al (2002), os vetores de fluxo também confirmaram o cenário proposto na simulação e mostraram claramente a exploração do aquífero inferior (Figura 3.11). O valor do deslocamento vertical máximo, Δm^* , que foi obtido ao final da simulação foi de cerca de 3 cm nas proximidades do poço (Figura 3.12). Apesar do bom comportamento qualitativo dos resultados obtidos, a situação simulada não corresponde a um cenário real e os parâmetros adotados são aproximações retiradas da literatura científica.

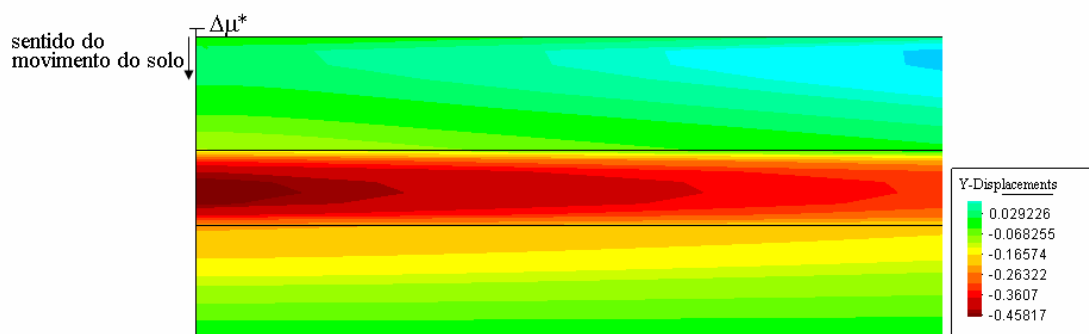
Os autores concluíram, portanto, que a formulação hidro-mecânica aplicada a um meio poroso, implementada no programa CODE_BRIGHT, é adequada para a simulação de subsidência do solo devido à exploração de água das camadas aquíferas. Uma importante característica dos resultados obtidos é que a análise apresentada mostra a influência da consideração de meios heterogêneos (diferentes camadas) no regime de fluxo devido ao bombeamento. Os resultados evidenciaram que a camada com menor permeabilidade (semi-permeável) funciona como barreira para o fluxo.

O problema real de subsidência é complexo e multidisciplinar, envolvendo conhecimentos de geologia, geodésia, fluxo em meios poroso deformáveis e métodos matemáticos e numéricos. É importante ressaltar que o cenário simulado, os parâmetros adotados e os resultados obtidos são preliminares, e, além de um conhecimento maior com relação aos parâmetros hidráulicos e mecânicos a serem adotados, é necessário realizar um maior número de simulações para conseguir uma boa precisão da estimativa dos rebaixamentos do terreno devido à exploração dos aquíferos brasileiros.



Fonte: Cabral et al. (2002)

Figura 3.11: Vetores de fluxo mostrando o bombeamento do aquífero inferior



Fonte: Cabral et al. (2002)

Figura 3.12: Deslocamentos verticais nas proximidades do poço bombeado.

Uma outra ferramenta usada para entender o funcionamento de aquíferos sedimentares, é o modelo computacional MODFLOW de diferenças finitas, que soluciona a equação de fluxo subterrâneo, em meio saturado heterogêneo e anisotrópico. O MODFLOW-2000 (Harbaugh et al., 2000) foi desenvolvido para simular o fluxo da água subterrânea e possui um módulo apropriado para simulação da subsidência chamado de pacote SUB, que vem sendo utilizado em alguns países. O pacote SUB foi desenvolvido para utilização dentro do código computacional MODFLOW-2000 para simular o fluxo da água subterrânea e a compactação do sistema aquífero em áreas susceptíveis – com presença de camadas compressíveis que podem compactar ou com ocorrência de camadas que podem representar fontes significantes de exploração de água subterrânea. Segundo Hoffmann et al. (2003) o pacote SUB considera apenas variações na tensão efetiva resultantes de alterações na pressão dos poros com água. Variações na carga geostática não são consideradas no modelo.

O MODFLOW, em sua versão geral para simulação do fluxo da água subterrânea, já foi apresentado e utilizado em várias situações mostrando, segundo os autores um bom desempenho quando comparado com dados reais. As aplicações direcionadas ao estudo sobre subsidência do solo também tem sido utilizado por alguns pesquisadores que investigam a ocorrência do fenômeno no mundo (Wilson e Gorelick, 1996; Shearer, 1998; entre outros), sendo inclusive fonte de ferramenta para tomada de decisões.

3.5 Comentários Finais

Com a realização de estudos prévios, é possível estimar as vazões máximas que poderão ser extraídas de uma nova captação, sem que cause danos aos poços vizinhos. Da mesma forma, avaliações específicas podem mostrar se novas atividades antrópicas causarão algum problema ao aquífero. Cabe, entretanto, aos órgãos de governo, com

participação e o engajamento da população, definir as políticas para o bom manejo do recurso, para que este seja utilizado de forma sustentável e que possa promover o bem estar e o desenvolvimento econômico da sociedade.

De acordo com Hoffmann et al. (2003), mais que 80% da subsidência identificada nos Estados Unidos é consequência do impacto de atividades antrópicas na água subterrânea e a crescente exploração dos mananciais hídricos subterrâneos irá certamente agravar a situação atual das ocorrências existentes e iniciar o processo em outras localidades.

As características peculiares dos aquíferos cársticos fazem com que, embora existam muitas pesquisas e trabalhos em diversas regiões do mundo, os seus resultados não podem ser extrapolados ou aplicados para todos os carstes conhecidos, uma vez que as suas características geomorfológicas e hidrogeológicas variam de um lugar a outro. Assim em cada caso estudado, devem ser adaptadas todas as técnicas de prospecção às condições locais de geologia, hidrogeologia e hidrologia.

Por outro lado, em aquíferos sedimentares o caráter lento de desenvolvimento do problema e os indícios hidrogeológicos que apontam a possibilidade de ocorrência do fenômeno numa dada localidade, justificam a necessidade de maiores investigações científicas para aumento do grau de conhecimento com relação ao processo físico e desenvolvimento de ferramentas para detecção, monitoramento e mitigação do problema.

Assim sendo, a simulação numérica é um recurso bastante útil para o entendimento e a descrição do comportamento de fluxo de águas subterrâneas sob diversas condições de contorno, que pode ser realizada, inclusive, por meio de uma das ferramentas computacionais já existentes. A simulação numérica, nesse contexto, desempenha um papel importante na tomada de decisões referentes à gestão e ao gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos.

Uma outra ferramenta computacional que pode ser bastante útil na investigação quanto à possibilidade de ocorrência de subsidência numa determinada área é o geoprocessamento, que permite a representação das variações espaciais das propriedades das camadas de solo, bem como o acompanhamento da evolução do rebaixamento do solo e dos níveis potenciométricos, bem como pode auxiliar no gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos.

A realização de monitoramentos para verificação da ocorrência de deslocamentos verticais na superfície do solo, em uma área que apresenta possibilidade de risco de subsidência, combinada com resultados de simulação numérica sobre cenários futuros

de exploração constituem uma grande contribuição da ciência e tecnologia à segurança contra ocorrência desse tipo de acidente geológico e à elaboração de estratégias para o gerenciamento de risco.

CAPÍTULO 4

DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

4.1 Localização da área de estudo

A Região Metropolitana do Recife – RMR é composta por 14 municípios que compreende uma faixa costeira de cerca de 2.500 km² e tem uma população de cerca de três milhões de habitantes. A cidade do Recife possui uma área de 218km² e uma população de 1.422.905 habitantes, segundo censo realizado pelo IBGE em 2000.

A área de estudo compreende uma parte da planície do Recife que está inserida na zona sul da cidade, o bairro de Boa Viagem (Figura 4.1), que constitui o principal pólo turístico do Estado.



Figura 4.1: Localização da área de estudo.

4.2 Aspectos climáticos

O ciclo hidrológico de uma região é fortemente influenciado pelo clima e a planície do Recife apresenta um clima quente e úmido estando situada na zona fisiográfica do litoral-mata atlântica. As precipitações desta região apresentam um padrão de grande variabilidade no decorrer dos anos. De acordo com Batista (1984), no período de 1911 a 1969, por exemplo, as precipitações variaram de uma mínima anual de cerca de 760 mm em 1946 e uma máxima de aproximadamente 2.800mm em 1913. Segundo Farias (2003), baseando-se em informações obtidas junto ao Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, para o ano de 2003, a precipitação pluviométrica é abundante, e no período de 1961 a 1990 atingiu o valor médio de 2.450mm/ano. O período mais chuvoso vai de março a agosto, com valor máximo ocorrendo normalmente no mês de julho, e o período mais seco vai de setembro a fevereiro, com um mínimo de chuvas em

novembro, Figura 4.2. Segundo as informações sobre as médias apresentadas, para os 30 anos de dados analisados, ocorreu um excedente de precipitação pluviométrica em relação à evapotranspiração de aproximadamente 1.130mm.

A evaporação na região é diretamente proporcional à insolação e inversa da precipitação (Batista, 1984). Analisando-se a Figura 4.2 pode-se verificar que para as três décadas analisadas os maiores índices de evaporação ocorrem nos meses de estiagem onde a insolação é maior.

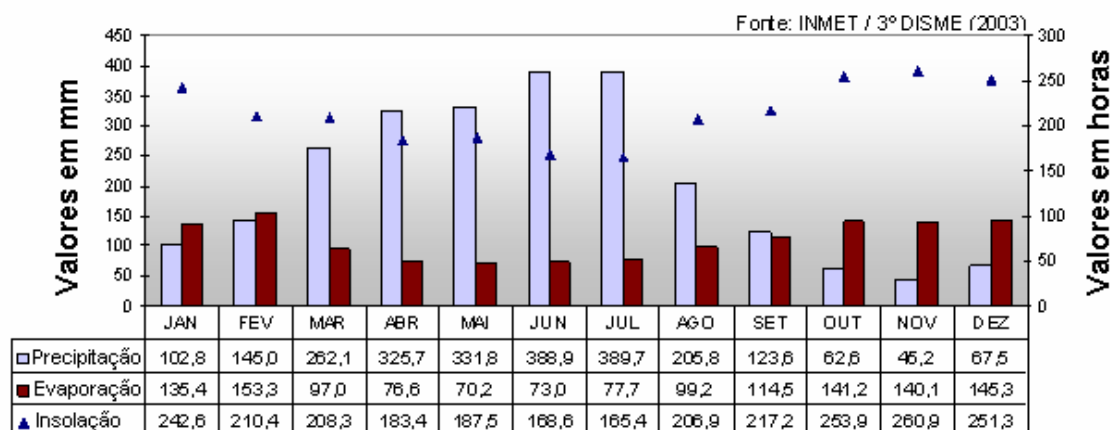


Figura 4.2: Médias mensais de precipitação, evaporação e insolação na Estação Meteorológica do Recife.

A temperatura, por outro lado, oscila muito pouco. As temperaturas absolutas registradas no decorrer de 1911 a 1969 apresentaram a máxima de 33°C, em 1945, e a mínima de 15°C, em 1965 (Batista, 1984). Para as três décadas analisadas por Farias (2003) a média anual foi de 25.5°C.

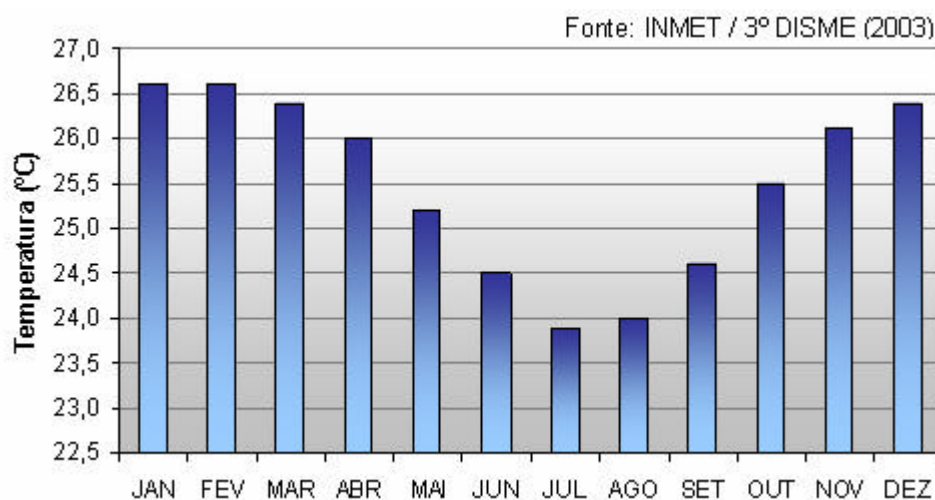


Figura 4.3: Médias mensais de temperatura na Estação Meteorológica do Recife, para 30 anos de dados.

4.3 Geologia e Estratigrafia

A área em estudo está inserida geotectonicamente na Bacia Pernambuco/Paraíba (norte do Lineamento Pernambuco) e Bacia do Cabo (sul do lineamento Pernambuco) precisamente na Planície do Recife e seus encaixes (Monteiro, 2000). No interior da planície de Recife pode-se identificar duas situações morfológicas distintas (Batista, 1984): a primeira é representada pelos tabuleiros do Grupo Barreiras que constituem regiões de topografia mais alta, plana no topo e com pequena inclinação para leste. Essas feições são encontradas em todo o Nordeste brasileiro e são formadas por sedimentos silto-argilosos e arenosos que podem condicionar cotas que variam de 10 a 150m, crescendo do litoral para o interior; e a segunda é representada pela planície do Recife, é constituída por sedimentos recentes que, em grande parte, são depositados pelo rio Capibaribe, com pequenas ondulações oriundas de antigos depósitos eólicos, que possui cotas variando de zero a 10m e inclinação suave para leste, com cota média de 3 a 4m. Verifica-se ainda, na planície do Recife, a ocorrência de mangues nas margens e desembocaduras dos rios.

As unidades geológicas que constituem o município do Recife são: Embasamento Cristalino, Bacias Sedimentares Cretáceas, Sedimentos Terciários e Sedimentos Quaternários.

Com base nas informações constantes no texto explicativo do Mapa Geológico do Recife (Alheiros et al., 1995), apresenta-se a seguir essas unidades para caracterização da planície do Recife quanto à estratigrafia:

4.3.1 Embasamento Cristalino

As rochas pertencentes ao embasamento cristalino afloram na porção oeste da Região Metropolitana do Recife – RMR, ao longo de toda a borda das duas bacias sedimentares, apresentando um suave mergulho para o leste, com inclinação da ordem de 28m/km (Batista, 1984).

O embasamento cristalino, de idade pré-cambriana, é constituído geologicamente por rochas graníticas, gnáissicas e migmatíticas, que estão fraturadas ou fissuradas por esforços tectônicos regionais. Neste meio, a água está armazenada nos espaços fendilhados e/ou fraturados da rocha, limitando a circulação da água.

4.3.2 Bacias Sedimentares Cretáceas

As Bacias Sedimentares Cretáceas instalaram-se sobre blocos de embasamento cristalino, rebaixados por falhas geológicas que ocorreram nessas rochas, durante a separação das placas tectônicas. A Figura 4.4 apresenta o mapa hidrogeológico de Recife com a localização do Lineamento Pernambuco, que é uma importante falha geológica e o retângulo indica a área onde está havendo maior número de poços.

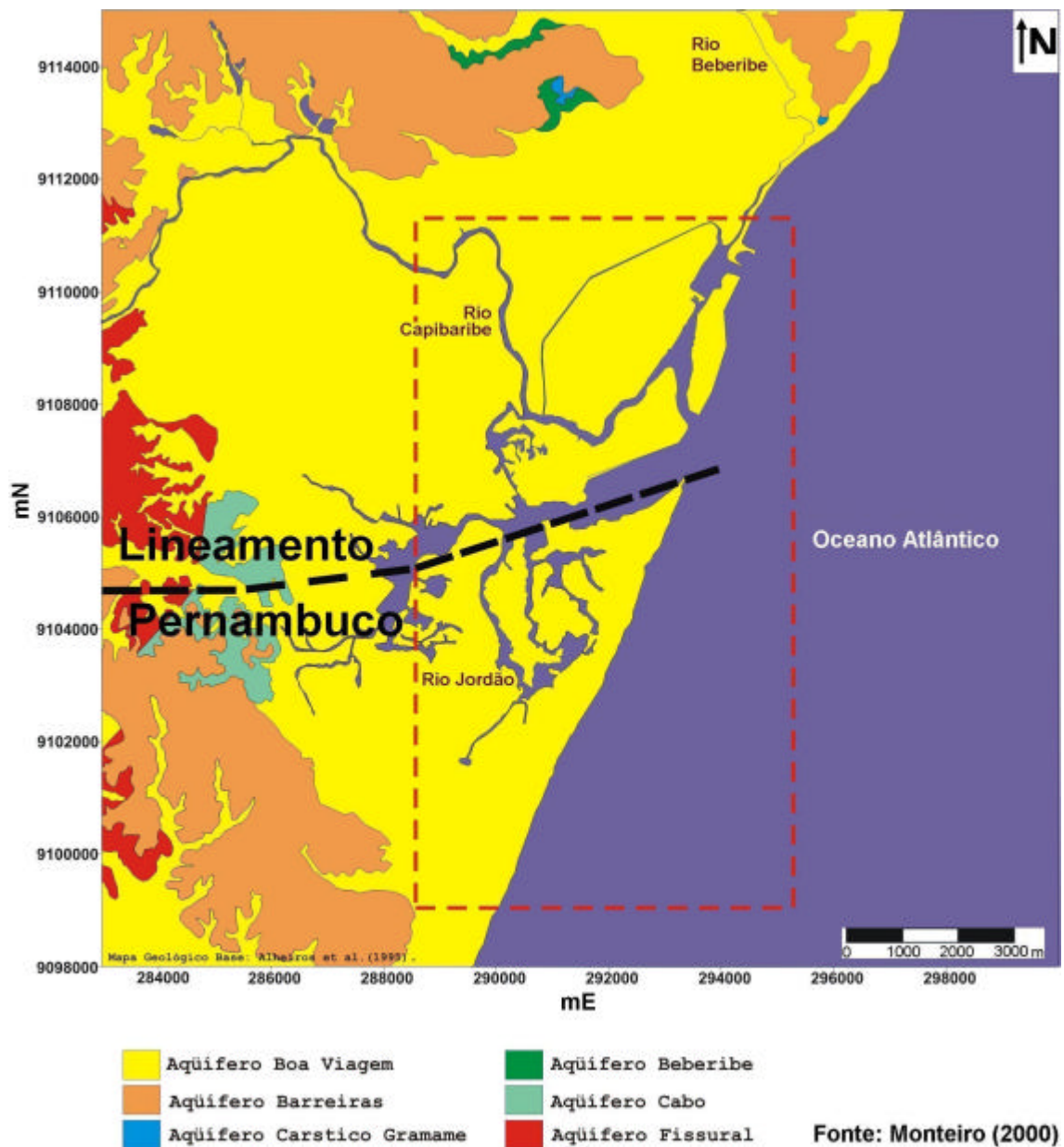


Figura 4.4: Mapa Hidrogeológico de Recife e adjacências, com a posição aproximada do lineamento Pernambuco.

Na área sul do Lineamento Pernambuco (Figura 4.4) formou-se a Bacia Cabo, onde foram depositados conglomerados, arenitos feldspáticos (arcósios) e argilitos, entre

outros. A Bacia Sedimentar Cabo está localizada no litoral sul e estende-se por cerca de 100 km desde a cidade de São José da Coroa Grande até a cidade de Recife, sendo limitada pelo alto de Maragogi e pelo Lineamento Pernambuco.

Ao norte do Lineamento Pernambuco (Figura 4.4) formou-se a Bacia Pernambuco-Paraíba, onde foram depositados sedimentos arenosos de origem fluvial, denominados de Formação Beberibe. A partir dessa época, o avanço sobre o continente permitiu a formação de depósitos marinhos carbonáticos que se consolidaram como camadas de rochas calcárias, denominadas de Formação Gramame e mais adiante a Formação Maria Farinha. A Bacia Sedimentar Pernambuco-Paraíba ocorre a partir do Lineamento Pernambuco ao longo de todo o litoral Norte da RMR e constitui uma faixa continental com largura média em torno de 20 km, estreitando-se quase que abruptamente nas proximidades do Lineamento Pernambuco, quando assume uma largura média de 8 km. É caracterizada por estruturas de pequeno rejeito e pacotes sedimentares pouco espessos.

A Formação Beberibe repousa sobre o embasamento cristalino e constitui a base da seqüência sedimentar da Bacia. Compreende uma seqüência essencialmente arenosa com espessura média de 200m (Farias, 2003). Pode ser subdividido em Beberibe superior, constituído por arenitos calcíferos, e em Beberibe inferior, de caráter arenoso com algumas intercalações de silte e argila. O Beberibe inferior representa o principal aquífero explotado na RMR.

O pacote sedimentar da Formação Gramame pode atingir 55m e é constituído de 2/3 de calcários argilosos em finas camadas com intercalações de margas e argilas mais puras. Não apresenta potencial hidrológico, caracterizando-se pelos valores altos de carbonatos e bicarbonatos.

A Formação Maria Farinha tem espessuras de até 35m e é constituída por calcários com intercalações de argila e estão sobrepostos aos calcários da Formação Gramame. Tal como a Formação Gramame, a Formação Maria Farinha também não apresenta importância como reservatório de água.

4.3.3 Grupo Barreiras

Recobrando o embasamento cristalino e as unidades das Bacias Sedimentares Cretáceas, com espessuras variáveis (em torno de 40m), encontram-se os sedimentos terciários da Formação Barreiras, que constituem depósitos arenosos de origem fluvial e podem

ocorrer recobertos por camadas alternadas de sedimentos arenosos e argilosos. Ocupa mais de 50% da área da RMR – Parte Norte, correspondente à zona de tabuleiros dissecados por vales estreitos e profundos. Não se verifica exposições significativas dessa formação no litoral Sul, ocorrendo na forma de pequenos morros isolados.

4.3.4 Sedimentos Quaternários

Ocorrem essencialmente na planície costeira, com exceção dos aluviões mais recentes depositados nos vales fluviais instalados em cotas mais elevadas e podem ser identificadas em cinco unidades distintas:

- Terraço Marinho Pleistocênico: constitui uma unidade morfológica aplainada com cotas entre 7 e 10m, em contraste com as encostas dos morros que cercam a planície costeira.
- Terraço Marinho Pleistocênico Modificado: corresponde a uma parte da antiga praia pleistocênica que foi profundamente alterada pela ação de rios e apresenta alguns trechos com areias retrabalhadas e outros trechos com depósitos de argilas moles.
- Terraço Marinho Holocênico: corresponde a faixa da praia atual, que é situada entre o canal de Setúbal e a linha costeira, essa formação apresenta cotas entre 3 e 5m e pode-se identificar a presença de fragmentos de concha em sua composição.
- Depósitos Flúvio-Lagunares: corresponde aos aluviões, que são arenosos e mostram sedimentos argilosos com matéria orgânica, e aos segmentos lagunares, de composição variada areno-siltico-argilosa com matéria orgânica.
- Manguezais: são áreas com características geológicas e biológicas específicas, morfologicamente mais rebaixadas, encaixadas entre os terraços marinhos, e com vegetação típica dos mangues desenvolvida sobre sedimentos argilo-siltosos com muita matéria orgânica.

4.4 Hidrogeologia

Tal como foi apresentado no item anterior, os terrenos que formam a Planície do Recife apresentam características litológicas distintas, apresenta-se a seguir algumas considerações sobre essas formações com enfoque hidrogeológico.

Segundo Costa et al. (2004), hidrogeologicamente, podem ser distinguidos na área, os seguintes aquíferos conforme a importância dos mesmos enquanto mananciais de águas subterrâneas, e na seguinte sequência de maior para menor potencialidade:

- Aquífero Beberibe (Bacia Sedimentar PE-PB);
- Aquífero Cabo (Bacia Sedimentar do Cabo);
- Aquífero Boa Viagem (Planície do Recife);
- Aquífero Barreiras;
- Aquífero Fissural.

De acordo com Batista (1984), os sedimentos que formam o Aquífero Beberibe inferior são os que melhores condições reúnem para o acúmulo de água. Assim sendo, o Aquífero Beberibe constitui-se no melhor aquífero e o principal fornecedor de água subterrânea de toda a RMR, ocorrendo na porção norte e na Planície do Recife, sendo utilizada para o abastecimento público e doméstico, além de ser explorado para fins comerciais por empresas que comercializam água mineral. O aquífero Beberibe é composto pelas camadas geológicas superior e inferior, mas como não há uma nítida separação geológica e hidráulica entre elas, considera-se as duas camadas juntas como um único aquífero. Na maior parte do aquífero ocorre semiconfinamento, com forte anisotropia e permeabilidade vertical menor em relação à horizontal, sendo que em algumas áreas restritas, o nível siltico-argiloso funciona como aquífero, separando os dois sub-níveis, e condicionando um comportamento de semi-confinado para o sub-nível inferior.

A área de estudo desta pesquisa, o bairro de Boa Viagem, encontra-se constituída pela Formação Cabo, composta de arenito muito argiloso, sobreposta pelos sedimentos recentes, denominado de Aquífero Boa Viagem, que constitui a terceira formação aquífera mais explorada da RMR. O Aquífero Cabo é explorado em profundidade até o limite com o substrato impermeável do derrame basáltico da Formação Ipojuca. Seus afloramentos mais setentrionais conhecidos ocorrem na periferia da cidade do Recife, imediatamente ao sul do Lineamento Pernambuco, ocorrendo ainda, recobertos por sedimentos recentes em toda a região de Boa Viagem-Piedade-Imbiribeira.

O aquífero Boa Viagem é composto por areias variadas, argilas, limos e vasas, de origem continental ou marinha, ocorrendo nos vales dos rios, ao longo das praias e em zonas de mangues. Esses sedimentos afloram em quase toda a superfície da Planície do Recife, ora recobrindo os sedimentos do Aquífero Beberibe e Cabo, ora sobre o

embasamento cristalino na região mais a Oeste. De acordo com Costa et al. (2002), esse aquífero chega a atingir na região de Boa Viagem, até 80m de espessura. Além da importância hidrológica como reservatório subterrâneo, o aquífero Boa Viagem alimenta os aquíferos Cabo e Beberibe através da água drenada ao longo de sua superfície não urbanizada. Os aquíferos Cabo e Beberibe nas planícies de Recife e Jaboatão dos Guararapes, não vêm recebendo recarga por infiltração natural, mas apenas por drenança muito lenta, a partir do aquífero Boa Viagem a eles sobreposto (Costa et al., 2002). A Figura 4.5 apresenta um diagrama esquemático vertical com a localização dos aquíferos Cabo, Beberibe e Boa Viagem.

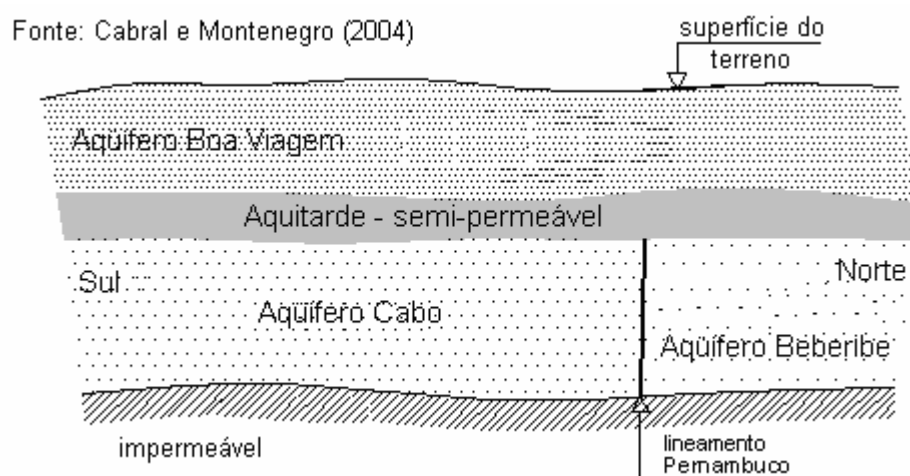


Figura 4.5: Diagrama esquemático dos aquíferos Beberibe, Cabo e Boa Viagem.

O Aquífero Barreiras compreende um sistema aquífero caracterizado por uma seqüência aquífera freática, com níveis confinados em profundidade, mas sua exploração é pouco desenvolvida, uma vez que a fração granulométrica predominante é a siltico-argilosa, que reduz a capacidade de armazenamento do aquífero.

No Embasamento Cristalino a água subterrânea encontra-se limitada aos espaços fendilhados, assim sendo, toda a circulação da água subterrânea é efetuada entre as fraturas e possibilitam a extração da água, ali, acumulada.

A Tabela 4.1 apresenta alguns parâmetros hidrodinâmicos, relacionados com os aquíferos existentes na RMR, que podem ser utilizados para caracterizar o comportamento dos aquíferos porosos, são eles: transmissividade, condutividade hidráulica, porosidade eficaz e coeficiente de armazenamento.

Tabela 4.1: Coeficiente Hidrodinâmicos.

Coeficientes Hidrodinâmicos	Aqüíferos			
	Beberibe	Cabo	Boa Viagem	Barreiras
Transmissividade	$2,2 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$	$8,6 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$	$7,0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$	$1,7 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
Cond. Hidráulica	$2,2 \times 10^{-5} \text{ m/s}$	$1,0 \times 10^{-5} \text{ m/s}$	$1,7 \times 10^{-4} \text{ m/s}$	$3,4 \times 10^{-5} \text{ m/s}$
Porosidade eficaz	$1,0 \times 10^{-1}$	$7,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-1}$	$5,0 \times 10^{-2}$
Coef. Armaz.	$2,0 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-4}$	Não avaliado	Não avaliado

Fonte: Costa et al. (2002)

Os parâmetros apresentados na Tabela 4.1 podem ser definidos como (Costa et al., 2004):

- porosidade: relação entre o volume de vazios de uma rocha pelo seu volume total;
- porosidade eficaz: relação entre o volume de água drenada (excluindo o volume retido por adsorção, capilaridade, etc.) e o volume total da rocha;
- permeabilidade: capacidade de um meio em permitir a percolação de água por entre os interstícios dos grãos;
- condutividade hidráulica: medida de velocidade que indica o quanto uma partícula de água flui dentro de um meio;
- transmissividade: produto da condutividade hidráulica pela espessura saturada do aqüífero e reflete a quantidade de água que pode ser transmitida horizontalmente por toda a espessura saturada do aqüífero;
- coeficiente de armazenamento: valor adimensional que reflete a compressão da água dentro do aqüífero, sendo, no caso de um aqüífero livre que está sujeito apenas à pressão atmosférica, igual à porosidade eficaz.

Esses parâmetros hidrodinâmicos médios foram apresentados por Costa et al. (2004) com base no estudo hidrológico e hidroquímico realizado nos municípios da RMR (Recife, Olinda, Jaboatão dos Guararapes, Paulista, Abreu e Lima e Camaragibe) – HIDROREC - para os aqüíferos intersticiais da área (Tabela 4.1)

4.5 Seções Litológicas

Para melhor compreensão das características geológicas da área de estudo, e com base nas informações dos perfis litológicos dos poços perfurados, e registrados, no bairro de Boa Viagem foram construídas as três seções litológicas apresentadas por Cabral e Montenegro (2004). A localização dessas seções está apresentada na Figura 4.6, onde a área tracejada corresponde à área de estudo.

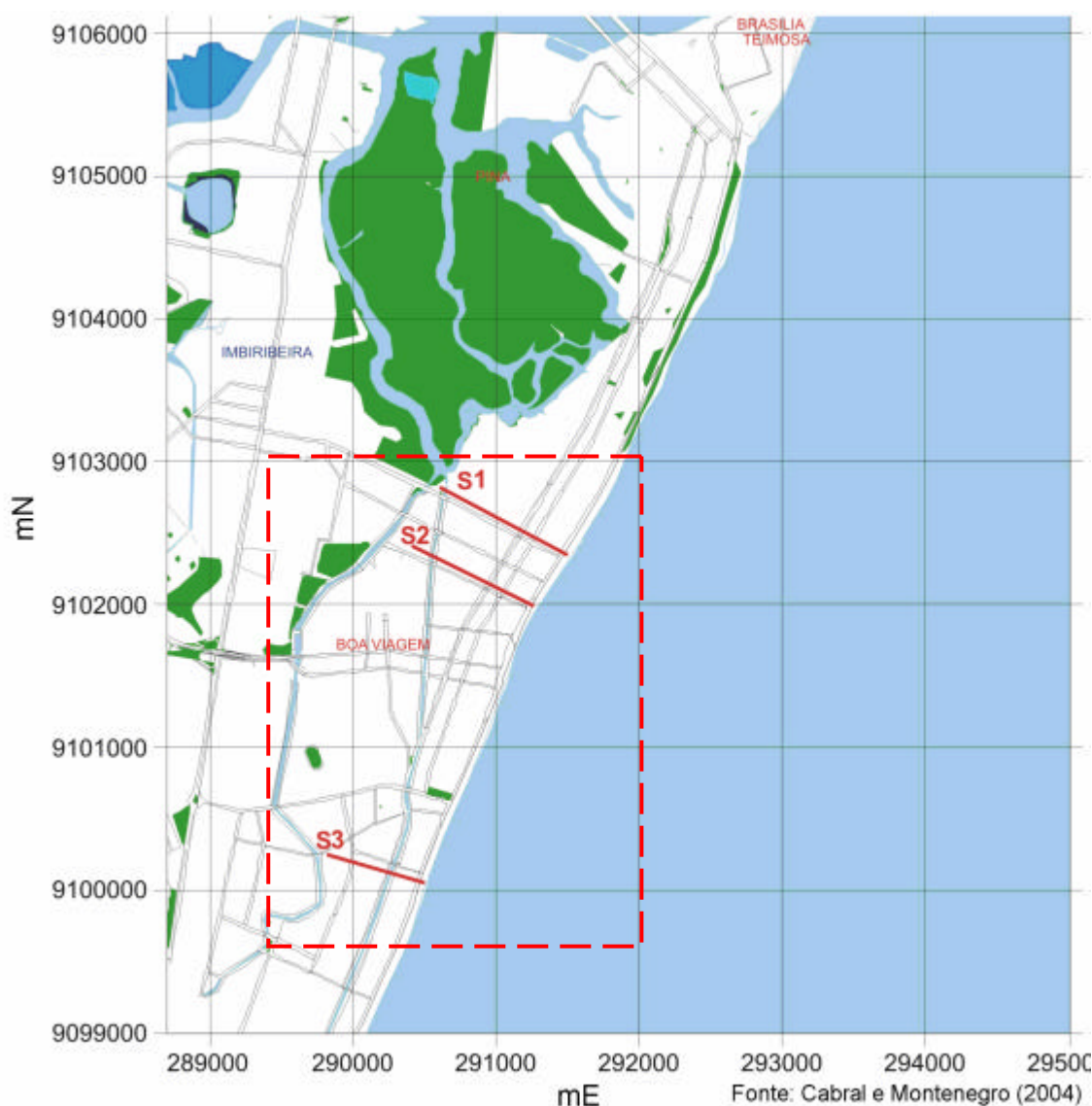


Figura 4.6: Localização das seções litológicas analisadas.

4.5.1 Seção litológica S1

A seção S1, Figura 4.7, inicia-se com a presença de material de aterro, em apenas um dos poços, e ocorre um horizonte de areia até os 40m de profundidade (aqüífero Boa Viagem) intercalado com níveis de material argiloso de até 20m de espessura.

Na seqüência aparece arenito (aqüífero Cabo) com intercalações de argila. Nessas intercalações de argila ocorre uma região com nível mais espesso, da ordem de 20m, no trecho ocidental da seção.

Verificou-se a ocorrência de material siltoso, em um dos poços localizados no extremo leste, em apenas um dos poços a uma profundidade de 130m. Foram utilizadas

informações de descrição de seis poços com profundidade máxima de 140m, sendo que na região central da seção não há informação sobre os perfis.

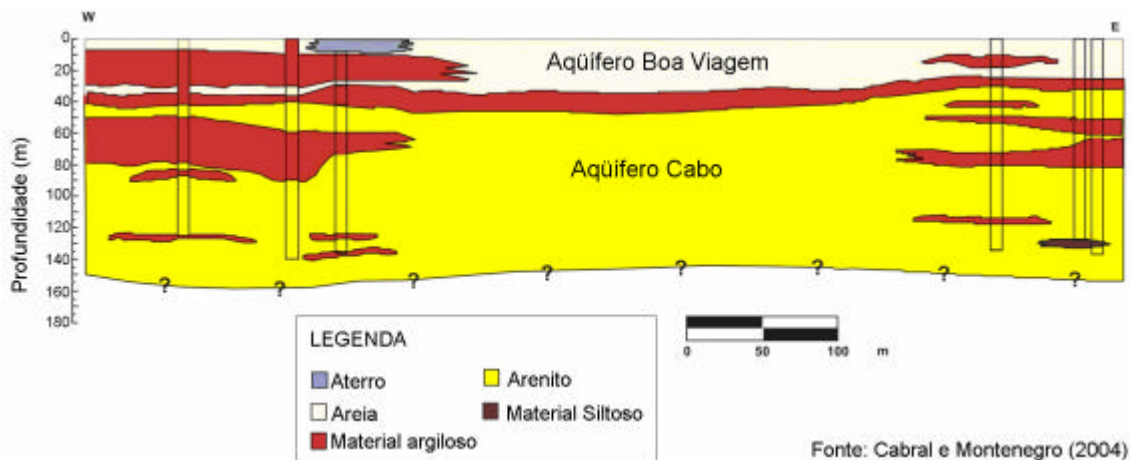


Figura 4.7: Seção Litológica S1, no bairro de Boa Viagem, direção oeste-leste.

4.5.2 Seção litológica S2

A seção S2, Figura 4.8, tal como na seção anterior, esta seção inicia-se com a presença de material de aterro, em dois poços, e ocorre um horizonte de areia até os 25m de profundidade intercalado com níveis de material argiloso, do trecho central até o extremo leste da seção, de até 10m de espessura.

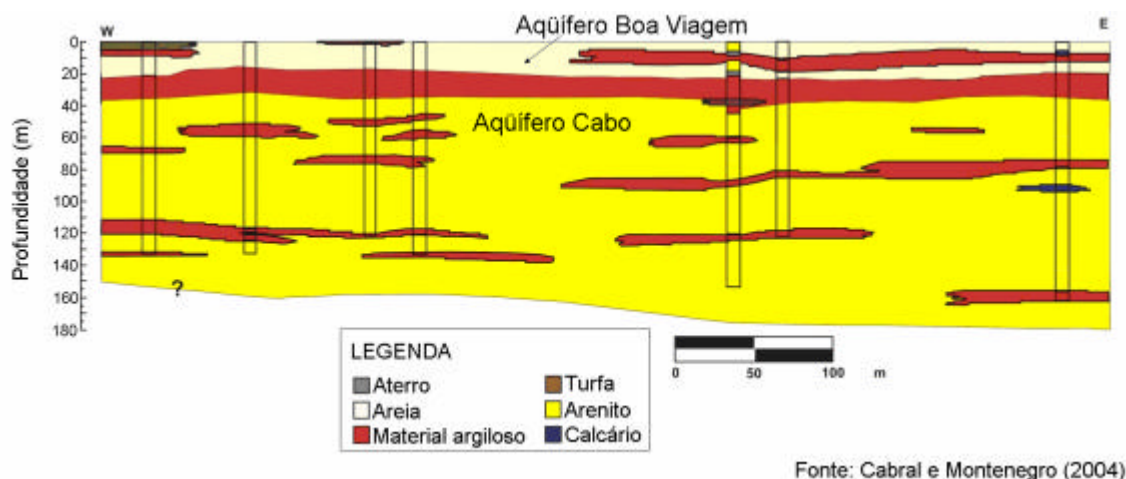


Figura 4.8: Seção Litológica S2, no bairro de Boa Viagem, na direção oeste-leste.

Na seqüência aparece um horizonte contínuo de material argiloso com espessura de até 30m e profundidade de até 45m. De acordo com Cabral e Montenegro (2004), a base desta seqüência deve coincidir com o aquífero Boa Viagem. Intercalado com o material argiloso registrou-se a presença de material turfoso.

Logo abaixo ao nível argiloso ocorre a presença de arenito (aquéifero Cabo), com intercalações descontínuas de material argiloso, de espessura máxima de cerca de 10m, em diferentes profundidades. Foram utilizadas informações de descrição de nove poços com profundidade máxima de 160m. Nas informações do poço de maior profundidade verificou-se a presença de uma fina intercalação de calcário (ou arenito calcífero) aos 90m de profundidade.

4.5.3 Seção litológica S3

A seção S3, Figura 4.9 inicia-se com a presença de material arenoso até 60m de profundidade, intercalado com alguns níveis de material argiloso, de até 8m de espessura e deve tratar-se do aquífero Boa Viagem.

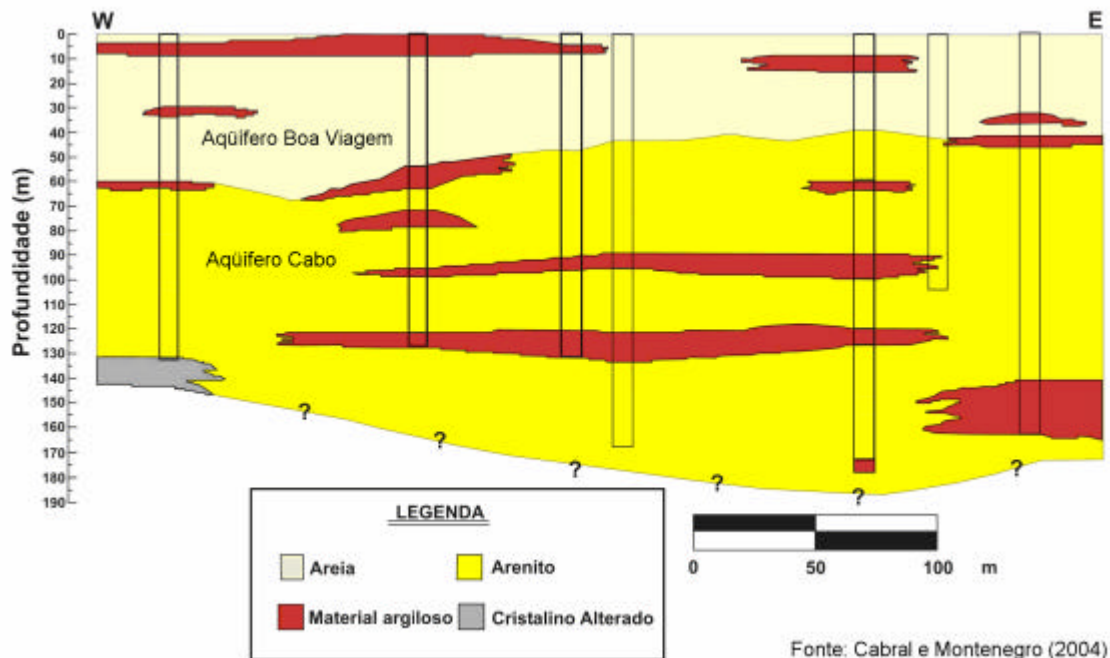


Figura 4.9: Seção Litológica S3, no bairro de Boa Viagem, na direção oeste-leste.

Logo abaixo do nível argiloso ocorre a presença de arenito (aquéifero Cabo) com uma granulometria predominantemente fina a média, onde se posicionam as seções filtrantes dos poços descritos. Nesta camada de arenito encontram-se intercalações de material argiloso, na porção central da seção, em profundidades variando de 90 a 120m e espessura máxima de 10m. Em um poço, localizado no oeste da seção, registrou-se a ocorrência de cristalino alterado na profundidade final do poço (130m). Foram utilizadas informações de descrição de sete poços com profundidade máxima de 180m.

De forma geral, estas seções possibilitam a identificação da ocorrência dos dois aquíferos existentes na área de estudo.

4.6 Abastecimento por poços

A RMR tem uma demanda de água de aproximadamente $14\text{m}^3/\text{s}$ e, desta demanda, cerca de $6\text{m}^3/\text{s}$ é obtida pela captação de água subterrânea. A quantidade de água disponibilizada pela companhia de saneamento público não é suficiente para o abastecimento total da população. Por esse motivo, desta captação de recursos hídricos subterrâneos, cerca de $4\text{m}^3/\text{s}$ é explorado por mais de 10.000 poços rasos e profundos perfurados por particulares (Farias, 2003). Somando-se a isso, deve-se considerar o crescimento populacional da RMR como um agravante da situação precária de abastecimento de água que justifica o grande interesse dos moradores da região na perfuração de novos poços (Figura 4.10) uma vez que, do número de poços com a data de perfuração informada, 37% foram perfurados nos últimos 10 anos.

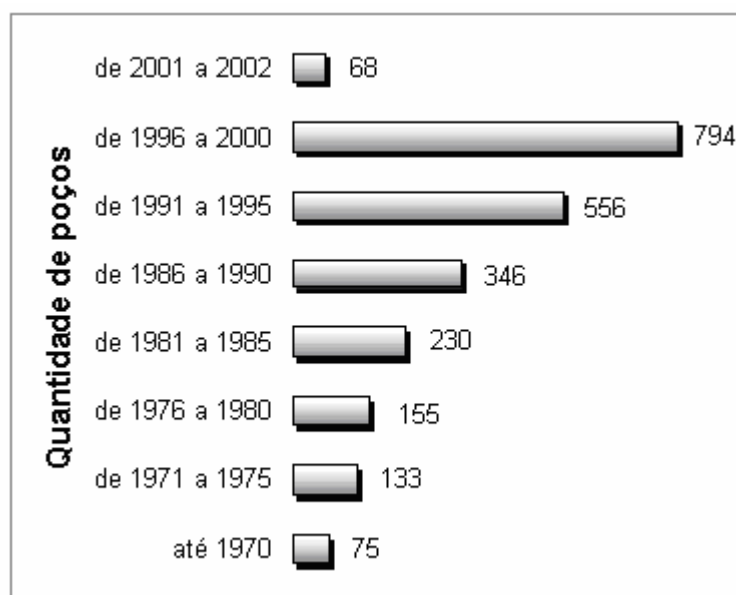


Figura 4.10: Poços perfurados na RMR até o ano de 2002 - informações do banco de dados HIDROREC II – Costa et al. (2002)

O gráfico de crescimento populacional verificado na RMR (Figura 4.11) corresponde ao fenômeno observado no Brasil onde, no ano de 2000, 80% da população se concentrava no perímetro urbano, nas principais regiões metropolitanas do país.

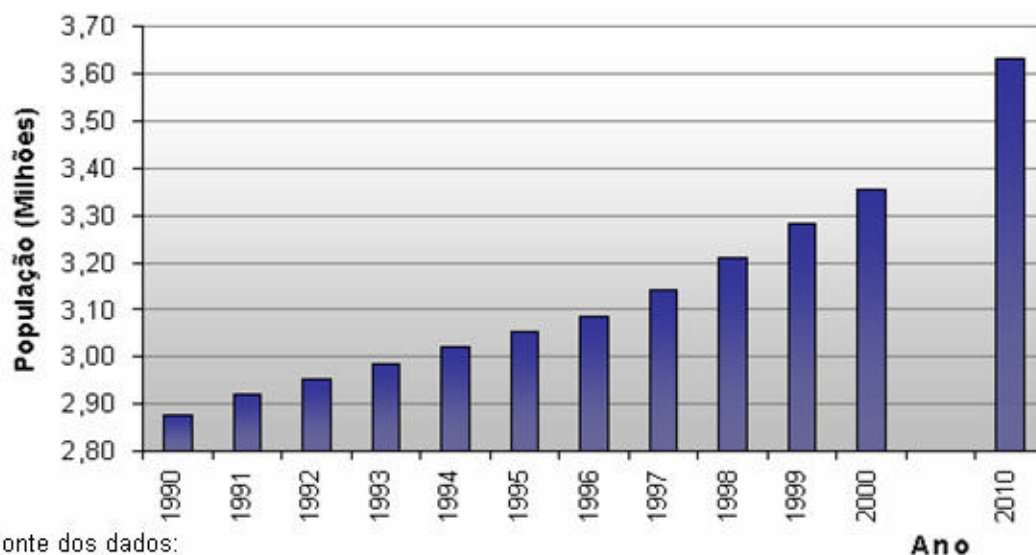


Figura 4.11: Gráfico do crescimento populacional da Região Metropolitana do Recife.

O racionamento de água na RMR já dura 20 anos, mas ocorreram dois períodos mais críticos em que a população sofreu um grande período de escassez de água, no ano de 1993 e entre os anos de 1998 e 1999 (Figura 4.12), período inclusive em que o fornecimento público de água ocorria apenas em 1 ou 2 dias na semana.

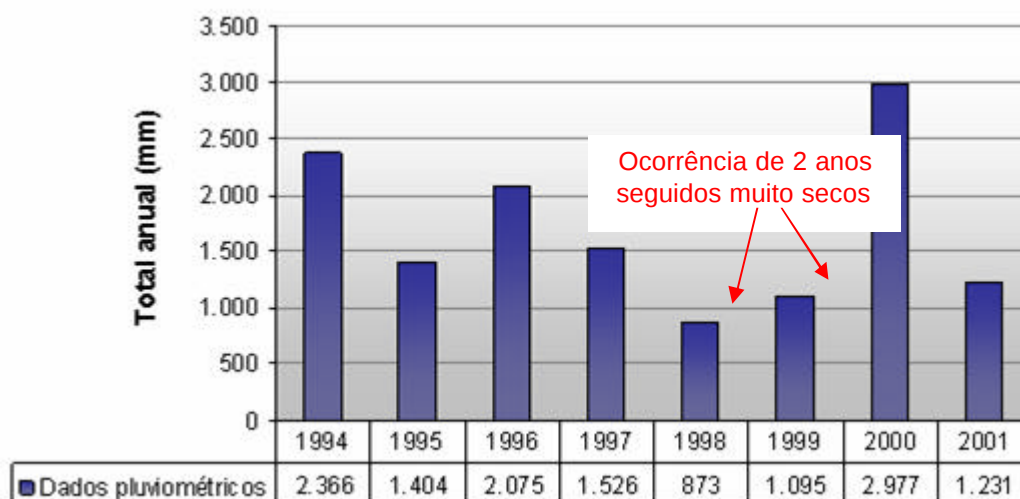


Figura 4.12: Precipitação anual de 1994 a 2001- informações do banco de dados

HIDROREC II – Costa et al. (2002)

A água explotada do manancial subterrâneo destina-se, além do abastecimento público, ao abastecimento privado de áreas residenciais, hospitais e indústrias. A RMR tem cerca de 40% de seu abastecimento de água efetuado pela rede de poços que explota o

Aquífero Beberibe, Cabo, Boa Viagem e Barreiras. De acordo com o “Estudo Hidrogeológico de Recife – Olinda - Camaragibe - Jaboatão dos Guararapes - HIDROREC II” (Costa et al., 2002), os aquíferos da região estão sendo intensamente explorados, pois existem na atualidade, em média 110 poços por km². Além disso, dos cerca de 13.000 poços existentes somente na cidade do Recife, aproximadamente 2/3 correspondem a poços rasos e 1/3 a poços profundos. Dos 5.383 poços cadastrados (no Hidrorec II e em trabalhos anteriores), 53.4% correspondem a poços profundos, 26.6% a poços rasos e 20% sem definição de profundidade (Figura 4.13).

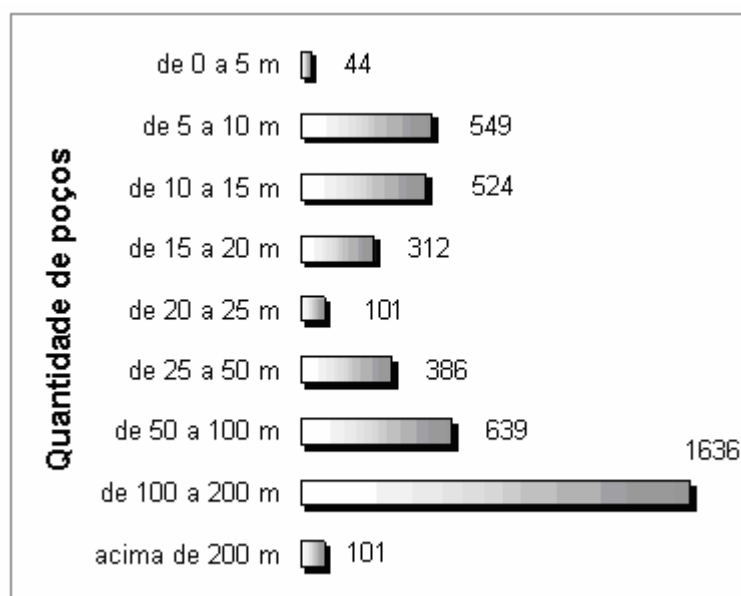


Figura 4.13: Frequência de profundidade dos poços cadastrados - informações do banco de dados HIDROREC II – Costa et al. (2002).

De acordo com Costa et al. (2002), existem três zonas de maior rebaixamento da superfície potenciométrica na área de Recife: os bairros de Casa Amarela e Casa Forte, o bairro de Afogados e imediações, e o bairro de Boa Viagem. A zona onde o aquífero Cabo (ao sul) se encontra mais deprimida localiza-se, na orla costeira de Boa Viagem, onde ocorre uma curva fechada com o valor da ordem de 60m (Costa et al., 2002).

Como consequência dessa superexploração já ocorreu um rebaixamento generalizado dos níveis d'água dos aquíferos Cabo e Beberibe nos últimos cinco anos, oscilando entre 25 e 40m em toda a região estudada (Costa et al., 2002). Além disso, os estudos apontaram, a partir do balanço hídrico de entrada e saída de água nesses aquíferos (Tabela 4.2), que há *superávit* para o aquífero Boa Viagem, enquanto os aquíferos Beberibe e Cabo apresentam *déficit*.

Tabela 4.2: Balanço de entrada e saída dos aquíferos Beberibe, Cabo e Boa Viagem.

Balanço	Aquífero		
	Beberibe	Cabo	Boa Viagem
Recarga anual (1)	$9,14 \times 10^6 m^3 / ano$	$5,35 \times 10^6 m^3 / ano$	$43,19 \times 10^6 m^3 / ano$
Exutório natural (2)	$7,49 \times 10^6 m^3 / ano$	$7,16 \times 10^6 m^3 / ano$	$11,64 \times 10^6 m^3 / ano$
Exutório artificial (3)	$64,04 \times 10^6 m^3 / ano$	$28,71 \times 10^6 m^3 / ano$	$11,82 \times 10^6 m^3 / ano$
Balanço: (1)-[(2)+(3)]	$- 62,39 \times 10^6 m^3 / ano$	$- 30,52 \times 10^6 m^3 / ano$	$19,73 \times 10^6 m^3 / ano$
Situação	Déficit	Déficit	Superávit

Fonte: Costa et al. (2002)

As Figuras 4.14 e 4.15 apresentam os mapas potenciométricos com informações dos aquíferos Beberibe e Cabo na Planície do Recife, entre os períodos de 1988/1991 e 1998/2001, respectivamente.

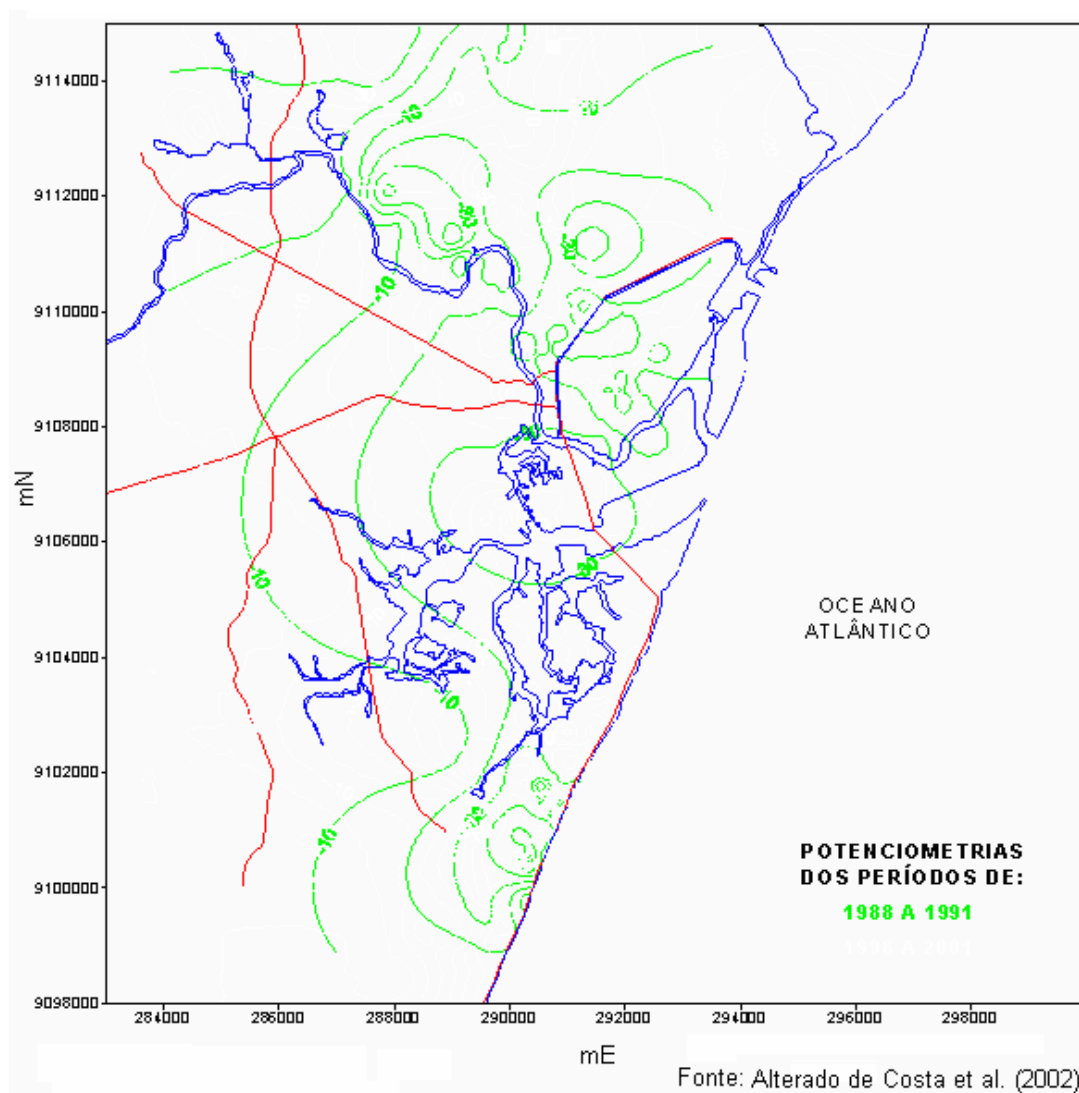


Figura 4.14: Comparação entre as superfícies potenciométricas dos aquíferos Beberibe e Cabo na Planície do Recife, entre os períodos de 1988/1991.

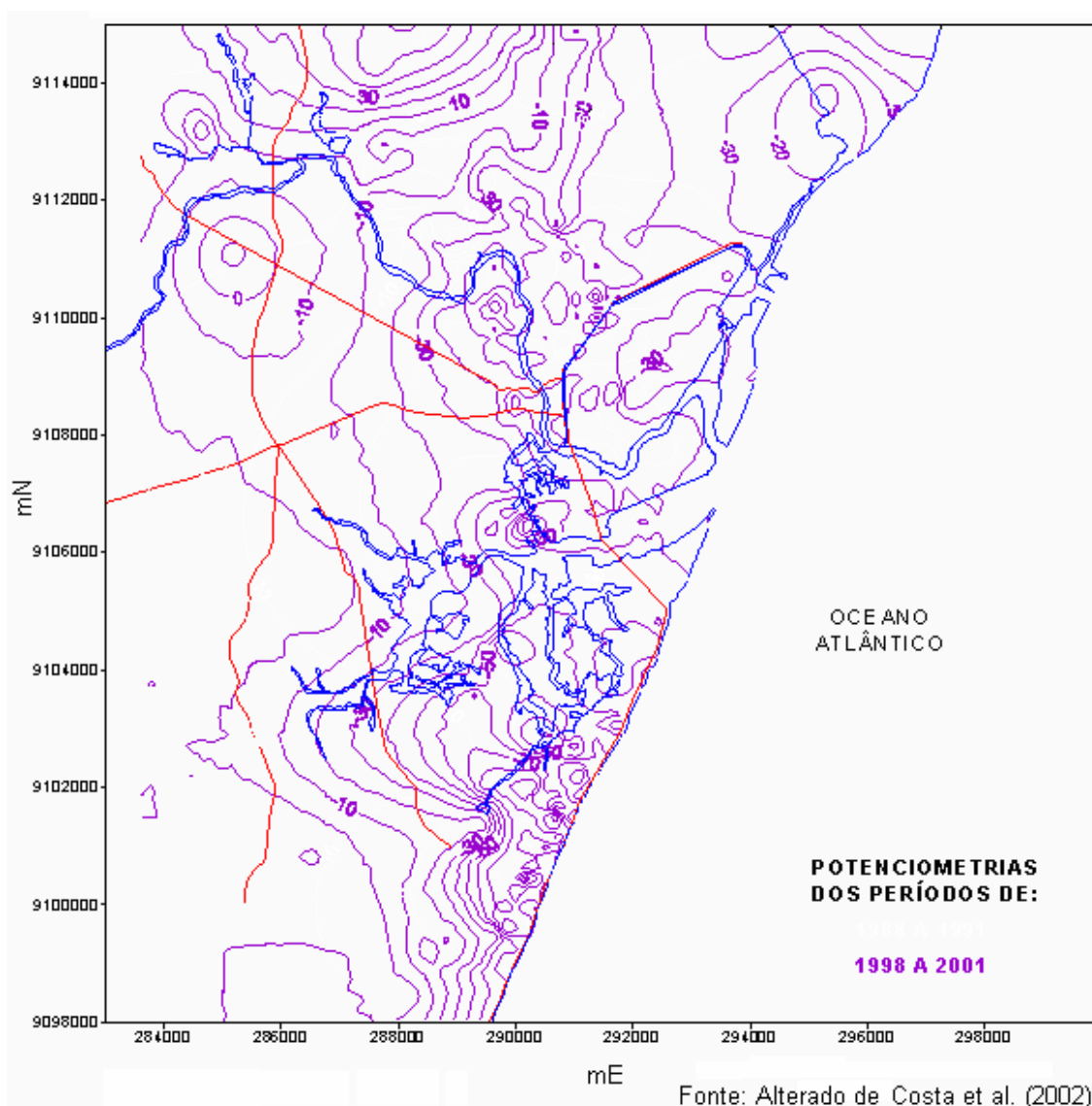


Figura 4.15: Comparação entre as superfícies potenciométricas dos aquíferos Beberibe e Cabo na Planície do Recife, entre os períodos de 1998/2001.

No que se refere ao controle da exploração demasiada dos recursos hídricos, segundo informações de Costa et al. (2002) já se conta atualmente com um mapa de Zoneamento Explotável dos Aquíferos (Figura 4.16), onde se dispôs, para cada zona, as restrições de captação, indo ao extremo de recomendar a proibição de novos poços na Zona “A”, que abrange parte do bairro de Boa Viagem, apresentada na Figura 4.17, e onde verificou-se que a profundidade do nível potenciométrico já chegou aos 100m (Costa et al., 2002). Além disso, o bairro de Boa Viagem concentra aproximadamente 6530 moradores/km², e corresponde a uma área de grande concentração de turistas, por todo o ano, e consequentemente de hotéis. Este contingente de moradores fixos e “flutuantes” contribui para que o bairro de Boa Viagem seja uma área de grande demanda de água e

poços para abastecimento d'água, de modo que cerca de 17% dos poços cadastrados encontram-se no bairro de Boa Viagem.

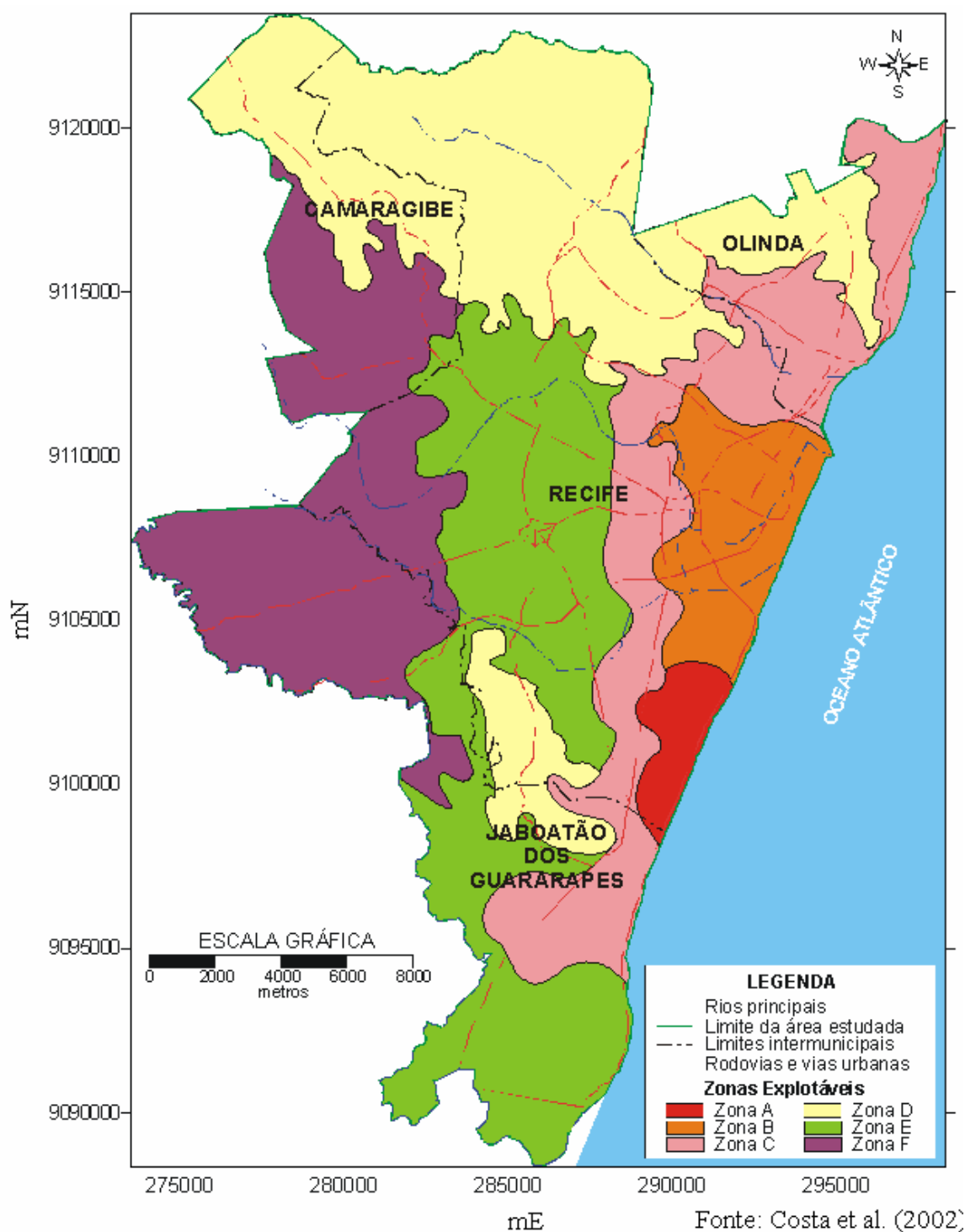


Figura 4.16: Mapa de Zoneamento Explotável dos Aquíferos Beberibe, Cabo, e Barreiras na Região do Projeto HIDROREC II

[illegible]

O incremento das atividades comerciais, industriais e turísticas tem contribuído para o aumento considerável do consumo de água na área. Analisando-se as informações do banco de dados do relatório HIDROREC II verifica-se maior número de poços nos bairros da zona sul (Boa Viagem, Imbiribeira, Ipsep, Pina, Piedade e Setúbal) em que se

encontram as maiores concentrações de atividades comerciais e turísticas. Do total de poços localizados nesses bairros da zona sul apenas 39% apresentam informação quanto a vazão explorada e a Tabela 4.3 apresenta esse quantitativo por bairros.

Tabela 4.3: Informações sobre quantitativos de poços da zona sul.

Bairro	Quantidade de poços com informação de vazão
Imbiribeira	44
Ipsep	9
Pina	17
Piedade	11
Setúbal	36
Boa Viagem	374

A Figura 4.18 mostra a grande quantidade de prédios concentrados na faixa costeira da praia de Boa Viagem e a consequência dessa concentração na quantidade de poços perfurados pode ser visualizada no mapa, retirado do sistema de informações GIAREC – Cabral et al. (1999 e 2000) e, apresentado na Figura 4.19.

Fonte: Teresa Maia – www.pernambuco.com

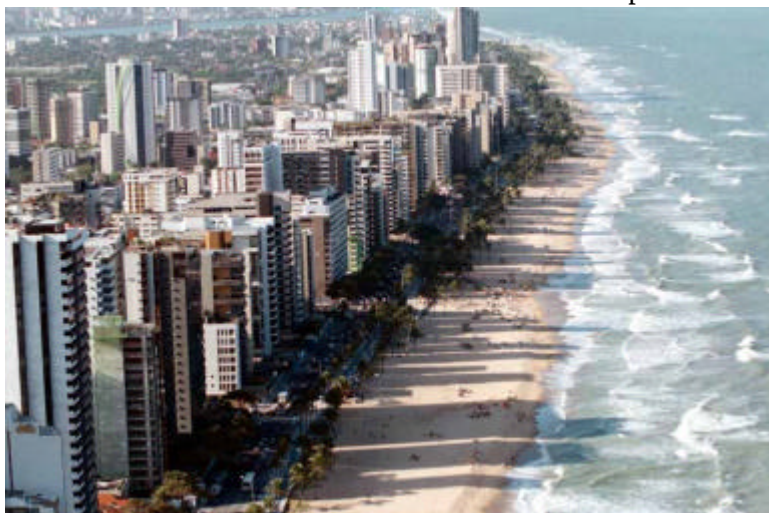


Figura 4.18: Foto da praia urbana de Boa Viagem

Apesar de ser abastecido através dos serviços de abastecimento d'água da COMPESA, provenientes de vários mananciais de superfície, a demanda aumenta mais rápido que a oferta e a água subterrânea dos aquíferos Cabo e Boa Viagem, representa um reforço para o abastecimento da área. Nesse contexto, as Figuras 4.20a e 4.20b mostram como a região do bairro de Boa Viagem apresenta grande concentração de poços que exploram água dos aquíferos Boa Viagem e Cabo.

Fonte: Banco de Dados Giarec (Cabral et al., 1999)

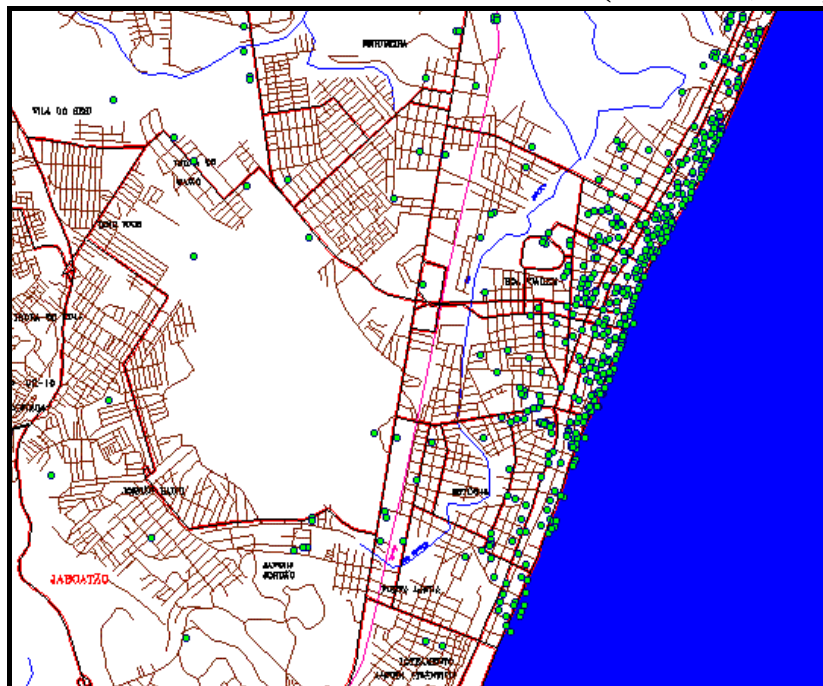
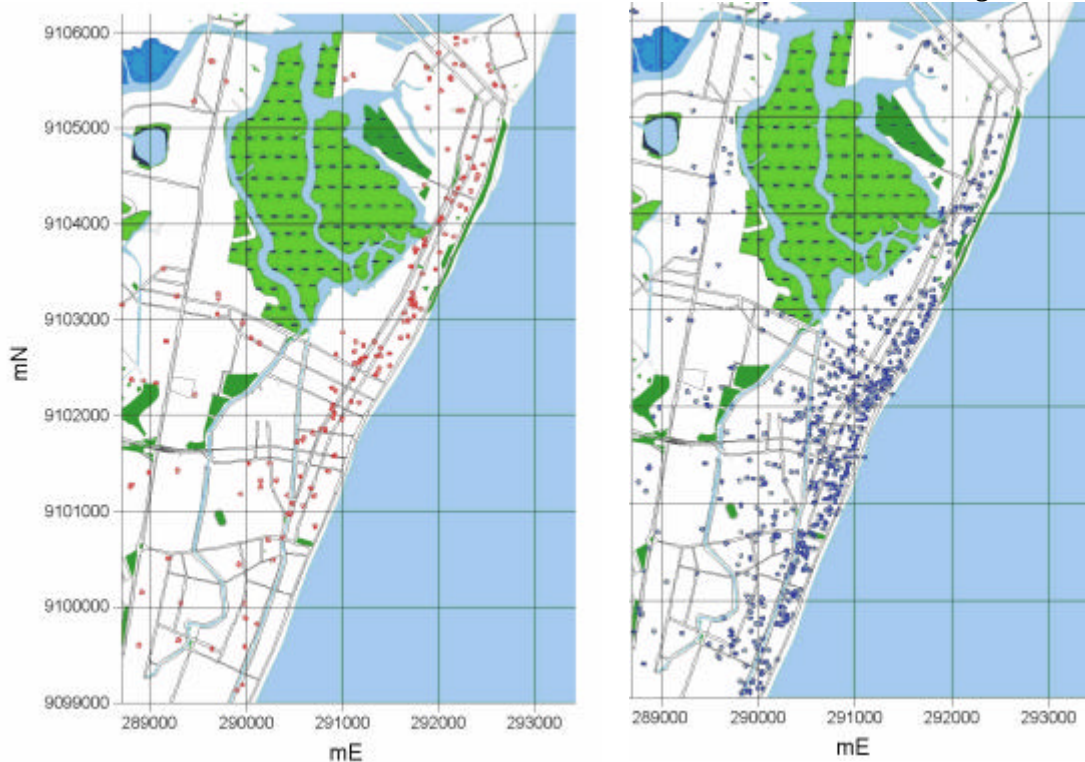


Figura 4.19: Trecho da RMR do Recife que compreende a área de Boa Viagem.

Fonte: Cabral e Montenegro, 2004



(a) Os pontos vermelhos indicam os poços que exploram água do aquífero Boa Viagem.

(b) Os pontos azuis indicam os poços que exploram água do aquífero Cabo.

Figura 4.20: Mapas da área de Boa Viagem.

4.7 Comentários Finais

Devido à grande concentração de atividades comerciais, industriais e, principalmente, turísticas e à exploração imobiliária crescente que caracterizam o bairro de Boa Viagem, há uma expectativa de aumento na quantidade de poços perfurados e, conseqüentemente, uma grande demanda por recursos hídricos. Costa et al. (2004) ressaltaram a preocupação com o excessivo rebaixamento ocorrido nos aquíferos profundos nos últimos cinco anos, onde em dois poços localizados no bairro de Boa Viagem verificou-se um rebaixamento de mais de 60m entre 1997 e 2000 no poço do edifício Algarve e um rebaixamento de cerca de 30m no poço do edifício Safra, no mesmo período.

Com relação ao controle da exploração demasiada dos recursos hídricos, as preocupações expostas nesta pesquisa com relação à expectativa de aumento na quantidade de poços perfurados no bairro de Boa Viagem são embasadas também nas informações contidas no estudo HIDROREC II, em que foi apresentada a ampliação da área de restrição da Zona “A” em 100% (Figura 4.17). Em um período de 25 anos, de 1975 a 2000, essa área apresentou uma variação no nível estático dos poços de -15 a -108m (Costa et al., 2004). Além da exploração demasiada, um fator agravante na situação das reservas hídricas subterrâneas é a baixa capacidade de recarga dos aquíferos mais profundos, uma vez que, como já foi dito anteriormente, esses são abastecidos lentamente pela água que drena do aquífero Boa Viagem.

O rebaixamento excessivo do nível d’água nos poços, as baixas taxas de recarga dos aquíferos mais profundos e disposição litológica das camadas arenosas com intercalações de argila são subsídios para indicar a possibilidade da região de sofrer subsidência.

Apesar de alguns prédios localizados na RMR terem sido apresentados nos veículos de comunicação em situação preocupante devido ao surgimento de fissuras e rachaduras, ocorrendo inclusive alguns desabamentos, esses eventos *a priori* não podem ser associados à subsidência. Por outro lado, esses eventos contribuíram para motivação de desenvolvimento desse trabalho, entretanto, no decorrer da pesquisa não houve oportunidade de investigar mais detalhadamente este assunto. Sabe-se, contudo que a ocorrência de problemas desse tipo pode ter origem numa série de fatores, sendo que a subsidência do solo pode ser um deles.

CAPÍTULO 5

MÉTODOS GEODÉSICOS PARA O MONITORAMENTO DA SUBSIDÊNCIA DO SOLO

5.1 Conceitos Geodésicos Básicos

5.1.1 Introdução

O conhecimento da coordenada vertical (altitude) bem como das coordenadas horizontais (latitude e longitude) de pontos da superfície da Terra é de primordial importância na geodésia, cartografia, oceanografia e nas diversas obras da engenharia. No estudo da subsidência do solo quantificamos o deslocamento vertical ocorrido através das informações das variações de altitudes medidas em um campo de pontos pré-estabelecidos, em diferentes épocas de medição.

As altitudes ou diferenças de altitudes podem ser determinadas por diferentes métodos, como nivelamento geométrico, nivelamento trigonométrico, gravimetria e através do sistema GPS.

Quando as altitudes têm como referência a superfície do geóide (como é o caso dos nivelamentos geométrico e trigonométrico e gravimetria), elas estão relacionadas à direção da gravidade (chamada vertical). Neste caso, são denominadas altitudes ortométricas. Quando as altitudes têm como referência uma superfície matemática arbitrária (por exemplo, a superfície de um elipsóide de revolução), elas estão relacionadas a uma perpendicular à essa superfície (chamada normal), e têm definição puramente geométrica, sem qualquer vinculação com as propriedades físicas da Terra (por exemplo, a gravidade). Este é o caso das altitudes determinadas através do Sistema de Posicionamento Global (GPS). Essas altitudes são chamadas de altitudes geométricas, ou altitudes elipsoidais.

Para vincular essas informações altimétricas de cunho meramente geométrico com a realidade física das posições dos pontos, devemos incluir uma grandeza chamada ondulação geoidal, que subtraída da altitude geométrica (obtida por GPS) fornece a altitude ortométrica, necessária à maioria das obras de engenharia e à cartografia. Quando são consideradas apenas as diferenças de altitudes elipsoidais obtidas por GPS entre os diversos pontos, as correspondentes informações de ondulação geoidal são

negligenciadas. Na presente pesquisa foram analisadas somente as altitudes e as diferenças de altitudes oriundas do GPS.

Neste item serão abordados os conceitos geodésicos básicos necessários ao entendimento do trabalho desenvolvido.

5.1.2 A posição de um ponto na superfície da Terra

A geodésia é a ciência que se preocupa com a determinação da forma e dimensões da Terra, ou de porção dela, bem como dos parâmetros definidores do seu campo de gravidade. As operações geodésicas conduzidas sobre a superfície terrestre envolvem medições de ângulos e distâncias associadas à medições gravimétricas e astronômicas, bem como medições realizadas sobre os satélites artificiais (por exemplo, o GPS). No Brasil as operações geodésicas são de responsabilidade do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE.

Face às irregularidades da superfície da Terra, após as medições realizadas adota-se uma superfície matemática de geometria simples, como referência para a condução dos cálculos geodésicos, cujo objetivo é a obtenção das coordenadas geodésicas (latitude, longitude e altitude) dos pontos estabelecidos na Terra.

Em geodésia, o modelo matemático adotado para a Terra é o elipsóide de revolução, cuja superfície é gerada pela rotação de uma elipse em torno de seu eixo menor. As coordenadas horizontais, latitude geodésica (f) e longitude geodésica (l), bem como a coordenada vertical, a altitude geodésica (h) são definidas em relação a essa superfície (Figura 5.1)

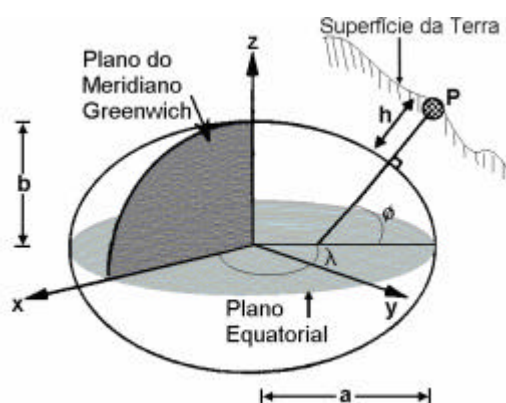


Figura 5.1: A posição de um ponto P sobre a superfície da Terra definida por suas coordenadas geodésicas.

A utilização do elipsóide de revolução como forma geométrica representativa da superfície da Terra exige duas considerações: que o eixo menor, através do qual ocorre a rotação da elipse, coincida com o eixo médio de rotação da Terra; e que seu centro coincida com o centro de massas da Terra, ou seja, o geocentro. O elipsóide assim estabelecido é denominado elipsóide global ou elipsóide internacional de referência.

Com o objetivo de ajustar alguns pontos específicos de uma determinada área da superfície da Terra à superfície geométrica conhecida, foi estabelecido um elipsóide local, que consiste no deslocamento do elipsóide global de forma a adaptar-se o melhor possível a uma porção da superfície geoidal na região considerada, onde geralmente, se supõe que o eixo menor desse elipsóide local seja paralelo ao elipsóide global geocêntrico (isto é, paralelo ao eixo de rotação da Terra). A relação entre os sistemas local e geocêntrico é chamada de *Datum* Geodésico. Outros elipsóides que não apresentam paralelismo com o eixo de rotação médio da Terra são também adotados.

No Brasil o *datum* geodésico é definido por um elipsóide local, o Elipsóide Internacional de Referência 1967, o qual é deslocado até tangenciar o ponto inicial da rede geodésica fundamental brasileira, chamado Chuá. Os parâmetros desse elipsóide juntamente com a posição do ponto Chuá formam o *datum* geodésico brasileiro denominado SAD-69 (*South American Datum* – 1969). Atualmente, o sistema de referência adotado oficialmente nos trabalhos geodésicos e cartográficos no Brasil foi mudado em 2005 para um novo sistema, o SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico para a América do Sul). O Projeto SIRGAS foi estabelecido durante a Conferência Internacional para Definição do *Datum* Geocêntrico para a América do Sul, que ocorreu em Outubro de 1993, em Assunção, no Paraguai. A utilização de um único *Datum* garante a solução para as discrepâncias existentes entre os diferentes marcos geodésicos em todos os países da América do Sul por constituir uma plataforma comum de referência. Para associar a posição de um ponto na superfície da Terra, geometricamente definido em relação a um elipsóide de revolução, às suas propriedades físicas, adotamos como superfície de referência o geóide, que é uma superfície do campo de gravidade da Terra que coincide com o nível médio dos mares, suposta prolongada através dos continentes (Gemael, 1994). De acordo com Gemael (1994), existem vários métodos para a determinação da separação geóide-elipsóide (o astrogeodésico, o gravimétrico, explorando o rastreamento de satélites artificiais, entre outros) que devem ser entendidos como complementares, pois todos apresentam vantagens e desvantagens e podem ser usados de forma combinada.

Diante do seu significado físico, o geóide é adotado como superfície de referência na determinação das altitudes ortométricas (H). Considerando a dificuldade na formulação de uma hipótese para a distribuição da densidade da massa topográfica introduz-se um novo conceito, o quase-geóide.

O quase-geóide é uma superfície não equipotencial, mas que apresenta ondulações e é muito próxima ao geóide, cuja determinação não requer hipóteses geofísicas, baseando-se na modelagem matemática do campo de gravidade normal. O quase-geóide difere do geóide na ordem de mm a cm em baixas elevações e pode atingir 1 m de diferença em altas montanhas (Torge, 2001). Nos oceanos, e nas regiões costeiras, como no trabalho apresentado aqui, o geóide e o quase-geóide praticamente coincidem (Bomford, 1980). Ao considerar a superfície de referência como sendo o quase-geóide, é pertinente a definição de altitude normal, que corresponde a distância medida sobre a vertical do quase-geóide ao ponto de interesse na superfície física, e a definição de anomalia da altitude ou altitude anômala (ζ), que corresponde as ondulações do quase-geóide em relação ao elipsóide.

Este estudo concentra-se na diferença de variação de altitude, situação em que a diferença entre o geóide e o quase-geóide não representam um papel importante.

A Figura 5.2 mostra a relação entre as altitudes ortométrica e elipsoidal, bem como a relação entre as superfícies geoidal, quase-geoidal e elipsoidal.

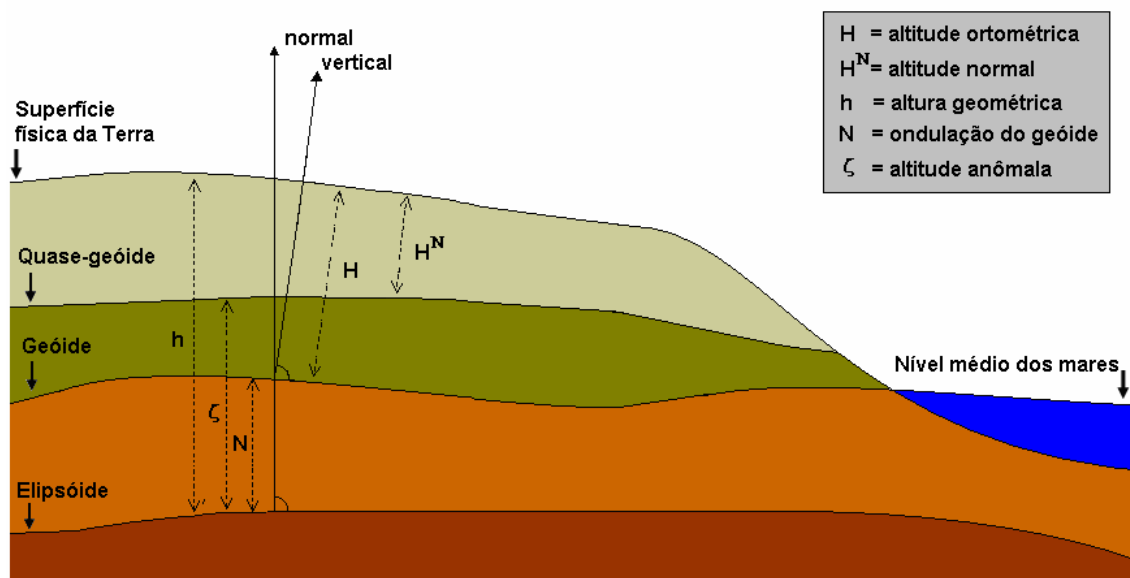


Figura 5.2: Relação entre as altitudes e as superfícies de referência.

A relação entre as duas altitudes, ortométrica (H) e elipsoidal (h), se dá, como pode ser visto na Figura 5.2, aproximadamente, através da equação:

$$h = H + N, \quad (5.1)$$

onde:

N é a ondulação geoidal.

5.1.3 Determinação da altitude ortométrica

Altitude ortométrica é a distância linear entre um ponto na superfície física e o geóide, medida sobre a vertical do ponto ao geóide, corresponde aos valores obtidos com o nivelamento geométrico associado à gravimetria. Segundo Gemael (1994) o nivelamento de precisão, no Brasil, tem natureza puramente geométrica sempre desacompanhado de determinações gravimétricas.

O valor da altitude ortométrica de um ponto P na superfície do solo é obtido pela utilização de um valor médio para a gravidade ao longo da linha vertical entre o geóide e o ponto:

$$H = \frac{\sum \Delta H}{g_m}, \quad (5.2)$$

onde :

g_m é o valor médio da gravidade.

O nivelamento é um procedimento incremental para determinação da altitude da superfície topográfica da Terra. O nivelamento geométrico consiste na determinação do desnível entre pontos localizados na superfície topográfica por intermédio de leituras correspondentes a visadas horizontais, obtidas com um nível, sobre miras colocadas verticalmente nos referidos pontos (Figura 5.3a). O desnível entre esses dois pontos será dado pela diferença das leituras do fio nivelador na mira ré (R) e vante (V) :

$$H_A - H_B = \Delta H_{AB} = \sum_{i=A}^B (R_i - V_i), \quad (5.3)$$

onde:

H_A e H_B são as altitudes ortométricas dos pontos A e B.

O nivelamento trigonométrico consiste na medição da diferença de altura entre dois pontos a partir da resolução de triângulos, fundamentada na relação trigonométrica entre ângulos e distância medidos (Figura 5.3b). Este tipo de nivelamento envolve a

observação do ângulo zenital ou vertical de altura e a distância inclinada ou horizontal entre os pontos, e pode ser executado por visadas unilaterais ou visadas recíprocas. O desnível entre dois pontos é determinado pela seguinte equação:

$$H_A - H_B = \Delta H_{AB} = S \cdot \cos Z + h_i - h_a + C_C - C_R, \quad (5.4)$$

onde:

S é a distância inclinada,

Z é o ângulo zenital,

h_i é a altura do instrumento,

h_a é a altura do alvo,

C_C é a correção da curvatura terrestre, determinada pela equação: $C_C = \frac{S^2}{2 \cdot R_T}$,

sendo que:

R_T é o raio da Terra, e

C_R é a correção da refração atmosférica, determinada pela equação:

$$C_R = -\frac{S^2}{2 \cdot R_T} \cdot k_R,$$

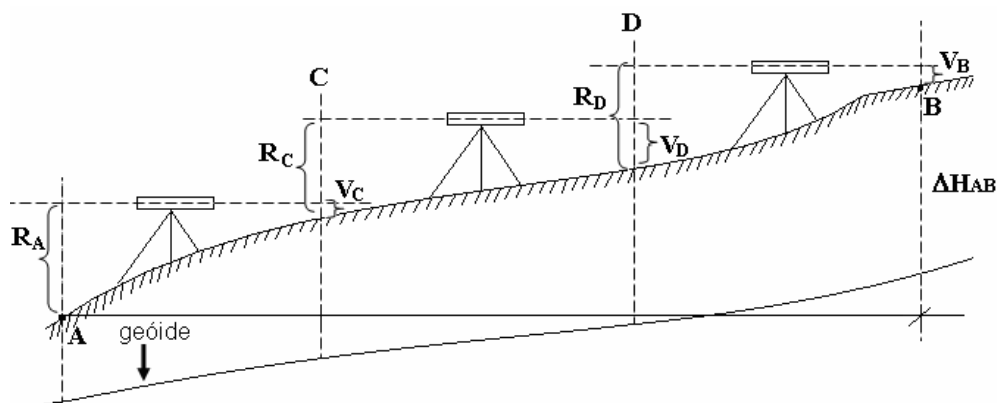
sendo que:

k_R é o coeficiente de refração.

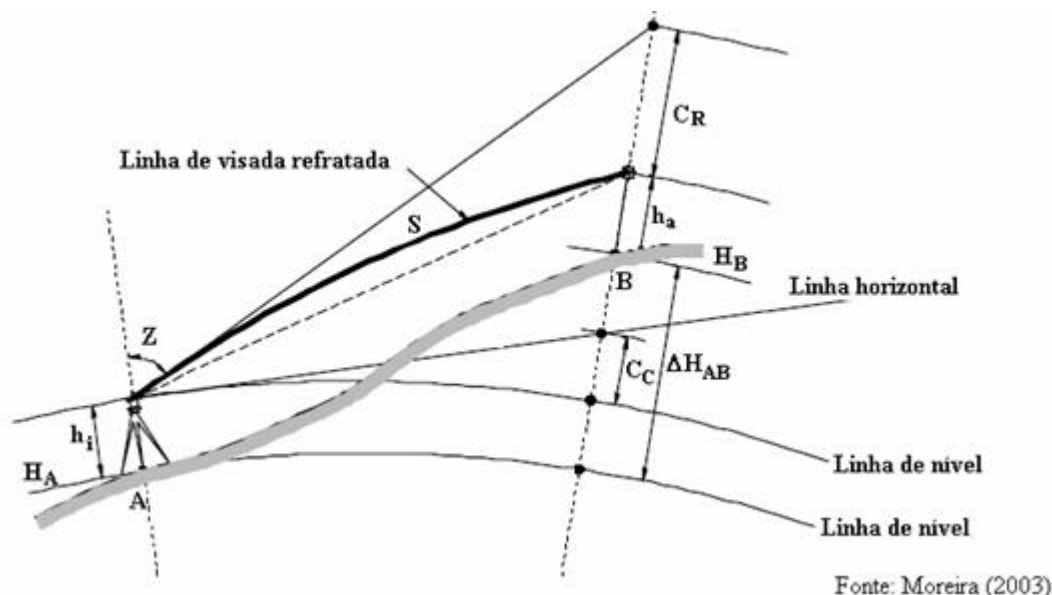
De acordo com o procedimento do nivelamento e a acurácia atingida, levantamentos geodésicos nacionais distinguem diferentes ordens de nivelamento. Para a realização do nivelamento geométrico de primeira ordem, por exemplo, o erro máximo aceito pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) é de $3mm\sqrt{k^*}$, onde k^* é a distância entre os extremos nivelados em quilômetros.

A acurácia do nivelamento preciso depende de muitos fatores, como por exemplo calibração do instrumento, efeitos magnéticos, erros de graduação das miras, refração vertical, movimentos verticais de instrumentos e miras, efeitos de marés, etc. Para eliminação ou redução dos erros sistemáticos que afetam a acurácia dos resultados é importante proceder conforme as orientações contidas nas normas técnicas utilizadas na cartografia, como exemplo a NBR 13133 de 1994 (ABNT) e as Especificações e Normas Gerais para Levantamentos Geodésicos do IBGE (1983). De acordo com Torge

(2001) para 1km de nivelamento geométrico duplo, pode-se atingir um desvio padrão de 0.2 a 1mm.



a) Nivelamento geométrico.



b) Nivelamento trigonométrico.

Figura 5.3: Ilustração das técnicas de nivelamento.

A variação da altitude e a variação da gravidade são praticamente inseparáveis no nivelamento geométrico, ou seja, a acurácia da altitude ortométrica depende da acurácia do modelo de gravidade da Terra utilizado. Valores de gravidade podem ser interpolados de medições de gravidade em estações afastadas de 5 a 20 km em áreas planas, e de 1 a 2 km em montanhas (Torge, 2001).

5.1.4 Altitudes elipsoidais ou Altura geométrica

A altura geométrica é a altitude puramente geométrica tomada como a distância de um ponto na superfície ao elipsóide de referência (c.f. Figura 5.2) e, de acordo com Gemael

(1999), juntamente com a latitude e a longitude formam um terno coerente pois são obtidas num único processo, o rastreamento de satélites artificiais. Ou seja, a altitude determinada utilizando-se o GPS corresponde à altura geométrica.

A comparação entre altitudes obtidas com o GPS e as altitudes obtidas com nivelamento apenas é possível quando ambas estiverem associados ao mesmo *datum* local. Em termos práticos isso normalmente acontece transformando-se as altitudes GPS em altitudes ortométricas. A exatidão dos valores altimétricos será função, também, da acurácia do geóide utilizado, ou seja, do conhecimento rigoroso das ondulações geoidais adotadas.

Para fins de monitoramento da subsidência do solo, é suficiente utilizar-se apenas da diferença entre altitudes de um mesmo tipo. Nesse contexto, com o emprego do GPS, a detecção dos deslocamentos verticais pode ser realizada mediante a diferença entre altitudes elipsoidais, não sendo necessário, portanto, o conhecimento das ondulações geoidais, tal como foi considerado na execução do experimento 2 (ver Capítulo 6), realizado no decorrer dessa pesquisa.

5.2 O Sistema de Posicionamento Global (GPS)

5.2.1 Introdução

O Sistema de Posicionamento Global – GPS é um sistema de navegação por satélites projetado de tal forma que em qualquer lugar do mundo e a qualquer instante, existam pelo menos quatro satélites GPS, dos cerca de 30 satélites disponíveis, Figura 5.4a, acima do horizonte do observador, independente das condições meteorológicas, Figura 5.4b. De acordo com a posição geográfica do observador, estão visíveis, em geral, mais que 8 satélites.

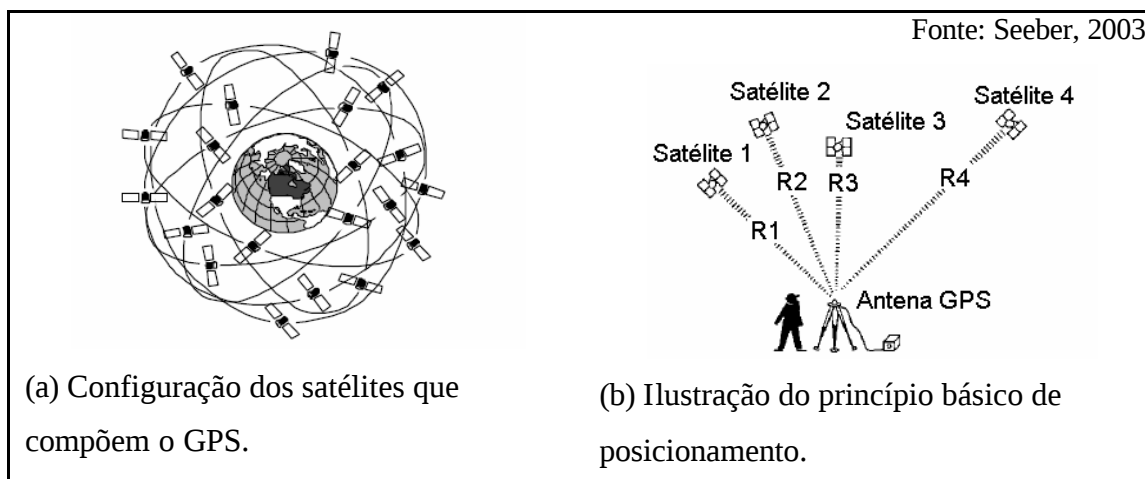


Figura 5.4: Sistema GPS.

O princípio básico do sistema GPS é a medição das pseudo-distâncias entre um mínimo de quatro satélites e a estação na superfície da Terra. A medição dessa distância se dá por meio da comparação entre o tempo de envio do sinal, pelo satélite, e o tempo de recepção do sinal, pela antena do usuário. Ou seja, a determinação da distância “antena do receptor – satélite” é resultado da multiplicação dos intervalos de tempo observados desde a saída do sinal do satélite até a chegada do mesmo no receptor, pela velocidade de propagação do sinal. Na realidade, os relógios do satélite e do receptor não são sincronizados, o que resulta em um erro sistemático na determinação da distância; por esse motivo, essa distância observada (satélite-receptor) é considerada uma pseudo-distância. A aplicação desse princípio exigiu, contudo, a estruturação de 3 segmentos distintos - o segmento espacial, com o objetivo de gerar e transmitir os sinais GPS; o segmento de controle, com o objetivo de atualizar a mensagem de navegação transmitida pelos satélites; e o segmento do usuário, com o objetivo de controlar, registrar e visualizar os dados recebidos.

O segmento espacial é composto pelos satélites orbitando a uma altitude aproximada de 20.200 km, que estão distribuídos em seis planos orbitais e cada órbita possui uma inclinação de 55° em relação ao plano do Equador. Os sinais emitidos pelos satélites são duas ondas portadoras, L_1 e L_2 ; os códigos C/A e P, modulados em fase sobre as portadoras; e os dados de navegação (Tabela 5.1).

Tabela 5.1: Sinais dos satélites GPS.

Sinal	Frequência (MHz)	Comprimento de onda (cm)
Portadora L_1	1575.42	19.0
Portadora L_2	1227.60	24.4
Código P	10.23	2931
Código C/A	1.023	29310

Fonte: Adaptado de Seeber (2003).

O segmento de controle compreende as estações de monitoramento estrategicamente espalhadas pelo mundo (Figura 5.5). Essas estações rastreiam continuamente todos os satélites visíveis pelo campo da antena das estações.

O processamento das informações resultantes desse rastreamento, o cálculo dos dados relativos às órbitas e a correção dos relógios dos satélites – para atualização da mensagem de navegação, é realizado na *Master Control Station* que está localizada em Colorado Springs, Estados Unidos.

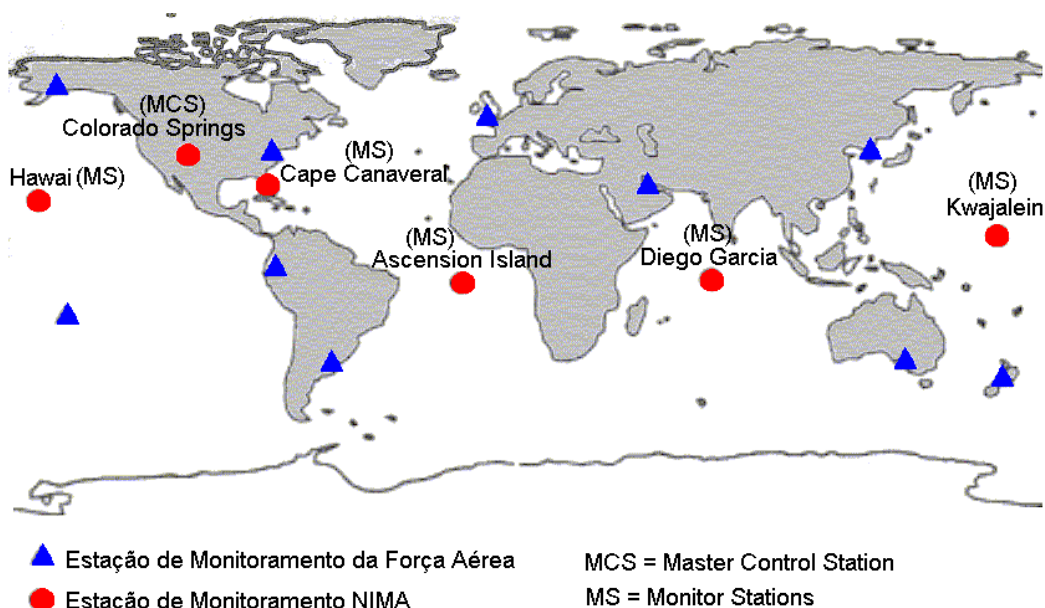


Figura 5.5: Localização das estações de monitoramento e *Master Control Station*.

A mensagem de navegação atualizada é transmitida para os satélites pelas *Ground Antennas* (Figura 5.6), assim que os satélites se encontrem no campo de visada das antenas.

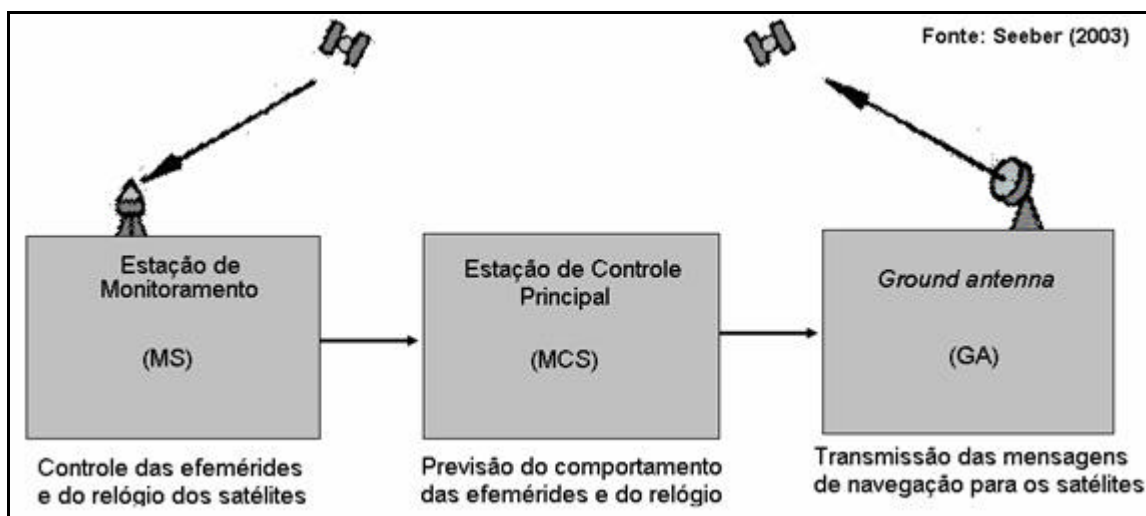


Figura 5.6: Fluxo de dados para determinação das efemérides transmitidas.

A Figura 5.5 apresenta também a localização das estações de monitoramento da *National Imagery and Mapping Agency* – NIMA que, de acordo com a *Accuracy Improvement Initiative* – AII do Departamento de Defesa dos Estados Unidos, planeja-se serem utilizadas no conjunto de estações de monitoramento para previsão das efemérides transmitidas – os elementos Keplerianos e as forças perturbadoras (campo

gravitacional da Terra, atração luni-solar, pressão da radiação solar e atrito com a atmosfera) que agem sobre os satélites. De forma geral as tarefas associadas a este segmento são: controle do sistema de satélite, determinação do tempo do sistema GPS, pré-cálculo dos dados orbitais dos satélites, e armazenamento das informações orbitais e de tempo na memória de cada satélite.

O segmento do usuário corresponde a todos os instrumentos necessários para determinação de posição, velocidade ou tempo – receptores (antena, pré-amplificador e unidade eletrônica), algoritmos, programas, metodologias, etc.

Os receptores GPS armazenam as informações referentes à navegação em um arquivo específico de formato próprio, entretanto independente do formato adotado pelos fabricantes de receptores GPS, através da conversão para RINEX - *Receiver Independent Exchange Format*, pode-se utilizar as informações das observações, os dados meteorológicos e as informações de navegação em qualquer dos softwares disponíveis para determinação das coordenadas dos satélites GPS (Marques e Oliveira, 1999). Existem vários tipos de receptores GPS, que podem ser divididos em vários grupos de acordo com diferentes classificações, que podem ser encontradas em Seeber (2003) - Tabela 5.2.

A Figura 5.7 apresenta os componentes básicos de um receptor GPS genérico, que são: antena com pré-amplificador, oscilador, seção de RF (radiofrequência), canais, microprocessador, interface com o usuário, memória, abastecimento de energia.

Tabela 5.2: Possibilidades de agrupamento dos receptores GPS.

Agrupamento dos receptores GPS de acordo com:			
dados disponíveis	processamento do sinal	técnica de operação dos canais	fins da comunidade usuária
• código C/A • código C/A + portadora L_1 • código C/A + portadoras L_1 e L_2 • código C/A + código P + portadoras L_1 e L_2	• com uso do código • sem uso do código • quase-independente do código	• multicanal • sequencial • multiplex	• militares • civis • geodésicos • navegação • manual

Fonte: Seeber (2003)

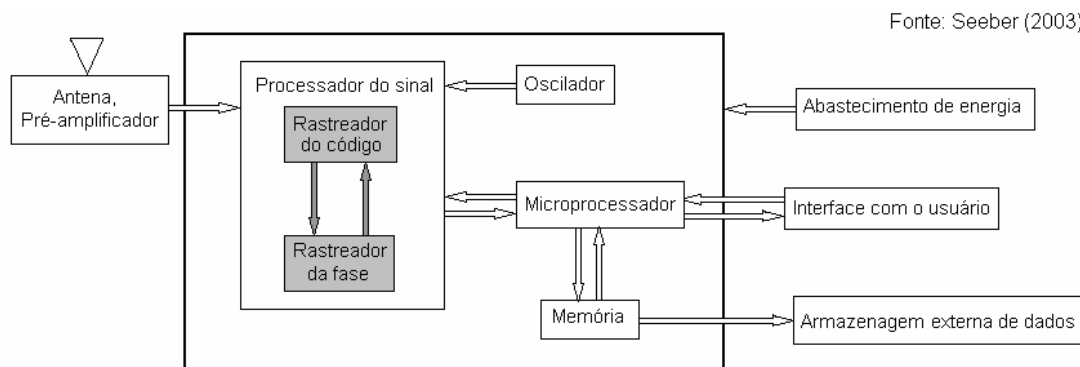


Figura 5.7: Principais componentes de um receptor GPS.

O desenvolvimento de novas tecnologias e a necessidade, sempre crescente, dentre outras, da obtenção de dados cada vez mais precisos resultam numa grande quantidade de receptores em uso no mercado atualmente. Consequentemente, os aparelhos ficam cada vez mais rapidamente ultrapassados. Por outro lado, algumas propriedades básicas podem ser determinadas com respeito aos aparelhos destinados às aplicações geodésicas. Podem-se destacar, como de fundamental importância para os levantamentos geodésicos, segundo Seeber e Romão (1997) os receptores que utilizam ambas as frequências - L_1 e L_2 , acesso ao comprimento de onda completo de L_2 , código P em L_1 e L_2 , baixo ruído da fase portadora ($< 1\text{mm}$), baixo ruído do código (da ordem de dm), alta taxa de dados (> 1 Hertz), entre outros.

5.2.2 Influência dos Erros e Precisão

Para discussão sobre as principais fontes de erro no GPS, tradicionalmente os mesmos são agrupados em erros associados aos satélites, erros resultantes da propagação do sinal, erros oriundos do receptor/antena e erros da estação. Ao final das discussões apresenta-se um resumo sobre os erros que são mais importantes na determinação da variação da altitude, bem como as respectivas ordens de grandeza (Tabela 5.5).

a) Erros associados aos satélites

São considerados erros associados aos satélites os erros orbitais e os erros do relógio do satélite. Os erros orbitais referem-se à diferença entre a órbita real do satélite e as correspondentes informações transmitidas, conhecidas como *Broadcast Ephemerides*. Com a utilização das efemérides transmitidas para o cálculo das coordenadas dos satélites, qualquer erro nas efemérides se propagará para a antena do usuário. Esses

erros são eliminados com a realização de observações relativas em, pelo menos, duas estações, quando estas não estão muito distantes entre si. Pode-se esperar, entretanto, a existência de um resíduo nas coordenadas relativas em função da distância do satélite à linha de base que degradam a acurácia da linha de base na medida em que a mesma torna-se mais longa. Considerando-se uma linha de base de 10 km, um erro de 25 m na órbita representa um erro de 1 cm nas coordenadas relativas. A precisão das efemérides transmitidas pelo satélite é da ordem de 5m.

As efemérides precisas, quando utiliza-se GPS, são baseadas no modelo terrestre WGS 84, *World Geodetic System 84*, que tem sua origem quase coincidente com o centro de massa da Terra, e “o eixo Z aponta para o pólo terrestre médio (convencional) e o eixo X aponta para o meridiano médio (convencional), o eixo Y forma um sistema dextrógiro” (Seeber e Romão, 1997).

O elipsóide de referência adotado é o GRS 1980, *Geodetic Reference System 1980*, que corresponde a um elipsóide de revolução equipotencial e geocêntrico. A Tabela 5.3 apresenta os parâmetros fundamentais do WGS 84 (Monico, 2000 e Seeber, 2003). O WGS 84 é definido com uma acurácia de cerca de 1 cm e corresponde ao nível do ITRF.

Tabela 5.3: Parâmetros fundamentais do WGS 84

Parâmetro e valor	Descrição
$a = 6378137 \text{ m}$	Semi-eixo maior
$f = 1/298.257223563$	Achatamento
$w_e = 7292115 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$	Velocidade angular da Terra
$GM = 3986004.418 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{s}^2$	Constante gravitacional geocêntrica da Terra

Um outro fator que interfere na acurácia das informações de posicionamento levantadas é o não sincronismo do relógio do satélite com o sistema de tempo GPS. Esse não sincronismo ocorre devido ao efeito da Teoria de Einstein da Relatividade Geral. Uma das conseqüências dos postulados de Einstein é que o valor do intervalo de ocorrência de um fenômeno depende do referencial em que está o observador. Assim, dois observadores situados em referenciais inerciais diferentes, um tendo velocidade constante em relação ao outro, os intervalos de tempo medidos por esses observadores serão diferentes. Nesse contexto, observa-se que um relógio localizado num referencial que se move em relação a outro "anda" mais devagar do que o relógio “parado”. Conclui-se, portanto, que os relógios dos satélites andam a um ritmo diferente dos relógios da Terra. A gravidade, interpretada pela Teoria de Einstein da Relatividade

Geral, afeta o comportamento dos relógios em órbita, os quais se adiantam em relação aos relógios da Terra, ou seja, os relógios localizados na Terra andam mais lentamente do que os relógios dos satélites que estão em órbita. A diferença de sincronismo daí resultante influencia nas pseudo-distâncias levantadas tal que o erro resultante é da ordem de 1 a 10 m. Esses erros podem, entretanto, ser eliminados com a realização de posicionamento relativo ao empregar-se combinações lineares de observações envolvendo receptores e satélites (ver item 5.2.3 sobre o posicionamento relativo).

b) Erros resultantes da propagação do sinal

Esses erros ocorrem na trajetória do sinal através da ionosfera e troposfera, sobre essas fontes de erro discute-se a seguir.

- Refração troposférica

A troposfera é uma camada da atmosfera que se estende da superfície da Terra até cerca de 50 km e a refração associada a esta camada é conhecida como refração troposférica. Os erros de propagação essenciais, devido à refração troposférica, se originam na baixa troposfera (até aproximadamente 30 km) e dependem apenas das propriedades termodinâmicas do ar. Outros efeitos são: atenuação atmosférica, cintilação troposférica e atraso troposférico. Monico (2000) descreve esses efeitos da seguinte forma:

- Atenuação atmosférica: corresponde à diminuição da potência da onda eletromagnética devido aos elementos que constituem a atmosfera, variando para cada frequência. Recomenda-se não utilizar observações GPS abaixo do ângulo de elevação de 5°.
- Cintilação troposférica: oscilação na amplitude da onda eletromagnética, causada por irregularidades e turbulência no índice de refatividade atmosférica. Os efeitos da cintilação troposférica dependem da frequência, do ângulo de elevação e das condições atmosféricas (em particular da densidade das nuvens). Recomenda-se utilizar nas observações GPS ângulos de elevação acima de 10°, quando esses efeitos são relativamente pequenos.
- Atraso troposférico: está associado à influência da atmosfera seca, devido à quantidade de nitrogênio e oxigênio, e úmida, devido ao vapor d'água atmosférico.

A correção troposférica é função, principalmente, da elevação do satélite e da altura da estação. Assim, o cálculo da correção troposférica depende da acurácia das coordenadas aproximadas usadas durante o processamento das observações. Uma associação dos parâmetros atmosféricos da altura da estação apenas é possível para sinais de satélites com baixa elevação (Görres, 1996).

Uma das formas sugeridas por Rothacher (2001), para minimização do efeito da refração troposférica, é combinar a utilização de baixos ângulos de elevação com o emprego de uma função de mapeamento como Saastamoinen e Hopfield, por exemplo. Borre et al. (2001) afirmam que esta modelagem pode reduzir o atraso a poucos milímetros. A utilização de uma atmosfera convencional não representa, entretanto, a situação real e isso representa um erro transmitido à altura.

Para fins de modelagem, o atraso troposférico pode ser considerado como uma combinação da contribuição de duas parcelas, correspondendo aos gases secos - componente seca, e ao vapor d'água, componente úmida, que compõem a massa gasosa próxima à superfície da terra. A componente seca é responsável pela maior parte da refração troposférica, cerca de 90%.

Segundo Mendes e Langley (1999) o atraso troposférico pode ser escrito como:

$$d_{trop} = d_h^z \cdot m_h(e) + d_w^z \cdot m_w(e), \quad (5.5)$$

onde:

d_{trop} é o atraso na propagação troposférica em um determinado ângulo de elevação e ,

d_h^z e d_w^z são os atrasos devido às componentes seca e úmida, respectivamente,

$m_h(e)$ e $m_w(e)$ são as funções mapeamento associadas às componentes seca e úmida.

Um grande número de funções de mapeamento está disponível, mas as funções propostas por Niell (1996) são particularmente interessantes, pois não dependem de parâmetros meteorológicos. Mendes et al. (2002) apresentaram uma comparação entre uma função de mapeamento que requer dados de localização e dados meteorológicos (superfície de temperatura) e a função de mapeamento proposta por Niell (1996) para ondas do espectro rádio. Segundo Mendes et al. (2002) a função de mapeamento que requer dados de localização e dados meteorológicos apresentou,

em geral, comportamento melhor que a função proposta por Niell (1996), em níveis milimétricos.

Existem vários modelos que permitem obter com uma boa acurácia a componente seca, entretanto a contribuição da componente úmida é de difícil modelagem. Schüller (2001) apresentou alguns modelos para as funções de mapeamento correspondentes às componentes seca e úmida propostos por Saastamoinen (1972), Black (1978), Davis et al. (1985) e Niell (1996).

Mendes e Langley (1994) compararam a acurácia de várias funções de mapeamento utilizando conjunto de dados reais referentes a diferentes condições climáticas para diferentes ângulos de elevação, a partir de 3°, e recomendam a utilização de algumas funções de mapeamento como a proposta por Niell. Os autores afirmaram que a função proposta por Niell estava entre as funções testadas que apresentaram maior acurácia para baixos ângulos de elevação e que se mostraram mais efetivas com relação à facilidade de implementação e velocidade de cálculo.

O software de processamento das observações utilizado nessa pesquisa, o GEONAP, utiliza o modelo troposférico de Hopfield. Na aplicação do modelo para correção troposférica pode-se utilizar informações de tempo padrão ou valores reais, entretanto, resultados empíricos têm mostrado que os dados padrões de tempo (temperatura úmida e seca, e pressão) rendem melhor aproximação que os reais (Geopp, 2000).

De acordo com Görres (1996), o atraso no tempo de percurso do sinal devido à refração troposférica apenas pode ser eliminado pela simples diferença para redes pequenas sem grandes variações de altitude.

- Refração ionosférica

A ionosfera compreende a região da atmosfera entre 50 e 1000 km e caracteriza-se pelo número significativo de elétrons livres, átomos carregados positivamente e íons. Para alguns autores a ionosfera é considerada a maior fonte de erro no posicionamento de alta precisão com GPS. O efeito da ionosfera resulta da diferença espacial e temporal da densidade dos elétrons e influencia diferentemente ambas as frequências, podendo ser da ordem de 1 m ou mesmo atingir valores da ordem de mais de 100 m (Klobuchar, 1991). O efeito perturbador ionosférico é maior nas regiões do globo compreendidas entre -20° e +20° de latitude geomagnética - as regiões equatoriais (Langley, 2000) e sua intensidade depende da atividade solar na

ocasião do posicionamento, atingindo valores máximos durante a atividade solar máxima e para satélites localizados no horizonte (Newby e Langley, 1992, apud Camargo et al., 2000).

O efeito ionosférico resulta num incremento nas distâncias obtidas com o código e um decremento nas distâncias obtidas com a fase da portadora (sendo os valores idênticos, mas de sinais opostos). A magnitude desse erro é função do período do dia, estação do ano, ciclo solar, localização geográfica do receptor e campo magnético da terra. Receptores de dupla frequência têm a vantagem de permitir a correção da natureza dispersiva da ionosfera, através de uma combinação linear das pseudo-distâncias. Os valores estimados podem, então, ser removidos de L_1 , através da expressão apresentada por Langley (2000):

$$d_{ion,1} = \frac{f_2^2}{f_2^2 - f_1^2} [P_1 - P_2] + e, \quad (5.6)$$

onde:

f_1 e f_2 são as respectivas frequências de L_1 e L_2 ,

P_1 e P_2 são as pseudo-distâncias medidas de L_1 e L_2 ,

e representa os erros remanescentes, que, de acordo com Seeber (1993), são de poucos centímetros.

A utilização de receptores de apenas uma frequência exige a correção desses efeitos com o auxílio de um modelo ionosférico, que pode ter seus coeficientes transmitidos na mensagem de navegação, ou esses podem ser obtidos de observações resultantes de receptores de dupla frequência. O modelo matemático que utiliza os coeficientes transmitidos nas mensagens de navegação é conhecido como modelo *Broadcast* ou modelo Klobuchar (1987). O software de processamento das observações utilizado nessa pesquisa, o GEONAP, utiliza o modelo de correção ionosférica Klobuchar (Geopp, 2000).

O modelo Klobuchar é baseado em medidas de Conteúdo Eletrônico Total (TEC) e permite estimar o tempo de atraso do sinal ao atravessar a ionosfera através de oito coeficientes que fazem parte dos dados de mensagem enviados pelos satélites da constelação GPS e são ajustados de acordo com a localização do receptor. Informações sobre o TEC em escala global podem ser obtidas no Serviço Internacional de GPS para Geodinâmica – IGS. Segundo o modelo Klobuchar,

durante o período diurno o modelo utiliza uma função cosseno com amplitude máxima às 14 horas locais, enquanto que para o período noturno, o efeito da ionosfera, em L_1 , é considerado constante e corresponde a 5 nanosegundos³. A amplitude e o período da função cosseno são calculados com base na latitude geomagnética e dos coeficientes transmitidos. O modelo de Klobuchar corrige entre 50% e 60% do efeito da ionosfera em regiões de média latitude (Leick, 1995).

Em aplicações que se deseja grande precisão, recomenda-se, além do emprego de um modelo ionosférico, a utilização de receptores com dupla frequência. De forma geral, pode-se considerar, assim mesmo, a existência de erros residuais que, podem ser cancelados com o uso de observações diferenciais entre duas estações com linha de base curta (até cerca de 30 km), uma vez que os sinais atravessam a mesma região atmosférica. Nas investigações realizadas nessa pesquisa foram utilizados apenas receptores com dupla frequência.

Estudos realizados no sul do Brasil sobre o emprego do GPS em regiões equatoriais mostram que tanto na América Central quanto na América do Sul, as observáveis GPS são fortemente afetadas pelas condições ionosféricas. Nesse contexto, Camargo et al (2000) apresentam um modelo matemático, baseado em diferenças entre pseudo-distâncias das fases das portadoras, para representar as condições ionosféricas no Brasil, visando auxiliar, principalmente, os usuários de receptores de GPS com apenas uma frequência. Os experimentos mostraram que este modelo fornece um erro de 80% em relação ao posicionamento conduzido sem a referida correção. No posicionamento relativo, o benefício foi de 50% para linhas de base de aproximadamente 100 km. Os autores recomendam, entretanto, que, sejam realizados novos estudos sobre as funções de mapeamento atmosférico para modelamento do atraso ionosférico na vertical e análise do impacto da função de mapeamento do modelo proposto, uma vez que a ionosfera na região equatorial apresenta grandes alterações. Willgalis et al. (2001) apresentaram um estudo sobre a implantação de uma rede de referência GPS no Brasil, onde a alta atividade ionosférica foi um dos pontos discutidos. De acordo com os autores, e baseados na distribuição dos resíduos como uma função do tempo de observação, os resultados são fortemente correlacionados com o nascer e com o pôr do sol, quando ocorrem

³ De acordo com Klobuchar (1991), 1 nanosegundo de atraso, medido em L_1 , corresponde a 0.3 m de erro na distância em L_1

gradientes elevados de atraso ionosférico. Os períodos mais críticos, segundo os autores, vão do pôr-do-sol até a meia-noite, momento a partir do qual ocorre diminuição da atividade ionosférica e os resultados são normais até o nascer do sol.

c) Erros oriundos do receptor

Neste grupo enquadram-se os erros originados nos arredores da estação, os multicaminhos, e na própria antena receptora, devido às variações no centro de fase da antena.

- Multicaminhos

Como o próprio nome sugere, os multicaminhos são sinais refletidos por superfícies vizinhas (carros, construções, árvores,...), próximas ao receptor, gerando no mesmo mensagens de sinais “fantasmas” que afetam as medições da pseudo-distância e da fase da portadora. São considerados, portanto, em observações GPS, como multicaminhos, todos os sinais refletidos de objetos externos à antena. Vários são os estudos apresentados sobre a dimensão do erro provocado pelos sinais refletidos e sobre a redução dos mesmos.

A propagação de multicaminhos apresenta características diferentes para aplicações estáticas e dinâmicas. De acordo com Weill (1997), para um receptor estacionário a geometria da propagação muda lentamente, fazendo com que os parâmetros associados aos multicaminhos permaneçam constantes por alguns minutos, enquanto que em aplicações dinâmicas, ou móveis, um mesmo receptor pode experimentar grandes flutuações de medição em frações de segundos.

Weill (1997) apresentou uma descrição de técnicas que podem ser utilizadas para redução de multicaminhos:

- utilização de antenas especiais (*choke ring*),
- estratégia de localização da antena,
- processamento espacial com arranjo de várias antenas, e
- observação do sinal por um longo tempo.

As antenas *choke ring* (Figura 5.8) compreendem um plano contendo uma série de depressões circulares e concêntricas com profundidade de $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda, que impedem a formação de ondas superficiais para sinais que chegam de direções próximas do horizonte. Essas características resultam em um acréscimo de peso, tamanho e custos em relação aos tipos de antenas sem estas características.

Além disso, o sucesso da utilização desse tipo de antena na mitigação de erros de multicaminhos não é observado em sinais que chegam de cima do horizonte.

Fonte: Guia de Instalação - *Choke Ring*, NovAtel GPS Antenna

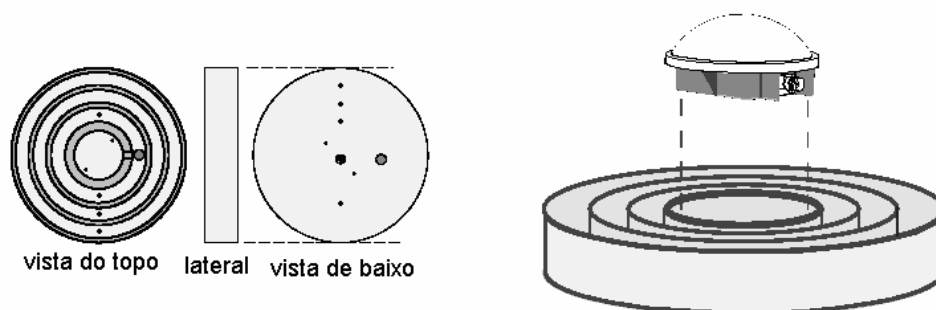


Figura 5.8: Esquema de montagem de uma antena *choke ring*.

De fato, pode-se reduzir a susceptibilidade aos sinais refletidos utilizando-se antenas *choke ring*, mas a recomendação mais efetiva é, certamente, evitar-se o levantamento em locais propícios à ocorrência de multicaminhos, por isso é muito importante a estratégia de localização da antena. Apesar de parecer uma recomendação simples, na realidade é uma situação difícil de se encontrar. Seeber (2003) sugere como possíveis medidas para minimização dos efeitos dos sinais refletidos, escolha cuidadosa do local de observação, do receptor e do software e calibração da estação. Com relação a esse último item, Böder et al (2001) apresentam um método para calibração absoluta da antena utilizando uma estação em movimento, próxima à estação fixa, que elimina os multicaminhos através do movimento controlado.

A utilização de várias antenas no processamento do sinal é útil para explorar as diferenças entre as estações (uma vez que o sinal GPS corrompido pelos multicaminhos será normalmente diferente para cada antena) e permitir o isolamento do sinal direto. De acordo com Weill (1997), em alguns casos, o uso de múltiplas antenas pode ser considerado para formar um padrão direcional da antena para o sinal direto, mas não para os sinais resultantes de multicaminhos que chegam de outras direções.

Os multicaminhos dependem da formação geométrica dos satélites, por isso, tanto Seeber e Willgalis (2002) quanto Weill (1997) afirmam que os erros daí oriundos desaparecem em medições de longa duração. De acordo com Weill (1997), uma técnica que pode ser utilizada na caracterização dos multicaminhos, em um

determinado lugar, é a observação de um mesmo satélite em dois dias consecutivos. A ocorrência de multicaminhos afeta os resultados uma vez que pode resultar em falhas no processamento, dificultando a contagem dos ciclos inteiros, as ambigüidades. Nos algoritmos matemáticos utilizados para resolução das ambigüidades, em parte dos testes estatísticos, assume-se que os erros associados aos dados têm distribuição normal, eliminando, portanto os erros resultantes do multicaminho que são sistemáticos.

- Variação do centro de fase da antena

Para a determinação de alturas exige-se o conhecimento exato da posição do centro de fase da antena. O centro de fase elétrico da antena depende, contudo, do azimute e da elevação dos satélites observados. O desvio do centro de fase elétrico com relação ao centro de fase mecânico (determinado pela intersecção entre o eixo de simetria mecânico vertical e o plano da base) é conhecido como PCV – *phase center variations*. O PCV varia de poucos milímetros a alguns centímetros. Diferentes antenas de um mesmo tipo podem apresentar diferentes PCV. Assim, as aplicações de alta precisão com GPS exigem o conhecimento das variações milimétricas do centro de fase de forma a possibilitar a correção de erros sistemáticos. Neste contexto, exige-se uma boa calibração da antena para a obtenção de uma boa acurácia na altitude.

Os métodos mais utilizados para calibração da antena GPS são: calibração utilizando a câmara anecóica; calibração de campo relativa e calibração de campo absoluta.

O método da calibração utilizando a câmara anecóica constitui um método laboratorial, onde a antena GPS é inclinada e deslocada com relação ao sinal GPS artificial gerado por uma fonte dentro da câmara.

A calibração de campo relativa baseia-se na diferença residual simples ou dupla, utilizando-se duas antenas, sendo que uma delas é a antena de referência, de PCV precisamente conhecido.

As principais vantagens, Seeber (2003), associadas aos valores dos PCV absolutos, resultantes de calibração de campo, são a disponibilidade em tempo real (técnica do robô), a independência da antena de referência e das coordenadas de referência, além de estarem livres de efeitos multicaminhos, poder ser aplicados em qualquer

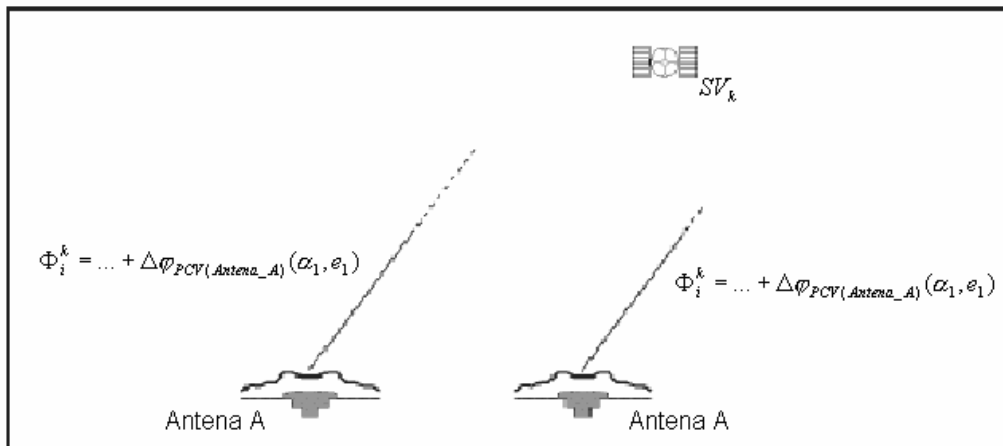
hemisfério e facilitarem a identificação dos erros de acordo com a origem dos mesmos (ex., troposféricos).

Uma forma de reduzir os efeitos que afetam a acurácia das medições da altitude é a utilização de um mesmo tipo de antena em todas as estações envolvidas, e, quando possível, o mesmo tipo de equipamento (antena, receptor,...). Erros podem ser esperados, ainda, do próprio funcionamento interno de um receptor simples, ou atrasos de propagação do sinal que ocorrem internamente nos receptores de multi-canais, ou mesmo instabilidade do oscilador.

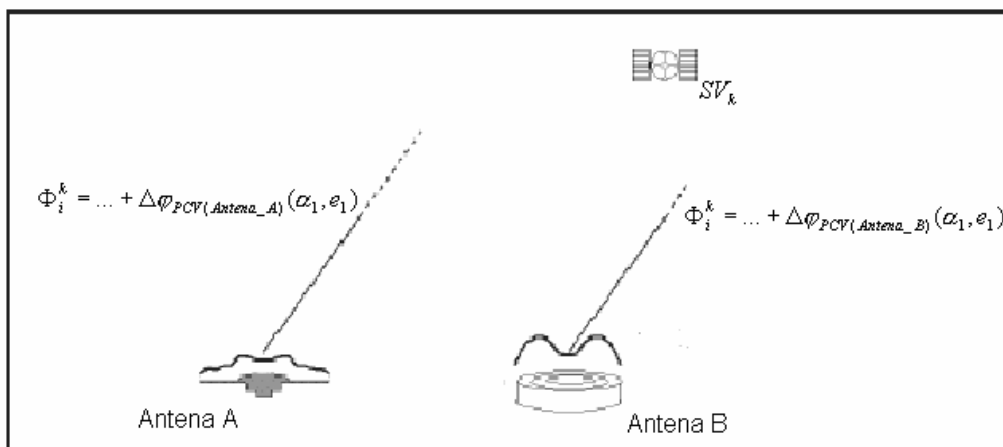
Menge (2003), num estudo sobre a calibração do centro de fase de antenas GPS para a determinação de alta precisão do posicionamento, concluiu que, em linhas de base curtas, a utilização de antenas iguais permite que os erros devido ao centro de fase da antena em ambas as estações sejam anulados (Figura 5.9a). Por outro lado, o uso de antenas diferentes (Figura 5.9b), mesmo para curtas distâncias, resulta na degradação da componente vertical do posicionamento. Nesse caso, a desconsideração do PCV e a modelagem troposférica são os responsáveis pelos maiores erros na componente vertical. De acordo com Menge (2003), em linhas de base longas, é necessário o emprego de antenas idênticas com valores de PCV absolutos. Segundo o autor, a grande diferença geográfica entre as estações resulta em diferença na orientação das antenas (Figura 5.9c).

A altura da antena também é um aspecto importante quando utiliza-se o sistema de satélites de navegação global. O software de processamento GEONAP utiliza o centro de fase da antena como o centro geométrico de uma estação. Após a estimação das coordenadas, a altura da antena é, então aplicada às coordenadas. Nos processamentos realizados nessa pesquisa foram utilizadas as informações sobre as variações do centro de fase das antenas através de arquivo de calibração das antenas.

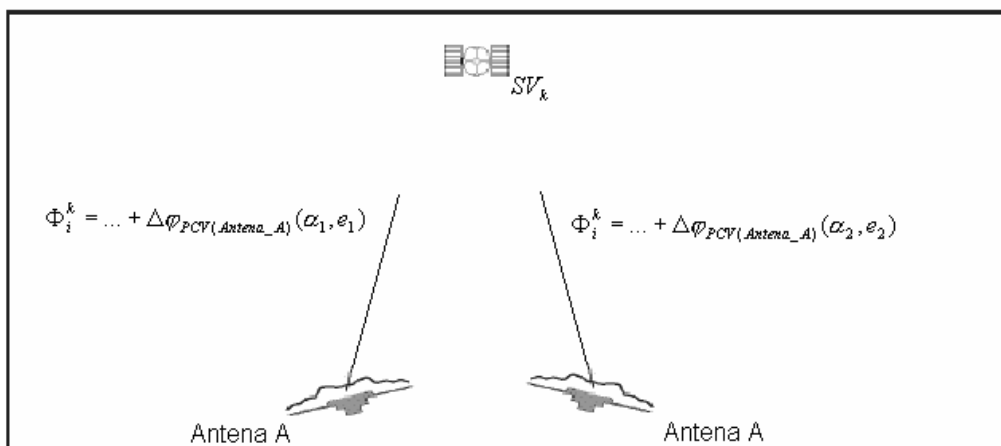
Fonte: Menge (2003)



(a) pequena distância e antenas iguais



(b) pequena distância e antenas diferentes



(c) grande distância e antenas iguais

Figura 5.9: Soluções que alteram o efeito do PCV no posicionamento.

d) Fatores que influenciam na precisão

Alguns fatores podem influenciar nos erros que interferem nos resultados obtidos por GPS. Nesse contexto discute-se a seguir alguns fatores que podem ser “manipulados” com o objetivo de obter-se resultados de melhor qualidade.

Com relação à fixação do ângulo de elevação, o problema maior está em definir os ganhos e as perdas com os ângulos fixados. No que se refere à minimização dos efeitos troposféricos, por exemplo, Rothacher (2001) sugere a inclusão, no processamento, de ângulos de elevação tão baixos quanto possível, por exemplo 5° para determinadas altitudes. O inconveniente da utilização de baixos ângulos de elevação é que os ruídos e os efeitos sistemáticos devido à troposfera, multicaminhos e variações do centro de fase da antena são muito maiores que para ângulo de elevação alto. Assim sendo, o atraso ionosférico, o atraso troposférico e os multicaminhos são fortemente afetados pelo ângulo de elevação de cada satélite. Para reduzir os efeitos desses erros, alguns receptores utilizam um ângulo de elevação limite e ignoram os dados de satélites abaixo deste ângulo. Nesse contexto, Görres (1996), analisando diferentes ângulos de elevação a partir de 1°, concluiu que a melhor correspondência entre ângulo de elevação, modelagem da refração troposférica e variação do centro de fase da antena acontece em torno de 10°. No presente trabalho foi utilizado o ângulo de elevação de 15°.

A duração da observação, por sua vez, é fundamental para a obtenção de altitudes precisas e é um fator importante na eliminação ou redução dos erros associados aos multicaminhos e à refração troposférica.

Teoricamente o período ideal para a identificação de multicaminhos é de aproximadamente 24 horas quando a configuração dos satélites se repete, entretanto, estudos apontam previsões mais otimistas neste sentido e, de acordo com Seeber (2003), períodos típicos para repetição do ciclo são entre 15 e 30 minutos, ou seja, esse tempo é suficiente para detecção e eliminação desses efeitos. O efeito da refração troposférica, por outro lado, consiste num efeito sistemático de longa duração.

Além disso, as variações climáticas que ocorrem durante o dia, influenciam na precisão dos resultados. Da campanha realizada em Harz verificam-se variações na discrepância média da altitude entre 3 e 9 mm, dependendo do período de observação considerado (Figura 5.10). A realização da campanha durante o inverno, com a ocorrência de muita neve, pode ter contribuído para que os dados não apresentem uma tendência definida de

variação com o período do dia. Assim mesmo, fica claro, que a escolha do horário de observação é importante para a obtenção de altitudes precisas.

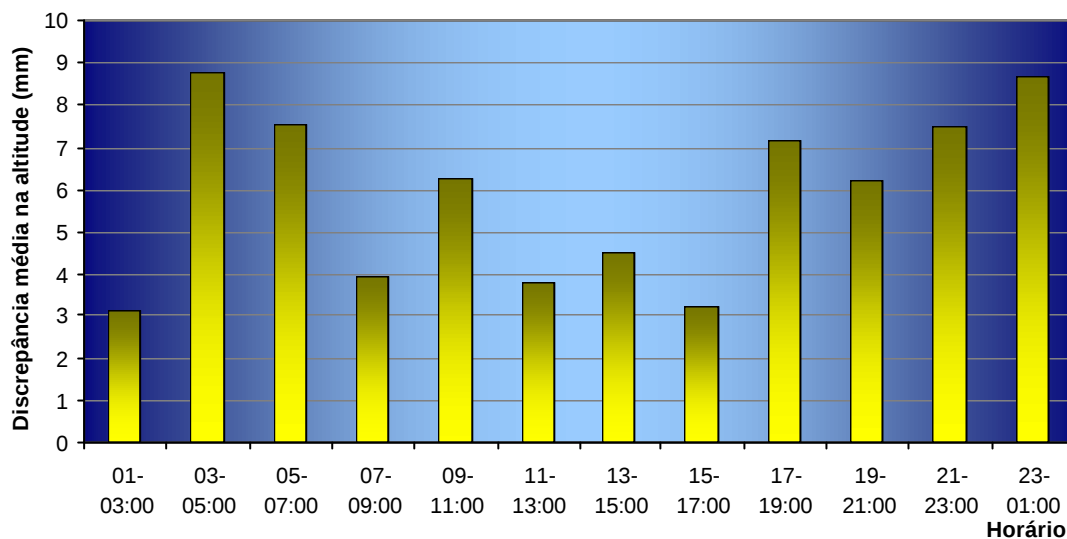


Figura 5.10: Variação da discrepância média na altitude, com relação à solução padrão, durante um período de 24 horas.

e) Resumo

As fontes de erro “mais importantes” a serem consideradas quando na determinação da altitude de um ponto com GPS são:

- as efemérides transmitidas;
- a ionosfera;
- a troposfera;
- os multicaminhos e
- o deslocamento do centro de fase da antena.

Nesse contexto, Menge (2003) resumiu os efeitos associados a essas fontes de erro como mostra a Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Contabilidade dos erros associados à determinação da altitude.

Fonte de Erro	Posicionamento	
	Absoluto	Relativo
Erros dependentes da distância		
Órbita (transmitida)	5 – 50 m	0.5 – 2 ppm
Ionosfera	0.5 – 100 m	0.1 – 50 ppm
Troposfera	0.01 – 0.4 m	0.1 – 2 ppm
Erros dependentes da estação		
Multicaminhos (receptor)	mm – cm	mm – cm
Deslocamento do centro de fase da antena	mm – cm	mm – cm
Ruído nas medições	≤ 3 mm	≤ 4 mm

Fonte: Menge (2003).

A forma como esses erros são minimizados (ou possivelmente eliminados) depende de algumas circunstâncias operacionais decisivas no posicionamento com GPS como comprimento da linha de base, duração da observação, disponibilidade de dupla frequência e quantidade de satélites rastreados.

Faz-se, portanto, para obtenção de coordenadas verticais de alta precisão as seguintes recomendações:

- Utilização de efemérides precisas e combinação linear entre as observações (ver item 5.2.4 – Determinação das ambigüidades) de mesmo tipo para redução dos erros associados às órbitas e à ionosfera, respectivamente.
- Utilização de modelos troposféricos que se mostrem adequados na região de realização do posicionamento.
- Realização de longos períodos de observação para eliminação dos efeitos dos multicaminhos.
- Utilização de antenas iguais orientadas na mesma direção (para linhas de base curtas) e valores de PCV absolutos disponíveis (para linhas de base longas), Menge (2003).

5.2.3 Posicionamento Relativo

O posicionamento relativo é um dos conceitos mais importantes associados às técnicas de levantamentos com o sistema GPS. Tanto as observações de código quanto as da fase das portadoras podem ser tratadas a partir de pelo menos duas estações que estão observando simultaneamente os mesmos satélites. Este procedimento permite a minimização, ou eliminação, dos efeitos de alguns erros sistemáticos que incidem de forma semelhante em ambas as estações. Com relação aos códigos, a técnica associada denomina-se DGPS ou GPS Diferencial, e com relação à fase da portadora, as observações são combinadas linearmente dando origem às diferenças de fase.

De forma geral, emprega-se o posicionamento relativo para determinação das coordenadas de uma estação móvel aplicando correções fornecidas pela estação de monitoramento, também chamada de estação de referência. A estação de referência corresponde a uma estação permanente pertencente ao Sistema de Controle Ativo – SCA, composto de redes ativas.

A rede de referência global mais importante é mantida pelo *International GPS Service* – IGS, que corresponde a uma organização não governamental. Essa rede de referência dispõe de mais de 300 estações operando continuamente em todo o mundo. A

Alemanha dispõe de uma rede de monitoramento contínuo, chamada *Satellite Positioning Service* – SAPOS, que é organizada pela *German State Surveying Agencies* – AdV, cujo objetivo é cobrir toda a área do país com cerca de 250 estações permanentes com espaçamento de 40 a 70 km. No presente trabalho, algumas dessas estações foram utilizadas como referência nos experimentos realizados.

No Brasil, a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo – RBMC, Figura 5.11, operando (em junho de 2004) com 24 estações, é a rede de referência ativa mais importante do país e constitui o principal elo de ligação com redes internacionais e com os sistemas de referência adotados globalmente.

Os dados apresentados nesse trabalho como subsídios para argumentação da viabilidade do emprego do GPS para monitoramento de subsistência de pequena grandeza foram coletados utilizando-se o princípio do posicionamento relativo e estações de referência pertencentes ao serviço alemão SAPOS.

As observações de fase da portadora combinadas linearmente dão origem às seguintes observações derivadas:

- simples diferença de fase: corresponde a diferenciação das observações de fase de duas estações para o mesmo satélite, neste caso os erros dos relógios dos satélites são cancelados;
- dupla diferença de fase: corresponde a diferenciação simples para dois satélites, cancelam-se assim os erros dos relógios dos satélites e dos receptores (Figura 5.12a);
- tripla diferença de fase: corresponde a dupla diferença no tempo, que além do cancelamento dos erros dos relógios dos satélites e dos receptores, possibilita a eliminação das ambigüidades (Figura 5.12b).

Das combinações apresentadas, a mais empregada é a dupla diferença de fase, que corresponde ao modelo matemático de melhor rigidez geométrica para a solução. Como na tripla diferença, não existem parâmetros associados às ambigüidades, é utilizada em determinações relativas de longas linhas de base (>100 km), quando a qualidade dos resultados das duplas diferenças não é satisfatória. A tripla diferença pode ser muito útil na remoção da perda de ciclos ou *cycle slips* (Seeber, 2003). Por outro lado, Langley (1993) afirma que a diferenciação no tempo resulta em uma observável com menos

informações contidas, e, conseqüentemente, as coordenadas determinadas a partir da tripla diferença tendem a ser menos acuradas que as obtidas por dupla diferença. Monico (2000) justifica que, apesar de proporcionar a eliminação das ambigüidades, a tripla diferença não é muito utilizada na solução final por incorporar um maior ruído na observável resultante.



Figura 5.11: Estações da RBMC, situação em 2004.

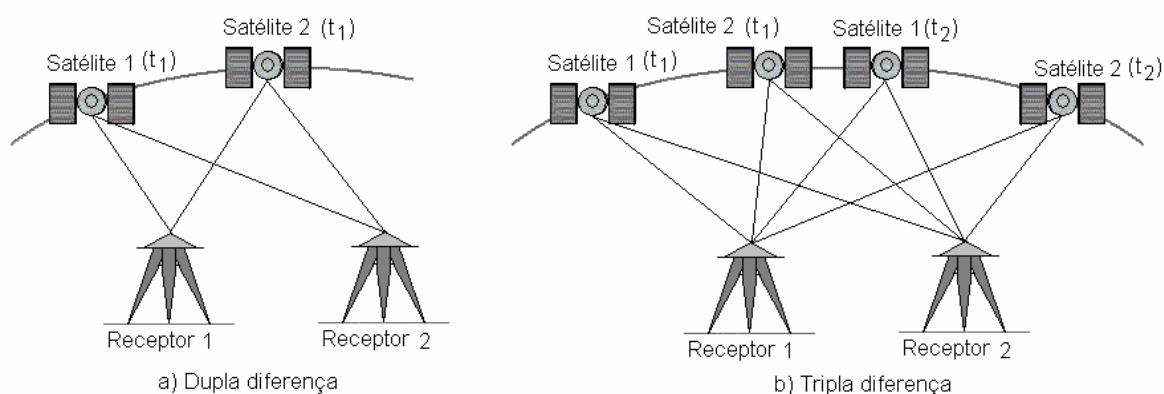


Figura 5.12: Observações derivadas.

5.2.4 Determinação das Ambigüidades

Ambigüidade é o número de ciclos inteiros (comprimentos de onda) entre o satélite e o receptor. Assim que um receptor é ligado, as medidas de fase são registradas no receptor a partir da primeira observação, instante t_0 , e um contador de ciclos inteiros é inicializado. Numa determinada época, a fase observada é igual a soma da parte fracionária medida com o número de ciclos inteiros contados durante esse rastreamento. No início do levantamento o número de ciclos inteiros é desconhecido, logo, a contagem de ciclos obtida é um valor ambíguo, daí o nome de ambigüidade para a incógnita que corresponde ao número efetivo de comprimentos de onda entre o centro de fase da antena do receptor e o centro de fase da antena de cada satélite no instante da primeira observação. O processo de estimar e validar as ambigüidades GPS é chamado de resolução ou fixação das ambigüidades e consiste na determinação de uma posição a partir da qual as ambigüidades iniciais são resolvidas, ou seja, o número inteiro de ciclos é determinado e mantido “fixo” ao longo do levantamento. Esse procedimento é chamado de *Fixed Solution*. Em Seeber (2003) encontra-se a descrição de alguns métodos de resolução das ambigüidades.

A fixação das ambigüidades melhora consideravelmente a precisão da componente vertical do posicionamento, sobretudo em curtos períodos de observação, e o procedimento consiste na realização de combinações lineares entre as fases das portadoras e dos códigos de ambas as frequências originais. O cálculo é realizado de forma iterativa até a resolução de todas as ambigüidades. A Tabela 5.5 resume algumas propriedades das combinações lineares aplicáveis com o GEONAP, outras combinações possíveis estão apresentadas em Seeber (2003).

Tabela 5.5: Algumas combinações lineares das fases portadoras

Sinal	Determinação	l (cm)	s (mm)	Denominação	Aplicação específica
L_1	L_1	19.0	3.0	Sinal L_1	-
L_2	L_2	24.4	3.9	Sinal L_2	-
L_Δ	$L_\Delta = L_1 - L_2$	86.2	19.4	Wide Lane	Longas distâncias
L_Σ	$L_\Sigma = L_1 + L_2$	10.7	2.1	Narrow Lane	Curtas distâncias
L_0	$L_0 = \frac{L_\Delta + L_\Sigma}{2}$	≈ 5.4	10	Sinal livre da ionosfera	-
L_I	$L_I = L_\Sigma - L_\Delta$	≈ 10.7	20	Sinal ionosférico	-
L_{54}	$L_{54} = 5L_1 - 4L_2$	10.1	10.3	-	-
L_{43}	$L_{43} = 4L_1 - 3L_2$	11.4	9.1	-	-
L_X^*	-	172.4	3.0	-	-

* A combinação L_X corresponde ao ajustamento automático de todas as combinações lineares das observáveis originais L_1 e L_2 .

Fonte: Seeber (2003).

O programa de modernização do GPS irá disponibilizar em breve uma terceira frequência civil, a L_5 . De acordo com Seeber (2003), a disponibilidade desses três sinais civis com diferentes capacidades permitirá a realização de correções ionosféricas em tempo real e facilitarão a resolução de ambigüidades nas medições da fase portadora.

Os processamentos, do tipo *Fixed Solution*, realizados nessa pesquisa utilizam a combinação L_0 para definição das coordenadas finais.

Um outro procedimento muito utilizado no processamento das observações GPS é a solução flutuante, mais conhecida como *Float Solution*, onde os valores das ambigüidades convergem para números decimais, nesse caso as ambigüidades não são verdadeiramente resolvidas.

Com um maior período de observação os procedimentos flutuante e fixado para “resolução” das ambigüidades tendem a resultados de coordenadas muito próximos. No que se refere à determinação da altitude, a Figura 5.13 mostra valores de discrepância médios entre essas duas soluções para diferentes períodos de observação (2, 4, 6, 8, 10, 12 e 24 horas) das observações GPS obtidas na campanha em Harz.

Como pode ser observado, a diferença média entre as altitudes determinadas com fixação da ambigüidade e sem fixação da ambigüidade para um período de 24 horas foi de cerca de 1 mm. O método *Fixed Solution*, por consistir-se em um procedimento iterativo que “exige” a solução total das ambigüidades, resulta em um processamento

mais demorado que o *Float Solution*. Apesar disso, visando à determinação precisa de altitude, recomenda-se o uso de *Fixed Solution* no processamento de observações inferiores a 24 horas.

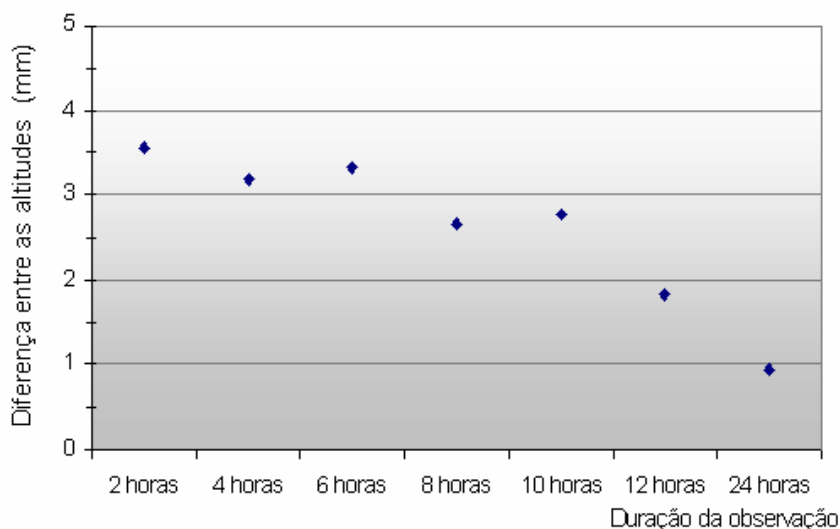


Figura 5.13: Diferença entre as altitudes com ambigüidades fixas e sem ambigüidades fixadas em diferentes períodos de observação.

5.3 Análise de Deformação

Existem diferentes técnicas que podem ser empregadas no monitoramento de deformações. Os métodos geodésicos são utilizados no controle da magnitude e variação temporal das deformações horizontais e verticais de estruturas da parte mais superficial da crosta da Terra e valem-se de redes de monitoramento para sua realização. Uma rede geodésica utilizada no monitoramento da subsidência compreende um conjunto de estações, em que são realizadas observações em épocas distintas, com o objetivo de detectar possíveis deslocamentos ocorridos. Assim, para detecção de pequenas variações de altitude, como as experimentadas na maioria dos casos de subsidência, é necessário realizar uma comparação entre as coordenadas altitude dos pontos objeto obtidas em duas, ou mais, épocas distintas através de uma análise de deformação.

5.3.1 Ajustamento

Considerando-se as observações coletadas em k épocas, realiza-se o ajustamento através do modelo funcional:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{l}_1 \\ \mathbf{l}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{l}_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{v}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{v}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & & & 0 \\ & \mathbf{A}_{22} & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & \mathbf{A}_{kk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_1 \\ \hat{\mathbf{x}}_2 \\ \vdots \\ \hat{\mathbf{x}}_k \end{bmatrix}, \quad (5.7)$$

e do modelo estocástico:

$$\Sigma_{ii} = \sigma_0^2 \mathbf{Q}_{ii} = \sigma_0^2 \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{11} & & & 0 \\ & \mathbf{Q}_{22} & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & \mathbf{Q}_{kk} \end{bmatrix}, \quad (5.8)$$

onde:

$\mathbf{l}_i$ é o vetor $(n \times 1)$ das observações,

$\mathbf{v}_i$ é o vetor $(n \times 1)$ dos resíduos,

$\mathbf{A}_{ij}$ é a matriz *Design* ou Jacobiana $(n \times u)$, que corresponde às funções de base ou matriz de deformação e cujos elementos são funções da posição dos pontos de observação e do tempo,

$\hat{\mathbf{x}}_i$ é o vetor $(u \times 1)$ das coordenadas dos pontos,

Σ_{ii} é a matriz Variância-Covariância $(n \times u)$ das observações para todas as épocas,

σ_0^2 é o fator de variância arbitrado *a priori*,

$\mathbf{Q}_{ii}$ é a matriz dos co-fatores dos pesos das observações $(n \times u)$,

i é o índice que denota cada uma das épocas em que foram coletadas as observações.

De forma linearizada as Equações (5.7) e (5.8) podem ser re-escritas, respectivamente, como:

$$\mathbf{l}_i + \mathbf{v}_i = \mathbf{A}_{ij} \hat{\mathbf{x}}_i, \quad (5.9)$$

$$\Sigma_{ii} = \sigma_0^2 \mathbf{Q}_{ii}. \quad (5.10)$$

Como resultado do ajustamento obtém-se o vetor das coordenadas dos pontos (5.11) e a matriz dos co-fatores (5.12):

$$\hat{\mathbf{x}}_i = \mathbf{Q}_{xi} \mathbf{A}_i^T \mathbf{P}_i \mathbf{l}_i, \quad (5.11)$$

$$\mathbf{Q}_{xi} = (\mathbf{A}_i^T \mathbf{P}_i \mathbf{A}_i)^+, \quad (5.12)$$

sendo:

$$\mathbf{P}_i = \mathbf{Q}_{ii}^{-1},$$

⁺ corresponde ao emprego da pseudo-inversa.

Ao final do ajustamento obtém-se o fator de variância *a posteriori*, que corresponde à estimativa da confiança nos valores obtidos, que é calculada como:

$$\hat{s}_{0i}^2 = \frac{\mathbf{v}_i^T \mathbf{P}_i \mathbf{v}_i}{q_i} = \frac{\Omega_i}{q_i}, \quad (5.13)$$

sendo:

q_i o número de graus de liberdade, ou seja, corresponde a quantidade de observações excedentes,

$\mathbf{P}_i$ a matriz dos pesos ($n \times u$),

Ω_i o somatório do quadrado dos resíduos.

Com a realização do ajustamento supõe-se que os erros grosseiros e sistemáticos foram eliminados, assim qualquer diferença entre coordenadas estimadas em épocas diferentes estaria associado a um deslocamento do ponto observado. Com o objetivo de validar essa suposição, deve-se aplicar um teste de hipóteses. Nesse contexto as hipóteses a serem testadas são:

$$H_0 : s_o^2 = \hat{s}_0^2, \quad (5.14)$$

$$H_a : s_o^2 \neq \hat{s}_0^2. \quad (5.15)$$

Para validar a hipótese básica apresentada em (5.14) define-se o fator de variância *a posteriori* para k épocas como:

$$\hat{s}_0^2 = \frac{\sum_{i=1}^k \mathbf{v}_i^T \mathbf{P}_i \mathbf{v}_i}{\sum_{i=1}^k q_i} = \frac{\sum_{i=1}^k \Omega_i}{\sum_{i=1}^k q_i}. \quad (5.16)$$

5.3.2 Teste da hipótese linear

De acordo com Niemeier (1985), cada hipótese linear pode e deve ser apresentada na forma:

$$H_0 : \mathbf{Ax} = \mathbf{l}. \quad (5.17)$$

Como averiguação investiga-se se esta hipótese H_0 é adequada ao modelo de ajustamento ou não. Assim sendo, para cada problema específico da prática geodésica deve-se definir um teste de hipótese na forma de uma hipótese linear como apresentado em (5.9).

No que se refere à análise de deformações, considerando-se a distribuição do somatório do quadrado dos resíduos (5.13), e partindo-se da declaração fundamental do ajustamento (5.9), para uma única época, pode-se definir uma hipótese inicial, para a correspondência funcional entre as observações e os parâmetros utilizando-se a matriz *Design*, como sendo:

$$E\{\mathbf{l}\} = \mathbf{Ax}. \quad (5.18)$$

Substituindo-se (5.11) em (5.9), obtém-se a seguinte expressão para o somatório do quadrado dos resíduos:

$$\Omega = \mathbf{v}^T \mathbf{v} = (\mathbf{I} - \mathbf{Ax})^T (\mathbf{I} - \mathbf{Ax}). \quad (5.19)$$

De acordo com Niemeier (1985), sendo a Equação (5.19) válida para qualquer inversa da matriz normal $\mathbf{N} = \mathbf{A}^T \mathbf{A}$, Ω é portanto independente do vetor solução $\hat{\mathbf{x}}$ e tem uma distribuição normal quadrática, podendo ser expressa como:

$$\frac{\Omega}{s_0^2} = \frac{\mathbf{v}^T \mathbf{v}}{s_0^2} \approx c_q^2, \quad (5.20)$$

onde: c_q^2 representa a distribuição c^2 .

O quociente $\frac{\Omega}{s_0^2}$ segue uma distribuição c^2 central se o parâmetro de não centralização l^* é igual a zero, isso apenas é válido se o modelo funcional (5.20) estiver correto. O parâmetro de não centralização pode ser determinado através da expressão:

$$l^* = \frac{1}{2s_0^2} \mathbf{x}^T \mathbf{A}^T \mathbf{A} \mathbf{x} - \frac{1}{2s_0^2} \mathbf{x}^T \mathbf{A}^T \mathbf{A} \mathbf{N}^+ \mathbf{A}^T \mathbf{A} \mathbf{x}. \quad (5.21)$$

A hipótese linear H_0 para (5.17) pode ser entendida como um sistema composto pelas Equações (5.18), (5.17) e (5.8). A consideração de uma hipótese alternativa H_a altera, entretanto, o vetor de parâmetros original e, conseqüentemente, a soma do quadrado dos resíduos:

$$\Omega_H = (\mathbf{I} - \mathbf{A} \hat{\mathbf{x}}_H)^T \mathbf{P} (\mathbf{I} - \mathbf{A} \hat{\mathbf{x}}_H). \quad (5.22)$$

A sobretaxa da soma do quadrado dos resíduos pode ser, então, definida como:

$$R = \Omega_H - \Omega. \quad (5.23)$$

O teste para a hipótese nula H_0 é definido pelo quociente:

$$F = \frac{\frac{R}{h^*}}{\frac{\Omega}{f^*}} = \frac{R}{\hat{s}_0^2 \cdot h^*}, \quad (5.24)$$

onde: h^* e f^* correspondem aos graus de liberdade associados a R e Ω , respectivamente.

O quociente apresentado em (5.24) segue por definição uma distribuição F não central.

Assim sendo, para validade de H_0 segue a distribuição F central tal que a probabilidade do teste da hipótese linear é dada por:

$$P\{F > F_{h^*, f^*, 1-a} / H_0\} = a, \quad (5.25)$$

onde:

a indica a probabilidade de erro, ou seja, a probabilidade de rejeitar a hipótese básica sendo ela verdadeira.

A rejeição da hipótese básica, segundo o critério, por outro lado, significa que o ajustamento apresenta problema e que a origem desse problema deve ser investigada e pode estar associada a várias causas. Gemael (1994) cita como possíveis causas a

utilização de um modelo matemático inadequado, problemas com a linearização, erros de cálculo, entre outros.

5.3.3 Testes estatísticos para análise de deformação

Considerando-se a análise de deformação a ser realizada entre duas épocas distintas, é necessário a realização de um teste global de congruência com o objetivo de investigar se a variação nas coordenadas do ponto, entre as épocas distintas, é significativa; e um teste de localização geométrica para investigação de qual ponto ou quais pontos numa época específica sofreram deslocamento significativo.

De forma geral, a condição estatística para considerar as observações de k épocas como congruentes é que as coordenadas dos pontos sejam iguais em todas as épocas, ou seja, é válida a seguinte hipótese nula:

$$H_0 : E\{\hat{\mathbf{x}}_1\} = E\{\hat{\mathbf{x}}_2\} = \dots = E\{\hat{\mathbf{x}}_k\}. \quad (5.26)$$

A hipótese nula como descrita em (5.26) sugere a definição de um vetor deslocamento, entre duas épocas, dado por:

$$\mathbf{d} = \hat{\mathbf{x}}_2 - \hat{\mathbf{x}}_1, \quad (5.27)$$

cujas matrizes dos co-fatores pode ser expressa como:

$$\mathbf{Q}_d = \mathbf{Q}_{ll_1} + \mathbf{Q}_{ll_2}, \quad (5.28)$$

e a sobretaxa da soma do quadrado dos resíduos é dada por:

$$R = \mathbf{d}^T \mathbf{Q}_d^+ \mathbf{d}. \quad (5.29)$$

O tratamento estatístico aplicado à hipótese nula (5.26) baseia-se na distribuição F de Snedecor que pode ser expressa, de forma análoga a (5.24), para redes que apresentam a mesma configuração, como:

$$F_0 = \frac{\mathbf{d}^T \mathbf{Q}_d^+ \mathbf{d}}{\hat{s}_0^2 \cdot h^*} = \frac{R}{\hat{s}_0^2 \cdot h^*}. \quad (5.30)$$

Na prática, contudo, a rede de monitoramento utilizada pode sofrer alterações de uma época em relação à anterior, através da eliminação, acréscimo ou deslocamento de um

ou mais pontos. Nesses casos pode-se realizar a comparação apenas entre os pontos idênticos medidos nas épocas de estudo e devem ser escolhidos como *datums* apenas os pontos idênticos. Nesse contexto, o vetor diferença e a matriz dos co-fatores podem ser calculados de forma análoga a (5.27) e (5.28):

$$\mathbf{d}_D = \hat{\mathbf{x}}_{D1} - \hat{\mathbf{x}}_{D2}, \quad (5.31)$$

$$(\mathbf{Q}_d)_D = (\mathbf{Q}_{DD})_1 + (\mathbf{Q}_{DD})_2. \quad (5.32)$$

Para a sobretaxa R vale a expressão:

$$R_D = \mathbf{d}_D^T (\mathbf{Q}_d)_D^+ \mathbf{d}_D. \quad (5.33)$$

Com base no exposto acima, pode-se definir a probabilidade do teste estatístico apropriado à aceitação da hipótese nula apresentada em (5.26) como sendo:

$$P\{F_0 > F_{h^*, f^*, 1-a} \mid H_0\} = a. \quad (5.34)$$

Ou seja, o critério apresentado em (5.34) pode ser resumido como:

$F_0 < F_{h^*, f^*, 1-a}$: a hipótese nula H_0 é aceita e não há deformação,

$F_0 = F_{h^*, f^*, 1-a}$: a hipótese nula H_0 é rejeitada.

Os resultados de um teste de congruência global são baseados numa segura declaração estatística sobre a existência de movimentos significantes em qualquer ponto da rede observada, com um nível de significância de $(1 - a)$. Para identificação dos pontos que sofreram deslocamento, bem como a magnitude dos mesmos, realiza-se um teste de localização.

5.3.4 Localização da deformação

Pelzer (1974, apud Niemeier, 1985) desenvolveu o Método das Componentes Residuais Máximas (*Methode der maximalen Klaffungsanteile*). Esse método baseia-se nas informações sobre a divergência de congruência entre duas épocas, ou seja, quando o teste global (5.30) indica significantes deformações entre as épocas, considera-se como ponto ou pontos de deslocamento aqueles que apresentam valores grandes de desnível.

A análise de deformação deve inicialmente verificar se os pontos de apoio permaneceram estáveis, sendo que os movimentos dos pontos objeto são analisados em um segundo nível de trabalho. Apenas depois que prova-se a estabilidade dos pontos de apoio é que estes podem ser ligados aos pontos objetos para verificar a ocorrência de movimento desses últimos. Segundo Welsch et al. (2000), pode-se entender como um ponto estável aquele cuja posição resultante das coordenadas obtidas com repetidas medições corresponde àquela atribuída na medição inicial.

Duas estratégias de investigação podem ser empregadas para localização do ponto que sofreu deslocamento:

- Estratégia de retorno, que consiste na retirada, da rede total, dos pontos que experimentaram variação de posição, realizando-se, então, o teste global apenas com os pontos de apoio, ou seja, com os pontos considerados estáveis. Assim, à medida que os testes apontam a ocorrência de pontos deslocados, esses são localizados e retirados. O procedimento termina quando nenhuma grande discrepância é detectada.
- Estratégia de avanço, onde se acrescenta um ponto objeto ao grupo dos pontos considerados estáveis. Para cada procedimento, o ponto objeto é examinado como um ponto estável e o valor da sobretaxa R é aplicado ao teste de congruência conforme apresentado em (5.30). O procedimento é encerrado quando aparecem deformações significantes.

A estratégia de retorno é vantajosa quando os pontos objeto sofrem deslocamento pouco significativo (Niemeier, 1985). Segundo Welsch et al. (2000), não pode-se afirmar qual estratégia deve ser utilizada num determinado caso, mas aponta como possível o emprego das duas técnicas.

Ao descrever o método desenvolvido por Pelzer (1974), Niemeier (1985) afirma que pode-se sub-dividir o vetor diferença e a inversa da matriz dos co-fatores conforme a estabilidade dos pontos e propõe o seguinte conjunto de expressões:

$$\mathbf{d} = \begin{bmatrix} \mathbf{d}_F \\ \mathbf{d}_B \end{bmatrix}, \quad (5.35)$$

$$\mathbf{Q}_d^+ = \mathbf{P}_d = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{FF} & \mathbf{P}_{FB} \\ \mathbf{P}_{BF} & \mathbf{P}_{BB} \end{bmatrix}. \quad (5.36)$$

onde: os índices F, B correspondem aos pontos considerados estáveis e não estáveis, respectivamente.

Da combinação das expressões (5.35) e (5.36), pode-se obter a equação para determinação das duas parcelas, independentes estocasticamente, associadas aos pontos considerados estáveis e considerados não estáveis:

$$R_i = \mathbf{d}^T \mathbf{P}_d \mathbf{d} = \mathbf{d}_F^T \mathbf{P}_F \mathbf{d}_F + \mathbf{d}_B^T \mathbf{P}_B \mathbf{d}_B. \quad (5.37)$$

Em um processo repetitivo, cada uma das coordenadas de cada um dos pontos diferentes são armazenados em um sub-vetor $\mathbf{d}_B$ e realiza-se uma separação de R conforme apresentado em (5.37). Para cada um dos p pontos, recebe-se neste primeiro passo de localização um total de q desníveis, ou seja:

$$R_i = (\mathbf{d}_B^T \mathbf{P}_B \mathbf{d}_B)_i \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, q. \quad (5.38)$$

Quando o teste de congruência global (5.34) aponta um deslocamento significativo, este é então atribuído ao(s) ponto(s) de máximo desnível (Niemeier, 1985):

$$R_{\max} = \max(R_i, \text{para } i = 1, 2, \dots, q), \quad (5.39)$$

onde:

p é o número de pontos.

CAPÍTULO 6

USO DO GPS NO MONITORAMENTO DA SUBSIDÊNCIA DO SOLO

6.1 Descrição dos Experimentos

Neste capítulo descrevem-se os dois experimentos realizados, nessa pesquisa, para obtenção de dados GPS. O objetivo geral desses experimentos é discutir a aplicabilidade do equipamento e do método GPS para detecção, e monitoramento, de pequenos deslocamentos verticais na superfície do solo.

Os objetivos específicos identificados para atingir o objetivo geral são:

- detecção de pequenas variações controladas de altitude, utilizando-se estações permanentes de referência;
- determinação de uma estratégia apropriada para controle da altitude, analisando os aspectos relacionados com o comprimento de linhas de base, a duração das observações, o número de estações, entre outros; e
- proposta e simulação da rede de monitoramento a ser implantada na área de teste, em Recife.

O emprego do GPS como instrumento de monitoramento da subsidência é possível à medida que o mesmo seja capaz de detectar pequenos deslocamentos no nível do solo. Visando atingir os objetivos específicos descritos anteriormente foram realizados dois experimentos.

6.1.1 Experimento 1

O objetivo desse experimento é determinar uma estratégia apropriada para controle da altitude, analisando os aspectos relacionados com o comprimento de linhas de base, a duração das observações, o número de estações, entre outros. Para isso foi realizada, em Harz - região montanhosa da Alemanha, próxima à cidade de Hannover (Figura 6.1) – uma campanha de levantamento com GPS.

Na campanha realizada em Harz, utilizou-se como estação de referência a estação 0651 pertencente à rede de monitoramento contínuo da Alemanha. O modo de levantamento foi estático e a coleta de dados contínua, sendo que o tempo mínimo observado, por sessão, foi de 40 horas. Para realização desse experimento foi utilizada uma rede com 17 estações móveis e 1 estação fixa. A Tabela 6.1 apresenta o distanciamento das estações móveis com relação à estação de referência. As estações móveis mais extremas, 0120 e 2146, estão afastadas de cerca de 40 km.

Tabela 6.1: Distância aproximada das estações móveis em relação à estação fixa.

Estação móvel	Distância (km)	Estação móvel	Distância (km)	Estação móvel	Distância (km)
0124	16	0120	25	0130	14
0121	23	2140	20	0013	18
0012	13	0128	13	0009	12
0132	17	2143	< 1	0001	12
0004	11	0106	20	0107	17
2139	19	2146	22		

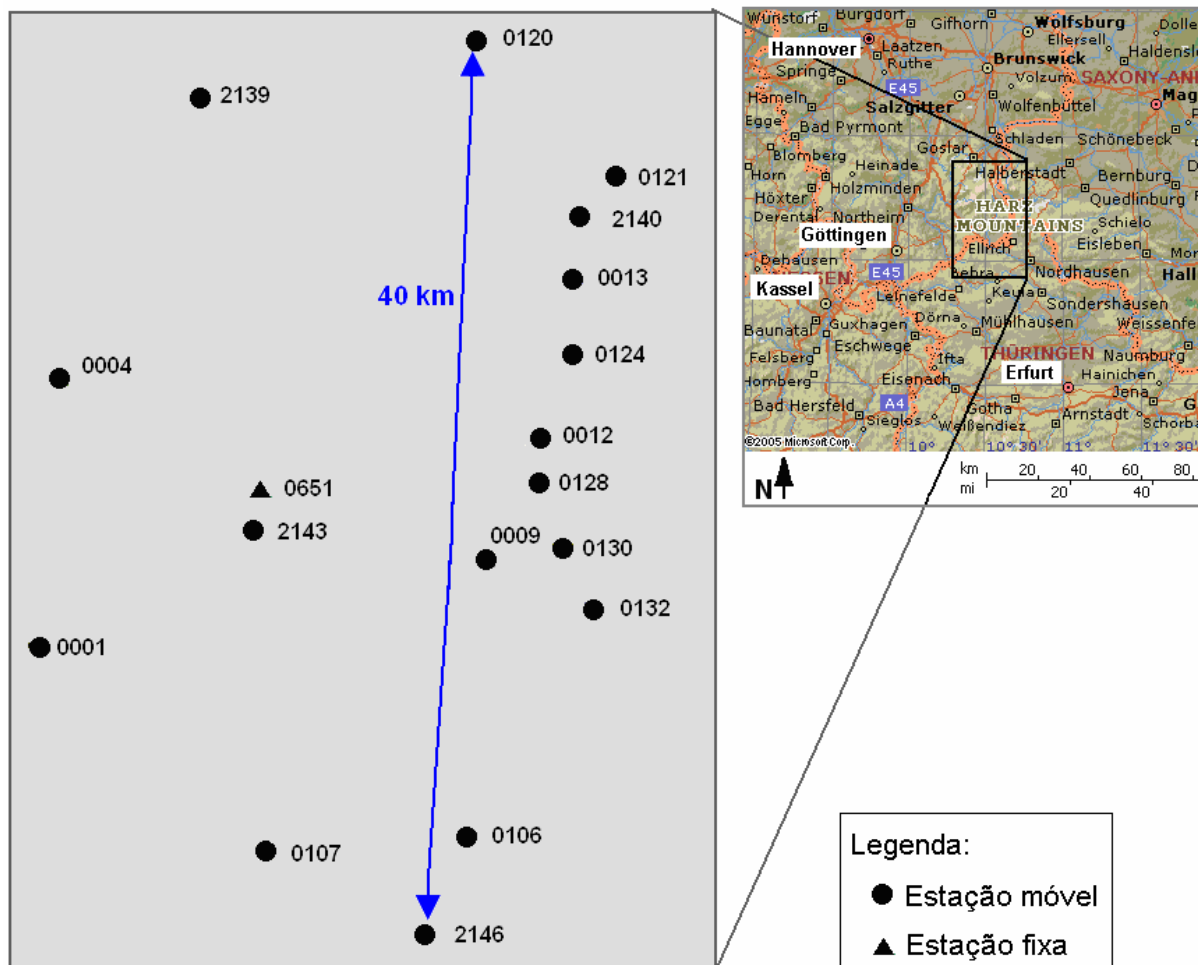


Figura 6.1: Mapa de localização da região montanhosa de Harz destacando a posição de todas as estações, móveis e fixa.

Os 11 (onze) receptores utilizados nessa campanha foram TRIMBLE – modelo 4700 e as antenas conectadas nos equipamentos foram TRM33429.20+GP TCWD na estação de referência, Figura 6.2, e TRM33429.20+GP nas 10 estações móveis, Figura 6.3 . Foram coletados dados dos dias 20, 21, 22 e 23 de outubro de 2003, que correspondem, respectivamente aos dias do ano 293, 294, 295 e 296.



Figura 6.2: Foto da antena TRIMBLE modelo TRM33429.20+GP TCWD e da estação da rede SAPOS 0651 localizada em Harz (<http://www.lgn.de/produkte/sapos/sender/station/cl.htm> - acessada em 18 de agosto de 2004).



Figura 6.3: Foto da antena TRIMBLE modelo TRM33429.20+GP.

O conjunto de observações feitas simultaneamente no curso de um projeto GPS é chamado de sessão. A rede geodésica GPS compreende um conjunto de estações ocupadas em diferentes sessões, tal que exista pelo menos uma estação em comum entre elas. O trabalho de campo realizado no âmbito do experimento 1 foi realizado em duas sessões de 48 horas de observação cada uma. Na primeira sessão, de 20 a 22 de outubro, os onze equipamentos ocuparam as estações: 0009, 0012, 0013, 0120, 0121, 0124, 0128, 0130, 0132, 2140; na segunda sessão, os onze equipamentos ocuparam as estações: 0001, 0004, 0106, 0107, 0120, 0124, 0130, 2139, 2143, 2146, de 22 a 24 de outubro, como mostra as Figuras 6.4 e 6.5.

Período (Ano: 2003)	0009	0012	0013	2140	0121	0132	0128	0120	0124	0130	0001	0004	0106	0107	2139	2143	2146
20.outubro (08h00) – 22.outubro (07h59)																	
22.outubro (08h00) – 24.outubro (07h59)																	

Figura 6.4: Cronograma de estações observadas de 20 a 24 de outubro de 2003.

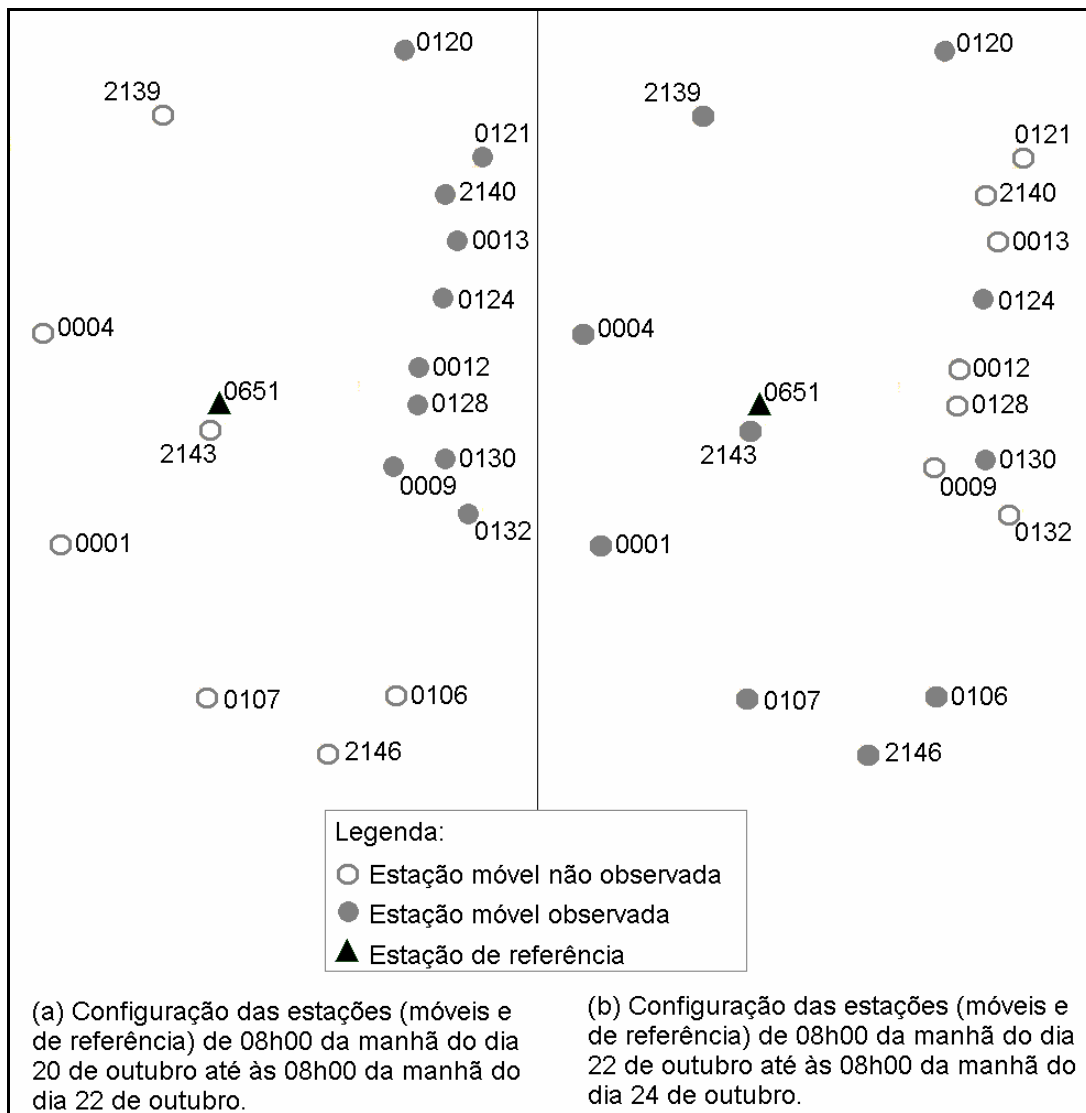


Figura 6.5: Distribuição espacial das estações utilizadas no experimento 1.

Foram utilizadas as informações sobre as variações do centro de fase das antenas através de arquivos de calibração das antenas na ocasião do processamento das observações.

6.1.2 Experimento 2

O objetivo desse experimento é determinar uma estratégia apropriada para detecção de pequenas variações de altitude, analisando os aspectos relacionados com o comprimento de linhas de base, a duração das observações, o número de estações de referência, entre outros. Para isso foi realizado, no teto de medições da Universidade de Hannover, um experimento com duas antenas GPS, que chamaremos aqui de msd1 e msd2, sendo que uma delas foi submetida à variações de altitudes conhecidas.

Nesse experimento, utilizaram-se sete estações de referência pertencentes à rede de monitoramento contínuo da Alemanha. O modo de levantamento foi estático e a coleta de dados, contínua. Foram utilizadas duas antenas sobre o teto de medições, msd1 e msd2. A

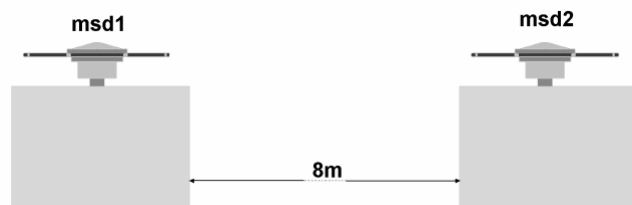
antena msd1 permaneceu na mesma posição durante todo o período de coleta de dados com o objetivo de verificar qualquer irregularidade que pudesse ocorrer com a coleta dos dados da antena msd2, uma vez que elas estavam muito próximas, cerca de 8 m de distância. A outra antena, msd2, experimentou 5 posições diferentes visando simular o rebaixamento do solo, sendo que o tempo mínimo observado, para uma dada posição, foi de 48 horas. Devido a localização das antenas, em cima do prédio, com pouco ou nenhum obstáculo para recebimento do sinal do satélite, obteve-se uma grande quantidade de sinais. Os receptores utilizados no teto de medições foram ASHTECH – modelo Z-XII (que possui duas frequências), Figura 6.6, e as antenas conectadas nos equipamentos foram XII. As antenas permaneceram montadas sobre dois pilares considerados estáveis, Figura 6.7, separados por uma distância de aproximadamente 8 m. A Tabela 6.2 apresenta o distanciamento aproximado entre as estações de referência observadas e o ponto objeto msd2. As estações de referência mais extremas, 0652 e 0666, estão afastadas cerca de 83 km.



Figura 6.6: Fotos do receptor ASHTECH modelo Z-XII.



(a) Foto do teto de medições do Institut für Erdmessung da Universidade de Hannover.



(b) Esquema de disposição das antenas sobre o teto de medições.

Figura 6.7: Disposição das antenas utilizadas no experimento 2.

O cronograma de coleta das observações, realizada entre 10 e 21 de setembro de 2004, bem como a posição experimentada pela antena msd2 nos referidos dias está apresentado na Figura 6.8 e a distribuição espacial das estações na Figura 6.9.

Data	10.09	11.09	12.09	13.09	14.09	15.09	16.09	17.09	18.09	19.09	20.09	21.09
Posição 1	08:45 ■		08:45 ■									
Posição 2				14:00 ■		14:00 ■						
Posição 3						14:25 ■		14:25 ■				
Posição 4								14:35 ■		14:35 ■		
Posição 5										15:10 ■		15:10 ■

Figura 6.8: Cronograma das observações realizadas entre 10 e 21 de setembro de 2004.

Nordsee

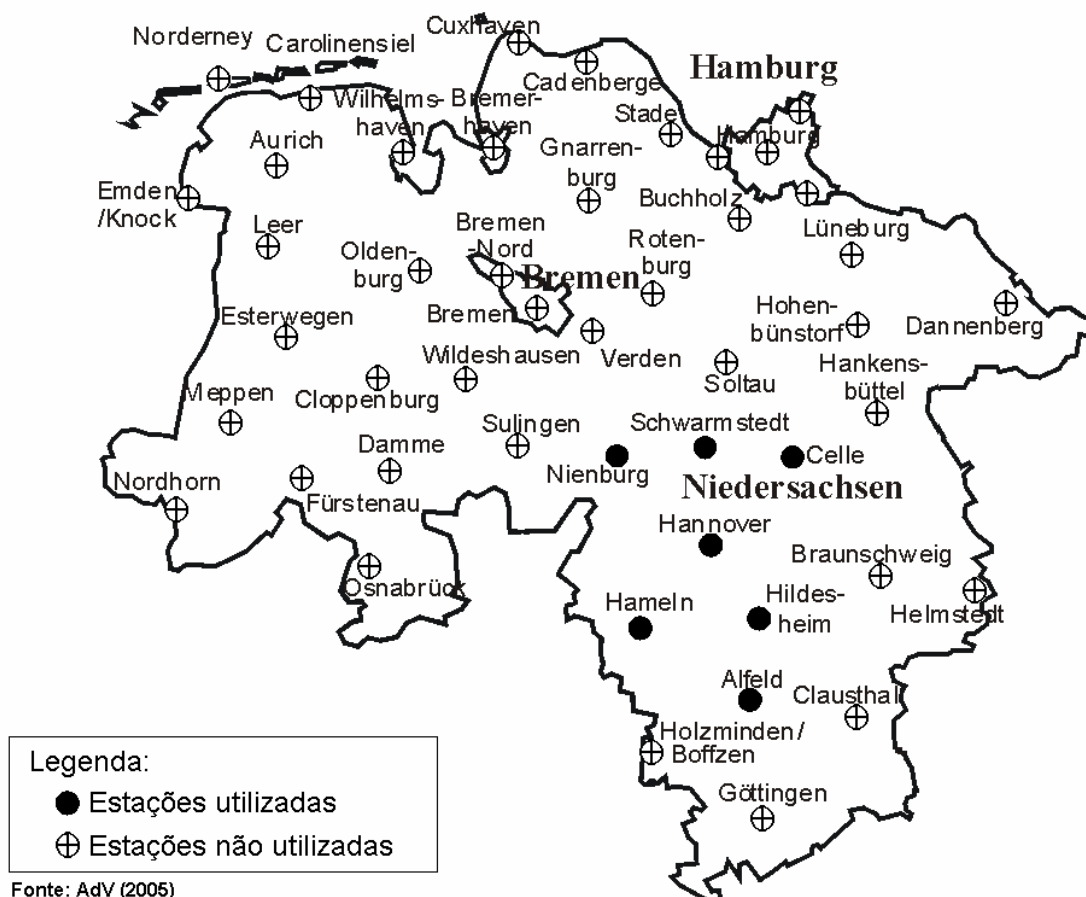


Figura 6.9: Estações de referência localizadas no Estado da Niedersachsen (Alemanha).

Tabela 6.2: Distância aproximada das estações de referência em relação à estação msd2.

Estação	Localização	Distância
0640	Hannover	6 km
0652	Alfed	44 km
0657	Hameln	39 km
0663	Hildesheim	29 km
0665	Schwarmstedt	33 km
0666	Nienburg	44 km
0676	Celle	36 km

Para simulação do movimento, para baixo, experimentado por uma antena na ocasião de ocorrência de subsidência, foram realizadas observações com a antena msd2 em cinco posições diferentes, que simulam, nesse experimento, a realização de medições em cinco épocas distintas. Para isso foram utilizados anéis de metal de tamanhos conhecidos, tal que o somatório dos anéis conferiu à antena uma altura de 11.8cm. Após a coleta de dados da primeira sessão, com todos os anéis compondo a base da antena, retirou-se o primeiro anel com 8.3cm de altura e iniciou-se, então, a segunda sessão. Ao final do período observado retirou-se o anel com 1cm de altura e iniciou-se a terceira sessão. O procedimento foi repetido mais duas vezes retirando-se os anéis de 0.5cm e 2cm, e realizando-se respectivamente a quarta e a quinta sessão. A diferença de altitude entre as posições experimentadas pela antena msd2 está apresentada na Figura 6.10.

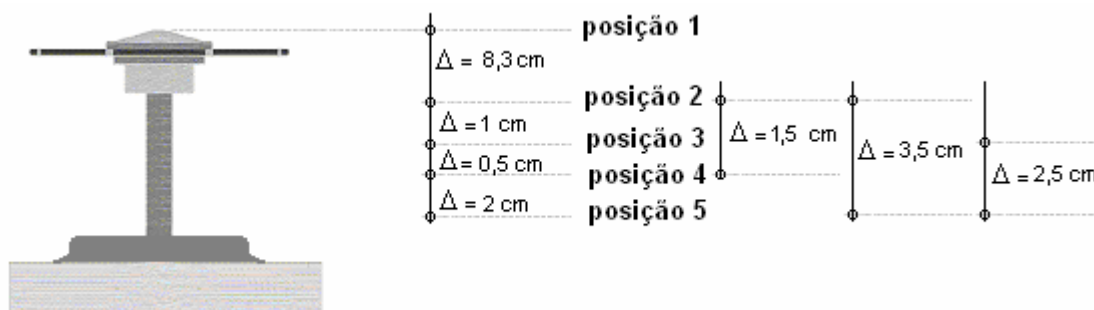


Figura 6.10: Variação da altitude da antena msd2 para simulação da subsidência.

6.2 Processamento das Observações

6.2.1 Software GEONAP

Para o processamento dos dados GPS foi utilizado o software científico GEONAP (*GEOdätische NAVSTAR Positionierung*), que foi desenvolvido inicialmente no *Institut für Erdmessung* da Universidade de Hannover (Wübbena, 1989, apud Menge et al., 1998).

Além de possibilitar o ajustamento de várias estações GPS numa mesma sessão, o GEONAP permite a utilização de diferentes métodos de medições (estático, cinemático, *stop-and-go* e pseudo-cinemático) e de diferentes equipamentos.

Todos os parâmetros são ajustados em um modelo funcional e estocástico (Capítulo 5 – item 5.3.1) das observações das pseudo-distâncias das fases das portadoras e, para resolução das ambigüidades, as estratégias oferecidas pelo GEONAP são (Romão, 1995):

- combinação de código e fase da portadora;
- método geométrico;
- tratamento do efeito ionosférico pela determinação da maior parte do atraso ionosférico com o emprego da combinação linear L_0 (Capítulo 5 –Tabela 5.5) e resolução do erro restante através da aplicação de um modelo ionosférico;
- algoritmo de busca da ambigüidade, onde podem ser utilizadas diferentes combinações lineares das fases das portadoras L_1 e L_2 (Capítulo 5 –Tabela 5.5), num processo iterativo até que todas as ambigüidades estejam resolvidas. De acordo com Goldan (1996) a combinação linear do tipo *Wide Lane* ($L_\Delta = L_1 - L_2$), de comprimento de onda igual a 86.2 cm e erro estimado em cerca de 2 cm, é indicada na resolução das ambigüidades para longas distâncias entre os receptores. O atraso ionosférico de primeira ordem, entretanto, não é eliminado com essa combinação.

O programa computacional GEONAP compreende um conjunto de sub-programas que processam as fases das portadoras dos sinais GPS a partir dos dados brutos vindos dos receptores em formato padrão RINEX. O formato RINEX (*Receiver INdependent EXchange Format*) é um formato universal utilizado para entrada de dados na maioria dos programas computacionais de processamento de dados obtidos com receptores GPS.

As informações recebidas, de todas as estações, referentes às efemérides dos satélites são testadas, classificadas e resumidas para cada sessão com o subprograma do GEONAP chamado RIMSRT. Com o RIMSRT é possível o tratamento dos dados dos satélites e o controle dos erros no almanaque e nos dados de navegação.

O subprograma GNSNGL é responsável por determinar, numa mesma sessão, uma solução inicial para cada estação que é utilizada provisoriamente no cálculo das coordenadas da estação, tanto para observações estáticas quanto para a determinação da trajetória de observações cinemáticas e para correção de diferentes fontes de erro (por exemplo, erros dos relógios dos satélites, parâmetros troposféricos, entre outros).

O principal programa computacional GEONAP realiza o cálculo das ambigüidades dos sinais das portadoras ou das combinações desses. Ao final do processamento de cada sessão obtém-se as coordenadas ajustadas do ponto sobre a superfície topográfica bem como a matriz Variância-Covariância referente ao ajustamento realizado. Alguns subprogramas auxiliares

também são utilizados ao longo do ajustamento com o GEONAP, eles são empregados na detecção e eliminação das perdas de ciclo, na atualização das soluções e na apresentação de resultados.

No ajustamento geral de diferentes sessões de uma campanha, ou de um projeto, utilizam-se os resultados do ajustamento realizado com o GEONAP (coordenadas e MVC) no software GNPNET, obtendo assim a solução final.

6.2.2 Estratégia utilizada no processamento

As observações coletadas em Harz, em cada sessão, foram processadas, com o GEONAP, buscando a resolução das ambigüidades. Para todas as linhas de base foram resolvidas inicialmente as combinações lineares do tipo *Wide Lane* (L_{Δ}). Para algumas linhas de base, entretanto, a combinação linear que se mostrou mais eficiente foi a L_X . Em seguida resolveu-se a combinação que corrige o sinal com relação aos efeitos ionosféricos, L_0 . Outras combinações foram utilizadas, mas não apresentaram um bom desempenho na resolução das ambigüidades para as observações processadas. O ângulo de elevação dos satélites adotado no processamento foi de 15° , evitando assim a utilização das coordenadas que estão mais afetadas com o efeito troposférico (Capítulo 5 – Item 5.2.2).

Foram realizados processamentos adicionais tipo *Float* (sem resolução das ambigüidades) com diferentes períodos de observação, para verificar a discrepância entre as soluções assim obtidas e as soluções *Fixed*, e a correlação dessas discrepâncias com a duração da observação. Diante da grande proximidade dos resultados (Capítulo 5 – Figura 5.13), da ordem de 1 mm, em longos períodos de observação, convencionou-se, nesse trabalho, o emprego de solução *Float* apenas na obtenção de resultados a partir de sessões com duração de 24 horas.

O processamento das observações coletadas no experimento 2 foi conduzido de forma análoga ao experimento 1. Tal como realizado no experimento 1, priorizou-se a resolução das ambigüidades utilizando-se as combinações lineares L_{Δ} e/ou L_X . Ao final, a solução de cada sessão foi calculada com a correção ionosférica do sinal.

Os valores apresentados nos resultados (coordenadas e MVC), discutidos a seguir, foram obtidos do ajustamento em rede das sessões com o GNPNET.

6.3 Determinação das Altitudes com GPS

Para obtenção de altitudes elipsoidais, com alta precisão, utilizando-se GPS, é necessário a definição de algumas circunstâncias operacionais que permitam a minimização e/ou eliminação dos erros que interferem na precisão das coordenadas verticais do posicionamento.

Nesse contexto, partindo-se de uma solução definida como “padrão”, apresenta-se a seguir a análise dos resultados, para ambos os experimentos realizados. Os resultados de referência - coordenadas, variâncias e covariâncias – que compõe a solução padrão – foram obtidos do processamento de todas as observações dos experimentos e utilizando o tempo total observado, com o GEONAP, e posterior ajustamento com o GNPNET.

Os aspectos relacionados com a determinação de altitudes com o GPS abordados nessa pesquisa compreendem:

- o tempo de observação,
- o comprimento da linha de base, e
- o número de estações de referência.

Além disso, realizou-se uma comparação com as altitudes ortométricas dos resultados do experimento 1 e uma análise considerando a existência de obstáculos na área de investigação.

6.3.1 Experimento 1

6.3.1.1 Solução padrão GPS

No caso do experimento 1, a estação fixa no GEONAP e considerada de referência no GNPNET foi a estação 0651, pertencente à rede de referência da Alemanha. Como já foi apresentado anteriormente, muitos diferentes efeitos contribuem para que as altitudes determinadas com o emprego do GPS sejam menos precisas que as posições horizontais (latitude e longitude) e, como era de se esperar, exceto para a estação de referência 0651, o desvio padrão na altitude, em média 3 mm, foi da ordem de duas vezes maior que os valores obtidos na latitude e na longitude (Figura 6.11). Este fator corresponde às melhores expectativas apresentadas por Rothacher (2001) num estudo sobre a estimativa de alturas de estações com GPS. Sendo que as menores diferenças entre a componente vertical e as componentes horizontais do posicionamento correspondem às estações observadas mais tempo, 0124, 0120 e 0130.

A Tabela 6.3 apresenta os resultados da solução padrão para todas as estações observadas no experimento 1. As diferenças entre as altitudes elipsoidais das estações são consideravelmente grandes uma vez que se realizou o experimento numa região montanhosa, sendo que essa diferença atinge um valor máximo de quase 690 m entre as estações 0128 e 0120.

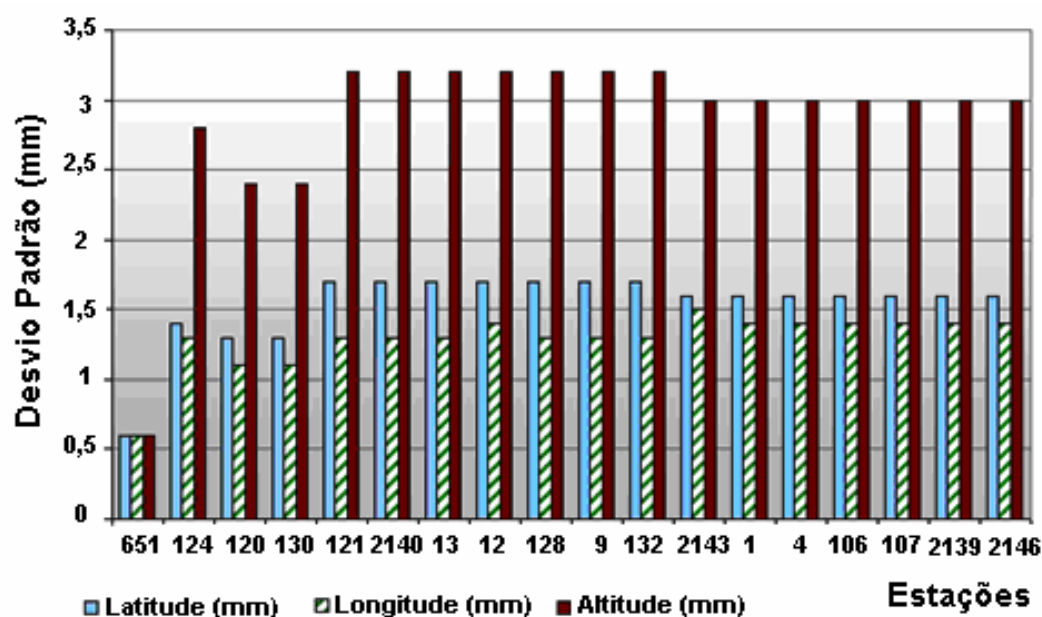


Figura 6.11: Desvio padrão das coordenadas referentes à solução padrão do experimento 1.

Tabela 6.3: Coordenadas no WGS84 da solução padrão (experimento 1)

Estação	Latitude	Longitude	Altura geométrica (m)
0651	51° 47' 56.58301"	10° 20' 46.14810"	650.5190
0124	51° 51' 51.05871"	10° 33' 22.67793"	373.0105
0120	51° 59' 54.99921"	10° 31' 4.03127"	154.7527
0130	51° 46' 26.90062"	10° 33' 5.00383"	834.3818
0121	51° 56' 25.84637"	10° 35' 5.88603"	209.1755
2140	51° 55' 3.81828"	10° 33' 20.40613"	247.0705
0013	51° 53' 32.15712"	10° 33' 22.65706"	300.0466
0012	51 49 41.71934	10 31 53.34552	660.1368
0128	51 48 20.02341	10 32 3.80308	841.6090
0009	51 45 41.08036	10 30 43.55925	818.4022
0132	51 44 46.92205	10 34 33.70048	797.8546
2143	51 47 35.65835	10 20 58.50781	645.7231
0001	51 43 44.12951	10 12 50.71236	303.1093
0004	51 50 37.33603	10 11 53.36601	295.4648
0106	51 38 45.51043	10 30 20.53298	428.8094
0107	51 38 43.88421	10 21 0.11011	303.7644
2139	51 57 50.71857	10 18 18.95239	297.7127
2146	51 36 48.88034	10 27 20.03488	428.0793

Neste experimento foram utilizadas as observações de 96 horas nos processamentos tipo *Fixed* com o GEONAP e todas as ambigüidades foram resolvidas. Adicionalmente foi realizado processamento tipo *Float*, mas os resultados mostraram-se muito próximos, tal como discutido anteriormente no item 5.2.4.

6.3.1.2 Análise do tempo de observação

Foram realizados processamentos no GEONAP de todas as sessões observadas, considerando-se fixas apenas as coordenadas da estação 0651, sob diferentes períodos de observação. Os

resultados de altitude obtidos com 2, 4, 6, 8, 10, 12 e 24 horas foram, então, comparados com os obtidos na solução padrão. A Figura 6.12 mostra como os resultados de altitude tendem a um valor estabilizado com o aumento do período de observação.

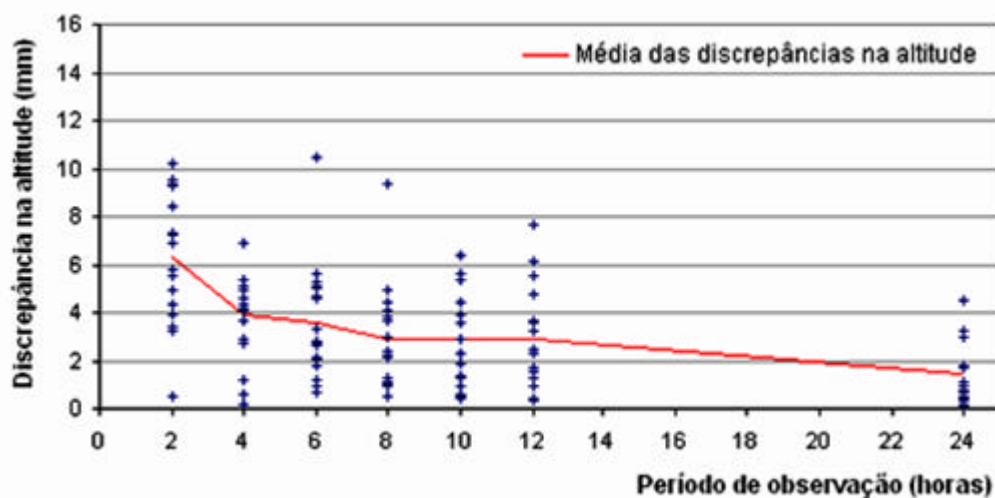


Figura 6.12: Discrepância média em altitude para diferentes períodos de observação.

A discrepância média para o menor período de observação considerado, 2 horas, foi de 6 mm, que foi reduzido a quase a metade com o acréscimo de 2 horas de observação. A discrepância média da altitude estabiliza-se em torno de 3 mm para períodos de observação acima de 6 horas. A metade dessa discrepância, contudo, só é observada com aproximadamente 24 horas de observação.

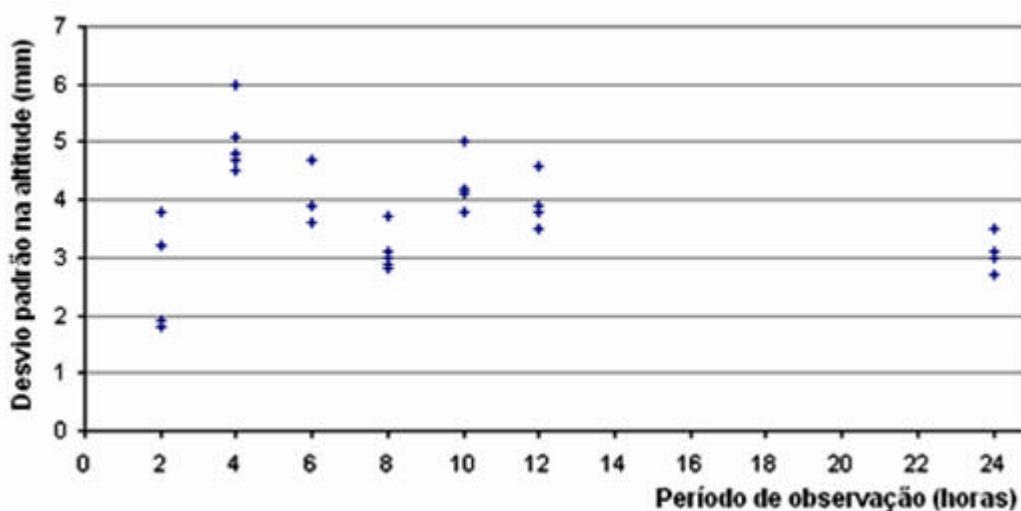


Figura 6.13 Desvio padrão na altitude com diferentes períodos de observação.

Os valores de desvio padrão, por sua vez, não apresentaram um comportamento definido com o horário, mas pode-se observar que as altitudes obtidas com 24 horas de observação

apresentam menor variação que as restantes (Figura 6.13). Exceto para o período de 4 horas, todos os períodos observados apresentaram desvio padrão abaixo de 5 mm.

É importante observar, entretanto, que esses resultados podem ser diferentes conforme o período do dia em que se realizam as observações. Para esses mesmos resultados obtidos da campanha em Harz verificou-se diferentes discrepâncias na altitude para os resultados do processamento de cada duas horas de observação durante um período de 24 horas (Figura 5.10). O horário do dia e o período do ano mais indicado para realização de observações GPS, tal que estas estejam menos sujeitas aos efeitos ionosféricos e troposféricos, entretanto, depende do local onde se realizam as medições.

6.3.1.3 Análise do comprimento da linha de base

Buscando obter as soluções resultantes de linhas de base simples, foram realizados processamentos entre as linhas de base individualmente, para isso, foram escolhidas as estações observadas no mesmo período, e utilizadas as observações de um mesmo horário, tal que todas as estações envolvidas nessa análise estejam rastreando a mesma constelação de satélites. Foi realizado, então o processamento, no GEONAP, da estação de referência 0651 com cada uma das seguintes estações: 2143, 0004, 0001, 0130, 0124, 0107, 2139, 0106, 2146 e 0120 (Figura 6.14), que distam, entre 1 e 25 km de 0651 (ver Tabela 6.1).

Foram utilizadas as observações coletadas em duas horas de observação, sendo metade do período num dia e a outra metade no outro, e o horário escolhido foi de 9 às 10 horas da manhã. Outros horários foram analisados e apresentaram comportamento semelhante ao horário escolhido. Foram resolvidas todas as ambigüidades e a combinação linear que se mostrou mais eficiente foi a L_x . Ao final de todos os processamentos, resolveu-se a combinação linear L_0 . O ângulo de elevação dos satélites adotado foi 15° . Os valores dos desvios padrão e as coordenadas finais de cada estação foram determinados com o ajustamento das sessões com o GNPNET.

A Figura 6.15 apresenta a variação do desvio padrão para as coordenadas (latitude, longitude e altitude) com diferentes comprimentos de linha de base.

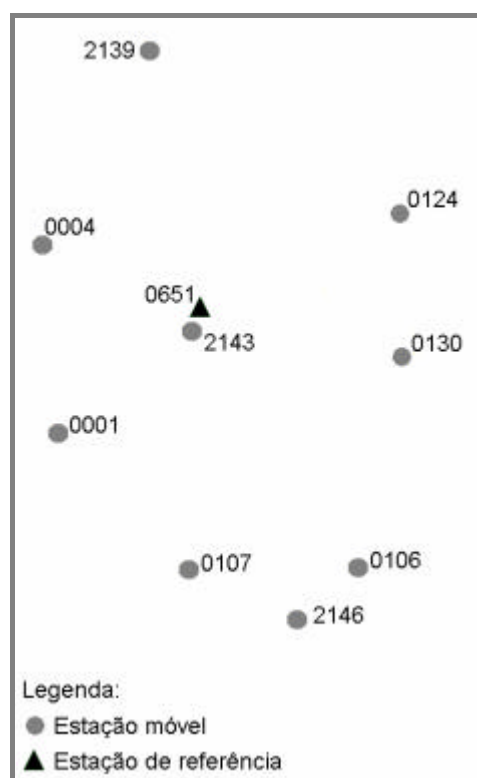


Figura 6.14: Estações utilizadas na análise sobre comprimento da linha de base.

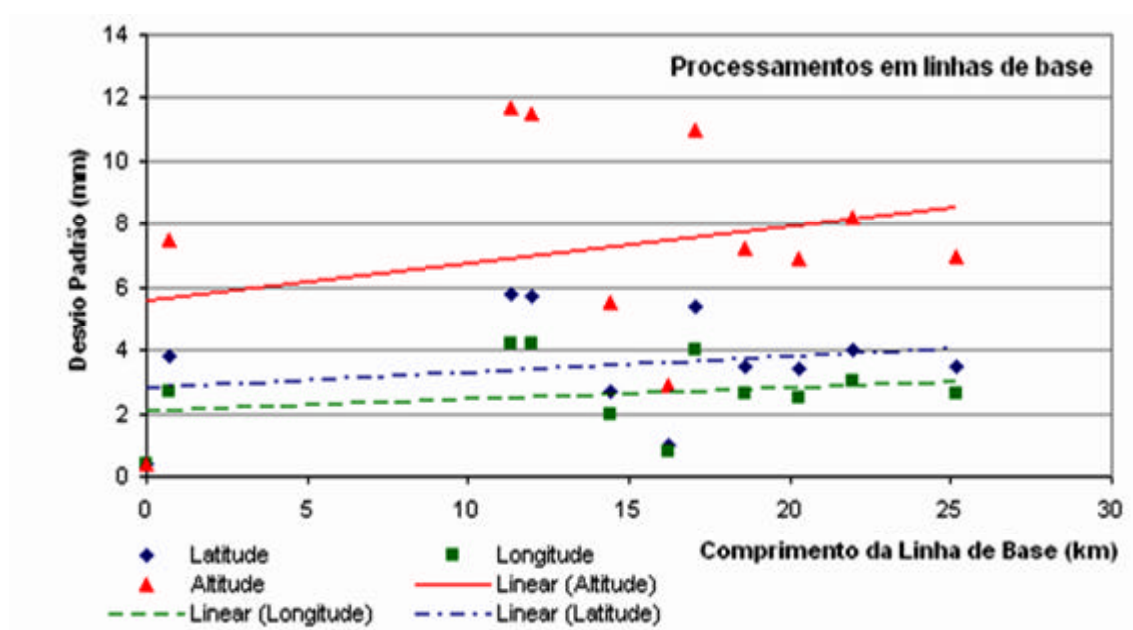


Figura 6.15: Desvio padrão com diferentes comprimentos de linha de base – processamento em linhas de base de duas horas de observação.

Nos resultados apresentados não se observa um comportamento definido de degradação das coordenadas com o aumento no comprimento da linha de base, mas com as linhas traçadas é possível verificar as tendências de crescimento dos desvios padrão das três componentes com

o distanciamento da estação objeto. Como era de se esperar, os piores resultados de precisão correspondem à coordenada vertical do posicionamento, sendo que estes permaneceram abaixo de 12 mm, enquanto que para as coordenadas latitude e longitude os valores máximos ficaram em torno de 5 mm.

Sabe-se que a precisão geodésica é obtida apenas com o posicionamento relativo, ou seja, com a utilização de, pelo menos, dois receptores rastreando simultaneamente um grupo de satélites comuns. Ou através do uso de um receptor e do acesso aos dados de uma estação permanente pertencente ao Sistema de Controle Ativo (item 4.3.3). Os dados apresentados na Figura 6.15 correspondem justamente a esta situação, uma vez que a estação de referência 0650 é parte integrante da rede de monitoramento contínuo da Alemanha, SAPOS, e, de acordo com os valores de desvio padrão apresentados, pode-se esperar, nessa situação, altitudes com precisão de cerca de 1 cm. Por outro lado, a utilização de um número maior de receptores garante a repetição de linhas de base e confere maior rigidez geométrica à rede.

Baseado nas especificações dadas pelo IBGE para levantamentos com GPS (IBGE, 1993) que recomenda uma duração de sessão de 2 horas para linhas de base até 50 km, foi realizado o processamento das observações em rede para as estações apresentadas na Figura 6.14 no período recomendado. A Figura 6.16 apresenta as discrepâncias com relação à solução padrão (item 5.3.1) para os resultados obtidos considerando as linhas de base isoladas e considerando o ajustamento em rede.

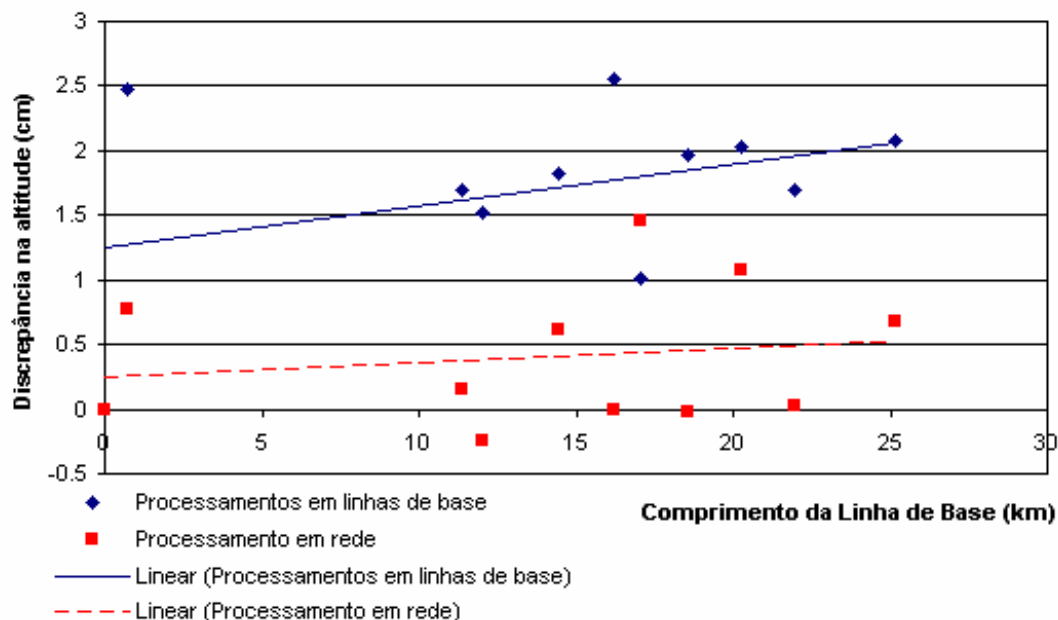


Figura 6.16: Discrepância na altitude entre a solução padrão e o processamento com 2 horas de observação para diferentes comprimentos de linha de base e o processamento em rede.

Tal como pode ser verificado, ambas as estratégias de processamento apresentam uma tendência de crescimento na discrepância com o aumento do comprimento da linha de base, sendo esse comportamento mais acentuado para o processamento individual das linhas de base. No que se refere à magnitude das discrepâncias na altitude, verifica-se uma diferença de aproximadamente 1 cm entre os valores máximos obtidos, sendo que os melhores resultados são oriundos do ajustamento em rede, ou seja, isso em valores médios representou 2 cm e 0.5 cm para os processamentos em linha de base e em rede, respectivamente. Essa comparação expressa em valores a vantagem, quando se deseja obter precisões milimétricas, em se utilizar mais que dois receptores para o rastreamento dos satélites e o modo de ajustamento em rede. Hofmann-Wellenhof et al. (1994) ao compararem os resultados dos dois métodos para os mesmos pontos (linha de base simples e solução com vários pontos simultâneos) afirmaram que a correlação não é corretamente modelada com a solução em linha de base simples porque as correlações entre as linhas de base são desprezadas. Assim, tal como é sugerido pelo IBGE (1993), recomenda-se que na área de estudo sejam utilizados pelo menos dois receptores além do acesso aos dados da estação RECF pertencente à RBMC.

Com relação aos receptores empregados, deve-se priorizar o uso do mesmo tipo de antena para todos os receptores, de forma a minimizar os erros sistemáticos provenientes de diferentes definições de centros de fase (Capítulo 5 - item 5.3.2).

6.3.1.4 Análise do número de estações de referência

A partir das considerações feitas no item anterior, verificou-se a importância da realização do ajustamento em rede quando é necessária a obtenção de resultados de alta precisão. Num ajustamento em rede, faz-se a combinação de soluções de várias sessões numa solução rigorosa de toda a rede, devendo-se considerar a correlação entre todas as observações da rede, tal que a dispersão dos resultados seja compatível com a dispersão real das estações.

Com relação às estações de referência, as suas coordenadas correspondem às injunções utilizadas no ajustamento das observações. Quando as coordenadas das estações de injunção são mantidas invariantes ao longo do ajustamento (injunções absolutas ou estações fixas), as incertezas dos parâmetros aos quais elas estão ligadas não são transmitidas aos parâmetros incógnitos. Quando as coordenadas das estações de referência estão associadas às próprias informações de precisão (injunções relativas ou estações fiduciais), essas transferem suas incertezas aos parâmetros incógnitos e, conseqüentemente, resultam em valores de dispersão maiores. A solução obtida do emprego de injunções relativas apresenta valores de dispersão maiores devido à propagação das covariâncias, mas, por outro lado, podem ser considerados mais realísticos. Visando a fixação de coordenadas obtidas com grande precisão, as estações

observadas 96 horas (0130, 0124 e 0120), que serão tratadas como de referência, foram processadas, no GEONAP e posteriormente ajustadas no GNPNET, utilizando-se as informações dos quatro dias de observação e mantendo-se fixas apenas as coordenadas da estação 0651. Desse modo, foram obtidas as coordenadas de referência, Tabela 6.4, com baixos valores de desvio padrão (valores máximos da ordem de 2 mm), utilizadas na análise da influência do número de estações de referência.

Tabela 6.4: Coordenadas no WGS84 das estações consideradas de referência

Estação	Latitude	Longitude	Altura geométrica (m)	S_j (mm)	S_l (mm)	S_h (mm)
0651	51° 47' 56.58301"	10° 20' 46.14810"	650.5190	0.4	0.4	0.4
0124	51° 51' 51.05877"	10° 33' 22.67775"	373.0088	1.1	2.4	2.3
0120	51° 59' 54.99919"	10° 31' 4.03112"	154.7540	1	1.9	1.8
0130	51° 46' 26.90062"	10° 33' 5.00379"	834.3864	1	1.8	1.8

Realizou-se, então, o processamento com o GEONAP, utilizando-se todas as estações observadas e fixando-se as coordenadas apenas da estação pertencente à rede SAPOS, a 0651. As demais estações permaneceram, em todos os processamentos, sem fixar as coordenadas. As simulações das diferentes estratégias de combinação das estações de referência, com fixação das coordenadas, foram realizadas com o emprego do GNPNET.

As estratégias utilizadas na fixação de coordenadas foram:

- 1a. estratégia: a estação de referência considerada é a 0130 (estratégia 1R) – Figura 6.17a
- 2a. estratégia: as estações de referência consideradas são 0130 e 0120 (estratégia 2R1), que distam aproximadamente 25 km – Figura 6.17b
- 3a. estratégia: as estações de referência consideradas são 0130, 0120 e 0124 (estratégia 3R), sendo que a distância entre a estação 0130 e 0124 é de 10 km e entre a estação 0120 e 0124 é 15 km – Figura 6.17c.

Foram processadas no GEONAP as observações coletadas em cada período de 24 horas e os resultados dos quatro dias de campanha (96 horas no total) foram, então, ajustados no GNPNET (onde aplicou-se cada uma das estratégias propostas), para comparação entre as soluções finais. Comparou-se, então, os valores das discrepâncias na altitude, em relação à solução padrão, para os resultados obtidos com uma (1R), com duas (2R1) e com três (3R) estações de referência.

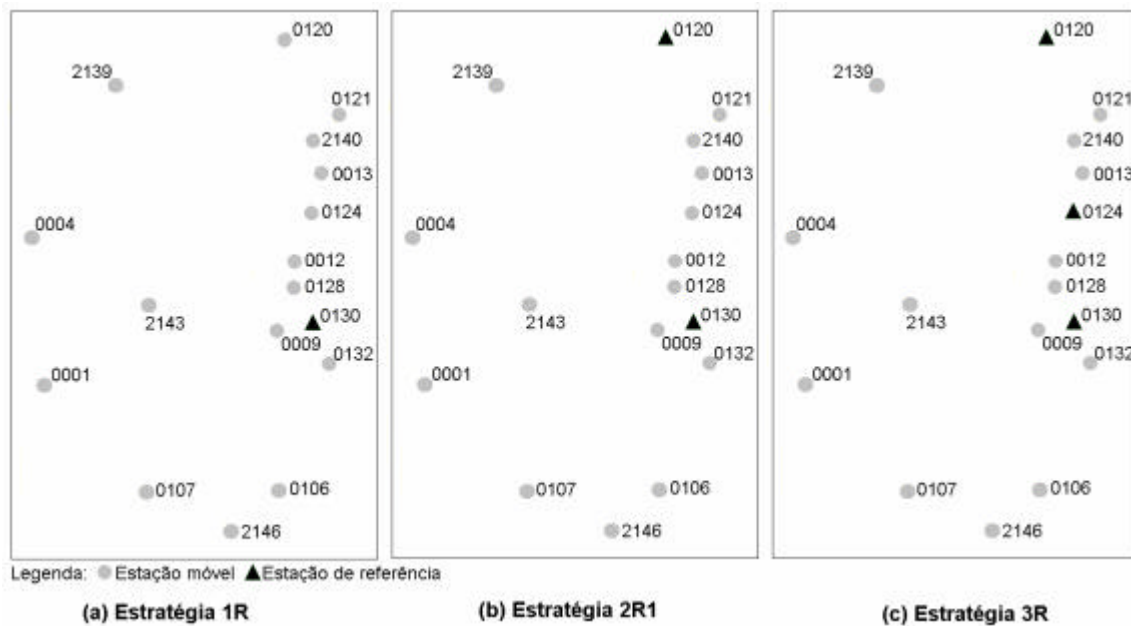


Figura 6.17: Distribuição das estações consideradas em cada uma das estratégias para análise do número de estações de referência.

Conforme pode ser visto na Figura 6.18, os resultados obtidos com apenas uma estação de referência apresentam discrepância maior que os resultados obtidos com duas e com três estações de referência, para todas as estações observadas. Com relação aos valores máximos, verifica-se que os valores das discrepâncias permaneceram abaixo de 12 mm para a estratégia 1R, enquanto que para as estratégias 2R1 e 3R os valores máximos foram inferiores a 8 mm.

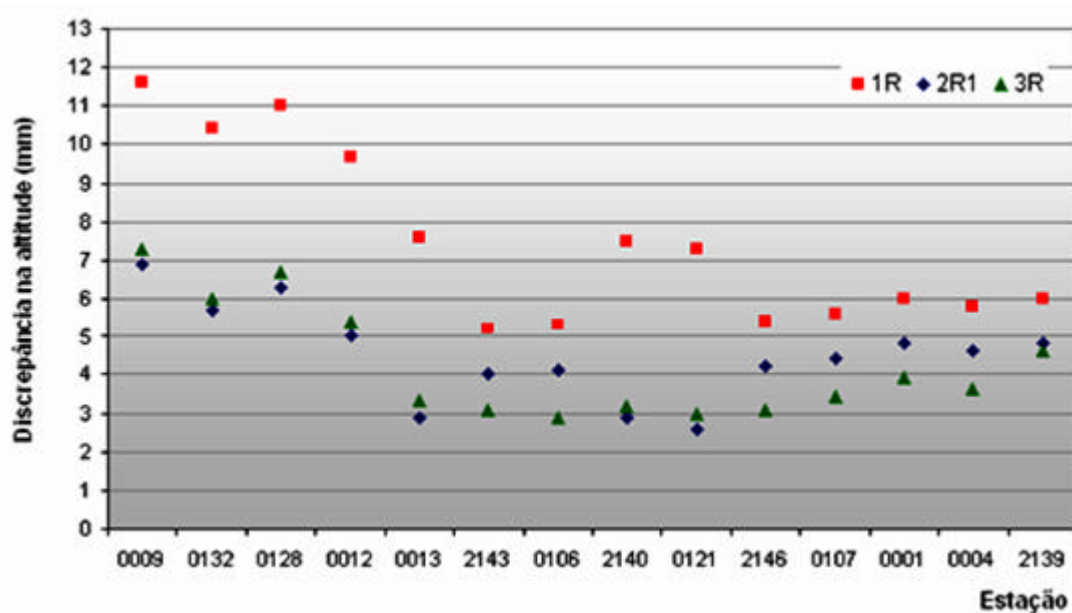
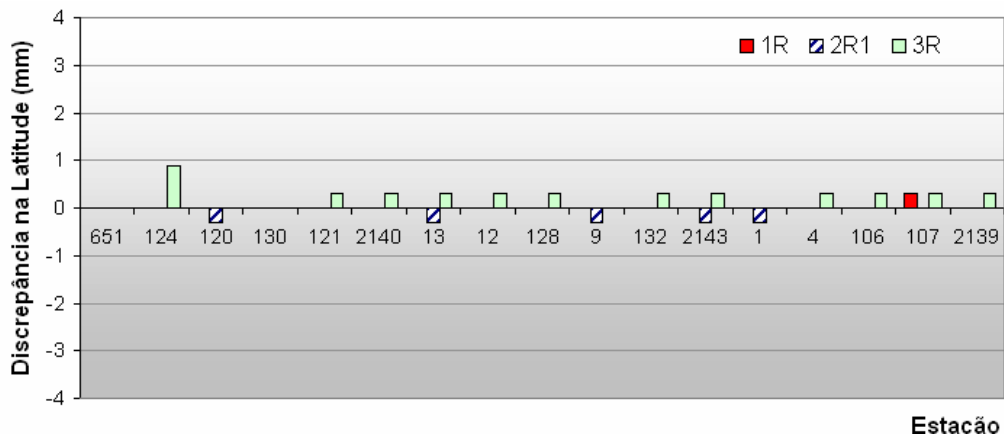


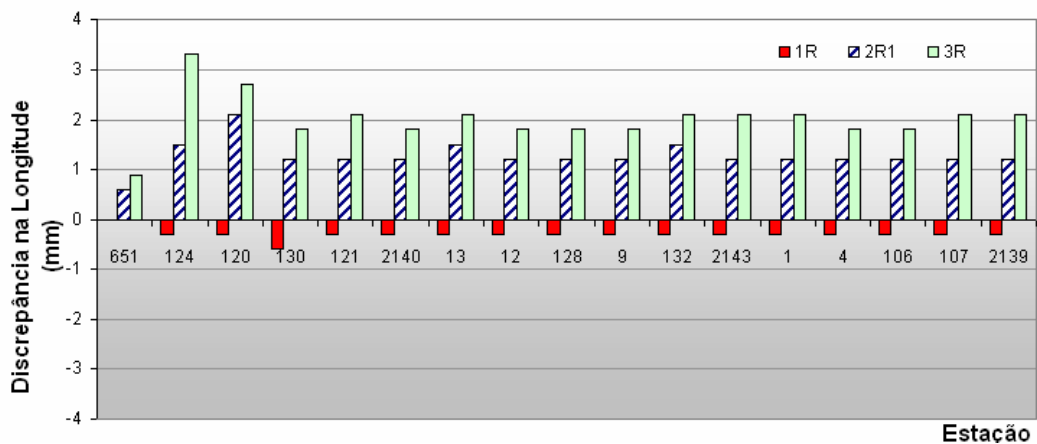
Figura 6.18: Discrepância na altitude entre a solução padrão e o processamento com 96 horas de observação com diferentes números de estações de referência.

Os resultados de altitude mostraram-se portanto mais próximos da solução padrão com o emprego de duas ou três estações que com o emprego de apenas uma. Além disso, os valores de altitude obtidos com duas e três estações mostraram-se muito próximos, indicando, para essa situação, que o emprego de apenas duas estações é suficiente para garantir uma discrepância média de altitude para as estações móveis da ordem de 4 mm, quase metade da média obtida considerando-se a estratégia 1R.

Com relação aos valores de discrepância da latitude e da longitude, independente da estratégia utilizada, os resultados mostraram-se muito próximos da solução padrão, permanecendo os valores na ordem de poucas unidades de milímetros (Figura 6.19). No que se refere aos desvios padrão da latitude e da longitude, os valores permaneceram na mesma ordem de grandeza (Figura 6.20) que as respectivas discrepâncias, sendo que a longitude mostrou alguma variação com a mudança no número de estações de referência. Pode-se concluir, portanto, que é possível obter precisão milimétrica, na latitude e na longitude, com o emprego de apenas uma estação de referência.

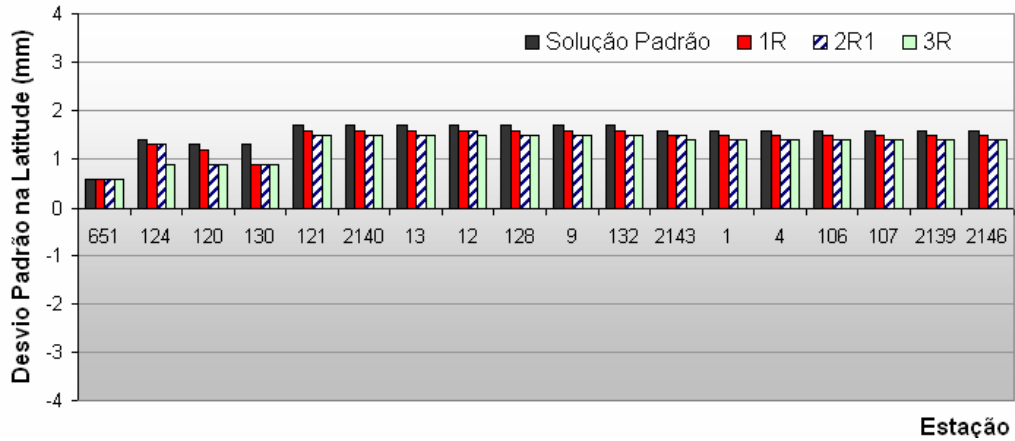


(a) Na latitude.

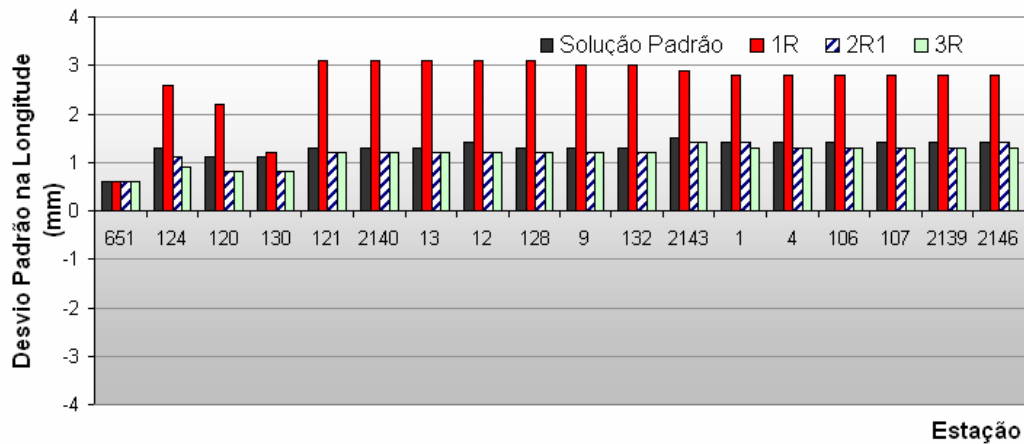


(b) Na longitude.

Figura 6.19: Discrepância entre a solução padrão e o processamento com 96 horas de observação para diferentes números de estações de referência (estratégias 1R, 2R1 e 3R).



(a) Na latitude.



(b) Na longitude.

Figura 6.20: Desvio padrão com 96 horas de observação para diferentes números de estações de referência (estratégias 1R, 2R1 e 3R).

Com base na discussão apresentada no item anterior (sobre a deteriorização das coordenadas determinadas com o GPS devido ao comprimento da linha de base), analisou-se o resultado obtido com o processamento em rede, de todas as estações observadas, com a estratégia 1R (Figura 6.21). Analisando-se unicamente o comprimento da linha de base verifica-se um comportamento totalmente contrário ao apresentado anteriormente, pois as coordenadas obtidas para estações mais distantes mostraram discrepância menor que as mais próximas.

Como a área de coleta dos dados compreende uma região montanhosa localizada no norte da Alemanha, investigou-se o comportamento dos resultados com a variação de altitude das estações móveis, o que indicou a existência de uma correlação de crescimento entre a discrepância na altitude e o valor da altitude da estação observada. Como é sugerido na Figura 6.22, onde as estações localizadas em altitudes elevadas tendem a coordenadas verticais mais afastadas da solução padrão mesmo sendo as mais próximas das estações de referência. De

acordo com os resultados obtidos, portanto, discrepâncias da ordem de 1 cm podem ser esperadas para estações localizadas em altitudes até cerca de 650 metros.

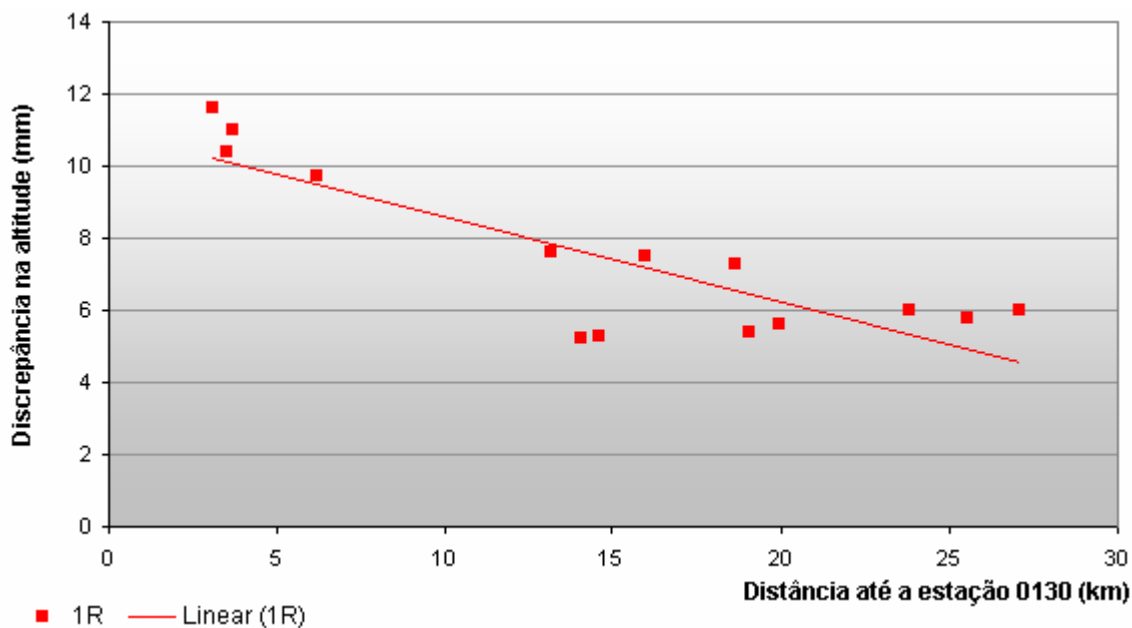


Figura 6.21: Discrepância da altitude entre a solução padrão e o processamento com 96 horas de observação em relação à distância até a estação de referência 0130 (estratégia 1R).

Assim sendo, em regiões com variação de relevo, a variação de altitude representa um condicionante adicional na precisão dos resultados. No que se refere ao objeto de estudo dessa pesquisa, a área de investigação de subsidência, compreende uma região de planície e, portanto, não deve apresentar variações que possam ser associados às variações de altitude.

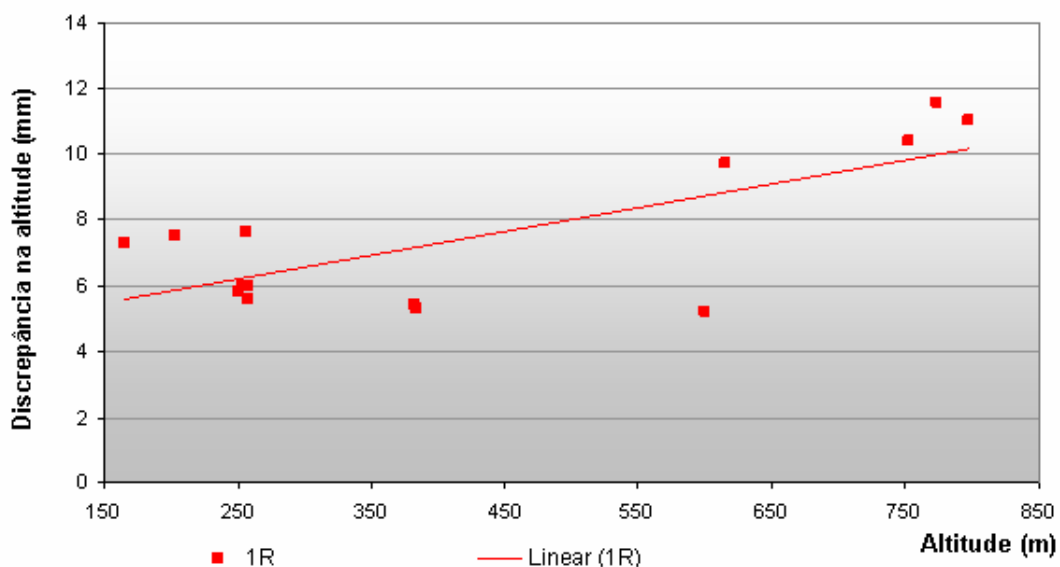


Figura 6.22: Discrepância da altitude entre a solução padrão e o processamento com 96 horas de observação em relação à altitude da estação (estratégia 1R).

No que se refere ao número de estações de referência, de acordo com os resultados apresentados anteriormente (Figura 6.18), é possível obter coordenadas verticais com discrepância de ordem milimétrica utilizando-se apenas duas estações de referência. Explorando melhor essa possibilidade, propõe-se uma outra estratégia empregando como de referência as estações 0130 e 0124 (que chamaremos de “estratégia 2R2”), que distam cerca de 10 km – Figura 6.23.

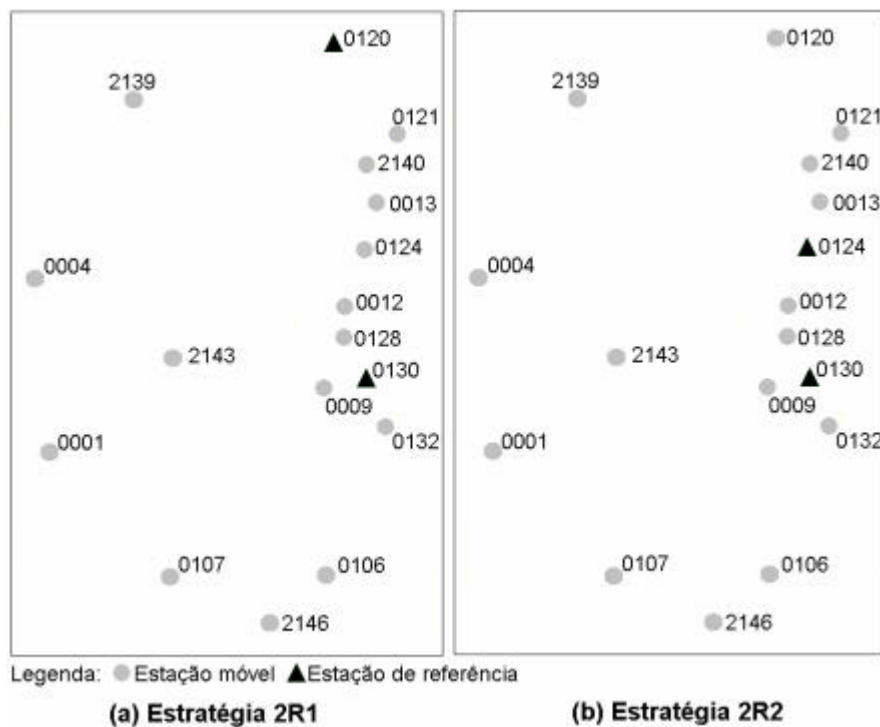


Figura 6.23: Distribuição das estações consideradas nas estratégias 2R1 e 2R2.

A Figura 6.24 apresenta os valores de discrepância na altitude com relação à solução padrão com o emprego das duas estações de referência e a distância, em km, entre cada uma das estações observadas e as estações de referência consideradas.

Com relação aos valores máximos, verifica-se que os valores das discrepâncias permaneceram abaixo de 11 mm para a estratégia 2R2, enquanto que para as estratégias 2R1 o valor máximo foi da ordem de 7 mm. Os resultados de altitude mostraram-se, portanto mais próximos da solução padrão com a estratégia 2R1.

De forma geral, a estratégia 2R2 apresentou valores de discrepância maiores ou iguais aos obtidos com a estratégia 2R1. Comparando-se a Figura 6.24 com a Figura 6.18 pode-se verificar que as estações que apresentaram maior discrepância em relação à solução padrão são as mesmas tanto para a estratégia 1R quanto para a estratégia 2R2 e correspondem justamente às estações mais próximas à estação 0130 (009, 0132, 0128, 0012, 0013, 2140, 0121).

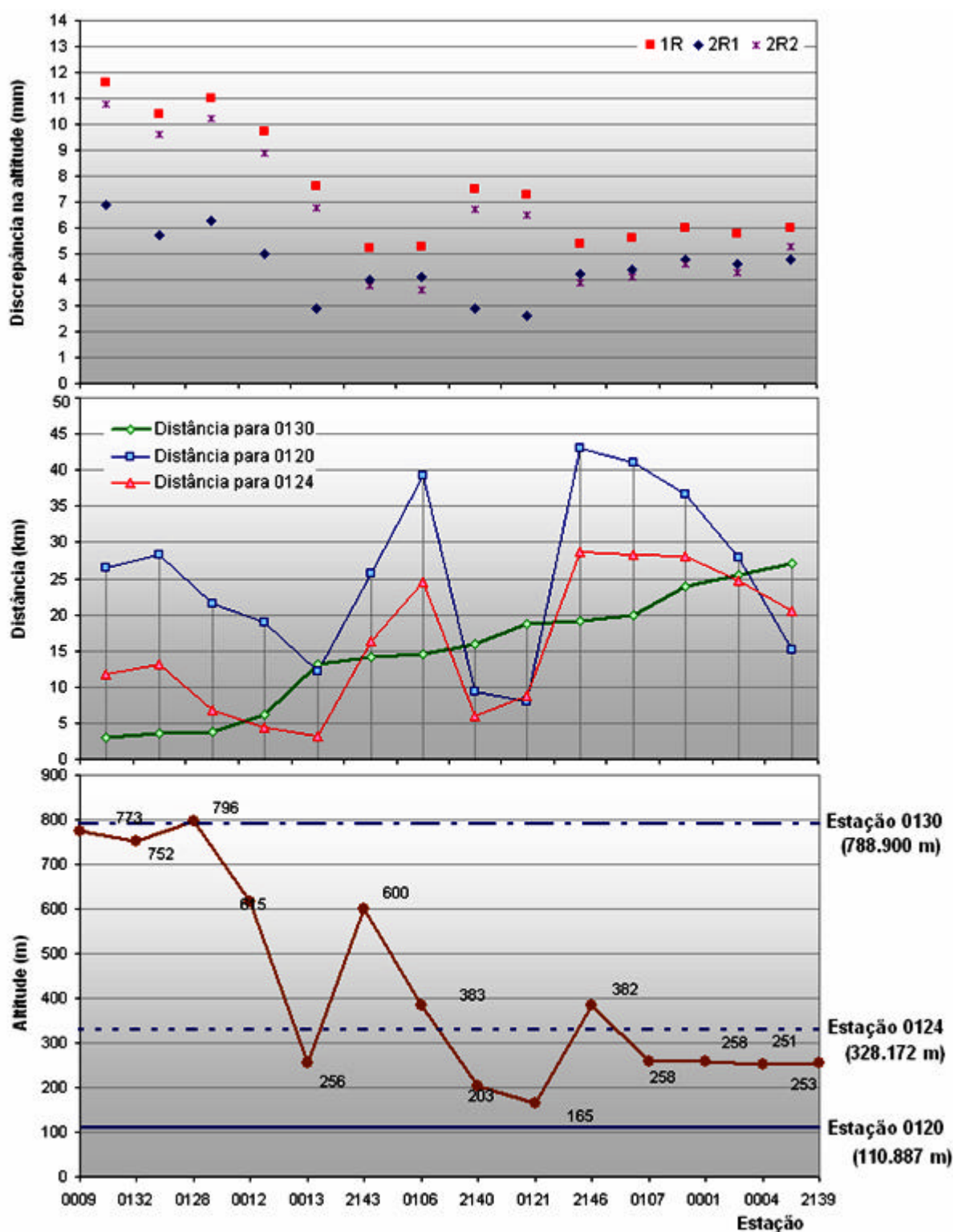


Figura 6.24: Para cada estação observada: discrepância na altitude entre a solução padrão e o processamento com 96 horas de observação (estratégias 1R, 2R1 e 2R2), distância até as estações de referência consideradas e altitude das estações observadas.

A proximidade da estação 0124 com relação à estação 0130 conferiu pouco ganho de precisão (cerca de 1 mm), e as duas estações juntas “funcionaram” como apenas uma, ao

contrário da estratégia 2R1, cujos resultados apresentaram praticamente o mesmo desempenho que os resultados obtidos com a estratégia 3R. Portanto, a disposição das estações de referência quando definida de forma adequada pode resultar em ganho de precisão e confiabilidade.

Sobre o comprometimento da posição relativa das estações na precisão final da rede, Even-Tzur et al. (1996, apud Marini e Monico, 2003) afirmam que, assim como numa rede de nivelamento, a geometria do polígono formado pelos vértices da rede GPS não interfere na precisão final da posição relativa dos vértices, mas sim o comprimento das linhas de base, que deve ser o menor e mais homogêneo possível. Por outro lado, a combinação das informações apresentadas na Figura 6.24 evidencia, mais uma vez, a influência da altitude da estação sobre a precisão dos resultados. Assim sendo, recomenda-se, sempre que possível, a implantação de estações, numa mesma rede geodésica, com altitudes próximas.

Do ponto de vista da precisão dos resultados, verificou-se que o desvio padrão diminui com o aumento da quantidade de estações de referência utilizadas (Figura 6.25). O ganho médio de precisão é da ordem de 1 mm quando se opta pela utilização de três estações de referência ao invés de apenas uma (Tabela 6.5).

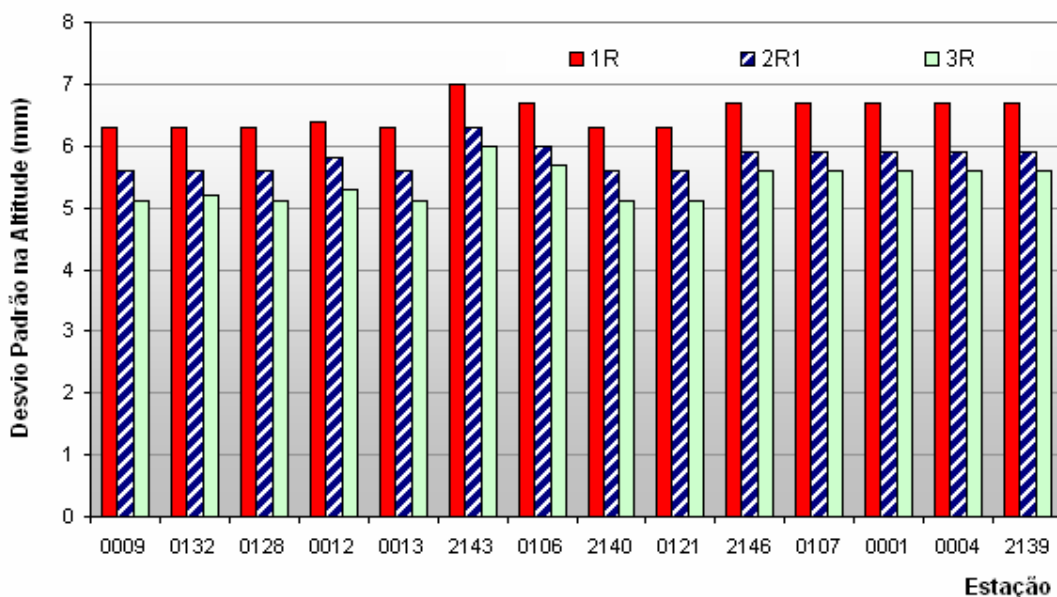


Figura 6.25: Desvio padrão da altitude com diferentes números de estações de referência com 96 horas de observação.

Assim, considerando a discrepância em relação à solução padrão bem como o desvio padrão, e, visando à determinação precisa de altitude, recomenda-se o emprego de pelo menos duas estações de referência com uma distribuição adequada.

Tabela 6.5: Valores e diferenças de desvio padrão da altitude (estratégias 1R, 2R1 e 3R)

Estação	1R	2R1	3R	Δ_{1R_2R1}	Δ_{2R1_3R}	Δ_{1R_3R}
0009	6.3	5.6	5.1	0.7	0.5	1.2
0132	6.3	5.6	5.2	0.7	0.4	1.1
0128	6.3	5.6	5.1	0.7	0.5	1.2
0012	6.4	5.8	5.3	0.6	0.5	1.1
0013	6.3	5.6	5.1	0.7	0.5	1.2
2143	7	6.3	6	0.7	0.3	1
0106	6.7	6	5.7	0.7	0.3	1
2140	6.3	5.6	5.1	0.7	0.5	1.2
0121	6.3	5.6	5.1	0.7	0.5	1.2
2146	6.7	5.9	5.6	0.8	0.3	1.1
0107	6.7	5.9	5.6	0.8	0.3	1.1
0001	6.7	5.9	5.6	0.8	0.3	1.1
0004	6.7	5.9	5.6	0.8	0.3	1.1
2139	6.7	5.9	5.6	0.8	0.3	1.1

6.3.1.5 Comparação com altitudes ortométricas

Tal como já foi explicado anteriormente, com o sistema GPS determina-se a altitude geométrica ou elipsoidal, e para determinação da altitude ortométrica ou normal é necessário a existência de modelos do geóide ou do quase-geóide (Equação 5.1). O mapa geoidal representa a conversão entre os dois sistemas de altitude. A precisão da transformação é função, entretanto, da precisão na determinação do geóide. Para que a tecnologia GPS seja plenamente aproveitada, proporcionando economia de tempo e recursos, necessita-se de um mapa geoidal cada vez mais preciso.

No Brasil, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, através da Coordenação de Geodésia - CGED, e a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - EPUSP, geraram um Modelo de Ondulação Geoidal com uma resolução de 10' de arco e desenvolveram o Sistema de Interpolação de Ondulação Geoidal - MAPGEO2004, esse sistema já está disponível para *download* (ftp://ftp.ibge.gov.br/Programa/Sistema_Interpolacao_Ondulacao_Geoidal/mapgeo2004.2_setup.exe).

Através desse sistema, os usuários podem obter a ondulação geoidal em um ponto, e/ou conjunto de pontos, referida aos sistemas SIRGAS2000 e SAD69.

Sempre que se desejar expressar as coordenadas de um ponto em um sistema de referência diferente do que foi utilizado no seu levantamento original é necessário realizar uma transformação de coordenadas. Segundo Almeida et al. (2002), esse problema é relevante hoje em dia no Brasil porque o sistema de referência oficial (SAD-69) é diferente do utilizado pelo NAVSTAR/GPS (WGS-84). Essa transformação se estende a outros sistemas mais antigos que co-existem com o sistema oficial atual e aos sistemas mais modernos, como o SIRGAS, por exemplo. O procedimento de transformação de coordenadas geodésicas, entretanto, de

acordo com Freitas et al. (2004), exige atenção por parte dos usuários, pois o emprego de diferentes procedimentos de transformação gera diferenças nos valores das coordenadas transformadas. As conseqüências dessas diferenças podem ser percebidas em problemas de fusão de dados de múltiplas fontes, por exemplo. Duas bases de dados podem estar sob o mesmo sistema de referência, mas terem sido transformadas de outros sistemas utilizando diferentes procedimentos. Isso pode fazer com que uma mesma representação de uma feição seja transformada em duas representações diferentes (ou seja, com diferença nas coordenadas dos seus pontos). Sobre esse tema, o IBGE disponibiliza a Resolução N°. 23 de 21.02.1989 (IBGE, 1989) que apresenta os parâmetros para transformação de sistemas geodésicos. Além disso, paralelamente às atividades de integração ao SIRGAS, já estão sendo determinados os parâmetros de transformação relativos ao *datum* local oficialmente adotado no Brasil, o SAD69.

No que se refere aos dados obtidos nessa pesquisa, na determinação altimétrica das coordenadas foram utilizadas as informações de ondulação do quase-geóide do *Europäische Gravimetrische Quasigeoid* EGG97 do *Institut für Erdmessung* da Universidade de Hannover, Figura 6.26. O EGG97 foi realizado no âmbito da República Federal da Alemanha com uma precisão entre 1 e 5 cm.

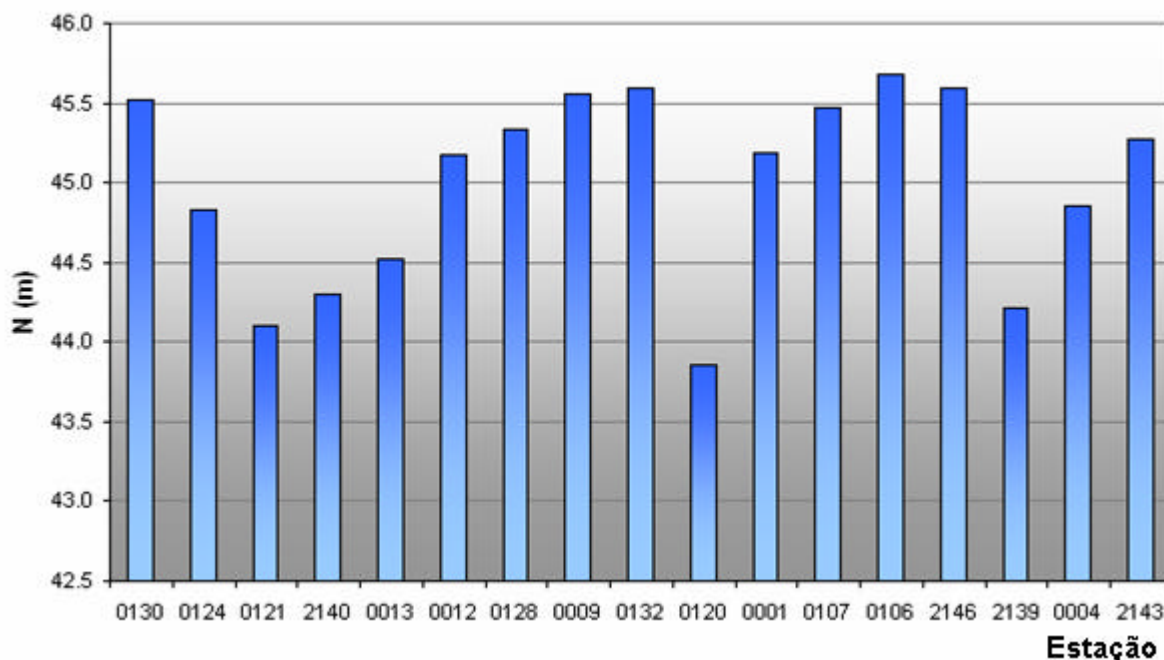


Figura 6.26: Valores da ondulação geoidal obtidos do quase-geóide EGG97.

A comparação das coordenadas verticais obtidas do GPS com os resultados de nivelamento (Figura 6.27), apontam uma diferença média de 1.3 cm, tal como as melhores expectativas apresentadas por Torge (2001) quando afirma que as discrepâncias entre modelos dos quase-

geóides locais e regionais e pontos de controle de nivelamento/GPS têm sido reduzidos à ordem de dm para cerca de 1000 km e para poucos centímetros para cerca de 100 km. A Figura 6.28 apresenta a diferença entre as altitudes determinadas a partir do nivelamento e as altitudes determinadas das observações GPS (já considerada a ondulação do quase-geóide).

Como já foi discutido anteriormente, a exatidão das altitudes ortométrica ou normais a partir dos resultados de observações GPS é função, também, da acurácia do geóide (ou quase-geóide) utilizado, assim a determinação do geóide tem grande importância no posicionamento vertical.

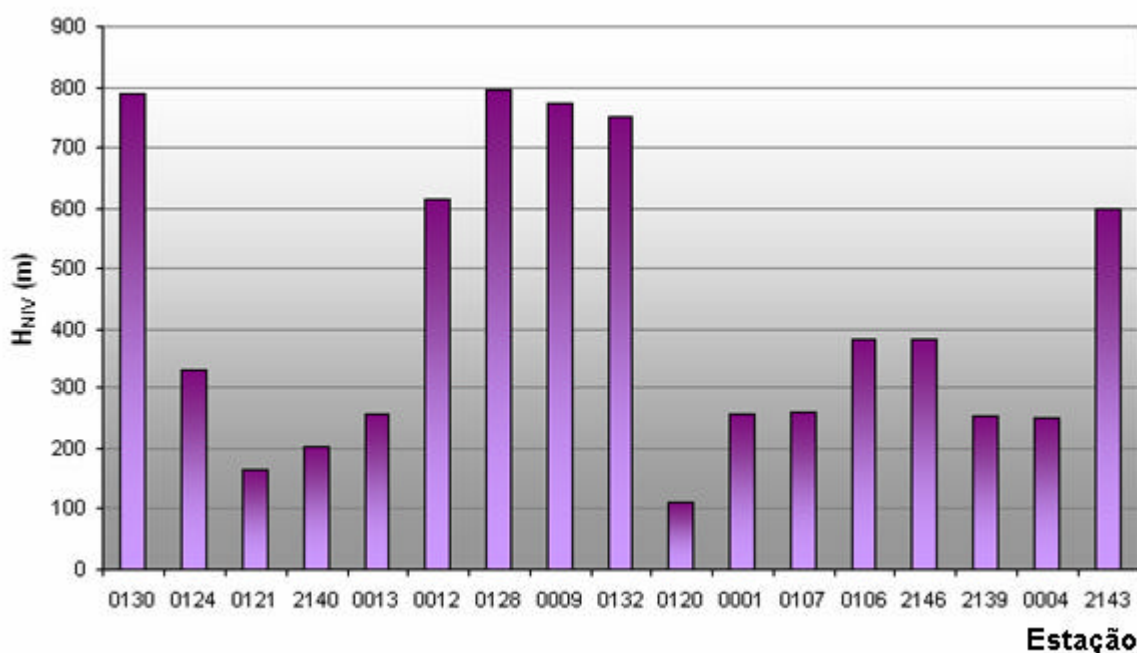


Figura 6.27: Altitudes determinadas por nivelamento.

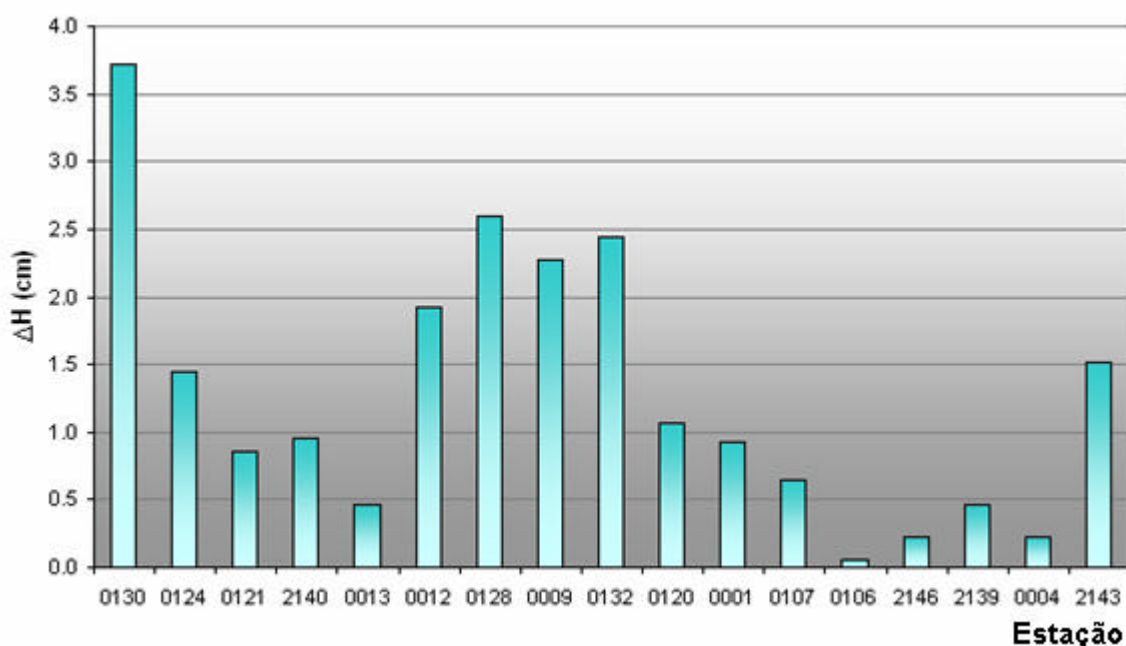


Figura 6.28: Comparação da altitude determinada com GPS e os dados de nivelamento.

Comparando-se os gráficos apresentados nas Figuras 6.28 e 6.27, verifica-se que a diferença entre as altitudes determinadas por GPS e as altitudes obtidas por nivelamento é maior para as estações localizadas em altitudes maiores (0130, 0012, 0128, 0009, 0132, 2143).

Pode-se concluir, portanto que para realizar a comparação entre coordenadas verticais obtidas, numa mesma época ou em épocas distintas, com nivelamento geométrico e com GPS é necessário o conhecimento do geóide com boa precisão.

6.3.2 Experimento 2

6.3.2.1 Solução padrão GPS

Para fixação das coordenadas das sete estações de referência (0640, 0652, 0657, 0663, 0665, 0666, 0676), foram processadas, no GEONAP e posteriormente ajustadas no GNPNET, as observações dos 11 dias de observação, mantendo-se fixas apenas as coordenadas da estação 0640 (estação pertencente à rede SAPOS que está localizada em Hannover). Desse modo, foram obtidas as coordenadas de referência, Tabela 6.6, com valores de desvio padrão máximos menores que 5 mm.

Utilizando-se as coordenadas apresentadas na Tabela 6.6, realizou-se, então, o processamento com o GEONAP para obtenção da solução padrão com todas as observações de 48 horas de cada uma das sessões simuladas. Assim, para cada uma das cinco soluções padrão foi considerado, no processamento com o GEONAP, a estação fixa 0640, e no ajustamento com o GNPNET as sete estações pertencentes à rede de referência da Alemanha (Tabela 6.2).

Tabela 6.6: Coordenadas no WGS84 das estações de referência

Estação	Localização	Latitude	Longitude	Altura geométrica (m)	S_j (mm)	S_l (mm)	S_h (mm)
0640	Hannover	52° 24' 27.11455"	9° 48' 5.951580"	123.7356	0.9	0.9	0.9
0652	Alfeld	51° 59' 16.50499"	9° 48' 16.89826"	149.7304	2.3	4.1	4.2
0657	Hameln	52° 06' 21.08093"	9° 21' 12.34740"	140.5068	2.3	4.1	4.2
0663	Hildesheim	52° 08' 57.59793"	9° 54' 34.99066"	218.1091	2.2	4.1	4.2
0665	Schwarmstedt	52° 40' 40.7009"	9° 36' 55.93775"	84.5957	2.3	4.1	4.2
0666	Nienburg	52° 38' 36.3879"	9° 12' 22.86571"	86.7403	2.3	4.1	4.2
0676	Celle	52° 37' 32.86876"	10° 04' 44.03664"	106.3453	2.3	4.1	4.2

Cada uma das soluções padrão foi obtida do processamento tipo *Float* com o GEONAP. As coordenadas da solução padrão e os respectivos desvios padrão, para cada uma das posições de msd2, estão apresentadas na Tabela 6.7.

Considerou-se como “posição esperada” inicial, para a antena msd2, a solução padrão obtida com a antena msd2 colocada na posição 1. Essa coordenada vertical foi, então, reduzida das diferenças entre as alturas da antena msd2, medidas em cada uma das posições utilizadas, resultando nas “posições esperadas” apresentadas na Figura 6.29. A diferença entre os valores obtidos e esperados foi de 2 mm para a posição 3, de 5 mm para a posição 4 e de 6 mm para a posição 5. Os valores de altitude obtidos para as posições 1 e 2 corresponderam exatamente aos valores esperados nas respectivas posições.

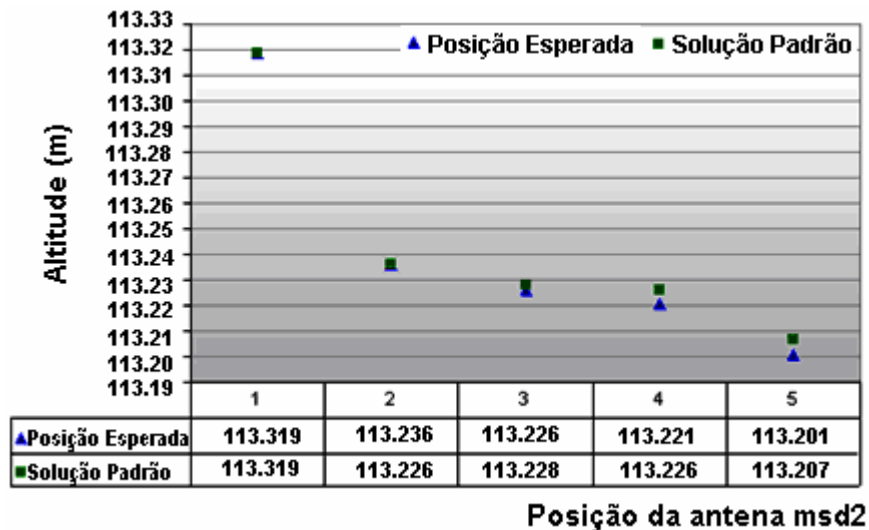


Figura 6.29: Comparação entre as altitudes esperadas e as obtidas com a solução padrão.

Na Figura 6.30 está esquematizado as variações de altitude da antena msd2: reais e as detectadas com a solução padrão obtida de um tempo de rastreamento de 48 horas.

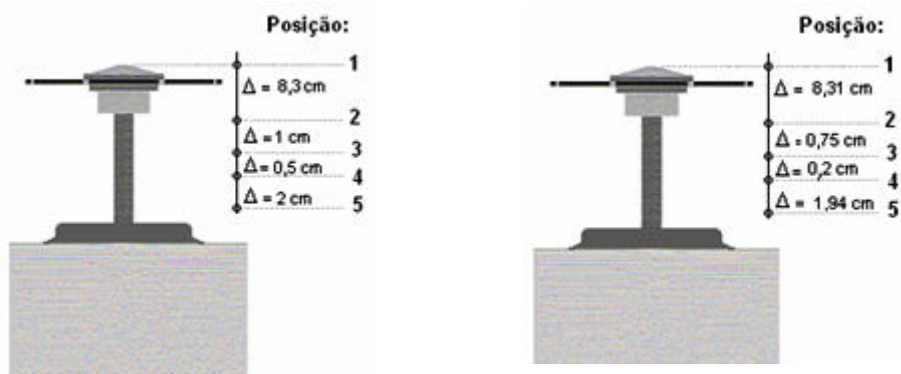


Figura 6.30: Esquema de posições da antena msd2.

Com relação aos desvios padrão, os piores resultados correspondem às coordenadas de msd1 e msd2. A Figura 6.31 apresenta o desvio padrão das coordenadas referentes à solução padrão para a antena msd2 na posição 1.

Tabela 6.7: Coordenadas no WGS84 da solução padrão (experimento 2)

Estação	Latitude	Longitude	Altura geométrica (m)	S_j (mm)	S_l (mm)	S_h (mm)
Msd2 na posição 1						
0640	52° 24' 27.1146"	9° 48' 5.95160"	123.7356	1	1.1	1.1
0652	51° 59' 16.5050"	9° 48' 16.8983"	149.7315	1.7	2	2
0657	52° 06' 21.0809"	9° 21' 12.3474"	140.5072	1.7	2	2
0663	52° 08' 57.5979"	9° 54' 34.9907"	218.1089	1.7	2	2
0665	52° 40' 40.7009"	9° 36' 55.9377"	84.5952	1.7	2	2
0666	52° 38' 36.3879"	9° 12' 22.8657"	86.7398	1.7	2	2
0676	52° 37' 32.8688"	10° 4' 44.0366"	106.3448	1.7	2	2
msd1	52° 23' 8.08570"	9° 42' 43.8715"	113.3119	3.1	6	6.2
msd2	52° 23' 8.29760"	9° 42' 43.6167"	113.3189	4.2	9.4	9.7
Msd2 na posição 2						
0640	52° 24' 27.1146"	9° 48' 5.95160"	123.7357	1.3	1.4	1.4
0652	51° 59' 16.5051"	9° 48' 16.8982"	149.7337	2.2	2.6	2.6
0657	52° 06' 21.0810"	9° 21' 12.3474"	140.5075	2.2	2.6	2.6
0663	52° 08' 57.5980"	9° 54' 34.9907"	218.1123	2.2	2.6	2.6
0665	52° 40' 40.7009"	9° 36' 55.9377"	84.5935	2.2	2.6	2.6
0666	52° 38' 36.3879"	9° 12' 22.8657"	86.7361	2.2	2.6	2.6
0676	52° 37' 32.8687"	10° 4' 44.0366"	106.3441	2.2	2.6	2.6
msd1	52° 23' 8.08580"	9° 42' 43.8716"	113.3060	3.9	7.7	8
msd2	52° 23' 8.29760"	9° 42' 43.6167"	113.2358	5.3	11.8	12.2
Msd2 na posição 3						
0640	52° 24' 27.1146"	9° 48' 5.95160"	123.7356	0.7	0.7	0.7
0652	51° 59' 16.5050"	9° 48' 16.8982"	149.7309	1.2	1.5	1.5
0657	52° 06' 21.0810"	9° 21' 12.3474"	140.5070	1.2	1.5	1.5
0663	52° 08' 57.5979"	9° 54' 34.9907"	218.1097	1.2	1.5	1.5
0665	52° 40' 40.7009"	9° 36' 55.9378"	84.5950	1.2	1.5	1.5
0666	52° 38' 36.3879"	9° 12' 22.8657"	86.7393	1.2	1.5	1.5
0676	52° 37' 32.8688"	10° 4' 44.0367"	106.3456	1.2	1.5	1.5
msd1	52° 23' 8.08570"	9° 42' 43.8717"	113.3069	2	3.9	4
msd2	52° 23' 8.29760"	9° 42' 43.6168"	113.2283	2.6	5.6	5.9
Msd2 na posição 4						
0640	52° 24' 27.11454"	9° 48' 5.95163"	123.7353	2	1.9	2.2
0652	51° 59' 16.50501"	9° 48' 16.8982"	149.7238	3.1	2.7	3.9
0657	52° 06' 21.08090"	9° 21' 12.3475"	140.5055	3.1	2.7	3.9
0663	52° 08' 57.59794"	9° 54' 34.9905"	218.1031	3.1	2.7	3.9
0665	52° 40' 40.70090"	9° 36' 55.9378"	84.6021	3.1	2.7	3.9
0666	52° 38' 36.38790"	9° 12' 22.8655"	86.748	3.1	2.7	3.9
0676	52° 37' 32.86878"	10° 04' 44.0368"	106.3464	3.1	2.7	3.9
msd1	52° 23' 8.085620"	9° 42' 43.8714"	113.3049	4.8	3.7	9.7
msd2	52° 23' 8.297540"	9° 42' 43.6167"	113.2263	6.3	4.4	14.2
Msd2 na posição 5						
0640	52° 24' 27.1146"	9° 48' 5.95160"	123.7357	0.5	0.5	0.5
0652	51° 59' 16.5050"	9° 48' 16.8983"	149.7312	0.9	1	1
0657	52° 06' 21.0809"	9° 21' 12.3474"	140.5068	0.9	1	1
0663	52° 08' 57.5980"	9° 54' 34.9907"	218.1099	0.9	1	1
0665	52° 40' 40.7009"	9° 36' 55.9378"	84.5947	0.9	1	1
0666	52° 38' 36.3879"	9° 12' 22.8658"	86.7398	0.9	1	1
0676	52° 37' 32.8688"	10° 4' 44.0366"	106.3449	0.9	1	1
msd1	52° 23' 8.08570"	9° 42' 43.8715"	113.3139	1.5	3	3.2
msd2	52° 23' 8.2976"	9° 42' 43.6167"	113.2069	2.1	4.5	4.9

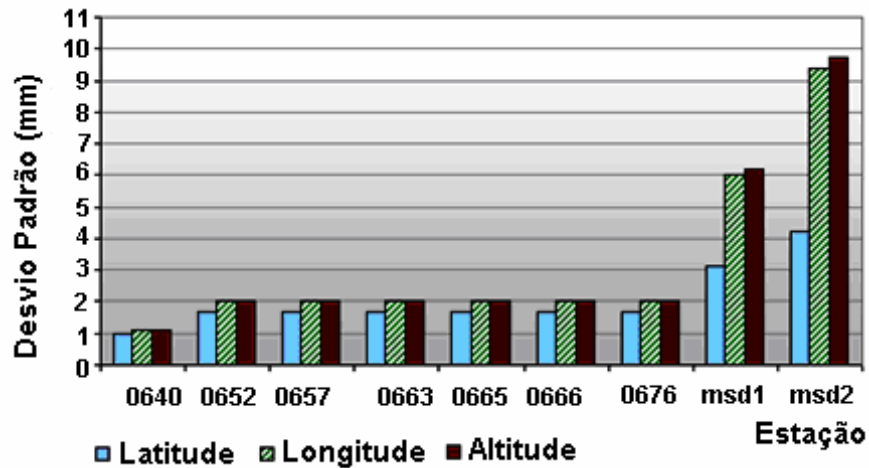


Figura 6.31: Desvio padrão das coordenadas referentes à solução padrão do experimento 2.

Conforme apresentado na Tabela 6.7, os desvios padrão mantiveram-se na mesma ordem de grandeza de acordo com a coordenada a que se referem, isso em valores médios (considerando todas as estações observadas) representou menos que 4 mm para a latitude e menos que 5mm para a longitude e altitude. As estações de referência observadas apresentaram desvio padrão pequeno, sendo que os valores mais elevados foram verificados nas soluções obtidas para a antena msd2 na posição 4 e foram inferiores a 4 mm. Por outro lado, as soluções padrão obtidas para as antenas localizadas sobre o teto de medições, msd1 e msd2, apresentaram desvio padrão máximo da ordem de 1.5 cm.

6.3.2.2 Análise do tempo de observação

Para análise da influência da duração da observação na detecção de deslocamentos verticais, foram processados no GEONAP, as observações de todas as estações envolvidas em períodos de 4, 12 e 24 horas. Os resultados foram processados no GNPNET considerando-se fixas as coordenadas das sete estações SAPOS (localizadas em Hannover, Alfed, Hameln, Hildesheim, Schwarmstedt, Nienburg e Celle). As altitudes, da antena msd2, assim determinadas foram comparadas com as coordenadas verticais da solução padrão (Figura 6.32). Em valores médios as discrepâncias em relação à solução padrão foram da ordem de 1 cm considerando-se os valores obtidos para 4 horas de observação, 0.5 cm para os obtidos com 12 horas e cerca de 0.3 cm para os obtidos com 24 horas. Tal como discutido para os resultados do experimento 1 (item 5.3.1.2), verifica-se que maiores períodos de observação contribuem para obtenção de resultados mais acurados.

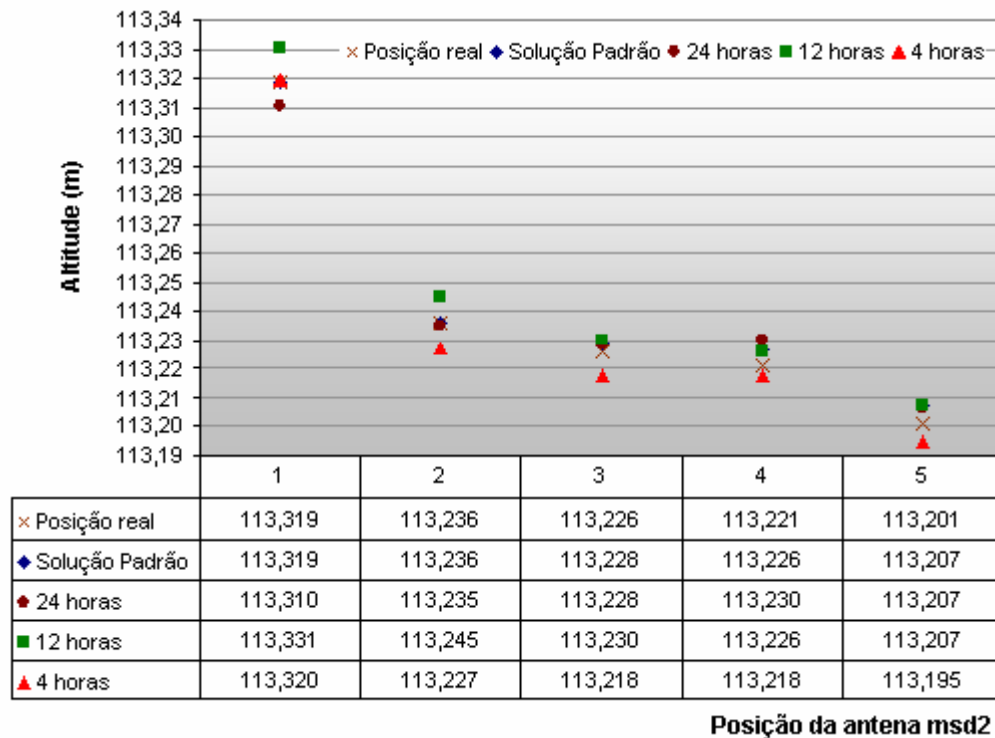


Figura 6.32: Altitudes da antena msd2 obtidas com diferentes períodos de observação e 7 estações de referência.

Do ponto de vista da utilização do GPS na detecção de pequenos deslocamentos verticais, a Figura 6.33 apresenta a diferença de altitude para as diferentes épocas simuladas, utilizando-se os resultados obtidos com os diferentes períodos de observação. Pode-se verificar que, mesmo com apenas quatro horas de observação, as diferenças entre as altitudes obtidas correspondem aos deslocamentos impostos às antenas com uma diferença máxima de 1 cm na simulação do deslocamento da posição 1 para a posição 2.

No que se refere ao desvio padrão, verifica-se um comportamento bem definido de redução desses valores com o aumento no período de observação, isso representou em valores médios cerca de 1 cm para 4 horas, 5 mm para 12 horas e 4 mm para 24 horas. Assim sendo, para determinação precisa de altitude e diferença de altitude é necessário a observação, com equipamentos GPS, por longos períodos. Sendo evidente nos conjuntos de dados apresentados nas Figuras 6.32, 6.33 e 6.34 o ganho de acurácia e precisão com o aumento no referido tempo.

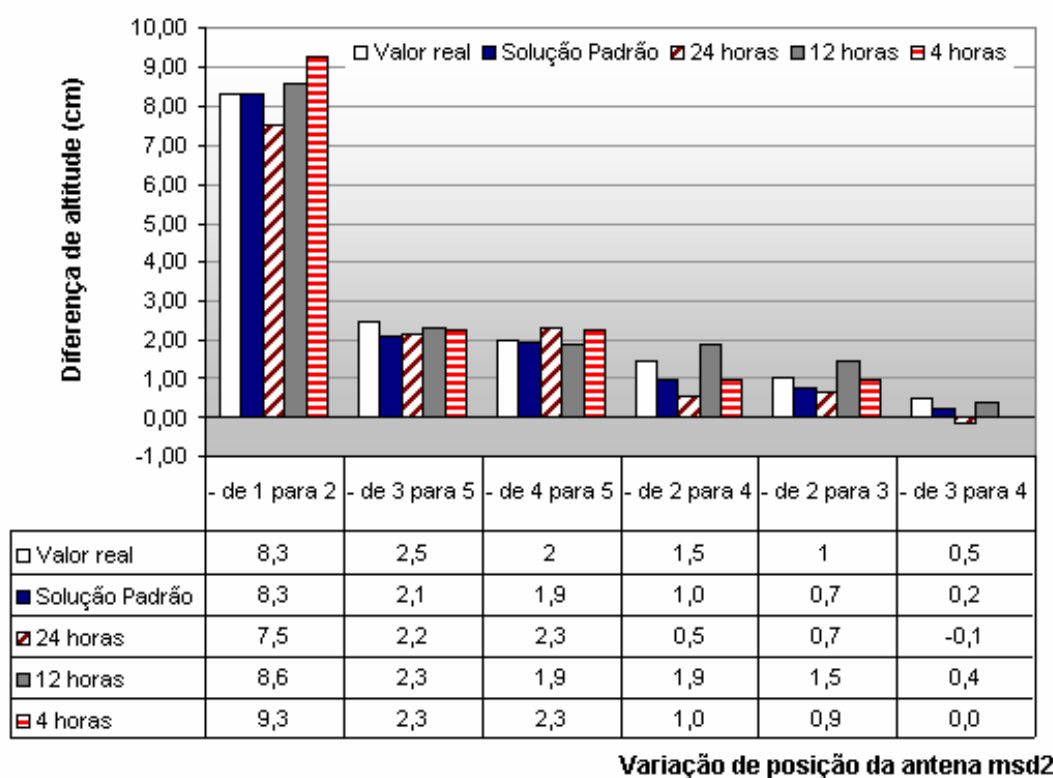


Figura 6.33: Diferenças de altitudes da antena msd2 obtidas com diferentes períodos de observação e 7 estações de referência.

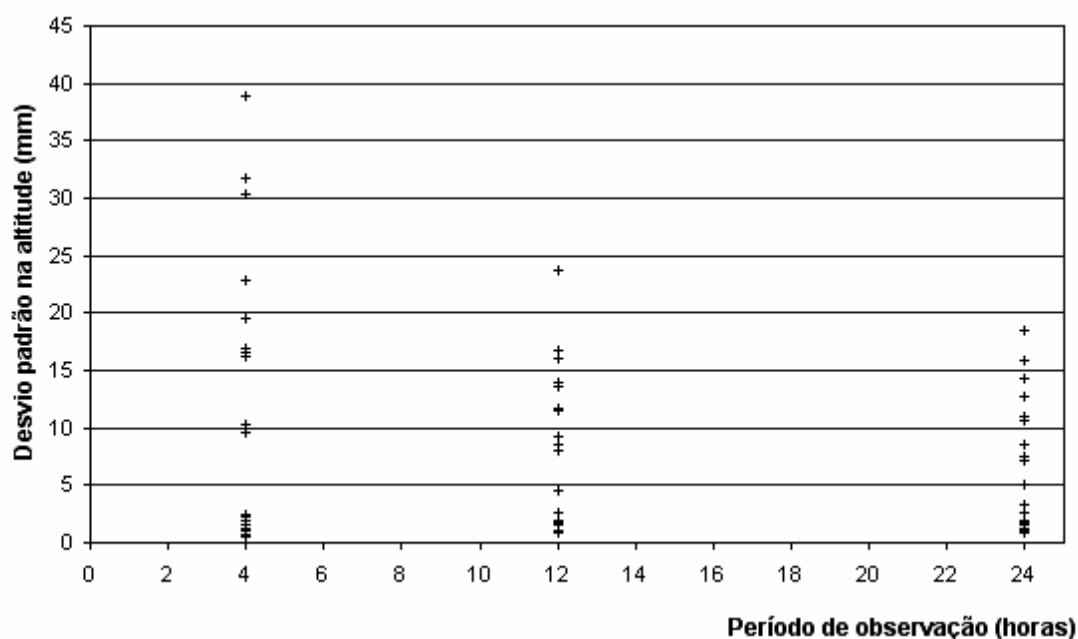


Figura 6.34: Desvio padrão na altitude da antena msd2 obtido com diferentes períodos de observação e 7 estações de referência.

6.3.2.3 Análise da distância até a estação de referência

Com base na discussão apresentada anteriormente, no item 6.3.1.3, foram realizados processamentos, em rede, com o GEONAP, das observações coletadas num período de 24 horas, mantendo-se fixas apenas as coordenadas da estação SAPOS localizada em Hannover. Os resultados foram processados no GNPNET, sendo que em cada ajustamento foi considerada apenas uma estação de referência, neste contexto, as estações analisadas foram 0640, 0665, 0663, 0657 e 0652, que distam, respectivamente, 6km, 29 km, 36 km, 39 km e 44 km de msd2.

A Figura 6.35 mostra a discrepância nas coordenadas verticais com relação à solução padrão, como era de se esperar, os valores tornam-se mais afastados do valor real quanto maior a distância da estação de referência.

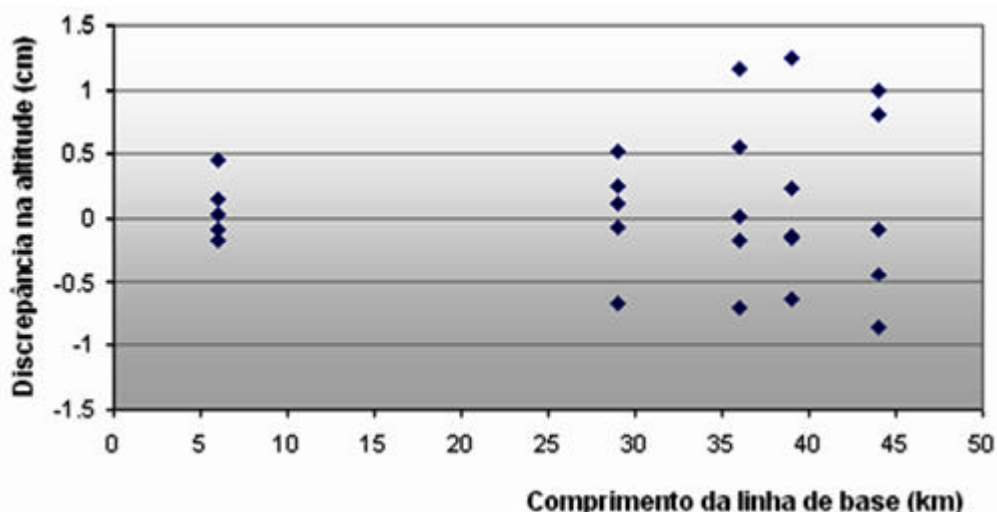


Figura 6.35: Discrepância na altitude entre a solução padrão e o processamento com 24 horas de observação, em cada uma das 5 posições, para diferentes comprimentos de linha de base.

Com relação aos valores de discrepância da latitude (Figura 6.36a), os resultados mostraram-se bastante próximos dos valores adotados para a solução padrão, sendo que a média da variação em torno deste valor inferior a 2 mm. A discrepância da longitude (Figura 6.36b), por outro lado, apresentou variação maior sem relação evidente com o distanciamento da estação de referência, em valores médios isso representou uma discrepância inferior a 4 mm.

No que se refere ao desvio padrão (Figura 6.37), não se verifica uma tendência de crescimento com o aumento no distanciamento da estação de referência. Em valores médios, os desvios padrão da latitude, longitude e altitude foram da ordem de 1 cm, 1.5 cm e 1.5 cm, respectivamente.

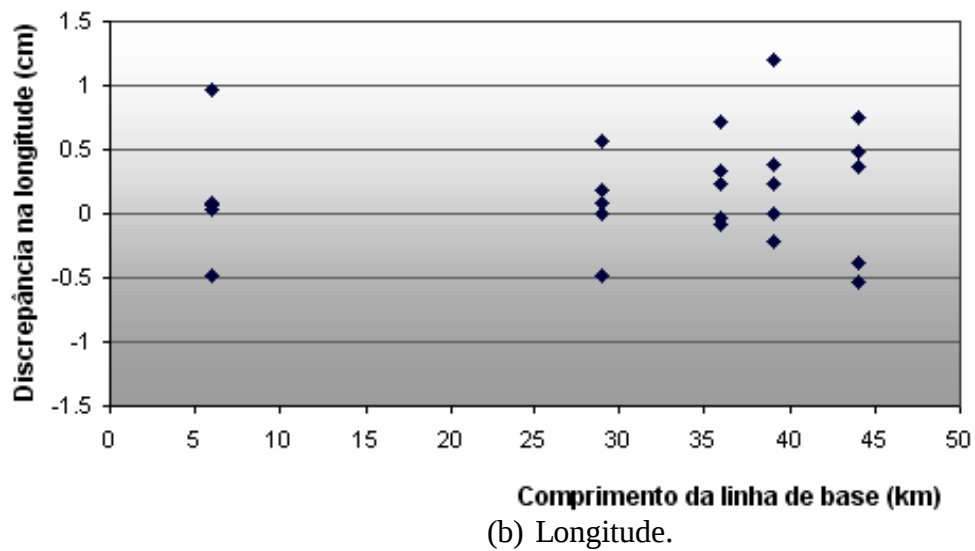
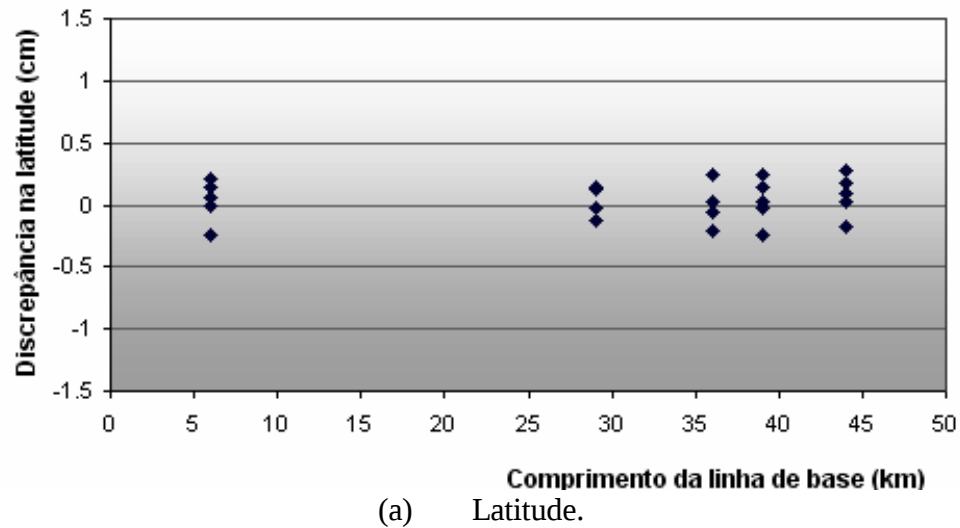


Figura 6.36: Discrepância entre a solução padrão e o processamento com 24 horas de observação, em cada uma das 5 posições, para diferentes comprimentos de linha de base.

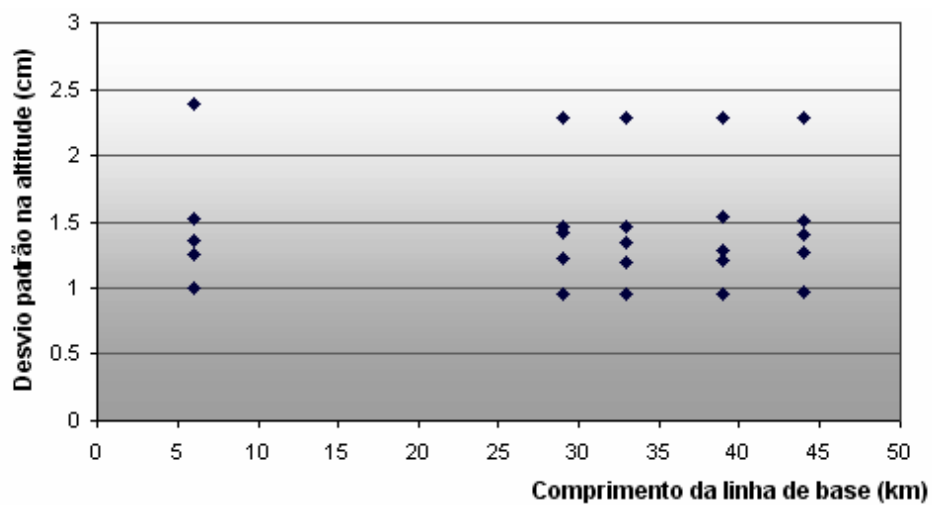
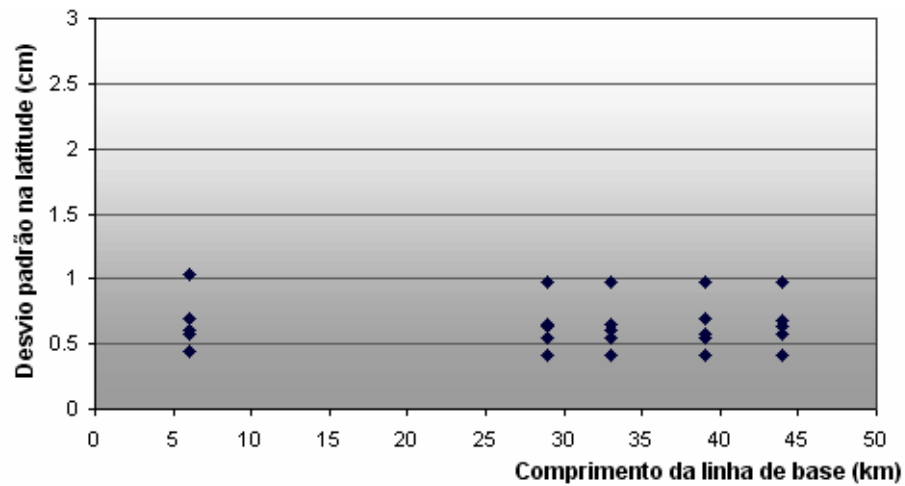
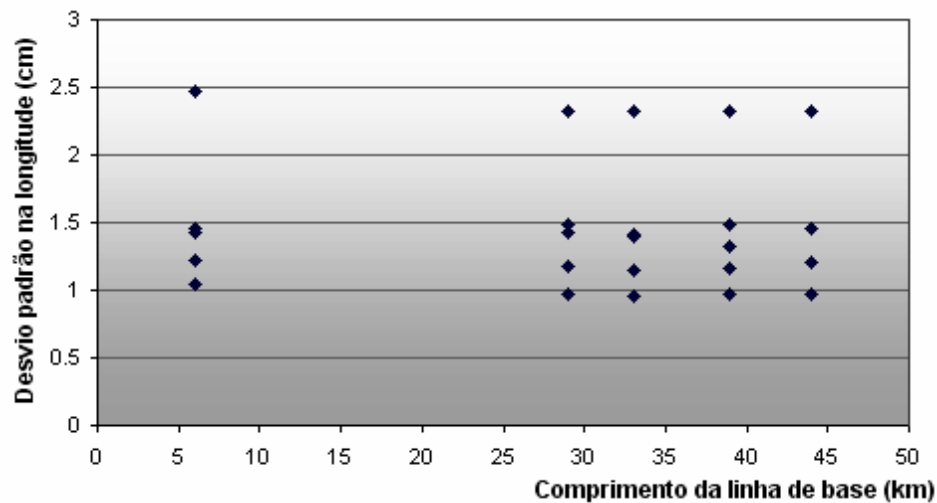


Figura 6.37: Desvio padrão na altitude com 24 horas de observação para diferentes comprimentos de linha de base.



(a) Latitude.



(b) Longitude.

Figura 6.38: Desvio padrão com 24 horas de observação para diferentes comprimentos de linha de base.

As diferenças de altitude, da antena msd2, obtidas com o GPS foram comparadas com os deslocamentos reais e a discrepância média com relação aos valores verdadeiros, considerando-se diferentes comprimentos de linha de base, está apresentada na Figura 6.39. Como se pode observar o comprimento da linha de base influencia claramente na capacidade de detecção dos deslocamentos verticais, ou seja, os valores obtidos com as estações de referência mais próximas são os que mais se aproximam dos valores reais.

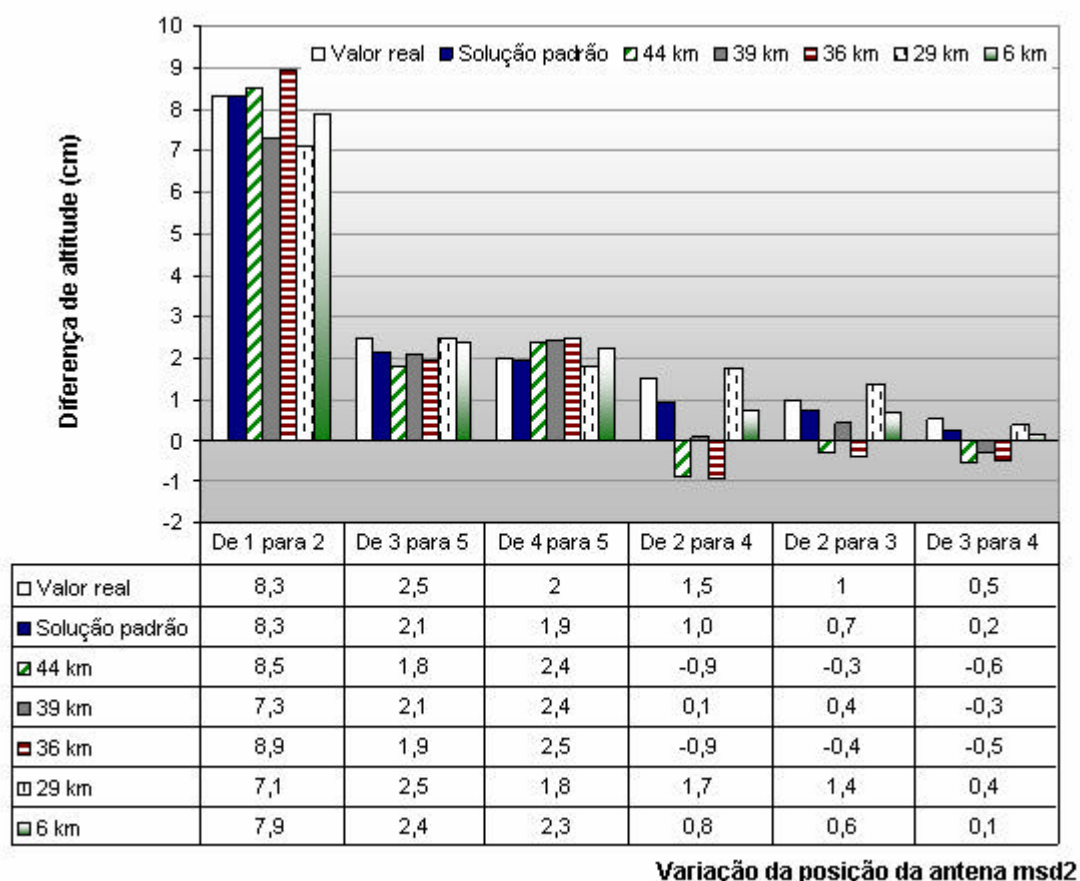


Figura 6.39: Diferenças de altitude da antena msd2 com 24 horas de observação para diferentes comprimentos de linha de base.

Nesse contexto, comparou-se o desempenho dos resultados obtidos na detecção de deslocamento vertical com diferentes comprimentos da linha de base (Tabela 6.8). Verifica-se que mesmo com o emprego de estações de referências distantes é possível detectar a ocorrência de deslocamento vertical de um ponto de observação. Por outro lado, linhas de base mais longas podem apresentar falsa correspondência entre a direção real do movimento ocorrido e a direção do movimento detectado, como ocorreu com o emprego das estações com mais de 29 km de distância (Figura 6.39). A falsa correspondência de direção foi constada nos deslocamentos de menor magnitude, da ordem de 1 cm ou menor. Quanto aos deslocamentos maiores que 1 cm, todos os resultados mostraram correspondência de direção, sendo que a diferença máxima entre o deslocamento real e o detectado foi da ordem de 1cm.

Assim, recomenda-se priorizar o emprego de estações de referência tão próximas quanto possível, garantindo uma boa distribuição com relação à toda a rede, de modo que seja possível detectar a direção correta e a magnitude do movimento ocorrido.

Tabela 6.8: Análise dos deslocamentos detectados com 24 horas de observação para diferentes comprimentos de linha de base

Estação de Referência	Comprimento da linha de base (km)	Variação da posição de msd2	Deslocamento Real (cm)	Correspondência na direção do deslocamento	Diferença em relação ao deslocamento real (cm)
0640	6 km	De 1 para 2	8.3	sim	0.4
		De 3 para 5	2.5	sim	-0.3
		De 4 para 5	2.0	sim	-0.4
		De 2 para 4	1.5	sim	0.2
		De 2 para 3	1.0	sim	0.1
		De 3 para 4	0.5	sim	0.1
0665	29 km	De 1 para 2	8.3	sim	1.2
		De 3 para 5	2.5	sim	-0.4
		De 4 para 5	2.0	sim	0.1
		De 2 para 4	1.5	sim	-0.7
		De 2 para 3	1.0	sim	-0.7
		De 3 para 4	0.5	sim	-0.2
0663	36 km	De 1 para 2	8.3	sim	-0.6
		De 3 para 5	2.5	sim	0.2
		De 4 para 5	2.0	sim	-0.6
		De 2 para 4	1.5	não	0.1 *
		De 2 para 3	1.0	não	0.3*
		De 3 para 4	0.5	não	0.2*
0657	39 km	De 1 para 2	8.3	sim	1.0
		De 3 para 5	2.5	sim	0.0
		De 4 para 5	2.0	sim	-0.5
		De 2 para 4	1.5	sim	0.9
		De 2 para 3	1.0	sim	0.3
		De 3 para 4	0.5	não	0.1*
0652	44 km	De 1 para 2	8.3	sim	-0.2
		De 3 para 5	2.5	sim	0.3
		De 4 para 5	2.0	sim	-0.5
		De 2 para 4	1.5	não	0.1*
		De 2 para 3	1.0	não	0.4*
		De 3 para 4	0.5	não	0.4*

* Diferenças em valores absolutos

6.3.2.4 Análise do número de estações de referência

Do mesmo modo que foi realizado no experimento anterior, aqui também foram processadas no GEONAP, e posteriormente ajustadas no GNPNET, apenas as estações de referência observadas nesse experimento. Assim, utilizando-se as informações dos 11 dias de observação (cerca de 264 horas) e mantendo-se fixas apenas as coordenadas da estação 0640, foram obtidas as coordenadas de referência, Tabela 6.6, com baixos valores de desvio padrão (valores máximos da ordem de 4 mm), que foram utilizadas na análise da influência do número de estações de referência.

Dando continuidade, então, ao estudo sobre o ajustamento em rede, investigou-se a quantidade de estações de referência necessárias para garantir a obtenção de resultados com alta precisão. Assim sendo, utilizou-se os resultados dos processamentos realizados com o GEONAP (fixando-se apenas as coordenadas da estação 0640), por um período de 4 horas (solução *Fixed*), 12 horas e 24 horas (ambas *Float*), nas simulações das diferentes estratégias de combinação das estações de referência. Essas estratégias foram empregadas, na fixação das coordenadas, no ajustamento com o GNPNET.

As diferentes estratégias utilizadas na fixação das coordenadas, nessa análise, foram:

1a. estratégia: as estações de referência consideradas são sete estações de referência da rede SAPOS (estratégia 7R) – Figura 6.40a

2a. estratégia: estações de referência consideradas - 0676, 0665 e 0666 (estratégia 3R), sendo que a distância entre a estação 0676 e 0665 é de 32 km e entre a estação 0665 e 0666 é 28 km - Figura 6.40b

3a. estratégia: estações de referência consideradas - 0676 e 0665 (estratégia 2R) -Figura 6.40c

4a. estratégia: estação de referência considerada é a 0665 – Figura 6.40d.

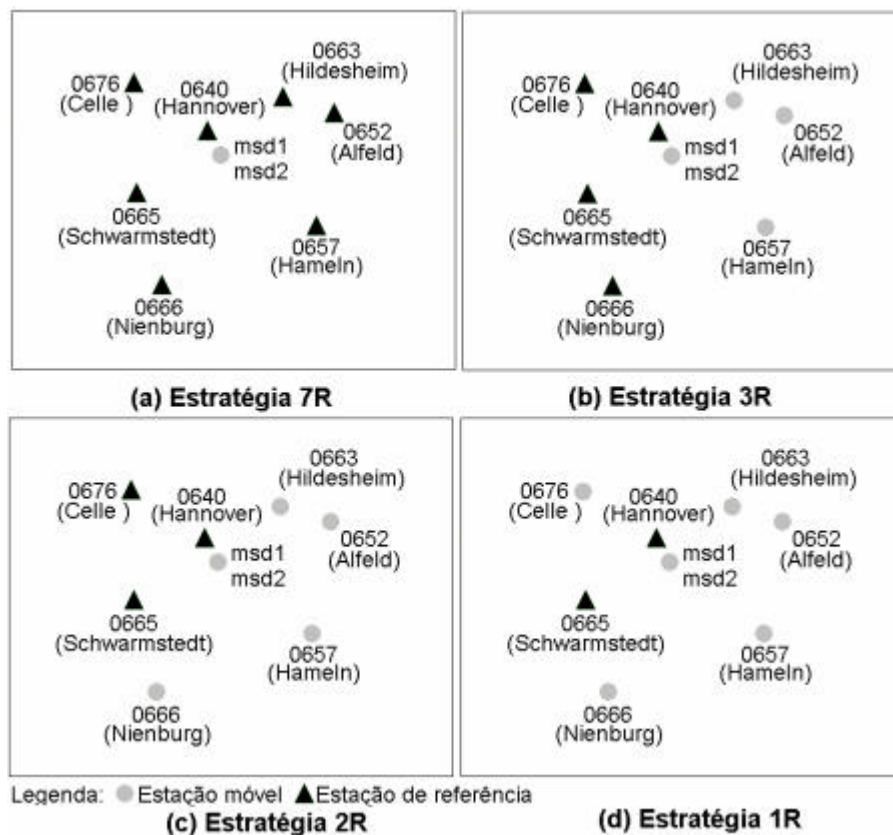
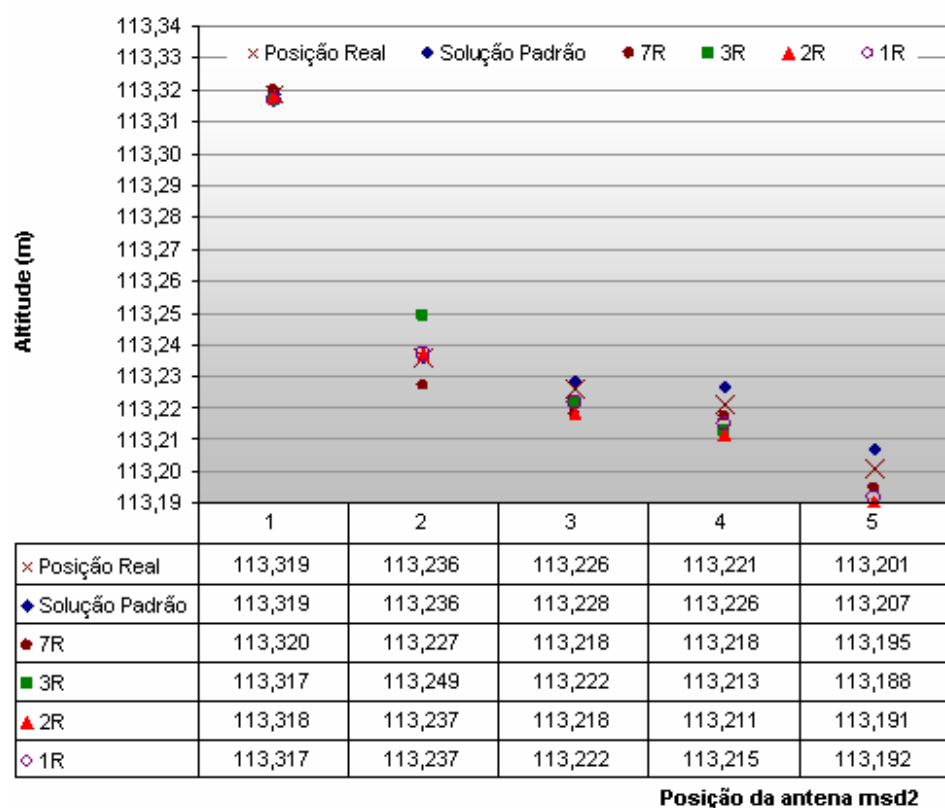
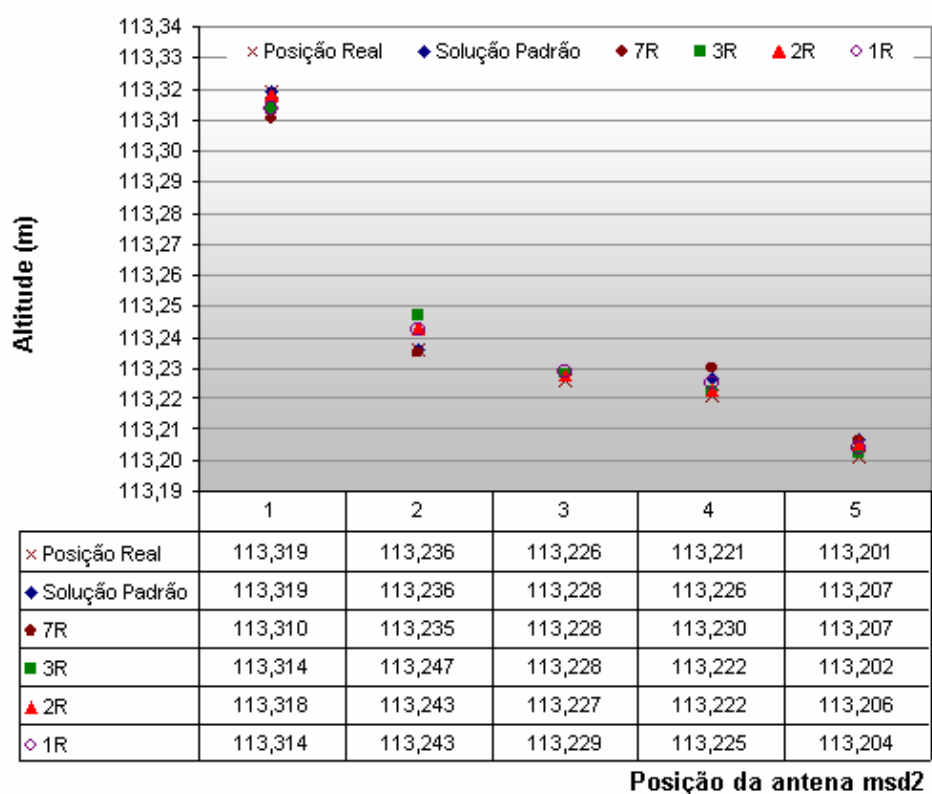


Figura 6.40: Distribuição das estações consideradas nas estratégias 7R, 3R, 2R e 1R.

A Figura 6.41 apresenta as altitudes obtidas com diferentes quantidades de estações de referência em dois períodos de observação distintos (4 e 24 horas).



(a) 4 horas de observação.



(b) 24 horas de observação.

Figura 6.41: Altitudes da antena msd2 obtidas com diferentes quantidades de estações de referência.

Comparou-se as variações de altitude, em relação ao valor real (solução padrão), para os resultados obtidos com uma, duas, três e sete estações de referência. Com o objetivo de simular um cenário típico de região costeira, as estações escolhidas nas estratégias 3R, 2R e 1R estão localizadas à esquerda do ponto monitorado, supondo-se que à direita encontra-se o mar.

Como pode ser verificado na Figura 6.41, a variação no número de estações de referência pode alterar a acurácia das coordenadas verticais, principalmente com curtos períodos de observação. Com o emprego de apenas uma estação de referência isso é bastante evidente, enquanto que para um período de observação de 24 horas (Figura 6.41b) a discrepância média na altitude é da ordem de 3 mm, a redução desse período para 4 horas provoca uma degradação, com relação ao valor real, em termos de valores médios, da ordem de 1 cm. Essa mesma alteração na ordem de grandeza da discrepância pode ser observado nos demais resultados considerando as diferentes estratégias utilizadas, Tabela 6.9. Pode-se concluir, portanto, que é possível obter coordenadas verticais com discrepâncias milimétricas, mesmo com o emprego de apenas uma estação de referência, desde que os resultados sejam coletados por longos períodos de observação.

Tabela 6.9: Discrepâncias na altitude em relação à solução padrão, em cm.

Quantidade de estações	Período de observação	Posição da antena msd2					Média dos valores absolutos
		1	2	3	4	5	
7	24 horas	0.8	0.1	0.0	-0.3	0.0	0.3
	12 horas	-1.2	-0.9	-0.2	0.0	0.0	0.5
	4 horas	-0.1	0.9	1.1	0.9	1.2	0.8
3	24 horas	0.5	-1.1	0.0	0.4	0.5	0.5
	12 horas	-0.9	-2.4	0.2	1.6	0.6	1.1
	4 horas	0.2	-1.3	0.6	1.4	1.9	1.1
2	24 horas	0.1	-0.7	0.1	0.4	0.1	0.3
	12 horas	-0.8	-1.9	0.1	0.9	0.0	0.7
	4 horas	0.1	-0.1	1.0	1.5	1.6	0.9
1	24 horas	0.5	-0.7	-0.1	0.1	0.3	0.3
	12 horas	-1.2	-2.1	0.0	0.9	0.2	0.9
	4 horas	0.2	-0.1	0.7	1.1	1.5	0.7

Com relação ao desvio padrão, conforme apresentado na Figura 6.42. os valores tanto para a latitude quanto para a longitude apresentaram correlação com o período de observação adotado, no que diz respeito à quantidade de estações de referência, entretanto, os valores permaneceram praticamente inalterados com a variação na quantidade de estações de

referência consideradas. Os valores máximos observados foram da ordem de 1 cm para a latitude, obtido com o processamento dos dados de 4 horas, e menor que 2 cm para a longitude correspondendo ao período de 12 horas.

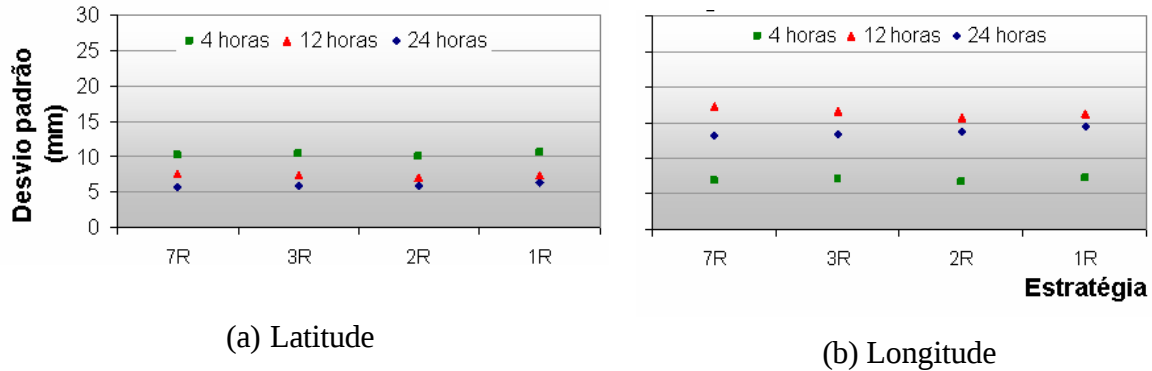


Figura 6.42: Desvio padrão com diferentes quantidades de estações de referência e períodos de observação.

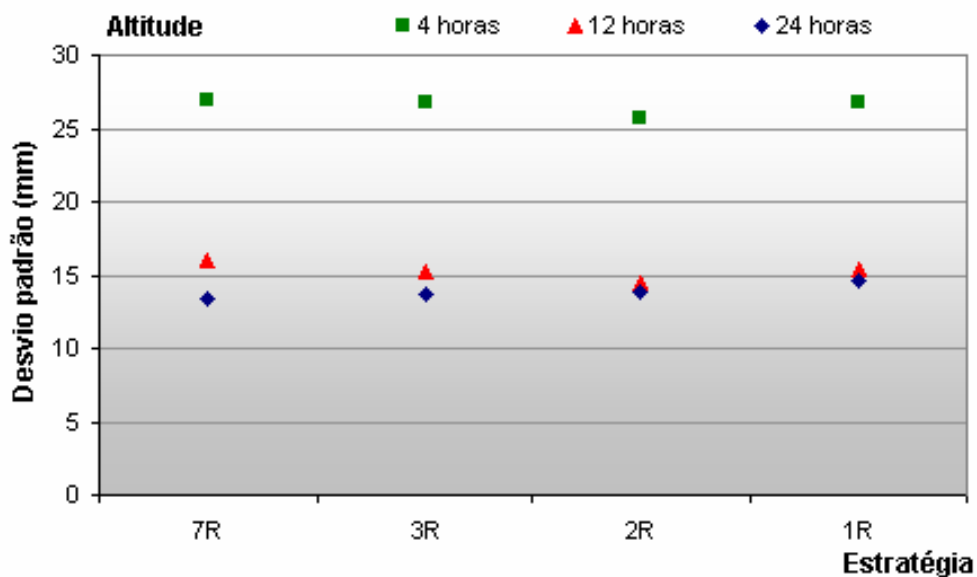


Figura 6.43: Desvio padrão na altitude com diferentes quantidades de estações de referência e períodos de observação.

Os desvios padrão da altitude, assim como os da latitude e da longitude, não apresentaram variação considerável com o aumento no número de estações de referência, mas, por outro lado, pode-se verificar que para um mesmo número de estações de referência, o ganho de precisão com o aumento no período de observação é evidente. Nesse sentido, como era de se esperar, os melhores resultados corresponderam aos obtidos com maior período de observação, ou seja, com 12 e com 24 horas.

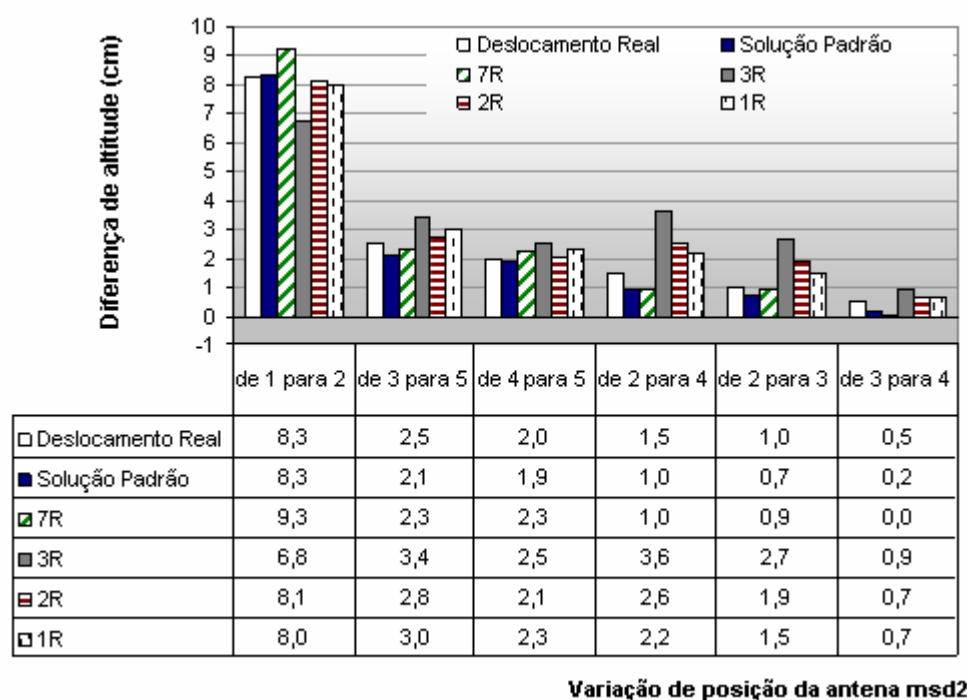


Figura 6.44: Diferenças de altitudes da antena msd2 obtidas com diferentes quantidades de estações de referência para um período de observação de 4 horas.

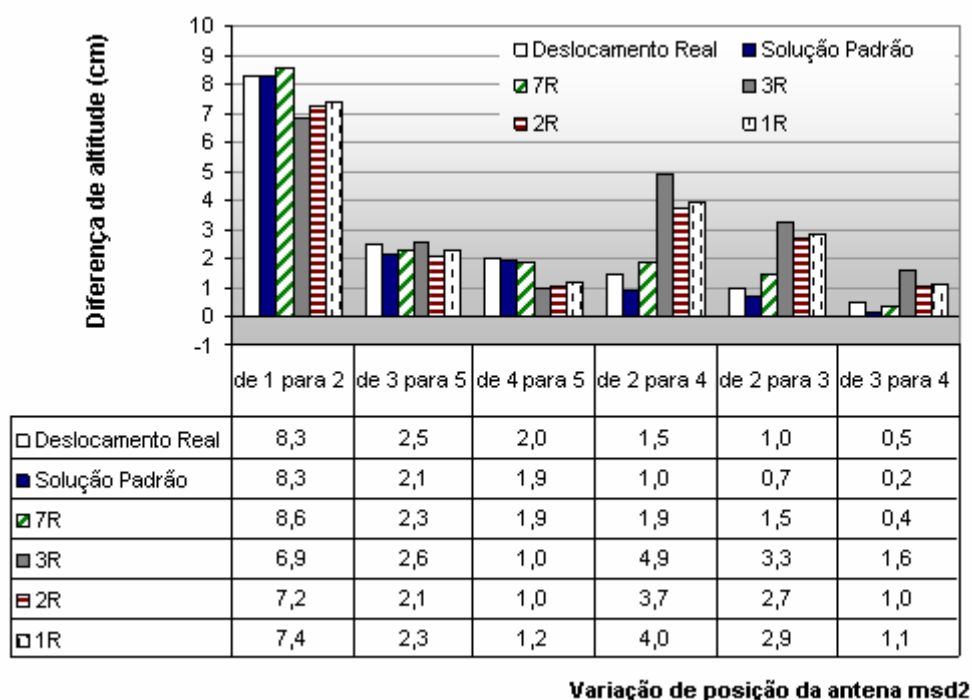


Figura 6.45: Diferenças de altitudes da antena msd2 obtidas com diferentes quantidades de estações de referência para um período de observação de 12 horas.

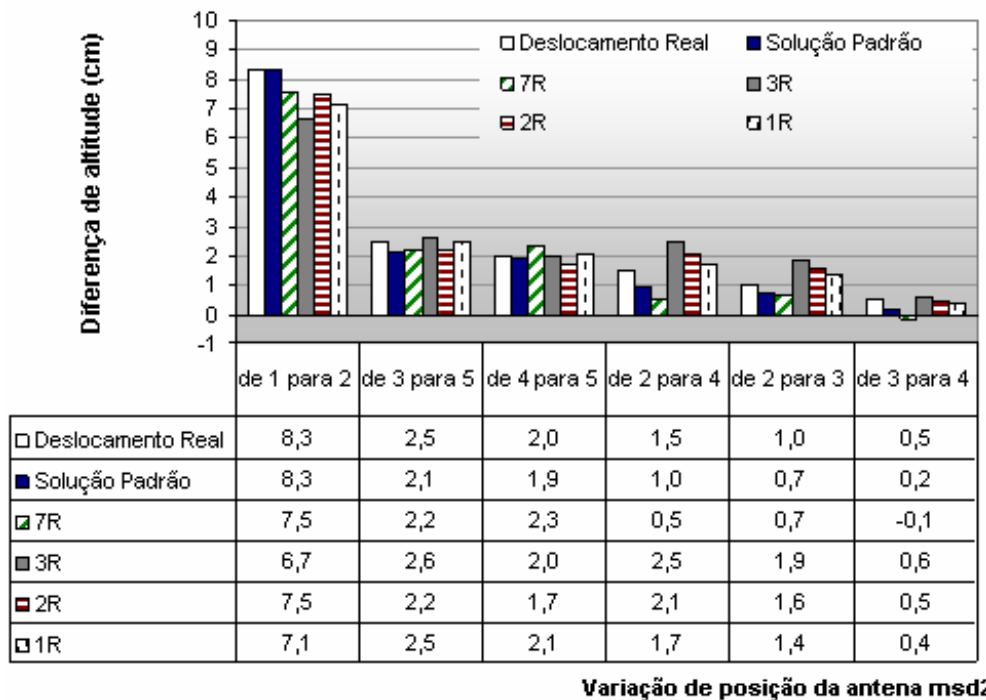


Figura 6.46: Diferenças de altitudes da antena msd2 obtidas com diferentes quantidades de estações de referência para um período de observação de 24 horas.

Independente do período de observação e da quantidade de estações de referência, as Figuras 6.44, 6.45 e 6.46 indicam que é possível detectar deslocamentos verticais da ordem de 2 cm com uma discrepância média da ordem de 5 mm. Os resultados obtidos com 24 horas de observação mostram que esse período é o mais eficiente na detecção de deslocamentos verticais, principalmente os de menor magnitude. Analisando-se o comportamento para deslocamentos da ordem de 2 cm, 1 cm e 0.2 cm – Tabela 6.10, verifica-se que foi possível a detecção de deslocamentos de tal ordem com precisão milimétrica apenas utilizando-se 7 estações de referência.

Assim sendo, na impossibilidade de utilização de estações de referência bem distribuídas ao redor do ponto de monitoramento, estratégia 7R, deve-se priorizar a necessidade de longos períodos de observação, pelo menos 24 horas de observação, sendo possível obter uma diferença entre o deslocamento real e o detectado de até 1.5 cm, como visto na solução com 3 estações de referência (Tabela 6.10).

Verificou-se que é possível obter altitudes com discrepância média da ordem de 3 mm utilizando-se uma única estação de referência, desde que as observações sejam coletadas por longos períodos (Figura 6.47). Além disso, o aumento no período de observação resultou em ganho de precisão para a mesma quantidade de estações de referência (Figura 6.48). Nesse contexto, comparando-se os resultados obtidos com 12 horas e 24 horas (Figuras 6.45 e 6.46) e apenas uma estação de referência, verifica-se que o aumento no período de observação

resultou numa diminuição na discrepância média do deslocamento vertical de cerca de 1.5 cm para menos que 0.6 cm.

Tabela 6.10: Discrepâncias em relação à solução padrão, em cm.

Período	Deslocamentos reais:		
	2.5	1.5	0.5
1R			
4 horas	-0.9	-1.2	-0.5
12 horas	-0.2	-3.0	-0.9
24 horas	-0.4	-0.7	-0.2
2R			
4 horas	-0.7	-1.6	-0.5
12 horas	0.0	-2.7	-0.8
24 horas	-0.1	-1.1	-0.3
3R			
4 horas	-1.3	-2.6	-0.7
12 horas	-0.5	-3.9	-1.4
24 horas	-0.5	-1.5	-0.4
7R			
4 horas	-0.2	0.0	0.2
12 horas	-0.2	-0.9	-0.2
24 horas	-0.1	0.5	0.1

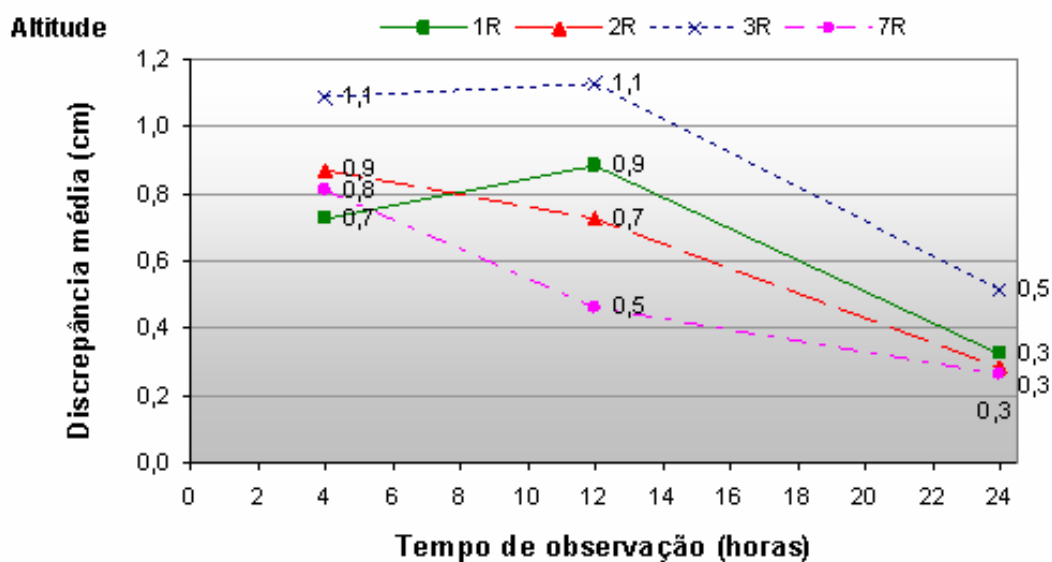


Figura 6.47: Discrepâncias na altitude com relação à solução padrão para diferentes períodos de tempo e quantidade de estações de referência.

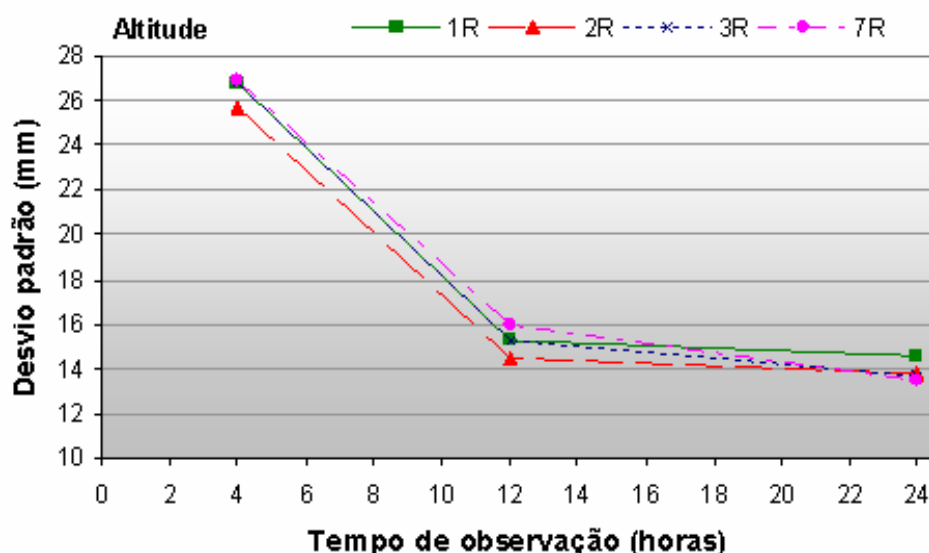


Figura 6.48: Desvios padrão na altitude para diferentes períodos de tempo e quantidade de estações de referência..

6.3.2.5 Análise da limitação na capacidade de detecção de deslocamentos verticais sub-centimétricos

Para verificar o comportamento dos resultados na ausência de deslocamentos verticais, analisou-se as coordenadas de altitude, para a antena msd1, obtidas do processamento com o GEONAP, considerando diferentes períodos de observação (4, 12 e 24 horas). Os resultados obtidos com considerando-se fixas as coordenadas das sete estações SAPOS, apresentados na Figura 6.49, mostraram-se mais próximos da solução padrão com o aumento no período de observação. A discrepância máxima ocorreu para a simulação 1, da ordem de 1 cm, isso pode indicar alguma alteração nas condições atmosféricas, uma vez que essa alta discrepância também ocorreu na antena msd2 quando na realização da simulação 1 (Tabela 6.9). Os resultados das outras simulações mostraram uma discrepância da ordem de 5 mm ou menos. No que se refere ao desvio padrão, os resultados apresentados na Figura 6.50 indicam ganho de precisão com o aumento no período de observação, sendo que os melhores valores, obtidos com o período de 48 horas, e são inferiores a 1 cm.

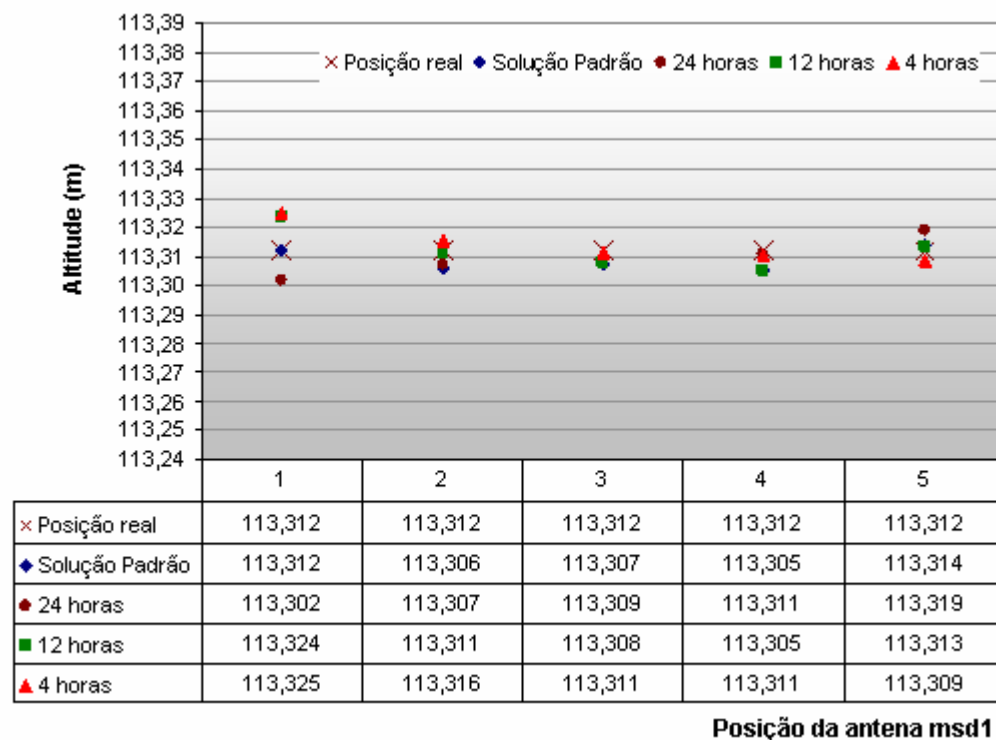


Figura 6.49: Altitudes da antena msd1 obtidas com diferentes períodos de observação e 7 estações de referência.

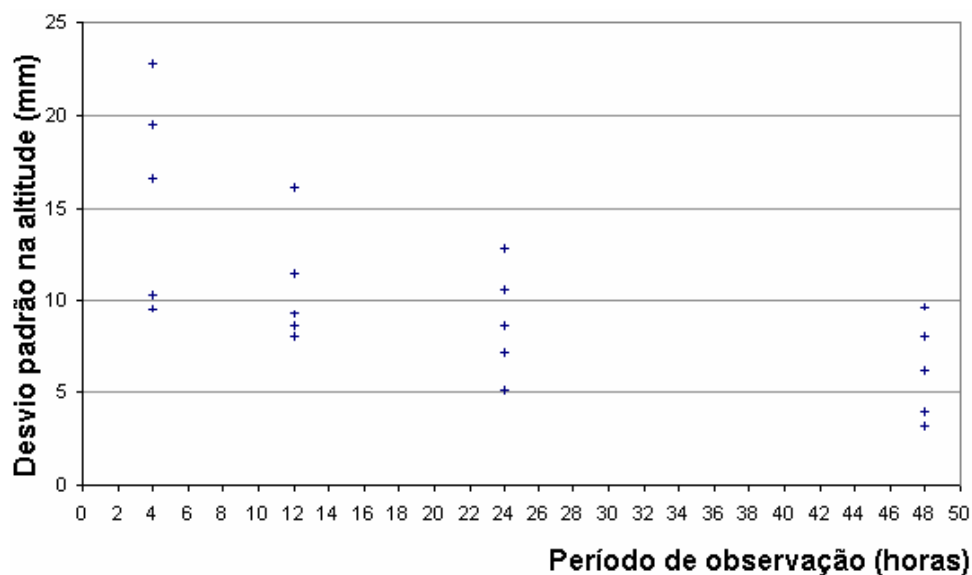


Figura 6.50: Desvio padrão da altitude (antena msd1) com diferentes períodos de observação e 7 estações de referência.

Apesar de não estar sujeita a deslocamentos verticais, a variação, mesmo que da ordem de alguns milímetros, verificada na antena msd1, pode ser resultante de variação no centro de fase da antena, uma vez que o tipo de antena utilizado no teto de medições, da marca

ASHTECH, do *Institut für Erdmessung* da Universidade de Hannover é diferente do tipo utilizado nas estações SAPOS, da marca TRIMBLE. Além disso, foram utilizadas informações sobre as variações do centro de fase das antenas através de arquivos de calibração das antenas, na ocasião do processamento das observações, apenas para as antenas de referência.

Além disso, de acordo com Menge (2003), na contabilização dos erros associados à determinação da altitude, mesmo com o emprego de antenas iguais orientadas na mesma direção ou com os valores de PCV absolutos disponíveis, pode-se esperar um efeito absoluto do ruído nas medições, menor ou igual a 3 mm. O ruído é portanto, um agente limitador da capacidade de detecção dos deslocamentos verticais, devendo-se considerar, nesse contexto, como possível ocorrência de variação de altitude, apenas os valores superiores ao mesmo.

6.3.2.6 Análise de obstrução

Os dados coletados no experimento 2 apresentam uma grande diferença com relação à situação apresentada em Recife. Se por um lado o teto de medições de Hannover apresenta-se completamente livre para coleta das observações, ou seja, sem qualquer obstrução que impossibilite o recebimento do sinal pela antena GPS, o mesmo não pode ser afirmado com relação à situação que se apresenta na área de estudo. O bairro de Boa Viagem, como já foi dito anteriormente, apresenta uma grande densidade populacional que se materializa na quantidade de edifícios.

De forma geral, um fator que afeta a precisão é a geometria formada pela localização dos satélites em relação uns aos outros com relação ao receptor GPS. Ou seja, se um receptor GPS estiver localizado sob 4 satélites e todos estiverem na mesma região do céu, a sua geometria é considerada pobre e, neste caso, o receptor pode não ser capaz de se localizar, pois todas as medidas de distância provém da mesma direção geral. Em outras palavras, isso significa que a triangulação é pobre e a área comum da intersecção das medidas é muito grande e a área onde o receptor busca sua posição corresponde a um grande espaço. Assim sendo, mesmo que o receptor mostre uma posição, a precisão desta certamente não é boa. Por outro lado, considerando os mesmos 4 satélites, espalhados em todas as direções, poderá se verificar que a precisão melhora drasticamente, pois a geometria é ótima e as medidas provém de várias direções. A geometria dos satélites ganha mais importância quando se usa o receptor GPS próximo a edifícios ou em áreas montanhosas ou vales, pois com o bloqueio de algum satélite, a posição relativa dos demais satélites determinará a precisão, ou mesmo se a posição pode

ser obtida. Quanto melhor a distribuição, melhor será a geometria identificada por uma quantidade denominada PDOP (*Positional Dilution of Precision*), tal que os menores PDOP's indicarão uma melhor geometria e, portanto, uma melhor precisão na determinação da posição.

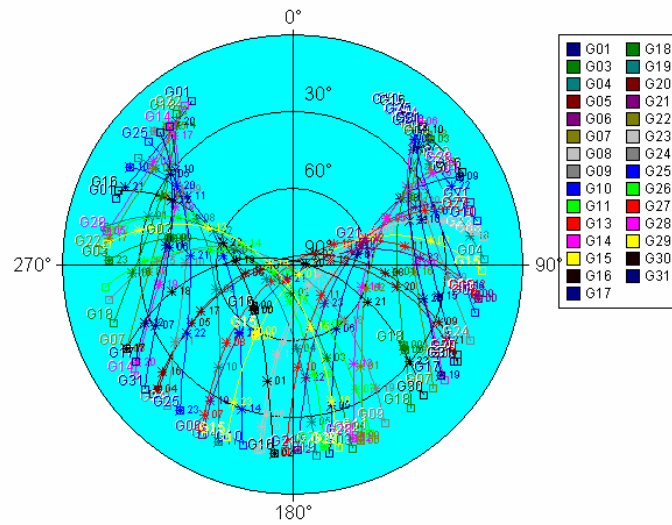
De forma geral, os receptores indicam os satélites disponíveis e as respectivas posições (azimute e elevação) no momento do levantamento, permitindo ao operador saber se o sinal de um determinado satélite está sendo obstruído.

Visando analisar a influência da presença de edifícios nas proximidades dos pontos de observação foram realizados processamentos com o GEONAP simulando a existência de alguns obstáculos na ocasião da coleta de dados.

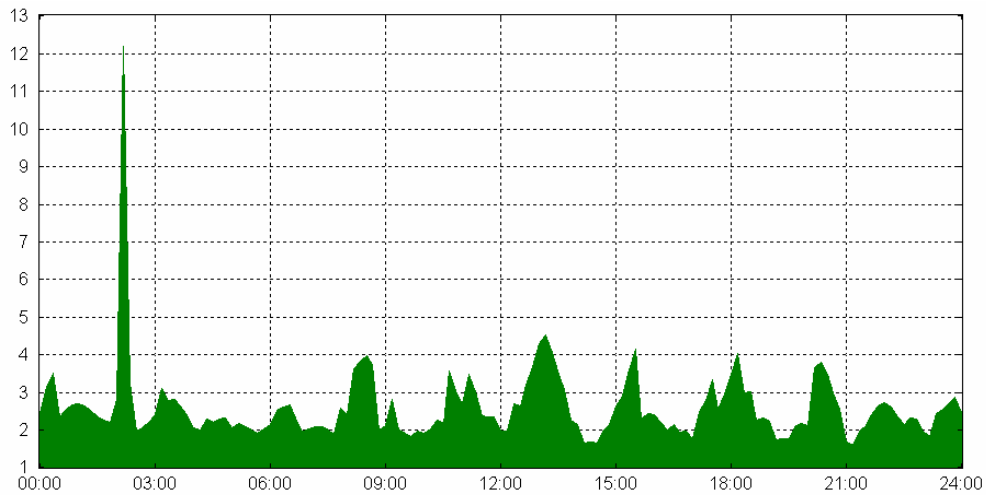
A simulação das obstruções compreendeu as seguintes etapas:

- a) Coleta dos almanaques: contendo as informações referentes às posições dos satélites no período de coleta das observações do experimento 2, do site da *U.S. Coast Guard Navigation Center* (<http://www.navcen.uscg.gov>).
- b) Construção dos diagramas de visibilidade dos satélites e os valores de PDOP: a partir dos dados coletados dos almanaques para um período de 24 horas nas duas localidades Hannover e Recife. Devido a inclinação das órbitas GPS (55°), os *Sky Plot* mostram uma certa falta de simetria na distribuição dos satélites, e as áreas sem os traçados das órbitas definem as regiões do céu de onde não é possível fazer observações. Segundo Seeber (2003), essas regiões são função da latitude do observador, e os *sky plot* apresentados nas Figuras 6.51a e 6.52a estão de acordo com os diagramas de visibilidade esperados para regiões de latitudes médias, como é o caso de Hannover, e regiões equatoriais, Recife.

Com a atual cobertura de satélites GPS, a importância do critério PDOP não é tão evidente, uma vez que este é suficientemente baixo na maior parte do dia, Figuras 6.51b e 6.52b. Seeber (2003) afirmou que, com a configuração completa de satélites, as variações dos valores de DOP são menos críticos e o PDOP permanece, na maioria das vezes abaixo de 3.



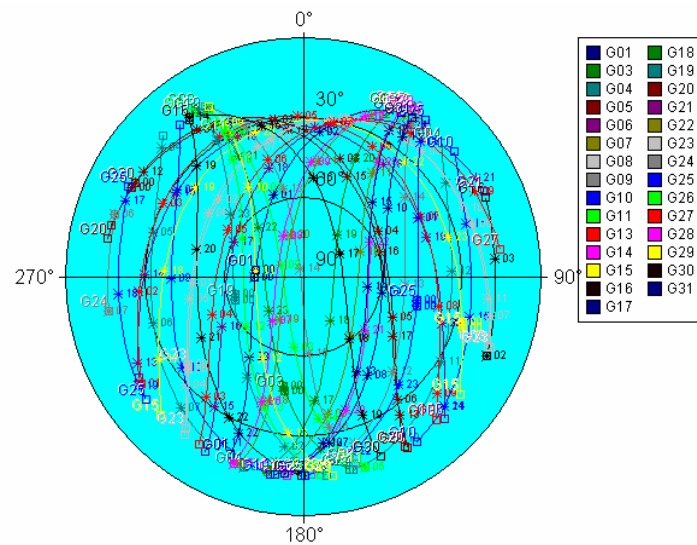
(a) Diagrama de visibilidade (Sky Plot)



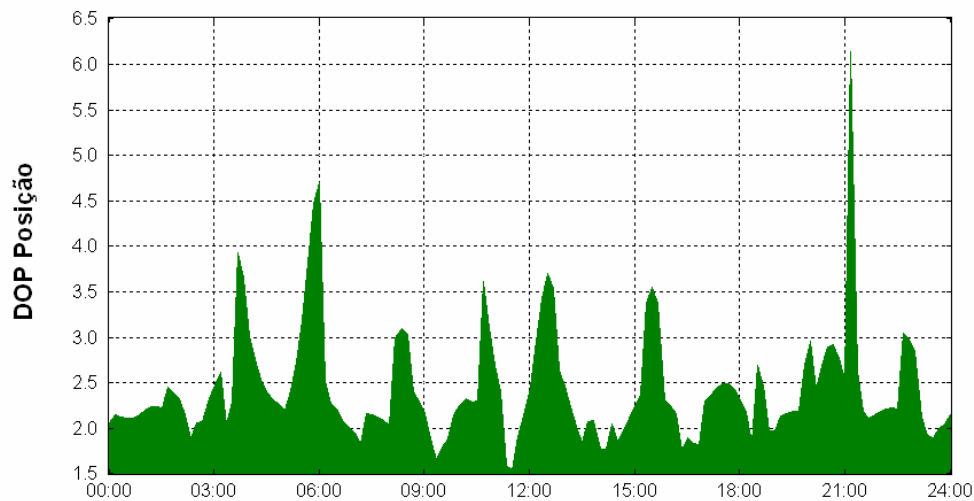
(b) Gráfico de PDOP.

Figura 6.51: Informações do almanaque para Hannover num período de 24 horas.

- c) Escolha e “materialização” das obstruções: na simulação realizada foi considerada uma situação possível na área de estudo, para a mesma época em que foram realizadas as observações do experimento 2. O cenário simulado compreende um ponto de observação localizado na calçada de uma rua e ladeado por quatro prédios, sendo dois deles de 15 andares (aproximadamente 48 metros de altura) e os outros dois de 10 andares (cerca de 33 metros de altura) – Figura 6.53.



(a) Diagrama de visibilidade (Sky Plot)

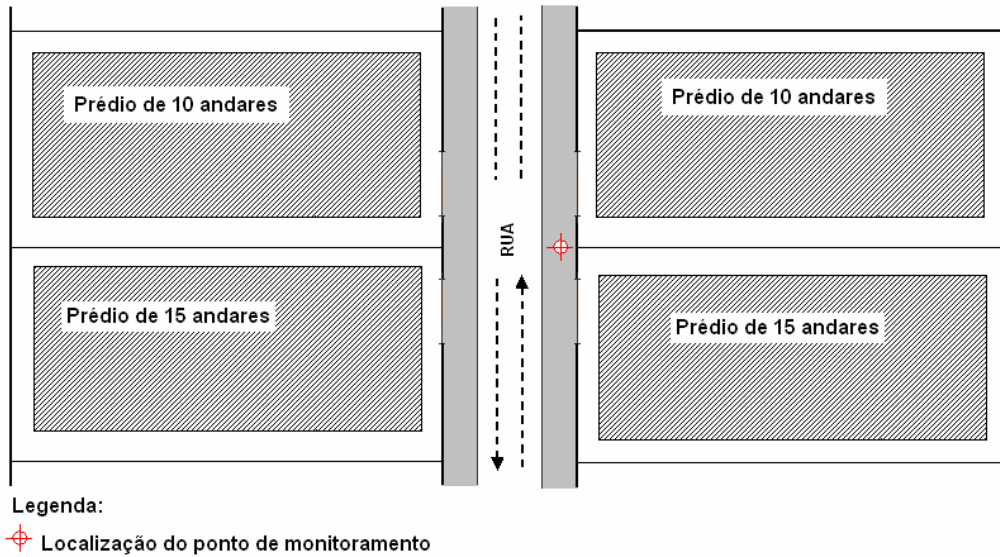


(b) Gráfico de PDOP.

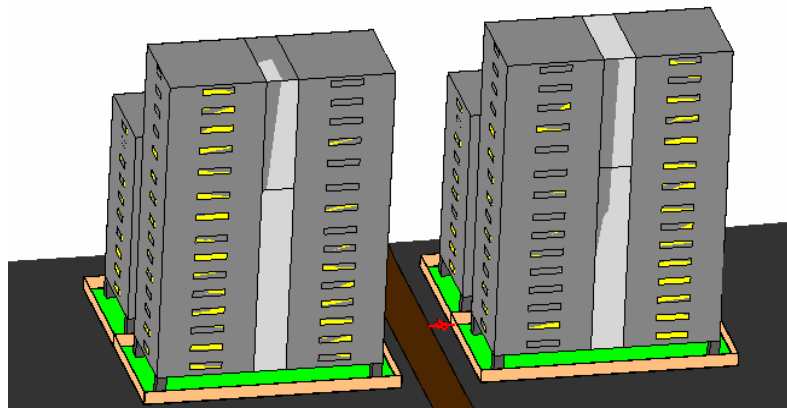
Figura 6.52: Informações do almanaque para Recife num período de 24 horas.

A Figura 6.54 apresenta o *sky plot* sem e com a implantação dessas obstruções sobre a região de estudo, para verificação dos satélites encobertos num período de duas horas de observação.

- d) Implantação dos obstáculos sobre os dados do experimento 2: o mesmo cenário de obstrução definido anteriormente foi implantado para as coordenadas de Hannover.
- e) Simulação das obstruções: nesta etapa foi realizado o processamento das observações do experimento 2, desativando os satélites que se mostraram obstruídos com a implantação dos obstáculos, no período do dia analisado.



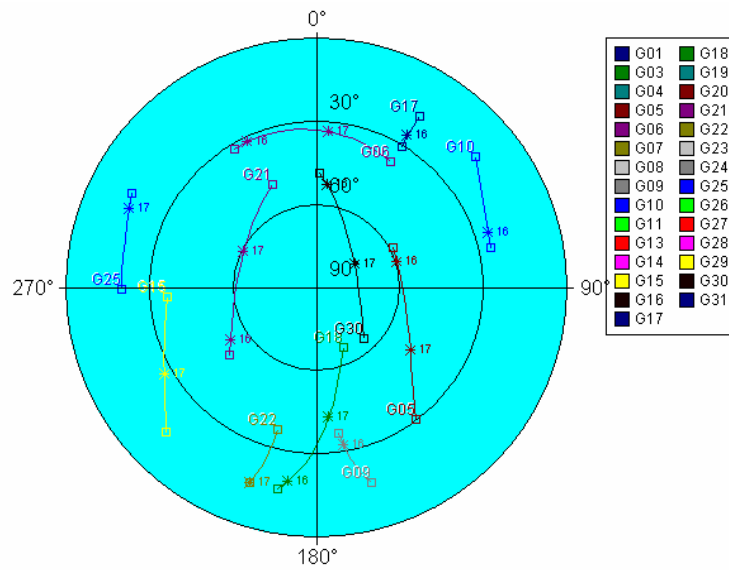
(a) Croqui de localização do ponto de monitoramento em relação aos prédios



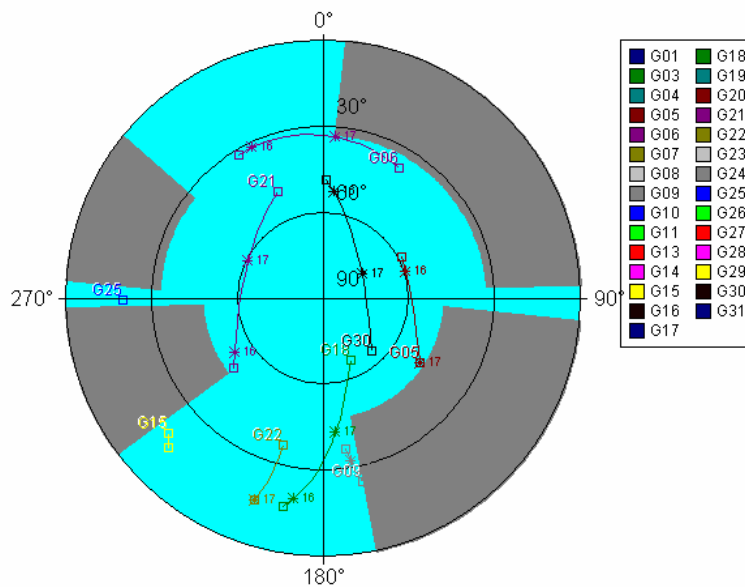
(b) Perspectiva dos prédios e localização do ponto de monitoramento.

Figura 6.53: Esquemas gráficos para entendimento do cenário simulado.

As observações, sujeitas à presença de tais obstruções, foram processadas com o GEONAP buscando a resolução das ambigüidades. Foram consideradas no processamento as três estações de referência Schwarmstedt (0665), Celle (0676) e Hannover (0640), que distam, respectivamente, 33 km, 36 km e 6 km, dos pontos objetos msd1 e msd2. Para todas as linhas de base foram resolvidas inicialmente as combinações lineares do tipo L_X . Em seguida resolveu-se a combinação que corrige o sinal com relação aos efeitos ionosféricos, L_0 . Todo o processamento foi realizado segundo um ângulo de elevação dos satélites de 15° .



(a) Sky-plot sem a presença de obstruções.



(b) Sky-plot com a presença de obstruções.

Figura 6.54: Diagrama de visibilidade para Recife num período de 2 horas.

Com relação à precisão dos resultados, a Figura 6.55 mostra como a presença dos obstáculos simulados pode influenciar na precisão dos resultados, principalmente no que se refere à altitude. A comparação dos resultados obtidos nas duas situações mostra que o desvio padrão na altitude da antena msd2, para um mesmo período de 2 horas, foi quase 1 cm maior com os obstáculos.

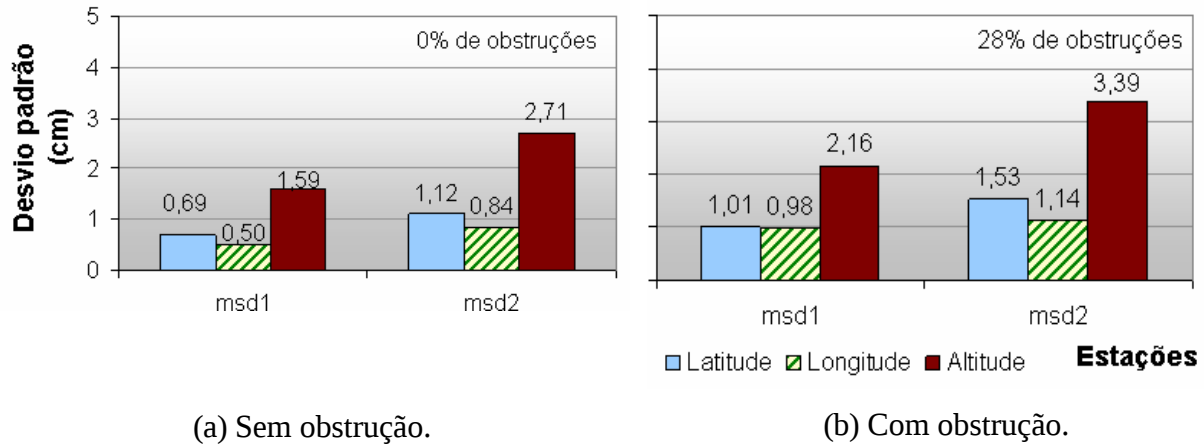


Figura 6.55: Desvio padrão das coordenadas obtidas com duas horas de observação (horário local: 14h00 às 16h00) e três estações de referência.

No que se refere à determinação da altitude, verifica-se, mais uma vez, que ocorre degradação dos resultados devido a ocorrência de obstruções que impedem a recepção dos sinais GPS integralmente. De acordo com os resultados apresentados na Figura 6.56, a discrepância na altitude, com relação à solução padrão, apontam uma diferença da ordem de 1 cm para as antenas msd1 e msd2, com a presença de obstáculos.

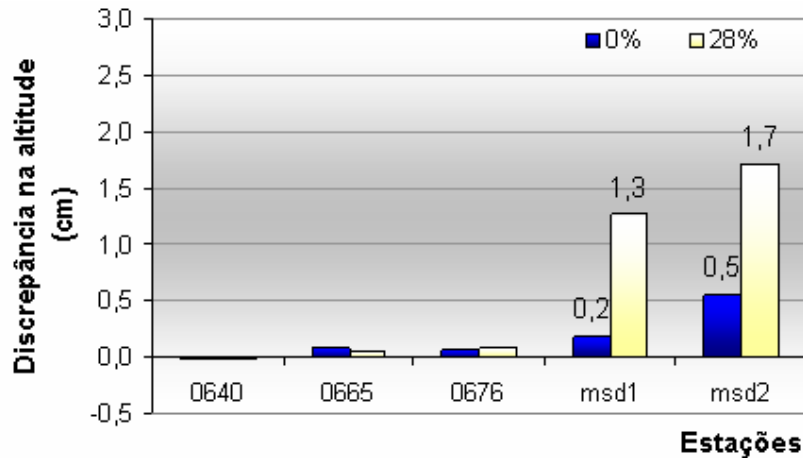


Figura 6.56: Discrepâncias na altitude entre a solução padrão e o processamento com 2 horas de observação (horário local: 14h00 às 16h00) sem obstrução e com obstrução de 28% e três estações de referência.

Diferentes resultados podem ser obtidos conforme o período do dia em que são realizadas as observações, nesse contexto, a Figura 6.57 apresenta resultados do processamento de 2 horas num outro período do dia, sem e com obstruções. A diferença entre a altitude obtida para a antena msd2 com e sem obstáculos no período da manhã (horário local: 08h50 às 10h50) foi quase 2 vezes maior que no período da tarde (horário local: 14h00 às 16h00). Daí a

importância em se considerar a existência dos obstáculos, pois a deteriorização dos resultados obtidos sem considerar as obstruções, quando elas existem, pode se refletir em resultados com precisões ruins.

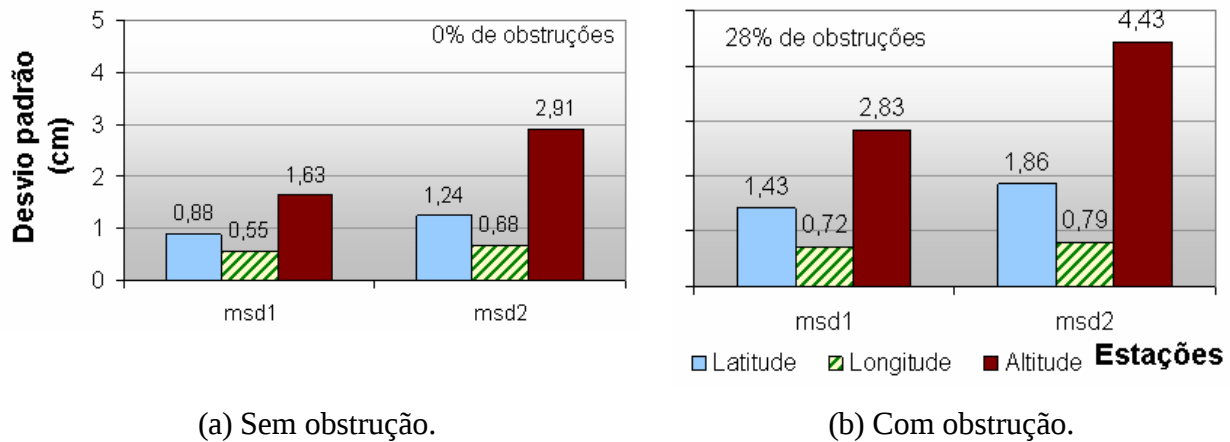


Figura 6.57: Desvio padrão das coordenadas obtidas com duas horas de observação (horário local: 08h50 às 10h50) e três estações de referência.

No que diz respeito à acurácia dos resultados, aqui também é possível verificar variação na acurácia com a presença de obstáculos.

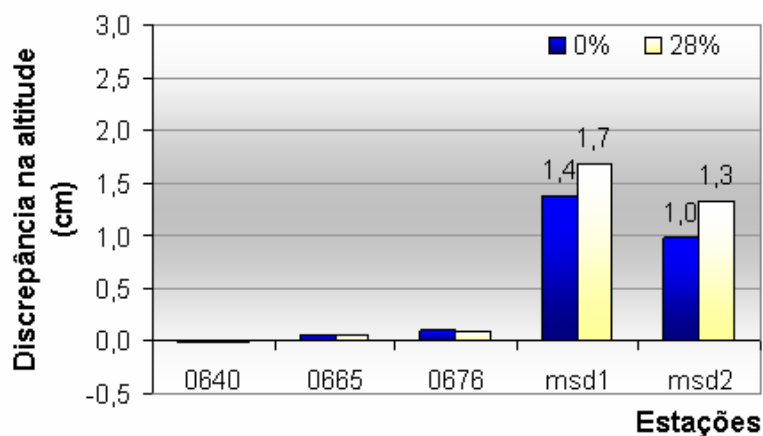


Figura 6.58: Discrepâncias na altitude sem obstrução e com obstrução de 28% com duas horas de observação (horário local: 08h50 às 10h50) e três estações de referência.

Recomenda-se, portanto, principalmente em áreas urbanas, a realização de um planejamento com um dos muitos softwares disponíveis no mercado e, sempre que possível, baseado em um estudo prévio do local onde se realizarão as medições, a implantação dos obstáculos existentes (construções e árvores) sobre o *sky plot* ainda na fase de planejamento. Apenas com o resultado dessa investigação, analisando-se a combinação PDOP e quantidade de satélites disponíveis, pode-se afirmar qual o período do dia é o mais indicado para a coleta dos dados.

Nesse contexto, duas considerações, já discutidas anteriormente, podem ser re-apresentadas nesse momento:

- o princípio básico do sistema GPS é a medição das pseudo-distâncias entre um mínimo de quatro satélites e a estação na superfície da Terra, e
- a ocorrência de obstáculos aumentam consideravelmente os valores de PDOP (Figura 6.59).

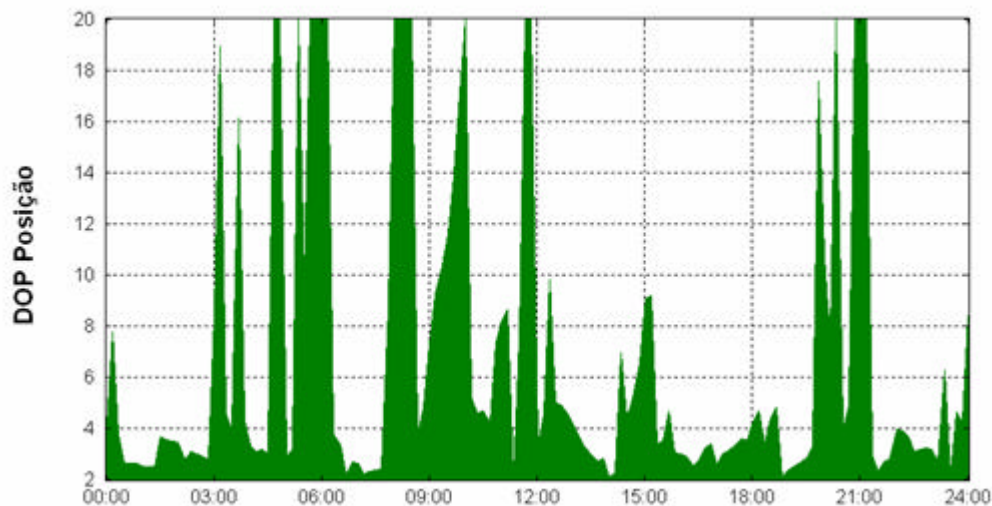


Figura 6.59: Gráfico de PDOP, para 28% de obstáculos e um período de 24 horas.

Comparando-se as Figuras 6.52b e 6.59, pode-se ter uma idéia da influência dos obstáculos na quantidade e distribuição geométrica dos satélites rastreados. Pode-se utilizar, portanto, o PDOP como um dos critérios a serem atendidos para obtenção de coordenadas verticais com precisão de, pelo menos, algumas unidades de centímetros, em áreas sujeitas à existência de obstruções. Valores de DOP abaixo de 4 correspondem a medições de posicionamento consideradas acuradas. Assim sendo, desprezando-se os valores de PDOP maiores que 4 e considerando-se apenas os dados obtidos da observação de, pelo menos, 4 satélites, para um intervalo de 2 horas (10h50 até 12h50, por exemplo), o período de 11h10 a 11h15 e o período de 11h45 a 12h50, neste caso, não atenderiam o critério proposto (Figuras 6.60a e 6.60b).

A exclusão dos dados obtidos nesse período, e utilização de apenas 50 minutos de observação – correspondendo ao período de 10h50 a 11h10 e 11h15 a 11h45, não garantem a obtenção de resultados mais precisos, Figuras 6.57b e 6.61a, uma vez que os valores de desvio padrão permanecem na mesma ordem de grandeza.

Por outro lado, os resultados obtidos com a retirada dos períodos de alto PDOP e número de satélites insuficiente mostraram-se mais próximos da solução padrão, com uma discrepância em relação à solução padrão da ordem de 1 cm, enquanto que com a utilização de todas as observações do período resultou-se numa discrepância máxima de cerca de 2 cm.

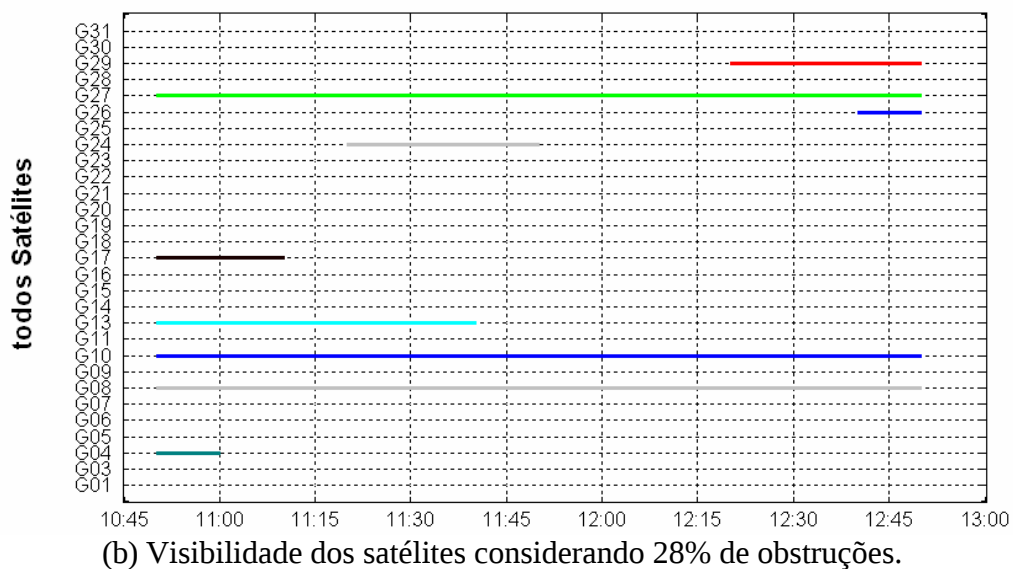
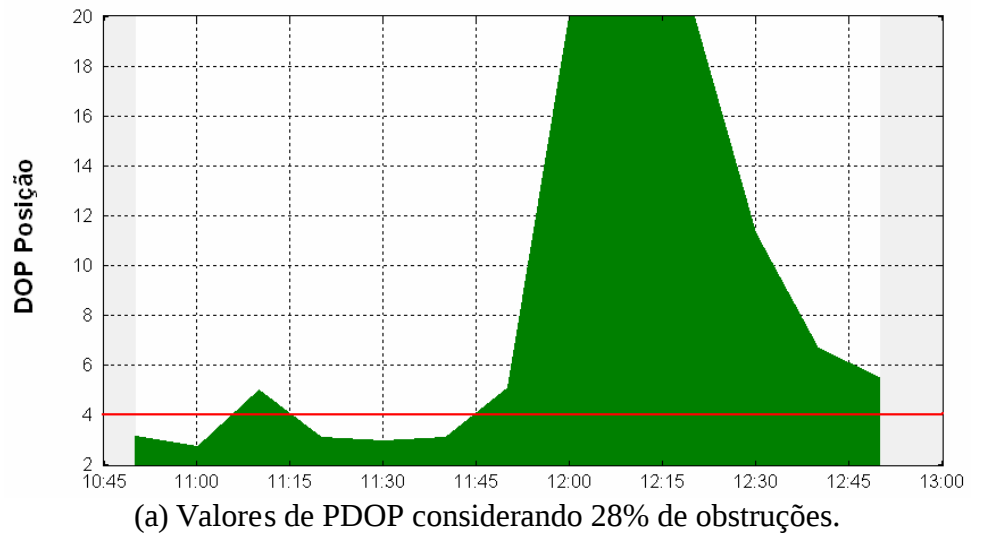


Figura 6.60: Gráficos para análise de um período de 2 horas de observação.

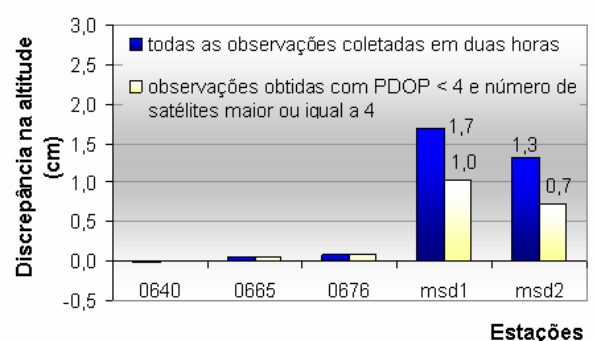
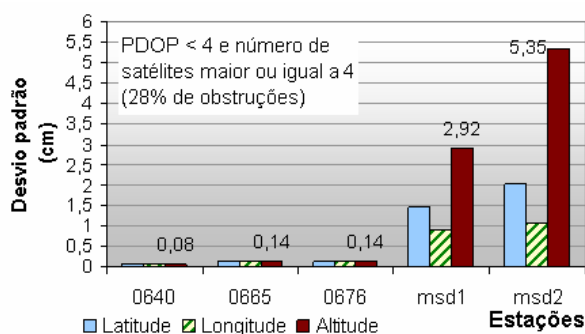


Figura 6.61: Resultados obtidos com duas horas de observação (horário local: 10h50 às 12h50), obstrução de 28% e três estações de referência.

Com um aumento no período de observação verifica-se, entretanto, que os resultados são mais próximos da solução padrão e a retirada de períodos de PDOP ruins, com número de satélites

abaixo de 4, não representam ganho de precisão (Figuras 6.62) e nem de acurácia (Figuras 6.63). Ao contrário, tanto para a antena msd1 quanto para a antena msd2, os desvios padrão foram menores quando se utilizou todas as observações coletadas no período.

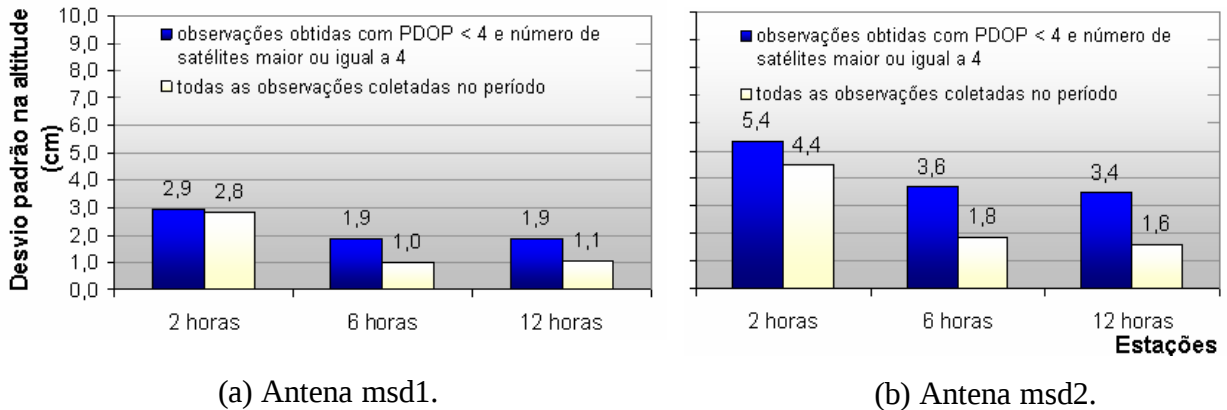


Figura 6.62: Desvio padrão da altitude para diferentes períodos de observação e três estações de referência.

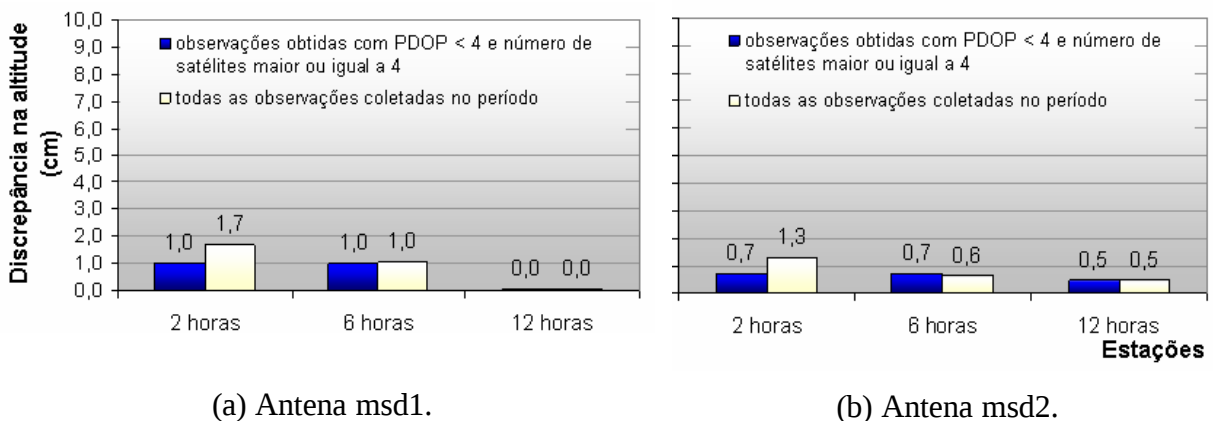


Figura 6.63: Discrepâncias na altitude para diferentes períodos de observação e três estações de referência.

A partir da simulação de obstruções, verifica-se que a utilização desse critério geométrico, pode ser útil na determinação de coordenadas verticais desde que não se disponha de um período de observação satisfatório, uma vez que a determinação de coordenadas verticais com alta precisão exige a observação por longos períodos.

Além disso, subtraindo-se os períodos com PDOP alto e número de satélites inadequados do período de observação total (tempo bruto), o período restante utilizado no processamento (tempo líquido) pode ser drasticamente reduzido e, conseqüentemente, pode não atender outras características fundamentais ao posicionamento vertical preciso. Já é sabido que, algumas vezes, longos períodos de observação são úteis para a redução dos efeitos de

multicaminhos e esta condição deve ser considerada sempre que a proximidade de superfícies refletoras for inevitável, como em áreas urbanas, mas é importante observar que esses longos períodos correspondem ao tempo de observação líquido.

Assim sendo, mesmo considerando-se a presença de obstáculos na área de investigação, verifica-se que é possível a obtenção de coordenadas verticais com discrepâncias da ordem de milímetros. Para cada situação, de localidade e disponibilidade de tempo, pode-se definir a duração do rastreamento necessária para obtenção da precisão requerida. Na impossibilidade de trabalhar-se com um horizonte em torno da antena desobstruído acima de 15° , reforça-se a recomendação da avaliação da influência da obstrução na trajetória dos satélites. O cenário de obstrução empregado nessas simulações, apesar de ser de possível ocorrência real, não corresponde ao cenário encontrado nos pontos propostos para monitoramento na área de estudo. Períodos de tempo “líquidos” maiores - com bom PDOP e quantidade de satélites adequada - podem ser esperados para realização de campanhas na área de Boa Viagem, uma vez que os pontos para monitoramento escolhidos localizam-se em esquinas, ladeados por prédios de até 5 andares e avenidas largas.

Recomenda-se, portanto, para obtenção de coordenadas verticais com alta precisão, em áreas urbanas, além da consideração dos obstáculos presentes no local do levantamento, a realização do levantamento por longos períodos, não sendo necessário efetuar a exclusão de observações coletadas em períodos com PDOP ruim e com número de satélites baixo.

6.3.3 Resumo

As conclusões, desse capítulo, que são significantes para a realização das medições e análises de observações GPS com vistas à determinação de altitudes com elevada precisão e detecção de deslocamentos verticais são apresentados brevemente nesse resumo.

a) Tempo de observação

A utilização de longos períodos de observação permitiu a obtenção de resultados mais acurados e precisos. Os resultados de ambos os experimentos demonstraram que é possível obter coordenadas verticais com precisão e discrepância, com relação à solução padrão, de ordem milimétrica (Figuras 6.12 e 6.32), sendo que valores dessa ordem de grandeza foram obtidos com, pelo menos, 6 horas de observação em ambos os experimentos realizados. Períodos de tempo inferiores, apesar de poderem resultar em coordenadas verticais igualmente precisas (desvios padrão com mesma ordem de grandeza), mostram-se menos eficientes com relação à proximidade do valor real (discrepâncias maiores).

Para utilização do GPS na detecção de pequenos deslocamentos verticais, verifica-se que o período de observação também é um fator muito importante quando se investiga variações de altitude de ordem milimétrica. A aplicação dessa metodologia para monitoramento da subsidência exige que os resultados obtidos demonstrem uma boa correspondência na direção e na magnitude do deslocamento vertical. Nesse contexto, conforme observado com a realização do experimento 2, todos os períodos mostraram-se eficientes na detecção da direção do movimento, em praticamente todos os deslocamentos provocados. As coordenadas de altitude foram então obtidas com precisão e discrepância da ordem de 1 cm para um período de 4 horas e de cerca de 0.5 cm para os períodos de 12 horas e 24 horas. Com relação à variação da posição vertical do ponto, verificou-se ser possível detectar a ocorrência dos deslocamentos com uma discrepância média de 4 mm.

Diferentes resultados são obtidos conforme o horário do dia e o período do ano, sendo necessário uma investigação (baseada em levantamentos pré-existentes ou a serem efetuados) no local de realização das observações, para definição do melhor período de trabalho.

b) Comprimento da linha de base

Compararam-se os resultados obtidos com o processamento de linhas de base simples e verificou-se, para os resultados do experimento 1, uma tendência de crescimento do desvio padrão com o aumento no comprimento da linha de base, sendo esse comportamento mais evidente com relação à altitude (Figura 6.15). Com os resultados do experimento 2 não se verificou uma tendência definida do comportamento do desvio padrão com relação ao comprimento da linha de base.

O ajustamento em linhas de base individuais e em rede dos mesmos pontos, com os dados do experimento 1, mostrou que essa última metodologia resulta em valores menos discrepantes, isto é, em valores médios os processamentos em linha de base e em rede resultaram numa discrepância com relação à solução padrão de 2 cm e 0.5 cm, e em valores máximos essas discrepâncias foram de 2.5cm e 1.5cm, respectivamente (Figura 6.16). Assim, quando se deseja obter discrepâncias milimétricas, devem-se utilizar mais que dois receptores para o rastreamento dos satélites e o método de ajustamento em rede.

Foram realizadas investigações sobre a influência do comprimento da linha de base até 44 km com respeito ao desempenho na detecção de pequenos deslocamentos verticais (experimento 2), os quais evidenciaram a limitação no uso do GPS em linhas de base longas. Resultados satisfatórios foram obtidos com linhas de base até 30 km, onde se detectou corretamente a direção do movimento com discrepância média da ordem de 5 mm (Figura 6.39). Os demais

resultados apontaram deslocamentos com discrepância média inferior a 5 mm mas com algumas das variações verticais de sentidos contrários.

c) Número de estações de referência

Para investigação da quantidade de estações de referência na obtenção de coordenadas verticais precisas foram realizadas algumas investigações a partir das observações GPS coletadas. Assim foram considerados os dados do experimento 1 e os comprimentos de linha de base variando de menos que 1 km até quase 45 km.

Os valores mostraram-se mais próximos à solução padrão com o aumento no número de estações de referência, tendo sido verificado que o emprego de apenas duas estações pode ser suficiente para obtenção de uma discrepância média da ordem de 4 mm. Nesse contexto, estudou-se duas possibilidades de arranjo para distribuição das duas estações de referência e verificou-se que a posição das estações de referência quando definida de forma adequada pode resultar em ganho de precisão, ou seja, as estações devem ser dispostas tal que os comprimentos da linha de base sejam os menores e mais homogêneos possíveis.

Diferentes quantidades de estações de referência (Tabela 6.11) foram testadas também para investigação da quantidade de estações necessária à obtenção de coordenadas verticais precisas e verificação da capacidade de detecção dos deslocamentos (experimento 2).

Tabela 6.11: Comprimentos das linhas de base conforme a estratégia utilizada

Qtde Estações Ref.	Comprimento das linhas de base
7	De 6 km a 44 km
3	33 km, 36 km, 44 km
2	33 km, 36 km
1	33 km

Verificou-se que é possível obter altitudes com discrepância média da ordem de 3 mm utilizando-se uma única estação de referência, desde que as observações sejam coletadas por longos períodos (Figura 6.62). Além disso, o aumento no período de observação resultou em ganho de precisão para a mesma quantidade de estações de referência (Figura 6.63). Nesse contexto, comparando-se os resultados obtidos com 12 horas e 24 horas (Figuras 6.45 e 6.46) e apenas uma estação de referência, verifica-se que o aumento no período de observação resultou numa diminuição na discrepância média do deslocamento vertical de cerca de 1.5 cm para menos que 0.6 cm.

d) Existência de obstruções

Verificou-se que é fundamental a consideração das obstruções para definição do melhor horário para realização das observações. Mesmo resultando em períodos com PDOP ruim e número de satélites insuficiente (< 4), para obtenção de coordenadas que podem ser consideradas acuradas, é preferível utilizar todas as observações coletadas no período para realização do ajustamento.

Foi realizada a simulação da ocorrência de quatro prédios ladeando o ponto de observação, que representou uma obstrução de 28%, para os sinais recebidos por um ângulo de elevação de 15° . Nesse contexto, coordenadas verticais com precisão de 5 mm foram obtidas para um período de observação de 12 horas.

Concluiu-se que, apesar de longos períodos de observação serem úteis na minimização, ou eliminação, da degradação das coordenadas verticais, deve-se realizar a análise prévia das obstruções, com um software de planejamento, para escolha do melhor horário para a realização do levantamento.

e) Capacidade de detecção de deslocamentos verticais

Analisando-se os resultados de altitude de uma antena que não esteve sujeita a deslocamentos verticais (antena msd1 do experimento 2), verificou-se uma variação, da ordem de alguns milímetros, que pode ser resultante de variação no centro de fase da antena, uma vez que foram utilizados dois tipos de antenas diferentes e apenas as estações de referência tiveram as informações sobre as variações do centro de fase corrigidas através de arquivos de calibração. Além disso, estudos anteriores, sobre a calibração do centro de fase da antena GPS para a determinação precisa de altura mostram que, mesmo com o emprego de antenas iguais orientadas na mesma direção ou com os valores de PCV absolutos disponíveis, pode-se esperar um efeito absoluto do ruído nas medições, menor ou igual a 3 mm. O ruído é portanto, um agente limitador da capacidade de detecção dos deslocamentos verticais, devendo-se considerar, nesse contexto, como possível ocorrência de variação de altitude, apenas os valores superiores ao mesmo.

Das variações de altitude apresentadas pela antena msd1 pode-se considerar para as coordenadas verticais obtidas nessa pesquisa um ruído de 5 mm.

6.4 Análise de Deformação

Para as redes geodésicas de controle deve ser investigado se um deslocamento ocorrido num ponto da rede é detectável ou não. Assim sendo, define-se como sensibilidade da rede geodésica a habilidade da mesma em detectar os deslocamentos com probabilidades dadas a

partir das observações de duas épocas. Ou seja, se as diferenças de coordenadas em comparação com as precisões obtidas são relativamente grandes ou não. Para isso, testa-se se as redes observadas em cada uma das épocas são congruentes através de informações estocásticas com referência à precisão dos pontos considerados. Para realização desse tipo de análise, foi utilizado sobre os resultados obtidos no experimento 2, o software PANDA.

6.4.1 Software PANDA

O software PANDA, desenvolvido no *Institut für Geodäsie* da Universidade de Hannover, realiza a análise de redes e verifica a ocorrência de movimento em cada um dos pontos. De acordo com Niemeier e Tengen (1988), o PANDA aplica-se as seguintes práticas de levantamento: planejamento e otimização de projeto; ajustamento e análise de qualidades de redes; e na determinação de movimentos após duas épocas medidas. O software consiste de três programas principais: um programa para ajustamento de redes (PAN), um programa para análise de deformação (DEFANA) e um outro para representação gráfica dos resultados. A parte principal da análise de deformação é a realização do teste de congruência global para determinar significantes deslocamentos entre os pontos de referência.

De forma sucinta a metodologia utilizada no software PANDA e descrita no item 5.4, baseia-se nesses três itens:

- Hipótese linear considerada: $H_0 : E\{\hat{\mathbf{x}}_1\} = E\{\hat{\mathbf{x}}_2\} = \dots = E\{\hat{\mathbf{x}}_k\}$ (5.26)

- Teste estatístico empregado para validar a hipótese linear: $F_0 = \frac{\mathbf{d}^T \mathbf{Q}_d^+ \mathbf{d}}{\hat{s}_0^2 \cdot h^*} = \frac{R}{\bar{s}_0^2 \cdot h^*}$ (5.30)

- Probabilidade do teste estatístico $P\{F_0 > F_{h^*, f^*, 1-\alpha} \mid H_0\} = \alpha$ (5.34)

O software utiliza a metodologia desenvolvida por Pelzer (1974, apud Niemeier, 1985) – Método das Componentes Residuais Máximas, para localização dos pontos com deslocamento, apresentada no Capítulo 5 (item 5.3). Além do emprego das estratégias de retorno, de avanço e a combinação de ambas, é possível, ainda, a realização da análise em um passo (onde todos os pontos são considerados como de referência), ou em dois passos (quando inicialmente investiga-se a ocorrência de movimento entre os pontos de apoio e a seguir são testados os pontos objeto).

6.4.2 Resultados da análise de deformação

Inicialmente foram analisadas, no PANDA, as coordenadas definidas para a solução padrão (e respectiva MVC) apresentadas na Tabela 6.6. Como já foi explicado anteriormente, cada uma das posições experimentadas pela antena msd2 do experimento 2 simulou a realização de uma campanha. A comparação entre essas coordenadas, bem como suas informações estocásticas, obtidas nas diversas campanhas, e épocas, permite verificar a capacidade de detecção dos deslocamentos ocorridos. A Figura 6.30 apresenta o esquema com as posições experimentadas pela antena msd2, conforme os resultados obtidos com o GEONAP para a solução padrão (item 6.3.2.1).

Em todas as análises de deformação realizadas com o PANDA foram consideradas como pontos de apoio as sete estações de referência pertencentes à rede SAPOS e utilizadas no experimento 2. Foram realizadas análises no âmbito dos pontos de apoio bem como dos pontos objeto (em dois passos), além disso, combinou-se as estratégias de retorno e de avanço para localização dos pontos que deslocaram. Considerando-se que cada posição corresponde a uma campanha, será chamado de “resultados da campanha 1”, as coordenadas e a MVC obtidas, para todos os pontos observados, com a antena msd2 na posição 1, “resultados da campanha 2”, para os resultados obtidos com a antena msd2 na posição 2, “resultados da campanha 3”, para os da posição 3, e assim por diante.

As Tabelas 6.13 e 6.14 apresentam os resultados dos testes estatísticos realizados no PANDA com as coordenadas e as informações estocásticas geradas a partir das soluções dos ajustamentos com base no processamento de duas horas de observação no GEONAP e o emprego de uma estação de referência, a 0665, no GNPNET. No ajustamento realizado foram consideradas fixas as coordenadas das estações 0652, 0657, 0663, 0665, 0666 e 0676, e como pontos objeto foram consideradas as estações 0640, msd1 e msd2. O objetivo de considerar a estação 0640 como uma estação objeto é verificar o comportamento da análise de deformação para a situação em que não ocorreu movimento vertical real.

Como se pode observar a estatística referente à estação de referência 0640 obedeceu à condição imposta pela hipótese nula, tanto na análise realizada com as observações coletadas em duas horas quanto com as coletadas em 24 horas, indicando que, como aconteceu de fato, a estação 0640 não sofreu deslocamento. Os pontos objeto referentes às estações msd1 e msd2 mostraram-se mais sensíveis com relação ao tempo de observação utilizado. A estatística referente à estação msd1, cuja posição manteve-se fixa para todas as “campanhas”, indicou um deslocamento que não aconteceu de fato, isso pode ser atribuído aos baixos valores de precisão das coordenadas obtidas do ajustamento para esta estação.

Tabela 6.12: Estatística aplicada na análise de sensibilidade – 2 horas

Campanhas comparadas	Teste estatístico	Estação		
		0640	Msd1	Msd2
1 e 2 ($\Delta h_{msd2} = 8.3 \text{ cm}$)	$H_0 : E\{\hat{\mathbf{x}}_1\} = E\{\hat{\mathbf{x}}_2\}$ é aceita? Valor do deslocamento:	Sim -	Não 1 cm	Não 9.7 cm
3 e 5 ($\Delta h_{msd2} = 2.5 \text{ cm}$)	$H_0 : E\{\hat{\mathbf{x}}_1\} = E\{\hat{\mathbf{x}}_2\}$ é aceita? Valor do deslocamento:	Sim -	Não 0.3 cm	Não 2.3 cm
2 e 4 ($\Delta h_{msd2} = 1.5 \text{ cm}$)	$H_0 : E\{\hat{\mathbf{x}}_1\} = E\{\hat{\mathbf{x}}_2\}$ é aceita? Valor do deslocamento:	Sim -	Não 0.5 cm	Não 1.5 cm
2 e 3 ($\Delta h_{msd2} = 1 \text{ cm}$)	$H_0 : E\{\hat{\mathbf{x}}_1\} = E\{\hat{\mathbf{x}}_2\}$ é aceita? Valor do deslocamento:	Sim -	Não 0.5 cm	Não 0.9 cm
3 e 4 ($\Delta h_{msd2} = 0.5 \text{ cm}$)	$H_0 : E\{\hat{\mathbf{x}}_1\} = E\{\hat{\mathbf{x}}_2\}$ é aceita? Valor do deslocamento:	Sim -	Não 0.0 cm	Não 0.6 cm

Tabela 6.13: Estatística aplicada na análise de sensibilidade – 24 horas

Campanhas comparadas	Teste estatístico	Estação		
		0640	Msd1	Msd2
1 e 2 ($\Delta h_{msd2} = 8.3 \text{ cm}$)	$H_0 : E\{\hat{\mathbf{x}}_1\} = E\{\hat{\mathbf{x}}_2\}$ é aceita? Valor do deslocamento:	Sim -	Não 0.5 cm	Não 8.3 cm
3 e 5 ($\Delta h_{msd2} = 2.5 \text{ cm}$)	$H_0 : E\{\hat{\mathbf{x}}_1\} = E\{\hat{\mathbf{x}}_2\}$ é aceita? Valor do deslocamento:	Sim -	Não 0.7 cm	Não 2.2 cm
2 e 4 ($\Delta h_{msd2} = 1.5 \text{ cm}$)	$H_0 : E\{\hat{\mathbf{x}}_1\} = E\{\hat{\mathbf{x}}_2\}$ é aceita? Valor do deslocamento:	Sim -	Não 0.1 cm	Não 1.2 cm
2 e 3 ($\Delta h_{msd2} = 1 \text{ cm}$)	$H_0 : E\{\hat{\mathbf{x}}_1\} = E\{\hat{\mathbf{x}}_2\}$ é aceita? Valor do deslocamento:	Sim -	Não 0.1 cm	Não 1.2 cm
3 e 4 ($\Delta h_{msd2} = 0.5 \text{ cm}$)	$H_0 : E\{\hat{\mathbf{x}}_1\} = E\{\hat{\mathbf{x}}_2\}$ é aceita? Valor do deslocamento:	Sim -	Não 0.1 cm	Não 0.4 cm

Os resultados da estatística referente à estação msd2 mostraram a ocorrência de todos os deslocamentos provocados, indicando que a metodologia aplicada é adequada à detecção de pequenos deslocamentos verticais. Analisando-se os valores numéricos, verifica-se que a discrepância máxima entre os valores dos deslocamentos verticais detectados e os provocados foi de 1.4 cm para a estatística realizada com os dados de 2 horas enquanto que com os resultados de 24 horas o valor máximo foi de 0.3 cm (Tabelas 6.13 e 6.14).

Com base nas coordenadas obtidas do ajustamento no GEONAP, e com o emprego do PANDA, verificou-se que é possível detectar variações dos pontos, da ordem de alguns milímetros, as quais se situam na ordem de grandeza da acurácia das observações, mesmo com curtos períodos de tempo, sendo que o tempo mínimo observado foi de apenas duas horas de observação.

Por outro lado, sabendo-se que a matriz dos co-fatores de variância das incógnitas, oriunda do ajustamento das observações geodésicas pelo método dos mínimos quadrados, descreve o

comportamento estocástico do vetor das incógnitas, e que essas variâncias apresentam-se menores conforme o aumento no período de observação (item 6.3.2.2, sobre a análise do tempo de observação), tal como era de se esperar, os resultados obtidos com o PANDA para as coordenadas estimadas de 24 horas de observação mostraram-se mais eficientes na detecção de deslocamentos significativos.

CAPÍTULO 7

DISCUSSÃO SOBRE UMA REDE DE CONTROLE PARA RECIFE

7.1 Introdução

As conclusões do Capítulo 6, que indicam os fatores significantes para a determinação de altitudes com elevada precisão e a detecção de deslocamentos verticais, foram a base para discussão sobre as principais características da rede de controle a ser aplicada em Recife. Dos resultados obtidos foi possível propor características fundamentais a serem atendidas, como localização, tempo de observação e quantidade de estações de referência, para o monitoramento da subsidência no bairro de Boa Viagem na Região Metropolitana do Recife - RMR.

Chrzanowski (1981) apresenta dois tipos de redes: redes relativas (nas quais os pontos que a compõem estão localizados dentro da região de deformação) e redes de referência (nas quais existem pontos situados fora da região de deformação). O principal desafio na análise de uma rede relativa é a determinação do modelo de deformação nos domínios espacial e temporal. Nas redes de referência, em que os deslocamentos de um ponto na superfície da Terra são determinados pela comparação entre as coordenadas determinadas em épocas diferentes (referidas ao mesmo *datum*), o maior desafio é a identificação dos pontos de referência estáveis. Nas redes de referência os pontos de referência devem estar fora da área sujeita à deformação e os pontos objeto de estudo, ao contrário, devem estar dentro.

7.2 Estudos anteriores

Redes de referência GPS locais para posicionamento em tempo real foram implementadas no Brasil em projetos anteriores. O primeiro projeto foi desenvolvido em abril de 1999 em Pontal do Sul, no Paraná, e foi destinado à aplicações marítimas (Krueger et al. 2001). Em novembro de 2000, uma segunda rede operou durante três semanas na RMR com quatro estações de referência, incluindo a estação RECF pertencente à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo – RBMC (Figura 7.1).

A rede de referência empregada nesse projeto utilizou quatro estações de referência GPS. De acordo com Willgalis et al. (2001), na ocasião os receptores foram colocados no topo de edificações elevadas – um prédio no bairro de Candeias, estação SOLA, e o prédio mais alto da Universidade Federal de Pernambuco, estação UFPE. Uma outra estação foi utilizada na 3ª Divisão de Levantamentos Topográficos, localizada no município de Olinda – RMR, e a

quarta estação estava situada onde funcionava na época o centro de treinamento da companhia de comunicações TELEBRAS, localizada no bairro de Aldeia pertencente ao município de Camaragibe - RMR . Além dessas, foi utilizada uma estação pertencente à RBMC localizada na torre da biblioteca central da UFPE.



Figura 7.1: Rede de referência GPS instalada na RMR e utilizada no projeto desenvolvido em novembro de 2000.

As investigações realizadas, no âmbito do projeto realizado em 2000, destinaram-se, principalmente, ao estudo de multi-estações sob condições ionosféricas na região equatorial, ao estudo sobre levantamentos cadastrais e ao estudo sobre levantamentos geodésicos. Os estudos mostraram que é praticável o posicionamento em tempo real para linhas de base até 40 quilômetros, desde que seja garantida a comunicação (Willgalis et al., 2001; Willgalis et al., 2002) e quando os efeitos dos erros dependentes da distância e da estação são eliminados ou mesmo corrigidos (Seeber, 2001).

Baseando-se nas experiências anteriores e nas simulações realizadas nessa pesquisa, propõe-se o estabelecimento de uma rede de referência GPS, com o objetivo de monitorar o posicionamento de pontos objeto no bairro de Boa Viagem e, com isso, detectar, caso ocorra, deslocamentos verticais de pequena magnitude.

7.3 Estabelecimento de uma Rede de Referência GPS

Visando aplicar o conhecimento adquirido nesse trabalho à área de estudo na Região Metropolitana de Recife (bairro de Boa Viagem), apresenta-se a seguir algumas características sobre a rede GPS de monitoramento a ser utilizada.

7.3.1 Conceitos Básicos

De uma forma geral, os métodos de levantamento são empregados no monitoramento da magnitude e da taxa de deslocamentos horizontais e verticais em estruturas e em superfícies do solo. Sobre os esquemas de monitoramento existentes, Secord (1995) propõe uma divisão em esquemas para grandes áreas e pequenas áreas. O estudo de grandes áreas é chamado comumente de estudo geodésico e permite a realização do levantamento de áreas com extensão igual ou maior que algumas centenas de metros. O Sistema GPS constitui um dos métodos de levantamento que podem ser empregados no monitoramento desse tipo de movimento do solo.

Conforme discutido anteriormente, para utilização da técnica GPS com vistas à detecção de deslocamentos verticais com alta precisão, é necessário fazer uso do posicionamento relativo empregando dois ou mais receptores, tal que eles estejam, simultaneamente, rastreando um grupo de satélites comuns.

7.3.2 As Estações de Referência

Tal como dito anteriormente, e segundo Chrzanowski (1981), o principal desafio em uma rede de referência, em que os deslocamentos de um ponto na superfície da Terra são determinados pela comparação entre as coordenadas determinadas em épocas diferentes, é a identificação dos pontos de referência estáveis. Nas redes de referência os pontos de controle devem estar fora da área sujeita à deformação e os pontos objeto de estudo, ao contrário, devem estar dentro (Figura 7.2).

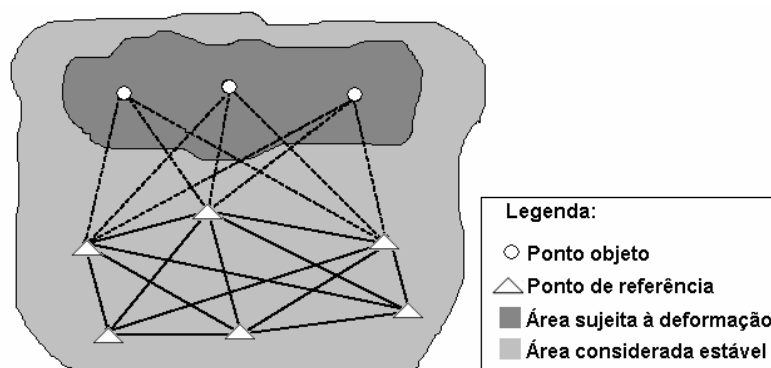


Figura 7.2: Esquema mostrando a disposição dos pontos de referência e dos pontos objeto numa rede de referência.

A definição de pontos de referência para investigação sobre a ocorrência de subsidência na área de Boa Viagem não é uma atividade simples. Inicialmente é preciso identificar, dentro da RMR, qual a área que não está sujeita à deformação. O fato de estar fora da área de exploração intensa não significa que o ponto esteja numa área estável.

Assim, buscando a aplicação dos estudos realizados, propõe-se, em princípio, a utilização de alguns dos pontos de referência usados no projeto realizado em 2000 também, para estabelecimento da rede de referência para o monitoramento da subsidência em Recife.

Apesar de esses pontos estarem fora da área de estudo, alguns aspectos podem ser questionados com relação à estabilidade dos mesmos (Figura 7.1):

- RECF, no Campus da Universidade Federal de Pernambuco, zona oeste da cidade do Recife, está localizado sobre sedimentos recentes.
- 3^aDL, na 3^a Divisão de Levantamentos, na cidade de Olinda (RMR), está localizado sobre a bacia Pernambuco-Paraíba.
- SOLA, no edifício Solar de Camaragibe, no bairro de Candeias, na cidade de Jaboatão dos Guararapes (RMR), está localizado sobre a bacia do Cabo.

Como estes marcos não estão firmemente ancorados na rocha do embasamento cristalino podem sofrer alguma deformação, de modo que é necessário, antes de utilizá-los no monitoramento dos deslocamentos verticais, fazer uma amarração em relação a pontos ancorados em rocha. Propõe-se, ainda a utilização do marco construído no decorrer dessa Pesquisa, estação MURIBECA, Figura 7.3.

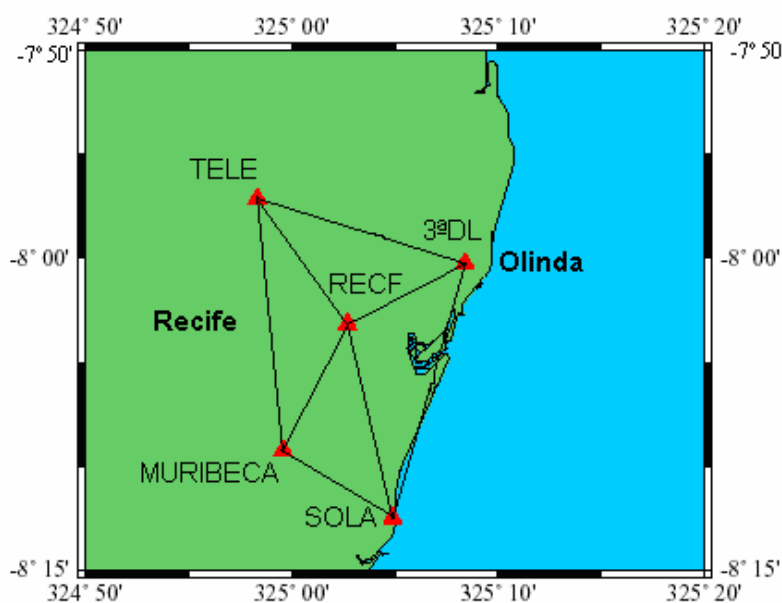


Figura 7.3: Rede de referência GPS instalada na RMR que pode ser utilizada na aplicação da metodologia proposta nesta Pesquisa.

O marco que compõe a estação MURIBECA está localizado no bairro da Muribeca (Rua Muribeca) na cidade de Jaboatão dos Guararapes, RMR, Figuras 7.4 e 7.5. Face às considerações expostas sobre a estabilidade dos pontos de referência considerados, sugere-se a instalação de novos pontos, *benchmarks*, que devem estar ancorados na rocha em local fora da área de investigação, como, por exemplo, no bairro de Aldeia localizado em Camaragibe, também na RMR.



Figura 7.4: Marco localizado na rua Muribeca, em frente à Igreja Nossa Senhora do Rosário.

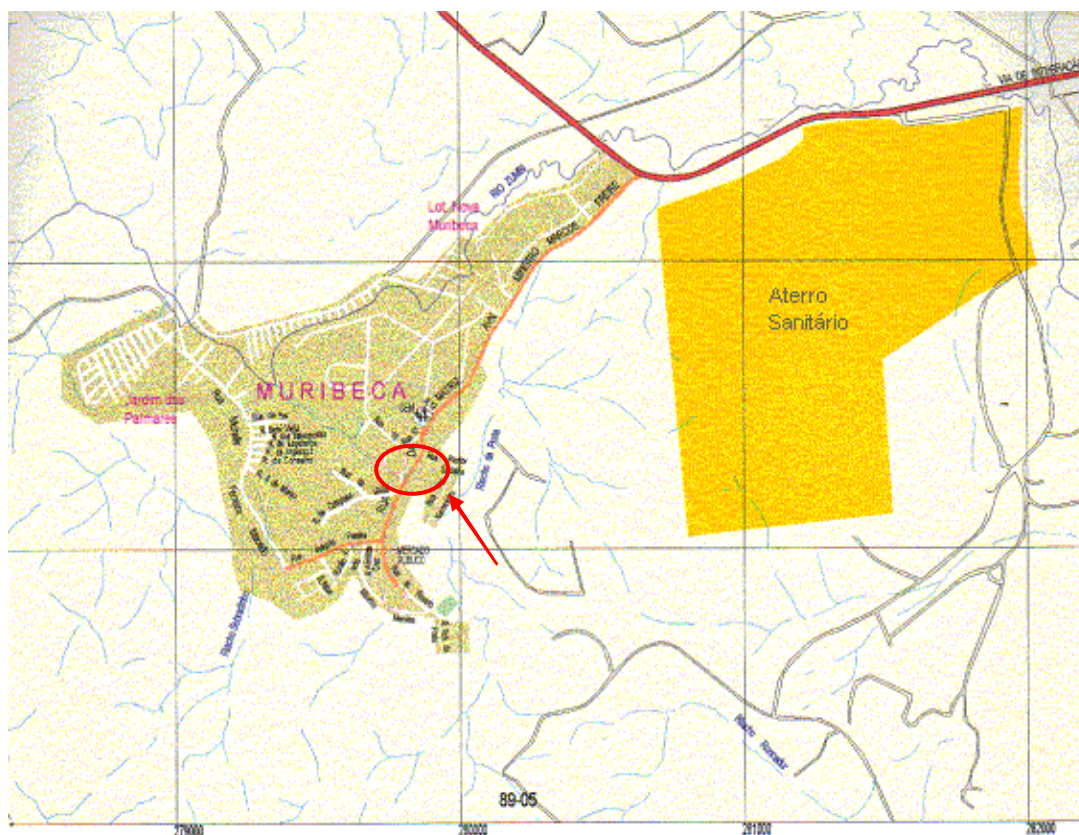


Figura 7.5: Localização da Rua Muribeca no distrito de Muribeca, município de Jaboatão dos Guararapes, na RMR.

O procedimento de execução do marco que compõe a estação MURIBECA está descrito a seguir.

1) Quanto ao detalhamento do projeto do marco externo :

Para materialização de marcos é recomendada a adoção das especificações para a construção e implantação de marcos geodésicos, abordadas na Norma de Serviço do Diretor de Geociências do IBGE nº 029/88 de 22 de setembro de 1988 (IBGE, 1988).

O marco externo implantado na Muribeca obedeceu à norma citada com algumas adaptações, aumentando a largura da base para melhor estabilidade conforme o detalhamento apresentado na Figura 7.6. Como pode ser visto, o projeto compreende uma placa de concreto que serve de base para o marco, de dimensões 1,00m x 1,00m x 0,10m.

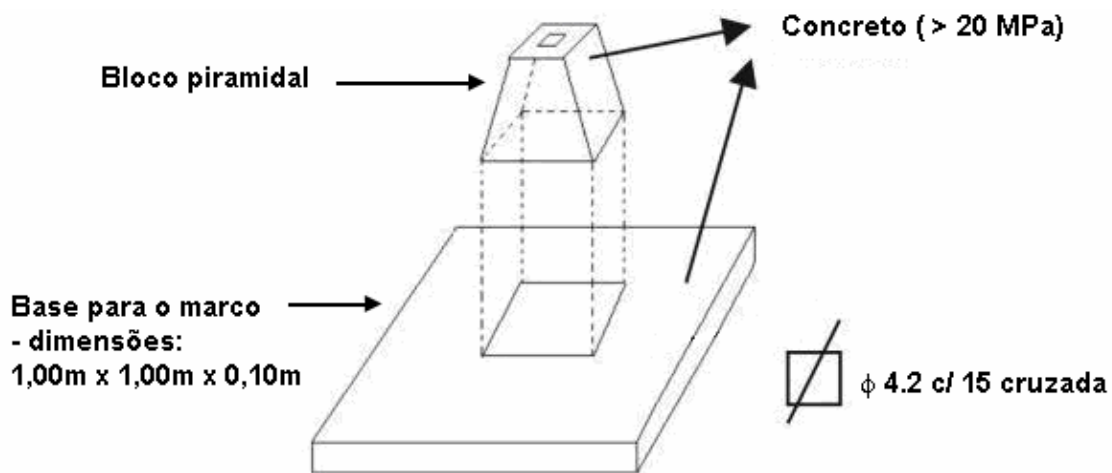


Figura 7.6: Detalhamento do projeto do marco implantado na Muribeca.

A Figura 7.7 apresenta em detalhe as dimensões do bloco piramidal, bem como a localização do mesmo com relação ao nível do terreno, tal que o topo do bloco está a 10cm abaixo do nível do terreno. O detalhe do pino localizado na cavidade que se encontra na superfície superior do bloco piramidal está apresentado na Figura 7.8.

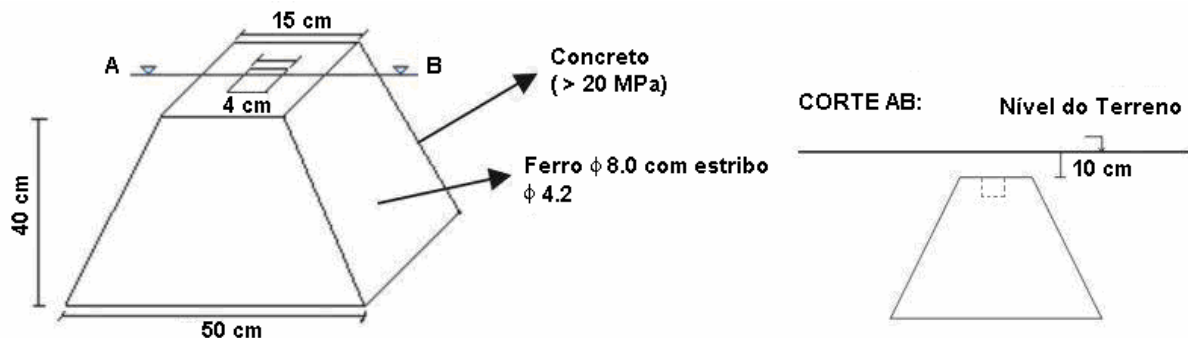


Figura 7.7: Dimensões do bloco piramidal e corte AB mostrando a posição do bloco com relação ao nível do terreno.

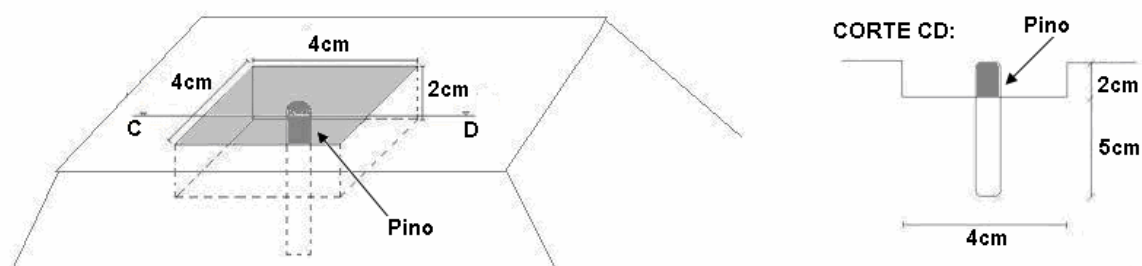


Figura 7.8: Detalhe da cavidade na parte superior do bloco piramidal e posição do pino com relação à cavidade.

2) Quanto à construção do marco externo:

A metodologia utilizada na construção do marco externo obedeceu aos passos apresentados na seqüência.

- a) Locação do ponto e escavação do solo (com dimensões de 1.20m x 1.20m e profundidade de 0.65m).
- b) Colocação de concreto magro e da forma de madeira.
- c) Construção da base em concreto de 20MPa (com dimensões de 1.00m x 1.00m x 0.10m)
- d) Posicionamento da armação, Figura 7.9a.
- e) Execução do concreto com devido adensamento, Figura 7.9b.
- f) Centralização do bloco pré-fabricado
- g) Adensamento e construção de um aterro (30 cm de areia + água). A complementação do aterro foi feita com o material retirado da própria escavação.
- h) Utilização de tijolos cerâmicos de 8 furos na construção de alvenaria para proteção lateral Figura 7.9c.
- i) Colocação da placa protetora em concreto armado (com dimensões de 0.35m x 0.35m x 0.06m), Figura 7.9d., e cobertura com material restante da escavação.

7.3.3 Os Pontos Objeto

Para fins de monitoramento de subsidência, foram construídos, no decorrer dessa pesquisa, os 10 primeiros pontos objeto para controle de altitude no bairro de Boa Viagem (Figura 7.10).

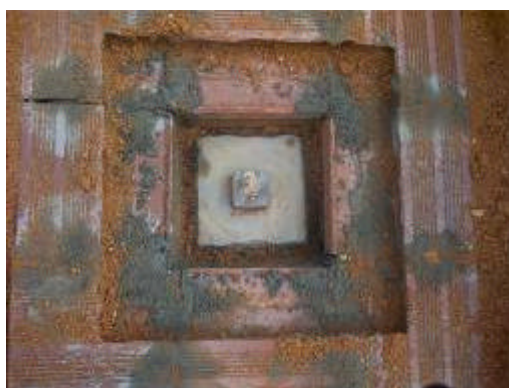
A norma técnica NBR 9061 (ABNT-1985) apresenta um esquema para construção de marcos que podem ser utilizados como pontos de controle de trabalhos geodésicos de alta precisão. O marco de referência como proposto pela NBR 9061, Figura 7.11, sofre movimentação quando sujeito à grandes vibrações como tráfego intenso e tem como característica positiva a facilidade na confecção do mesmo. Nota-se que a profundidade de cravação do tubo interno que servirá como marco de referência é variável e depende da geologia encontrada na região.



a) Posicionamento da armação.



b) Execução do concreto.



c) Alvenaria com tijolos cerâmicos.



d) Colocação da placa protetora.

Figura 7.9: Execução do marco externo.

No bairro de Boa Viagem os poços são bastante profundos chegando muitos deles a atingir a profundidade de 200m, onde se encontra uma camada de basalto com maior resistência. O custo de um marco até esta profundidade inviabilizou o uso de um marco com essas características, além do risco de flambagem da haste vertical interna.

Além disso, no caso em estudo, ao se utilizar o sistema GPS não há necessidade de ancorar o marco na rocha. Ao contrário, o importante é que o ponto objeto para controle de altitude acompanhe o movimento do terreno e que este movimento possa ser detectado com a técnica GPS. Optou-se, então, pela construção de um outro tipo de marco para instalação nos pontos de controle, bem mais barato, com 4m de profundidade e solidário com o terreno e, portanto, acompanhando seu deslocamento vertical (se houver).

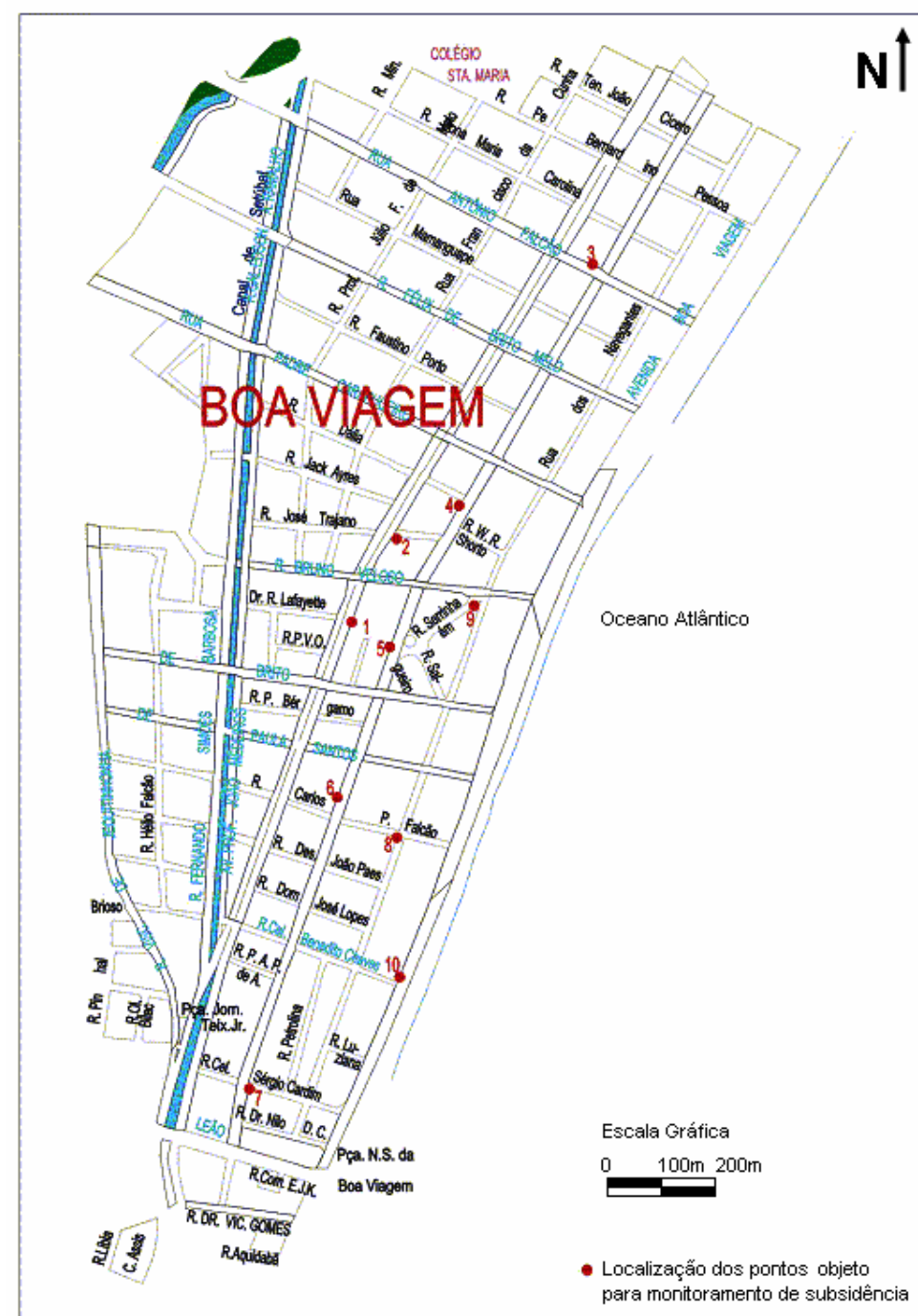


Figura 7.10: Mapa de situação dos pontos objeto em Boa Viagem.

Fonte: NBR 9061 da ABNT (1985)

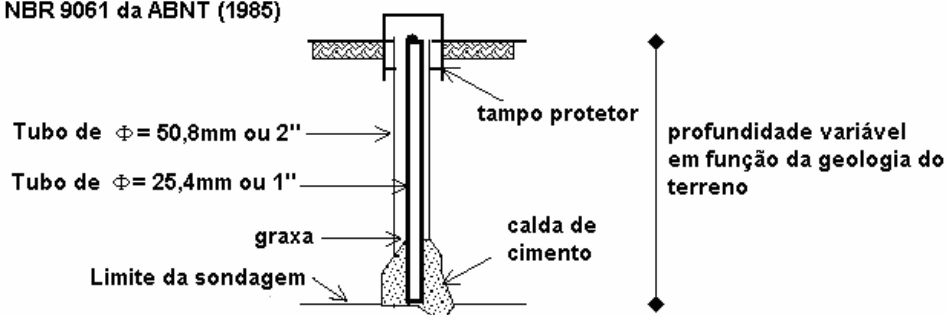


Figura 7.11: Esquema de marco de referência.

Os pontos de controle construídos, no decorrer dessa pesquisa, obedeceram ao seguinte procedimento:

1) Quanto à localização dos pontos de controle:

Vários locais foram pré-selecionados para instalação dos pontos considerando a grande concentração de poços e a conseqüente susceptibilidade à ocorrência de subsidência. A definição dos locais mais adequados, entretanto, foi feita observando, principalmente as seguintes características: capacidade de obtenção de sinais GPS, fácil acesso e boas condições para instalação e operação do equipamento GPS (receptor + antena).

2) Quanto ao detalhamento do projeto dos pontos de controle:

Todos os 10 marcos implantados na área de Boa Viagem obedeceram ao detalhamento apresentado na Figura 7.12.

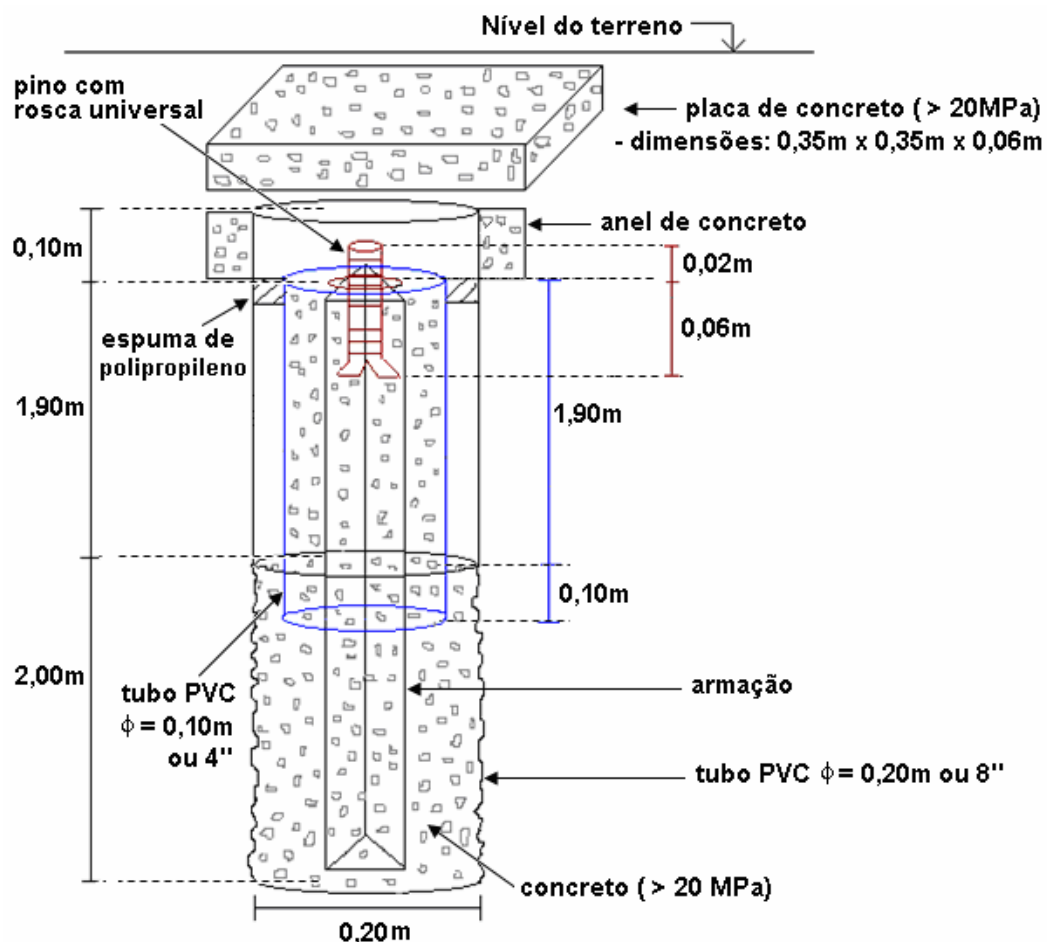


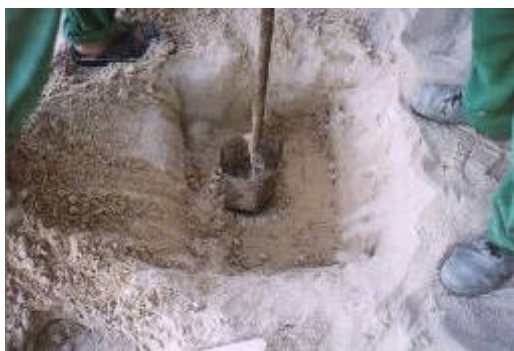
Figura 7.12: Detalhamento do projeto dos marcos implantados em Boa Viagem.

3) Quanto à construção dos marcos que servirão como pontos de controle:

A metodologia utilizada na construção dos marcos obedeceu aos passos apresentados na seqüência.

- a) Locação dos pontos e escavação do solo (com dimensões de 0.50m x 0.50m e profundidade de 0.20m).
- b) Perfuração do solo a trado (com diâmetro de 0.25m) até a profundidade possível, em média 1m sem presença de água, Figura 7.13a.
- c) Preparação do tubo de PVC através da realização de ranhuras com serra (para melhor aderência ao solo) e revestimento externo com piche e areia (para aumento da rugosidade da parede externa do tubo).
- d) Extração da areia, com a ajuda de uma sonda e colocação do tubo de PVC (com diâmetro de 0.20m e comprimento de 2m), até 1.85m, no furo aberto no solo.
- e) Introdução de um segundo tubo de PVC (com 2m de comprimento), para complementação dos 4.00m previsto em projeto, tal que permanecesse 0.10m do tubo acima do nível da implantação do anel de concreto, Figura 7.13b.
- f) Implantação da armação centralizada com 3 ferros de 8 mm com estribos de 5 mm a cada 15 cm (com 4m de comprimento), Figura 7.13c.
- g) Concretagem do tubo de PVC (concreto de 20MPa – usinado e transportado em caminhão betoneira e adensado através de motor vibrador com agulha), Figura 7.13d.
- h) Introdução do tubo de PVC interno (com diâmetro de 0.10m e comprimento de 2m) de comprimento e utilização de espaçadores de madeira para centralização do tubo interno.
- i) Utilização de um gabarito de madeira (com furo central de 0.10m de diâmetro) para concretagem e adensamento do interior do tubo de 0.1m, Figura 7.13e.
- j) Introdução e fixação do tampão de PVC (CAP) com rosca universal.
- l) Construção de anel de concreto para apoio da placa protetora, Figura 7.13f.
- m) Colocação de espuma em volta do tubo de PVC interno, Figura 7.13g.
- n) Colocação da placa protetora em concreto armado (com dimensões 0.35m x 0.35m x 0.06m), Figura 7.13h.
- o) Recuperação do calçamento e limpeza da área de trabalho.

A Tabela 7.1 apresenta as coordenadas aproximadas dos pontos objeto, essas coordenadas não devem, entretanto, ser utilizadas como exatas uma vez que foram obtidas com equipamentos GPS simples com o objetivo único de ter a localização aproximada dos pontos instalados.



a) Perfuração com trado.



b) Introdução do 2º tubo de PVC.



c) Implantação da armação.



d) Concretagem do tubo de PVC.



e) Gabarito de madeira.



f) Anel de concreto.



g) Colocação da espuma.



h) Colocação da placa protetora.

Figura 7.13: Execução dos pontos objeto.

Tabela 7.1: Coordenadas aproximadas dos pontos objeto

Ponto objeto	Latitude	Longitude	Detalhe da localização
BV01	08° 07' 21.2" S	34° 53' 57.4"	Av. Eng. Domingos Ferreira, próximo à Rua Bruno Veloso
BV02	08° 07' 15.3" S	34° 53' 54.9"	Cruzamento da Av. Eng. Domingos Ferreira com a Rua José Trajano
BV03	08° 06' 58.0" S	34° 53' 41.0"	Cruzamento da Av. Conselheiro Aguiar com a Rua Antônio Falcão
BV04	08° 07' 13.0" S	34° 53' 49.7"	Cruzamento da Av. Conselheiro Aguiar com a Rua Dália
BV05	08° 07' 23.5" S	34° 53' 54.8"	Cruzamento da Av. Conselheiro Aguiar com a Rua Ribeiro de Brito
BV06	08° 07' 30.8" S	34° 53' 57.3"	Cruzamento da Av. Conselheiro Aguiar com a Rua Ernesto de Paula Santos
BV07	08° 07' 51.0" S	34° 54' 4.4"	Cruzamento da Av. Conselheiro Aguiar com a Rua Cel. Sérgio Cardim
BV08	08° 07' 34.9" S	34° 53' 54.3"	Cruzamento da Rua dos Navegantes com a Rua Carlos Pereira Falcão
BV09	08° 07' 20.0" S	34° 53' 49.0"	Cruzamento da Rua dos Navegantes com a Rua Serinhaém
BV10	08° 07' 46.3" S	34° 54' 1.5"	Av. Boa Viagem, próxima à Rua Cel. Benedito Chaves

Os pontos de controle construídos estão distribuídos ao longo da área de estudo e espaçados de 300 a 500 metros e serão utilizados para verificação de ocorrência de movimento vertical da superfície do solo. Por tratar-se de uma área urbana, alguns desses pontos objetos poderão apresentar em alguns momentos do dia horários com difícil recepção dos sinais GPS.

As Figuras de 7.14a até 7.14j mostram as fotos dos pontos de controle instalados segundo o mapa apresentado em 7.10.



a) Marco BV01 (Av. Eng. Domingos Ferreira).



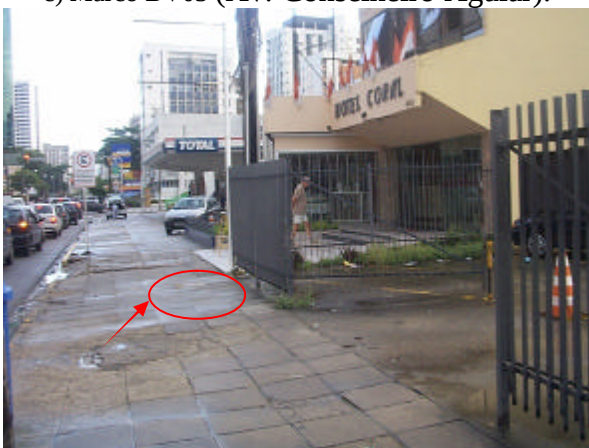
b) Marco BV02 (Av. Eng. Domingos Ferreira).



c) Marco BV03 (Av. Conselheiro Aguiar).



d) Marco BV04 (Av. Conselheiro Aguiar).



e) Marco BV05 (Av. Conselheiro Aguiar).



f) Marco BV06 (Av. Conselheiro Aguiar).



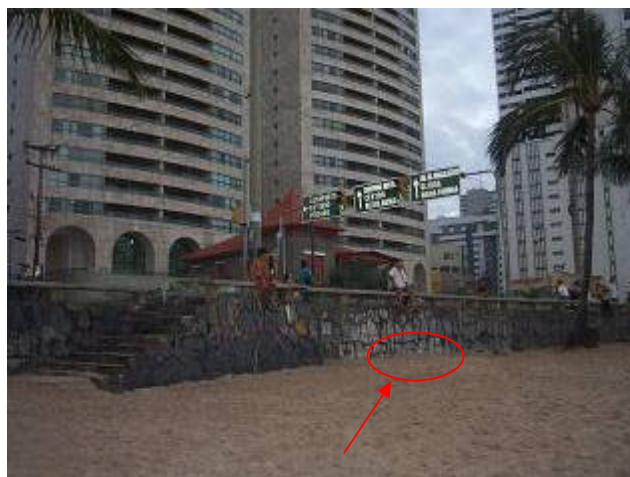
g) Marco BV07 (Av. Conselheiro Aguiar).



h) Marco BV08 (Rua dos Navegantes).



i) Marco BV09 (Rua dos Navegantes).



j) Marco BV10 (Av. Boa Viagem).

Figura 7.14: Localização dos marcos implantados em Boa Viagem.

7.3.4 Planejamento da Rede de Monitoramento

Esta seção tem por objetivo a apresentação de uma metodologia para a implantação de uma rede de monitoramento da subsidência em regiões costeiras. Nas cidades de médio porte do Brasil essas redes de monitoramento podem ser integradas à rede estadual. Além disso, sabendo-se da necessidade de amarração de qualquer levantamento a pontos de referência com coordenadas conhecidas, recomenda-se o uso de informações referentes à uma rede geodésica de precisão, como a RBMC.

Os aspectos fundamentais à implantação desse tipo de rede já foram discutidos anteriormente e englobam: a definição do tipo de rede, o planejamento e seleção dos pontos de referência e dos pontos de controle, a escolha e materialização dos marcos e o estabelecimento da rede. O estabelecimento da rede compreende a realização das observações GPS e respectivos cálculos e ajustamentos. Apenas com a obtenção das coordenadas finais de todos os pontos que compõem a rede de monitoramento é possível estudar o comportamento da coordenada vertical do posicionamento e verificar a ocorrência ou não de deslocamentos.

Com relação à Região Metropolitana de Recife, foram realizadas as seguintes atividades:

- definição do tipo de rede;
- planejamento e seleção dos pontos de referência; e
- planejamento, seleção e implantação dos pontos objeto.

Visando a utilização da rede proposta, para fins de monitoramento da subsidência na região de Boa Viagem, são feitas a seguir algumas recomendações.

1. Com relação aos equipamentos e ao método de rastreamento:

Receptores de diferentes modelos ou fabricantes podem ser empregados em um mesmo projeto, mas deve-se garantir a simultaneidade das observações e a mesma taxa de observação. Outras exigências que os receptores devem atender é permitir a conversão dos diferentes formatos de arquivos de observação gravados pelos receptores a um formato único (formato RINEX - *Receiver Independent Exchange Format* – item 5.3.1, por exemplo). No tipo de aplicação a que se destina essa pesquisa é indispensável o uso de receptores de dupla frequência. Essa exigência é ainda mais importante em levantamentos com longas linhas de base ou em áreas de forte atividade ionosférica.

Recomenda-se, também, o emprego de um mesmo tipo de antena para todos os receptores, de forma que sejam minimizados os erros sistemáticos provenientes de diferentes definições de centros de fase. Nesse caso, não se pode utilizar diferentes receptores. Em caso de aquisição de novos equipamentos, deve-se priorizar a obtenção de antenas que apresentem menor sensibilidade aos efeitos de multicaminhos e menor variação do centro de fase (item 5.3.2c). Com relação à precisão do equipamento, o mais adequado para esse uso é o GPS geodésico, com precisões de $5\text{ mm} + 5\text{ ppm}$.

No que diz respeito ao método de rastreamento, recomenda-se o emprego de posicionamento relativo, ou seja, o levantamento baseado na utilização simultânea de, pelo menos, dois rastreadores. A condição de um ponto de coordenadas conhecidas pode ser satisfeita com a utilização da estação localizada na RECF pertencente à RBMC. As informações de observação do aparelho instalado nessa estação serão, então, empregadas para realizar as correções nos outros pontos observados (item 5.3.3), por ocasião do ajustamento dos dados.

2. Com relação ao tempo de observação:

De forma prática, o tempo de observação adotado é selecionado conforme a disponibilidade de equipamentos, da precisão desejada e de pessoal. Os resultados dos dois experimentos realizados nessa pesquisa, em concordância com os relatos apresentados na literatura científica, evidenciam a influência do tempo de observação na obtenção de coordenadas precisas. Conforme discutido no item 6.3.3a, foram obtidos resultados com discrepância média de 0.5 cm com o emprego de 12 horas de observação. Por outro lado, após todos os períodos de tempo analisados, e com base numa análise geral dos resultados, verifica-se que um período de 6 horas pode ser suficiente para a obtenção de coordenadas verticais com discrepância média inferior a 1 cm. Assim sendo, recomenda-se o rastreamento dos satélites por um período mínimo de 6 horas, em cada um

dos pontos de controle. Quanto maior a quantidade de equipamentos disponíveis, menos dias serão utilizados para a coleta de dados, a quantidade reduzida desses, por outro lado, aumenta a duração dos trabalhos de campo.

A alta atividade ionosférica na região equatorial é um outro fator a ser considerado, pois requer o emprego de curtas distâncias (< 20 km). De acordo com a situação dos pontos propostos nessa pesquisa (de controle e de referência) o distanciamento máximo entre eles é dessa ordem. Assim sendo, e com base nas informações dadas por Willgalis et al. (2001) e discutidas no item 5.3 quando comenta-se a influência do atraso ionosférico na precisão dos resultados, deve-se evitar medições com GPS entre o pôr-do-sol e a meia-noite. Apesar do horário mais indicado ser de meia-noite até o nascer do sol, a realização dos trabalhos de campo até o horário do pôr-do-sol devem corresponder a bons resultados. Com relação à taxa de observação, em posicionamentos estáticos, a taxa de observação a cada 15 segundos tem se mostrado adequada.

3. Com relação ao comprimento da linha de base:

Para fins de monitoramento da subsidência, as simulações realizadas nessa pesquisa no âmbito do experimento 2 mostram que é possível a detecção de deslocamentos verticais com discrepância média da ordem de 5mm para linhas de base até 30 km (item 6.3.2.3). Nesse contexto, as estações de referência indicadas anteriormente (RECF, UFPE, SOLA, 3^aDL e TELE) como pontos de referência externos à área de teste estão posicionadas de forma adequada entre elas (Figura 7.1) e com relação aos pontos de controle. A estação de referência mais importante da rede proposta, pois é a de coordenadas mais acuradas, é a estação RECF pertencente à rede de monitoramento RBMC. A distância dessa estação aos pontos de controle na área de Boa Viagem é em torno de 12 km. A estação mais afastada da região em que se encontra os pontos de controle é a 3^aDL, cujo distanciamento é da ordem de 20 km. Assim sendo, no que se refere ao comprimento da linha de base, todas as estações de referência propostas favorecem a obtenção de coordenadas verticais com precisão de alguns milímetros.

4. Com relação ao número de estações de referência:

Tal como discutido anteriormente, item 6.3.3c, é possível obter bons resultados (discrepância média da ordem de 5 mm) com apenas uma estação de referência, o inconveniente desse tipo de solução é que, para que esses bons resultados sejam alcançados, despende-se um longo período de tempo de observação, de cerca de 24 horas. É importante observar que os resultados apresentados nessa pesquisa foram coletados na

Alemanha, região que apresenta baixa atividade ionosférica. Nas condições de Recife, sujeito à grande atividade ionosférica, para obtenção de valores de mesma ordem esse período de observação pode ser maior.

Foram analisados também os resultados obtidos com duas, três e sete estações de referência. As situações de duas e três estações de referência correspondem à simulação de uma região costeira, onde as estações encontram-se margeando a área de monitoramento em apenas um lado. Nesse contexto, verificou-se pouca diferença entre os resultados obtidos, no que diz respeito à discrepância em relação à solução padrão e com relação ao desvio padrão. Mesmo assim, o aumento no período de observação resulta nitidamente em resultados menos discrepantes e mais precisos.

De acordo com os resultados discutidos no item 6.3.3c, Figuras 6.62 e 6.63, os melhores valores são obtidos com o emprego de sete estações de referência distribuídas ao redor da área de investigação. Com a atual tecnologia existente, esse tipo de situação ainda não é possível em regiões costeiras. Assim sendo, recomenda-se o emprego de pelo menos três estações de referência, por um período igual ou superior a 6 horas, situação em que pode ocorrer uma discrepância da ordem de 1 cm e desvios-padrão inferiores a 2.5 mm. Pode-se considerar portanto que a variação de altitude detectável com a tecnologia utilizada e a metodologia aplicada é superior a 5mm.

5. Com relação à existência de obstruções:

A existência de obstruções nas proximidades dos pontos de observação merece atenção por parte dos usuários do sistema GPS visando minimização ou mesmo a eliminação dos efeitos degradantes daí resultante. Este aspecto precisa ser discutido no âmbito dessa pesquisa, principalmente porque a área de investigação corresponde a uma região altamente urbanizada, populosa e, por isso, com grande ocorrência de edificações próximas. Os efeitos degradantes que podem ser esperados nessa situação são a ocorrência de multicaminhos (item 6.3.3c) e a obstrução dos sinais GPS (item 6.3.3d). Conforme a situação apresentada para a rede proposta nessa pesquisa, os pontos de referência não se encontram sujeitos à ocorrência desses efeitos uma vez que são implantados em localidades elevadas que devem estar livres de obstruções. O mesmo, entretanto não deve se verificar nos pontos de controle (Figuras 7.14a até 7.14j). Em qualquer dos dois efeitos considerados a observação por longos períodos de observação favorece a obtenção de coordenadas precisas. Os resultados da simulação de prédios na área de investigação indicam que se pode obter coordenadas verticais com discrepância de até 0.5 cm com

períodos de 12 horas de observação mesmo com a presença de obstruções. Em períodos de 6 horas esse valor foi da ordem de 1 cm.

Assim, além de um período igual ou superior a 6 horas, recomenda-se o uso de um software de planejamento para a escolha do horário com maior quantidade de satélites visíveis e com bom PDOP. A influência da existência de muros ou cercas pode ser minimizada com o uso de tripés elevados, para colocação da antena GPS sobre o marco.

Em caso de instalação de novos pontos de controle, recomenda-se que seja feita uma análise prévia no local, para que no local de implantação do marco exista o mínimo possível de obstruções, devendo-se priorizar localidades afastadas de obstáculos por cerca de 50 metros.

Com a realização de simulações numéricas, considerando as características de exploração, litologia e parâmetros hidráulicos e mecânicos adequados à área de estudo, será possível investigar a periodicidade das medições a serem realizadas com o GPS. Sugere-se, entretanto, que sejam realizadas pelo menos duas medições por ano, sendo que esse intervalo entre as campanhas de medições poderá ser aumentado conforme os resultados obtidos com o monitoramento e com as simulações realizadas.

6. Outras recomendações:

Com relação à observação das condições meteorológicas, verifica-se que essa é função dos requisitos de precisão, comprimento das linhas de base, diferença de altitude entre as estações e a finalidade do projeto. Geralmente, em levantamentos locais, como os indicados nessa pesquisa, as observações meteorológicas não são necessárias. Sendo suficiente a adoção de um modelo de refração troposférica por ocasião do processamento.

No que se refere ao processamento das observações, visando à identificação e a resolução de qualquer problema com os dados obtidos, estes devem ser processados logo que possível após a sessão de observação. Considerando-se a necessidade de obtenção de coordenadas verticais com alta precisão e alguns estudos realizados sobre o tema (Santos, 1996 e Romão, 1995) recomenda-se a utilização de um software científico, como o GEONAP, por exemplo, ao invés de um software comercial para ajustamento das observações.

No que se refere às estações de referência adotadas, sugere-se a instalação de novos *benchmarks* ancorados na rocha num local fora da área de investigação (como o bairro de Aldeia localizado em Camaragibe, por exemplo). Com a instalação desses novos pontos de referência, deve ser feito um controle da estabilidade dos pontos de referência adotados.

CAPÍTULO 8

SÍNTESE CONCLUSIVA

8.1 Conclusões

O levantamento de informações, apresentado no Capítulo 2, referente aos casos de subsidência do solo, como consequência da exploração demasiada da água subterrânea, ocorridos em toda a parte do mundo, inclusive no Brasil, mostra que o problema de subsidência é um risco real. Apenas nos Estados Unidos mais que 44.000 km² em 45 estados têm sido diretamente afetados pela subsidência.

A análise das características relacionadas com a subsidência do solo devido à extração de água de camadas subterrâneas, tais como magnitude e velocidade de ocorrência, indica que, de uma forma geral, tanto os aquíferos sedimentares quanto os aquíferos cársticos estão sujeitos à ocorrência desse fenômeno em grandes magnitudes. Sendo que nos aquíferos sedimentares eles ocorrem de forma muito mais lenta que nos cársticos, como pode ser visto nos casos relatados nos Estados Unidos, onde ocorreu um rebaixamento de solo de 9m, associado à exploração de um aquífero sedimentar, em 52 anos, e um outro associado à ocorrência de aquífero cárstico de 34m em 48 horas (Capítulo 2).

8.1.1 Geologia e Hidrogeologia

Na caracterização da área de estudo foram considerados alguns aspectos relacionados com a localização, o clima, a geologia e a hidrogeologia. A apresentação das seções litológicas efetuadas na área possibilitou um melhor conhecimento das características dos aquíferos presentes.

No caso das bacias de Boa Viagem em Recife, o regime de superexploração de água subterrânea, o rebaixamento excessivo do nível d'água nos poços, a precária recarga dos aquíferos mais profundos e disposição litológica que compreende camadas arenosas com intercalações de argila são subsídios para indicar a possibilidade de ocorrer subsidência no bairro de Boa Viagem, como foi apresentado no Capítulo 4. No entanto só o monitoramento sistemático e continuado ao longo de vários anos confirmará ou não a ocorrência generalizada de subsidência. Este monitoramento poderá, também, subsidiar o gerenciamento de situações de risco ou a adoção de medidas mitigadoras.

8.1.2 Gestão dos recursos hídricos na área de estudo.

No que se refere ao controle da exploração demasiada dos recursos hídricos, tal como foi apresentado no Capítulo 4, já se conta atualmente com um mapa de Zoneamento Explorável dos Aquíferos, onde se dispôs, para cada zona, baseado num estudo hidrológico e hidroquímico, as restrições de captação. Sendo que esses estudos foram realizados a partir da preocupação com o acentuado nível de rebaixamento dos aquíferos e a deteriorização da qualidade da água, verifica-se a necessidade de ampliar os estudos para identificação de áreas na RMR que têm possibilidade de ocorrência de subsidência, objetivando estabelecer um Zoneamento que considere esse risco.

No que se refere à análise sobre a possibilidade de ocorrência de subsidência numa determinada área, foram apresentadas, no Capítulo 3, duas ferramentas que podem subsidiar essa investigação: o levantamento da susceptibilidade à subsidência, baseado em informações sobre utilização do solo, geologia e hidrogeologia do local, e a realização de simulação numérica.

8.1.3 Simulação numérica

A revisão bibliográfica realizada mostrou que as ferramentas computacionais já são utilizadas com bom desempenho e em várias localidades para simulação da subsidência.

As considerações sobre o fluxo de água no meio poroso e a compactação do solo apresentadas no Capítulo 3 mostraram que, considerando a grande quantidade de variáveis envolvidas e a complexidade das equações, um modelo que acople o comportamento hidro-mecânico não é de fácil aplicação, sendo necessário portanto a utilização de programas computacionais capazes de simular a compactação do sistema aquífero e subsidência do solo. Como pôde ser visto, identificou-se dois programas computacionais apropriados para esse fim: o MODFLOW (que já vem sendo utilizado com êxito em muitas investigações) e o CODE_BRIGTH (que já vem sendo testado e aplicado com êxito em problemas reais de engenharia). A utilização de modelagem numérica representa uma ferramenta bastante útil no estudo da subsidência do solo, bem como para subsidiar o estabelecimento de normas de restrição de uso e o gerenciamento dos mananciais hídricos subterrâneos. Os resultados de simulações realizadas com o CODE-BRIGHT indicam que o programa computacional pode ser utilizado no estudo da subsidência, desde que os parâmetros hidro-mecânicos sejam bem conhecidos e que os cenários simulados sejam muito próximos aos cenários reais.

8.1.4 Monitoramento da subsidência utilizando GPS

Para atender o objetivo de verificação da capacidade de detecção de pequenos deslocamentos verticais com o emprego da técnica GPS foram realizados dois experimentos com vistas à detecção de pequenos deslocamentos verticais, onde foram investigados os aspectos relacionados com o tempo de observação, o comprimento da linha de base e o número de estações de referência na implantação de uma rede para monitoramento da subsidência em Recife, estratégia de processamento e limitações na capacidade de detecção de deslocamentos verticais sub-centimétricos.

Com relação ao tempo de observação, os resultados dos dois experimentos realizados nessa pesquisa, em concordância com os relatos apresentados na literatura científica, evidenciam a influência do tempo de observação na obtenção de coordenadas precisas. Conforme discutido no item 6.3.3a, foram obtidos resultados com discrepância média de 0.5 cm com o emprego de 12 horas de observação. Por outro lado, após todos os períodos de tempo analisados, e com base numa análise geral dos resultados, verifica-se que um período de 6 horas pode ser suficiente para a obtenção de coordenadas verticais com discrepância média inferior a 1 cm. Assim sendo, recomenda-se o rastreamento dos satélites por um período mínimo de 6 horas, em cada um dos pontos de controle.

Com relação ao comprimento da linha de base, para fins de monitoramento da subsidência, as simulações realizadas nessa pesquisa no âmbito do experimento 2 mostram que é possível a detecção de deslocamentos verticais com discrepância média da ordem de 5mm para linhas de base até 30 km (item 6.3.2.3). Nesse contexto, as estações de referência indicadas anteriormente como pontos de referência externos à área de teste estão posicionadas de forma adequada entre elas e com relação aos pontos de controle no que se refere ao comprimento da linha de base.

Com relação ao número de estações de referência, tal como discutido no item 6.3.3c, é possível obter bons resultados (discrepância média da ordem de 5 mm) com apenas uma estação de referência, o inconveniente desse tipo de solução é que, para que esses bons resultados sejam alcançados, depende-se um longo período de tempo de observação, de cerca de 24 horas. De acordo com os resultados discutidos no item 6.3.3c, Figuras 6.62 e 6.63, os melhores valores são obtidos com o emprego de sete estações de referência distribuídas ao redor da área de investigação. As situações de duas e três estações de referência correspondem à simulação de uma região costeira, onde se verificou pouca diferença entre os resultados obtidos, no que diz respeito à discrepância em relação à solução padrão e com relação ao desvio padrão. Mesmo assim, o aumento no período de observação resulta nitidamente em

resultados menos discrepantes e mais precisos. Em regiões costeiras, onde não é possível a utilização de estações de referência bem distribuídas ao redor da área de monitoramento, deve-se priorizar a necessidade de longos períodos de observação e, pelo menos, três estações de referência. Como os marcos das estações de referência sugeridos nessa Pesquisa não estão firmemente ancorados na rocha do embasamento cristalino, pode ocorrer alguma deformação nos mesmos, de modo que é necessário, antes de empregá-los no monitoramento dos deslocamentos verticais do solo, fazer uma amarração em relação a pontos ancorados em rocha.

Com relação à existência de obstrução, os resultados simulação de prédios na área de investigação indicam que se pode obter coordenadas verticais com discrepância de até 0.5 cm com períodos de 12 horas de observação mesmo com a presença de obstruções. Em períodos de 6 horas esse valor foi da ordem de 1 cm. Este aspecto precisa ser discutido no âmbito dessa pesquisa, principalmente porque a área de investigação corresponde a uma região altamente urbanizada, populosa e, por isso, com grande ocorrência de edificações próximas. Os efeitos degradantes que podem ser esperados nessa situação são a ocorrência de multicaminhos (item 6.3.3c) e a obstrução dos sinais GPS (item 6.3.3d). A consideração das obstruções para definição do melhor horário para realização das observações é muito importante e, mesmo resultando em períodos com PDOP ruim e número de satélites insuficiente (< 4), para obtenção de coordenadas que podem ser consideradas acuradas, é preferível utilizar todas as observações coletadas no período para realização do ajustamento.

Com relação à estratégia de monitoramento, os resultados do processamento em linhas de base e do processamento em rede mostraram que o segundo é o mais indicado para obtenção de coordenadas com alta precisão, verificou-se uma diferença de aproximadamente 1 cm entre os valores máximos obtidos, ou seja, isso em valores médios representou 2 cm e 0.5 cm para os processamentos em linha de base e em rede, respectivamente.

Na análise realizada no item 6.3.2.5, com exceção do resultado da simulação 1, as discrepâncias foram da ordem de 5mm ou menos. Apesar de não estar sujeita a deslocamentos verticais, a variação, mesmo que da ordem de alguns milímetros, verificada na antena msd1, pode ser resultante de variação no centro de fase da antena, uma vez que o tipo de antena utilizado no teto de medições é diferente do tipo utilizado nas estações SAPOS. Além disso, foram utilizadas informações sobre as variações do centro de fase das antenas através de arquivos de calibração das antenas, na ocasião do processamento das observações, apenas para as antenas de referência. De acordo com Menge (2003), pode-se esperar um efeito absoluto do ruído nas medições, menor ou igual a 3 mm. O ruído é portanto um agente

limitador da capacidade de detecção dos deslocamentos verticais, devendo-se considerar, nesse contexto, como possível ocorrência de variação de altitude, apenas os valores superiores ao mesmo.

No item 6.4.2 foi realizada uma análise dos deslocamentos obtidos no experimento 2, com o software PANDA (item 6.4.1). Os testes estatísticos referentes à estação de referência 0640 obedeceram à condição imposta pela hipótese nula, tanto na análise realizada com as observações coletadas em duas horas quanto com as coletadas em 24 horas, indicando que, como aconteceu de fato, a estação 0640 não sofreu deslocamento. Os resultados da estatística referente à estação msd2 mostraram a ocorrência de todos os deslocamentos provocados, indicando que a metodologia aplicada é adequada à detecção de pequenos deslocamentos verticais. Com base nas coordenadas obtidas do ajustamento no GEONAP, e com o emprego do PANDA, verificou-se que é possível detectar variações dos pontos, da ordem de alguns milímetros, as quais se situam na ordem de grandeza da acurácia das observações, mesmo com curtos períodos de tempo

Os estudos desenvolvidos nesta pesquisa mostraram que é possível utilizar o GPS como instrumento de monitoramento da subsidência na área de estudo com um desempenho satisfatório que garante a sua aplicabilidade não apenas ao monitoramento de subsidência, mas também a outros problemas práticos de engenharia que envolvam rebaixamento de solo ou acompanhamento de deslocamentos em edificações.

8.2 Sugestões para novas pesquisas

Para realização de estudos, em continuidade a esta linha de pesquisa, faz-se as seguintes sugestões:

- Investigar as características geotécnicas do solo a várias profundidades para obtenção de parâmetros de campo com vistas à aplicação em simulações numéricas.
- Realizar simulações numéricas na área de estudo explorando as informações geológicas e hidrogeológicas existentes com base na situação atual de exploração e considerando cenários futuros visando o gerenciamento da exploração da água subterrânea.
- Dar continuidade ao trabalho iniciado nessa pesquisa e realizar medições com GPS nos pontos de controle instalados na área de estudo e no marco externo instalado na Muribeca, ao longo de muitos anos, para verificar a ocorrência de deslocamentos verticais, utilizando a metodologia apresentada no âmbito dessa Pesquisa.
- Utilizar técnicas de geoprocessamento associadas à modelagem numérica para realizar um mapeamento das áreas com possibilidade de risco de subsidência na RMR.

- Organizar subsídios para o estabelecimento de normas, portarias, ou similares, de restrição e controle do uso das águas subterrâneas no âmbito da Política Estadual de Recursos Hídricos.
- Aplicar metodologias para desenvolvimento de propostas para conscientização da população quanto aos riscos do uso indiscriminado das águas subterrâneas. A abordagem proposta deverá contemplar a conscientização dos perfuradores de poços.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIDIN, H.Z., DJAJA, R., DARMAWAN, D., HADI, S., AKBAR, A., RAJIYOWIRYONO, H., SUDIBYO, Y., MEILANO, I., KASUMA, M.A., KAHAR, J., SUBARYA, C. (2001). Land Subsidence of Jakarta (Indonesia) and its Geodetic Monitoring System. Em: Natural Hazards 23, pp. 365-387.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1985) NBR 9061 - Segurança de escavação à céu aberto. Rio de Janeiro, 31p.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (1994) NBR 13133 – Execução de levantamento topográfico. Rio de Janeiro.
- AdV – Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (Associação das Agências Geodésicas dos Estados da República Federal da Alemanha) (2005) Grundlagen – SAPOS...bringt Sie in Position! Hannover, Alemanha.
- AITCHINSON, G.D. (1965) Discussion in Proceedings. Em: 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Montreal, Vol. 3, p. 318-321.
- AITCHINSON, G.D., PETER, P., MARTYN, R. (1973) Long term observation of deformation in structures founded in expansive clays in South Australia. Em: Proceedings of 3rd International Conference on Expansive Soils, Haifa, Vol. 2, p. 109-113
- ALHEIROS, M.M., FERREIRA, M.G.V.X., LIMA FILHO, M.F. (1995) Mapa Geológico do Recife. Convênio Carta Geotécnica da Cidade do Recife- FINEP/LSI-DEC-UFPE. Editoração 3a. Divisão de Levantamento / MEx
- ALLIS, R.G. (2000) Review of Subsidence at Wairakei Field, New Zealand. Em: Geothermics, 29:455-478
- ALMEIDA, C.A.M., NIEVINSKI, F.G., ROCHA, R.S. (2002) Avaliação da transformação de Coordenadas Geodésicas usando Diferentes Métodos e Parâmetros no Brasil. Anais do Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário, Florianópolis – RS, Brasil. Disponível em: www.spg.com.br/informacoes/artigos_gps/125.htm

- ALONSO, E. E., BATLLE, F., GENS, A., LLORET, A. (1988) Consolidation analysis of partially saturated soils - Application to earthdam. Em: International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Innsbruck, p. 1303-1308.
- ALONSO, E. E., GENS, A., JOSA, A. (1990) A constitutive model for partially saturated soils. Geotechnique: 40 (3), p. 405-430.
- ALONSO, E.E. (1993) Constitutive modelling of unsaturated soils. Em: Unsaturated soils: recent developments and applications (E. Alonso, A. Gens editors), Civil Engineering European Course (COMETT).
- AMIN, A., BANKHER, K. (1997) Causes of Land Subsidence in the Kingdom of Saudi Arabia. Em: Natural Hazards: 16, p. 57-63
- ARBHABHIRAMA, A., KRIDAKORN, C. (1968) Steady downward flow to a water table. Em: Water Resources Research: 4, p. 1249-1257.
- ARTUSO, E., OLIVEIRA, M.M., LOBO FERREIRA, J.P.C. (2004) Capítulo 7 – Avaliação da Vulnerabilidade à Poluição das Águas Subterrâneas do sector de Évora do Sistema Aquífero de Évora-Montemor-Cuba. Em: Água Subterrânea: Aquíferos Costeiros e Aluviões, Vulnerabilidade e Aproveitamento. p. 277-321.
- ATAPOUR, H., AFTABI, A. (2002). Geomorphological, geochemical and geo-environmental aspects of karstification in the urban areas of Kerman city, southeastern, Iran. Em: Environmental Geology 42, p. 783-792
- BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO – BNDES (1996) Saneamento Ambiental - foco: Saneamento Básico. Disponível em: www.bndes.gov.br (acessado em 26 de Abril de 2005)
- BATISTA, R.P. (1984) Estudo Hidrogeológico da Planície do Recife. Dissertação de Mestrado, UFPE, Pernambuco, Brasil, 91 p.
- BEAR, J., VERRUIJT, A. (1987) Modeling Groundwater Flow and Pollution. Kluwer Academic Publ.
- BELL, J.W. (1997) Las Vegas Valley: Land Subsidence and Fissuring Due to Ground-Water Withdrawal. Em: Nevada Bureau of Mines and Geology. Disponível em: http://geochange.er.usgs.gov/sw/impacts/hydrology/vegas_gw/

- BITELLI, G., BONSIGNORE, F., UNGUENDOLI, M. (2000) Levelling and GPS networks to monitor ground subsidence in the Southern Po Valley. Em: Journal of Geodynamics, 30: 355-369
- BLACK, H.D. (1978) An easily implemented algorithm for the tropospheric range correction. Em: Journal of Geophysical Research, Vol. 38 (B4), p. 1825-1828
- BLIGHT, G.E. (1965) A study of effective stress for volume change. Em: Moisture Equilibria And Moisture Changes in Soils Beneath Covered Areas, Butterworths, Sydney, p. 259-269
- BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. (1996). A Gestão de Recursos Hídricos. Em: Informe Infra-Estrutura Nº 5. Área de Projetos de Infra-Estrutura do BNDES, equipe responsável: GSET 4/AI. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/conhecimento/Infra/g7405.pdf> (acessado em 31/07/2005)
- BÖDER, V., MENGE, F., SEEBER, G., WÜBBENA, G., SCHMITZ, M. (2001) How to Deal With Station Dependent Errors-New Developments of the Absolute Field Calibration of PCV and Phase-Multipath With a Precise Robot. Em: Proceedings of the 14th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation ION GPS 2001, September, Salt Lake City, Utah
- BOLZON, G., SCHREFLER, B.A., ZIENKIEWICZ, O.C. (1996) Elastoplastic soil constitutive laws generalised to partially saturated states. Em: Geotechnique: 46 (2), p. 279-290.
- BOMFORD, G. (1980) Geodesy, Oxford University Press, New York, USA.
- BORRE, K., JONG, K., PICHOT, C. (2001) Subsidence Monitoring System Using Real-Time GPS Sensors. Anais do 14th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation GPS 2001, Salt Lake City, Utah (publicado em CD).
- BORGUETTI, N.R.B., BORGHETTI, J.R., ROSA FILHO, E.F. (2004) Aquífero Guarani. Livro disponível no site da ABAS: http://www.abas.org.br/index.php?PG=aguas_subterraneas&SPG=aguas_subterraneas_as (acessada em 16 de julho de 2005)
- BROOKS, R.H., COREY, A.J. (1964) Hydraulic properties of porous media. Em: Hydrol. Paper 3, Colo. State Univ., Fort Collins, CO

- BURLAND, J.B. (1965) Some aspects of the mechanical behaviour of partially saturated soils. Em: Moisture Equilibria And Moisture Changes in Soils Beneath Covered Areas, Butterworths, Sydney, p. 270-278
- CABRAL, J.J.S.P., MONTENEGRO, S.M.G.L. (2004) Capítulo 5 - Considerações sobre a Salinização dos Aquíferos Costeiros na Planície de Recife. Em: Água Subterrânea: Aquíferos Costeiros e Aluviões, Vulnerabilidade e Aproveitamento. Editora Universitária da UFPE. Pernambuco, Brasil
- CABRAL, J.J.S.P., SANTOS, S.M., MONTENEGRO, S.M.G.L., DEMETRIO, J.G.A., CIRILO, J.A., MANOEL FILHO, J., SANTOS, A.C., MONTENEGRO, A.A.A. (1999) Ferramentas para o Gerenciamento Integrado dos Aquíferos da Região Metropolitana de Recife. Em: XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Belo Horizonte, Brasil
- CABRAL, J.J.S.P., SANTOS, S.M., DEMETRIO, J.G.A., MONTENEGRO, S.M.G.L. (2000) A Groundwater Information System for Recife Metropolitan Region. Em: International Conference on Management Information Systems Incorporating GIS & Remote Sensing, WIT_{PRES} , Lisboa, Portugal
- CABRAL, J.J.S.P., SANTOS, S. M., DEMÉTRIO, J.G.A., PONTES FILHO, I.D.S. (2001) Considerações sobre a possibilidade de ocorrência de subsidência devido a superexploração de água subterrânea. Em: Simpósio Regional de Hidrogeologia e XII Evento Nacional de Companhias de Perfuração de Pocos, Pernambuco, Brasil.
- CABRAL, J.J.S.P., SANTOS, S. M., COSTA, L.M., GUIMARÃES, L.N., PONTES FILHO, I.D.S. (2002) Simulação Numérica da Possibilidade de Ocorrência de Subsidência devido a Super-exploração de Água Subterrânea. Em: VI Simpósio Nordeste de Recursos Hídricos, Alagoas, Brasil
- CABRAL, J.J.S.P., PONTES FILHO, I.D.S., SANTOS, S. M., COSTA, L.M., DEMÉTRIO, J.G.A. (2003) Subsidência de Solo devido à Extração de Fluido em Camadas de Subsolo. Em: I Congresso de Pesquisa e Desenvolvimento e III Encontro para Avaliação de Programas para Formação de Recursos Humanos, Pernambuco, Brasil
- CAMARGO, P.O., MONICO, J.F.G., FERREIRA, L.D.D. (2000) Application of ionospheric corrections in the equatorial region for L1 GPS users. Em: Earth Planets Space, 52, p. 1083-1089

- CARMINATI, E., MARTINELLI, G. (2002). Subsidence rates in the Po Plain, northern Italy: the relative impact of natural and anthropogenic causation. Em: Engineering Geology 66, pp. 241–255.
- CHANG, C. (2000). Estimation of Local Subsidence Using GPS and Levelling Combined Data. Em: Surveying and Land Information Systems, Vol. 60, N. 2, p. 85-94
- CHEN, C., PEI, S., JIAO, J.J. (2003). Land subsidence caused by groundwater exploitation in Suzhou City, China. Em: Hydrogeology Journal 11, pp. 275.287
- CHILINGARIAN, G.V., RIEKE, H.H., DONALDSON, E.C. (1995) Compaction of Argillaceous Sediments. Em: Subsidence due to Fluid Withdrawal, Chapter 2, Holanda, p. 47-164
- CHRZANOWSKI, A. (1981) A Comparison of different approaches into the analysis of deformation measurements. Em: FIG Int. Congre., 16th, Pap. No. 602.3, Montreux
- COLEMAN, J.D. (1962) Stress strain relations for partly saturated soil. Em: Correspondence to Geotechnique: 12(4), p. 348-350.
- COSTA, L.M. (2000) Análise hidro-mecânica de solos não saturados com aplicação a barragem de terra. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil
- COSTA, L.M., PONTES FILHO, I. D. S. E FERREIRA, S. R. M. (2000) A Hydro-mechanical Simulation for Plate Tests in Collapsible Soils Em: XXI CILAMCE, Rio de Janeiro, Brasil
- COSTA, W.D., COSTA FILHO, W.D., COSTA, H.F., FERREIRA, C.A., MORAIS, J.F.S., VERDE, E.R.V., COSTA, L.B. (2002) Estudo Hidrogeológico de Recife, Olinda, Camaragibe e Jaboatão dos Guararapes - HIDROREC II. Secretaria de Recursos Hídricos do Estado de Pernambuco, Pernambuco, Brasil
- COSTA, W.D., SANTOS, M.A.V., COSTA FILHO, W.D., CAVALCANTI, D.J. (2004) Capítulo 9 – Monitoramento dos Aquíferos Costeiros de Pernambuco na Região do Recife. Em: Água Subterrânea: Aquíferos Costeiros e Aluviões, Vulnerabilidade e Aproveitamento. Editora Universitária da UFPE. Pernambuco, Brasil.
- COSTA FILHO, W.D., COSTA, W.D. (2000) Caracterização Hidrogeológica do Estado de Pernambuco. Em: I Congresso Mundial Integrado de Águas Subterrâneas, Ceará, Brasil.

- CUI, Y.J., DELAGE, P., SULTAN, N. (1995) An elastoplastic model for compacted soils. Em: Proceedings of the 1st International Conference on Unsaturated Soils, Paris, Vol. 2, p. 703-709.
- DAVIS, J.L., HERRING, T.A., SHAPIRO, I.I., ROGERS, A.E.E., ELGERED, G. (1985) Geodesy by radio interferometry: effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length. Em: Radio Science, Vol. 20 (6), p. 1593-1607
- DESAI, C. S., SIRIWARDANE, H. J. (1984) Constitutive Laws for Engineering Materials: With Emphasis on Geologic Materials. Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey
- ESTELLER, M.V., DIAZ-DELGADO, C. (2002) Environmental Effects of Aquifer Overexploitation: A Case Study in the Highlands of Mexico. Em: Environmental Management: 29 (2), p. 266-278
- ESTELLER, M.V., ANDREU, J.M. (2005) Anthropic effects on hydrochemical characteristics of the Valle de Toluca aquifer (central Mexico). Em: Hydrogeology Journal: 13, p. 378-390
- EVEN-TZUR, G., PAPO, H. (1996) Optimization of GPS Networks by Linear Programming. Em: Survey Review, 33:262
- FARIAS, V.P. (2003) Estudo das Águas Subterrâneas na Área do Complexo Médico-Empresarial da Ilha do Leite e Regiões Adjacentes no Município de Recife – PE. Dissertação de Mestrado. UFPE, Pernambuco, Brasil
- FOSTER, S.D. S.; HIRATA, R.C.; ROCHA, G. A. (1988) Riscos de Poluição de águas subterrâneas: uma proposta metodológica de avaliação regional. Em: 5o Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Anais. ABAS. São Paulo, Brasil, p. 175-185.
- FREDLUND, D.G. (1979) Appropriate concepts and technology for unsaturated soils. Canadian Geotechnical Journal: 16, p. 121-139.
- FREDLUND, D.G., XING, A., HUANG, S. (1994) Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. Canadian Geotechnical Journal, 31(3): 521-532
- FREDLUND, D.G., RAHARDJO, H. (1993) Soil Mechanics for Unsaturated Soils. John Wiley & Sons, Inc., New York, USA

- FREITAS, S.R.C., LAZZAROTTO, D.R., SLUTER, C.R., LUZ, R.T. (2004) Avaliação da Compatibilidade dos Sistemas Geodésicos de Referência no Brasil. Em: Bol. Ciênc. Geod., sec. Artigos, Curitiba, Brasil, 10 (2): 225-239
- GARDNER, W. R. (1958) Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. Em: Soil Science 85(4), p.228-232.
- GEMAEL, C. (1994) Introdução ao Ajustamento de Observações: aplicações geodésicas. 1.ed. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil.
- GENS, A., ALONSO, E. E. (1992) A framework for the behaviour of unsaturated expansive clays. Em: Canadian Geotechnical Journal: 29, p. 1013-1032.
- GENS, A., GARCIA-MOLINA, A.J., OLIVELLA, S. ALONSO, E.E., E HUERTAS F. (1996) Analysis of a full scale in-situ heating test simulating repository conditions. Em: International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics.
- GENS, A., GUIMARÃES, L.N., GARCÍA-MOLINA, A.J., ALONSO, E. E. (1998) Interaction between Clay Barrier and Host Medium in Radioactive Waste Isolation. Em: Third International Congress on Environmental Geotechnics, pp. 581 a 588, Lisboa, Portugal.
- GENS, A., VAUNAT, J. AND LEDESMA, A. (1995) Analysis of Hydration of Engineered Barrier in a Radioactive Waste Repository Scheme Using an Elastoplastic Model. Em: 1st. International Conference on Unsaturated Soils, Balkema, Vol. 2, p. 1065-1073. Eds. Alonso, E.E. and Delage, P.
- GEOPP (2000). GEONAP - Referenz Handbuch. GEOSPACE-Gesellschaft für Satellitengestützte Geodätische und Navigatorische Technologien mbH, Alemanha
- GIAO, P.H., PHUEN-WEJ, N., HONJO, Y. (1999) FEM quasi-eD Modelling of Responses to Artificial Recharge in the Bangkok Multiaquifer System. Em: Environmental Modelling & Software: 14, p. 141-151
- GOLDAN, H. (1996) Beiträge zur GPS-gestützten Höhenbestimmung im Küstenbereich. Tese de doutorado N°. 215, Universität Hannover, Alemanha

- GONZÁLEZ-MORÁN, T., RODRÍGUEZ, R., CORTES, S.A. (1999) The Basin of Mexico and its Metropolitan Area: Water Abstraction and Related Environmental Problems. Em: Journal of South American Earth Sciences: 12, p. 607-613
- GÖRRES, B. (1996) Bestimmung von Höhenänderungen in regionalen Netzen mit dem Global Positioning System. Dissertação. Institut für Angewandte Geodäsie, Frankfurt am Main, Alemanha.
- HARBAUGH, A.W., BANTA, E.R., HILL, M.C., MCDONALD, M.G. (2000) MODFLOW-2000, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model—User Guide To Modularization Concepts And The Ground-Water Flow Process. Em: U.S.Geological Survey Open-File Report 00-92, 130 p.
- HEYWOOD, C.E., GALLOWAY, D.L., STORK, S.V. (2002) Ground Displacements Caused by Aquifer-System Water-Level Variations Observed Using Interferometric Synthetic Aperture Radar near Albuquerque, New Mexico. Em: U.S.Geological Survey Water-Resources Investigations Report 02-4235, 24 p.
- HOFFMANN, J., ZEBKER, H.A., GALLOWAY, D.L., AMELUNG, F. (2001) Seasonal subsidence and rebound in Las Vegas Valley, Nevada, observed by synthetic aperture radar interferometry. Em: Water Resources Research, 37 (6), 1551–1566.
- HOFFMANN, J., LEAKE, S.A., GALLOWAY, D.L., WILSON, A.M. (2003) MODFLOW-2000 Ground-Water Model – User Guide to the Subsidence and Aquifer-System Compaction (SUB) Package. Em: U.S.Geological Survey Water-Resources Program Report 03-233, 44 p.
- HOFMANN-WELLENHOF, B., LICHTENEGGER, H., COLLINS, J. (1994) GPS – Theory and Practice. Springer-Verlag.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (1983) Resolução da Presidência do IBGE Nº. 22 de 21/07/83 sobre as Especificações e Normas Gerais para Levantamentos Geodésicos.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (1988) Instrução Técnica Norma de Serviço do Diretor de Geociências do IBGE nº 29 de 22/09/88 sobre a Padronização de Marcos Geodésicos. Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/pdf/padronizacao_marcos.pdf (acessada em 12 de julho de 2005)

- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (1989) Resolução da Presidência do IBGE N°. 23 de 21/02/89 sobre os Parâmetros par Transformação do Sistema Geodésico. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/pdf/rpr-2389.pdf> (acessada em 19 de outubro de 2005)
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (1993) Resolução da Presidência do IBGE N°. 5 de 31/03/93 sobre as Especificações e Normas Gerais para Levantamentos GPS: versão preliminar. Disponível em: www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/pdf/normas_gps.pdf (acessada em 2 de março de 2005).
- IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (1988). Cajamar – Carst e Urbanização. Relatório interno.
- JOHNSON, L.D. (1978) Predicting potential heave and heave with time in swelling foundation soils. Technical Report S-78-7, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, CE, Vicksburg, Miss.
- JOSA, A. (1988) An elastoplastic model for partially saturated soils. Tese de Doutorado, Universitat Politècnica de Catalunya, ETSICCP, Barcelona.
- JOSA, A., ALONSO, E.E., LLORET, A., GENS, A. (1987) Stress-strain behaviour of partially saturated soils. Em: Proc. 9th European Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering, Dublin, Vol. 2, p. 561-564.
- JUSTO, J.L., DELGADO, A., RUIZ, J. (1984) The influence of the stress path in the collapse-swelling of soils at the laboratory. Em: Proceedings of the 5th International Conference on Expansive Soils, Adelaide, p. 67-71.
- KLOBUCHAR, J.A.(1987) Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users. Em: IEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems, New York, Vol 23 (2)
- KLOBUCHAR, J.A.(1991) Ionospheric effects on GPS. Em: GPS World, Abril, Vol.2(4), p.48-51
- KOOI, H. (2000) Land Subsidence due to Compaction in the Coastal Area of The Netherlands: the Role of Lateral Fluid Flow and Constraints from Well-log Data. Em: Global and Planetary Change: 27, p. 207-222

- KRUEGER, P.C., DE SOUZA, E., ROMÃO, V.M.C. (2001) Time investigations in the Mel Island using precise real time positioning in Curitiba, Brazil. Em: Proc. ION-GPS 2001, Salt Lake City.
- LAMONT-BLACK, J., YOUNGER, P.L., FORTH, R.A., COOPER, A.H., BONNIFACE, J.P. (2002). A decision-logic framework for investigating subsidence problems potentially attributable to gypsum karstification. Em: Engineering Geology 65, pp.205-215
- LANGLEY, R.B. (1993) The Observables. Em: GPS World, Vol. 4, No. 4, p. 52-59
- LANGLEY, RB. (2000) GPS, the Ionosphere, and the Solar Maximum. Em: GPS World, Vol. 11, No. 7, p. 44-49
- LARSON, K.J., BASAGAOGLU, H., MARIÑO, M.A. (2001) Prediction of optimal safe ground water yield and land subsidence in the Los Banos-Kettleman City area, California, using a calibrated numerical simulation model. Em: Journal of Hydrology, 242: 79-102
- LEAKE, S.A. (1997) Land Subsidence from Ground-Water Pumping. Em: U.S.Geological Survey. Disponível em: <http://geochange.er.usgs.gov/sw/changes/anthropogenic/subside/>
- LEICK, A. (1995) GPS Satellite Surveying. John Wiley & Sons, New York, 2.ed., 560p.
- LEWIS, R.W. & SCHREFLER, B.A. (1987). Modelling of Subsidence. Em: The Finite Element Method in the Deformation and Consolidation of Porous Media. John Wiley & Sons, Chichester, p. 98-164
- LIU, C., PAN, Y., LIAO, J., HUANG, C., OUYANG, S. (2004). Characterization of land subsidence in the Choshui River alluvial fan,Taiwan. Em: Environmental Geology 45, p. 1154–1166
- LLORET, A., ALONSO, E.E. (1980) Consolidation of unsaturated soils including swelling and collapse behaviour. Em: Geotechnique : 30 (4), p. 449-477.
- LLORET, A., ALONSO, E.E. (1985) State surfaces for partially saturated soils. Em: Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, Vol. 2, p. 557-562.

- LLORET, A., GENS, A., BATLLE, F., ALONSO, E.E. (1987) Flow and deformation analysis of partially saturated soils. Em: Proceedings of the 9th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Dublin, Vol. 2, p. 565-568.
- LOBO FERREIRA, J.P.C., CABRAL, M. (1991) Proposal for na Operational Definition of Vulnerability for the European Community's Atlas of Goundwater Resources, in Meeting of the European Institute for Water, Groundwater Work Goup Brussels.
- LYTTON, R. L. (1977) The characterization of expansive soils in engineering. Em: Symposium on water movement and equilibrium in swelling soils. American Geophysical Union, San Francisco, California.
- MARINI, M.C., MONICO, J.F.G. (2003) Aspectos da Otimização e Processamento de Redes GPS. Em: Pesquisas em Geociências, 30(2):51-60
- MARQUES, A.B. E OLIVEIRA, L.C. (1999) Sistema Computacional para Cálculo das Órbitas de Satélites GPS. Em: XIX Congresso Brasileiro de Cartografia, Recife-PE, Brasil
- MATYAS, E. L., RADHAKRISNA, H. S. (1968) Volume change characteristics of partially saturated soils. Em: Geotechnique: 18 (4), p. 432-448.
- MENDES, V.B., LANGLEY, R.B. (1994) A Comprehensive Analysis of Mapping Functions Used in Modeling Tropospheric Propagation Delay in Space Geodetic Data. Em: Proceedings of KIS 94, International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation, Banff, Canada, The University of Calgary, Calgary, Canada, p. 87 - 92
- MENDES, V.B., LANGLEY, R.B. (1999) Tropospheric Zenith Delay Prediction Accuracy for High-Precision GPS Positioning and Navigation. Em: Journal of the Institute of Navigation, Vol. 46(1), p. 25-34
- MENDES, V.B., PRATES, G., PAVLIS, D.E., LANGLEY, R.B. (2002) Improved Mapping Functions for Atmospheric Refraction Correction in SLR. Em: Geophysical Research Letters, Vol. 29 (10), p. 1-5
- MENGE, F., SEEGER, G., VÖLKSEN, C., WÜBBENA, G., SCHMITZ, M. (1998) Results of Absolute Field Calibration of GPS Antenna PCV. Em: Proceedings International Technical Meeting, ION GPS-98, Nashville, Tennessee, USA.

- MENGE, F. (2003) Zur Kalibrierung der Phasenzentrumsvariationen von GPS-Antennen für die hochpräzise Positionsbestimmung. Tese de doutorado N°. 247, Universität Hannover, Alemanha
- MINGORANCE, F. (2000). Manifestaciones de subsidencia superficial en el Pastal, Norte de Mendoza, Argentina. Em: Revista de la Facultad de Ingeniería, Argentina 41, p.5-16
- MONICO, J.F.G. (2000) Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS, Descrição, fundamentos e aplicações. Editora UNESP, São Paulo-SP, Brasil.
- MONTEIRO, A.B. 2000 Modelagem do Fluxo Subterrâneo nos Aquíferos da Planície do Recife e seus Encaixes. Dissertação de Mestrado, UFPE, Pernambuco, Brasil.
- MOREIRA, A.S.B. (2003) Nivelamento Trigonométrico e Nivelamento Geométrico Classe IIN da NBR 13.133: Limites e Condições de Compatibilidade. Dissertação de Mestrado, USP, São Paulo, Brasil.
- NADAL, C.A., GIUSTI, D.A., ROSA FILHO, E.F., HINDI, E.C. (2001). Metodologia geodésica/geológica para o levantamento de deslocamentos do terreno em regiões circunvizinhas a um poço artesiano. Em: Anais do II Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, Curitiba, Paraná, Brasil
- NEWBY, S.P., LANGLEY, R.B.(1992) Three alternative empirical ionospheric models – are they better than GPS broadcast model? Em: Proceedings of the Sixth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, Columbus, p. 240-244
- NIELL, A.E (1996) Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. Em: Journal of Geophysical Research, Vol. 101 (B2), p. 3227-3246
- NIEMEIER, W. (1985) Deformationsanalyse. Em: Geodätische Netze II, Wittwer, Stuttgart, Alemanha, p. 559-624
- NIEMEIER, W., TENGGEN, D. (1988) PANDA - A Menu Driven Software Package on a PC for Optimization, Adjustment and Deformation Analysis of Engineering Networks. Em: Proc. 5. Int. FIG-Symposium "Deformationsmessungen", Fredericton, Canada, p. 374-376
- OLIVELLA, S. (1995) Nonisothermal Multiphase Flow of Brine and Gas Thorough Saline Media. Tese de Doutorado, Universitat Politècnica de Catalunya, Departament D'Enginyeria del Terreny i Cartogràfica.

- ORTIGÃO, A. (1993) Introdução à Mecânica dos Solos dos Estados Críticos. Livros Técnicos e Científicos Editora. 368p.
- PELZER, H. (1974) Neuere Ergebnisse bei der statistischen Analyse von Deformationsmessungen. Em: Proceedings of the FIG XIV International Congress, Washington, paper No. 608.3.
- PHIEN-WEJ, N., GIAO, P.H., NUTALAYA, P. (1998) Field Experiment of Artificial Recharge through a Well with Reference to Land Subsidence Control. Em: Engineering Geology: 50, p. 187-201
- PROKOPOVICH, N.P. (1978) Genetic classification of land subsidence. In: Evaluation and Prediction of Subsidence. Em: Engineering Foundation Conference in Pensacola Beach, Florida. Proc.Am.Soc. Civil Engrs., New York, N.Y., p 389 – 399
- PROKOPOVICH, N.P. (1983) Tectonick framework and detection of aquifers susceptible to subsidence. Em: E.C. Donaldson and H. van Domselaar (Editors), Proceedings of 1982 Forum on Subsidence due to Fluid Withdrawals. U.S.DOE, Bartlesville Energy Technology Center, Bartlesville, Okla, p 25-32
- ROMÃO, V.M.C. (1995) Der Beitrag von GPS zur Bereitstellung des Raumbezugs für Geoinformationssysteme in kartographisch wenig erschlossenen Gebieten. Tese de doutorado Nr.210, Universität Hannover, Alemanha
- ROSCOE, K.H., SCHOFIELD, A., WORTH, C.P. (1958) On the yielding of soils. Em: Geotechnique: 8, p. 22-53
- ROSCOE K.H., BURLAND J.B. (1968) On the generalised stress-strain behaviour of ‘wet’ clay. Em: Eng. plasticity, Cambridge Univ. Press, 535-609
- ROTHACHER, M. (2001) Estimation of Station Heights with GPS. Em: Vertical Reference Systems – International Association of Geodesy Symposia – Springer, Cartagena, Colombia, p. 81-90
- SAASTMOINEN, J. (1972) Contributions to the Theory of Atmospheric Refraction. Em: Bulletin Géodésique (The Journal of the International Association of Geodesy), Association Internationale de Géodésie, Paris, França, p. 279-298

- SALAS A. I., SERRATOSA I. M. (1957) Foundations on swelling clays. Em: Proc. of the 4th ICSMFE, London 1: 424-428.
- SANTOS, A.A. (1996) Realização e Análise de Rede GPS para o Estado de Pernambuco. Dissertação, UFPR, Brasil.
- SATO, H.P., ABE, K, OORAKI, O. (2003) GPS-Measured Land Subsidence in Ojiya City, Niigata Prefecture, Japan. Em: Engineering Geology: 67, p. 379-390
- SCHOFIELD A.N., WROTH C.P. (1968) Critical state soil mechanics. McGraw Hill, London
- SCHÜLER, T. (2001) On Ground-Based GPS Tropospheric Delay Estimation. Dissertação. Universität der Bundeswehr München, Alemanha
- SCOTT, R.F. (1979). Subsidence – A Review. Em: Evaluation and Prediction of Subsidence. ASCE, New York, p.1-25
- SECORD, J.M. (1995) Development of the Automatic Data Management and the Analysis of Integrated Deformation Measurements. Tese de Doutorado. Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report, n. 176, University of New Brunswick, Fredericton, Canada, 237 p.
- SEEBER, G. (1993) Satellite Geodesy. Foundations, Methods, and Applications. De Gruyter, Berlin
- SEEBER, G. (2001) Global Positioning System (GPS) – Fachbereich Geowissenschaften. Em: Enzyklopädie Natur-Wissenschaft und Technik, Ecomed Verlagsgesellschaft AG & Co. KG, Germany, p.1-13
- SEEBER, G. (2003) Satellite Geodesy. Foundations, Methods, and Applications. De Gruyter, Berlin
- SEEBER, G., ROMÃO, V.M.C. (1997) Princípios Básicos do GPS nas Medições Geodésicas. Em: Geodésia On-Line – Revista da Comissão Brasileira de Geodésia, 2, p. 2-18
- SEEBER, G., WILLGALIS, S. (2002) Präzise Echtzeitpositionierung in GNSS-Referenzstationsnetzen. Em: 4. SAPOS-Symposium, Universität Hannover, Alemanha.

- SHEARER, T.R. (1998) A Numerical Model to Calculate Land Subsidence, Applied at Hangu in China. Em: Engineering Geology: 49, p. 85-93
- SILVA, A.B.(1995) Capítulo 3.2 – Hidrogeologia de Meios Cársticos. Em: Curso de Hidrogeologia de Aquíferos Cársticos. Organizado pelo Núcleo de Estudos Hidrogeológicos do Meio Ambiente da UFBA(NEHMA), 39 p.
- SILVEIRA, L.G. (1992) Estudo de um Modelo Constitutivo para Solos Não-Saturados. Dissertação de Mestrado, PUC, Rio de Janeiro.
- SNEED, M., GALLOWAY, D.L. (2000) Aquifer-System Compaction: Analyses and Simulations-the Holly Site, Edwards Air Force Base, Antelope Valley, California. Em: U.S.Geological Survey Water-Resources Investigations Report 00-4015, 64 p.
- SNEED, M., STORK, S.V., IKEHARA, M.E. (2002) Detection and Measurement of Land Subsidence Using Global Positioning System and Interferometric Synthetic Aperture Radar, Coachella Valley, California, 1998-2000. Em: U.S.Geological Survey Water Resources Investigations Report 02-4239, 29p.
- SNEED, M., IKEHARA, M.E., STORK, S.V., AMELUNG, F., GALLOWAY, D.L. (2003) Detection and Measurement of Land Subsidence Using Interferometric Synthetic Aperture Radar and Global Positioning System, San Bernardino County, Mojave Desert, California Em: U.S.Geological Survey Water Resources Investigations Report 03-4015, 69p.
- STIROS, S.C. (2001) Subsidence of the Thessaloniki (northern Greece) coastal plain, 1960-1999. Em: Engineering Geology: 61, p. 243-256
- TERZAGHI, K.T. (1925) Erdbaumechanik auf Bödenphysikalischer Grundlage. Deuticke, Wien, 399 p.
- THOMAS H.R., ALONSO, E.E. AND GENS, A. (1995) Modelling Thermo-Hydraulic-Mechanical Processes in the Containment of Nuclear Waste. Em: 1st. International Conference on Unsaturated Soils, Eds. Alonso, E.E. and Delage, P., Balkema, Vol. 2, p. 1065-1073.
- THU, T.M. E FREDLUND, D.G (2000) Modelling subsidence in the Hanoi City area, Vietnam. Em: Canadian Geotechnical Journal: 37, p.621-637
- TORGE, W. (2001) Geodesy. De Gruyter, Berlin.

- VAN DER MEIJ, J.L., MINNEMA, B. (1999) Modelling of the Effect of a Sea-Level Rise and Land Subsidence on the Evolution of the Groundwater Density in the Subsoil of the Northern Part of the Netherlands. Em: Journal of Hydrology: 226, p. 152-166
- VAN GENUCHTEN, M.Th. (1980) A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. Em: Soil Science Society of America Journal: 44, p. 892-898
- VANAPALLI, S.K., LOBBEZOO, J.P. (2002) A Normalized Function for Predicting the Coefficient Permeability of Unsaturated Soils. Em: Third International Conference on Unsaturated Soils, Recife, Brazil, ed. J.F.T. Juca et al., Balkema Publishers, pp. 839-844.
- WEILL, L.R. (1997) Conquering Multipath: The GPS Accuracy Battle. Em: GPS World, Vol. 8 (4), p. 59-66
- WELSCH, W., HEUNECKE, O., KUHLMANN, H. (2000) Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen. Em: Möser et al.: Handbuch Ingenieurgeodäsie. Wichmann Verlag, Heidelberg.
- WHEELER, S.J., SIVAKUMAR, V. (1995) An elastoplastic critical state framework for unsaturated soil. Em: Geotechnique: 45 (1), p. 35-53.
- WILLGALIS, S., SEEGER, G., MENGE, F., KRUEGER, C.P., ROMÃO, V.M.C. (2001) Implementation of a GPS Reference Network for Precise Real Time Positioning in Recife, Brazil. Em: ION GPS 2001, Salt Lake City, UT, p. 1071-1078
- WILLGALIS, S., SEEGER, G., KRUEGER, C.P., ROMÃO, V.M.C. (2002) A Real Time GPS Reference Network for Recife, Brazil, Enabling Precise and Reliable Cadastral Surveys. Em: FIG XXII International Congress, Washington, USA, p. 1-15
- WILSON, A.M., GORELICK, S. (1996) The Effects of Pulsed Pumping on Land Subsidence in the Santa Clara Valley, California. Em: Journal of Hydrology: 174, p. 375-396
- WOOD D.M. (1984) Choice of models for geotechnical predictions. Em: Mechanics of Engineering Materials, Desai & Gallagher (ed), p. 633-654.
- WÜBBENA, G (1989) The GPS Adjustment Software Package -GEONAP- Concepts and Models. Em: Proceedings of the Fifth International Symposium on Satellite Positioning, Las Cruces, New Mexico, p. 452-461.