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

REJANE MARIA RODRIGUES DE LUNA

INVESTIGAÇÃO DA OCORRÊNCIA DE SUBSIDÊNCIA DO SOLO EM REGIÃO DE EXPLOTAÇÃO DE AQUÍFEROS NA PLANÍCIE COSTEIRA DA CIDADE DO RECIFE EM PERNAMBUCO

RECIFE
2017

REJANE MARIA RODRIGUES DE LUNA

INVESTIGAÇÃO DA OCORRÊNCIA DE SUBSIDÊNCIA DO SOLO EM REGIÃO DE EXPLOTAÇÃO DE AQUÍFEROS NA PLANÍCIE COSTEIRA DA CIDADE DO RECIFE EM PERNAMBUCO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Área de concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos

Orientador: Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral

RECIFE

2017

Catalogação na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

L961i Luna, Rejane Maria Rodrigues de.
Investigação da ocorrência de subsidência do solo em região de explotação de aquíferos na planície costeira da cidade do recife em Pernambuco / Rejane Maria Rodrigues de Luna. – 2017.
236 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2017.
Inclui Referências, Apêndices e Anexos.

1. Engenharia Civil. 2. Explotação de água subterrânea. 3. Nivelamento geométrico. 4. GNSS. 5. Subsidência. I. Cabral, Jaime Joaquim da Silva Pereira. (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.) BCTG/2018-94

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE POS-GRADUAÇAO EM ENGENHARIA CIVIL

A comissão examinadora da Defesa de Tese de Doutorado

INVESTIGAÇÃO DA OCORRËNCIA DE SUBSIDËNCIA DO SOLO EM REGIÃO DE EXPLOTAÇÃO DE AQUÍFEROS NA PLANÍCIE COSTEIRA DA CIDADE DO RECIFE EM PERNAMBUCO

defendida por

Rejane Maria Rodrigues de Luna

Considera a candidata APROVADA

Recife, 31 de janeiro de 2017

Banca Examinadora:

_____
Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral – UFPE
(orientador)

_____
Prof. Dr. Haroldo Antonio Marques – IME
(examinador externo)

_____
Prof.ª Dr.ª Andréa de Seixas– UFPE
(examinadora externa)

_____
Prof. Dr. Anderson Luiz Ribeiro de Paiva – UFPE
(examinador externo)

_____
Prof.ª Dr.ª Sylvana Melo dos Santos – UFPE
(examinadora interna)

A meus pais, José e Aliete (*in memoriam*), e a meu filho, Daniel, e minha filha, Silvia Roberta (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

A Deus, que nos dá permissão para viver.

À Universidade Federal de Pernambuco, que acolheu o projeto de desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral, o apoio, incentivo e a orientação.

Ao Prof. Dr. Silvio Jacks dos Anjos Garnés, os proveitosos esclarecimentos, as sugestões e discussões.

Aos componentes da banca examinadora, a contribuição inestimável por meio das sugestões para o enriquecimento do trabalho.

Ao Instituto Federal de Pernambuco (IFPE), o apoio e a permissão concedida para a realização do curso.

Aos professores que fazem parte do Departamento Acadêmico de Infraestrutura e Construção Civil do IFPE, os incentivos.

Ao Departamento de Engenharia Cartográfica (Decart) da UFPE, que cedeu gentilmente as instalações do Laboratório de Geodésia e os equipamentos necessários para o desenvolvimento da pesquisa.

Ao Engenheiro Severino Lopes S. Filho, a incansável colaboração no apoio de campo.

Aos alunos do Decart e IFPE, a valiosa colaboração nos levantamentos de campo.

Ao amigo Prof. José Risonaldo de Lima, o apoio e a compreensão da necessidade de mais uma conquista na minha vida profissional.

À minha família, a compreensão diante de minha ausência em alguns momentos.

Aos meus pais, José e Aliete (*in memoriam*), pelo incentivo ao estudo em todas as etapas da minha vida;

Ao meu filho, Daniel, a razão de todo o meu esforço e a minha dedicação.

Tudo é loucura ou sonho no começo. Nada do que o homem fez no mundo teve início de outra maneira – mas já tantos sonhos se realizaram, que não temos direito de duvidar de nenhum.

(Monteiro Lobato, 1923).

RESUMO

A cidade do Recife, no nordeste do Brasil, é formada por uma planície costeira cercada de morros. A Planície do Recife é delimitada pelo Oceano Atlântico e por vários rios que cruzam a cidade, sua geologia é formada por sedimentos de origem fluviomarinha, produzidos pelas transgressões e regressões marinhas. Suas características hidrogeológicas e sua posição geográfica, localizada em planície estuarina, ligeiramente acima do nível do mar, provocam problemas como erosão costeira e inundações frequentes. Nos últimos 50 anos, desde 1948, houve um aumento na explotação das águas subterrâneas, na cidade do Recife, provocando um rebaixamento do nível piezométrico que chegou a 100 metros em alguns pontos. Devido à explotação excessiva das águas subterrâneas na cidade e como consequência, o rebaixamento do nível de água subterrâneo, a subsidência do solo tornou-se uma grande preocupação e um fenômeno a ser cuidadosamente investigado. Neste contexto, métodos geodésicos para monitorar e quantificar a deformação vertical do solo, devido à retirada das águas subterrâneas, têm sido utilizados em todo o mundo. Esta tese descreve metodologias para investigar a ocorrência de subsidência do solo em área onde existe explotação excessiva de água subterrânea, utilizando o nivelamento geométrico de alta precisão, para quantificar o fenômeno e faz uma análise comparativa das altitudes relacionadas ao ano de 1958 com as altitudes recentes, mais especificamente nos anos de 2012 e 2015. Como resultado dos experimentos, obteve-se uma diferença de nível de 3,86 cm para uma das Referências de Nível RRNN (RN9319G) do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) localizada dentro da área de monitoramento de subsidência. Sendo assim, na Planície do Recife, pode-se concluir que os estudos de nivelamento levam a estimar um deslocamento vertical de aproximadamente 0,68 mm/ano. Além disso, esta tese também verifica a aplicabilidade da tecnologia de posicionamento GNSS (*Global Navigation Satelite System*) através de três experimentos que simularam o fenômeno via deslocamentos verticais controlados imputados às antenas dos receptores. Os experimentos foram realizados em 2013 e 2016 e a partir daí, verificou-se que, utilizando a tecnologia GNSS é possível se detectar deslocamentos verticais a partir de 1 cm desde que a área esteja livre de obstáculos, o tempo de rastreio seja de, no mínimo, duas horas e a rede utilizada para o processamento seja local. Com a finalidade de comparação, foram realizadas análises com a utilização de diferentes softwares no processamento dos dados GNSS: Topcon Tools, AUSPOS, OPUS e PPP. Para esta pesquisa, as soluções satisfatórias, para os experimentos com a tecnologia GNSS, foram obtidas apenas com a utilização do software comercial Topcon Tools. A pesquisa e o trabalho desenvolvido

também utilizou outros pontos-objeto para a medição com o método de nivelamento geométrico e diversos pontos de referência para o posicionamento GNSS que não apresentaram resultados satisfatórios para a detecção de subsidência. Apesar dos processos de subsidência serem lentos em Recife, o fenômeno está ocorrendo e pode ser avaliado utilizando-se as técnicas de nivelamento geométrico de precisão e posicionamento GNSS.

Palavras-chave: Explotação de água subterrânea. Nivelamento geométrico. GNSS. Subsidência.

ABSTRACT

The city of Recife, in northeastern Brazil, is formed by a coastal plain surrounded by hills. The Plain of Recife is delimited by the Atlantic Ocean and several rivers that cross the city, its geology is formed by sediments of fluviomarinha origin, produced by the transgressions and marine regressions. Its hydrogeological characteristics and geographic position, located in the estuarine plain, slightly above sea level, cause problems such as coastal erosion and frequent flooding. In the last 50 years, since 1948, there has been an increase in the exploitation of groundwater, in the city of Recife, causing a lowering of the piezometric level that reached 100 meters in some points. Due to the excessive exploitation of groundwater in the city and as a consequence, lowering groundwater level, subsidence of soil has become a major concern and a phenomenon to be carefully investigated. In this context, geodetic methods to monitor and quantify the vertical deformation of the ground, due to the withdrawal of groundwater, have been used all over the world. This thesis describes methodologies to investigate the occurrence of soil subsidence in an area where there is excessive exploitation of groundwater using high precision geometric leveling to quantify the phenomenon and makes a comparative analysis of the altitudes related to the year 1958 with recent altitudes, more specifically in the years of 2012 and 2015. As a result of the experiments, a level difference of 3.86 cm was obtained for one of the RRNN Level References (RN9319G) of IBGE (Brazilian Institute of Geography and Statistics) located within the area of subsidence monitoring. Thus, in the Plain of Recife, it can be concluded that the leveling studies lead to estimate a vertical displacement of approximately 0.68 mm / year. In addition, this thesis also verifies the applicability of the GNSS (Global Navigation Satellite System) positioning technology through three experiments that simulated the phenomenon through controlled vertical displacements imputed to the antennas of the receivers. The experiments were carried out in 2013 and 2016 and from this it was verified that, using GNSS technology, it is possible to detect vertical displacements from 1 cm as long as the area is clear of obstacles, the least two hours and the network used for processing is local. For the purpose of comparison, analyzes were performed using different software in GNSS data processing: Topcon Tools, AUSPOS, OPUS and PPP. For this research, satisfactory solutions for experiments with GNSS technology were obtained only with the commercial software Topcon Tools. The research and the work developed also used other object points for the measurement with the geometric leveling method and several reference points for the GNSS positioning that did not present satisfactory results for the detection of subsidence. Although subsidence processes are slow in Recife, the phenomenon

is occurring and can be evaluated using precision geometric leveling and GNSS positioning techniques.

Keywords: Exploitation of groundwater. Geometric leveling. GNSS. Subsidence.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fluxograma da metodologia desenvolvida na tese..... 35
Figura 2 – Representação esquemática da distribuição vertical da água no solo e subsolo, mostrando as diversas zonas de umidade..... 37
Figura 3 – Nível freático: superfície de separação entre a zona vadosa e a zona saturada..... 38
Figura 4 – Tipos de aquífero quanto à porosidade..... 42
Figura 5 – Bacias da Região Hidrográfica Amazônica..... 45
Figura 6 – Tipos de aquífero quanto à pressão..... 45
Figura 7 – Outros fatores causadores do fenômeno de subsidência..... 51
Figura 8 – Esquema da distribuição de pressões em um aquífero sedimentar confinado submetido à sobre-explotação..... 52
Figura 9 – Esquema da distribuição de pressões em um aquífero sedimentar não confinado submetido à sobre-explotação..... 53
Figura 10 – Colapso em Sete Lagoas, Minas Gerais, 1988..... 58
Figura 11 – Colapso em Cajamar, São Paulo, 1986..... 58
Figura 12 – Rede Maregráfica Permanente para Geodésia (RMPG)..... 62
Figura 13 – Superfícies de referência: física, geóide e elipsóide de revolução..... 64
Figura 14 – Nivelamento geométrico..... 66
Figura 15 – Grandezas relacionadas com as superfícies altimétricas de referência..... 70
Figura 16 – Altitude geométrica (h), altitude ortométrica (H) e ondulação geoidal (N)..... 72
Figura 17 – Estação RECF da RBMC..... 82
Figura 18 – Prédio da Biblioteca Central do Câmpus Recife da UFPE com a Estação RECF da RBMC..... 82
Figura 19 – Lance no nivelamento geométrico..... 83
Figura 20 – Erro altimétrico devido à curvatura da Terra e refração atmosférica..... 86
Figura 21 – Histórico do número de manchas solares (ciclos solares)..... 100
Figura 22 – Predição do número de manchas (ciclo solar 24)..... 100
Figura 23 – Componentes do atraso troposférico calculadas pelo modelo de Hopfield 102
Figura 24 – Ilustração da ocorrência de multicaminho..... 103

Figura 25 – Representação do posicionamento relativo e o vetor de linha de base..... 105
Figura 26 – Mapa de localização da RMR..... 108
Figura 27 – Municípios que compõem a RMR..... 109
Figura 28 – Diagrama esquemático com a localização do Aquífero Boa Viagem..... 109
Figura 29 – O bairro de Boa Viagem..... 110
Figura 30 – Igreja de Nossa Senhora da Boa Viagem na primeira metade do século XX..... 112
Figura 31 – Igreja de Nossa Senhora da Boa Viagem no século XXI..... 112
Figura 32 – Igreja de Nossa Senhora do Rosário no bairro do Pina em 1935..... 113
Figura 33 – Igreja de Nossa Senhora do Rosário no bairro do Pina, início do século XXI..... 114
Figura 34 – Mapa hidrogeológico de Recife e adjacências, com a posição aproximada do lineamento Pernambuco..... 116
Figura 35 – Esboço litoestrutural das unidades geológicas do município de Recife.... 117
Figura 36 – Ortognaisse do complexo gnáissico migmático..... 118
Figura 37 – Mapa hidrogeológico simplificado com distinção dos domínios aquíferos..... 121
Figura 38 – Localização das seções litológicas..... 123
Figura 39 – Seção litológica S1 no bairro de Boa Viagem, direção oeste-leste..... 124
Figura 40 – Seção Litológica S2, no bairro de Boa Viagem, direção oeste-leste..... 125
Figura 41 – Seção Litológica S3, no bairro de Boa Viagem, direção oeste-leste..... 126
Figura 42 – Número de poços por faixa de profundidade para os Aquíferos Boa Viagem e Beberibe..... 129
Figura 43 – Georreferenciamento de poços outorgados na RMR..... 130
Figura 44 – Georreferenciamento de poços outorgados na cidade do Recife..... 131
Figura 45 – Mapa de localização do estado de Pernambuco, com destaque para a RMR e cidades vizinhas com seu zoneamento explotável..... 133
Figura 46 – Mapa de localização da área de estudo..... 134
Figura 47 – Rebaixamento do Aquífero Cabo na Zona A ao longo de quarenta anos.. 135
Figura 48 – RN9319G e RN9319M com coordenadas em SIRGAS2000..... 139
Figura 49 – Mapa de localização da Igreja de Nossa Senhora da Boa Viagem..... 140

Figura 50 – Mapa de localização da Igreja de Nossa Senhora do Rosário..... 141
Figura 51 – Localização, em SIRGAS2000, dos pontos de monitoramento de subsidência nos muros dos prédios em Boa Viagem..... 142
Figura 52 – Materialização dos pontos de monitoramento de subsidência..... 142
Figura 53 – Detalhe da materialização dos pontos..... 143
Figura 54 – Chave "T" para retirada da proteção da rosca no momento da colocação do pino..... 143
Figura 55 – Mapa de localização dos pontos de monitoramento de subsidência no muro dos prédios em Boa Viagem e as RRNN das igrejas..... 144
Figura 56 – Detalhe da materialização dos pontos com pinos de ferro..... 145
Figura 57 – Mapa de localização dos pontos de monitoramento de subsidência implantados no calçamento das vias públicas..... 145
Figura 58 – Parte da Rede Altimétrica em Recife..... 146
Figura 59 – Esquema organizacional da caderneta de nivelamento do IBGE..... 147
Figura 60 – Equipamentos e acessórios utilizados no nivelamento da campanha 2012 148
Figura 61 – Equipamentos e acessórios utilizados no nivelamento da campanha 2015 149
Figura 62 – Receptor cercado por altos edifícios e embaixo de rede de alta tensão.... 152
Figura 63 – Mapa com a localização da rede utilizada, Câmpus Recife da UFPE..... 153
Figura 64 – Receptor instalado no ponto de simulação de subsidência (SUB1-1, Câmpus Recife da UFPE..... 153
Figura 65 – Receptores utilizados na rede local, Câmpus Recife da UFPE..... 154
Figura 66 – Posição inicial do bastão (SUB1-1), Câmpus Recife da UFPE..... 155
Figura 67 – Posição final do bastão (SUB1-2), Câmpus Recife da UFPE..... 156
Figura 68 – Mapa de localização da rede utilizada, Praia de Boa Viagem/Câmpus Recife da UFPE..... 157
Figura 69 – Visualização da proximidade do ponto SUB2-1 aos altos edifícios na Praia de Boa Viagem e ao ponto V-12..... 158
Figura 70 – Visualização da proximidade do ponto SUB2-1 à superfície do mar..... 158
Figura 71 – Posição inicial do bastão (SUB2-1), Praia de Boa Viagem..... 159
Figura 72 – Posição final do bastão (SUB2-2), Praia de Boa Viagem..... 159
Figura 73 – Materialização dos marcos, com chapa metálica, no topo dos edifícios... 161
Figura 74 – Mapa com a localização dos marcos no topo dos edifícios..... 162

Figura 75 – Receptor instalado no ponto BV18 topo do Edifício Brisa do Mar..... 164
Figura 76 – Receptor instalado no ponto BV19 topo do Edifício La Vivance..... 164
Figura 77 – Receptor instalado no ponto BV20 topo do Edifício Ciudad Real..... 165
Figura 78 – Receptor instalado no ponto BV21 topo do Edifício Equinócio..... 165
Figura 79 – Processamento com rede local: Sessão 1 177
Figura 80 – Processamento com rede local: Sessão 2 178

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Distribuição dos aquíferos mais importantes do mundo..... 44
Quadro 2 – Resumo de reservas totais do Sistema Aquífero Grande Amazônia (Saga) por bacia..... 44
Quadro 3 – Altitudes científicas..... 69
Quadro 4 – Classificação dos levantamentos altimétricos quanto à exatidão..... 85
Quadro 5 – Exemplos de alguns casos de subsidências no mundo detectadas com a tecnologia GNSS..... 91
Quadro 6 – Zonas de restrição e seus diagnósticos na RMR..... 132
Quadro 7 – Informações sobre quantitativo de poços na zona sul..... 137
Quadro 8 – Informações sobre instalação dos hidrômetros em Boa Viagem..... 138
Quadro 9 – Informações das estações de referência..... 155
Quadro 10 – Informações do ponto de simulação da subsidência..... 155
Quadro 11 – Informações das estações de referência e do ponto de simulação da subsidência..... 160
Quadro 12 – Relação dos edifícios com respectivo endereço..... 160
Quadro 13 – Número de pavimentos de cada edifício e o respectivo tempo de construção..... 160
Quadro 14 – Informações dos pontos de simulação da subsidência para a sessão 1 no topo dos edifícios..... 163
Quadro 15 – Informações dos pontos de simulação da subsidência para a sessão 2 no topo dos edifícios..... 163
Quadro 16 – Trecho da caderneta de nivelamento do IBGE entre as RRNN 9319G e 9319M realizado em agosto de 1958..... 168
Quadro 17 – Parte da monografia da RN9319G..... 168
Quadro 18 – Parte da monografia da RN9319M..... 169
Quadro 19 – Parte da monografia da RN9319G: altitude atual..... 169
Quadro 20 – Parte da monografia da RN9319M: altitude atual..... 169
Quadro 21 – Relatório do processamento/ajustamento dos dados de 1958 do Quadro 16..... 170
Quadro 22 – Relatório do ajustamento do nivelamento de 2012..... 172
Quadro 23 – Relatório do ajustamento do nivelamento de 2015..... 173

Quadro 24 – Estações de referência utilizadas no processamento da sessão 1 com o serviço AUSPOS..... 179
Quadro 25 – Estações de referência utilizadas no processamento da sessão 2 com o serviço AUSPOS..... 179
Quadro 26 – Estações de referência utilizadas no processamento da sessão 1 com o serviço OPUS..... 181
Quadro 27 – Estações de referência utilizadas no processamento da sessão 2 com o serviço OPUS..... 181

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo com as velocidades de deslocamentos verticais relacionados com o tempo de monitoramento e a tecnologia utilizada..... 56

Tabela 2 – Classificação dos níveis baseada no desvio padrão encontrado em 1 km de extensão duplamente nivelado..... 84

Tabela 3 – Coeficientes hidrodinâmicos dos aquíferos da RMR..... 123

Tabela 4 – Número de poços por bairro para cada aquífero..... 127

Tabela 5 – Profundidade dos poços nos Aquíferos Boa Viagem e Beberibe..... 128

Tabela 6 – Vazões médias dos Aquíferos Boa Viagem e Beberibe..... 129

Tabela 7 – Médias das características dos poços tubulares na RMR para cada aquífero..... 131

Tabela 8 – Rebaixamento do Aquífero Cabo na Zona A..... 134

Tabela 9 – Variação da profundidade d'água em um poço na Zona A..... 136

Tabela 10 – Valores das latitudes e altitudes ortométricas..... 150

Tabela 11 – Desvios padrão esperados para um levantamento estático..... 166

Tabela 12 – Discrepâncias dos desníveis entre as RRNN 9319M e 9319G..... 171

Tabela 13 – Comparação de discrepâncias entre os nivelamentos de 2012 e 2015..... 173

Tabela 14 – Discrepâncias dos desníveis entre as RRNN 9319M e 9319G com os dados de nivelamento IBGE 1958, nivelamento 2012 e nivelamento 2015..... 174

Tabela 15 – Resultados do deslocamento da altura da antena na simulação de subsidência no Câmpus Recife da UFPE..... 174

Tabela 16 – Resultados do deslocamento da altura da antena na simulação de subsidência na Praia de Boa Viagem..... 175

Tabela 17 – Altitudes geométricas (elipsoidais) das estações no topo dos edifícios processadas com o software Topcon Tools..... 177

Tabela 18 – Diferença entre as altitudes geométricas das estações no topo dos edifícios..... 177

Tabela 19 – Resultado do processamento para a sessão 1 com o serviço AUSPOS... 178

Tabela 20 – Resultado dos desvios padrão para o processamento da sessão 1 com o serviço AUSPOS..... 179

Tabela 21 – Resultado do processamento para a sessão 2 com o serviço AUSPOS... 179
Tabela 22 – Resultado dos desvios padrão para o processamento da sessão 2 com o serviço AUSPOS..... 180
Tabela 23 – Resultado das diferenças de altitude com o serviço AUSPOS..... 180
Tabela 24 – Resultado do processamento para a sessão 1 com o serviço OPUS..... 180
Tabela 25 – Resultado dos desvios padrão para o processamento da sessão 1 com o serviço OPUS..... 181
Tabela 26 – Resultado do processamento para a sessão 2 com o serviço OPUS..... 181
Tabela 27 – Resultado dos desvios padrão para o processamento da sessão 2 com o serviço OPUS..... 182
Tabela 28 – Resultado das diferenças de altitude com o serviço OPUS..... 182
Tabela 29 – Resultado do processamento para a sessão 1 com o serviço PPP do IBGE..... 182
Tabela 30 – Resultado dos desvios padrão para o processamento da sessão 1 com o serviço PPP do IBGE..... 183
Tabela 31 – Resultado do processamento para a sessão 2 com o serviço PPP do IBGE..... 183
Tabela 32 – Resultado dos desvios padrão para o processamento da sessão 2 com o serviço PPP do IBGE..... 183
Tabela 33 – Resultado das diferenças de altitude com o serviço PPP do IBGE..... 184

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAGP	Ajustamento Altimétrico Global Preliminar
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
AUSPOS	Online GPS Processing Service
CAS	Coordenação de Águas Subterrâneas
CCG	Conselho de Cooperação do Golfo
CGED	Coordenação de Geodésia
CNES	Centre National d'Éstudes Spatiales
CODE	Center for Orbit Determination
COMPESA	Companhia Pernambucana de Saneamento
CPRH	Agência Estadual de Meio Ambiente
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CSRS–PPP	Canadian Spatial Reference System – Precise Point Positioning
CTG	Centro de Tecnologia e Geociências
CTS	Conventional Terrestrial System
DCB	Differential Code Bias
DD	Dupla Diferença
DECART	Departamento de Engenharia Cartográfica
DIA	Detecção, Identificação e Adaptação
DORIS	Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite
EMLURB	Empresa de Manutenção e Limpeza Urbana
EOP	Earth Orientation Parameters
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
GHOST	Geodetic Adjustment Using Helmert Blocking of Space and Terrestrial Data
GLONASS	Global Navitation Satellite System
GNSS	Sistemas Globais de Navegação por Satélite
GPS	Global Positioning System
GRGS	Group de Recherches de Géodési Spatiale
GRH	Grupo de Recursos Hídricos

IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IERS	International Earth Rotation and Reference System Service
IFPE	Instituto Federal de Pernambuco
IGES	International GPS Service for Geodynamics
IGN	Institut Géographique National
IGS	International GNSS Service
INSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
JPL	Jet Propulsion Laboratory
LLR	Lunar Laser Ranging
LPE	Lineamento Pernambuco
MAPGEO	Modelo de Ondulação Geoidal
MMCC	Macrocircuitos
MMQ	Método dos Mínimos Quadrados
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NAVSTAR–GPS	Navigation Satellite with Time and Ranging – Global Positioning System
NBR	Norma Brasileira
NMM	Nível Médio dos Mares
NRCan	Natural Resources of Canadá
OPUS	Online Positioning User Service
PDOP	Position Dilution of Precision
PPP	Posicionamento por Ponto Preciso
PTE	Princípio das Tensões Efetivas
RAAP	Rede Altimétrica de Alta Precisão
RA-SGB	Rede Altimétrica do Sistema Geodésico Brasileiro
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
RECF	Recife
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
RMPG	Rede Maregráfica Permanente para Geodésia
RMR	Região Metropolitana do Recife
RN	Referência de Nível
RRNN	Referências de Nível

SAGA	Sistema Aquífero Grande Amazônia
SAR	Synthetic Aperture Radar
SCA	Sistemas de Controle Ativos
SGB	Sistema Geodésico Brasileiro
SGR	Sistema Geodésico de Referência
SGRH	Sistema de Gerenciamento de Recursos Hídricos
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SLR	Satellite Laser Raging
SNi	Seção de Nivelamento
SP3	Standard Product #3
SRH	Secretaria de Recursos Hídricos
TEC	Total Electron Content
UFAC	Universidade Federal do Acre
UFPA	Universidade Federal do Pará
UNECE	United Nations Economic Comission for Europe
UTC	Universal Time Coordinated
UTM	Universal Transversa de Mercator
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
VLBI	Very Long Baseline Interferometry
WWDR	World Water Development Report
ZTD	Zenital Tropospheric Delay

SUMÁRIO

1	**INTRODUÇÃO**.....	26
1.1	**Hipótese**.....	31
1.2	**Justificativa**.....	31
1.3	**Objetivos**.....	33
1.3.1	Objetivo geral.....	33
1.3.2	Objetivos específicos.....	33
1.4	**Descrição das seções**.....	33
2	**REFERENCIAL TEÓRICO**.....	36
2.1	**Águas subterrâneas**.....	36
2.2	**Aquíferos**.....	41
2.3	**Poços**.....	49
2.4	**Subsidência**.....	50
2.4.1	Mecanismos da subsidência.....	51
2.4.2	Ocorrência de subsidência no mundo.....	54
2.4.3	Ocorrência de subsidência no Brasil.....	57
2.5	**A geodésia e os métodos geodésicos para avaliação de ocorrência da subsidência**.....	59
2.5.1	Definição de geodésia e das superfícies de referência altimétrica.....	59
2.5.2	Ondulação geoidal.....	63
2.5.3	Determinação de um ponto P na superfície física da terra e os tipos de altitude.....	63
2.5.3.1	*Altitudes geométricas*.....	65
2.5.3.1.1	Altitudes niveladas.....	65
2.5.3.1.2	Altitude elipsoidal.....	66
2.5.3.2	*Altitudes científicas: teoria do potencial e número geopotencial*.....	67
2.5.3.2.1	Teoria do potencial.....	67
2.5.3.2.2	Número geopotencial.....	68
2.5.4	Sistema geodésico de referência e sua materialização.....	74
2.5.5	Rede altimétrica brasileira.....	76
2.5.6	Rede altimétrica local.....	77

2.5.6.1 *Sistema altimétrico local*..... 78
2.5.6.2 *Ponto altimétrico local*..... 78
2.5.7 Redes GNSS..... 79
2.5.7.1 *Redes passivas*..... 80
2.5.7.2 *Redes ativas: RBMC*..... 81
2.5.8 Métodos geodésicos para determinação de altitudes..... 83
2.5.8.1 *Método de nivelamento geométrico de alta precisão*..... 83
2.5.8.1.1 Efeitos da curvatura da Terra e refração atmosférica..... 86
2.5.8.1.2 Cálculo da precisão do nivelamento..... 88
2.5.8.1.3 Ajustamento de nivelamento e contranivelamento..... 90
2.5.8.2 *Posicionamento GNSS*..... 90
2.5.8.2.1 Método de posicionamento relativo estático..... 92
2.5.8.2.2 Método PPP..... 94
2.5.8.2.3 Serviços PPP on-line..... 96
2.5.8.2.4 Erros sistemáticos envolvidos nas observáveis GNSS..... 98
2.5.8.2.5 Erros relacionados com a propagação do sinal..... 98
2.5.8.2.6 Ajustamento em redes..... 104
3 ÁREA DE ESTUDO..... 108
3.1 Descrição e localização da área de estudo..... 108
3.2 Zona sul de Recife e os bairros de Boa Viagem e Pina..... 110
3.2.1 O bairro de Boa Viagem..... 110
3.2.2 Igreja de Nossa Senhora da Boa Viagem..... 111
3.2.3 O bairro do Pina e sua Igreja Matriz..... 113
3.3 Geologia e estratigrafia..... 114
3.3.1 Embasamento cristalino..... 117
3.3.2 Bacias sedimentares cretáceas..... 118
3.3.3 Grupo Barreiras..... 119
3.3.4 Sedimentos quaternários..... 119
3.4 Hidrogeologia..... 120
3.5 Litologia..... 123
3.5.1 Seção litológica S1..... 124
3.5.2 Seção litológica S2..... 124

3.5.3 Seção litológica S3..... 125
3.6 Captação de águas subterrâneas por poços..... 126
3.7 Gerenciamento de recursos hídricos do estado de Pernambuco..... 129
3.8 Situação da explotação das águas subterrâneas na RMR..... 131
3.9 Explotação de águas subterrâneas no bairro de Boa Viagem..... 137
4 METODOLOGIA..... 139
4.1 Descrição das investigações de monitoramento da subsidência utilizando nivelamento geométrico de precisão..... 139
4.1.1 Campanha de nivelamento realizada em 1958..... 146
4.1.2 Campanha de nivelamento realizada em 2012..... 147
4.1.3 Campanha de nivelamento realizada em 2015..... 148
4.2 Descrição das investigações de procedimentos técnicos utilizando receptores GNSS para a detecção do deslocamento da altura da antena inserida no bastão..... 151
4.2.1 Experimentação no Câmpus Recife da UFPE..... 152
4.2.2 Experimentação na Praia de Boa Viagem..... 156
4.2.3 Experimentação no topo de quatro prédios no bairro de Boa Viagem..... 160
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO..... 167
5.1 Resultados das investigações de monitoramento da subsidência utilizando nivelamento geométrico de precisão..... 167
5.1.1 Resultados utilizando o nivelamento de precisão no ano de 1958: Nível WILD N-3 (Precisão ± 0,2mm/km) 167
5.1.2 Resultados utilizando o nivelamento de precisão no ano de 2012: Nível AT-B2 Topcon (Precisão ± 0,7mm/km) 171
5.1.3 Resultados utilizando o nivelamento de precisão no ano de 2015: Nível DNA03 Leica (Precisão ± 0,3mm/km) 172
5.2 Resultados das investigações de procedimentos técnicos utilizando receptores GNSS para a detecção do deslocamento da altura da antena inserida no bastão: simulação no Câmpus da UFPE..... 174
5.3 Resultados das investigações de procedimentos técnicos utilizando receptores GNSS para a detecção do deslocamento da altura da antena inserida no bastão: simulação na orla da Praia de Boa Viagem 175

5.4 **Resultados das investigações de procedimentos técnicos utilizando receptores GNSS para a detecção do deslocamento da altura da antena inserida no bastão: simulação no topo dos prédios na Praia de Boa Viagem**..... 176
5.4.1 Processamento com *Topcon Tools* versão 8.2..... 176
5.4.2 Processamento com o serviço AUSPOS..... 178
5.4.3 Processamento com o serviço OPUS..... 180
5.4.4 Processamento PPP (IBGE)..... 182
6 **CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**..... 185
6.1 **Conclusões**..... 185
6.2 **Recomendações**..... 186
REFERÊNCIAS..... 188
APÊNDICES..... 200
ANEXOS..... 221

1 INTRODUÇÃO

A subsidência é um fenômeno de rebaixamento da superfície do terreno causado por alterações ocorridas nas camadas subterrâneas, ou seja, redução do nível do terreno em consequência da remoção de suporte subterrâneo.

Os solos são constituídos por partículas sólidas com água (ou outro líquido) e ar nos espaços intermediários. Assim, as partículas se encontram livres para descolamentos entre si. Em diversas situações, o comportamento do solo pode ser entendido pela consideração das forças transmitidas diretamente nos contatos entre as partículas, embora essas forças não sejam utilizadas nos cálculos e modelos de fundação. Nessa linha, não é raro, por exemplo, que as partículas de solo se quebrem quando o solo é solicitado alterando-se o próprio solo, com consequente influência no seu desempenho (HACHICH et al., 1996). Sob o efeito de cargas externas, todos os solos, em maior ou menor proporção, deformam-se. No caso em que essas deformações sejam diferenciadas ao longo do plano das fundações de uma obra, tensões de grande intensidade serão introduzidas na estrutura dela, podendo gerar o aparecimento de trincas (THOMAZ, 1989). Se o solo for uma argila dura ou uma areia compacta, os recalques decorrem essencialmente de deformações por mudança de forma, função da carga atuante e do módulo e deformação do solo. No caso de solos fofos e moles, os recalques são basicamente provenientes da sua redução de volume já que a água presente no bulbo de tensões das fundações tenderá a percolar para regiões sujeitas a pressões menores (THOMAZ, 1989).

É importante salientar que existe uma distinção entre subsidência e recalque. De acordo com a Norma Nrasileira (NBR) 6122 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1996), o recalque é definido pelo movimento vertical descendente de um elemento estrutural. Quando o movimento for ascendente, denomina-se levantamento. Define também o recalque diferencial específico como a relação entre as diferenças dos recalques de dois apoios e a distância entre eles.

Quando o recalque ocorre em toda a fundação, é chamado de recalque total; quando ocorre em apenas um trecho, é chamado de recalque diferencial. Os danos causados por recalques podem ser divididos em três grupos: visuais e estéticos (sem riscos de qualquer natureza), danos comprometendo o uso e a funcionalidade do prédio e danos estruturais pondo em risco a segurança dos usuários (CONSOLI; MILITITSKY; SCHINAID, 2005).

Cabral, Santos e Pontes Filho (2006) discutiram as principais características do mecanismo causador da subsidência e destacaram a subdivisão dele apresentada por

Mingnorance (2000) em cinco grupos: hidrocompactação, dissolução de rochas e sais, extração de água subterrânea, extração de petróleo ou gás e atividade mineira. A subsidência associada à extração de águas subterrâneas em aquíferos sedimentares, segundo Cabral, Santos e Pontes Filho (2006), é resultante do bombeamento do fluido que reduz a pressão dos poros que ajudam a suportar as camadas sobrejacentes do solo, como consequência do rebaixamento do nível da água. Os autores descreveram a ocorrência de tal mecanismo do ponto de vista da distribuição de pressões e do Princípio das Tensões Efetivas (PTE) proposto por Terzaghi (1925 apud SANTOS, 2005). De acordo com Santos (2005), o PTE constitui o elo entre a explotação de água subterrânea e o fenômeno de subsidência, e considerando que dentro do aquífero a pressão neutra, ou seja, a pressão no poro preenchido com água equivale à carga hidráulica, quando a água é explotada do aquífero, a carga piezométrica e a pressão neutra diminuem, e a tensão efetiva no aquífero aumenta, uma vez que a pressão total permanece constante.

A complexidade do problema da subsidência do solo, em razão da superexplotação de águas subterrâneas, vem sendo estudada por pesquisadores em todo o mundo. Em Shangai, China, desde 1921, pesquisadores têm estudado o fenômeno, e registros históricos apontam uma correlação entre o volume bombeado de águas subterrâneas e a ocorrência de subsidência durante estudos realizados por mais de quarenta anos entre 1921 e 1965. A subsidência do solo vem ocorrendo em várias localidades do mundo com diferentes graus de rebaixamento, dependendo do tipo de solo, da intensidade e da natureza das causas atuantes – extração de água subterrânea, petróleo e gás, dissolução de rochas e sais, entre outros (SANTOS, 2005). Diversos mecanismos que causam a subsidência do solo são descritos com detalhes por Mingorance (2000). Do ponto de vista do aproveitamento de recursos hídricos, a subsidência do solo pode ser causada por hidrocompactação em solos com sedimentos finos mal compactados, por dissolução de rochas e sais através da água que se infiltra em subsolos cársticos ou devido à extração de água subterrânea em aquíferos sedimentares porosos (CABRAL; SANTOS; PONTES FILHO, 2006).

Galloway e Burbey (2011) afirmam que no processo de subsidência existe a suscetibilidade não somente de uma deformação lenta, mas também de um afundamento súbito de partes da superfície do solo, sendo o perfil de solo um dos maiores condicionantes para a ocorrência de um caso ou outro. Bijuan Huang; Longcang Shu; Yang (2012) ressaltam os perigos, resultantes da ocorrência de subsidência do solo: rebaixamento do nível do solo, fissura nas edificações, ruptura de tubulações subterrâneas, aumento do risco de inundações, entre outros.

Outros pesquisadores, como Ye-Shuang Xu et al. (2012), atribuem fatores causadores do fenômeno tais como cargas adicionais no subsolo, incluindo cargas de construção e cargas dinâmicas; construção de estruturas subterrâneas, incluindo a construção de túneis e escavação de fundação; em longo prazo, redução nos níveis de águas subterrâneas que pode ser causada por vazamentos de revestimentos de túneis, de corte de fluxo das águas subterrâneas devido à existência de estruturas subterrâneas em aquíferos e reduzida reposição das águas subterrâneas a partir de regiões urbanas.

Luna et al. (2015) afirmam que a subsidência do solo tornou-se uma grande preocupação e um fenômeno a ser cuidadosamente investigado na cidade do Recife em razão da explotação excessiva das águas subterrâneas e sua consequência no rebaixamento do nível de água subterrânea. A cidade do Recife, no Nordeste do Brasil, é formada por uma planície costeira cercada de morros. A Planície do Recife é cercada pelo Oceano Atlântico e por vários rios que cruzam a cidade. Sua geologia é formada por sedimentos de origem marinha e fluvial, produzidos pelas transgressões e regressões marinhas. Suas características hidrogeológicas e sua posição geográfica, localizada em uma planície estuarina, ligeiramente acima do nível do mar, provoca vários problemas relacionados com a água, como a erosão costeira e as inundações frequentes em áreas urbanas (LUNA et al., 2017).

De acordo com Costa et al. (1998), houve um aumento na explotação das águas subterrâneas em grande parte da planície. A perfuração de poços começou na década de 1970 e intensificou-se entre os anos de 1993 e 1998, quando a população passou por um longo período de racionamento de água na região metropolitana do Recife (RMR), o que acarretou o rebaixamento da superfície potenciométrica em valores superiores a 100 metros em alguns pontos. Em razão da explotação excessiva das águas subterrâneas na RMR, do consequente rebaixamento do nível de água subterrânea e a recarga natural do aquífero, proporcionada pelas precipitações pluviométricas, apresenta-se deficitária uma vez que a superfície urbana da cidade encontra-se impermeabilizada por pavimentações, calçadas e pela construção de edifícios, a subsidência do solo tornou-se uma grande preocupação.

A comunidade científica da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), preocupada com as consequências da crescente explotação, elaborou um zoneamento de áreas explotáveis da RMR. Assim sendo, para evitar a exaustão de mananciais subterrâneos, foram definidas áreas sujeitas à restrição de captação de água pela extinta Secretaria de Recursos Hídricos (SRH), cujas ações atualmente estão sendo desenvolvidas pela Agência Pernambucana de Águas e Clima (Apac), que é a entidade fiscalizadora do uso dos recursos hídricos no estado de Pernambuco. Diante da concentração de informações, esse zoneamento foi restrito a uma

parte da RMR que abrange, total ou parcialmente, os municípios de Recife, Jaboatão dos Guararapes, Camaragibe e Olinda. Nesse zoneamento existe uma área de restrição maior à captação de águas subterrâneas, denominada Zona A, situada no bairro de Boa Viagem (MONTENEGRO; CABRAL; PAIVA, 2009).

Ainda que não existam indícios perceptíveis de subsidência do solo, devido à explotação demasiada dos aquíferos subterrâneos na RMR, o rebaixamento do nível piezométrico descrito anteriormente pode ser entendido como forte argumento para que o fenômeno possa estar ocorrendo mesmo lentamente. Daí a importância de se avaliar a ocorrência de subsidência do solo, em área onde existe explotação excessiva de água subterrânea na Planície do Recife, com base no monitoramento periódico do nível do solo. As especificidades locais são uma motivação adicional para o investimento na investigação do fenômeno, uma vez que não há um modelo geral de velocidade e abrangência que possa ser aplicado para identificar ou não a ocorrência da subsidência do solo quando da retirada do manancial subterrâneo.

Guo et al. (2015) descrevem a situação observada na cidade de Cangzhou, na China, onde observaram as diferentes relações entre compressão de aquíferos e aquitardos profundos sujeitos à extração de água para diferentes localidades da mesma cidade em razão da diferença na estrutura litológica local e condições de recarga e descarga do sistema subterrâneo. Os autores concluíram, no caso estudado, que o tempo para encerrar a consolidação primária do solo varia de menos de um ano até dezenas de anos, o que torna o processo de muito difícil previsão, evidenciando a importância do estudo específico de cada caso. Para se ter uma ideia da complexidade do processo, em um estudo envolvendo modelagem, Bakr (2015) concluiu que um processo acoplado de consolidação e compactação secundária leva à condição favorável em que a lenta dissipação do excesso de pressão nos poros com água reduz a contribuição da compactação para a subsidência total, sendo a consolidação pequena e a compressão secundária grande.

Santos, Cabral e Pontes Filho (2012) afirmam que, considerando as características inerentes ao fenômeno de subsidência do solo, devido à superexplotação de águas subterrâneas em aquíferos sedimentares, o instrumento utilizado para detecção dos deslocamentos do solo deve ser capaz de medir esses movimentos com o monitoramento das deformações ainda em fase inicial.

Como em algumas circunstâncias os deslocamentos são pequenos e lentos, várias técnicas têm sido pesquisadas para detectar a subsidência, tais como o nivelamento geométrico; os posicionamentos por satélites utilizando um ou mais sistemas do grupo Global

Navigation Satellite Systems (GNSS); o Sensoriamento Remoto com imagens de radar: Synthetic Aperture Radar (SAR), Interferometric Synthetic Aperture Radar (INSAR); e os extensômetros. Além dessas técnicas, existem outras relacionadas com o monitoramento de estruturas: nivelamento hidrostático de alta performance, Very Long Basiline Interferometry (VLBI) e GNSS associados a antenas de rádio astronômicas e também GNSS associados à malha geodésica de um país, estado ou município. Em algumas cidades de vários países, mais de uma técnica tem sido utilizada para confirmação dos resultados.

Cardoso et al. (2008) afirmam que, dentre as técnicas de posicionamento altimétrico utilizadas na Geodésia, o nivelamento geométrico de precisão e o posicionamento GNSS têm sido largamente empregados em casos onde exista, pelo menos, um ponto estável de referência. De fato, o nivelamento geométrico tem sido amplamente aplicado com a finalidade de realizar um monitoramento rigoroso e confiável das altitudes ou diferença de nível dos pontos da superfície terrestre em que os deslocamentos verticais sejam provocados pela subsidência do solo. Sobre isso, Bijuan Huang, Longcang Shu e Y. S. Yang (2012) destacam que os primeiros estudos sobre o monitoramento de subsidência do solo já empregavam o nivelamento geométrico como técnica usual.

Equipamentos mais sofisticados conseguem precisão de até o décimo de milímetro por quilometro nivelado, usando a técnica de medidas equidistantes com miras de ínvar. Há mais de uma década, a tecnologia GNSS vem sendo utilizada em levantamentos híbridos com as operações geodésicas tradicionais, ou mesmo em substituição a essas técnicas, nas mais diversas aplicações da engenharia, principalmente na determinação de altitudes de pontos na superfície da Terra (SANTOS et al., 2010). Em muitas localidades no mundo, tem-se aplicado o GNSS para fins de monitoramento de deslocamentos verticais.

Em diversos países, pesquisadores como Bitelli, Bonsignore e Unguendoli (2000), Chia-Chyang Chang (2000), Abidin et al. (2001), Sneed, Stork e Ikehara (2002), Sato, Abe e Ooraki (2003), Sneed et al. (2003), Cardoso et al. (2008), Santos et al. (2010), Bijuan Huang, Longcang Shu e Y. S. Yang (2012) relatam, em seus experimentos, a utilização do nivelamento geodésico de primeira ordem e o posicionamento GNSS como métodos geodésicos para detecção e medição do fenômeno da subsidência, seja esse de origem natural, seja antropogênica.

Comparando dados históricos de um nivelamento geométrico e de um rastreio GNSS, foi possível confirmar a subsidência de até 3,5 m entre os anos de 1950 e 2005, na planície de Thessaloniki ao norte da Grécia (PSIMOULIS et al., 2006). O uso do GNSS em conjunto com o nivelamento geométrico de precisão, como métodos eficazes na determinação de

deslocamentos verticais, foram utilizados para detectar a subsidência ocorrida no bairro de Laranjeiras na cidade de Lisboa, Portugal (HENRIQUES et al., 2011).

Nesse sentido, esta pesquisa tem por objetivo principal investigar a ocorrência do fenômeno da subsidência, levando em consideração a área do zoneamento explotável, por meio de métodos geodésicos, para avaliar e quantificar a deformação vertical do solo, em consequência da retirada de águas subterrâneas, os quais têm sido amplamente utilizados em registros do fenômeno estudado em todo o mundo. Para isso, utilizou-se então, neste trabalho, o rastreio com GNSS e o nivelamento geométrico de alta precisão, em pontos distribuídos ao longo da área sujeita aos movimentos do solo, compondo, assim, uma rede de monitoramento de subsidência. Pela comparação das altitudes desses pontos, realizada em diferentes épocas, pôde-se ter um indício de estimativa para atestar e quantificar o fenômeno.

A área estudada está situada na região sul da cidade do Recife, no bairro de Boa Viagem, no trecho abrangido pelas coordenadas UTM (Universal Transversa de Mercator) 9.100.690 mN, 9.102.462 mN, 290.422 mE e 291.441 mE, fuso 25, em Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas 2000 (SIRGAS2000), totalizando uma área de aproximadamente 0,62 km^2.

1.1 Hipótese

Levando em conta o estudo dos processos que causam a subsidência dos solos e analisando a realidade local da Planície do Recife, foi estabelecida a seguinte hipótese: O nível do solo da Planície do Recife, no bairro de Boa Viagem, está sofrendo lento rebaixamento devido a diversas causas como a explotação de águas subterrâneas, cargas estáticas e cargas dinâmicas, e a detecção do rebaixamento do nível do solo pode ser feita por meio de métodos geodésicos.

1.2 Justificativa

Segundo Santos (2005), 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 em razão da remoção de suporte subterrâneo. As causas mais comuns de ocorrência de subsidência estão relacionadas com as 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 semiárido nordestino e recentemente a região Sudeste, em particular o estado de São Paulo. Além disso, a água, quando contaminada, constitui um veículo natural para diversos tipos de doença. Por conseguinte, 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 em um 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 explotação dos recursos hídricos subterrâneos vem, cada vez mais, pondo em risco a existência de muitos aquíferos. Por esse motivo, a explotação de água dos reservatórios subterrâneos tem sido a principal causa da ocorrência de subsidência em áreas urbanas e circunvizinhanças.

A busca por água subterrânea tornou-se uma alternativa para a população já que a oferta e distribuição de águas superficiais nem sempre é suficiente. Especialistas afirmam que na RMR os níveis de água dos mananciais confinados sofreram rebaixamentos da ordem de oito metros por ano (COSTA et al., 2005), sobretudo no Aquífero Cabo, que segue desde o bairro do Pina, no Recife, até o município de Ipojuca no litoral sul pernambucano.

O excessivo bombeamento desses mananciais pode levar ao fenômeno conhecido como subsidência. Sendo assim, o desenvolvimento de áreas de pesquisa para o melhor entendimento do modelo físico de compactação dos reservatórios subsuperficiais e da subsidência do solo como consequência da extração de fluido, visando à 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 (SANTOS, 2005).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Investigar a ocorrência de subsidência do solo em área onde existe explotação excessiva de água subterrânea no bairro de Boa Viagem na cidade do Recife, com base no monitoramento periódico do nível do solo com aplicação da técnica do GNSS e nivelamento geométrico de precisão.

1.3.2 Objetivos específicos

a) Comparar as altitudes históricas com as atuais utilizando dados brutos dos nivelamentos geométricos de precisão referentes ao ano de 1958 e os nivelamentos realizados em 2012 e 2015 a fim de verificar a ocorrência de deslocamentos verticais.
b) Detectar deslocamentos verticais mediante simulações com GNSS para validação da tecnologia, nos pontos de controle instalados no solo, no Câmpus Recife da UFPE e na Praia de Boa Viagem, realizadas em 2013.
c) Verificar a ocorrência de deslocamentos verticais realizando medições com GNSS nos pontos de controle instalados no alto de prédios na área de estudo em 2016.
d) Comparar o uso de diferentes softwares de processamento GNSS na obtenção dos deslocamentos controlados, para os experimentos do ano de 2016.

1.4 Descrição das seções

As investigações, estudos e análises estão apresentados em seis seções incluindo esta introdutória.

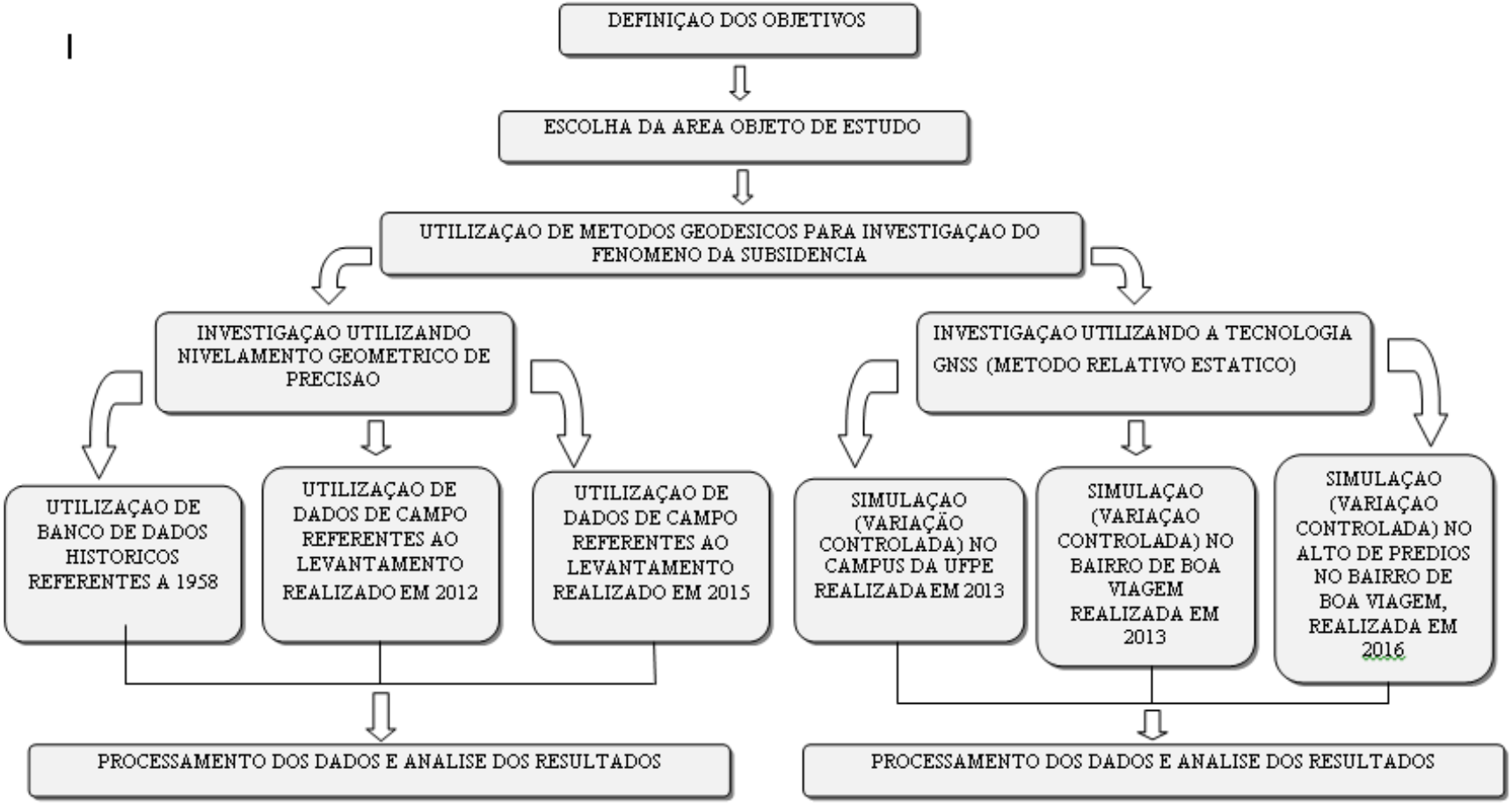
Na seção 2, apresenta-se o referencial teórico utilizado nesta pesquisa, onde foram abordados os seguintes temas: águas subterrâneas com destaque para os tipos de aquíferos, área de recarga e descarga dos aquíferos, os impactos ambientais aos quais os aquíferos estão sujeitos; faz-se ainda uma abordagem sobre subsidência do solo e suas ocorrências no mundo e no Brasil. Finalizando essa seção, são apresentados os métodos geodésicos para avaliação de ocorrência da subsidência e alguns aspectos geodésicos sobre medições altimétricas envolvendo o nivelamento geométrico de precisão e rastreio com a tecnologia GNSS.

A seção 3 traz uma descrição da área de estudo, que se inicia com um ligeiro histórico sobre os bairros de Boa Viagem e do Pina mostrando a ocupação urbana por volta dos séculos XVII ao XXI. Faz também uma abordagem hidrológica e geológica, aponta a situação da explotação das águas subterrâneas na RMR, com seu zoneamento explotável, e em particular mostra a situação no bairro de Boa Viagem.

A seção 4 descreve as metodologias utilizadas nas investigações de monitoramento da subsidência utilizando nivelamento geométrico de precisão, apresentando os resultados obtidos e suas análises. Ainda nessa seção, são descritas as investigações de monitoramento da subsidência utilizando a tecnologia GNSS quando da realização de três simulações do fenômeno de subsidência, uma realizada no Câmpus Recife da UFPE, outra realizada na Av. Boa Viagem, no bairro de Boa Viagem, e outra realizada em campanhas com os receptores instalados em pontos implantados no alto de quatro prédios localizados no bairro de Boa Viagem. Essa metodologia pode ser visualizada no fluxograma apresentado na Figura 1.

Os resultados obtidos em cada experimento estão na seção 5, em que se apresentam as discussões sobre a qualidade dos resultados. Finalizando, na seção 6, estão as conclusões e recomendações para futuras pesquisas.

Figura 1 – Fluxograma da metodologia desenvolvida na tese



Fonte: Elaboração própria, 2017.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Águas subterrâneas

Túneis e poços construídos para captação de água na Pérsia (atual Irã) e no Egito, por volta de 800 a.C., comprovam que as águas subterrâneas são aproveitadas pelo homem desde a Idade Antiga, portanto, muito antes da compreensão da sua origem, ocorrência e movimento (TOLMAN, 1937 apud FEITOSA; MANOEL FILHO, 2000).

A água subterrânea preenche os poros ou vazios intergranulares das rochas sedimentares, ou as fraturas, falhas e fissuras das rochas compactas, e sendo submetida a duas forças (de adesão e de gravidade), desempenha um papel essencial na manutenção da umidade do solo, do fluxo dos rios, lagos e brejos.

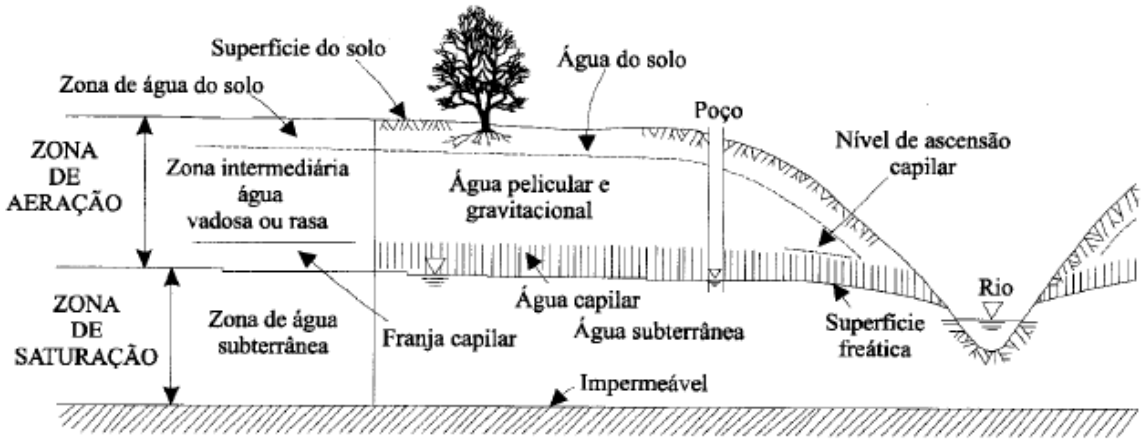
Após a precipitação, parte das águas que atinge o solo se infiltra e percola no interior do subsolo, durante períodos de tempo extremamente variáveis, em decorrência de muitos fatores: porosidade do solo, cobertura vegetal, inclinação do terreno, tipo de chuva.

Durante a infiltração, uma parcela da água sob a ação da força de adesão ou de capilaridade fica retida nas regiões mais próximas da superfície do solo, constituindo a zona não saturada.

Outra parcela, sob a ação da gravidade, atinge as zonas mais profundas do subsolo, constituindo a zona saturada. Embora toda a água situada abaixo da superfície da Terra seja evidentemente subterrânea, na hidrogeologia, a denominação água subterrânea é atribuída apenas à água que circula na zona saturada, isto é, na zona abaixo da superfície freática (FEITOSA; MANOEL FILHO, 2000).

Abaixo da superfície do terreno, a água contida no solo e nas formações geológicas é dividida ao longo da vertical basicamente em duas zonas horizontais: saturada e não saturada, de acordo com a proporção relativa do espaço poroso que é ocupado pela água como se pode ver na Figura 2 (FEITOSA; MANOEL FILHO, 2000). A zona não saturada, também chamada de zona de aeração ou vadosa (rasa), situa-se entre a superfície freática e a superfície do terreno, e nela os poros estão parcialmente preenchidos por gases (principalmente ar e vapor d’água).

Figura 2 – Representação esquemática da distribuição vertical da água no solo e subsolo, mostrando as diversas zonas de umidade



Fonte: Feitosa e Manoel Filho (2000).

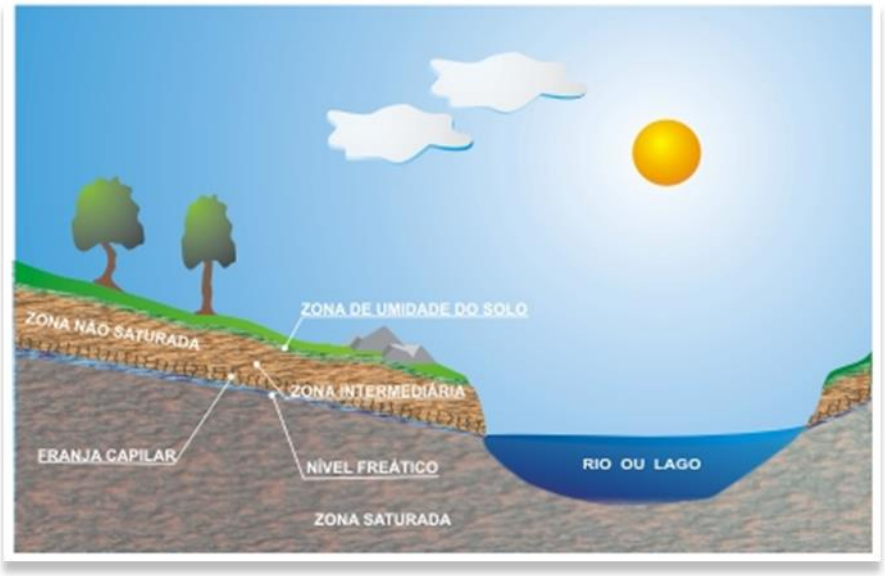
De baixo para cima, a zona não saturada divide-se em três partes:

a) Zona capilar, que se estende da superfície freática até o limite de ascensão capilar da água. A sua espessura depende principalmente da distribuição de tamanho dos poros e da homogeneidade do terreno.
b) Zona intermediária, compreendida entre o limite de ascensão capilar da água e o limite de alcance das raízes das plantas. A umidade existente nessa zona origina-se de água capilar isolada, fora do alcance das raízes, e água de retenção por forças não capilares.
c) Zona de água do solo ou zona de evapotranspiração, situada entre os extremos radiculares da vegetação e a superfície do terreno. A sua espessura pode variar de poucos centímetros (na ausência de cobertura vegetal) até vários metros em regiões de vegetação abundante (FEITOSA; MANOEL FILHO, 2000).

A zona saturada ou zona de saturação fica situada abaixo da superfície freática e nela todos os vazios existentes no terreno estão preenchidos com água. A superfície freática é definida como o lugar geométrico dos pontos em que a água se encontra submetida à pressão atmosférica (FEITOSA; MANOEL FILHO, 2000). As águas atingem essa zona por gravidade, através dos poros ou fraturas, até alcançar uma profundidade limite, onde os espaços entre as rochas está tão saturado que a água não pode penetrar mais. Para que haja infiltração até a zona saturada, é necessário primeiro satisfazer as necessidades da força de adesão na zona não saturada. Nessa zona, a água corresponde ao excedente de água da zona não saturada que se move em velocidade muito lenta, formando o manancial subterrâneo propriamente dito. Uma parcela dessa água desaguará na superfície dos terrenos, formando as

fontes, olhos de água. A outra parcela desse fluxo subterrâneo forma o escoamento de base que deságua nos rios, perenizando-os nos períodos de estiagem ou deságua diretamente nos lagos e oceanos. A superfície que separa a zona saturada da zona de aeração é chamada de nível freático (Figura 3), ou seja, esse nível corresponde ao topo da zona saturada (DRISCOLL, 1986).

Figura 3 – Nível freático: superfície de separação entre a zona vadosa e a zona saturada



Fonte: Adaptado de Borghetti, Borghetti e Rosa Filho (2004).

Dependendo das características climatológicas da região ou do volume de precipitação e escoamento da água, esse nível pode ficar permanentemente em grande profundidade, ou se aproximar da superfície horizontal do terreno, originando as zonas encharcadas ou pantanosas, ou convertendo-se em mananciais (nascentes) quando se aproxima da superfície através de um corte no terreno.

Assim como a distribuição das águas superficiais é muito variável, a das águas subterrâneas também é, uma vez que elas se inter-relacionam no ciclo hidrológico e dependem das condições climatológicas. Entretanto, as águas subterrâneas são aproximadamente 100 vezes mais abundantes que as águas superficiais dos rios e lagos. Embora elas se encontrem armazenadas nos poros e fissuras milimétricas das rochas, estas ocorrem em grandes extensões, gerando grandes volumes de águas subterrâneas, constituindo-se em importantes reservas de água doce (SHIKLOMANOV, 1998).

Durante o percurso no qual a água percola entre os poros do subsolo e das rochas, ocorre a depuração dela por meio de uma série de processos físico-químicos (troca iônica, decaimento radioativo, remoção de sólidos em suspensão, neutralização de pH em meio

poroso, entre outros) e bacteriológicos (processos bioquímicos ou eliminação de micro-organismos devido à ausência de nutrientes e oxigênio que os viabilizem), que agindo sobre a água, modificam as suas características adquiridas anteriormente, tornando-a particularmente mais adequada ao consumo humano (SILVA, 2003). Sendo assim, a composição química da água subterrânea é o resultado combinado da composição da água que adentra o solo e da evolução química influenciada diretamente pelas litologias atravessadas, e o teor de substâncias dissolvidas nas águas subterrâneas vai aumentando à medida que prossegue no seu movimento.

Segundo Wrege (1995), a água subterrânea apresenta algumas características que tornam o seu uso mais vantajoso em relação ao das águas dos rios: é filtrada e purificada naturalmente por meio da percolação, resultando em excelente qualidade e dispensando tratamento prévio; “não ocupa espaço em superfície; sofre menor influência das variações climáticas; é passível de extração perto do local de uso; tem temperatura constante; tem maior quantidade de reservas; [...] tem proteção contra agentes poluidores;” (WREGE, 1995); o uso do recurso muitas vezes melhora a qualidade; possibilita a implantação de projetos de abastecimento à medida da necessidade, entre outros.

De acordo com Leal (1999), a exploração de água subterrânea está condicionada a fatores quantitativos, qualitativos e econômicos. O autor destaca que o fator quantidade está intimamente ligado à condutividade hidráulica e ao coeficiente de armazenamento dos terrenos; enfatiza que os aquíferos têm diferentes taxas de recarga, portanto, em alguns deles, a recuperação ocorre lentamente e em outros a recuperação é mais rápida. Com relação à qualidade, o autor afirma que sofre influência da composição das rochas, das condições climáticas e de renovação das águas; quanto ao fator econômico, depende da profundidade do aquífero e das condições de bombeamento.

O aproveitamento das águas subterrâneas data de tempos antigos e sua evolução tem acompanhado a própria evolução da humanidade. Seu crescente uso se deve ao aumento de demanda e melhoramento das técnicas de construção de poços e dos métodos de bombeamento, permitindo a extração de água em volumes e profundidades cada vez maiores, possibilitando o suprimento de água a cidades, indústrias, projetos de irrigação, entre outros. A relação, em termos de demanda quanto ao uso, varia entre os países, e nestes, de região para região (PROASNE, 2012).

Segundo Leal (1999), praticamente todos os países, desenvolvidos ou não, utilizam água subterrânea para suprir suas necessidades. Países como Alemanha, Áustria, Bélgica, Dinamarca, França, Holanda, Hungria, Itália, Marrocos, Rússia e Suíça atendem de 70% a

90% da demanda para o abastecimento público usando água subterrânea (REBOUÇAS, 2002). De acordo com o WWDR (2015), a disponibilidade de águas subterrâneas está diminuindo, com 20% dos aquíferos do mundo explotados excessivamente. Segundo estimativas, em todo o mundo, dependem exclusivamente dos recursos hídricos subterrâneos para satisfazer suas necessidades diárias de água 2,5 bilhões de pessoas. A demanda hídrica global é fortemente influenciada pelo crescimento da população que, em 2030, estará estimada em aproximadamente 8,5 bilhões. Outros fatores como urbanização, política de segurança alimentar e energética, globalização do comércio, entre outros, também contribuem para o aumento da demanda hídrica. Em 2050, prevê-se um aumento nesta demanda de 55%, principalmente devido à crescente utilização pelo setor industrial, dos sistemas de geração de energia termoelétrica e dos usuários domésticos. A retirada excessiva é frequentemente o resultado de modelos antigos de uso de recursos naturais e de governança, em que a utilização de recursos para o crescimento econômico tem regulação deficiente e é realizada sem controle adequado (WWDR, 2015).

A expansão das terras agrícolas vem provocando também o uso intensivo das águas subterrâneas, além do uso habitual das fontes superficiais. Existem diversos exemplos no mundo de esgotamento de aquíferos por sobre-explotação para uso em irrigação. As políticas de desenvolvimento agrícola voltadas à autossuficiência alimentar feitas sem uma prioridade clara ao uso eficiente da água levaram ao uso excessivo dos recursos hídricos. Em particular, a falta de tarifas para o uso das águas subterrâneas resultou na predominância da utilização de métodos de irrigação tradicionais e no cultivo de produtos intensivos em água, ambos contribuindo como principais responsáveis pelo elevado consumo de água na agricultura. O consumo de águas subterrâneas para uso agrícola não é cobrado nos países do Conselho de Cooperação do Golfo (CCG): Bahrein, Kwaitt, Omã, Qatar, Arábia Saudita e Emirados Árabes Unidos, os quais estão localizados em uma região árida onde a oferta sustentável de água para todas as necessidades é uma tarefa complexa. Além disso, na maioria dos países, não existem medidores de vazão instalados em poços, o que dificulta o monitoramento e o controle da utilização de águas subterrâneas. Consequentemente, o uso intensivo e insustentável da água na irrigação (da qual, em média 94% são retirados de águas subterrâneas) levou a um rápido esgotamento de alguns aquíferos fósseis (não renováveis) e danificou outros em razão do aumento da salinidade. Até 2050, a agricultura precisará produzir globalmente 60% a mais de alimentos e 100% a mais nos países em desenvolvimento. Sendo já insustentáveis os atuais índices de crescimento global da demanda de água pela agricultura, o setor terá de aumentar sua eficiência no uso dessa água, reduzindo

as perdas e ainda, mais importante, aumentando a produtividade das culturas em relação aos recursos hídricos utilizados (WWDR, 2015).

No Brasil, vários núcleos urbanos são abastecidos de água subterrânea de forma exclusiva ou complementar, constituindo o recurso mais importante de água doce. Indústrias, propriedades rurais, escolas, hospitais e outros estabelecimentos utilizam, com frequência, água de poços profundos. Importantes cidades do país dependem integral ou parcialmente da água subterrânea para abastecimento, por exemplo: Ribeirão Preto, SP; Mossoró e Natal, RN; Maceió, AL; região metropolitana do Recife, PE; e Barreiras, BA. No Maranhão, mais de 70% das cidades são abastecidas por águas subterrâneas, e em São Paulo e no Piauí, chega a 80%. Mesmo em casos de elevado teor salino, como nas áreas de ocorrência dos sistemas aquíferos fissurados do semiárido nordestino, as águas subterrâneas constituem, não raro, a única fonte de suprimento permanente (LEAL, 1999).

2.2 Aquíferos

Denomina-se aquífero uma formação geológica que contém água e permite que quantidades significativas dessa água se movimentem no seu interior em condições normais. As formações permeáveis, como as areias e os arenitos, são exemplos de aquíferos (FEITOSA; MANOEL FILHO, 2000). Outro conceito refere-se a aquífero como se fosse, somente, o material geológico capaz de servir de depositório e de transmissor da água aí armazenada (BORGHETTI; BORGHETTI. ROSA FILHO, 2004).

Feitosa e Manoel Filho (2000) esclarecem que um aquiclude é uma formação que pode conter água (até mesmo em quantidades significativas), mas é incapaz de transmiti-la em condições naturais. As formações impermeáveis, como as camadas de argila, são exemplos de aquicludes.

Os autores definem, ainda, que um aquitardo é uma camada ou formação semipermeável, delimitada no topo e/ou na base por camadas de permeabilidade muito maior, e tem o comportamento de uma membrana semipermeável pela qual pode ocorrer uma filtração vertical ou drenança. Esclarecem, também, que a denominação de aquífugo aplica-se a uma formação impermeável que nem armazena nem transmite água.

Em um sistema geológico, a natureza e a distribuição dos aquíferos e aquitardos são controladas pela litologia, estratigrafia e estrutura das formações geológicas. A litologia trata da composição mineral, da distribuição de tamanho dos grãos e do grau de compactação dos sedimentos ou rochas constituintes do arcabouço geológico. A estratigrafia descreve as

relações geométricas e cronológicas entre os vários elementos constituintes do sistema geológico, tais como lentes, camadas e formações de origem sedimentar. Existem características estratigráficas denominadas de discordâncias que são especialmente importantes em hidrogeologia (FEITOSA; MANOEL FILHO, 2000).

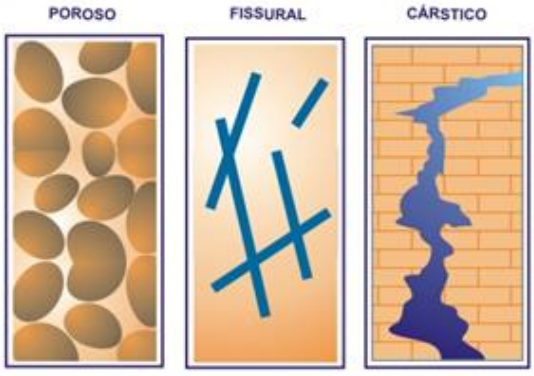
Essas discordâncias são descontinuidades estratigráficas ou superfícies que refletem a ocorrência de um intervalo de tempo durante o qual o processo de deposição foi interrompido, ou ainda, durante o qual, a superfície das rochas existentes foi intemperizada, erodida ou afetada por movimentos tectônicos. Essas discordâncias, muitas vezes, apresentam-se como superfícies que separam meios de permeabilidade diferente, por isso frequentemente estão associadas à ocorrência de aquíferos.

Já a estrutura, diz respeito às características geométricas produzidas no sistema geológico por deformação após deposição ou cristalização, como é o caso das juntas, fraturas, falhas e dobras (FEITOSA; MANOEL FILHO, 2000).

Feitosa e Manoel Filho (2000) afirmam que o conhecimento da geologia de uma região, isto é, da sua litoestratigrafia e estrutura, é o ponto de partida para a compreensão da distribuição espacial dos aquíferos e aquitardos.

Os aquíferos podem ser classificados de acordo com a capacidade de transmissão de água das respectivas camadas limítrofes: do topo e da base, e também são classificados de acordo com a pressão das águas nas suas superfícies limítrofes (FEITOSA; MANOEL FILHO, 2000). A Figura 4 ilustra os tipos de aquífero quanto à sua capacidade de transmissão de água.

Figura 4 – Tipos de aquífero quanto à porosidade



Fonte: Borghetti, Borghetti e Rosa Filho (2004).

O aquífero poroso ou sedimentar é aquele formado por rochas sedimentares consolidadas, sedimentos inconsolidados ou solos arenosos, onde a circulação da água se faz nos poros formados entre os grãos de areia, silte e argila de granulação variada. Constituem os

mais importantes aquíferos, pelo grande volume de água que armazenam, e por sua ocorrência em grandes áreas. Esses aquíferos ocorrem nas bacias sedimentares e em todas as várzeas onde se acumularam sedimentos arenosos. Uma particularidade desse tipo de aquífero é sua porosidade permitindo que a água flua para qualquer direção, em função tão somente dos diferenciais de pressão hidrostática ali existente. Essa propriedade é conhecida como isotropia. Já o aquífero fraturado ou fissural, é formado por rochas ígneas, metamórficas ou cristalinas, duras e maciças, onde a circulação da água se faz nas fraturas, fendas e falhas, abertas devido ao movimento tectônico.

A capacidade dessas rochas de acumularem água está relacionada com a quantidade de fraturas, suas aberturas e intercomunicação, permitindo a infiltração e fluxo da água. Poços perfurados nessas rochas fornecem poucos metros cúbicos de água por hora, e a possibilidade de se ter um poço produtivo dependerá, tão somente, desse poço interceptar fraturas capazes de conduzir a água.

Nesses aquíferos, a água só pode fluir onde houver fraturas, que, quase sempre, tendem a ter orientações preferenciais. São ditos, portanto, aquíferos anisotrópicos. Enquanto o aquífero cárstico é formado em rochas calcáreas ou carbonáticas, onde a circulação da água se faz nas fraturas e outras descontinuidades (diáclases) que resultaram da dissolução do carbonato pela água. Essas aberturas podem atingir grandes dimensões, criando, nesse caso, verdadeiros rios subterrâneos. São aquíferos heterogêneos, descontínuos, com águas duras, com fluxo em canais (BORGHETTI; BORGHETTI; ROSA FILHO, 2004).

Assim, uma litologia só será aquífera se, além de ter seus poros saturados de água, permitir a fácil transmissão da água armazenada. Um aquífero pode ter extensão de poucos quilômetros quadrados a milhares de quilômetros quadrados, ou pode, também, apresentar espessuras de poucos metros a centenas de metros (REBOUÇAS, 2002).

Em um levantamento realizado em 2000, a United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) constatou que existem mais de 100 aquíferos transnacionais no continente europeu (ALMÁSSY; BUZAS, 1999). Os aquíferos mais importantes do mundo, seja por extensão, seja pela transnacionalidade, estão apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 – Distribuição dos aquíferos mais importantes do mundo

AQUÍFEROS	PAÍSES	EXTENSÃO (km^2)
Guarani	Argentina, Brasil, Paraguai e Uruguai	1.200.000
Arenito Núbia	Líbia, Egito, Chade e Sudão	2.000.000
KalaharijKaroo	Namíbia, Bostwana e África do Sul	135.000
Digitalwaterwayvechte	Alemanha e Holanda	7.500
Slovak-Karst-Aggtelek	República Eslováquia e Hungria	3.300
Praded	República Checa e Polônia	Não informado
Grande Bacia Artesiana	Austrália	1.700.000
Bacia Murray	Austrália	297.000

Fonte: Adaptado de Almássy e Buzas (1999).

Outro grande aquífero, em capacidade e extensão, é o da bacia sedimentar da região amazônica. Pesquisadores da Universidade Federal do Acre (Ufac), em Rio Branco, afirmam, com base nos estudos realizados, que o sistema hidrogeológico começou a se formar no Período Cretáceo, há cerca de 135 milhões de anos e está a 4 mil metros de profundidade, abaixo do rio Amazonas (ABREU; CAVALCANTE; MATTA, 2013).

De acordo com Abreu, Cavalcante e Matta (2013), pesquisadores da Universidade Federal do Pará (UFPA), o volume de água subterrânea nesse aquífero é estimado em mais de 160 trilhões de metros cúbicos, como mostrado no Quadro 2.

Quadro 2 – Resumo de reservas totais do Sistema Aquífero Grande Amazônia (Saga) por bacia

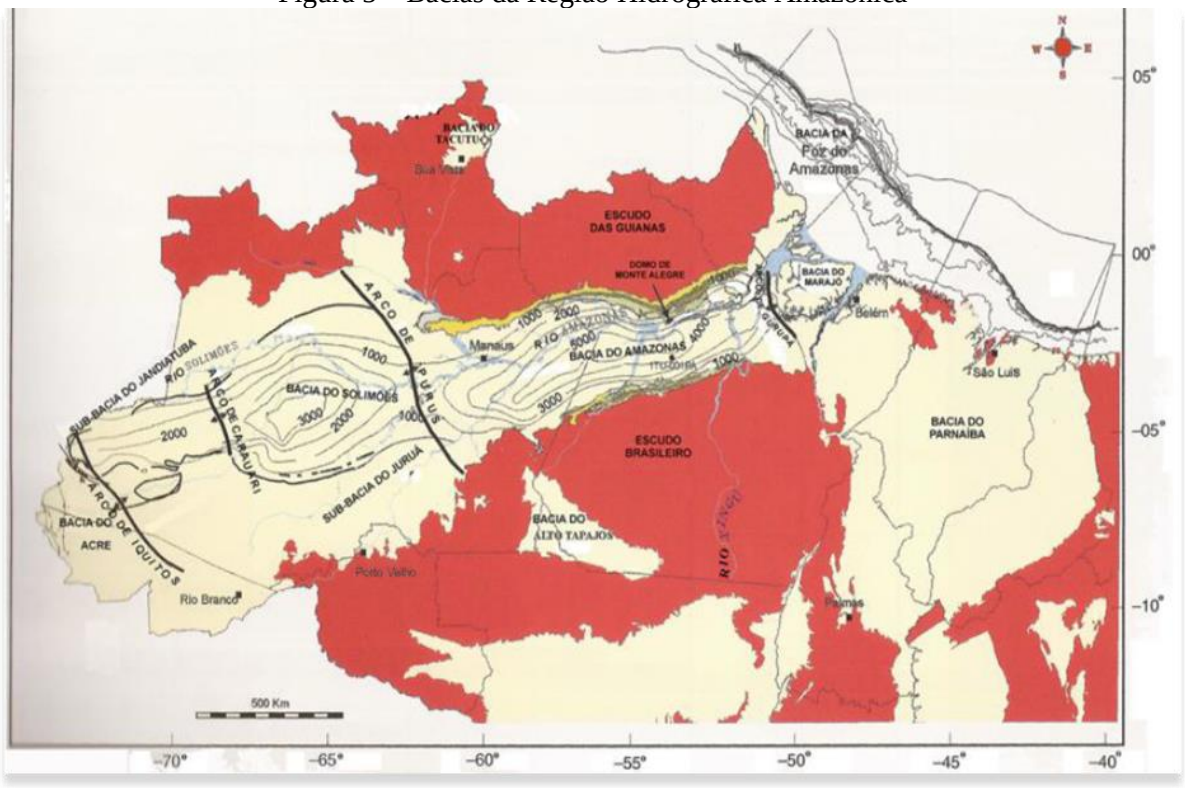
BACIA	RESERVAS (km^3)
Acre	23.960
Solimões	25.950
Amazonas	37.900
Marajó	74.710
Total	162.520

Fonte: Abreu, Cavalcante e Matta (2013).

Segundo Abreu, Cavalcante e Matta (2013), esse sistema é formado pelas bacias sedimentares do Acre, Solimões, Amazonas e Marajó, compondo uma área de 1.305.000 km^2, caracterizando-o como o maior aquífero do mundo (Figura 5).

O volume total apresentado no Quadro 2 é 3,5 vezes maior do que o do Aquífero Guarani (Quadro 1), depósito de água doce subterrânea com extensão de 1.200.000 $km^{2,}$ que abrange os territórios do Uruguai, da Argentina, do Paraguai e principalmente do Brasil.

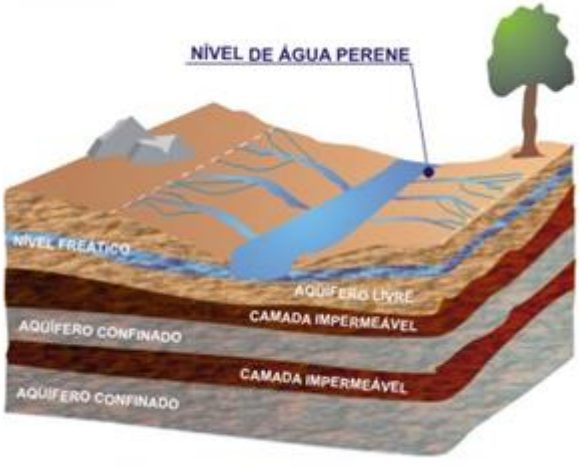
Figura 5 – Bacias da Região Hidrográfica Amazônica



Fonte: Adaptado de Abreu, Cavalcante e Matta (2013).

Quanto à pressão das águas nas suas superfícies limítrofes, os aquíferos podem ser livre ou freático, e confinado ou artesiano (Figura 6). O aquífero livre ou freático é aquele constituído por uma formação geológica permeável e superficial, totalmente aflorante em toda a sua extensão, e limitado na base por uma camada impermeável.

Figura 6 – Tipos de aquífero quanto à pressão



Fonte: Borghetti, Borghetti e Rosa Filho (2004).

A superfície superior da zona saturada está em equilíbrio com a pressão atmosférica, com a qual se comunica livremente. Os aquíferos livres têm a chamada recarga direta. Em aquíferos livres, o nível da água varia segundo a quantidade de chuva. São os aquíferos mais comuns e mais explorados pela população. São também os que apresentam maiores problemas de contaminação.

Existe um caso especial de aquífero livre formado sobre uma camada impermeável ou semipermeável de extensão limitada e situada entre a superfície freática regional e o nível do terreno, é o chamado aquífero suspenso, que, às vezes, existem em caráter temporário uma vez que drenam para o nível freático subjacente (FEITOSA; MANOEL FILHO, 2000). Já o aquífero confinado ou artesiano, é aquele constituído por uma formação geológica permeável, confinada entre duas camadas impermeáveis ou semipermeáveis. A pressão da água no topo da zona saturada é maior do que a pressão atmosférica naquele ponto, o que faz com que a água ascenda no poço para além da zona aquífera. O seu reabastecimento ou recarga, por meio das chuvas, dá-se preferencialmente nos locais onde a formação aflora à superfície. Neles, o nível da água encontra-se sob pressão, podendo causar artesianismo nos poços que captam suas águas. Os aquíferos confinados têm a chamada recarga indireta e quase sempre estão em locais onde ocorrem rochas sedimentares profundas – bacias sedimentares (BORGHETTI; BORGHETTI; ROSA FILHO, 2004).

O aquífero semiconfinado é aquele que se encontra limitado na base, no topo, ou em ambos, por camadas cuja permeabilidade é menor do que a do aquífero em si. O fluxo preferencial da água se dá ao longo da camada aquífera. Secundariamente, esse fluxo ocorre por meio das camadas semiconfinantes, à medida que haja uma diferença de pressão hidrostática entre a camada aquífera e as camadas subjacentes ou sobrejacentes. Em certas circunstâncias, um aquífero livre poderá ser abastecido por água oriunda de camadas semiconfinadas subjacentes ou vice-versa. Zonas de fraturas ou falhas geológicas poderão, também, constituir-se em pontos de fuga ou recarga da água da camada confinada. Em uma perfuração de um aquífero confinado, a água subirá acima do teto do aquífero em consequência da pressão exercida pelo peso das camadas confinantes sobrejacentes. A altura a que a água sobe chama-se nível potenciométrico e o furo é artesiano. Em uma perfuração de um aquífero livre, o nível da água não varia porque corresponde ao nível da água no aquífero, isto é, a água está à mesma pressão que a pressão atmosférica. O nível da água é designado então de nível freático (MATÉRIA..., 2008).

Um aquífero apresenta uma reserva permanente de água e uma reserva ativa ou reguladora que são continuamente abastecidas pela infiltração da chuva e de outras fontes

subterrâneas. As reservas reguladoras ou ativas correspondem ao escoamento de base dos rios. A área por onde ocorre o abastecimento do aquífero é chamada zona de recarga, que pode ser direta ou indireta. A zona de recarga direta é aquela onde as águas da chuva se infiltram diretamente no aquífero, por meio de suas áreas de afloramento e fissuras de rochas sobrejacentes. Sendo assim, a recarga sempre é direta nos aquíferos livres, ocorrendo em toda a superfície acima do lençol freático. Nos aquíferos confinados, o reabastecimento ocorre preferencialmente nos locais onde a formação portadora de água aflora à superfície. Já a zona de recarga indireta, é aquela onde o reabastecimento do aquífero se dá a partir da drenagem (filtração vertical) superficial das águas e do fluxo subterrâneo indireto, ao longo do pacote confinante sobrejacente, nas áreas onde a carga potenciométrica favorece os fluxos descendentes.

De acordo com Rebouças (2002), zona de descarga é aquela por onde as águas emergem do sistema, alimentando rios e jorrando com pressão por poços artesianos. As maiores taxas de recarga ocorrem nas regiões planas, bem arborizadas, e nos aquíferos livres. Nas regiões de relevo acidentado, sem cobertura vegetal, sujeitas a práticas de uso e ocupação que favorecem as enxurradas, a recarga ocorre mais lentamente e de maneira limitada.

Há condições que favorecem a recarga do aquífero, como o relevo, e as maiores taxas de recarga ocorrem nas regiões planas, bem arborizadas e nos aquíferos livres. Por outro lado, nas regiões de relevo acidentado, desprovidas de cobertura vegetal e sujeitas a práticas de uso e ocupação que favorecem a erosão, a recarga ocorre mais lentamente e de maneira limitada. Já a zona de descarga, é aquela por onde as águas emergem do sistema, alimentando rios, nesse caso, trata-se de um processo natural. Também pode ser explotada através de bombas nos aquíferos livres e jorrando com pressão por poços artesianos, nesses casos, devemos considerar que não se trata de processo natural (REBOUÇAS; BRAGA; TUNDISI, 2002).

Em condições naturais, Rebouças, Braga e Tundisi (2002) ressaltam, ainda, que apenas uma parcela dessas reservas reguladoras é passível de exploração, constituindo o potencial ou reserva explotável. Em geral, essa parcela é calculada entre 25% e 50% das reservas reguladoras. Esse volume de explotação pode aumentar em função das condições de ocorrência e recarga, bem como dos meios técnicos e financeiros disponíveis, considerando que a soma das extrações com as descargas naturais do aquífero para rios e oceano não pode ser superior à recarga natural do aquífero.

O manancial subterrâneo acha-se relativamente mais bem protegido dos agentes de contaminação que afetam diretamente a qualidade das águas dos rios, dado que ocorre sob uma zona não saturada (aquífero livre), ou está protegido por uma camada relativamente

pouco permeável (aquífero confinado) (REBOUÇAS, 1996). Porém, os agentes poluidores podem atingir continuamente os níveis mais profundos dos aquíferos porosos, notadamente na zona de recarga, sendo previsível um dano irreversível na qualidade das águas subterrâneas, estando sujeito a impactos ambientais (CPRM, 2003), a exemplo de:

a) Contaminação – a vulnerabilidade de um aquífero refere-se ao seu grau de proteção natural às possíveis ameaças de contaminação potencial, e depende das características litológicas e hidrogeológicas dos estratos que o separam da fonte de contaminação (geralmente superficial), e dos gradientes hidráulicos que determinam os fluxos e o transporte das substâncias contaminantes por meio dos sucessivos estratos e dentro do aquífero (CALCAGNO, 2001). A contaminação ocorre pela ocupação inadequada de uma área que não considera a sua vulnerabilidade, ou seja, a capacidade do solo em degradar as substâncias tóxicas introduzidas no ambiente, principalmente na zona de recarga dos aquíferos. A contaminação pode ser por fossas sépticas e negras; infiltração de efluentes industriais; fugas da rede de esgoto e galerias de águas pluviais; vazamento de postos de serviços; por aterros sanitários e lixões; uso indevido de fertilizantes nitrogenados; depósitos de lixo próximos dos poços mal construídos ou abandonados. Entretanto, a mais perigosa é a contaminação provocada por produtos químicos, que acarretam danos muitas vezes irreversíveis, causando enormes prejuízos haja vista que impossibilita o uso das águas subterrâneas em grandes áreas (MATÉRIA..., 2008).
b) Superexplotação ou superexploração (sobre-explotação ou sobre-exploração) de aquíferos: é a extração de água subterrânea que ultrapassa os limites de produção das reservas reguladoras ou ativas do aquífero, iniciando um processo de rebaixamento do nível potenciométrico que irá provocar danos ao meio ambiente ou para o próprio recurso hídrico. A água subterrânea pode ser retirada de forma permanente e em volumes constantes, por muitos anos, desde que esteja condicionada a estudos prévios do volume armazenado no subsolo e das condições climáticas e geológicas de reposição (MATÉRIA..., 2008).

Além da exaustão do aquífero, a superexplotação pode provocar:

a) Indução de água contaminada causada pelo deslocamento da pluma de poluição para locais do aquífero.
b) Salinização de aquíferos, podendo ser por avanço da cunha salina definida como o avanço da água do mar em subsuperfície sobre a água doce, salinizando o aquífero

em áreas litorâneas (CABRAL et al., 2008). Sem dúvida, a maioria dos aquíferos costeiros são suscetíveis à intrusão salina, que geralmente resulta da sobre-explotação em poços muito próximos do mar. Os aquíferos da cidade de Recife apresentam risco de salinização, e alguns poços já demonstram elevação do teor de sais. Entre as causas da salinização dos aquíferos de Recife, podem ser citados poços mal construídos, salinização proveniente dos estuários dos rios e dos mangues (CABRAL et al., 2008). Algumas outras cidades que tiveram problemas de salinização de seus poços são, entre outras: Lima, Peru; Santa Marta, Colômbia; Coro, Venezuela; Rio Grande do Norte e Natal, Brasil)e Mar del Plata, Argentina (MATÉRIA..., 2008).

c) Subsidência de solos, definida como “movimento para baixo ou afundamento do solo causado pela perda de suporte subjacente”, provocando uma compactação diferenciada do terreno que leva ao colapso das construções civis.

2.3 Poços

Segundo Diniz (2010), de maneira geral, o processo de pesquisa da fonte hídrica mais satisfatória depende das condições locais. Quando uma fonte natural de capacidade adequada é identificada previamente, esta normalmente será a opção mais satisfatória. Por outro lado, na ausência de fontes disponíveis, as melhores opções, geralmente, residem nas águas subterrâneas. Poços escavados manualmente, em geral, podem ser construídos nos locais onde são necessários e com mão de obra local, pouco qualificada. Já a perfuração de poços tubulares, frequentemente requerem equipamentos mais sofisticados e considerável experiência.

O método mais antigo de captação de águas subterrâneas é a escavação do solo até uma profundidade abaixo do nível freático. Normalmente, a quantidade de água que pode ser obtida por esse método é bastante limitada e quando quantidades maiores são necessárias, é preciso aumentar a área de captação, o que pode ser conseguido lateral ou verticalmente, ou, ainda, uma combinação desses dois métodos. A decisão sobre qual desses métodos deve ser aplicado depende da capacidade da formação aquífera e da profundidade do nível estático da água (DINIZ, 2010).

As formas verticais de captação de águas subterrâneas podem ser divididas em poços de grande diâmetro – poços escavados, e naqueles de pequeno diâmetro, ou poços tubulares, tendo sido utilizadas no Brasil desde o Período Imperial (DINIZ, 2008).

Um poço tubular é uma estrutura consistindo de tubos: tubos cegos em frente à formação não portadora de água e tubos perfurados ou de aberturas geometricamente confeccionadas em frente das formações permeáveis. Adaptam-se muito bem às mais diversas situações, prestando-se a captações de aquíferos rasos e pouco produtores até aquelas de grande profundidade e diâmetro, produtoras de expressivas vazões. Quando corretamente construídos têm longa vida útil, prestando-se ao abastecimento por várias dezenas de anos (DINIZ, 2010).

2.4 Subsidência

Segundo Galloway e Burbey (2011), a subsidência é um fenômeno sutil que pode ser observado pelo movimento do solo mediante deformações e falhas. As deformações provocadas por deslocamentos verticais e horizontais são os principais riscos associados à retirada de águas subterrâneas. Sendo assim, o controle geodésico e os modelos matemáticos (simulações) são importantes para avaliar esses riscos e estabelecer previsões. Ainda de acordo com esses autores, para o estudo da subsidência, geralmente são implantados *benchmarks* por meio de nivelamentos de primeira ou segunda ordem.

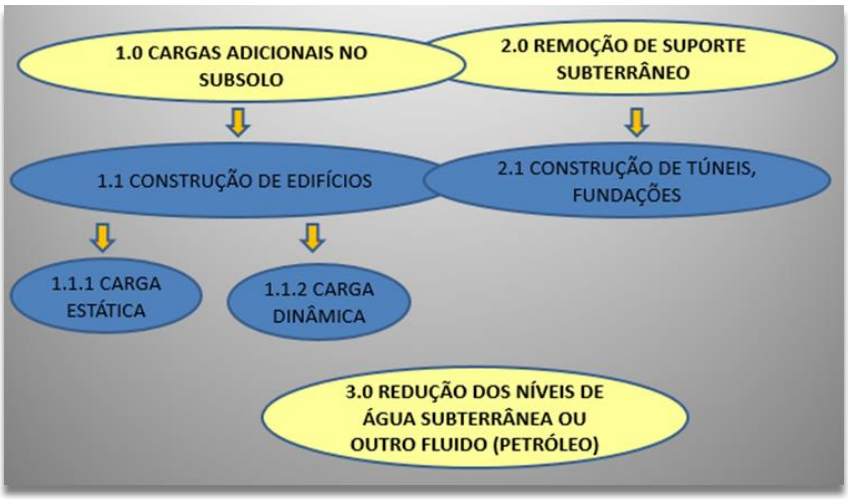
Segundo Infanti Junior e Fornasari Filho (1998), o processo de subsidência corresponde ao movimento, relativamente lento, de afundamento de terrenos, devido à deformação ou deslocamento de direção, essencialmente, vertical descendente.

Considerando as causas, Infanti Junior e Fornasari Filho (1998) classificam os processos de subsidência em dois tipos:

a) Processos naturais, causados principalmente pela dissolução de rochas (carstificação) como calcários, dolomitos, gipsita e sal, pela acomodação de camadas no substrato, devido ao seu peso ou a deslocamentos segundo planos de falhas.
b) Processos acelerados por ação antrópica, ocasionados pelo bombeamento de águas subterrâneas, por recalques ocasionados por acréscimo de peso devido a obras e estruturas e por galerias de mineração subterrâneas, principalmente em minas de carvão.

Outros pesquisadores como Ye-Shuang Xu et al. (2012), ao estudarem a subsidência em Shangai, China, atribuem outros fatores causadores do fenômeno: 1. cargas adicionais no subsolo; 2. remoção de suporte subterrâneo; 3. redução nos níveis de água subterrânea ou outro fluido (Figura 7).

Figura 7 – Outros fatores causadores do fenômeno de subsidência



Fonte: Elaboração própria, 2017.

Lin Zhu et al. (2015), que estudaram a subsidência do solo na parte norte de Beijing, China, que é densamente urbanizada, com base em múltiplos dados e imagens de satélite coletados de junho de 2003 a janeiro de 2010, concluíram que, apesar de não se ter identificado nenhuma correlação direta entre o aumento de carga (devido às construções) e a ocorrência da subsidência, estes podem constituir agravantes para ocorrência do processo.

2.4.1 Mecanismos da subsidência

De acordo com Cabral, Santos e Pontes Filho (2006), a subsidência é um fenômeno de rebaixamento da superfície do terreno em consequência das alterações ocorridas nas camadas subterrâneas, ou seja, redução do nível do terreno pela remoção de suporte subterrâneo. Os autores discutiram as principais características do mecanismo causador da subsidência e destacaram a subdivisão dele apresentada por Mingorance (2000) em cinco grupos: hidrocompactação, dissolução de rochas e sais, extração de água subterrânea, extração de petróleo ou gás e atividade mineira.

A subsidência associada à extração de águas subterrâneas em aquíferos sedimentares será descrita a seguir e, segundo Cabral, Santos e Pontes Filho (2006), é resultante do bombeamento do fluido que reduz a pressão dos poros que ajuda a suportar as camadas sobrejacentes do solo, como consequência do rebaixamento do nível da água. Os autores descreveram a ocorrência de tal mecanismo do ponto de vista da distribuição de pressões e do PTE proposto por Terzaghi (1925 apud SANTOS, 2005).

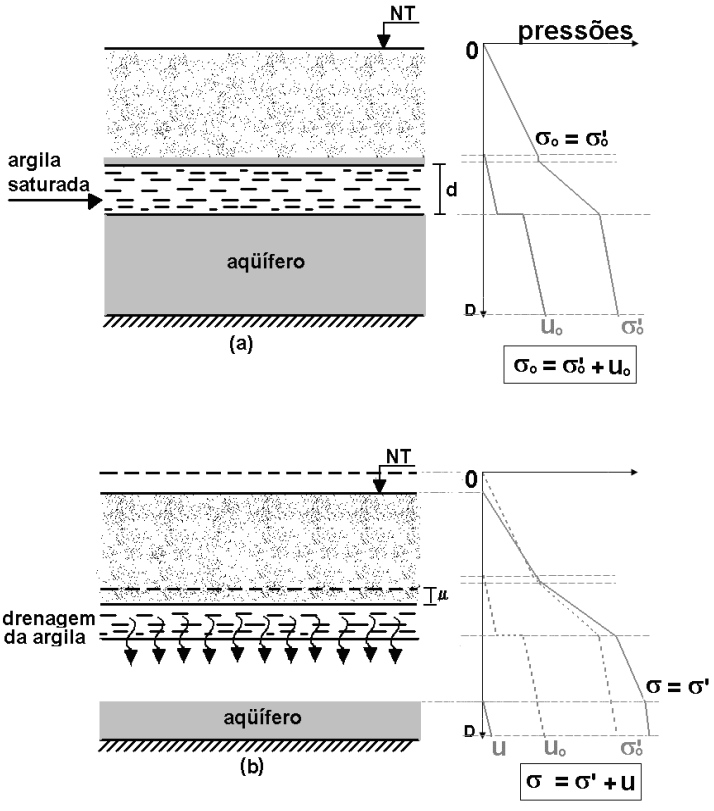
De acordo com Sylvana Santos (2005), o PTE constitui o elo entre a explotação de água subterrânea e o fenômeno de subsidência, e considerando que dentro do aquífero a pressão neutra *u*, ou seja, a pressão no poro preenchido com água equivale à carga hidráulica, quando a água é explotada do aquífero, a carga piezométrica e a pressão neutra diminuem e a tensão efetiva no aquífero aumenta, uma vez que a pressão total permanece constante, onde em um determinado ponto P dentro do aquífero, antes do bombeamento, o solo está sujeito às tensões iniciais (σ_0, σ'_0, u), tal que o peso das camadas de solo é suportado pela matriz sólida e pelo fluido simultaneamente. Segundo a autora, com a contínua retirada dos recursos hídricos subterrâneos e o rebaixamento do nível da água, verifica-se que, no mesmo ponto P, a carga geostática passa a ser suportada apenas pela matriz sólida, e esse aumento na tensão efetiva resulta na compressão do solo e consequente subsidência.

De acordo com Scott (1979 apud SANTOS, 2005), 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. Ainda no que se refere à distribuição de pressões, esse fenômeno pode ocorrer tanto em aquíferos confinados (Figura 8) quanto em aquíferos não confinados.

Figura 8 – Esquema da distribuição de pressões em um aquífero sedimentar confinado submetido à sobre-explotação

(a) antes do bombeamento – tensões iniciais atuantes (σ_0, σ'_0, u)

(b) após o bombeamento – tensões atuantes (σ, σ_0, u)

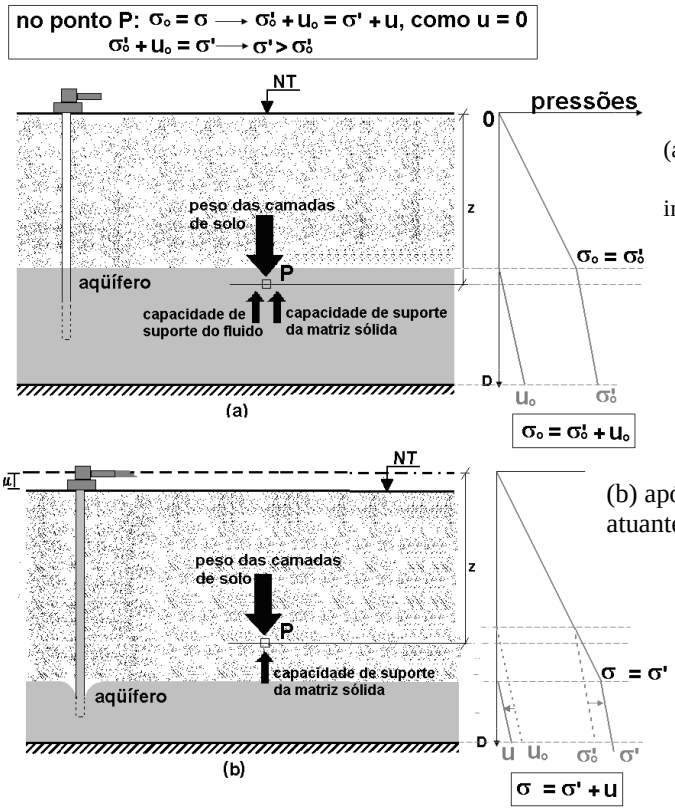


Fonte: Santos (2005).

Para os aquíferos não confinados, a Figura 9 apresenta um esquema da ocorrência do fenômeno, em que, ao rebaixar o nível do aquífero inferior, a camada de argila drena a água e ocorre um recalque que acarreta um rebaixamento do nível do terreno (SANTOS, 2005).

O comportamento do solo observado com a explotação de água subterrânea também está relacionado com sua granulometria, e de acordo com Santos (2005), os solos de granulação fina registram "na memória" as máximas tensões experimentadas por sua estrutura, que são comumente conhecidas como tensão de pré-consolidação.

Figura 9 – Esquema da distribuição de pressões em um aquífero sedimentar não confinado submetido à sobre-explotação



(a) antes do bombeamento – tensões iniciais atuantes (σ_0, σ'_0, u)

(b) após o bombeamento – tensões atuantes. (σ, σ_0, u).

Fonte: Santos (2005).

A autora destaca que a tensão de pré-consolidação constitui o fator condicionante do comportamento da estrutura sólida do solo, nesse tipo de material, em resposta às solicitações de carga e quando a tensão efetiva reduz e a pressão neutra aumenta, e o solo 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

significante rearranjo que resulta em um deslocamento vertical irrecuperável ou inelástico (SANTOS, 2005).

2.4.2 Ocorrência de subsidência no mundo

Em Shangai, a investigação de subsidência do solo devido à retirada de águas subterrâneas iniciou-se em 1921. Registros históricos mostram que o volume bombeado de águas subterrâneas e a subsidência aumentaram anualmente, em quarenta e quatro anos, entre 1921 e 1965. Durante esse período, verificou-se uma correlação entre o fenômeno e o bombeamento de águas subterrâneas (YE-SHUANG XU, 2010; SHUI-LONG SHEN; YE-SHUANG XU, 2011).

Henriques et al. (2011) afirmam que no bairro de Laranjeiras, na cidade de Lisboa, utilizando-se a tecnologia GNSS, verificou-se uma subsidência da ordem de 11 mm para um período de investigação de dois anos e meio entre meados de 2005 até o fim de 2007, o que equivale a uma velocidade de deslocamento vertical estimada em 4,4 mm/ano.

De acordo com Ustun, Tusat e Yalvac (2010), deslocamentos verticais da ordem de 12 a 52 mm foram observados, por meio de métodos geodésicos, com a utilização da tecnologia GNSS no período de 2006 a 2009, na bacia de Konya na Turquia, pela retirada de água subterrânea por um período entre trinta e quarenta anos desde 1969. O fenômeno de subsidência nessa região tem sido observado em áreas onde a água subterrânea tem sido intensivamente utilizada na irrigação e para uso diário das comunidades.

A subsidência do solo resultante da exploração das águas subterrâneas foi observada em Bangkok, Bandung, Hochi Minh e Tóquio. Em algumas partes dessas cidades, a subsidência da terra foi tão severa que ocorreram danos estruturais às construções e à infraestrutura. No leste de Bangkok, foram medidas taxas de subsidência da terra de 10 cm por ano e, em vários locais de Bandung, elas atingiram 24 cm por ano (WWDR, 2016).

Psimoulis et al. (2006) afirmam que a planície de Thessaloniki, localizada ao norte da Grécia, apresentou, ao longo de cinquenta anos, subsidência da ordem de 3,5 m resultante da hidrocompactação devido ao bombeamento intensivo de águas subterrâneas.

Após investigações realizadas no deserto de Mojave, na Califórnia, Sneed et al. (2003) ressaltam que, após quarenta anos, o bombeamento da água do reservatório subterrâneo, para diversas finalidades como abastecimento doméstico e fins agrícolas, foi responsável pela diminuição em mais de 30 m do nível das águas subterrâneas entre 1950 e 1990. Após oito anos, a diminuição do nível das águas subterrâneas foi de 15 m, entre 1990 e 1998. Detectou-

se, então, uma subsidência em torno de 60 cm nessa área, por meio de levantamentos realizados em 1969, 1990 e 1998.

A ocorrência de subsidência no México constitui um dos tradicionais registros da literatura específica. No aquífero do Vale de Toluca, um importante centro industrial e uma área com intensa atividade agrícola que também atende à necessidade de água no próprio vale e parte da cidade do México, ocorreram problemas como rebaixamento do nível piezométrico, de até 15 m em treze anos e subsidência do solo (ESTELLER; DIAZ-DELGADO, 2002). De acordo com as autoridades locais (Gerência de Águas do Vale do México), a ocorrência de subsidência nos últimos cem anos já resultou em um rebaixamento na parte central da área urbana, mais de 7,5 metros. González-Móran, Rodríguez e Cortes (1999) afirmam que, em algumas áreas, verificou-se uma subsidência superior a 15 m pela grande retirada de água subterrânea e a grande espessura das camadas de argila.

Sneed, Stork e Ikehara (2002) afirmam que, desde o início da década de 1920, a subsidência do solo, devido ao bombeamento excessivo de águas subterrâneas, no Vale Coachella na Califórnia, está sendo considerada como um problema em potencial, já que no fim da década de 1940, observou-se a compactação do sistema aquífero com um rebaixamento do nível de água subterrânea superior a 15 metros.

Dentre os casos registrados na literatura consultada, pode-se destacar, pelos significativos valores associados, a ocorrência de subsidência no Vale San Joaquim e no Vale Las Vegas, em Mendota, ambos na Califórnia, cidade do México, e no campo Wairakei, Nova Zelândia. O Vale San Joaquim é 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; BASAGAOGLU; MARIÑO, 2001).

Abidin et al. (2001) relataram a ocorrência de subsidência com valores superiores a 80 cm em estudos realizados no período 1982-1991 e superiores a 160 cm no período 1991-1997 em Jacarta, Indonésia. Ainda de acordo com os autores, a comparação com dados hidrológicos mostrou que a subsidência do solo está relacionada com a superexplotação das águas subterrâneas. No campo Wairakei, em Nova Zelândia, que já vem sendo monitorado desde 1955. Allis (2000) relatou a história do processo de subsidência devido à explotação 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 m ao longo de quarenta e cinco anos.

Com a utilização do programa *Modflow*, Thu e Fredlund (2000) realizaram uma simulação usando a modelagem numérica e estimaram, na cidade de Hanoi, no Vietnam, uma taxa de subsidência variando entre 20 e 35 mm por ano.

Os autores também fizeram uma projeção de subsidência para o período entre 1988 e 2015 em torno de 743 mm para a área do conjunto de poços em Phapvan e 144 mm para a área do conjunto de poços em Maidich. 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, Califórnia. De acordo com esses relatos, a Tabela 1 mostra um resumo das velocidades dos deslocamentos verticais relacionados com o tempo de monitoramento do fenômeno da subsidência e a tecnologia utilizada.

Tabela 1 – Resumo com as velocidades de deslocamentos verticais relacionados com o tempo de monitoramento e a tecnologia utilizada

Localidade	Velocidade de deslocamento vertical	Tempo de monitoramento	Tecnologia
Shangai	-----	-------	------
Laranjeiras, bairro em Lisboa	4,4 mm/ano	2,5 anos	Nivelamento e GNSS
Bacia do Konya na Turquia	De 4 mm/ano a 17,3 mm/ano	3 anos	GNSS
Leste de Bangkok	100 mm/ano	Não informado	Não informado
Bandung	240 mm/ano	Não informado	Não informado
Thessaloniki, na Grécia	70 mm/ano	50 anos	Nivelamento e GNSS
Deserto de Mojave na Califórnia	20 mm/ano	29 anos	Não informado
Vale de Toluca no México	De 75 mm/ano a 150 mm/ano	100 anos	Não informado
Jacarta na Indonésia	89 mm/ano e 150 mm/ano	9 anos e 6 anos	Não informado
Campo Wairakei na Nova Zelândia	300 mm/ano	45 anos	Não informado
Hanoi no Vietnam	De 20 mm/ano a 35 mm/ano	Não informado	Simulação com *Modflow*
Phapvan	27,5 mm/ano	27 anos	Simulação com *Modflow*
Maidich	5,3 mm/ano	27 anos	Simulação com *Modflow*

Fonte: Elaboração própria.

2.4.3 Ocorrência de subsidência no Brasil

Apesar do amplo uso dos mananciais hídricos subterrâneos, existem poucos registros de subsidência devido à extração de fluidos no Brasil. Essa ausência de documentos, entretanto, não deve traduzir-se em inexistência do fenômeno. Considerando que em algumas regiões do país a situação de explotação 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.

A explotação intensiva de água subterrânea pode causar subsidência do solo tanto em regiões de geologia do tipo cárstico como em regiões de bacias sedimentares (CABRAL, SANTOS; PONTES FILHO, 2006).

Segundo Cabral, Santos e Pontes Filho (2006), em regiões de bacias sedimentares, o bombeamento excessivo reduz a pressão de suporte exercida pela água nos poros, consequentemente aumenta o esforço sobre os grãos de solo acarretando uma redistribuição dos grãos e a subsidência da superfície, que pode atingir alguns centímetros por ano em uma extensão de vários quilômetros.

Quanto à subsidência por bombeamento em aquíferos sedimentares no Brasil, não foi encontrada nenhuma referência, apesar de haver possibilidade de ocorrência em diversas cidades onde ocorre explotação excessiva de água subterrânea. Em locais de formações de carste, o fluxo de água acarreta a dissolução dos compostos calcíferos, ocorrendo ampliação das cavidades de subsolo e consequente brusco abatimento do solo, com alguns metros de profundidade e algumas dezenas de metros de largura (CABRAL; SANTOS; PONTES FILHO, 2006).

Os aquíferos cársticos, 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 10), em 1988, o de Cajamar no estado de São Paulo (Figura 11), em 1986, e o de Mairinque, em São Paulo, em 1981. 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 Cajamar, a seca prolongada que antecedeu o acidente geológico e a retirada de água mediante poços artesianos que abastecem a cidade agravaram as condições naturais, provocando a queda da pressão da água subterrânea e acelerando o carreamento do solo. Com

isso, houve o desabamento do teto das cavidades e estas vieram a manifestar-se na superfície do terreno, formando a cratera.

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, A. B., 1995).

Figura 10 – Colapso em Sete Lagoas, Minas Gerais, 1988

Fonte: A. B. Silva (1995).

Figura 11 – Colapso em Cajamar, São Paulo, 1986

Fonte: A. B. Silva (1995).

2.5 A geodésia e os métodos geodésicos para avaliação de ocorrência da subsidência

Dentre as técnicas de posicionamento altimétrico utilizadas na Geodésia, o nivelamento geométrico de precisão e o posicionamento GNSS têm sido largamente utilizados. Suas aplicações vão desde investigação de fenômenos globais, por exemplo, fenômenos geodinâmicos, a investigações locais tais como subsidência do solo, monitoramento de recalque, entre outros (TORGE, 2001). O nivelamento geométrico de precisão é, tradicionalmente, o método mais preciso e o mais empregado na determinação de movimentos verticais de campo de pontos. O posicionamento altimétrico GNSS subcentimétrico exige aplicação de técnicas refinadas de observação e processamento de dados (CARDOSO et al., 2008).

2.5.1 Definição de geodésia e das superfícies de referência altimétrica

Em 1880, Friedrich Robert Helmert definiu Geodésia como “Ciência de medidas e mapeamento da superfície da Terra”. A superfície da Terra em sua grande extensão é moldada pelo campo de gravidade. Estando as observações geodésicas referenciadas ao campo de gravidade, torna-se necessário incluí-lo na definição de Geodésia. Então, Geodésia é a Ciência que tem por objetivo determinar a forma e as dimensões da Terra, bem como os parâmetros definidores de seu campo da gravidade e suas variações temporais (GEMAEL, 1999).

O objeto último da Geodésia é a determinação da forma e das dimensões da Terra, abrangendo, também, a determinação dos parâmetros definidores do campo da gravidade. Como a superfície terrestre continental se prolonga naturalmente no leito dos oceanos, fica subentendido que cabe também à Geodésia a descrição da “topografia submarina”. Em face das irregularidades da superfície terrestre, tal determinação exige o levantamento de pontos escolhidos sobre ela em número e distribuição geográfica compatíveis com a precisão desejada e com as restrições de ordem prática e econômica; os demais pontos são obtidos por interpolação. Para atingir o seu objetivo, a Geodésia pode valer-se de operações geométricas realizadas sobre a superfície terrestre (medições angulares e de distâncias) associadas a esparsas determinações astronômicas, ou valer-se de medições gravimétricas que conduzem ao conhecimento detalhado do campo da gravidade ou, mais modernamente, efetuar rastreio de satélites artificiais (GEMAEL, 1999).

De acordo com Seeber (2003), a Geodésia por satélite compreende técnicas observacionais e computacionais que permitem a solução de problemas geodésicos, pelo uso de medições precisas, tais como:

a) Determinação de posições tridimensionais globais, regionais e locais, como por exemplo, o estabelecimento de controle geodésico;
b) Determinação do campo de gravidade da Terra e funções lineares desse campo, como po exemplo, Geoide preciso;
c) Medição e modelagem de fenômenos geodinâmicos, como por exemplo, movimento polar, rotação da Terra e deformação da crosta.

Além da técnica de rastreio GNSS, Seeber (2003), destaca outros métodos geodésicos espaciais tais como as seguintes tecnologias:

a) Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite (DORIS), esse sistema utiliza como princípio de funcionamento o efeito Doppler e foi desenvolvido pela Agência Espacial Francesa Centre National d'Éstudes Spatiales (CNES) em cooperação com o (Institut Géographique National (IGN) e o Group de Recherches de Géodési Spatiale (GRGS) com o objetivo de dar suporte na determinação das órbitas precisas dos satélites, além da manutenção do International Terrestrial Reference Frame (ITRF), monitoramento da rotação da Terra, entre outros.
b) Satellite Laser Raging (SLR) é uma técnica de mensuração do tempo do duplo percurso de um feixe laser desde a estação terrestre até o conjunto retrorrefletor no satélite. Tem as seguintes aplicações: detecção e monitoramento do movimentos das placas tectônicas, deformação crustal, rotação da Terra, movimento dos pólos, determinação das marés oceânicas, entre outros.
c) Lunar Laser Ranging (LLR), tem o mesmo princípio que o Satellite Laser Raging (SLR), porém com retrorrefletores instalados na Lua. Como aplicação destaca-se a determinação de uma série de parâmetros que descrevem as efemérides lunares, Física lunar, interior da Lua, parâmetros de orientação da Terra, entre outros.
d) Altimetria por satélite, as medições são feitas a partir do satélite para a superfície da Terra. Tem como princípio básico a utilização de um radar altímetro instalado no satélite usado como plataforma móvel. O radar altímetro transmite pulsos de microondas para a superfície da Terra e recebe os sinais de retorno após a reflexão. Devido às propriedades refletoras favoráveis da água, o método é especialmente adequado sobre a superfície dos oceanos. Um radar altímetro pode ser utilizado

para fazer uma varredura da superfície dos oceanos e é, portanto, uma ferramenta geodésica eficaz no mapeamento do geoide;

e) Very Long Baseline Interferometry (VLBI), é uma técnica geodésica espacial, utilizada isoladamente ou combinada com outras técnicas espaciais, aplicada no restabelecimento dos parâmetros geodésicos, astronômicos e geodinâmicos, onde um par de radiotelescópios recebem rádio sinais de fontes extragalácticas, os quasars (Quasi Stelar Rádio Source).

A Geodésia considera três superfícies a saber:

I. Superfície física da Terra, local das operações geodésicas de campo.

II. Superfície do modelo geométrico, por vezes denominada superfície de referência sobre a qual são efetuados os cálculos geodésicos; esse modelo, na maioria das vezes, é um elipsoide de revolução.

III. O geoide, que é uma superfície equipotencial do campo da gravidade: aquela que mais se aproxima do “Nível Médio dos Mares” (NMM); nos continentes e ilhas (25% da superfície terrestre) acha-se no interior da crosta.

Em 1828, Gauss introduziu um modelo aperfeiçoado da figura da Terra, mas o termo geoide foi criado em 1873 por J. F. Listing. O geoide é limitado por uma superfície equipotencial do campo de gravidade da Terra que coincide com o nível médio não perturbado dos mares. Em cada ponto o vetor gravidade será perpendicular à superfície. Para estimar a forma do geoide é introduzido um campo de referência, conhecido como elipsoide de revolução com dimensões e características matematicamente definidas. A partir de então, pode-se imaginar a superfície geoidal prolongada através dos continentes, ela tem um formato ondulatório levemente irregular que acompanha as variações da estrutura de distribuição de massa da Terra. Essa ondulação é suave e fica em torno ± 30 m, sendo o valor máximo de ± 100m, em relação ao elipsoide de referência (IBGE, 2016a).

A altimetria, tão necessária aos trabalhos de engenharia, tais como: construção de estradas, abertura de túneis, usinas hidrelétricas, urbanismo, projetos de irrigação, entre outros, está intimamente ligada ao modelo irregular e complexo da Terra, o geoide. Trata-se de uma superfície equipotencial do campo da gravidade terrestre definido pelo nível médio dos oceanos.

Com o advento dos satélites artificiais e os estudos em relação às perturbações de suas órbitas teóricas pela força de atração gravitacional da Terra, tornou-se possível a materialização da definição global do geoide. A solução foi observar os níveis da maré por certo número de anos e adotar um valor médio como ponto definidor em que se encontra o

geoide. O “geoide brasileiro” ficou materializado pelas medições no marégrafo de Imbituba, no litoral de Santa Catarina, e teve seu valor estabelecido usando o intervalo de tempo entre os anos de 1949 a 1957 (GEMAEL, 1988; IBGE, 2011a; LUZ, 2008). Em 1996, o então Departamento de Geodésia do IBGE – hoje Coordenação de Geodésia (CGED) – estabeleceu a Rede Maregráfica Permanente para Geodésia (RMPG) com a finalidade de determinar e acompanhar a evolução temporal e espacial dos data altimétricos do SGB.

Quatro estações estão operacionais: Imbituba, SC, com observações convencionais desde junho de 1998 e digitais desde agosto de 2001; Salvador, BA, desde dezembro de 2002 e outubro de 2004; Santana, AP, cujos sensores convencional e digital foram ambos instalados em outubro de 2005; e Fortaleza, CE, com observações digitais desde abril de 2008. A estação de Macaé, RJ, encontra-se inativa desde junho de 2015. Ela funcionou com observações convencionais desde novembro de 1994 e digitais desde julho de 2001.

A expansão da RMPG contará com o estabelecimento de uma estação maregráfica na região Norte, no porto de Belém, e outra na região Sudeste, no porto do Forno em Arraial do Cabo, RJ. O conjunto de estações da RMPG permitirá que o nível médio do mar seja determinado ao longo de toda a costa brasileira e correlacionado com as observações pretéritas. Além disso, a rede proporcionará a vinculação entre esses resultados e todos os demais referenciais altimétricos, notadamente aqueles utilizados na Cartografia Náutica e nas operações portuárias, trazendo grandes benefícios aos usuários da RAAP em regiões costeiras (IBGE, 2017a). A Figura 12 ilustra a RMPG.

Figura 12 – Rede Maregráfica Permanente para Geodésia (RMPG)

Fonte: IBGE (2017a).

2.5.2 Ondulção geoidal

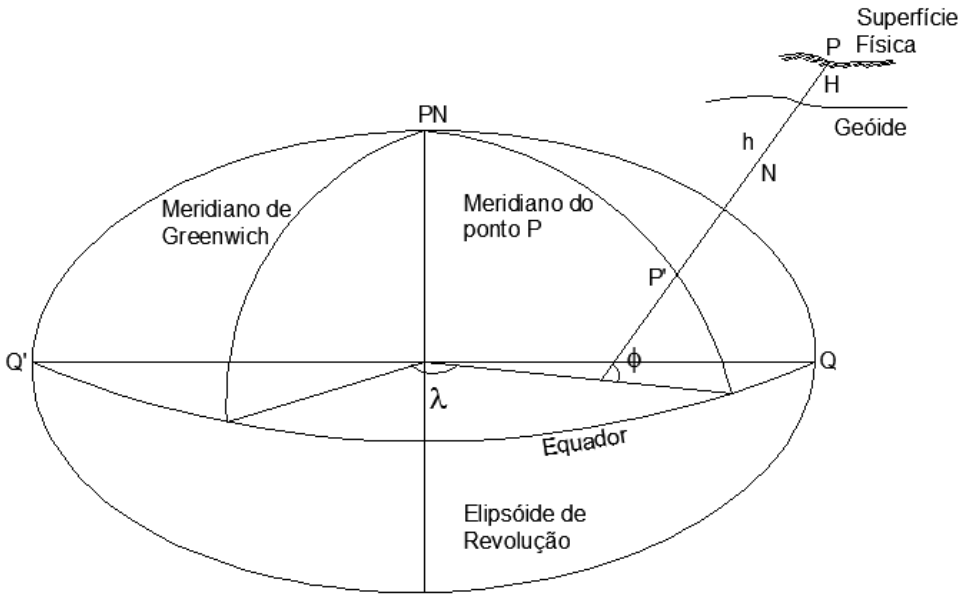
Em função de sua rapidez e precisão na obtenção de coordenadas, os Sistemas Globais de Navegação por Satélite (GNSS) revolucionaram as atividades que necessitam de posicionamento. Entretanto, a altitude determinada utilizando um receptor GNSS não está relacionada com o nível médio do mar (ou, de forma mais rigorosa, ao geoide), mas a um elipsoide de referência com dimensões específicas. Portanto, torna-se necessário conhecer a diferença entre as superfícies do geoide e do elipsoide, isto é, a altura (ou ondulação) geoidal (N), para que se possa obter a altitude acima do nível médio do mar, denominada ortométrica (H) em função das altitudes elipsoidais (h).

Dessa forma, existe um grande interesse por um modelo de ondulação geoidal brasileiro cada vez mais preciso para aplicações nas áreas de mapeamento e engenharia. É com esse objetivo que o Modelo de ondulação geoidal 2015 (MAPGEO2015) – ANEXO A –, assim como os modelos anteriores (MAPGEO2010, MAPGEO2004, MAPGEO92), foi concebido e produzido conjuntamente pelo IBGE, por meio da Coordenação de Geodésia (CGED), e pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Epusp). O novo modelo foi calculado com uma resolução de 5’ de arco, e o Sistema de Interpolação de Ondulações Geoidais foi atualizado. Por meio desse sistema, os usuários podem obter a ondulação geoidal em um ponto ou conjunto de pontos, cujas coordenadas refiram-se ao SIRGAS2000 e compreendidas entre as latitudes de 6°N e 35°S e entre as longitudes de 75°W e 30°W, dentro do território brasileiro, utilizando o endereço https://ww2.ibge.gov.br/mapgeo/mapgeo.htm (IBGE, 2016a).

2.5.3 Determinação de um ponto P na superfície física da terra e os tipos de altitude

Observando-se a Figura 13, percebem-se várias grandezas, representadas em diferentes escalas para permitir clareza no entendimento de suas definições, por exemplo, PP' é a normal ao elipsoide, conduzida a partir do ponto P na superfície física; o ângulo que essa normal forma com a sua projeção no equador é a latitude geodésica do ponto P e o diedro formado pelo meridiano geodésico paralelo ao de Greenwich e pelo meridiano do ponto P mede a longitude geodésica (λ) (GEMAEL, 1999).

Figura 13 – Superfícies de referência: física, geoide e elipsoide de revolução



Fonte: Gemael (1999).

Segundo Gemael (1999), para definir sem ambiguidade a posição do ponto P na superfície terrestre, necessita-se, além da latitude (Φ) e da longitude (λ), de uma terceira coordenada: a altitude geométrica (h), ou seja, distância de P ao elipsoide contada ao longo da respectiva normal, que pode ser obtida com a expressão aproximada da Equação 1:

$$H \cong h - N \qquad (1)$$

sendo:

H - a altitude ortométrica;

h - a altitude elipsoidal ou altitude geométrica;

N - a altura geoidal (separação entre o geoide e o elipsoide).

Segundo Blitzkow, Campos e Freitas (2004), desde o advento das observações por satélite, as determinações de posição no espaço vêm sendo resolvidas de forma simples e eficiente. Assim, pode-se facilmente determinar coordenadas referidas a um elipsoide de referência. Na prática, pelo satélite, obtêm-se coordenadas cartesianas (X, Y, Z) que são transformadas no terno geodésico latitude (Φ), longitude (λ) e altitude elipsoidal (h), que é uma grandeza geométrica sem significado físico. Essa altitude é referida à superfície elipsoidal que não é uma superfície equipotencial do campo de gravidade da Terra real, mas sim do modelo adotado, o elipsoide. Por esse motivo, a altitude elipsoidal nem sempre atende

a todas as exigências e muitas vezes necessita-se de um tipo de altitude que satisfaça condições específicas.

A seleção do tipo de altitude a ser usada e a escolha da superfície de referência (origem) são fundamentais em aplicações práticas da altimetria. Considerando essas opções, uma altitude pode ter significado apenas geométrico ou ter um sentido físico por constituir uma grandeza relacionada com o campo de gravidade. Salienta-se que o fluxo natural de água é regido pelo campo de gravidade, e não por condições geométricas (BLITZKOW; CAMPOS; FREITAS, 2004).

O efeito das alterações gravitacionais sobre as altitudes obtidas pode ser quantificado e tratado em conformidade com conceitos físicos. Assim, as altitudes utilizadas em geodésia podem ser classificadas segundo sua determinação, sua aplicação e o modelo físico considerado em sua definição. Nesse sentido, podem-se distinguir altitudes do tipo geométrico: niveladas e elipsoidais, além das altitudes do tipo físico que serão vistas nas seções a seguir (FREITAS; BLITZKOW, 1999).

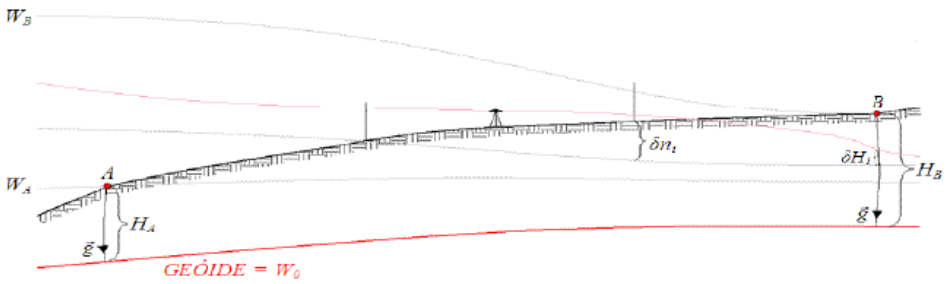
2.5.3.1 Altitudes geométricas

Para as altitudes geométricas, é possível estabelecer uma grandeza geométrica associada à referida altitude, em outras palavras, uma distância segundo uma direção que associa duas superfícies de referência. Implica selecionar uma superfície de referência como origem, estabelecer procedimentos de observação, selecionar métodos analíticos de cálculo e fazer a determinação da altitude em um ponto ou conjunto de pontos (BLITZKOW; CAMPOS; FREITAS, 2004).

2.5.3.1.1 Altitudes niveladas

As altitudes niveladas são obtidas pelo processo de nivelamento geométrico (Figura 14) via métodos ópticos, ópticos/eletrônicos e digitais de medição. As diferenças de altitudes medidas variam de acordo com o campo de gravidade da região, além das irregularidades topográficas. As quantidades observadas (δ_n) correspondem às distâncias existentes entre as superfícies equipotenciais do campo de gravidade terrestre. O somatório dos desníveis permite conhecer a diferença de altura entre os pontos extremos de interesse (FREITAS; BLITZKOW, 1999).

Figura 14 – Nivelamento geométrico



Fonte: Severo et al. (2013).

Onde:

δn_i = desnível parcial entre os pontos A e B;

δH_i = diferença de altitude ortométrica;

W = número geopotencial (será abordado na seção 2.5.3.2.2).

Se um circuito fechado de nivelamento geométrico for mensurado, ou seja, uma linha de nivelamento que se inicia em um ponto A e termina no mesmo ponto A, a soma dos desníveis parciais deve ser nula, pois a altitude da estação inicial é a mesma altitude da estação de término do circuito. Entretanto, em razão da presença inevitável de erros nos processos de medições, na prática, dificilmente essa condição é obedecida. Mesmo que se tomem medidas para a redução desses erros, como a instalação do nível a igual distância das miras, minimizando a influência da curvatura terrestre e da refração e da refração atmosférica (TORGE, 2001), o nivelamento geométrico conduzirá a diferentes altitudes para um ponto qualquer, nivelado a partir de percursos distintos, e uma das causas é atribuída ao não paralelismo das superfícies equipotenciais (HEISKANEN; MORITZ, 1967).

2.5.3.1.2 Altitude elipsoidal

A altitude elipsoidal representa a separação entre a superfície física e a superfície elipsoidal ao longo da normal. A altitude elipsoidal de um ponto pode ser calculada a partir das coordenadas cartesianas convenientemente referidas ao centro do elipsoide de referência. Atualmente, é muito usual obter as coordenadas cartesianas mediante observações GNSS. Em função disso, a altitude elipsoidal passa a ser uma coordenada importante nos registros relativos a informações de um ponto de referência. Entretanto, como esse tipo de altitude não tem vinculação com o campo de gravidade da Terra, podem ocorrer valores iguais para essa

grandeza em pontos situados em diferentes níveis, ou vice-versa, valores desiguais da altitude podem ocorrer sobre a mesma superfície equipotencial do campo de gravidade. Assim sendo, do ponto de vista da engenharia, essa altitude é utilizada com restrições. Não obstante, quando o interesse é pela variação temporal, a altitude elipsoidal pode ser muito útil tanto para a engenharia como para a geodinâmica (FREITAS; BLITZKOW, 1999).

2.5.3.2 Altitudes científicas: teoria do potencial e número geopotencial

Ao contrário das altitudes geométricas, as altitudes científicas são obtidas separadamente da latitude e da longitude. As altitudes científicas derivam de números geopotenciais em que cada valor particular da gravidade conduz a um tipo de altitude (GEMAEL, 1999). As altitudes científicas estão vinculadas, portanto, a um conceito físico do campo de gravidade, e não por condições geométricas (BLITZKOW; CAMPOS; FREITAS, 2004).

2.5.3.2.1 Teoria do potencial

A teoria do potencial, que remonta a Laplace, desempenha papel importantíssimo em vários setores da ciência, como em Mecânica Celeste, Hidrodinâmica, Eletricidade, Magnetismo, Termodinâmica, entre outras. A Geodésia, por seu turno, interessada no conhecimento da estrutura do campo da gravidade e de suas vinculações com o problema da forma da Terra, vem encontrando na teoria do potencial uma poderosa ferramenta de trabalho, hoje mais valorizada com as técnicas de posicionamento por rastreio de satélites artificiais (GEMAEL, 1999).

Esta teoria do potencial aliada ao desenvolvimento de superfícies equipotenciais sem harmônicos esféricos, e ainda, ao avanço tecnológico computacional, principalmente em termos de velocidade de processamento, permitiu que o geoide pudesse sair da concepção teórica para a prática. O modelo matemático do geoide, descrito pelo geopotencial (W), ou potencial da Terra “verdadeira”, em uma de suas formas é apresentado pela Equação 2 (GEMAEL, 1999):

$$W = \frac{KM}{r}\left\{1 + \sum_{n=2}^{\infty}\sum_{m=0}^{n}\left(\frac{a}{r}\right)^{n}\left[C_{nm}\cos(m\lambda) + S_{nm}\,\mathrm{sen}(m\lambda)\right]P_{nm}(v)\right\} + R \qquad (2)$$

sendo:

KM - constante de gravitação universal;
r - raio vetor no ponto de avaliação;
a - semieixo maior do elipsoide de revolução;
ν - colatitude do ponto de avaliação;
λ - longitude do ponto de avaliação;
R - raio médio para esfera auxiliar;
C_{nm}, S_{nm} - coeficientes do harmônico esférico;
n - grau do harmônico esférico;
m - ordem do harmônico esférico;
P_{nm} - função associada de Legendre.

O desconhecimento da densidade do interior da crosta terrestre e da verdadeira forma da Terra com suas elevações e depressões conduz ao uso de um modelo teórico. Esse modelo teórico é uma superfície equipotencial conhecida como Terra Normal, um elipsoide de revolução com mesma massa e velocidade de rotação da Terra real ou verdadeira, cujo potencial de atração denominado de esferopotencial (U) é dado pela Equação 3 (GEMAEL, 1999):

$$U = \frac{KM}{r}\left\{1 - \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}\left(\frac{a}{r}\right)^{2n} P_{2n}(v)\right\} + \frac{1}{2}(\omega r\, \mathrm{sen} v)^2 \qquad (3)$$

sendo:
ω - velocidade angular da Terra;
r - raio do paralelo elipsoidal no ponto de co-latitude ν;
n - o grau do harmônico;
J_{2n} - fator dinâmico de forma;
P_{2n} - zonais pares (função associada de Legendre).

2.5.3.2.2 Número geopotencial

A altitude ortométrica (H) advém do conhecimento do número geopotencial, que é representado na literatura pela letra N_P. Para um ponto P na superfície da Terra, o número geopotencial (N_P) é a diferença do geopotencial no geoide (W_0) e o geopotencial (W_P) no ponto (P) na superfície. Conforme Gemael (1999), sua Equação 4 é expressa por:

$$N_p = W_0 - W_p = \int_0^P g\, dz \cong \sum g_i\ (\Delta H_i) \quad (4)$$

Onde: g_i representa a aceleração da gravidade na i-ésima seção de desnível ΔH_i.

Para se obter altitudes científicas de pontos na superfície da Terra, é imprescindível ter conhecimento do número geopotencial (N_p). Uma altitude científica de um ponto P é dada pela Equação 5 (GEMAEL, 1999):

$$H = \frac{N_P}{G} \quad (5)$$

sendo:

Np - o número geopotencial obtido com a Equação 4, função dos desníveis;

G - um valor da gravidade terrestre.

Também se pode obter o número geopotencial (N_P) por meio do modelo de alturas geoidais para o país, descrito na seção 2.5.3.

Gemael (1999) apresenta um resumo das altitudes científicas, pois dependendo do valor adotado para a gravidade G, pode-se ter uma ou outra altitude científica. O resumo é transcrito no Quadro 3:

Quadro 3 – Altitudes científicas

Gravidade	Altitude
$G = g_m$	Ortométrica (H)
$G = g_p + 0{,}0424H$	Helmert (H^H)
$G = \gamma_p - 0{,}154H$	Vignal (H^V)
$G = \gamma'$	Molodenski (H^N)
$G = \gamma_{45°}$	Dinâmica (H^D)

Onde:

g_m - corresponde à gravidade média no interior da crosta terrestre do ponto na superfície da Terra até o geoide;

g_p - corresponde ao valor da gravidade observada no ponto sobre a superfície terrestre;

H = corresponde ao valor da altitude ortométrica de P;

γ - corresponde ao valor da gravidade normal obtida para a Terra normal;

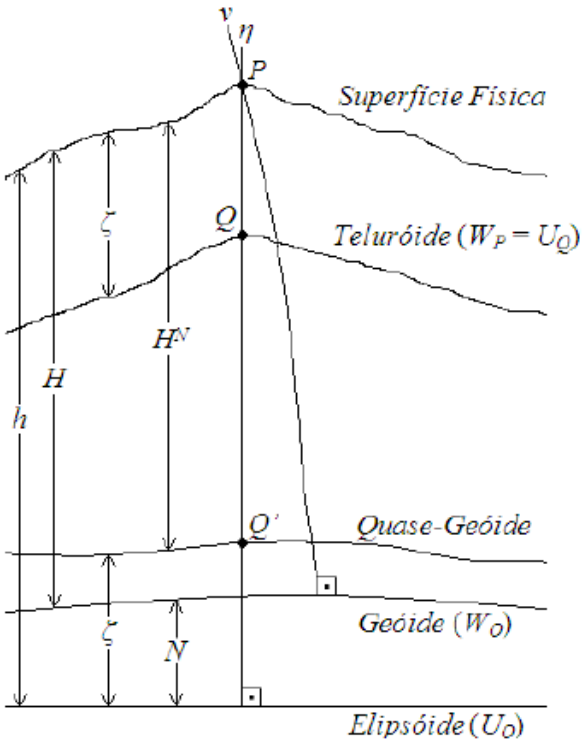
γ_p - corresponde ao valor da gravidade normal no elipsóide para a latitude de P;

$\gamma_{45°}$ - corresponde ao valor da gravidade normal válida para a latitude de 45°;

γ' - corresponde ao valor da gravidade normal média entre o elipsoide e o ponto correspondente do teluroide.

A Figura 15 ilustra algumas grandezas e a relação entre elas, para o entendimento de cada altitude científica apresentada no Quadro 3.

Figura 15 – Grandezas relacionadas com as superfícies altimétricas de referência



Fonte: Severo et al. (2013).

De acordo com Heiskanen e Moritz (1967 apud Severo et al., 2013), a separação entre geoide e quase-geoide, e consequentemente a diferença entre as altitudes ortométrica e normal, são dadas pela Equação 6, onde ζ representa a anomalia de altitude e N é a altura geoidal, sendo esta contada pela perpendicular ao elipsoide, deste ponto até o geoide, conforme mostrado na Figura 15.

$$H - H^N = \zeta - N = \frac{\gamma' - g_m}{\gamma'} H \quad (6)$$

Ainda na Figura 15, pode-se extrair a relação entre as altitudes normal (H^N) e ortométrica (H) com respeito à altitude elipsoidal (h), sendo esta uma altitude de característica puramente geométrica contada do elipsoide até a superfície física sobre a perpendicular ao elipsoide de referência. Dessa forma, o sinal de aproximação nas Equações 7 e 8 é atribuído ao fato de que as altitudes são medidas em linhas diferentes (SEVERO et al., 2013).

$$H \cong h - N \quad (7)$$

$$H^N \cong h - \zeta \quad (8)$$

Nos itens a seguir, serão discriminadas detalhadamente, entre outras, essas altitudes.

Altitude ortométrica – no Brasil, têm-se usado as altitudes obtidas por meio do nivelamento geométrico de precisão, corrigidas do não paralelismo das superfícies equipotenciais (FREITAS; BLITZKOW, 1999), pela Equação 9.

$$C_0 = -H_m \frac{(C_1 sen2\varphi_m + 2C_2 sen4\varphi_m)\Delta\varphi}{(1 + C_1 sen2\varphi_m + C_2 sen^2 2\varphi m)} \quad (9)$$

onde:

H_m= altitude média da seção de nivelamento considerada;

φ_m = latitude média da seção;

$\Delta\varphi$ = diferença de latitudes entre os extremos da seção;

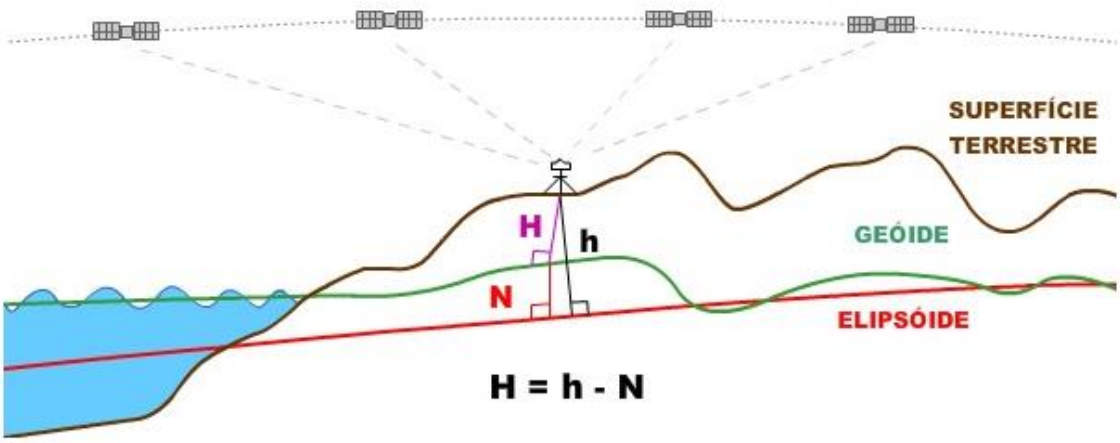
C_1 *e* C_2 = coeficientes do campo de gravidade normal, sendo para o SIRGAS2000 os valores: C_1= 0,00533023655 e C_2 = - 0,0000059.

A altitude ortométrica (H) de um ponto da superfície física da Terra corresponde à distância entre ele e o geoide, e é medida ao longo da vertical, caracterizando-se pela sua natureza física decorrente da atuação da força da gravidade, resultante das forças centrífuga e gravitacional (TORGE, 2001). A altitude elipsoidal ou geométrica (h) de um ponto da superfície terrestre tem natureza geométrica, sendo expressa pela distância entre o ponto da superfície física e a superfície elipsoidal de referência, medida ao longo da normal ao

elipsoide (VANICEK; KRAKIWSKY, 1982). A ondulação geoidal (N) corresponde à separação entre o geoide e o elipsoide (SEEBER, 2003).

Essa aproximação é decorrente da circunstância de N e H não serem colineares, pois H é contado ao longo da vertical do ponto P, que é a reta tangente à linha de força do campo gravítico nesse ponto e representa a direção do vetor gravidade, ou simplesmente, a direção da gravidade e N ao longo da normal (GEMAEL, 1999), conforme mostrado na Figura 16, a igualdade H = h - N é um valor aproximado, como visto na expressão aproximada da Equação 1.

Figura 16 – Altitude geométrica (h), altitude ortométrica (H) e ondulação geoidal (N)



Fonte: IBGE (2016a).

A correção da altitude ortométrica aplicada aos desníveis depende do conhecimento prévio das altitudes ortométricas nos vértices inicial e final da linha nivelada, sendo possível obter esses valores se forem conhecidos os números geopotenciais nos mesmos vértices (SEVERO et al., 2013).

De acordo com Freitas e Blitzkow (1999), a correção ortométrica elimina o efeito da variação da distância entre geópes devido à variação de latitude. É o tipo de correção mais extensamente aplicada nas redes de nivelamento e também adotada no Brasil. Esse tipo de correção independe de observações gravimétricas, sendo aplicada diretamente ao desnível bruto medido e pode ser calculada pela Equação 10:

$$\delta h' = 1542 \times 10^{-9} H_m \delta\varphi' \operatorname{sen}(2\varphi_M) \qquad (10)$$

Onde:

$\delta h'$: correção ortométrica num trecho de nivelamento geométrico;

$\delta_{\varphi'}$: desenvolvimento em latitude da linha de nivelamento, em minutos de arco;

φ_M: latitude média do trecho;

H_m: altitude bruta média do trecho.

Segundo Gemael (1999), no caso particular do campo de gravidade terrestre, as superfícies equipotenciais são conhecidas como geópes. O geópe fundamental é o geoide, correspondente ao nível médio dos mares não perturbado, prolongado através dos continentes.

Altitude de Helmert – pela impossibilidade de se obter g_m no interior da crosta terrestre, a altitude ortométrica tem um caráter puramente teórico, não podendo ser obtida a menos de hipóteses simplificativas sobre a densidade do material que compõe a litosfera (SEVERO et al., 2013).

A forma mais simples de determinação da altitude ortométrica utiliza a redução gravimétrica simplificada de Poincaré-Prey, sendo esta conhecida como altitude ortométrica de Helmert (SEVERO et al., 2013). A redução de Poincaré-Prey aplica uma série de simplificações com respeito às massas externas ao geoide, como a negligência do efeito do terreno e variações de densidade nas massas topográficas (SEVERO et al., 2013). A aproximação de g_m é dada pela expressão vista no Quadro 3, igual a: $G = g_p + 0{,}0424H$.

Altitude de Vignal – essa altitude vale-se da gravidade normal e, também, é uma aproximação da altitude ortométrica (GEMAEL, 1999), visto que sua determinação pode ser obtida pela expressão no Quadro 3, igual a: $G = \gamma_p - 0{,}154H$.

Altitude de Molodenski ou altitude normal – em 1945, Molodensky, Yeremeyev e Yurkina (1962 apud SEVERO et al., 2013) propuseram a concepção do sistema de altitudes normal, com o objetivo de contornar o problema da determinação da gravidade real média ao longo da vertical (g_m), que consiste em substituir g_m pelo valor médio da gravidade normal (γ') medida sobre a linha normal entre o teluroide e o elipsoide de referência (Figura 15).

De acordo com Severo et al. (2013), a superfície conhecida como teluroide pode ser mais bem entendida se imaginar-se um ponto P localizado na superfície terrestre, o qual tem um certo potencial W_p e também um determinado potencial U_p, sendo em geral ($W_p \neq U_p$). Existe um ponto Q, ao longo da normal, onde ($W_p = U_p$), assim essa superfície será definida pelos pontos onde o potencial normal U no ponto Q é igual ao potencial W no ponto P (SEVERO et al., 2013), indicando que teluroide não representa uma superfície equipotencial, pois normalmente pontos na superfície física têm diferentes W_p.

A distância contada entre os pontos P e Q representa a anomalia de altitude ζ. Essa mesma distância contada a partir do elipsoide de referência materializa o quase-geoide (Figura 15), e essa superfície também não define uma equipotencial. Dessa forma, a altitude normal (H^N) do ponto P pode ser definida como a distância entre o quase-geoide e a superfície física, contada sobre a linha normal passante pelo ponto P, conforme apresentado na Figura 15 (SEVERO et al., 2013).

Altitude dinâmica – outras possibilidades de escolha do denominador (G) da Equação 6 resultam em outros diferentes tipos de altitudes como a altitude dinâmica que resulta da escolha de um valor γ válido para uma dada latitude padrão, ou seja, 45° (BLITZKOW; CAMPOS; FREITAS, 2004).

De acordo com Luz (2016), para as altitudes dinâmicas, consideram-se valores constantes para a gravidade de referência (γ) escolhidos arbitrariamente. Esse tipo de altitude é ideal para estudos hidráulicos e hidrológicos, pois garante valores iguais de altitude para pontos sobre a mesma superfície equipotencial. No caso da América do Sul, o monitoramento do Aquífero Guarani constitui um exemplo de possível aplicação das altitudes dinâmicas, em função das necessidades hidrológicas e de sua grande extensão.

Por outro lado, Torge (2001) menciona que a principal desvantagem das altitudes dinâmicas origina-se das diferenças relativamente grandes em relação às altitudes niveladas.

2.5.4 Sistema geodésico de referência e sua materialização

A definição de um sistema de referência caracteriza-se pela ideia conceitual desse sistema (*Reference System)*. Quando um referencial é definido e adotado por convenção, a etapa seguinte caracteriza-se pela coleta de observações a partir de pontos sobre a superfície terrestre, devidamente materializados (*Reference Frame*), tendo um conjunto de coordenadas associado a uma época em particular. Atualmente, os sistemas, além das coordenadas, têm associadas a elas as respectivas velocidades. Esse conjunto materializa um Sistema Geodésico de Referência (MONICO, 2008).

Um sistema terrestre convencional Conventional Terrestrial System (CTS) é um sistema cartesiano geodésico cuja origem está situada no centro de massa da Terra, portanto também pode ser chamado de global. Um Sistema Geodésico de Referência (SGR) é um CTS associado a constantes geométricas e físicas do campo da gravidade (ZANETTI, 2006).

O SGR é constituído por um conjunto de parâmetros geodésicos fundamentais adquiridos nas observações realizadas na Terra, propondo um modelo da forma e dimensões

do elipsoide de referência e um campo de gravidade externo da Terra, cujas grandezas definidoras são: semi-eixo maior; fator dinâmico de forma; constante gravitacional geocêntrica e velocidade angular da Terra (SILVA, G. P, 2014).

De acordo com Zanetti (2006), a implantação de um SGR compreende duas etapas: a definição do sistema e a sua materialização. A definição do sistema de referência inclui a escolha de constantes, parâmetros e convenções. O conjunto de parâmetros e convenções necessários para definir em qualquer momento a origem e posição dos três eixos cartesianos no espaço, assim como parâmetros geométricos e físicos associados, são referidos em inglês como *system*. A materialização do sistema é feita por um conjunto de coordenadas de estações, obtidas por diferentes técnicas de posicionamento, criando a estrutura ou rede de referência (em inglês *frame*). Nas redes de referência clássicas, a materialização da posição horizontal de pontos na superfície terrestre é feita por meio de métodos tradicionais como poligonação, triangulação, trilateração e o posicionamento altimétrico mediante nivelamento geométrico ou trigonométrico.

Nos sistemas de referência terrestres modernos, a materialização das coordenadas de pontos na superfície terrestre é feita por técnicas espaciais de posicionamento de alta precisão, que fornecem medidas relacionadas com um sistema cartesiano tridimensional, com origem definida como geocêntrica. Essas coordenadas podem ser facilmente convertidas em coordenadas geodésicas: latitude, longitude e altitude, se adotada uma superfície de referência elipsóidica (ZANETTI, 2006).

Em fevereiro de 2005, o IBGE, responsável pela definição, implantação e manutenção do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) estabeleceu o SIRGAS em sua realização do ano 2000 (SIRGAS2000) como novo sistema de referência geodésico para o SGB. A adoção do SIRGAS2000 no Brasil garante a qualidade dos levantamentos GNSS, pela necessidade de um sistema de referência geocêntrico compatível com a precisão dos métodos e técnicas de posicionamento atuais e com os demais sistemas adotados em outros países (ZANETTI, 2006).

A definição, implantação e manutenção do SGB, bem como o estabelecimento das especificações e normas gerais para levantamentos geodésicos, são de responsabilidade do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). O SGB é composto pelas redes gravimétricas, planimétricas e altimétricas (SILVA, G. P., 2014).

2.5.5 Rede altimétrica brasileira

Segundo o IBGE (2016b), rede altimétrica é um conjunto de estações geodésicas, denominadas referências de nível, que materializam a componente altimétrica do SGB por meio de medições de nivelamento geométrico de alta precisão.

Em 13 de outubro de 1945, de acordo com o IBGE (2016b), a Seção de Nivelamento (SNi) iniciava os trabalhos de Nivelamento Geométrico de Alta Precisão, dando partida ao estabelecimento da Rede Altimétrica do SGB. No Distrito de Cocal, município de Urussanga, Santa Catarina, onde está localizada a Referência de Nível (RN) 1-A, a equipe integrada pelos Engenheiros Honório Bezerra – chefe da SNi –, José Clóvis Mota de Alencar, Péricles Sales Freire e Guarany Cabral de Lavôr, efetuou a operação inicial de nivelamento geométrico no IBGE. Em dezembro de 1946, foi efetuada a conexão com a Estação Maregráfica de Torres, Rio Grande do Sul, permitindo, então, o cálculo das altitudes das Referências de Nível já implantadas.

Concretizava-se, assim, o objetivo do Professor Allyrio de Mattos de dotar o Brasil de uma estrutura altimétrica fundamental, destinada a apoiar o mapeamento e servir de suporte às grandes obras de engenharia, sendo de vital importância para projetos de saneamento básico, irrigação, estradas e telecomunicações. Em 1958, quando a Rede Altimétrica contava com mais de 30.000 quilômetros de linhas de nivelamento, o *Datum* de Torres foi substituído pelo *Datum* de Imbituba, definido pela estação maregráfica do porto da cidade de mesmo nome, em Santa Catarina. Tal substituição ensejou uma sensível melhoria de definição do sistema de altitudes, uma vez que a estação de Imbituba contava na época com nove anos de observações, bem mais que o alcançado pela estação de Torres.

A Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP) do SGB passou por diversos processos de ajustamento manuais das observações de nivelamento (1948, 1952, 1959, 1962, 1963, 1966, 1970 e 1975), conforme seu desenvolvimento e as ferramentas de cálculo disponíveis a cada época. O último ajustamento, denominado Ajustamento Altimétrico Global Preliminar (AAGP), foi finalizado em 1993 e corrigiu alguns problemas dos ajustamentos anteriores, como a aplicação da redução pseudo-ortométrica, que trata apenas do efeito do não paralelismo das superfícies equipotenciais do campo da gravidade normal. Contudo, devido à limitação dos programas, o AAGP foi realizado de forma a particionar a RAAP em vários macrocircuitos (MMCC) e ajustamentos independentes (IBGE, 2016b).

Somente no início de 2005, foi possível iniciar o processo que levou ao ajustamento simultâneo, concluído em maio e disponibilizado em 20 de junho daquele ano. A organização

e a preparação de todos os dados da RAAP, observações e memoriais descritivos, demandaram a geração de programas específicos de crítica dos dados, em que foram identificadas e corrigidas as inconsistências encontradas. Assim, foi possível incluir estações que anteriormente receberam valores preliminares e cerca de 12.000 que ainda não haviam sido calculadas. Também foram identificadas áreas que precisam de novas medições, confirmada a necessidade de manutenção de várias estações geodésicas existentes e a construção de outras (IBGE, 2016b).

Para o cálculo do ajustamento, foi utilizado o software canadense denominado Geodetic Adjustment Using Helmert Blocking of Space and Terrestrial Data (GHOST), que permite o ajustamento simultâneo de grandes redes geodésicas. Nesse ajustamento foram incluídas todas as RRNN (Referências de Nível) medidas e não calculadas, antes e depois do AAGP, e as RRNN pertencentes aos “ramais” das linhas de nivelamento. Como resultado, foram disponibilizadas altitudes ajustadas de aproximadamente 69000 RRNN, com os respectivos desvios-padrão, propagados desde a origem da Rede, no marégrafo de Imbituba, SC. Pela impossibilidade de estabelecimento de Referências de Nível no entorno do baixo Rio Amazonas, a pequena porção da Rede Altimétrica existente no estado do Amapá não pôde ser conectada a Imbituba, levando à utilização do nível médio do mar no Porto de Santana entre 1957 e 1958, originando o Datum Santana. É importante ressaltar que a introdução de novas observações, a metodologia utilizada e as inconsistências corrigidas ocasionaram mudanças nas altitudes das antigas estações (IBGE, 2016b).

2.5.6 Rede altimétrica local

De acordo com Cardoso (2005), uma rede altimétrica local é composta por um campo de pontos distribuídos localmente na região de interesse.

As estruturas geodésicas de alcance local (redes altimétricas locais) são implantadas principalmente para projetos de engenharia, investigações geofísicas e para a determinação de geodinâmicos espacialmente limitados (SEIXAS et al., 2014). Esses autores comentam os exemplos de estruturas geodésicas de alcance local empregadas na engenharia, como monitoramento da subsidência do solo; racionalização construtiva no posicionamento preciso de edificações prediais; monitoramento de encostas, levantamentos cadastrais urbanos e definição de geoide local, que, respectivamente, são abordados por SANTOS, 2005; BOTELHO, 2003; RHADAMEK, 2008; GAMA, 2008; GUIMARÃES, 2013).

2.5.6.1 Sistema altimétrico local

De acordo com Cardoso et al. (2008), o sistema altimétrico local envolve normalmente uma porção limitada da superfície terrestre quando comparado com as redes regionais e nacionais, e é composto por um campo de pontos distribuídos na região de interesse. As altitudes dos pontos que compõem este sistema estão vinculadas à Rede Altimétrica do Sistema Geodésico Brasileiro (RA-SGB) podendo, em alguns casos, ser referenciados a pontos materializados em *benchmark's*, afloramentos rochosos, pilares, soleiras de edificações, entre outros. Segundo Silva, Seixas e Romão (2004), de grande importância é a estabilidade dos pontos de referência. Nesse sentido, informações da área geológica e geotécnica são fundamentais para a correta localização dos pontos de referência. Outra modalidade de sistema altimétrico local abrange extensões menores restringindo a pequenos corpos como edificações e obras de arte da construção civil.

O acompanhamento da estabilidade dos pontos de referência que compõem o sistema local é um fator fundamental para aplicações que envolvem uma série de observações altimétricas temporais de objetos sujeitos a movimentos verticais. A essas aplicações, pode-se citar investigação de recalque na construção civil, investigação de subsidência em áreas de extração de água subterrânea, gás, petróleo ou minérios, obras de drenagem, entre outros (DINGSHENG CHEN, 1994; SILVA; SEIXAS; ROMÃO, 2004).

2.5.6.2 Ponto altimétrico local

De acordo com Genetti (1990) e Silva, Seixas e Romão (2004), os campos de pontos, no processo de medição de deformação, são conjuntos de pontos interligados e classificados como de referência e objeto:

- Campo de pontos de referência – tem a finalidade de dar a referência de medição e com isso monitorar o objeto com respeito ao seu redor, é formado por um conjunto de pontos intencionalmente preparados para definirem um sistema altimétrico de medição estável. A localização desses pontos varia em função da geometria do objeto a ser monitorado e das condições que favorecem a execução das medições, tais como segurança, acessibilidade, estabilidade, dificuldade para monumentalização, vibrações, condições locais climáticas e geodinâmicas predominantes, entre outros.

- Campo de pontos-objeto – tem a finalidade de delinear o objeto, ou seja, discretizar os objetos envolvidos na investigação, que podem ser entendidos como superfícies e/ou estruturas. A localização deve fornecer a melhor correspondência possível com o contínuo em estudo de maneira que se possam interpolar os resultados de deformações identificadas espacialmente.

Em 1958, o IBGE realizou um circuito entre as duas Referências de Nível (RRNN) utilizadas nesta tese – RN9319G e RN9319M) – (ANEXOS F e G), o qual passava por outros pontos pertencentes à Rede Altimétrica, discriminados como 9319H, 9319J, 393O e 9319L. Porém, essas RRNN encontram-se destruídas ou não foram encontradas, de acordo com as monografias disponibilizadas pelo IBGE (ANEXOS G, H, I, J).

Alteração na posição altimétrica de pontos de referência se refletirá nos pontos-objeto conduzindo a conclusões errôneas sobre o comportamento real do objeto (DINGSHENG CHEN, 1994; SILVA; SEIXAS; ROMÃO, 2004).

2.5.7 Redes GNSS

Segundo Silva, Lima e Costa (2008), a implantação e manutenção de uma rede estadual GNSS é de extrema importância para o desenvolvimento de um município, estado ou país. Ela fornece uma estrutura posicional precisa, capaz de apoiar, praticamente, todas as atividades que utilizam tais informações, principalmente aquelas relacionadas com a engenharia. Além disso, visa estabelecer uma estrutura referida aos atuais padrões de precisão do SGB com a adoção do SIRGAS2000, dando suporte para que todos os trabalhos sejam referidos a esse sistema.

De acordo com Santos, Cabral e Pontes Filho (2012), nos últimos anos, tem aumentado o uso do sistema de posicionamento global para obtenção de coordenadas verticais, ou altitudes geométricas de pontos na superfície terrestre que, associadas a suas altitudes ortométricas, podem ser usadas em várias aplicações na engenharia civil, inclusive o monitoramento de subsidência do solo em diversas localidades no mundo. As redes geodésicas que têm como objetivo específico o monitoramento da subsidência do solo devem ter alta qualidade para que as medições realizadas sejam capazes de refletir a variação geométrica esperada para aquele ponto mesmo quando essas deformações forem pequenas, ou seja, na fase inicial dos deslocamentos verticais provocados pelo fenômeno. Na prática, para que isso seja possível, faz-se necessário considerar que os pontos de referência foram

preestabelecidos a partir de uma rede GNSS acurada e de uma rede confiável estabelecida a partir de um nivelamento geométrico de precisão.

Segundo Santos (1996), de modo geral, podem-se classificar redes GNSS em função de sua extensão geográfica assim: redes globais; redes regionais e redes locais.

As redes globais têm estações distribuidas ao redor do planeta; as redes regionais (ou continentais) são aquelas que se estendem por uma grande região geográfica, como um grupo de países, ou um país de extensão continental, ou um continente, enquanto as redes locais são aquelas que englobam uma região geográfica restrita (SANTOS, 1996).

Santos (1996) diz que outra maneira de se classificar uma rede GNSS é quanto ao modo de conecção com ela. Uma rede GNSS pode ser “passiva” (em que os usuários têm de ocupar as estações de modo similar à rede clássica) ou “ativa” – os usuários não precisam ocupar as estações da rede para estarem conectados a essa rede.

2.5.7.1 Redes passivas

De acordo com o IBGE (2016c), as redes GNSS estaduais procuram suprir as demandas atuais da sociedade que são cada vez mais ampliadas devido à utilização das técnicas de posicionamento por satélites artificiais. Até dezembro de 2006 foram estabelecidas 13 redes GNSS estaduais (abrangendo 17 estados): São Paulo, Paraná, Minas Gerais, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Santa Catarina, Rio de Janeiro, Rio Grande do Sul, Bahia, Ceará, Espírito Santo, Acre e a rede Nordeste. A rede Nordeste foi um caso à parte, pois foi estabelecida em uma única campanha de medição contemplando os estados de Alagoas, Sergipe, Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte. A localização de cada marco é previamente escolhida por representantes de instituições federais, estaduais e municipais de forma a zelar pela integridade física do marco, isto é, evitar abalos que possam interferir nas coordenadas dele ou até mesmo a sua destruição. A implantação de uma rede geodésica estadual vem a colaborar na elaboração dos seguintes produtos e informações:

- confecção de mapas e cartas;
- referência para obras de engenharia, tais como construção e pavimentação de rodovias e estradas, construção de pontes, viadutos e túneis;
- demarcação de unidades estaduais, unidades municipais, áreas indígenas, áreas de proteção ambiental;
- regulamentação fundiária;

- transmissão de energia;
- abastecimento d’água, etc.

A intenção, ao estabelecer essas redes passivas, é que todas as Unidades da Federação tenham uma rede altamente precisa e conectada entre si, tendo como referência a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), a principal estrutura geodésica no território nacional (IBGE, 2016c).

2.5.7.2 Redes ativas: RBMC

Também conhecida como rede geodésica ativa, a RBMC é um conjunto de estações geodésicas, equipadas com receptores GNSS de alto desempenho, que proporcionam, uma vez por dia ou em tempo real, observações para a determinação de coordenadas. A operacionalização da RBMC em 1996 implantou o conceito de redes “ativas” por meio do monitoramento (rastreio) contínuo de satélites do Sistema GNSS. A utilização da tecnologia GNSS provocou uma verdadeira revolução nas atividades de navegação e posicionamento. Os trabalhos geodésicos e topográficos passaram a ser realizados de forma mais rápida, precisa e econômica. À medida que as técnicas de posicionamento evoluem, diversas aplicações em tempo real e pós-processado têm surgido, tornando o papel da RBMC cada vez mais amplo (IBGE, 2016d).

Ainda segundo o IBGE (2016d), nas aplicações geodésicas e topográficas do GNSS está implícita a utilização do método relativo, isto é, ao menos uma estação de coordenadas conhecidas é também ocupada simultaneamente à ocupação dos pontos desejados. As estações da RBMC desempenham justamente o papel do ponto de coordenadas conhecidas pertencentes ao SGB, eliminando a necessidade de que o usuário imobilize um receptor em um ponto que, muitas vezes, oferece grandes dificuldades de acesso. Além disso, os receptores que equipam as estações da RBMC são de alto desempenho, proporcionando observações de grande qualidade e confiabilidade. A maioria dos receptores da rede tem a capacidade de rastrear satélites GPS e Global Navitation Satellite System (Glonass), enquanto alguns rastreiam apenas GPS. Esses receptores coletam e armazenam continuamente as observações do código e da fase das ondas portadoras transmitidos pelos satélites das constelações GPS ou Glonass.

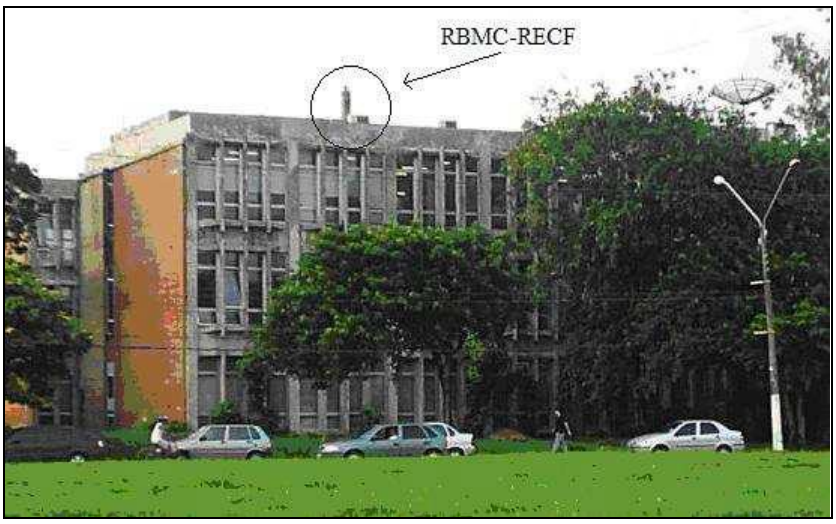
Cada estação tem um receptor e antena geodésica, conexão de Internet e fornecimento constante de energia elétrica que possibilita a operação contínua da estação. As coordenadas das estações da RBMC são componentes importantes na composição dos resultados finais dos

levantamentos a elas referenciados. Nesse aspecto, a grande vantagem da RBMC é que todas as suas estações fazem parte da Rede SIRGAS, cujas coordenadas finais têm precisão da ordem de ± 5 mm, configurando-se como uma das redes mais precisas do mundo. Outro papel importante da RBMC é que suas observações vêm contribuindo, desde 1997, para a densificação regional da rede do International GPS Service for Geodynamics (IGES), garantindo uma melhor precisão dos produtos do IGS – tais como órbitas precisas – sobre o território brasileiro (IBGE, 2016d). A Figura 17 ilustra a localizada no topo do prédio da Biblioteca Central da UFPE em Recife (Figura 18).

Figura 17 – Estação RECF da RBMC

Fonte: Cardoso et al. (2008).

Figura 18 – Prédio da Biblioteca Central do Câmpus Recife da UFPE com a Estação RECF da RBMC



Fonte: Adaptado de Cardoso et al.(2008).

2.5.8 Métodos geodésicos para determinação de altitudes

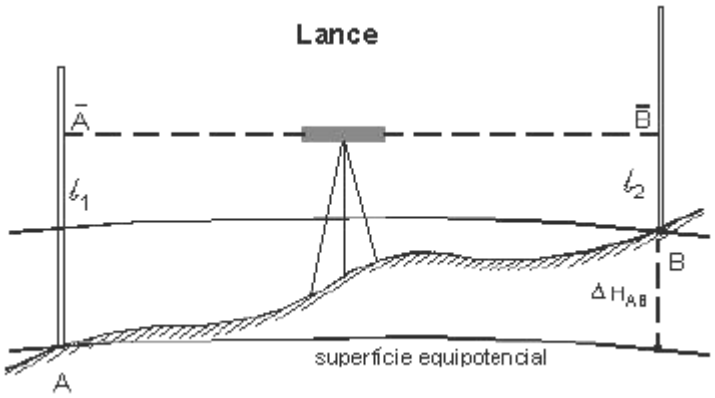
Os métodos geodésicos proporcionam a variação temporal das deformações/deslocamentos horizontais e verticais da própria rede ou de objetos externos à rede geodésica. Kahmen e Faig (1988) relatam que os métodos geodésicos podem ser usados para estudar deformações.

Serão descritas nas seções a seguir a definição e as características principais dos métodos geodésicos, para determinação de altitudes, utilizados nesta pesquisa: posicionamento por nivelamento geométrico e posicionamento GNSS pelo método relativo estático.

2.5.8.1 Método de nivelamento geométrico de alta precisão

A altimetria reproduz a verdadeira forma do terreno, e métodos de nivelamento são empregados para a determinação das diferenças de nível (JORDAN, 1944). O Nivelamento Geométrico é o método que determina a diferença de nível entre pontos do terreno por meio de visadas horizontais, em miras posicionadas na vertical sobre os pontos (Figura 19), determinadas com um nível (ABNT, 1994).

Figura 19 – Lance no nivelamento geométrico



Fonte: Blitzkow, Campos e Freitas (2004).

O nivelamento geométrico realiza a medida da diferença de nível entre pontos do terreno por intermédio de leituras correspondentes a visadas horizontais, obtidas com um nível, em miras colocadas verticalmente nos pontos de interesse. Por esse princípio, as leituras podem ser transportadas sucessivamente de um ponto para outro (nivelamento composto), ou

seja, parte-se de um ponto de altitude conhecida e determina-se o desnível até o próximo ponto, obtendo-se, assim a altitude deste (JORDAN, 1944).

O desnível (ΔH) de uma seção nivelada pode ser calculado pela diferença entre a somatória das leituras de Ré ($\Sigma l_{Ré}$) e somatória das leituras de vante ou de mudança (Σl_{MU}), Equação 11.

$$\Delta H = \sum l_{Ré} - \sum l_{MU} \quad (11)$$

A instalação do nível a igual distância das miras neutraliza ou minimiza a influência da curvatura terrestre e da refração atmosférica (ZANETTI, 2006). A utilização de níveis com placa-plano-paralelas (que aumenta a precisão das leituras) ou níveis digitais associadas a miras de ínvar e sapatas de ferro, permitem as determinações altimétricas de primeira ordem (IBGE, 1995). Quanto à classificação dos níveis, Kahmen e Faig (1988) dividem os níveis em três classes de acordo com a sua finalidade: níveis de construção, níveis de engenharia e níveis de precisão.

Deumlich (1982) propõe uma classificação baseada no desvio-padrão encontrado em 1 km de extensão duplamente nivelado.

Tabela 2 – Classificação dos níveis baseada no desvio padrão encontrado em 1 km de extensão duplamente nivelado

Classificação dos níveis	Desvio padrão
1 -Níveis de precisão baixa	> 10 mm/km
2 - Níveis de precisão média	≤ 10 mm/km
3 - Níveis de precisão alta	≤ 3 mm/km
4 - Níveis de precisão muito alta	≤ 1 mm/km
5 - Níveis de altíssima precisão	≤ 0,5 mm/km

Fonte: Deumlich (1982).

Os instrumentos do tipo 1 e 2 estão dentro da classe dos níveis de construção, projetados para medir simples elevações em canteiros de obras e em pequenas áreas. O tipo 3 são níveis de engenharia, projetados para auxiliar na construção de pontes e túneis, assim como em tarefas que exigem precisão na ordem de 2 a 3 mm/km. Os tipos 4 e 5 são níveis de precisão muito elevada, variando entre 0,3 e 1 mm/km. Eles são bastante semelhantes aos níveis de engenharia, no entanto, têm componentes mais precisos.

O Quadro 4 apresenta a classificação dos levantamentos altimétricos quanto à exatidão.

Quadro 4 – Classificação dos levantamentos altimétricos quanto à exatidão

Classificação Exatidão	Científico $2mm\sqrt{D_{km}}$	1.ª ordem $2mm\sqrt{D_{km}}$	2.ª ordem $3mm\sqrt{D_{km}}$	3.ª ordem $4mm\sqrt{D_{km}}$	Local $6mm\sqrt{D_{km}}$
Desenvolvimento	Será desenvolvida caso a caso de acordo com a finalidade de cada projeto. Basicamente em circuitos e acompanhada de medições gravimétricas (nivelamento geopotencial)	Em circuitos com até 400 km de perímetro e estações materializadas, afastadas de no máximo 3 km. Nas áreas metropolitanas, de preferência, 1 km	Em circuitos com até 200 km de perímetro e estações materializadas afastadas de no máximo 3 km. Nas áreas metropolitanas, de preferência, 1 km	Em circuitos ou linhas, em função da área a ser atendida, com estações espaçadas de, no máximo, 3 km	Em circuitos ou linhas, em função dos objetivos a serem atingidos pelos trabalhos.

Fonte: IBGE (1983).

Onde: D_{km} representa o perímetro nivelado em quilômetros.

Para grandes distâncias, a diferença de nível passa a ser afetada pelo potencial gravitacional. O eixo de colimação ou de visada do nível em cada sessão deve ser perpendicular à vertical do ponto onde o instrumento está instalado. Sendo assim, ele é paralelo à superfície equipotencial daquele ponto. Isso gera erros na medida de diferença de nível entre dois pontos separados por uma grande distância, pois as superfícies equipotenciais não são paralelas ao geoide (HOAR, 1982).

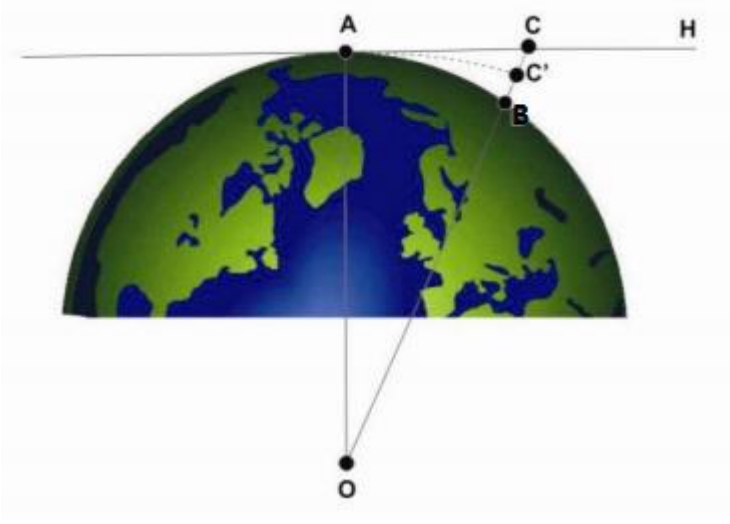
Os valores obtidos no nivelamento geométrico estão sujeitos a erros sistemáticos e aleatórios. Os sistemáticos consistem de erros provocados pela curvatura da Terra, refração atmosférica e descalibração do instrumento. Os efeitos desses erros podem ser modelados, corrigidos computacionalmente ou minimizados seguindo alguns procedimentos de campo, por exemplo, o comprimento das visadas e a equidistância entre as miras. Os erros aleatórios ocorrem no nivelamento do nível, nivelamento da mira, leitura da graduação da mira e acuidade visual do operador (ESPARTEL, 1987; JORDAN, 1944; KAHMEN; FAIG, 1988; WOLF; GHILANI, 1997).

2.5.8.1.1 Efeitos da curvatura da Terra e refração atmosférica

De acordo com Jelinek (2009), querendo-se determinar a diferença de nível entre os pontos A e B (Figura 20), coloca-se em B uma mira em posição vertical e em A um instrumento devidamente nivelado, gerando a horizontal AH, correspondente a superfície de nível aparente, que irá interceptar a mira em um ponto C, e não em B, pois o arco AB não pode ser determinado pelos aparelhos de topografia. É evidente que a substituição do nível verdadeiro pelo nível aparente provoca um erro na determinação da altura de um ponto do terreno, o qual é denominado erro devido à curvatura da Terra. O erro cometido, ao se admitir que os pontos A e C estão em nível (nível aparente), é o erro ε_C = BC, denominado erro devido à curvatura da terra. Este erro pode ser calculado, desde que seja medida a extensão do alinhamento AC = D, uma vez que o raio da terra é conhecido.

O erro altimétrico devido à curvatura da Terra (ε_C), como visto na Figura 20, é estabelecido em relação a um plano tangente que passa pelo centro de referência do nível e a superfície esférica modelo da Terra, conforme se pronuncia o afastamento (AB) entre mira e nível.

Figura 20 – Erro altimétrico devido à curvatura da Terra e refração atmosférica



Fonte: Jelinek (2009).

A expressão para se obter (ε_C = BC) é dada pela Equação 12 (ABNT, 1994):

$$\varepsilon_C = \frac{l^2}{2R} \cong 78{,}5 l_{km}^2 \qquad (12)$$

Na prática das operações altimétricas, o erro, devido à curvatura da Terra (ε_C), apresenta-se diminuído em razão do efeito da refração atmosférica sobre o raio visual. Quando se faz uma visada de um ponto para outro, o raio visual ao atravessar as camadas atmosféricas de densidades diferentes se refrata, seguindo uma trajetória curva, situada sobre o plano vertical visual, cuja concavidade é dirigida sobre a superfície do solo. Como consequência, o ponto C, quando visado de A é visto em C', originando o erro de refração: r_{mm} = CC'. A superfície AC' é dita superfície de nível ótico. Esse erro é dependente da temperatura e do estado higrométrico do ar, além de outras circunstâncias locais (JELINEK, 2009).

A refração atmosférica pressupõe que a luz no seu trajeto da mira, até o nível, faz uma curva obedecendo aproximadamente a uma circunferência. Essa curva pode ser modelada com a determinação do coeficiente de refração (k) e com o conhecimento da distância entre nível e mira (l). A Equação 13 que permite calcular o erro (r_{mm}), devido à refração, foi dada por Espartel (1987).

$$r_{mm} = \frac{k}{R}\, l^2 \cong 10{,}202\, l_{km}^2 \qquad (13)$$

Sendo: k o coeficiente de refração;

R um raio médio para a Terra;

l a distância mira-nível.

Considerando, além do raio médio R = 6371000m, um coeficiente de refração médio para o Brasil, k = 0,75 ou 2k = 0,14 (GEMAEL, 1988) e levando-se tais valores nas Equações 12 e 13, tem-se o efeito conjunto (ε) dos erros de refração e curvatura dados pela Equação 14 (ABNT, 1994):

$$\varepsilon \cong 67\, l_{km}^2 \qquad (14)$$

O valor determinado pela Equação 9 é importante para saber quanto o afastamento entre mira e nível afetam o erro conjunto da curvatura da Terra e refração atmosférica e assim decidir se são negligenciáveis ou não.

O controle do erro de fechamento ou é realizado por meio de um circuito fechado, ou por meio de um duplo nivelamento. Quando a volta é no sentido contrário ao que foi o nivelamento, é chamado de contranivelamento.

2.5.8.1.2 Cálculo da precisão do nivelamento

Ao realizar um nivelamento geométrico ao longo de um circuito fechado, a soma dos desníveis deveria ser teoricamente nula. Os erros de medição proporcionam erros de fechamento, que servem como indicador preliminar da precisão das medidas e devem ser distribuídos no ajustamento (GAMA; SILVA; SEIXAS, 2016; GEMAEL, 1994).

A qualidade das operações de campo na determinação do apoio topográfico altimétrico é constatada por meio do controle das diferenças de nível entre o nivelamento e o contranivelamento geométricos, seção a seção e acumulados na linha ou circuito (ABNT, 1994).

Essa qualidade deverá ser controlada observando-se os valores limites ou toleráveis por meio da Equação 15, para os levantamentos de alta precisão (IBGE, 1983).

$$T = \alpha\sqrt{D} = 3\ mm\sqrt{D} \quad (15)$$

Onde:
T é a tolerância;
α = 3 mm é o valor limite para levantamentos de alta precisão;
D é o comprimento da seção ou linha nivelada em km.

Para valores de fechamento maiores que essa tolerância, recomenda-se realizar um novo levantamento (SEIXAS et al., 2014).

A precisão do nivelamento é baseada no erro de fechamento entre o nivelamento e o contranivelamento, ou a diferença da cota de saída para a cota de chegada em circuitos fechados, ou ainda a diferença para zero se for usada a Equação 11 em circuitos fechados. Chamando ΔH o desnível entre dois pontos A e B afastados de uma distância D, e chamando ΔH' o desnível entre os mesmos dois pontos A e B afastados de uma distância D' por um percurso similar no contranivelamento, o erro de fechamento (ε_f) fica assim estabelecido (SILVA, D. J., 2014), Equação 16:

$$\varepsilon_f = \Delta H + \Delta H' \quad (16)$$

De acordo com Moreira (2003), a precisão no nivelamento geométrico é obtida aplicando a lei de propagação de erro na Equação 17.

$$\Delta H = l_{Ré} - l_{MU} \quad (17)$$

Assumindo iguais as distâncias de visadas à ré e vante e o erro médio de leitura na mira, tem-se, conforme Veronez (1998), que o erro do desnível do ponto A ao ponto B é dado pela Equação 18.

$$\sigma_{\Delta H = \pm}\ \sigma\sqrt{\frac{D}{d}} \quad (18)$$

Onde:
$\sigma_{\Delta H}$ é o erro do desnível do ponto A ao ponto B (mm);
σ é o erro aleatório de leitura na mira (mm);
D é o comprimento total da linha ou seção nivelada (km);
d é a distância de visada (km).

Para medidas duplas, como o nivelamento e o contranivelamento, o erro médio associado ao resultado é a média do erro de fechamento, e pode-se substituir $\sigma_{\Delta H}$ por esse valor médio, resultando na Equação 19 (SILVA, D. J., 2014):

$$\frac{\varepsilon_f}{2} = \sigma\sqrt{\frac{D}{d}} \quad (19)$$

A precisão σ para nivelamento é dada em quilômetros, assim, fazendo na Equação 19 o valor de d = 1 km, o valor de σ pode ser obtido em função do erro de fechamento e da média do percurso do nivelamento e contranivelamento (P), mediante a Equação 20 (SILVA, D. J., 2014):

$$\sigma = \frac{\varepsilon_f\,(mm)}{2\sqrt{P}\,(km)} \quad (20)$$

2.5.8.1.3 Ajustamento de nivelamento e contranivelamento

De acordo com a ABNT (1994, p. 22):

> O ajustamento de uma seção, linha ou circuito nivelados e contranivelados geometricamente é realizado pela distribuição do erro de fechamento [ε_f] pelas várias diferenças de nível obtidas pela média aritmética dos valores observados pelo nivelamento e contranivelamento, proporcionalmente às distâncias entre os lances nivelados ou às próprias diferenças de nível, conforme a inclinação do terreno.

Também como recomendação da ABNT (1994), no ajustamento de redes de nivelamento geométrico, onde os circuitos ou linhas se cruzam formando nós, recomenda-se que os valores mais prováveis das altitudes dos nós sejam considerados como as médias ponderadas dos valores calculados por meio das linhas ou circuitos que neles convergem, em que os pesos sejam arbitrados, a sentimento, tendo atenção ao comprimento dessas linhas ou circuitos. Nas figuras mais complexas é recomendável (ABNT, 1994) o emprego do método dos mínimos quadrados (MMQ).

De acordo com Gemael (1994), no ajustamento das observações pelo MMQ, os erros grosseiros e sistemáticos devem ser eliminados das observações antes da realização do ajustamento. Entretanto, para verificar se os referidos erros foram eliminados, é necessária a verificação da qualidade dos valores ajustados, utilizando-se procedimentos estatísticos

2.5.8.2 Posicionamento GNSS

Um dos grandes avanços nas técnicas de posicionamento é o sistema de posicionamento por satélites denominado Navigation Satellite with Time and Ranging – Global Positioning System (NAVSTAR-GPS). Nesse sistema, as coordenadas dos pontos são obtidas por rastreio e processamento dos sinais enviados pela constelação de satélites que orbitam ao redor da Terra. O princípio básico de navegação consiste na medida de distâncias entre o usuário e os satélites. Conhecendo as coordenadas dos satélites em um sistema de referência apropriado, é possível calcular as coordenadas da antena do usuário no mesmo Sistema de Referência dos satélites (MONICO, 2000a).

Porém, 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 pseudodistância (SEEBER, 2003). Marques (2013)

comenta que a medida da pseudodistância é obtida a partir da correlação entre o código gerado pelo satélite no instante de transmissão e sua réplica gerada no receptor no instante de recepção. O sistema de tempo dos satélites é obtido com base em relógios atômicos de alta precisão e é utilizado como referência para todos os sinais gerados e transmitidos. No caso dos receptores, estes dispõem de relógios de menor qualidade, os quais operam no sistema de tempo do receptor. As equações que relacionam esses dois sistemas de tempo com o sistema de tempo GNSS estão apresentadas em Monico (2008). A equação da pseudodistância é igual à diferença entre o tempo de recepção do receptor e o tempo de transmissão (satélite) multiplicada pela velocidade da luz no vácuo (MONICO, 2008; SEEBER, 2003).

Uma observável muito mais precisa que a pseudodistância é a fase da onda portadora. Também conhecida como fase de batimento da onda portadora, e é obtida pela diferença entre a fase gerada pelo satélite, no instante de transmissão do sinal e sua réplica, gerada pelo receptor, no instante de recepção do sinal. Apenas uma medida fracionária é obtida, restando um número inteiro de ciclos desconhecido, denominado ambiguidade da fase (MARQUES, 2013).

Santos, Cabral e Pontes Filho (2012) relatam que, ao longo de décadas, diversos estudos já foram realizados e a tecnologia GNSS já está sendo utilizada para o monitoramento da subsidência em várias localidades em todo o mundo. O Quadro 5 exemplifica alguns desses casos.

Quadro 5 – Exemplos de alguns casos de subsidências no mundo detectadas com a tecnologia GNSS

Localidade	Subsidência (GNSS)	Pesquisadores
Vale Coachella na Califórnia	34 mm a 60 mm (após 2 anos)	Sneed, Stork e Ikehara (2002)
Jacarta na Indonésia	>20 cm (1997 - 1999)	Abidin et al. (2001)
Yunlin Country, Taywan	>10 cm/ano	Chia-Chyang Chang (2000)
Ojiya, Japão	7 cm (1996 – 1998)	Sato, Abe e Ooraki (2003)

Fonte: Luna et al. (2012); Santos, Cabral e Pontes Filho (2012).

Alguns desses autores, como Chia-Chyang Chang (2000) e também Sato, Abe e Ooraki (2003), afirmam que a técnica de posicionamento GNSS quando utilizada por períodos

de tempo mais longos, mostra-se como um instrumento eficiente no monitoramento contínuo da subsidência.

2.5.8.2.1 Método de posicionamento relativo estático

Posicionamento diz respeito à determinação da posição de objetos com relação a um referencial específico. O posicionamento pode então ser classificado em posicionamento absoluto, quando as coordenadas estão associadas diretamente ao geocentro e relativo, no caso em que as coordenadas são determinadas com relação a um referencial materializado por um ou mais vértices com coordenadas conhecidas (MONICO, 2008).

De acordo com Monico (2008), o objeto a ser posicionado pode estar em repouso ou em movimento, o que gera um complemento à classificação com respeito ao referencial adotado. No primeiro caso, trata-se do posicionamento estático, enquanto o segundo diz respeito ao posicionamento cinemático.

Nos experimentos GNSS realizados nesta tese, empregou-se apenas o método de posicionamento relativo estático

Monico (2008) afirma que, para realizar o posicionamento relativo, o usuário deve dispor de dois ou mais receptores. No entanto, com o advento dos Sistemas de Controle Ativos (SCA), em que receptores rastreiam continuamente os satélites visíveis e os dados podem ser acessados via sistema de comunicação, essa realidade mudou. Dispondo de apenas um receptor, o usuário poderá efetuar o posicionamento relativo. Deverá, para tanto, acessar os dados de uma ou mais estações pertencentes ao SCA. No caso do Brasil, tem-se a RBMC, citada na seção 2.5.7.2.

No contexto de posicionamento relativo, utilizam-se, em geral, as duplas diferenças de fase (DD) como observáveis fundamentais. O conceito fundamental do posicionamento relativo é que os dois ou mais receptores envolvidos rastreiem, simultaneamente, pelo menos dois satélites comuns. Quando se realizam diferenças entre observáveis coletadas simultaneamente, objetiva-se, sobretudo, reduzir alguns tipos de erro. Deve-se então escolher a simultaneidade entre dois instantes: o de recepção ou o de transmissão do sinal. Sinais que são recebidos no mesmo instante são transmitidos em instantes diferentes e sinais que são transmitidos no mesmo instante são recebidos em instantes diferentes. Isso só não ocorreria se as distâncias entre receptores e satélites fossem iguais, possibilidade extremamente pequena (MONICO, 2008).

A observável normalmente adotada no posicionamento relativo estático é a DD da fase de batimento da onda portadora, muito embora possa também se utilizar a DD da pseudodistância, ou ambas. Os casos em que têm as duas observáveis proporcionam melhores resultados em termos de acurácia. Nesse tipo de posicionamento, dois ou mais receptores rastreiam, simultaneamente, os satélites visíveis por um período de tempo que pode variar de vinte minutos (método relativo estático rápido), no mínimo, até algumas horas. No posicionamento relativo estático, o período de ocupação é relativamente longo e apenas as DD da fase da onda portadora são em geral incluídas como observáveis. Como a precisão da fase da onda portadora é muito superior à pseudodistância, a participação desta não melhora os resultados de forma significativa. Mesmo assim, as pseudodistâncias devem estar disponíveis, pois elas são empregadas no pré-processamento para estimar o erro do relógio do receptor, ou calcular o instante aproximado de transmissão do sinal pelo satélite. Trata-se de método muito adotado em posicionamento geodésico, em particular, em *softwares* comerciais (MONICO, 2008). A pseudodistância tem incerteza de ordem decimétrica, e a fase da onda portadora tem incerteza de ordem milimétrica. Para que o posicionamento usufrua essa alta qualidade da medida de fase da portadora, é necessário obter solução fixa da ambiguidade da fase da onda portadora, que se trata de um número inteiro de ciclos contados a partir do satélite (transmissor) até o receptor no momento da primeira coleta realizada no receptor (MARQUES; PACHECO; TANAJURA, 2016).

Monico (2008) afirma que, depois de certo período de coleta de dados, a precisão, tanto das coordenadas quanto das ambiguidades, se estabiliza. A partir daí, as observações adicionais proporcionam maior confiabilidade na solução. Levantamentos estáticos requerem períodos de observação que dependem do comprimento da linha de base, do número de satélites visíveis, da configuração geométrica e do método utilizado. A acurácia está correlacionada com o comprimento da linha de base com um valor cerca de 1 a 0,1 ppm, ou melhor que isso. Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger e Colins (1997 apud Cardoso, 2005, p. 50) propõem um tempo de observação padrão para se conseguir a resolução das ambiguidades e atingir alta acurácia no posicionamento relativo estático em linhas de base medindo até 20 km. Esses intervalos são de 30 minutos mais 3 minutos/km, para receptores de uma frequência (L1) e 20 minutos, mais 2 minutos/km, para receptores de duas frequências (L1 e L2). Esses valores consideram a visibilidade de quatro satélites, boa geometria e condições normais da atmosfera.

Seeber (1993 apud Cardoso, 2005) adverte que, para linhas de base longas e em condições ambientais adversas (distúrbios troposféricos, multicaminho, etc.), várias horas de

observação são necessárias para obter uma precisa solução da ambiguidade. No caso especial das aplicações em monitoramento de deformações, o tempo de observação deve variar de, no mínimo, 24 horas a vários dias para sobrepor problemas orbitais, metereológicos, multicaminho e outros efeitos variáveis com o tempo.

2.5.8.2.2 Método PPP

O posicionamento absoluto ou posicionamento por ponto simples é o método de posicionamento GNSS em que se obtêm as coordenadas de um ponto utilizando apenas um receptor. Nesse método a posição é determinada de forma instantânea mediante observações da pseudodistância, derivada do codigo C/A presente na portadora L1, das posições dos satélites e do sistema de tempo contidos nas efemérides transmitidas (ALVES et al., 2010).

Quando as observações são pós-processadas, é possível utilizar as efemérides precisas e correções para os relógios dos satélites. Essas informações podem ser usadas tanto no processamento de observações de pseudodistância, como de fase da onda portadora ou, em ambos os casos, as observáveis podendo ser coletadas por receptores de simples (L1) ou dupla frequência (L1 & L2). Esse procedimento é o posicionamento por ponto preciso (PPP) e pode ser aplicado em uma grande variedade de atividades geodésicas (MONICO, 2008).

Segundo Marques (2012), o PPP é uma técnica de posicionamento que fornece as coordenadas de um ponto com alta acurácia: acurácia centimétrica no modo estático e cinemático. No modo estático, pode atingir a ordem de poucos centímetros (de acordo com o tempo e condições de rastreio). Para obter tal acurácia, são necessários receptores de dupla frequência, e a modelagem ou minimização dos efeitos/erros que interferem no sinal GNSS. Tais efeitos/erros ocorrem ao longo da propagação dos sinais dos satélites até o receptor.

O PPP elimina a necessidade de aquisição simultânea de dados de rastreamento a partir de uma estação de referência (base) e os problemas dependentes das distâncias que envolvem as linhas de base (ALVES et al., 2010).

De acordo com Seeber (2003 apud ALVES et al., 2010), o PPP requer fundamentalmente o uso de efemérides (órbitas precisas) e correções dos relógios dos satélites, ambos com alta precisão, estimados com base em observações de uma rede global de confiança e alta qualidade, por exemplo, a rede do International GNSS Service (IGS) – Serviço GNSS Internacional. Essas informações são tomadas para resolver parâmetros em qualquer local do mundo sem a necessidade de formar dados diferenciados a partir de estações de referência. Trata-se de parâmetros globais.

Conforme Monico (2000b), para dados decorrentes de receptores de dupla frequência, as duas observáveis de fase de batimento da onda portadora podem ser combinadas linearmente, reduzindo, sobremaneira, os efeitos de primeira ordem da refração ionosférica. Procedimento similar pode ser realizado com as pseudodistâncias.

Marques (2012) esclarece que o IGS produz três tipos de efemérides e correções para os relógios:

- IGS final, efemérides precisas, disponibilizadas de 12 a 18 dias após a coleta de dados pelos vários centros do IGS distribuídos pelo globo terrestre, são apresentadas em um formato padrão em American Standard Code for Information Interchange (ASCII), chamado Standard Product #3) (SP3). As órbitas são referenciadas a um dos ITRF, atualmente o ITRF2014 e ao sistema Global Positioning System (GPS). Apresentam dados em um intervalo de tempo de 24 horas, começando à zero hora e terminando às 23h45 do dia do arquivo.
- IGR, efeméride rápidas, que estão disponíveis aproximadamente de desessete a quarenta e uma horas após a coleta dos dados.
- IGU, efemérides ultrarrápidas, passaram a ser produzidas pelo IGS no ano 2000, estão disponíveis quatro vezes por dia, podendo essa ser predita, ou a observada com latência de três horas.

O ITRF é o referencial adotado nas efemérides precisas, realizado pelo IGS na época para a qual as órbitas foram calculadas. Seguindo o procedimento já utilizado para a realização do ITRF2005 e ITRF2008, o ITRF2014 usa como dados de entrada séries temporais de posições das estações e dos parâmetros de orientação da Terra, Earth Orientation Parameters (EOP), na época 2010.0, fornecidos pelos centros de análise por meio da utilização de quatro técnicas geodésicas espaciais: VLBI, SLR, GNSS e DORIS. Com base em soluções completamente reprocessadas dessas quatro técnicas, espera-se que o ITRF2014 seja uma solução melhorada em relação ao ITRF2008.

Como as órbitas IGS são disponibilizadas diariamente, a época das coordenadas ITRF calculadas pelo PPP são referidas à data dos dados coletados, ou seja, à data do levantamento GNSS. A época associada ao referencial realizado é de grande importância, havendo também necessidade de conhecer o campo de velocidade para atualização temporal das coordenadas (ALVES et al., 2010).

Segundo Perez, Monico e Chaves (2003), as coordenadas geodésicas dos pontos sobre a superfície terrestre mudam com o tempo devido ao movimento da placa litosférica e assim

se tornam dependentes da época em que foram obtidas. Se esses elementos são conhecidos, é possível determinar a variação da posição do ponto como uma função do tempo.

O desenvolvimento do Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) tornou-se possível com a disponibilização e facilidade de acesso às órbitas e às correções dos relógios dos satélites (ALVES et al., 2010).

2.5.8.2.3 Serviços PPP *on-line*

A evolução da tecnologia GNSS fez com que a quantidade de dados para processamento aumentasse, possibilitando o aparecimento de serviços específicos de processamento de dados. Com o intuito de facilitar o processamento dos dados, algumas agências e instituições passaram a oferecer gratuitamente serviços de processamento *on-line*, via internet. A disponibilização via internet dos serviços de processamento do PPP faz com que esse método, que pode fornecer soluções para os mais diversos problemas geodésicos, chegue ao alcance da comunidade em geral. Os usuários do PPP *on-line* têm a possibilidade de realizar o processamento de dados GNSS, a partir de uma única estação, obtendo posições com acurácia na ordem de poucos centímetros e com grande facilidade de acesso ao serviço (ABREU; FONSECA JUNIOR, 2005).

De acordo com Alves et al. (2010), nesse tipo de serviço, um arquivo de dados no formato Receiver Independent Exchange Format (Rinex) ou Hatanaka, compressão específica para arquivos em formato Rinex, é enviado por meio da página na internet do serviço oferecido. Quando o processamento é completado, os resultados são enviados para o usuário pelo endereço eletrônico informado ou para baixar da própria página. Dependendo do serviço utilizado, é necessário que o usuário forneça informações, como tipo e altura da antena, se o posicionamento é estático ou cinemático; isso se elas não estiverem contidas no cabeçalho do arquivo de dados. Aplicação das correções de variação do centro de fase da antena só ocorrerá se o tipo da antena for informado e se ela estiver identificada dentre as que têm arquivos de calibração atualizados pelo IGS.

Apresenta-se a seguir uma breve descrição dos serviços disponíveis que foram utilizados nesta tese:

a) Online GPS Processing Service (AUSPOS) – Geoscience Australia, serviço *on-line* gratuito disponibilizado pelo governo australiano que utiliza o software científico Berneese GNSS versão 5.2 para processamento dos dados GPS. Almeida e Poz (2016) salientam que, em seus experimentos, o serviço AUSPOS mostrou-se

eficiente independentemente dos comprimentos das linhas de base envolvidas no processamento, contudo, o serviço, apesar de gratuito e fácil de ser utilizado, apresenta desvantagens, tais como necessidade de acesso à internet, não permite alterações nas estratégias de processamento, processa somente dados GPS e de dupla frequência, processa somente dados com, no mínimo, uma hora de rastreio.

b) Online Positioning User Service (OPUS), serviço *on-line* gratuito disponibilizado pelo serviço geodésico nacional dos Estados Unidos para processamento de dados GNSS, processa apenas dados GPS e de dupla frequência e também não permite alterações nas estratégias de processamento.

c) O IBGE-PPP (Posicionamento por Ponto Preciso ou Posicionamento Absoluto Preciso) é um serviço *on-line* gratuito para o pós-processamento de dados GNSS, que faz uso do programa Canadian Spatial Reference System – Precise Point Positioning (CSRS–PPP) (GPS Precise Point Positioning) desenvolvido pelo Geodetic Survey Division of Natural Resources of Canada (NRCan). Ele permite aos usuários com receptores Global Positioning System (GPS) e/ou Global Navigation Satellite System (Glonass), obterem coordenadas de precisão no SIRGAS2000 e no ITRF. No posicionamento com GNSS, o termo Posicionamento por Ponto Preciso normalmente refere-se à obtenção da posição de um ponto utilizando as observáveis da fase da onda portadora, coletadas por receptores de duas frequências e em conjunto com os produtos precisos (órbitas e erro dos relógios dos satélites), por exemplo, aqueles disponíveis no IGS ou NRCan. É possível realizar processamento de dados GNSS (GPS e Glonass) que foram coletados por receptores de uma ou duas frequências no modo estático ou cinemático. Apenas são aceitos dados GPS que foram rastreados a partir do dia 25 de fevereiro de 2005, pois foi quando o SIRGAS2000 foi adotado oficialmente no Brasil. Além disso, o processamento GNSS só será realizado para observações coletadas após o dia 14 de agosto de 2011. Além do arquivo de observação GNSS nos formatos Rinex ou Hatanaka informado pelo usuário quando submete ao processamento, o serviço IBGE-PPP utiliza outros arquivos necessários para gerar os resultados, tais como órbitas e relógios (satélite), correção do centro de fase das antenas dos satélites e dos receptores, parâmetros de transformação ITRF/SIRGAS2000, modelo de carga oceânica, modelo de velocidades, modelo de pressão, temperatura e umidade, Modelo de Ondulação Geoidal 2015 (MAPGEO2015), entre outros (IBGE, 2017b).

Além desses serviços *on-line*, utilizou-se nesta tese o *software* comercial Topcon Tools versão 8.2 para o processamento e ajustamento dos marcos das experimentações a ser descritas nas seções 4.2.1, 4.2.2 e 4.2.3.

2.5.8.2.4 Erros sistemáticos envolvidos nas observáveis GNSS

De acordo com Monico (2008), as observáveis GNSS, como todas as outras observáveis envolvidas nos processos de medidas, estão sujeitas a erros aleatórios, sistemáticos e grosseiros. Para obter resultados confiáveis, o modelo matemático (funcional e estocástico) estabelecido deve ser válido para a realidade física que se tenta descrever e capaz de detectar problemas. Dessa forma, as fontes de erro envolvidas nos processos de medidas devem ser bem conhecidas. O autor adverte que erros sistemáticos podem ser parametrizados, modelados como termos adicionais, reduzidos ou mesmo eliminados por técnicas apropriadas de observação, enquanto os erros aleatórios, por sua vez, não apresentam nenhuma relação funcional com as medidas e são, em geral, as discrepâncias remanescentes nas observações, depois que todos os erros grosseiros e sistemáticos foram eliminados ou minimizados, os quais são inevitáveis, sendo, portanto, considerados uma propriedade inerente da observação.

Segundo Marques (2012), em geral, a acurácia do GNSS depende da qualidade das medidas de pseudodistância e fase. As fontes de erros ou efeitos podem estar relacionadas com os satélites e receptores, com a propagação do sinal na atmosfera ou relacionadas com efeitos geofísicos na estação terrestre.

Nas próximas seções, serão descritos os efeitos relacionados com a propagação do sinal, pois representam os mais expressivos no tocante aos experimentos descritos nesta tese.

2.5.8.2.5 Erros relacionados com a propagação do sinal

Os sinais provenientes dos satélites propagam-se pela atmosfera dinâmica, atravessando camadas de diferentes naturezas e estados variáveis. Assim sendo, sofrem diferentes tipos de influência que provocam variações na direção da propagação, na velocidade de propagação, na polarização e na potência do sinal (SEEBER, 2003).

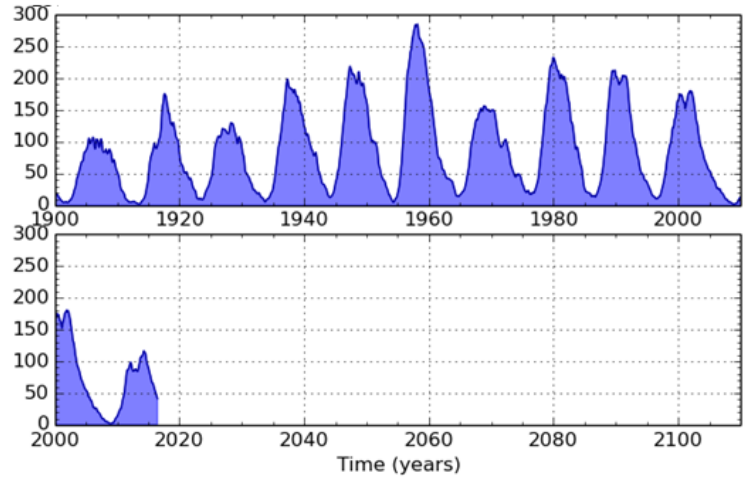
De acordo com Monico (2008), o meio em que ocorre a propagação consiste, essencialmente, da ionosfera e da troposfera, cada uma com características bem distintas, refração ionosférica, refração troposférica e ede multicaminho ou sinais refletidos.

Refração Ionosférica – a ionosfera é um meio dispersivo, ou seja, a refração depende da frequência. Isso significa que a fase da portadora e a modulação sobre ela sofre um retardo. A ionosfera abrange aproximadamente a região que vai de 50 até 1.000 km acima da superfície terrestre (MONICO, 2008). Nessa região os raios ultravioleta ionizam uma porção de moléculas de gases e liberam elétrons livres, que afetam o sinal das ondas de rádio e, consequentemente, o sinal dos satélites GNSS. A transição de um gás para um gás ionizado (plasma) ocorre gradualmente. Durante o processo, um gás molecular dissocia primeiro um gás atômico que ioniza com o aumento da temperatura. O plasma resultante consiste de uma mistura de partículas neutras, íons positivos (átomos e moléculas que têm perda de um ou mais elétrons) e elétrons negativos (KAPLAN, 1996; MARQUES, 2012).

As variações temporais da ionosfera compreendem as variações diurnas, sazonais e ciclos de longos períodos e influenciam diretamente na mudança da densidade de elétrons na ionosfera. As variações diurnas são provocadas por mudanças que ocorrem em certas regiões da ionosfera, que desaparecem à noite devido à recombinação e junção dos elétrons e íons. A principal razão da existência da variação diurna é a iluminação do sol, ou seja, a radiação solar. A variação sazonal ocorre durante os meses do ano em uma determinada região devido à variação sazonal do ângulo zenital do sol e também devido às mudanças intrínsecas da camada ionosférica. Valores máximos da densidade de elétrons ocorrem, aproximadamente, nos meses de março, abril, setembro e outubro (equinócio) e valores mínimos nos meses de solistícios de inverno e verão. As variações de ciclos de longos períodos na densidade de elétrons, com ciclos de aproximadamente onze anos, são associadas às ocorrências de manchas solares (*sunspot*) (MARQUES, 2012).

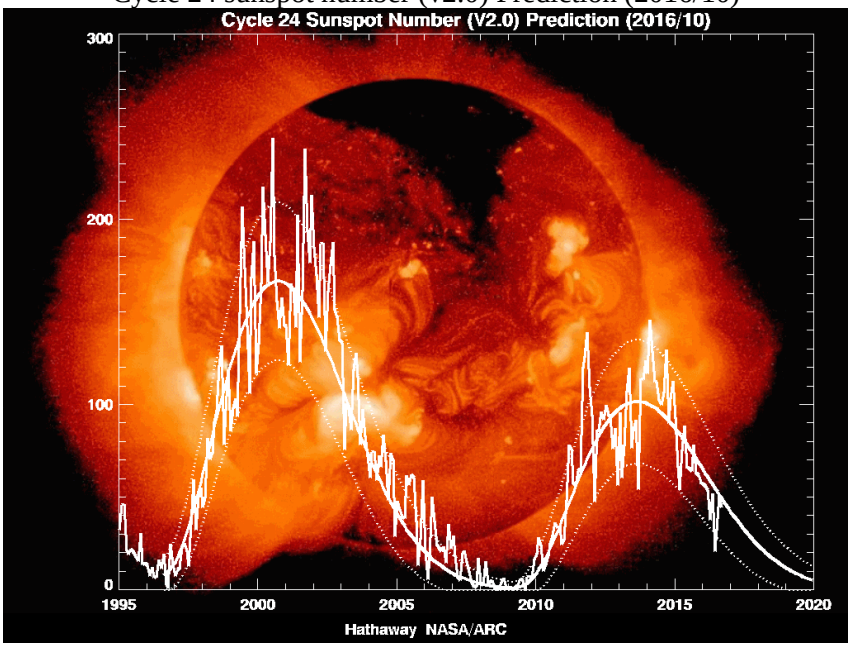
De acordo com Marques (2012), o aumento do número de manchas solares aumenta a radiação solar e ocasiona uma mudança na densidade de elétrons na ionosfera. A Figura 21 mostra o histórico dos ciclos solares (número de manchas) desde 1900 até 2017 e a Figura 22 mostra a predição realizada pela National Aeronautics and Space Administration (NASA) até 2020.

Figura 21 – Histórico do número de manchas solares (ciclos solares)



Fonte: SIDC (2017).

Figura 22 – Predição do número de manchas (ciclo solar 24)
Cycle 24 sunspot number (v2.0) Prediction (2016/10)



Fonte: Hathaway (2015, p. 10).

Segundo Marques (2012), o último registro de pico do número de manchas solares foi para o ciclo 23 e ocorreu em meados de 2000, porém o autor afirma que o pico máximo possivelmente ocorreu em meados de 2013 para o ciclo 24.

Em termos de posicionamento geodésico, Marques (2012) afirma que o parâmetro da ionosfera que produz a maioria dos efeitos nos sinais GNSS é o número total de elétrons na ionosfera denominado Total Electron Content (TEC).

O atraso de propagação na ionosfera depende, principalmente, do TEC ao longo do caminho percorrido pelo sinal e da frequência utilizada. Os principais parâmetros que causam influência são: a atividade solar e o campo geomagnético, uma vez que a refração ionosférica varia com a frequência, a localização geográfica e o tempo (SEEBER, 2003). O efeito ionósférico no sinal GNSS pode alcançar de poucos metros a mais de dez metros na direção zenital. Como a ionosfera é um meio dispersivo, o sinal apresenta diferentes atrasos para diferentes frequências, logo, receptores de dupla frequência levam vantagens no sentido que é possível realizar a combinação *ion-free* para minimizar ou eliminar os efeitos de primeira ordem na ionosfera.

Refração troposférica – a troposfera estende-se da superfície terrestre até aproximadamente 50 km e comporta-se, para frequências abaixo de 30 GHz, como um meio não dispersivo, isto é, a refração é independente da frequência do transmitido, dependendo apenas das propriedades termodidâmicas do ar (MONICO, 2008). A troposfera é a camada localizada entre a ionosfera e a superfície da Terra. O gradiente de concentração dos gases presentes nessa camada é um dos fatores que influenciam a qualidade obtida no posicionamento geodésico utilizando satélites artificiais. Essa influência gera um atraso no sinal, que, ao ser projetado na direção zenital, é denominado Atraso Zenital Troposférico – Zenital Tropospheric Delay (ZTD), conforme Sapucci (2001).

O atraso provocado nos sinais GNSS é gerado pela atmosfera hidrostática e úmida. O atraso devido à componente hidrostática varia em razão da temperatura, latitude e pressão atmosférica e pode ser estimado ou predito com razoável precisão, pois sua variação é pequena, sendo da ordem de 1% durante várias horas. O atraso devido à atmosfera úmida é gerado pela influência do vapor d'água atmosférico total e sua variação é muito maior, atingindo cerca de 20% em poucas horas, o que torna muito difícil sua predição com boa precisão, até mesmo quando se têm medidas de umidade superficiais disponíveis (SEEBER, 2003).

Segundo Monico (2008), o atraso troposférico (T_r^s) é causado pela variação do índice de refração dos gases atmosféricos em relação ao ar livre, e essa variação provoca uma leve curvatura na trajetória S do sinal em relação à trajetória geométrica S_g entre o satélite e o receptor GNSS, cujo modelo que estima o atraso troposférico (T_r^s), entre a antena de um receptor “r” e um satélite “s”, é expresso pela Equação 21:

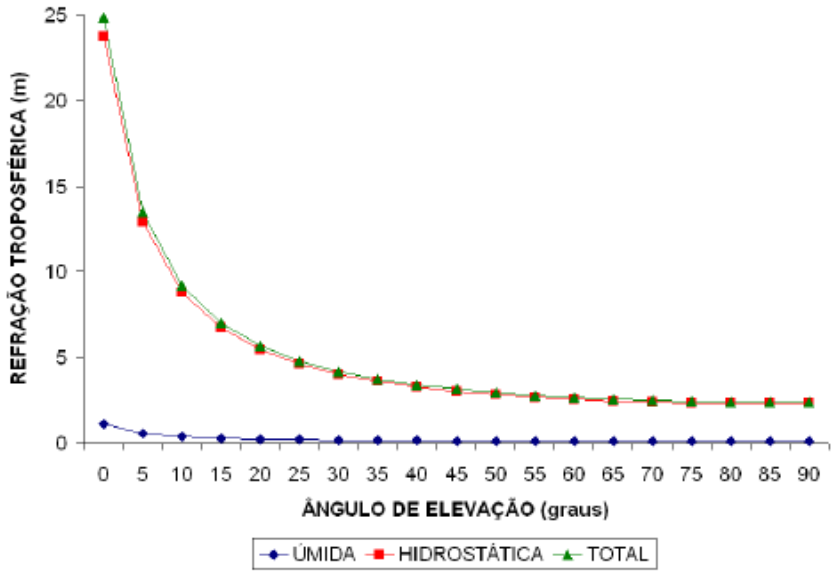
$$T_r^s = S - S_g = 10^{-6} \int N_T \, ds \qquad (21)$$

Onde: N_T é a refratividade da troposfera e, de acordo com Monico (2008), integral ao longo do caminho do sinal do satélite até o receptor que é solucionada quando se conhece o valor de N_T. A expressão empírica mais utilizada para a refratividade de gases não ideais incluindo o vapor d'água foi desenvolvida por Thayer (1974 apud SPILKER JR, 1996).

Monico (2008) explica que o atraso troposférico pode ser aproximado com a soma dos efeitos das componentes hidrostática e úmida, em que cada uma das componentes é expressa como o produto do atraso zenital (vertical) por uma função de mapeamento, a qual relaciona o atraso vertical com o atraso para ângulos de elevação (E) do satélite.

De acordo com Marques (2012), a Figura 23 apresenta as componentes do atraso troposférico calculadas pelo modelo de Hopfield e sua variação em função do ângulo de elevação. O autor observa que, para ângulos de elevação baixos, o efeito da troposfera calculado pelo modelo de Hopfield pode alcançar valores acima de 20 metros.

Figura 23 – Componentes do atraso troposférico calculadas pelo modelo de Hopfield



Fonte: Marques (2012).

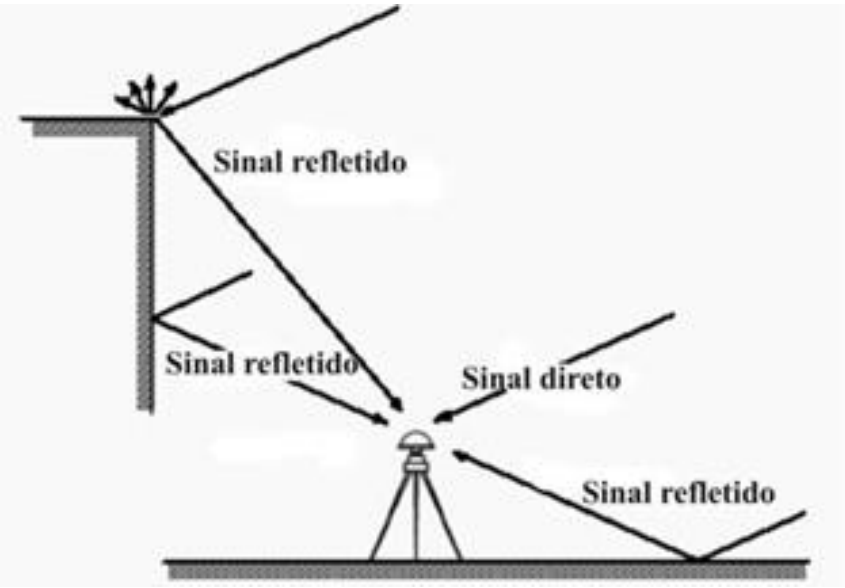
Marques (2012) declara que outra possibilidade para determinar o atraso troposférico (T_r^s) é pela estimativa com o Filtro de Kalman utilizando as medidas GNSS. Neese caso, o atraso troposférico é tratado como um processo estocástico apresentando ruídos cujos valores são inseridos na etapa de atualização da matriz variância e covariância do vetor estado (representa a descrição de um determinado fenômeno ou processo que pode ocorrer de forma discreta ou contínua). Muitas aplicações da geodésia requerem a determinação de estados que

variam no tempo, podendo-se citar, por exemplo, a determinação da trajetória de um satélite ou de um móvel qualquer. A estimativa do vetor estado pode ser realizada com base no Filtro de Kalman (MARQUES, 2012).

O Filtro de Kalman é um estimador recursivo não tendencioso e de variância mínima, que consiste na estimativa do vetor estado atual combinando as observações atuais e a adição do vetor estado predito para o mesmo instante de tempo (BROWN; HWANG, 1997; CAMARGO, 1992; GELB et al., 1974; MARQUES, 2012). O vetor estado representa a descrição de um determinado fenômeno ou processo que pode ocorrer de forma discreta ou contínua. Processos discretos podem ser originados mediante amostras de um processo contínuo em intervalos específicos. A amostragem pode ser, por exemplo, a obtenção de dados analógicos convertidos para sinal digital, ou podem ser as observações enviadas por um satélite a uma determinada taxa de amostragem.

Erro de multicaminho ou sinais refletidos – Segundo Monico (2008), o efeito provocado pelo multicaminho do sinal é bem descrito pelo próprio nome. O receptor pode, em algumas circunstâncias, receber, além do sinal que chega diretamente à antena, sinais refletidos em superfícies vizinhas a ela, como construções, carros, árvores, massa d'água, cercas, entre outras. O multicaminho é ilustrado na Figura 24. Nota-se que o sinal pode chegar ao receptor por dois ou mais caminhos diferentes, direto e indireto.

Figura 24 – Ilustração da ocorrência de multicaminho



Fonte: Monico (2008).

Monico (2008) destaca que, dessa forma, os sinais recebidos no receptor podem apresentar distorções na fase da onda portadora e na modulação sobre ela. O autor explica que, em geral, não há um modelo para tratar o efeito do multicaminho, pois as situações geométricas de cada local variam de forma arbitrária e, portanto, em muitas situações, as observáveis fase da onda portadora e pseudodistância são degradadas em razão do multicaminho, o que afeta a qualidade do posicionamento.

A ocorrência do multicaminho depende da refratividade do meio onde se posiciona a antena, das características da antena e das técnicas empregadas nos receptores para produzir os sinais refletidos. As condições um tanto arbitrárias da geometria e do ambiente envolvendo o levantamento tornam a modelagem desses efeitos muito difícil, embora algumas combinações de observáveis permitam avaliar o nível de sinais refletidos (MONICO, 2008).

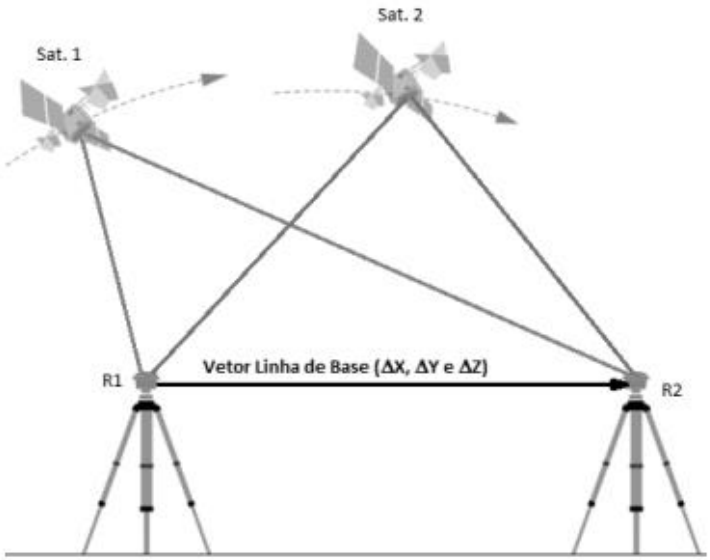
2.5.8.2.6 Ajustamento em redes

Diversos são os erros e/ou efeitos envolvidos com o sistema GNSS, podendo-se citar os de natureza atmosférica que afetam os sinais durante sua propagação, aqueles de natureza geodinâmica que afetam as estações ou ainda os erros provocados por atrasos de hardware de satélites e receptores, calibração de antenas, entre outros.

Para fins de posicionamento geodésico, a atmosfera geralmente é dividida em ionosfera e troposfera que provocam diferentes atrasos no sinal de rádio enviado pelo transmissor. Os efeitos geodinâmicos são principalmente aqueles provocados por efeitos de carga de marés oceânicas (Ocean Tide Loading), efeitos de marés terrestres (Earth Body Tide) e movimento de placas tectônicas (MARQUES; PACHECO; TANAJURA, 2016; MONICO, 2008).

O método de posicionamento GNSS que proporciona estimativas com melhor qualidade, principalmente para o caso de linha de base curta, é o método relativo (Figura 25), no qual dois ou mais receptores (R1 e R2) em diferentes estações coletam dados de satélites GNSS (Sat.1 e Sat.2) simultaneamente (MARQUES; PACHECO; TANAJURA, 2016).

Figura 25 – Representação do posicionamento relativo e o vetor de linha de base



Fonte: Marques, Pacheco e Tanajura (2016).

Nesse caso são realizadas combinações lineares entre as medidas coletadas em duas estações formando as observáveis de Dupla Diferença (DD), onde se estimam as componentes do vetor de linha de base. As equações de DD de pseudodistância (Equação 22) e de fase da portadora (Equação 23) podem ser escritas da seguinte forma:

$$PD_{DD_{r1r2}^{s1s2}} = \Delta\rho_{r1r2}^{s1s2} + \nu_{PD_{DD_{r1r2}^{s1s2}}} \tag{22}$$

$$\Delta\emptyset_{1,2}^{1,2} = \frac{f_{Li}}{c}\Delta\rho_{1,2}^{1,2} + N_{1,2}^{1,2} + \nu_{\emptyset_{DD}} \tag{23}$$

Onde:

s - satélite;

r - receptor;

ρ - distância geométrica entre satélite e receptor;

N - ambiguidade da fase da onda portadora;

$\Delta\rho_{r1r2}^{s1s2} = \Delta\rho_{r1r2}^{s1} - \Delta\rho_{r1r2}^{s2} = \rho_{r1}^{s1} - \rho_{r2}^{s1} - \rho_{r1}^{s2} + \rho_{r2}^{s2}$;

$\nu_{PD_{ij}^{rs}}$ - resíduos e efeitos não modelados da DD da pseudistância;

$\nu_{\emptyset_{DD}}$ - resíduos e efeitos não modelados da DD da fase da portadora;

$N_{1,2}^{1,2} = N_{1,2}^{1} - N_{1,2}^{2} = N_{1}^{1} - N_{2}^{1} - N_{1}^{2} + N_{2}^{2}$

As Equações 23 e 24 representam de forma geral o modelo matemático funcional utilizado no ajustamento por MMQ no método relativo (MARQUES; PACHECO; TANAJURA, 2016). Para o caso de linhas de base curtas, o posicionamento relativo permite eliminar a maioria dos erros envolvidos com o GNSS. Para obtenção de posicionamento com alta acurácia, principalmente se forem consideradas linhas de base longas, é necessário aplicar também diversas outras correções (MARQUES; PACHECO; TANAJURA, 2016).

Marques, Pacheco e Tanajura (2016) explicam que, em geral, são aplicadas combinações lineares entre observações coletadas em diferentes frequências, por exemplo, a combinação denominada *ion-free*, que permite eliminar os efeitos de primeira ordem da ionosfera. Os efeitos de ordem superior da ionosfera também podem ser corrigidos conforme recomendações do International Earth Rotation and Reference System Service (IERS). Outros tipos de combinação, tais como *wide-lane*, *narrow-lane* e outras também podem ser aplicadas, seja para detecção de perdas de ciclos na fase da portadora, seja para auxílio ao processo de solução das ambiguidades. Além disso, podem ser aplicados produtos disponibilizados pelos diversos centros internacionais dentre eles o IGS, o Center for Orbit Determination (CODE), o Jet Propulsion Laboratory (JPL), entre diversos outros.

Dentre os produtos disponíveis, têm-se, por exemplo, as órbitas precisas dos satélites, correções de atrasos de hardwares Differential Code Bias (DCB), parâmetros de calibração de antenas, etc. Muito importante se faz a aplicação dos parâmetros de calibração das antenas dos receptores, uma vez que o sinal recebido do satélite se refere ao centro de fase eletrônico da antena do receptor, enquanto a posição é estimada em relação ao centro de fase mecânico (MARQUES; PACHECO; TANAJURA, 2016; SEEBER, 2003).

Teunissen (1998) afirma que uma das etapas mais importantes na obtenção dos vetores de linha de base se refere ao processo de solução de ambiguidades como inteiras (solução fixa) e a validação dessa solução, assunto que sempre representou um grande desafio em termos de pesquisa para a Geodésia. A etapa envolvendo a estimativa do vetor de linha de base é comumente denominada de processamento de linhas de base. Uma vez que se tenham diversos vetores de linha de base formando uma rede GNSS, estes podem fazer parte do ajustamento de uma rede geodésica tridimensional.

O modelo matemático funcional do ajustamento de redes pode ser representado pelas Equações 24, 25 e 26:

$$\Delta X_{ij} = X_j - X_i \quad (24)$$

$$\Delta Y_{ij} = Y_j - Y_i \quad (25)$$

$$\Delta Z_{ij} = Z_j - Z_i \quad (26)$$

Onde: ΔX, ΔY e ΔZ representam as diferenças de coordenadas entre os ponto Pi e Pj. A solução por MMQ pelas Equações 24, 25 e 26 pode ser feita com a introdução de injunções mínimas (GEMAEL, 1994; MARQUES; MONICO, 2009).

O ajustamento de vetores em rede geodésica tridimensional torna a solução de posicionamento mais rigorosa e deve vir acompanhada da aplicação do controle de qualidade estatístico com etapas de Detecção, Identificação e Adaptação (DIA) de erros grosseiros que estejam presentes nas observações compostas dos vetores de linha de base (GEMAEL, 1994; MARQUES; MONICO, 2009; TEUNISSEN, 1998).

Marques, Pacheco e Tanajura (2016) afirmam que a aplicação de todas as correções citadas nesse item e outras, bem como procedimentos rigorosos para obtenção de coordenadas com alta acurácia deve ser realizada com o auxílio de softwares científicos, principalmente para o caso de linhas de base longas (acima de 20 km).

3 ÁREA DE ESTUDO

3.1 Descrição e localização da área de estudo

A região metropolitana do Recife localiza-se no estado de Pernambuco, compõe-se de 14 municípios distribuídos ao longo de uma área de 2.768,95 km², e tem uma população de 3,7 milhões de habitantes (IBGE, 2011b). Parte da cidade do Recife é construída sobre uma planície, com altitudes inferiores a 20 m circundada por morros. A Planície do Recife, parte principal da cidade, ocupa uma área de 112 km^2 e corresponde a uma planície deltáica de formação geológica fluviomarinha (BORBA, COSTA FILHO; MASCARENHAS, 2010), situada nos limites geográficos de ocorrência das bacias sedimentares do Cabo e Pernambuco-Paraíba. A precipitação média anual em Recife é de 2.458 mm e a temperatura média anual é de 25,5ºC. A Figura 26 ilustra a localização da RMR no estado de Pernambuco, com destaque para o município de Recife.

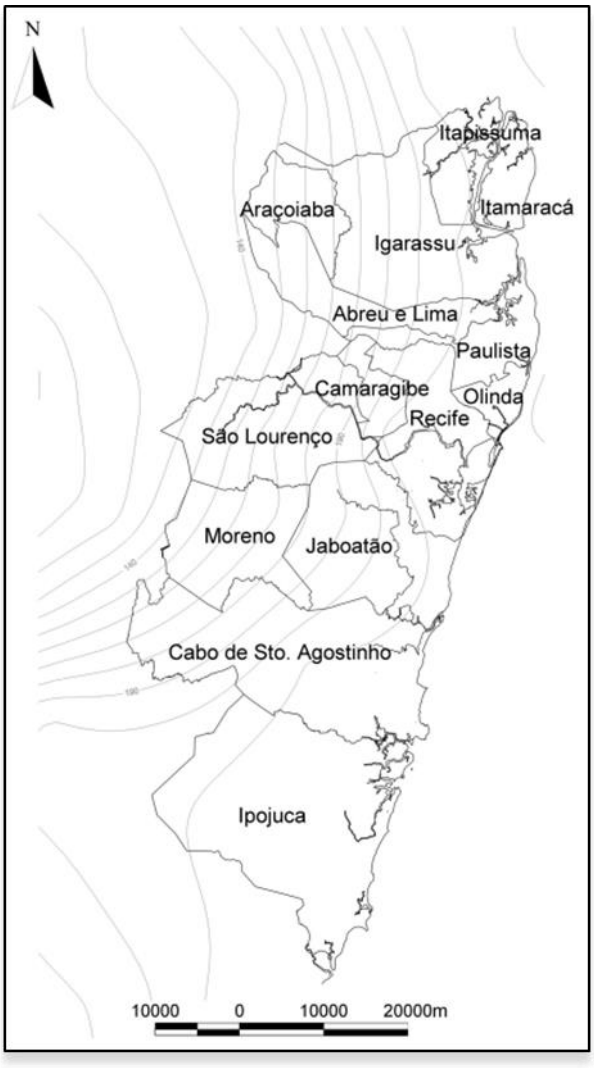
Figura 26 – Mapa de localização da RMR

Fonte: Cavalcanti e Montenegro (2009).

A RMR (Figura 27) é composta pelos seguintes municípios: Abreu e Lima, Araçoiaba, Cabo de Santo Agostinho, Camaragibe, Igarassu, Ipojuca, Itamaracá, Itapissuma, Jaboatão dos Guararapes, Moreno, Olinda, Paulista, Recife e São Lourenço da Mata, concentrando 42% da população do estado (CPRM, 2003).

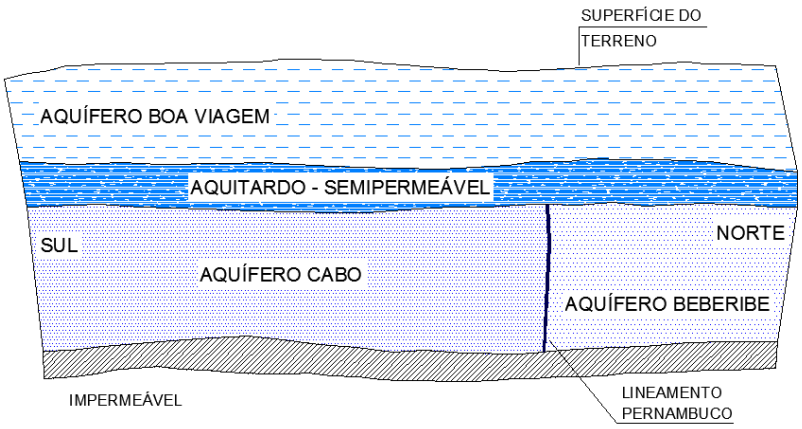
Essa área encontra-se constituída pela Formação Cabo, composta de arenito muito argiloso, sobreposta pelos sedimentos recentes, denominado de Aquífero Boa Viagem (Figura 28), que constitui a terceira formação aquífera mais explotada da RMR (SANTOS, 2005).

Figura 27 – Municípios que compõem a RMR



Fonte: CPRM (2003).

Figura 28 – Diagrama esquemático com a localização do Aquífero Boa Viagem



Fonte: Adaptado de Cabral e Montenegro (2004).

3.2 Zona sul de Recife e os bairros de Boa Viagem e Pina

A pesquisa realizou-se no bairro de Boa Viagem, em Recife, e utilizou Referências de Nível (RRNN), datadas do ano de 1958, localizadas na Igreja de Nossa Senhora da Boa Viagem e na Igreja Nossa Senhora do Rosário no bairro do Pina. Daí a importância de um breve histórico sobre esses bairros e suas igrejas, uma vez que se considera que essas RRNN não mais se encontram em processo de recalque pelo próprio peso da estrutura das igrejas, pelo fato de já se caracterizarem como construções muito antigas.

3.2.1 O bairro de Boa Viagem

No início do século XX, o acesso ao bairro de Boa Viagem (Figura 29) era bastante difícil. Em 1908, por exemplo, de acordo com os estudiosos do assunto, viam-se, apenas, umas 60 casas de construção regular, desalinhadas, e uma capela. A povoação só apresentava alguma vida nos meses de setembro a março, período em que a estação balneária era frequentada. Distando 11 km do centro do Recife, Boa Viagem só tomou impulso depois que a Avenida Beira-Mar foi construída. Isso possibilita à população utilizar o bonde elétrico para ir à praia. Antes disso, porém, tratando-se de transporte público, só havia uma linha de bondes, puxados por burros, inaugurada em 1899 (VAINSENCHER, 2007).

Figura 29 – O bairro de Boa Viagem

Fonte: Paróquia Nossa Senhora da Boa Viagem. Disponível em: <http://www.paroquiadaboaviagem.org/historia/>.

Outro fator relevante para o crescimento de Boa Viagem foi a construção, depois da 2.ª Guerra Mundial, dos aeroportos civil e militar, no Ibura, assim como do hospital dos norte-americanos, e do Parque da Aeronáutica, no bairro de Piedade, município de Jaboatão dos Guararapes, PE (VAINSENCHER, 2007).

3.2.2 Igreja de Nossa Senhora da Boa Viagem

De acordo com o historiador Flávio Guerra (1978), a Igreja de Nossa Senhora da Boa Viagem, até a metade do século XVII, localizava-se no antigo território da Barreta**,** correspondente a toda a área costeira, que se estendia desde o frontal do Pina até a povoação das Candeias. Não se tem conhecimento, porém, de uma fonte precisa que assegure a data da abertura da igreja. Antes de 1848, o templo pertencia à paróquia de Nossa Senhora da Paz, em Afogados e, só em 8 de setembro daquele ano, conseguiu ser elevado ao nível de paróquia independente. O documento mais antigo sobre a igreja é uma escritura, com a data de 6 de junho de 1707, pela qual Balthazar da Costa Passos e sua esposa, Ana de Araújo Costa, proprietários de terras naquela área, fazem doação, ao padre Leandro Camelo, de um local onde "havia um '*oratório ou presepe a Jesus, Maria e José*', juntamente com o solo que estava perto, que era um sítio de terras na Barreta, com cem braços de frente e uma légua de fundo, desde a praia até o Rio Jordão" (GUERRA, 1978, p. 105).

Bastante religiosos, esses doadores, mandaram "dar por testamento, ao patrimônio da capela, mais um sítio anexo, 'com 500 braças de frente sôbre outras iguais de fundo'." (GUERRA, 1978, p. 105). Segundo outra informação, proveniente de documentos históricos, o padre Leandro Camelo empregou, "em obséquios de Maria Santíssima", tudo o que possuía e "mandou fazer uma imagem com título da Boa Viagem, e a colocou em uma magnífica igreja que erigiu [...], distante duas léguas do Recife, sôbre as praias do mar" (GUERRA, 1978, p. 105). Segundo os estudiosos do assunto, a Igreja de Nossa Senhora da Boa Viagem, no período do Brasil Colônia, embora modesta, representava um dos templos de maior rendimento patrimonial do Recife.

> o seu usufruto era de cinco grandes sítios, quatro pequenos e vinte casas térreas no povoado, além de um pequeno sítio de coqueiros na praia, doado pelo padre Luís Marques Teixeira, com o único compromisso de tirar-se da sua renda 'a quantia necessária para se conservar acesa dia e noite a lâmpada da capela-mor da Igreja'. (GUERRA, 1978, p. 106).

A grande reforma na Capela de Nossa Senhora da Boa Viagem iniciou-se em 1862. No lugar do prédio anterior, ergueu-se um novo, com uma estrutura mais solene. Existia, antes disso, uma pequena igreja com linhas simplórias e um alpendre erguido à sua frente, que mais parecia um daqueles templos modestos da zona rural. Durante a grande reforma (1862), os religiosos preservaram alguns altares, entre os quais o da sacristia da Igreja de Nossa Senhora da Boa Viagem. Datado de 1745, esse altar foi entalhado pelo mestre João Pereira, e dourado pelo artista Francisco Teixeira Ribeiro, no ano de 1772. As Figuras 30 e 31 apresentam a Igreja de Nossa Senhora da Boa Viagem em épocas distintas.

Figura 30 – Igreja de Nossa Senhora da Boa Viagem na primeira metade do século XX

Fonte: Paróquia Nossa Senhora da Boa Viagem. Disponível em: <http://www.paroquiadaboaviagem.org/historia/>.

Figura 31 – Igreja de Nossa Senhora da Boa Viagem no século XXI

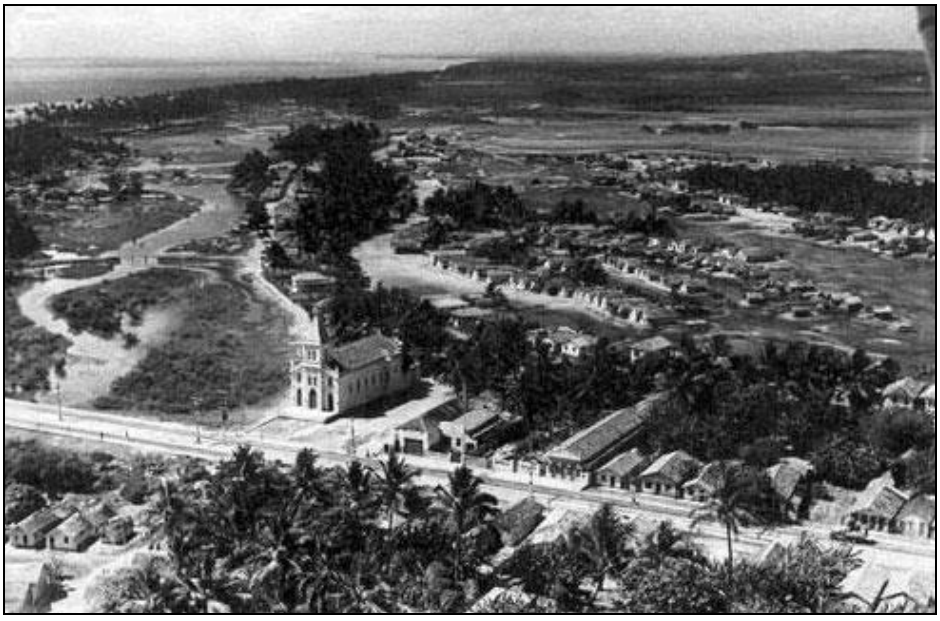
Fonte: PRACINHA..., 2012.
Foto: Rodrigo Lôbo/JC Imagem.

Portanto, a construção dessa igreja na estrutura, mantida até os dias de hoje, já tem 150 anos de idade. Sendo assim, os recalques devido ao peso próprio da construção já se estabilizaram há muitas décadas.

3.2.3 O bairro do Pina e sua Igreja Matriz

No início do século XX, o Pina havia deixado de pertencer à paróquia de Afogados, passando a ser Paróquia Nossa Senhora do Rosário, tendo o Padre José Fernandes Machado a responsabilidade de construir a Igreja Matriz que até então era uma capela de madeira, onde se realizavam as missas de Páscoa, as Santas Missões e a Missa de Natal. A inauguração da Igreja Matriz de Nossa Senhora do Rosário em 1932, foi um grande acontecimento, passando a realizar, além das missas semanais, as novenas, as procissões da Padroeira, as procissões da Páscoa, de São José e muitos casamentos e batizados. As Figuras 32 e 33 mostram, em épocas distintas, fotos do bairro do Pina e da Igreja de Nossa Senhora do Rosário, conhecida como Igreja do Pina. A Figura 32 também ilustra a principal porta de acesso ao bairro de Boa Viagem a partir do centro do Recife. Nos séculos XVIII e XIX, nessa região, o rio Capibaribe era utilizado por navios que transportavam açúcar para o mercado europeu (CARVALHO, 1997).

Figura 32 – Igreja de Nossa Senhora do Rosário no bairro do Pina em 1935



Fonte: <https://www.google.com.br/search?q=Igreja+de+Nossa+Senhora+do+Ros%C3%A1rio+no+bairro+do+Pina,+s%C3%A9culo+XXI&client=firefox- b&dcr=0&source=lnms&tbm=isch&as=X&ved=>.

Figura 33 – Igreja de Nossa Senhora do Rosário no bairro do Pina, início do século XXI

Fonte: <www.paroquiadorosariopina.org.br>.

3.3 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).

Batista (1984) identifica, no interior da Planície do Recife, duas situações morfológicas distintas: 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 150 m, crescendo do litoral para o interior. A segunda é representada pela Planície do Recife, constituída por sedimentos recentes, que parte são depositados pelo mar e parte depositados pelo rio Capibaribe, com pequenas ondulações oriundas de antigos depósitos eólicos, que tem cotas variando de zero a 10 m e inclinação suave para leste, cota média de 3 a 4 metros. Verifica-se, ainda, na Planície do Recife, a ocorrência de mangues nas margens e desembocadura dos rios.

Farias (2003) afirma que, com relação às estruturas tectônicas, a área do Recife apresenta-se cortada por falhas pré-cambrianas, parcialmente reativadas durante o cretáceo e atualmente estabilizadas. Identificam-se três eventos tectônicos relacionados com a origem da

Planície do Recife. O primeiro refere-se ao grande falhamento que atravessa longitudinalmente todo o estado de Pernambuco, na direção E-W, alcançando o estado do Piauí. Trata-se do chamado lineamento Pernambuco, que, no Recife, passa na altura da bacia do Pina e tem extensão superior a 900 km que continua no continente africano como lineamento Norte dos Camarões, ratificando sua idade pré-cretácea.

O segundo evento relaciona-se com as reativações do lineamento, gerando as falhas normais (de gravidade), com direção NE-SW, associadas à abertura do Oceano Atlântico, que provocaram um aprofundamento escalonado de blocos em direção à plataforma continental. A reativação, por gravidade, do lineamento Pernambuco funcionou como uma barreira, impedindo a progressão da Formação Beberibe, para sul. Nas proximidades do lineamento, a largura da bacia sedimentar Pernambuco-Paraíba estreita-se de forma quase abrupta, alcançando largura média de 8 km, em contraposição aos seus 25 km de largura média.

O terceiro evento tectônico, de direção NW-SE, propiciou a formação de uma depressão (*rift*) a sul do lineamento Pernambuco, dando origem à bacia sedimentar do Cabo. Associado a esse evento tectônico, está o extravasamento de lavas vulcânicas e traquíticas encontradas naquela bacia.

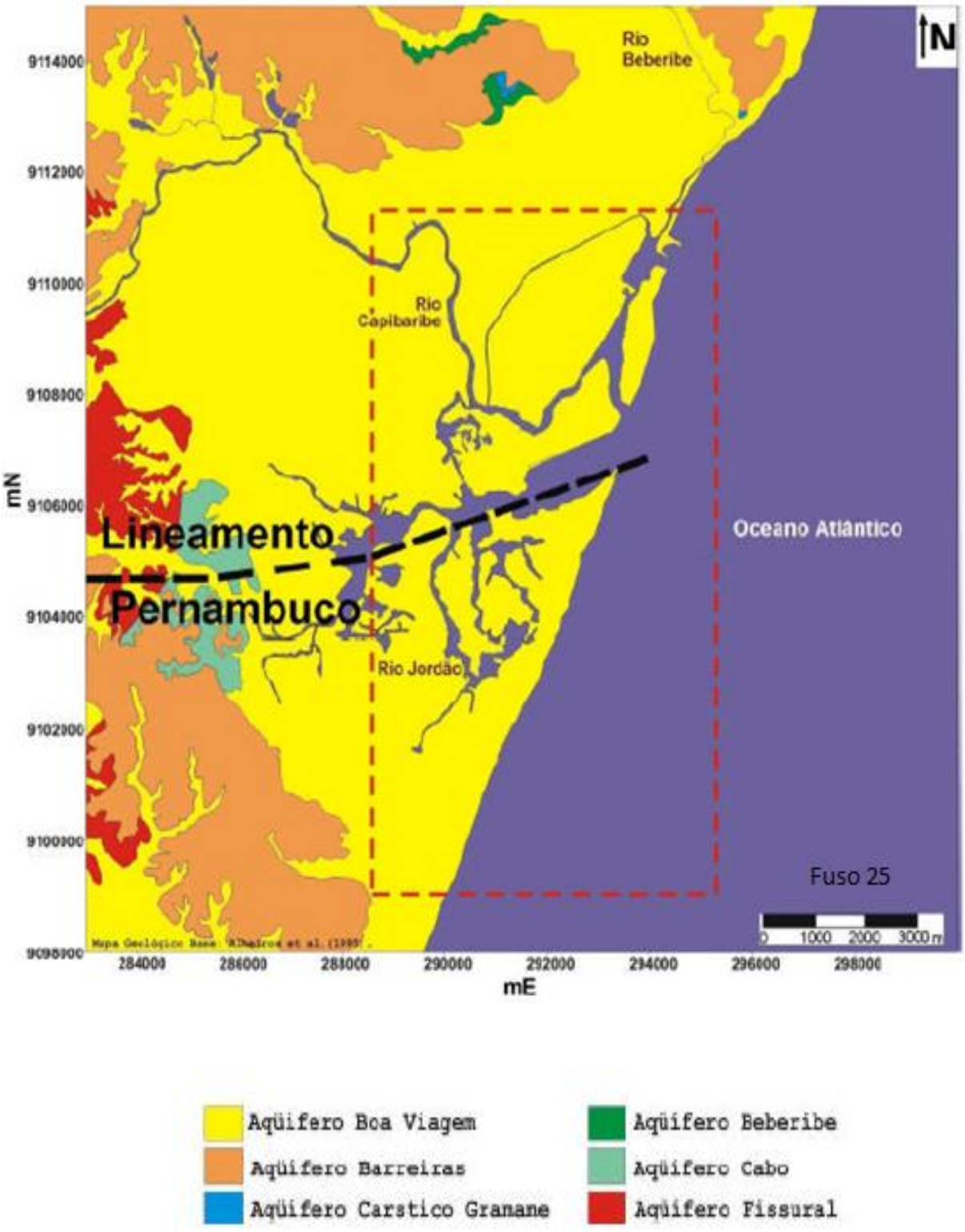
Há registros da ocorrência de rocha basáltica na região sul da planície, pela descrição de lâminas petrográficas de amostras coletadas em dois poços perfurados relativamente próximos ao lineamento, nos bairros de Imbiribeira e Boa Viagem, com profundidades de 98 e 136 m respectivamente.

A variedade litológica a que está imposta a Planície do Recife, somando-se aos eventos tectônicos a que esteve submetida ao longo do tempo geológico, gera como consequência diferentes sítios hidrogeológicos e influencia, sobremaneira, nos aspectos voltados para a disponibilidade e qualidade das suas águas subterrâneas.

A Figura 34 apresenta o mapa hidrogeológico do Recife com a localização do lineamento Pernambuco (LPE), que é uma importante falha geológica e o retângulo, tracejado em destaque, indica a área onde está havendo maior número de poços.

O município de Recife é constituído por quatro unidades geológicas (Figura 35) a saber: Embasamento Cristalino, Bacias Sedimentares Cretáceas, Sedimentos Terciários e Sedimentos Quaternários (CPRM, 2003).

Figura 34 – Mapa hidrogeológico de Recife e adjacências, com a posição aproximada do lineamento Pernambuco



Fonte: Monteiro (2000).

Figura 35 – Esboço litoestrutural das unidades geológicas do município de Recife

Fonte: Adaptado de Correia (2006).

Para caracterização da Planície do Recife, essas unidades geológicas serão apresentadas a seguir.

3.3.1 Embasamento cristalino

O embasamento cristalino está representado por dois grandes complexos. O primeiro, mais antigo, é o Complexo Gnáissico Migmático do Paleoproterozóico, situado a norte do LPE, constituído por ortognaisses de composição granítica a tonalítica. O segundo, a sul do LPE, é o Complexo Belém de São Francisco, de idade mesoproterozóica, constituído por ortognaisses e migmatitos com relíquias de supracrustais (CPRM, 2003).

As rochas pertencentes ao embasamento cristalino (Figura 35) afloram na porção oeste da RMR, ao longo de toda a borda das duas bacias sedimentares, apresentando um suave mergulho para o leste, com inclinação da ordem de 28 m/km (BATISTA, 1984). O embasamento cristalino de idade pré-cambriana é constituído geologicamente por rochas graníticas, gnáissicas e migmáticas (Figura 36), que estão fraturadas ou fissuradas por esforços tecnônicos regionais. Nesse meio, a água está armazenada nos espaços fendilhados e/ou fraturados da rocha, limitando a circulação da água (SANTOS, 2005).

Figura 36 – Ortognaisse do complexo gnáissico migmático

Fonte: CPRM (2003).

3.3.2 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 Bacia Cabo formou-se na área sul do LPE, onde foram depositados conglomerados, arenito feldspáticos (arcósios) e argilitos, entre outros. A bacia sedimentar Cabo localiza-se no litoral sul e estende-se por cerca de 100 km, desde a cidade de São José da Coroa Grande até a cidade do Recife, sendo limitada pelo alto de Maragogi e pelo LPE.

A Bacia Pernambuco-Paraíba formou-se ao norte do LPE, onde foram depositados sedimentos arenosos de origem fluvial, denominados de Formação Beberibe. A partir daí, o avanço sobre o continente permitiu a formação de depósitos marinhos carbonáticos que se consolidaram como camadas de rochas calcáreas, denominadas de Formação Gramame e mais adiante a Formação Maria Farinha. A bacia sedimentar Pernambuco-Paraíba inicia-se no LPE 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 abruptamente nas proximidades do LPE, quando assume uma largura média de 8 km. A bacia sedimentar Pernambuco-Paraíba caracteriza-se por estruturas de pequeno rejeito e pacotes sedimentares pouco espessos (SANTOS, 2005).

Segundo Farias (2003), a Formação Beberibe repousa sobre o embasamento cristalino e constitui a base da sequência sedimentar da Bacia. Compreende uma sequência essencialmente arenosa com espessura média de 200 metros. Pode ser dividida 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 da RMR.

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

A Formação Maria Farinha tem espessura de até 35 m 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 (SANTOS, 2005).

3.3.3 Grupo Barreiras

Recobrindo o embasamento cristalino e as unidades das bacias sedimentares cretáceas, com espessuras variáveis (em torno de 40 m), 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 verificam exposições significativas dessa formação no litoral sul, ocorrendo na forma de pequenos morros isolados (SANTOS, 2005).

3.3.4 Sedimentos quaternários

A área dos bairros de Boa Viagem e Pina encontra-se na Planície do Recife na região formada pelos sedimentos quaternários e sedimentos recentes. Santos (2005) afirma que os 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 identificados em cinco unidades distintas:

- Terraço Marinho Pleistocênico – constitui uma unidade morfológica aplainada com cotas entre 7 e 10 m, 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 argila mole.

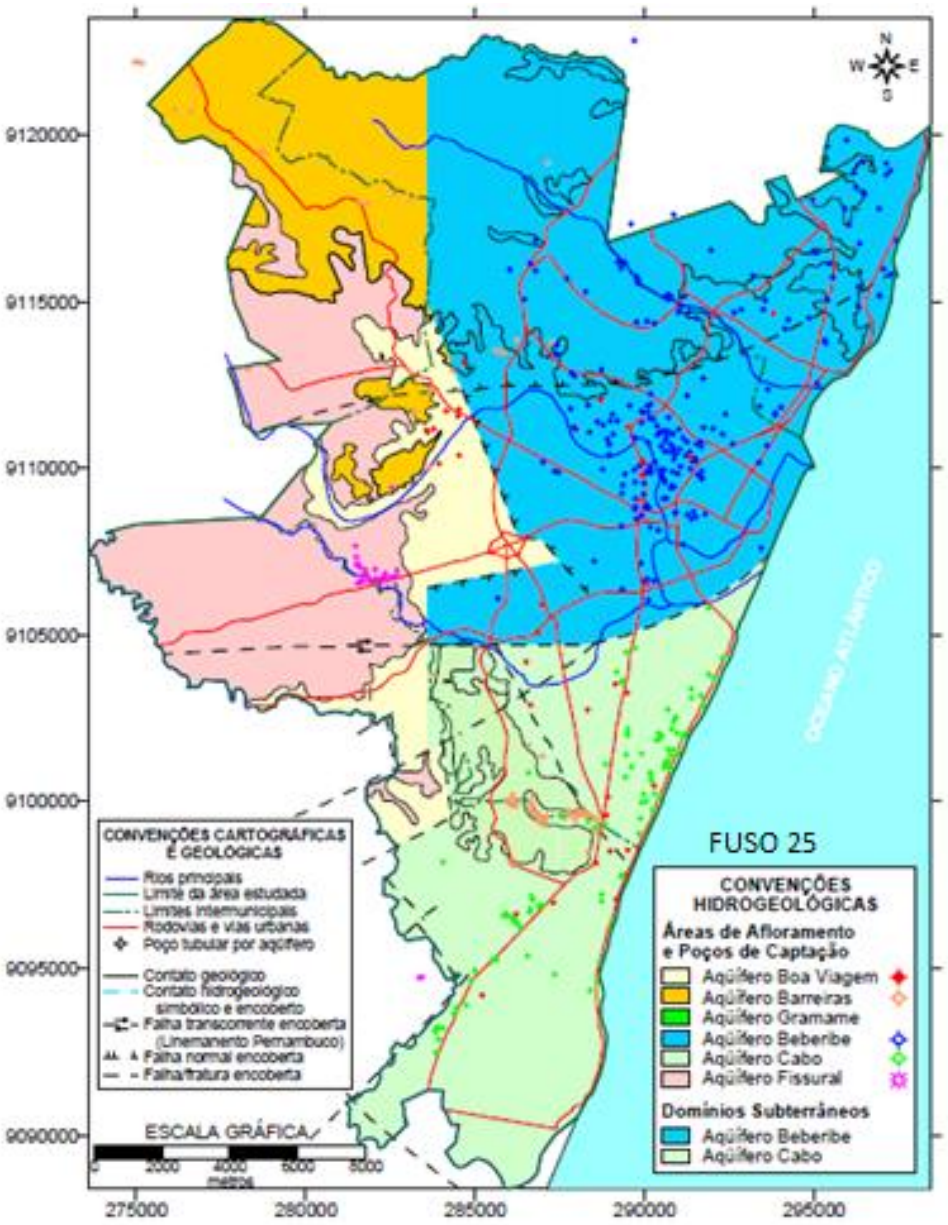
- Terraço Marinho Holocênico – corresponde à faixa da praia atual, que é situada entre o canal de Setúbal e a linha costeira. Essa formação apresenta cotas entre 3 e 5 m e pode-se identificar a presença de fragmentos de concha em sua composição.
- Depósitos Fluviolagunares – correspondem aos aluviões, que são arenosos, e mostram sedimentos argilosos com matéria orgânica, e aos segmentos lagunares, de composição variada areno-síltico-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.

3.4 Hidrogeologia

Hidrogeologicamente, conforme a importância dos aquíferos como mananciais de águas subterrâneas, podem ser distinguidos na área, os seguintes aquíferos, na sequência de maior para menor potencialidade (COSTA; COSTA FILHO, 2004): Aquífero Beberibe (Bacia Sedimentar PE-PB), Aquífero Cabo (Bacia Sedimentar do Cabo), Aquífero Boa Viagem (Planície do Recife), Aquífero Barreiras, Aquífero Fissural, mostrados no mapa da Figura 37.

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 explotado 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, consideram-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; em algumas áreas restritas, o nível síltico-argiloso funciona como aquitardo, separando os dois subníveis e condicionando um comportamento de semiconfinado para o subnível inferior (BATISTA, 1984).

Figura 37 – Mapa hidrogeológico simplificado com distinção dos domínios aquíferos



Fonte: Borba, Costa Filho e Mascarenhas (2010).

A Formação Cabo é composta de arenito muito argiloso, sobreposta pelos sedimentos recentes, denominado Aquífero Boa Viagem, que constitui a terceira formação aquífera mais explotada da RMR. O Aquífero Cabo é explotado 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 e Imbiribeira (SANTOS, 2005).

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 (SANTOS, 2005). Costa et al. (2002) afirmam que esse aquífero chega a atingir na região de Boa Viagem até 80 m de espessura. Além da importância hidrogeológica como reservatório subterrâneo, o Aquífero Boa Viagem alimenta os Aquíferos Cabo e Beberibe por meio da água drenada ao longo de sua superfície. Os Aquíferos Cabo e Beberibe nas planícies do 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.

O Aquífero Barreiras compreende um sistema aquífero caracterizado por uma sequência aquífera freática, com níveis confinados em profundidade, mas sua explotação é pouco desenvolvida, uma vez que a fração granulométrica predominante é síltico-argilosa, que reduz a capacidade de armazenamento do aquífero (SANTOS, 2005).

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 (SANTOS, 2005).

Costa et al. (2004) apresentaram alguns parâmetros hidrodinâmicos médios, tais como transmissividade, condutividade hidráulica, porosidade eficaz e coeficiente de armazenamento, os quais estão relacionados com os aquíferos existentes na RMR e podem ser utilizados para caracterizar o comportamento dos aquíferos porosos.

A transmissividade reflete a quantidade de água que pode ser transmitida horizontalmente por toda a espessura saturada do aquífero. É calculada pelo produto da condutividade hidráulica pela espessura saturada do aquífero. Por sua vez, a condutividade hidráulica é uma medida de velocidade que indica quanto uma partícula de água flui dentro de um meio. Já a porosidade eficaz, reflete a relação entre o volume de água drenada (excluindo o volume retido por adsorção, capilaridade, etc.) e o volume total da rocha. O coeficiente de armazenamento é um parâmetro adimensional que reflete a compressão da água dentro do aquífero, sendo, no caso de um aquífero livre que está sujeito apenas à pressão atmosférica, igual à porosidade eficaz.

Esses parâmetros 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) para os aquíferos intersticiais da área, os quais podem ser vistos na Tabela 3.

Tabela 3 – Coeficientes hidrodinâmicos dos aquíferos da RMR

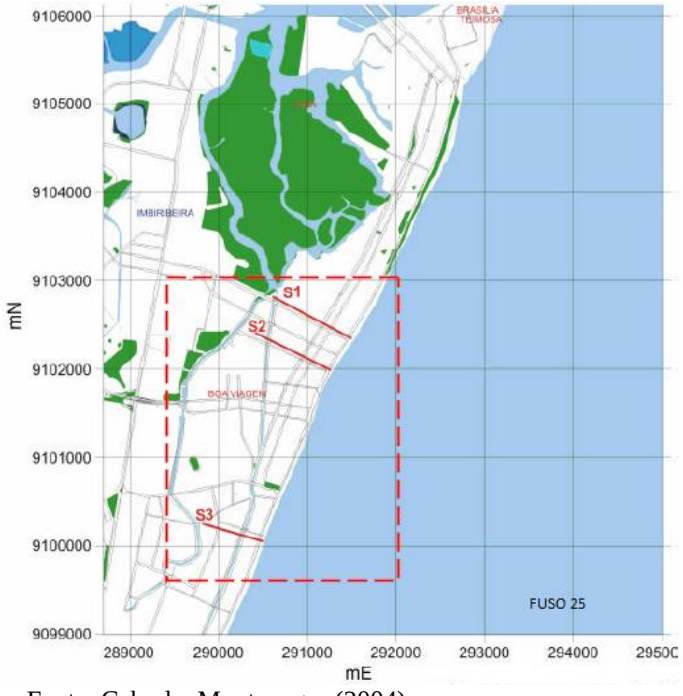
Coeficientes hidrodinâmicos	Aquíferos			
	Beberibe	Cabo	Boa Viagem	Barreiras
Transmissividade	2,2 x 10^{-3} m^2/s	8,6 x 10^{-4} m^2/s	7,0 x 10^{-3} m^2/s	1,7x 10^{-3} m^2/s
Condutividade hidráulica	2,2 x 10^{-5} m/s	1,0 x 10^{-5} m/s	1,7 x 10^{-4} m/s	3,4 x 10^{-5} m/s
Porosidade eficaz	1,0 x 10^{-1}	7,0 x 10^{-2}	1,0 x 10^{-1}	5,0 x 10^{-2}
Coeficiente de armazenamento	2,0 x 10^{-4}	1,0 x 10^{-4}	Não avaliado	Não avaliado

Fonte: Costa et al. (2002).

3.5 Litologia

Cabral e Montenegro (2004) apresentaram, para o bairro de Boa Viagem, a construção de três seções litológicas para melhor compreensão das características geológicas da área de estudo, baseados nas informações dos perfis litológicos dos poços perfurados nesse bairro. A localização dessas seções está apresentada na Figura 38, com destaque tracejado para a área de estudo.

Figura 38 – Localização das seções litológicas



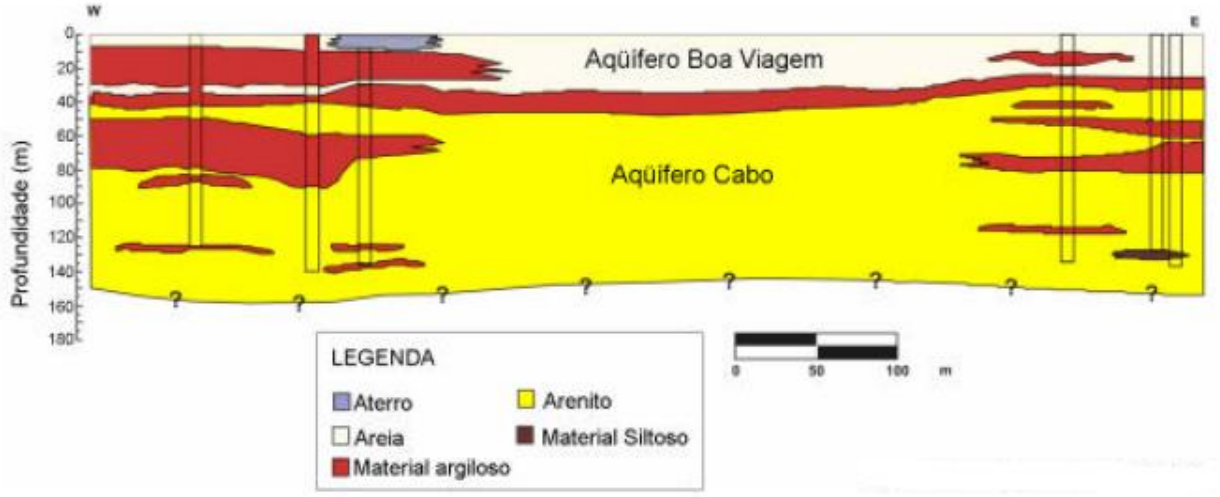
Fonte: Cabral e Montenegro (2004).

Em seguida, serão descritas as características dessas seções litológicas por meio dos perfis realizados ao longo de cada uma das seções observadas na Figura 38: seções S1, S2 e S3.

3.5.1 Seção litológica S1

Como se pode observar na Figura 39, essa seção inicia-se com a presença de material de aterro, em apenas um dos poços e ocorre um horizonte de areia até os 40 m de profundidade (Aquífero Boa Viagem) intercalado com níveis de material argiloso de até 20 m de espessura. Na sequência, aparece arenito (Aquífero Cabo) com intercalações de argila. Nessas intercalações de argila ocorre uma região com nível mais espesso, da ordem de 20 m, no trecho ocidental da seção. Verificou-se a ocorrência de material siltoso, em um dos poços localizados no extremo leste, a uma profundidade de 130 metros. Foram utilizadas informações de descrição desses poços com profundidade máxima de 140 m, pois na região central da seção não há informação sobre os perfis (SANTOS, 2005).

Figura 39 – Seção litológica S1 no bairro de Boa Viagem, direção oeste-leste

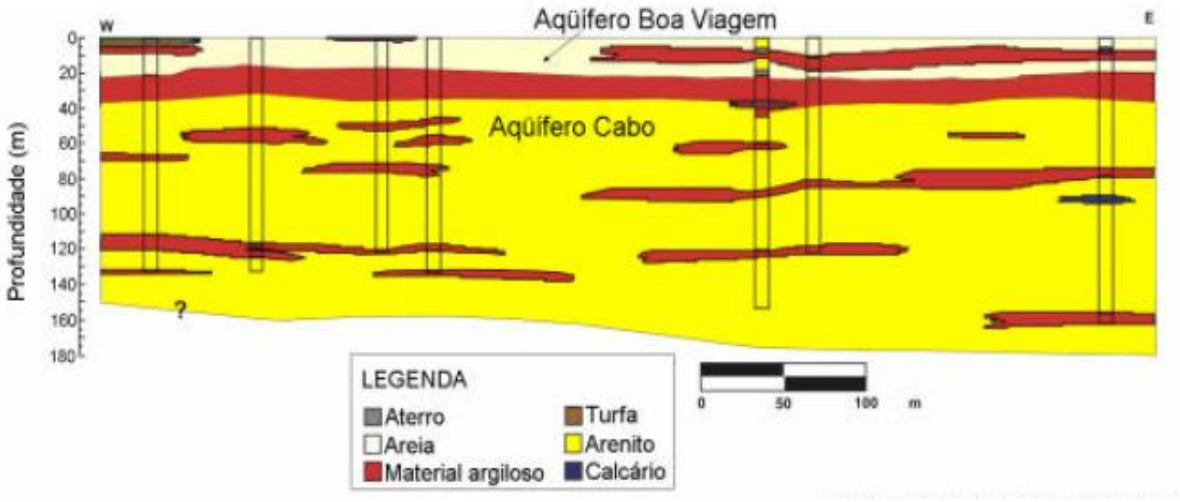


Fonte: Cabral e Montenegro (2004).

3.5.2 Seção litológica S2

Esta seção, que pode ser observada na Figura 40, apresenta na camada inicial material de aterro em dois poços e ocorre um horizonte de areia até os 25 m de profundidade, intercalado com níveis de material argiloso, do trecho central até o extremo leste da seção, de até 10 m de espessura.

Figura 40 – Seção Litológica S2, no bairro de Boa Viagem, direção oeste-leste



Fonte: Cabral e Montenegro(2004).

Logo em seguida, aparece um horizonte contínuo de material argiloso com espessura de até 30 m e profundidade de até 45 m (SANTOS, 2005). Cabral e Montenegro (2004) afirmam que a base dessa sequência deve coincidir com o Aquífero Boa Viagem. O perfil desta seção aponta, também, registro de material turfoso intercalado com o material argiloso.

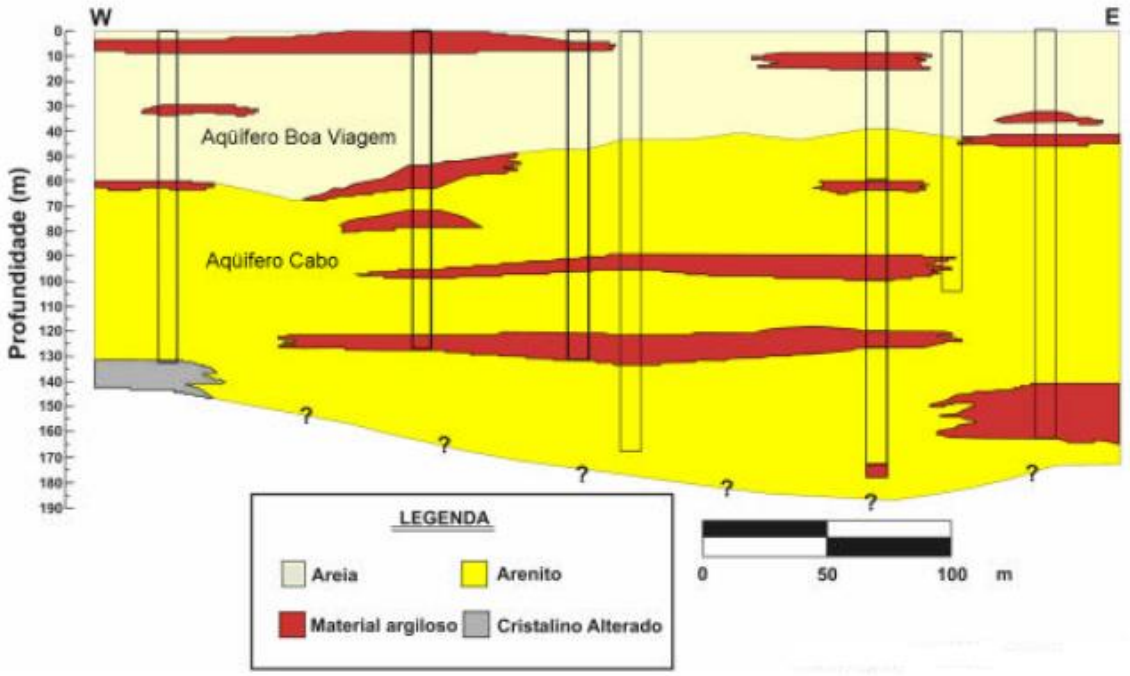
Pouco abaixo do nível argiloso, ocorre a presença de arenito (Aquífero Cabo), com intercalações descontínuas de material argiloso, de espessura máxima de cerca de 10 m, em diferentes profundidades. Foram utilizadas informações de descrição de nove poços com profundidade máxima de 160 metros. Nas informações do poço de maior profundidade, verificou-se a presença de uma fina intercalação de calcário (ou arenito calcífero) aos 90 m de profundidade (SANTOS, 2005).

3.5.3 Seção litológica S3

A seção S3 (Figura 41) inicia-se com a presença de material arenoso até 60 m de profundidade, intercalado com alguns níveis de material argiloso, de até 80 m de espessura e deve tratar-se do Aquífero Boa Viagem. Logo abaixo do nível argiloso, há a presença de arenito (Aquífero Cabo) com uma granulometria predominantemente fina a média, onde se posicionam as seções filtrantes dos poços descritos. Nessa camada de arenito encontram-se intercalações de material argiloso, na porção central da seção, em profundidades variando de 90 a 120 m e espessura máxima de 10 metros.

Em um poço localizado no oeste da seção, registrou-se a ocorrência de cristalino alterado na profundidade final do poço (130 m). Foram utilizadas informações de descrição de sete poços com profundidade máxima de 180 metros (SANTOS, 2005).

Figura 41 – Seção Litológica S3, no bairro de Boa Viagem, direção oeste-leste



Fonte: Cabral e Montenegro (2004).

No contexto geral, essas seções possibilitam a identificação da ocorrência dos dois aquíferos existentes na área de estudo.

3.6 Captação de águas subterrâneas por poços

Os primeiros poços perfurados na região de Boa Viagem, na década de 1930, eram jorrantes, ou seja, tinham artesianismo surgente e, em 2005, o nível do Aquífero Cabo naquela região situava-se a profundidades superiores a 80 m, chegando a alcançar, em algumas localidades, a profundidade de 130 m, com rebaixamentos médios da ordem de 8 m por ano (COSTA et al., 2005).

O estudo denominado HIDROREC II, realizado pela Secretaria de Recursos Hídricos de Pernambuco em 2002, por intermédio da Empresa COSTA Consultoria, apresentou como um dos principais produtos o mapa de zoneamento explotável, em que a cidade foi dividida

em zonas com restrições à vazão de novos poços e redução da vazão dos poços existentes (COSTA et al., 2005).

Constitui-se no principal instrumento técnico para subsidiar a gestão dos recursos hídricos subterrâneos na região metropolitana do Recife, abrangendo especificamente a região compreendida pelos municípios de Recife, Olinda, Camaragibe e Jaboatão dos Guararapes.

Nesse documento especifica-se, para cada uma das zonas de explotação, a sua localização, o aquífero explotado, a situação da profundidade da superfície potenciométrica quando da elaboração dos estudos e os condicionantes de explotação. Os parâmetros estabelecidos nos condicionantes de explotação definiram os limites de vazões a serem explotados em cada zona, por unidade de captação – poço (APAC, 2013).

Na área central do Recife, foram cadastrados 1.640 poços, conforme Costa et al. (2002 e a Agência Estadual de Meio Ambiente (CPRH, 2002), mas o número total é maior devido aos poços antigos não cadastrados e a poços novos clandestinos (PAIVA et al., 2003).

Do total de poços cadastrados, verificou-se que 533 poços exploram a água do Aquífero Boa Viagem, 630 poços exploram água do Aquífero Beberibe. No entanto, em 477 poços, o proprietário não sabia especificar nem o Aquífero nem a profundidade conforme a Tabela 4 (PAIVA et al., 2003).

Tabela 4 – Número de poços por bairro para cada aquífero

(continua)

Bairros	Aquífero Boa Viagem	Aquífero Beberibe	Sem informação	Total
Aflitos	20	65	28	113
Afogados	2	13	3	18
Boa Vista	17	84	90	191
Campo Grande	12	6	6	24
Casa Forte	4	2	7	13
Coelhos	0	12	1	13
Derby	3	27	16	46
Encruzilhada	12	9	10	31
Espinheiro	38	56	21	115
Graças	23	59	50	132
Hipódromo	1	0	3	4
Ilha do Leite	4	11	1	16
Ilha do Retiro	2	2	6	10
Jaqueira	10	21	7	38
Joana Bezerra	0	0	2	2
Madalena	39	52	37	128
Paissandu	40	27	4	71
Parnamirim	17	32	30	79
Parque Amorim	0	2	1	3

Tabela 4 – Número de poços por bairro para cada aquífero

(conclusão)

Bairros	Aquífero Boa Viagem	Aquífero Beberibe	Sem informação	Total
Prado	2	3	1	6
Rosarinho	31	21	15	67
Santana	10	11	5	26
Santo Amaro	33	28	9	70
Santo Antônio	119	11	14	144
São José	30	8	58	96
Tamarineira	4	11	12	27
Torre	55	53	36	144
Torreão	5	4	4	13
Total	533	630	477	1640

Fonte: Adaptado de Paiva et al. (2003).

A profundidade dos poços do Aquífero Boa Viagem variou entre 3 m no mínimo e no máximo 40 metros. Pela Tabela 5, verifica-se que, para o Aquífero Beberibe, foram encontrados a profundidade mínima de 42 m e um máximo de 27 m (PAIVA et al., 2003).

Tabela 5 – Profundidade dos poços nos Aquíferos Boa Viagem e Beberibe

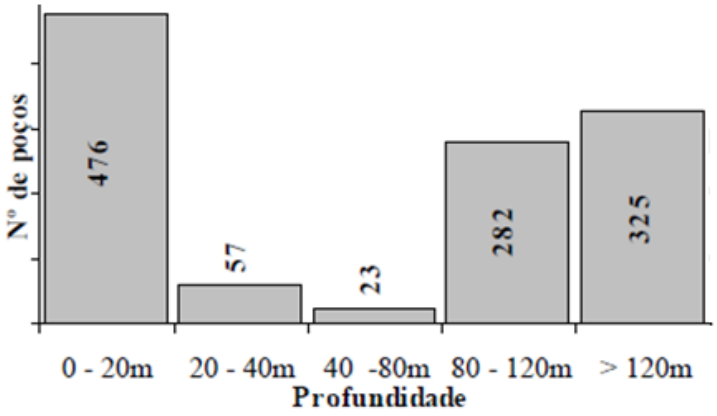
Aquífero Beberibe		Aquífero Boa Viagem	
N.º de poços	773,00	N.º de poços	562,00
Média (m)	123,85	Média (m)	12,80
Desvio padrão (m)	27,76	Desvio padrão (m)	7,33
Mediana (m)	120,00	Mediana (m)	11,90
Máxima (m)	270,00	Máxima (m)	40,00
Mínima (m)	42,00	Mínima (m)	3,00

Fonte: Adaptado de Paiva et al. (2003).

A Figura 42 mostra o número de poços por faixa de profundidade para os Aquíferos Boa Viagem e Beberibe. Observa-se que, na maioria, os poços têm profundidade entre 80 e 120 metros.

As vazões no Aquífero Boa Viagem variam entre 2 m^3/h e 24 m^3/h, enquanto no Aquífero Beberibe, as vazões são bem maiores, atingindo até 120 m^3/h. A Tabela 6 mostra o resultado do levantamento das vazões dos aquíferos (PAIVA et al., 2003).

Figura 42 – Número de poços por faixa de profundidade para os Aquíferos Boa Viagem e Beberibe



Fonte: Paiva et al. (2003).

Tabela 6 – Vazões médias dos Aquíferos Boa Viagem e Beberibe

Aquífero Beberibe		Aquífero Boa Viagem	
N.º de poços	481,00	N.º de poços	13,00
Média (m^3/h)	49,24	Média (m^3/h)	12,94
Desvio padrão (m^3/h)	16,28	Desvio padrão (m^3/h)	7,650
Mediana (m^3/h)	49,50	Mediana (m^3/h)	14,70
Máxima (m^3/h)	120,00	Máxima (m^3/h)	24,00
Mínima (m^3/h)	3,50	Mínima (m^3/h)	1,64

Fonte: Adaptado de Paiva et al. (2003).

3.7 Gerenciamento de recursos hídricos do estado de Pernambuco

O gerenciamento de recursos hídricos pode ser assim definido:

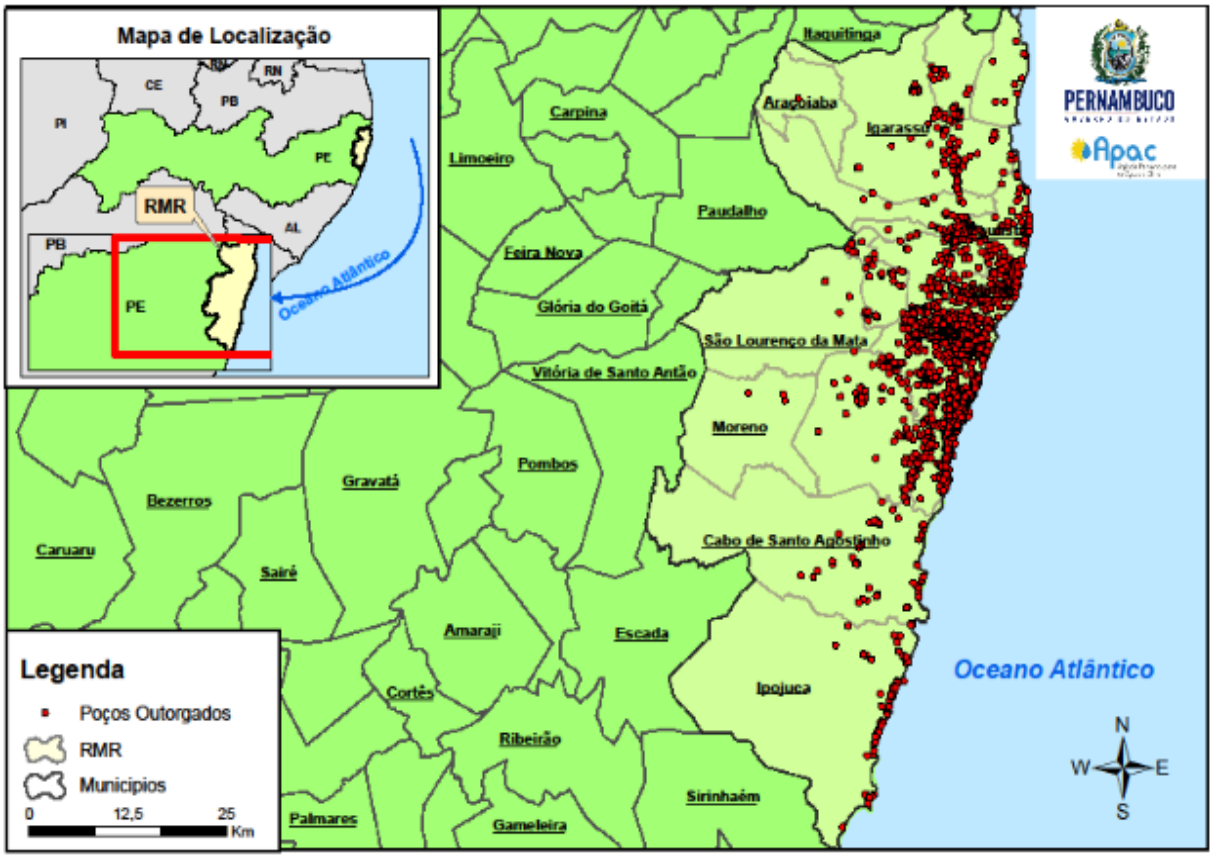
> o conjunto de ações que visam o aproveitamento múltiplo e racional dos recursos hídricos, com atendimento satisfatório de todos os usos e usuários, em quantidade e padrões de qualidade, assim como o controle, conservação, proteção e recuperação desses recursos com distribuição equânime dos custos entre os usuários e beneficiários. (BARTH, 1996, p. 124).

O Sistema de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SGRH) do estado de Pernambuco encontra-se fortalecido desde 2010 com a criação da Agência Pernambucana de Águas e Clima (Apac) pela Lei Estadual n.º 14.028, de 26 de março de 2010 (PERNAMBUCO, 2010), com a finalidade de executar a Política Estadual de Recursos Hídricos e regular o uso da água, e tendo como um de seus objetivos a análise dos projetos de captação apresentados pelos interessados de uso da água, com a possível emissão de outorga, o elemento balizador para a regulação de seu uso (APAC, 2013).

Em 2013, a Apac realizou o mapeamento das captações de água subterrânea por meio da inserção das coordenadas geográficas usando o programa ArcGIS. Tal georreferenciamento tanto facilita a visualização dos poços tubulares como disponibiliza as principais informações hidrogeológicas e de identificação de cada poço, auxiliando na gestão e monitoramento dos aquíferos.

A Figura 43 mostra a localização das captações de água subterrânea por meio de poços outorgados pela Apac na RMR.

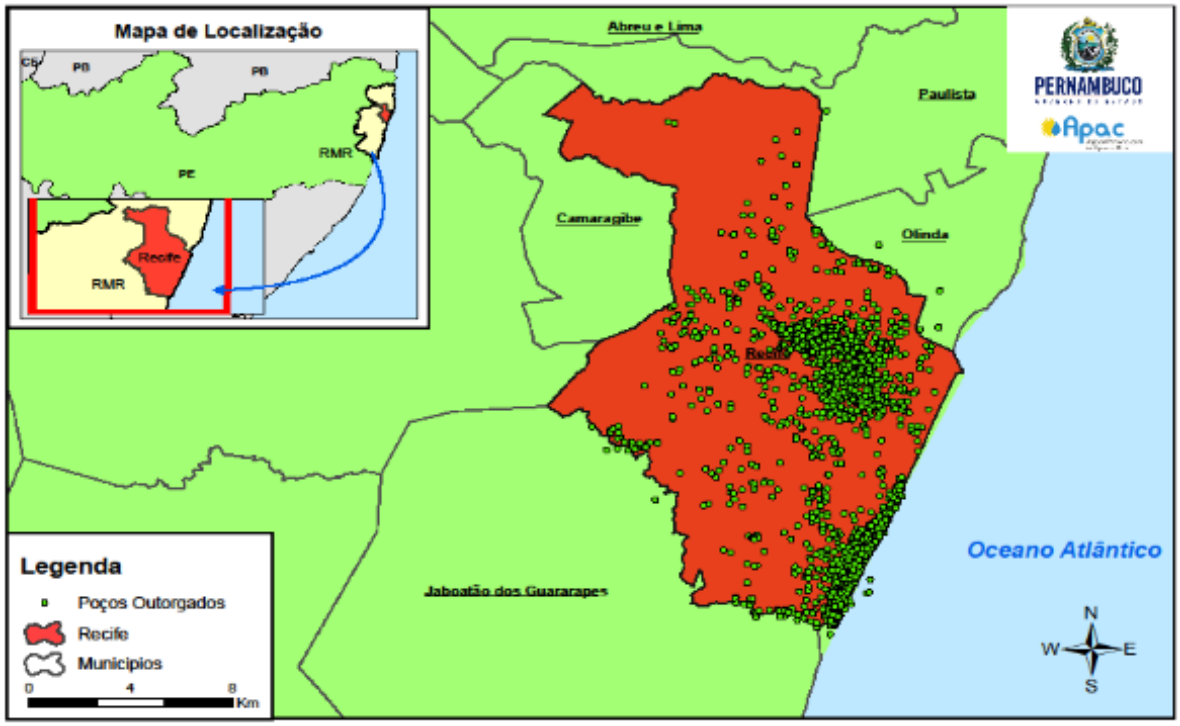
Figura 43 – Georreferenciamento de poços outorgados na RMR



Fonte: Apac (2013).

Na Figura 44, pode-se visualizar com mais clareza que as explotações de água subterrânea na cidade do Recife são mais evidentes (maior concentração) na zona norte e zona sul da cidade; especificamente nos bairros do Pina e de Boa Viagem, na zona sul, e os bairros de Casa Forte, Graças e Madalena na zona norte (APAC, 2013).

Figura 44 – Georreferenciamento de poços outorgados na cidade do Recife



Fonte: Apac (2013).

Com base nas características construtivas e operacionais dos poços tubulares da RMR, é possível observar as seguintes informações representadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Médias das características dos poços tubulares na RMR para cada aquífero

Aquíferos	Profundidade (m)	Diâmetro do Revestimento (pol.)	Nível Estático (m)	Nível Dinâmico (m)	Vazão (m^3/h)	Vazão Específica ($m^3/h/m$)
Boa Viagem	16,12	4	4,95	13,54	14,03	5,28
Barreiras	59,10	6	10,08	23,06	13,91	1,65
Beberibe	120,85	$4.^{1/2}$	31,50	45,87	17,59	2,45
Cabo	134,20	4,5	46,70	67,25	7,71	0,49
Fissural	30,28	$4.^{1/2}$	10,46	19,38	10,48	4,50

Fonte: Adaptado de Borba, Costa Filho e Mascarenhas (2010).

3.8 Situação da explotação das águas subterrâneas na RMR

Em Recife, principalmente em Boa Viagem e na área central (bairros de Ilha do Leite, Graças, Espinheiro e Aflitos), a exploração intensiva dos poços teve início na década de 1970 e aumentou bastante nos anos de 1993 a 1998 devido ao racionamento de água pela companhia pública de abastecimento. Os municípios de Recife e Olinda estiveram sob

colapso de abastecimento de água durante esse período. Em 1998 e 1999, intensificou-se a procura por água subterrânea, com a perfuração de inúmeros poços em condomínios, casas comerciais, shoppings, hospitais e indústrias. A captação desenfreada de águas subterrâneas vem comprometendo as reservas de aquíferos em várias regiões do Grande Recife, notadamente no Aquífero Cabo, em Boa Viagem.

Costa et al. (1998) constataram em seus estudos que os aquíferos da Planície do Recife vêm sendo superexplotados, pois de uma potencialidade da ordem de 50 milhões de metros cúbicos anuais, dos quais 13 milhões são drenados para os exutórios naturais, ainda vem sendo explotados cerca de 51 milhões de metros cúbicos anuais. Disso resultando um acentuado rebaixamento dos níveis potenciométricos, com depleção das reservas permanentes da ordem de 50% em trinta anos sugerindo, assim, a adoção de medidas restritivas à explotação de determinadas áreas, com proibição de novas perfurações por tempo indeterminado e controle das vazões a explotar em outras áreas. Para evitar a exaustão de mananciais subterrâneos, foram definidas áreas sujeitas à restrição de captação de água pela extinta SRH, cujas tarefas atualmente estão sendo desenvolvidas pela Apac, entidade fiscalizadora do uso dos recursos hídricos no estado de Pernambuco. O zoneamento de áreas explotáveis foi restrito a uma parte da RMR abrangendo total ou parcialmente os municípios de Recife, Jaboatão dos Guararapes, Camaragibe e Olinda, devido à concentração de informações na área selecionada.

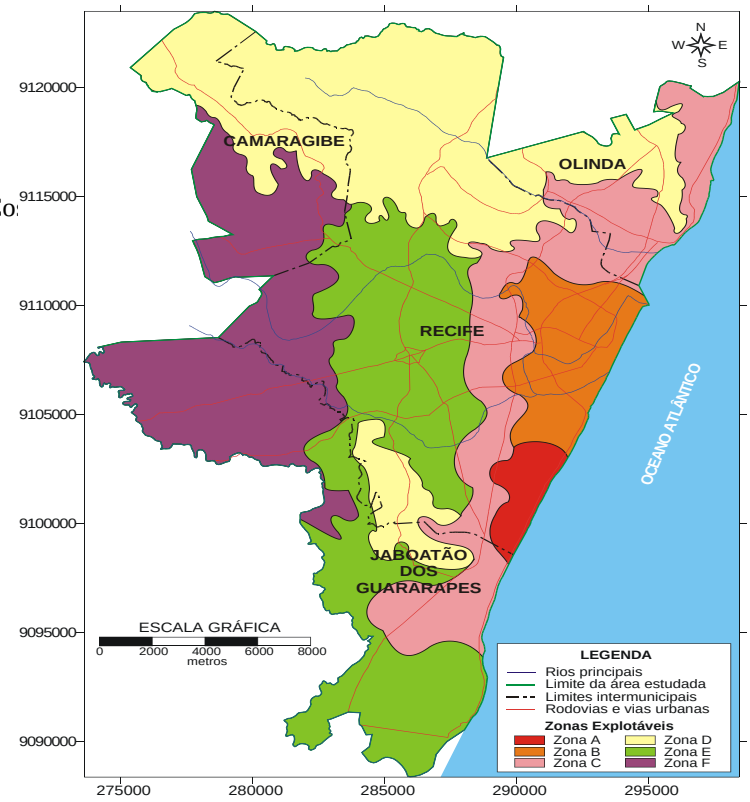
O Mapa de Zoneamento Explotável dos aquíferos da cidade do Recife é composto por três áreas de restrição (A, B, C), incluindo uma área de restrição maior à captação de águas subterrâneas, denominada Zona A, situado no bairro de Boa Viagem (COSTA et al., 1998). O Quadro 6 apresenta uma síntese do diagnóstico para cada zona de restrição, explicitadas no mapa da Figura 45.

Quadro 6 – Zonas de restrição e seus diagnósticos na RMR

ZONAS	DIAGNÓSTICO
A	Onde não poderão ser perfurados poços por tempo indeterminado
B	Onde os poços terão a vazão limitada, ficando a zona em constante vigilância quanto ao comportamento do nível potenciométrico
C	Onde não serão por enquanto limitadas as vazões, porém haverá um contínuo monitoramento do comportamento hidrogeológico.

Fonte: Adaptado de Costa et al. (1998).

Figura 45 – Mapa de localização do estado de Pernambuco, com destaque para a RMR e cidades vizinhas com seu zoneamento explotável



FUSO 25

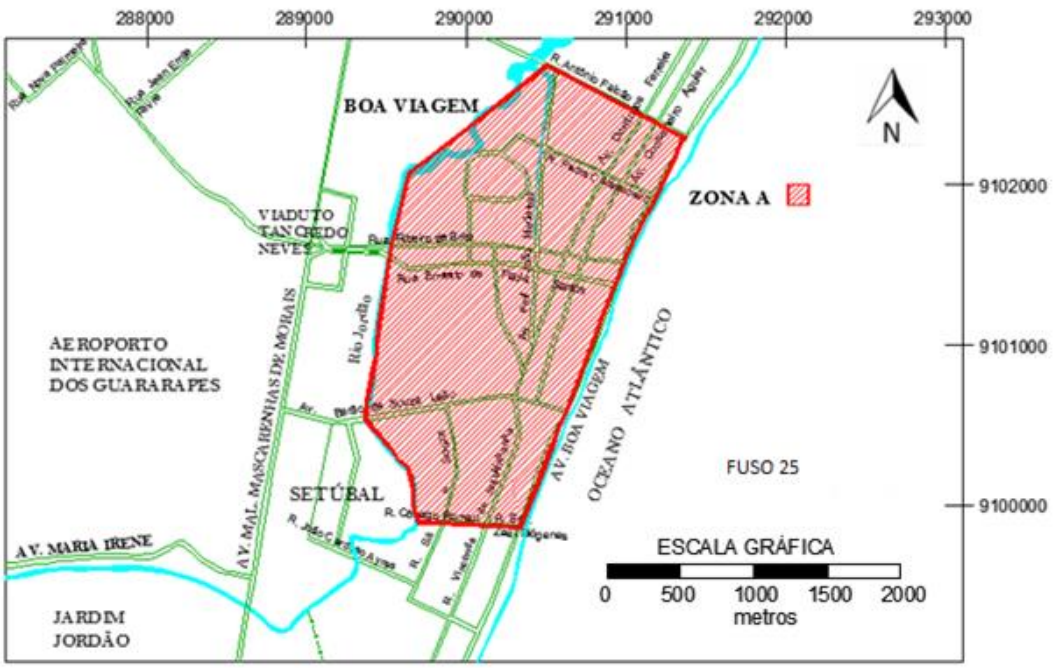
Fonte: Costa et al. (2002).

Esse zoneamento vem sendo aplicado pela Apac e pela Secretaria Executiva de Recursos Hídricos do governo do estado de Pernambuco, o órgão gestor dos recursos hídricos, criado pela Lei n.º 11.629, de 28 de janeiro de 1999, e estruturado pelo Decreto n.º 21.281, de 4 de fevereiro de 1999 (SILVA; MONTEIRO; FRANÇA, 1999).

A área escolhida para o estudo, apresentada nesta tese, encontra-se representada na zona A do mapa de zoneamento explotável, mostrado na Figura 45, pois representa a região mais crítica quanto ao rebaixamento da superfície piezométrica.

O mapa da Figura 46 mostra uma ampliação da área objeto desta pesquisa, sujeita a uma explotação demasiada de águas subterrâneas que resultou na restrição de perfuração de poços por tempo indeterminado, desde a década de 1990.

Figura 46 – Mapa de localização da área de estudo



Fonte: Adaptado de Pernambuco (1998).

A Zona A, que concentra em torno de 30% do déficit total da Planície do Recife em uma área correspondente a apenas 3% da área total da planície, é a que apresenta consequências mais graves da superexplotação, tais como rebaixamento do nível do aquífero em quase 100 metros (PERNAMBUCO, 1998).

Costa e Costa Filho (2004) destacam que foi observado um expressivo rebaixamento médio do Aquífero Cabo, na denominada Zona A, em Boa Viagem, conforme valores expressos na Tabela 8.

Tabela 8 – Rebaixamento do Aquífero Cabo na Zona A

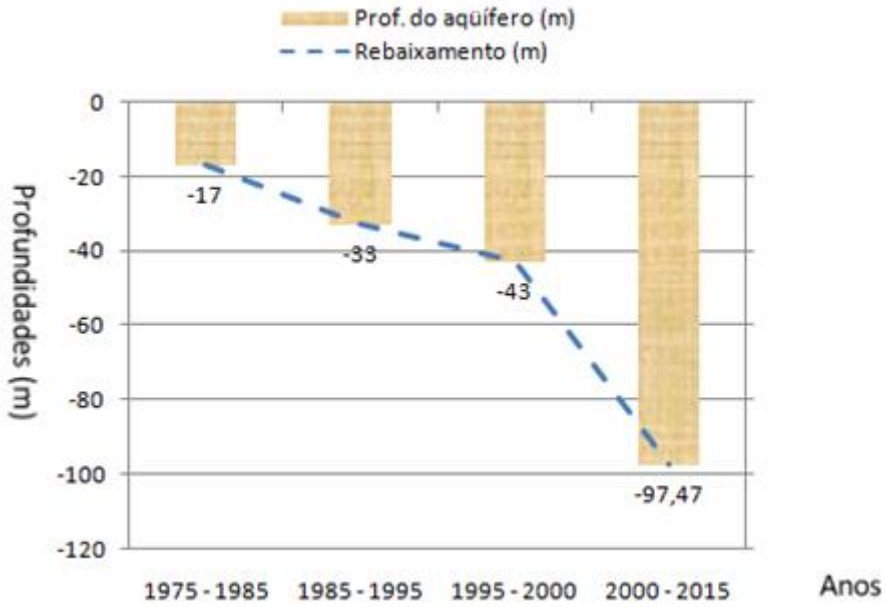
Período	Rebaixamento do aquífero
1975 a 1985	17 m
1986 a 1995	33 m
1996 a 2000	43 m
2001 a 2015	> 90 m

Fonte: Adaptado de Costa e Costa Filho (2004).

Computando-se todo o período da década de 1970 até os dias de hoje, a Zona A apresenta potencial de ocorrência de subsidência devido ao expressivo rebaixamento do lençol

d’água subterrâneo, que foi de mais de 90 m em quarenta anos. O gráfico da Figura 47 ilustra esse rebaixamento, o qual deu origem à chamada zona de restrição ou zona A.

Figura 47 – Rebaixamento do Aquífero Cabo na Zona A ao longo de quarenta anos



Fonte: Adaptado de Cabral e Montenegro (2004).

Costa e Costa Filho (2004) afirmam que a vazão total anual dos poços na região aumentou gradativamente, mas não na mesma proporção do aumento dos rebaixamentos.

Treze anos após o último levantamento, um novo estudo deve apontar as condições hidrogeológicas na RMR, cujo relatório estava com previsão para ser concluído até 2016. O trabalho encabeçado por pesquisadores da UFPE busca atualizar os níveis dos aquíferos subterrâneos, que ainda têm como grande vilão a perfuração indiscriminada de poços artesianos, no segmento comercial e residencial (informação verbal).[1]

A Tabela 9 apresenta a variação do nível potenciométrico em um poço com 120 m de profundidade, localizado na Zona A. O poço foi perfurado em 1992 e na época a profundidade do nível d’água era de 51 metros. Observa-se o rebaixamento do nível potenciométrico no poço e o inexpressivo efeito da recarga pela precipitação (variação ao longo do ano 2005).

[1] Informação prestada à pesquisadora em 24 de maio de 2015.

Tabela 9 – Variação da profundidade d'água em um poço na Zona A

Data (Mês – Ano)	Profundidade da água (m)
Janeiro 1992	51,00
Novembro 2003	84,86
Maio 2004	86,20
Janeiro 2005	92,95
Agosto 2005	97,47

Fonte: Adaptado de Montenegro, Cabral e Paiva (2009).

Além da redução da capacidade de resistência das camadas geológicas, pelo fato de os poros ficarem vazios com o bombeamento, houve um expressivo aumento de carga sobre o solo com a construção de centenas de prédios, alguns deles com mais de 30 pavimentos, ao longo de uma estreita faixa de solo entre o mangue e o oceano. Assim sendo, os esforços provocados pelas estruturas dos prédios aliados à retirada d'água subterrânea através de poços profundos podem agravar, também, o fenômeno da subsidência do solo na região estudada.

O cenário que se apresenta pode ser facilmente associado a outras localidades, conforme descrito por Yu Huang, Yang Yang e Jinglin Li (2015) ao falar sobre o caso da China. De acordo com os autores, em Shangai, a subsidência do solo vem tornando-se um problema cada vez mais sério em razão da combinação local de aumento na construção de edificações altas e consequentes escavações, construções subterrâneas e o excessivo bombeamento de água subterrânea. A solução para tentativa de controle do processo em Shangai, segundo afirmam Yu Huang, Yang Yang e Jinglin Li (2015), tem sido a adoção de diferentes métodos conforme a área da cidade, sendo a mais recorrente, a recarga artificial de água subterrânea.

De acordo com relatórios internos da Coordenação de Águas Subterrâneas (CAS) da Companhia Pernambucana de Saneamento (Compesa), o volume total de água subterrânea explotado em 2014, estimado para os municípios de Recife, Olinda, Paulista, Abreu e Lima, Igarassu, Itapissuma, Itamaracá e Goiana girou em torno de 5.307.928,64 m^3/mês, com uma vazão de aproximadamente 2,26 m^3/s, considerando-se apenas as captações da Compesa. Desse total, o município de Paulista apresentou o maior consumo: 1.432.458,72 m^3/mês, seguido pelo município do Recife, responsável por uma demanda de consumo mensal da ordem de 1.016.585,52 m^3.

3.9 Explotação de águas subterrâneas no bairro de Boa Viagem

A maior parte de água subterrânea da RMR é explotada por meio de poços particulares, e o volume extraído ainda é pouco conhecido (MANOEL FILHO, 2004). Infelizmente, essa realidade ainda persiste nos dias atuais, pois gestores na área de fiscalização da Apac, em entrevista ao Jornal *Folha de Pernambuco* (2015), afirmam que o controle sobre as obras clandestinas ainda é difícil, apesar de serem realizadas mais de 350 inspeções por ano (EXPLOTAÇÃO..., 2015). De acordo com Santos (2005), a quantidade de poços localizados no bairro de Boa Viagem, com dados de vazão, de acordo com informações do banco de dados do relatório HIDROREC II, totalizou um número de 374 poços em 2002 (Quadro 7), que, no entanto, representam apenas uma parcela do total de poços.

Quadro 7 – Informações sobre quantitativo de poços na zona sul

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

Fonte: Santos (2005).

Em maio de 2015, foi feita uma solicitação à Compesa (APÊNDICE A), cuja resposta enviada por e-mail (ANEXO B), disponibilizava uma planilha com informações sobre hidrômetros instalados na RMR.

Segundo planilha de dados da CAS/Compesa, para fins de cobrança dos esgotos, em Boa Viagem, existem 111 poços cadastrados, com hidrômetros instalados, responsáveis pela retirada de um volume mensal de águas subterrâneas da ordem de 44.254 m^3 para fins de uso doméstico e comercial, considerando-se o período de abril de 2015. O bairro de Boa Viagem, incluso na Zona A, não permite, desde 2003, a abertura de poços, cuja vazão dos já existentes está limitada em 50%. Essa redução, com relação ao quantitativo de poços com dados de vazão, considerando as informações de 2003 e de 2015, poderia ser atribuída a alguns fatores como falta de informações, fechamento dos poços por contaminação ou salinização ou até

mesmo pela exaustão deles. Esse quantitativo não implica, no entanto, que esses poços estivessem com hidrômetros instalados desde a época da ligação como mostra o Quadro 8.

Quadro 8 – Informações sobre instalação dos hidrômetros em Boa Viagem

ANO DE LIGAÇÃO	ANO DE INSTALAÇÃO DO HIDRÔMETRO
1985	2014
1986	2008 a 2015
1987	2009 e 2012
1989	2007 e 2013
1990	2013 e 2014
1991	2012
1995	2013
1996	2013
1997	2014
2004	2013
2007	2013

Fonte: Elaboração própria por meio de dados de planilha enviada pela CAS em 2015.

Analisando os dados informados pela CAS, apresentados no Quadro 8, pode-se perceber que, em destaque, existem poços que tiveram seu hidrômetro instalado quase trinta anos após a explotação de água deles. De um total de 98 poços ligados em 1986, desses poços 40 só tiveram seu hidrômetro instalado em 2013, ou seja, após vinte e sete anos. Esse fato aponta para uma realidade cujas consequências podem ser drásticas, uma vez que não se tem, ao certo, informações consistentes sobre a explotação dos mananciais subterrâneos praticada na área de estudo desta pesquisa, em uma visão micro do fenômeno da subsidência, menos ainda na ótica de uma visão macro quando se extrapola o problema para toda a RMR.

Porém, quanto a todas essas informações obtidas por esses relatórios disponibilizados pela Compesa, paira certa insegurança quanto à confiabilidade, uma vez que o interesse da concessionária gira em torno da arrecadação pela cobrança do esgotamento das águas explotadas dos poços. No entanto, esses quantitativos serviram apenas para ilustrar o panorama da utilização dos recursos hídricos subterrâneos disponibilizados até este momento de construção desta tese.

4 METODOLOGIA

Nesta seção, descrevem-se os experimentos realizados utilizando-se métodos geodésicos para investigação do fenômeno da subsidência, conforme foi explicitado no fluxograma da Figura 1. De acordo com o fluxograma, foram utilizados os dados de três campanhas de nivelamentos geométricos, realizados nos anos de 1958, 2012 e 2015, e também os dados de três campanhas utilizando-se a tecnologia GNSS, realizadas em 2013 e 2016. A descrição das investigações utilizando esses métodos geodésicos será mostrada nas seções a seguir.

4.1 Descrição das investigações de monitoramento da subsidência utilizando nivelamento geométrico de precisão

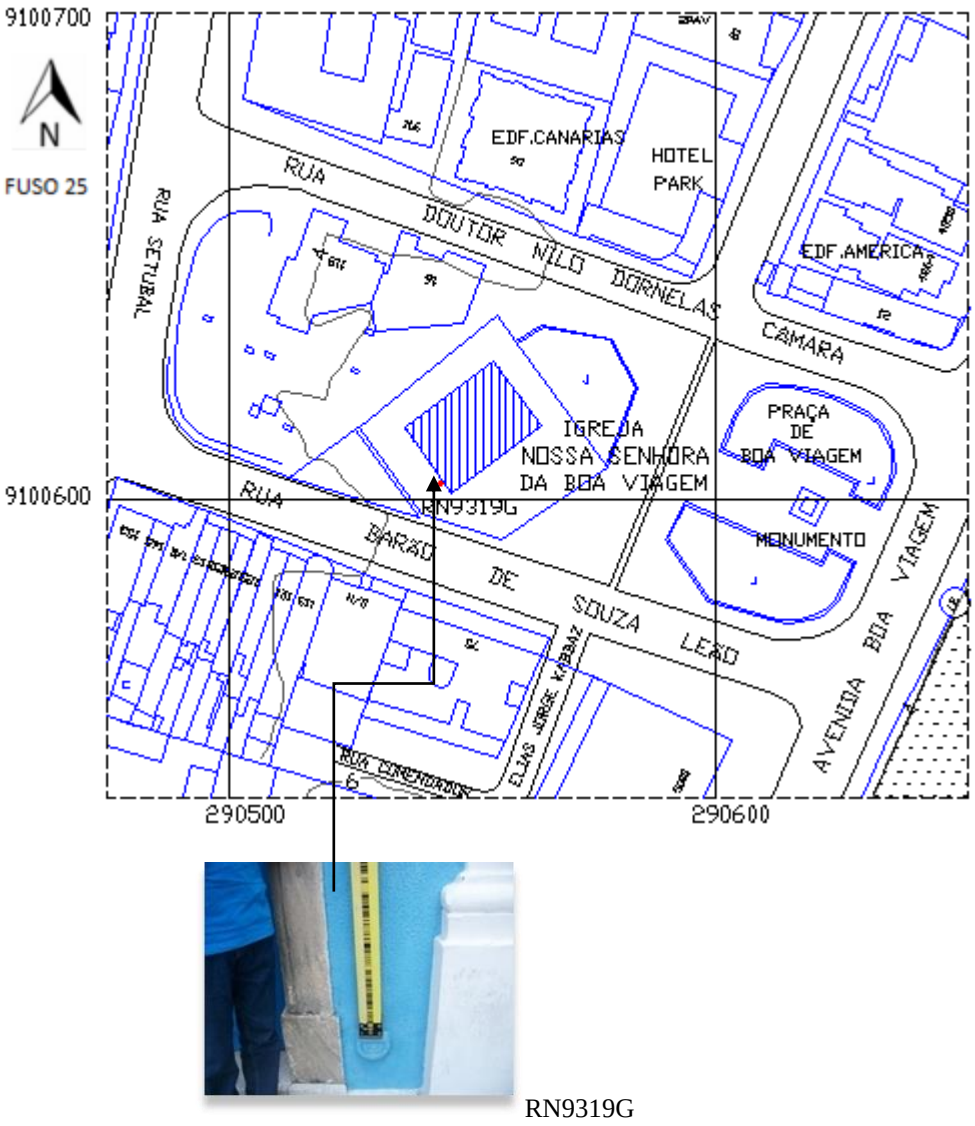
As investigações de subsidência do solo, devido à superexplotação de águas subterrâneas, em particular pela retirada de água por meio de poços profundos, utilizando o nivelamento geométrico de precisão, vêm sendo aplicadas na área costeira da Planície do Recife, no bairro de Boa Viagem, desde 2012. Visando verificar possibilidades de subsidência na Zona A (Figuras 45 e 46), foi realizado um estudo da variação do desnível ocorrido entre as Referências de Nível (RNNN) RN9319G e RN9319M (Figura 48), da Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP) do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB).

Figura 48 – RN9319G e RN9319M com coordenadas em SIRGAS2000

Fonte: Fotografias da autora, 2015.
(a) 8º07’55,68”S 34º54’03,54”W (b) 8º05’21,06”S 34º53’06,72”W

As Figuras 49 e 50 apresentam os mapas de localização da RN9319G e RN9319M, em coordenadas UTM, fuso 25, na escala 1:2000 em SIRGAS2000.

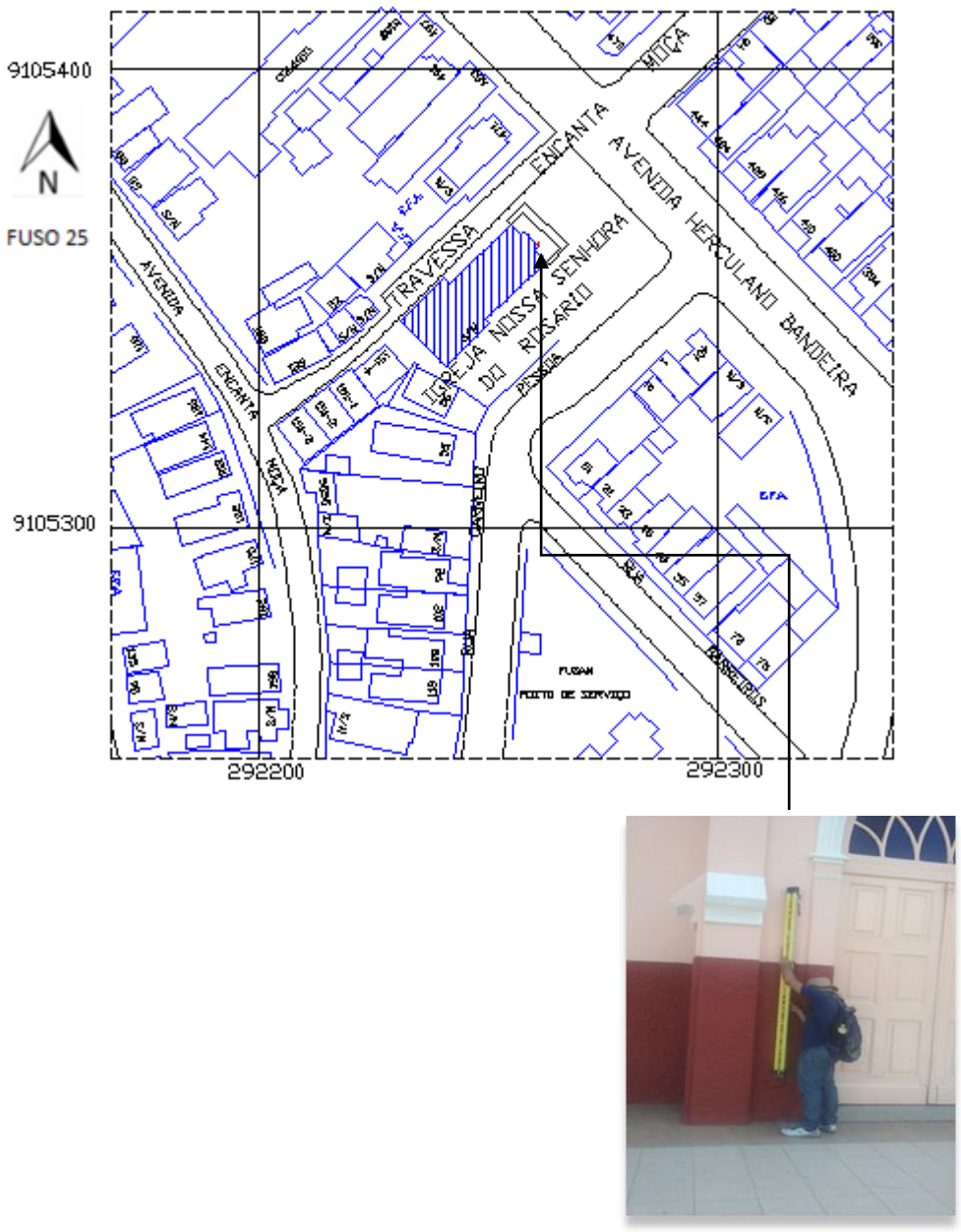
Figura 49 – Mapa de localização da Igreja de Nossa Senhora da Boa Viagem



RN9319G

Fonte: Elaboração própria, 2017.

Figura 50 – Mapa de localização da Igreja de Nossa Senhora do Rosário



Fonte: Elaboração própria, 2017.

Além dos extremos do trecho em análise, RRNN, outros pontos foram implantados para novos monitoramentos. Tais pontos receberam a denominação de BV12, BV13, BV14, BV15, BV16 e BV17 (Figura 51), sendo suas materializações realizadas frontalmente nos muros das edificações (Figura 52), chumbando-se uma placa identificadora e um parafuso (porca com rosca) que recebe, no momento da observação, um pino de aço inoxidável com extremidade esférica (Figura 53).

Figura 51 – Localização, em SIRGAS2000, dos pontos de monitoramento de subsidência nos muros dos prédios em Boa Viagem

(a) 8º7’48,29”S 34º54’03,96”W

(b) 8º07’44,07”S 34º54’01,89”W

(c) 8º07’10,72”S 4º53’44,19”W

(d) 8º07’06,45”S 34º53’45,90”W

(e) 8º07’24,85”S 34º53’50,89”W

(f)8º07’39,44”S 34º53’55,92”W

Fonte: Fotografias da autora, 2015.

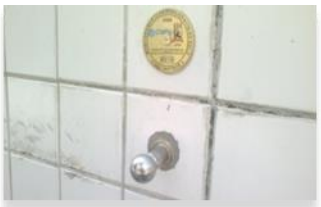
Figura 52 – Materialização dos pontos de monitoramento de subsidência

(a) Shopping Praia Sul – BV12
Av. Conselheiro Aguiar n.º 4880

(b) Edifício Costa Azul – BV13
Av. Conselheiro Aguiar n.º 4741

(c) Edifício Natália – BV14
Av. Navegantes n.º 1475

(d) Edifício Príncipe Alberto – BV15
Av. Conselheiro Aguiar n.º 3384



(e) Edifício Vitória Régia – BV16
Av. Navegantes n.º 993

(f) Edifício Coimbra – BV17
Av. Navegantes n.º 513

Fonte: Fotografias da autora, 2015.

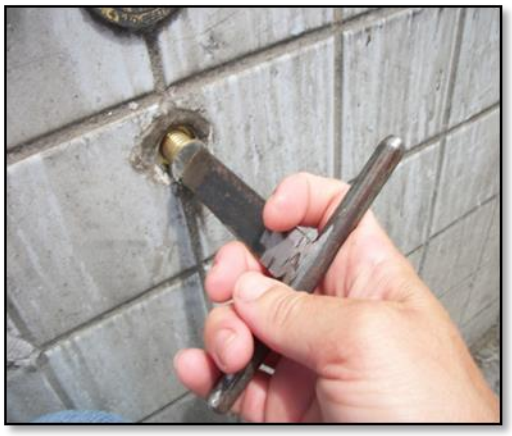
Figura 53 – Detalhe da materialização dos pontos

(a) Chapa identificadora, parafuso (porca com rosca) e pino.
Fonte: Fotografias da autora, 2015.

(b) Detalhe no momento da medição.

Diante da dificuldade encontrada no momento da retirada da proteção da rosca para colocação do pino no momento da medição, elaborou-se a chave “T” para facilitar a ação (Figura 54).

Figura 54 – Chave “T” para retirada da proteção da rosca no momento da colocação do pino



Fonte: Fotografia da autora, 2015.

A Figura 55 mostra o mapa de localização dos pontos de monitoramento implantados nas fachadas frontais dos muros dos prédios, bem como as RRNN das igrejas.

Figura 55 – Mapa de localização dos pontos de monitoramento de subsidência no muro dos prédios em Boa Viagem e as RRNN das igrejas

Fonte: Elaboração própria, 2017.

Para a fixação dos pinos e das chapas na fachada dos muros dos edifícios, elaborou-se uma carta ao síndico e aos condôminos de cada edifício (APÊNDICE B) solicitando a colaboração no sentido de permissão para instalação dos pinos e esclarecendo o fenômeno da subsidência e a necessidade de densificação dos pontos da rede de monitoramento de subsidência. Alguns dos edifícios visitados retornaram a resposta verbalmente por telefone,

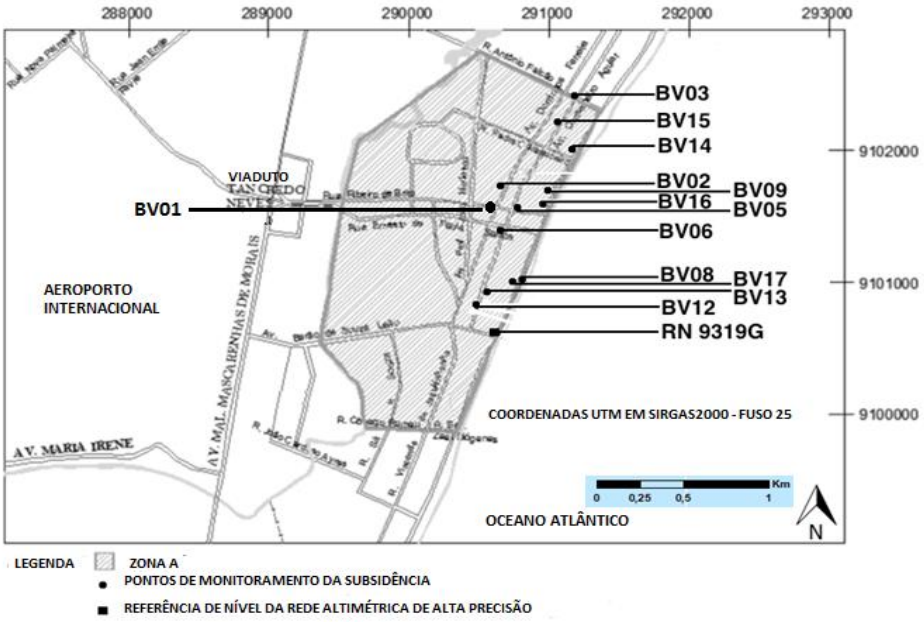
enquanto outros responderam na própria carta sinalizando o “de acordo”, conforme Anexos C e D. A opção de utilizar esse tipo de materialização ocorreu depois de experiências de materialização com pinos de ferro em caixas de concreto (Figura 56) nos calçamentos das vias públicas. Dos 10 pontos implantados por Santos (2005), restam apenas 2 marcos, cuja quantidade tornou-se inviável para o experimento.

Figura 56 – Detalhe da materialização dos pontos com pinos de ferro

Fonte: Fotografia da autora, 2015.

A Figura 57 mostra o mapa de localização dos pontos de monitoramento implantados nos calçamentos das vias públicas: BV01, BV02, BV03, BV05, BV06, BV08 e BV09 (APÊNDICES C, D, E, F, G, H, I).

Figura 57 – Mapa de localização dos pontos de monitoramento de subsidência implantados no calçamento das vias públicas



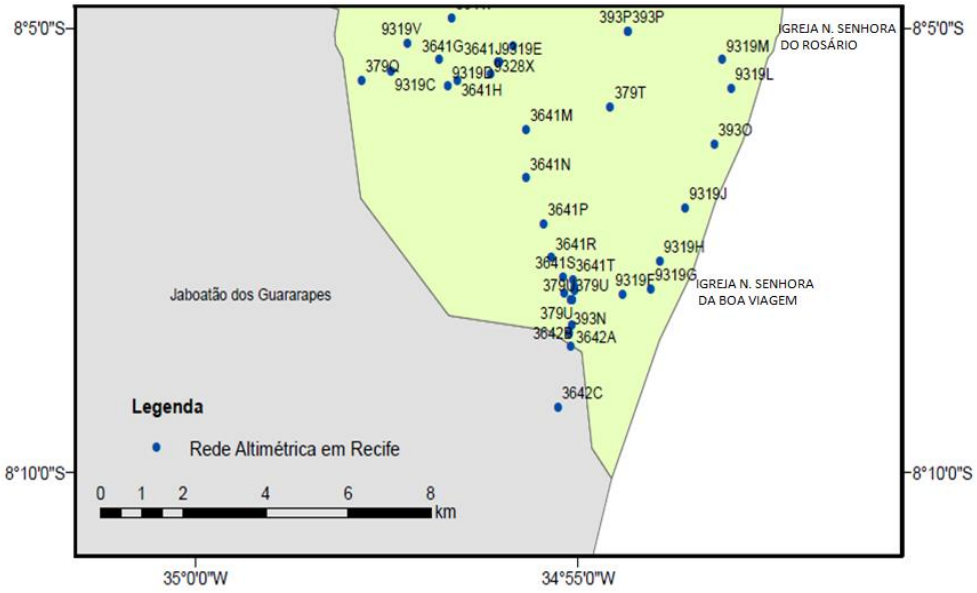
Fonte: Adaptado de Luna et al. (2017).

Para a implantação desses marcos, o Grupo de Recursos Hídricos (GRH) do Centro de Tecnologia e Geociências (CTG), Câmpus Recife da UFPE elaborou uma carta (APÊNDICE J) à Empresa de Manutenção e Limpeza Urbana (Emlurb), solicitando, em 2003, autorização para implantação dos 10 marcos. Em 20 de junho de 2003, o então diretor de Manutenção Urbana dessa empresa autorizou a implantação dos referidos marcos (ANEXO E). A abordagem tratada nesta tese levou em consideração a existência de dados provenientes de três nivelamentos geométricos de precisão, realizados nos anos de 1958, 2012 e 2015, descritos nos itens a seguir.

4.1.1 Campanha de nivelamento realizada em 1958

O nivelamento mais antigo foi realizado pela equipe do IBGE em 1958 e disponibilizado os dados brutos ao Departamento de Engenharia Cartográfica (Decart) da UFPE para fins de pesquisa da rede altimétrica do Recife (GARNÉS, 2016a, 2016b; SILVA, D. J., 2014). Esse nivelamento foi realizado em 5 e 6 de agosto de 1958, cujo circuito compreendeu as RRNN 9319G, 9319H, 9319J, 393O, 9319L e 9319M, conforme apresentado no mapa da Figura 58, cujas monografias encontram-se nos Anexos F, G, H, I, J, K. O instrumental utilizado foram níveis WILD N-3 com precisão de ± 0,2mm por quilômetro duplo de nivelamento e miras com fita de ínvar também de fabricação WILD (ALENCAR, 1968).

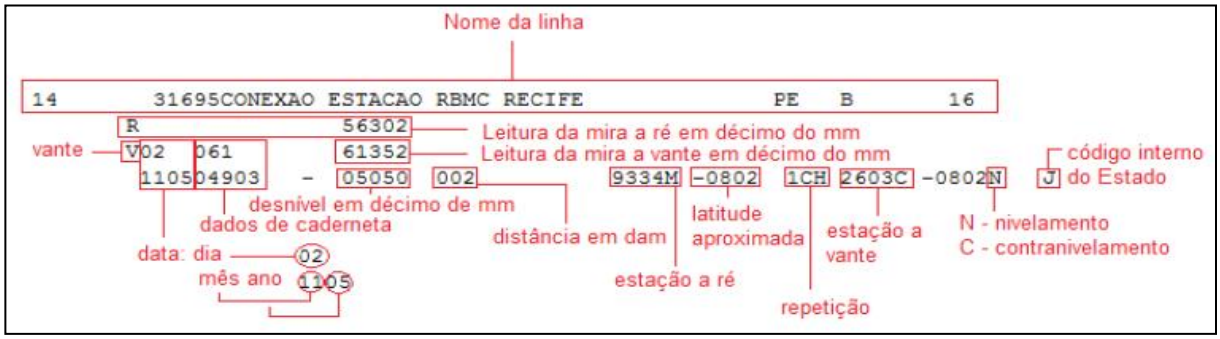
Figura 58 – Parte da Rede Altimétrica em Recife



Fonte: IBGE (2016b).

O desnível usando os dados originais fez-se necessário para dirimir dúvidas sobre diferenças com desníveis ajustados pelo IBGE, por exemplo, discrepância dos ajustamentos do: Ajustamento Altimétrico Global Preliminar (AAGP - 1992 a 2006) e RAAP (IBGE, 2011a) em relação aos nivelamentos realizados durante a pesquisa deste trabalho. A Figura 59 apresenta a forma organizacional da caderneta de nivelamento dos dados que compõem o acervo do banco de dados do IBGE e foram usados como referência inicial, o ano de 1958. As leituras de ré e vante referem-se a lances longos em que já tiveram os desníveis calculados, conforme indicação da distância em decâmetros.

Figura 59 – Esquema organizacional da caderneta de nivelamento do IBGE



Fonte: IBGE, 2016b.

Os nivelamentos para esta pesquisa (nivelamento e contranivelamento) ocorreram em 2012 e 2015, os quais serão descritos nas seções a seguir.

4.1.2 Campanha de nivelamento realizada em 2012

O nivelamento em 2012 realizou-se nos meses de janeiro e fevereiro, tendo sido utilizado um nível óptico da Topcon modelo AT-B2 (Figura 60a), 0,7 mm de precisão, classificado como nível de precisão muito alta, conforme Tabela 2, com placa plano-paralela, mira de alumínio, Figura 60b (a princípio com o intuito de comparação com a mira de ínvar), sapata de ferro (Figura 60c) e nível de cantoneira (Figura 60d). Partiu-se da RN9319M (ANEXO L) e chegou-se a RN9319G (ANEXO M), passando pelos pontos BV12, BV13, BV14, BV15, BV16 e BV17 (conforme mapa apresentado na Figura 55) materializados nos muros das edificações (APÊNDICES K, L, M, N, O, P) e por mais sete pontos, denominados: BV01, BV02, BV03, BV05, BV06, BV08, BV09, materializados com barras de ferro em

caixas de concreto nos calçamentos das vias públicas. A RN9319G mais os 13 pontos levantados, situam-se na Zona A e a RN9319M situa-se na Zona B, Figura 45.

Figura 60 – Equipamentos e acessórios utilizados no nivelamento da campanha 2012

(a) AT-B2 Precisão
Duplo nivelamento km: σ=0,7mm

b) Mira de alumínio

(c) Sapata de ferro.

(d) Nível de cantoneira.

Fonte: Adaptado de Luna et al. (2017).

4.1.3 Campanha de nivelamento realizada em 2015

O nivelamento em 2015 utilizando um nível digital DNA03, da Leica, 0,3 mm de precisão, classificado como nível de altíssima precisão, conforme Tabela 2, com mira de ínvar, leitura em código de barra, altura fixa de 2,0 m e nível de cantoneira (Figuras 61a e 61b), e sapata de ferro (Figura 61c), realizou-se nos dias 6 e 7 de dezembro de 2015. O percurso realizou-se em três linhas de nivelamento e contranivelamento:

a) a primeira partindo da RN9319M, localizada na Igreja Nossa Senhora do Rosário no Pina até o Supermercado Extra na Av. Domingos Ferreira em Boa Viagem;

b) a segunda partindo do Supermercado Extra na Av. Domingos Ferreira em Boa Viagem até o ponto BV15 no muro do Edifício Príncipe Alberto na Av. Conselheiro Aguiar;
c) a terceira partindo do ponto BV15 no muro do Edifício Príncipe Alberto na Av. Conselheiro Aguiar, passando pelos pontos materializados nos muros das edificações BV17, BV16, BV14, BV13, BV12 e finalizando na RN9319G, localizada na Igreja Nossa Senhora da Boa Viagem.

Figura 61 – Equipamentos e acessórios utilizados no nivelamento da campanha 2015

a) DNA03 Precisão Duplo nivelamento km: σ=0,3mm

Mira de ínvar

(b) Nível de cantoneira.

(c) Sapata de ferro.

Fonte: Adaptado de Luna et al. (2017).

Considerando-se as classificações apresentados no Quadro 4, com respeito aos experimentos realizados nesta pesquisa, os nivelamentos enquadram-se em levantamentos altimétricos de 1.ª ordem.

Para as correções do geopotencial, foram realizados os cálculos do não paralelismo segundo a formulação utilizada pelo IBGE na Equação 9 (IBGE, 2011a).

No cálculo de $C_{0,}$ para a seção nivelada entre as RN 9319M e RN 9319G, utilizou-se a Equação 10 e as latitudes e altitudes ortométricas mostradas na Tabela 10, as quais foram obtidas dos relatórios de estação geodésica nos Anexos L e M respectivamente.

Tabela 10 – Valores das latitudes e altitudes ortométricas

RN 9319G	RN 9319M
φ_m = -08° 07’ 56,00”	φ_m = -08° 05’ 21,00”
H = 4,6702 m	H = 3,3525 m

Fonte: IBGE (2016b).

O cálculo da correção C_0 obedeceu à sequência a seguir:

a) Cálculo da altitude média da seção nivelada:

$$H_m = \frac{(4{,}6702 + 3{,}3225)}{2}$$

$$H_m = 4{,}01135\text{m}$$

b) Cálculo da latitude média da seção nivelada:

$$\varphi_m = \frac{(-8°07'56{,}00'' - 8°05'21{,}00'')}{2}$$

$$\varphi_m = -08°06'38{,}50''$$

c) Cálculo da diferença de latitude entre os extremos da seção nivelada:

$\Delta\varphi$ = -08° 07’ 56,00” + 08° 05’ 21,00”

$\Delta\varphi$ = - 0° 02’ 35,00”

$\Delta\varphi_{rad} = -0{,}000751461$

Logo, utilizando-se os coeficientes do campo de gravidade normal:

C_1= 0,00533023655

C_2 = - 0,0000059

Substituindo-se os valores H_m = 4,01135m, φ_m = -08° 06’ 38,50” e $\Delta\varphi_{rad}$ = –0,000751461, tem-se:

$$C_0 = -0{,}00446mm$$

Os cálculos do nivelamento e contranivelamento passando pelos pontos de controle foram ajustados conforme erro de fechamento e proporcionais às distâncias niveladas. Para isso, foi utilizado o módulo de nivelamento geométrico do software AstGeoTop (GARNÉS, 2016b), que permite realizar mudanças de caminhamento, análise de precisão, perfis das seções niveladas e ajustamento proporcionais tanto para distâncias quanto para o número de pontos.

O ajustamento em pontos comuns é feito pela média das cotas do nivelamento e do contranivelamento, transformando o contranivelamento no mesmo sentido do nivelamento. A precisão (σ) foi calculada pela Equação 18.

4.2 Descrição das investigações de procedimentos técnicos utilizando receptores GNSS para a detecção do deslocamento da altura da antena inserida no bastão

Nesta seção serão descritos os três experimentos realizados, nesta pesquisa, para obtenção de dados GNSS. O objetivo geral desses experimentos é discutir a aplicabilidade do equipamento e da tecnologia GNSS, pelo método de posicionamento relativo estático, para detecção e monitoramento de pequenos deslocamentos verticais na superfície do solo.

Após duas campanhas de rastreio sem sucesso, uma realizada em 2009 e a outra em 2011, em que, com os receptores instalados em marcos colocados no solo, cercados por altos edifícios e embaixo de redes de alta tensão (Figura 62), os resultados das medições obtidas não possibilitaram uma boa acurácia, possivelmente pela degradação das observáveis. Avaliou-se, então, a aplicabilidade da tecnologia GNSS através de três simulações do fenômeno da subsidência, cujos experimentos foram realizados em 2013 e 2016.

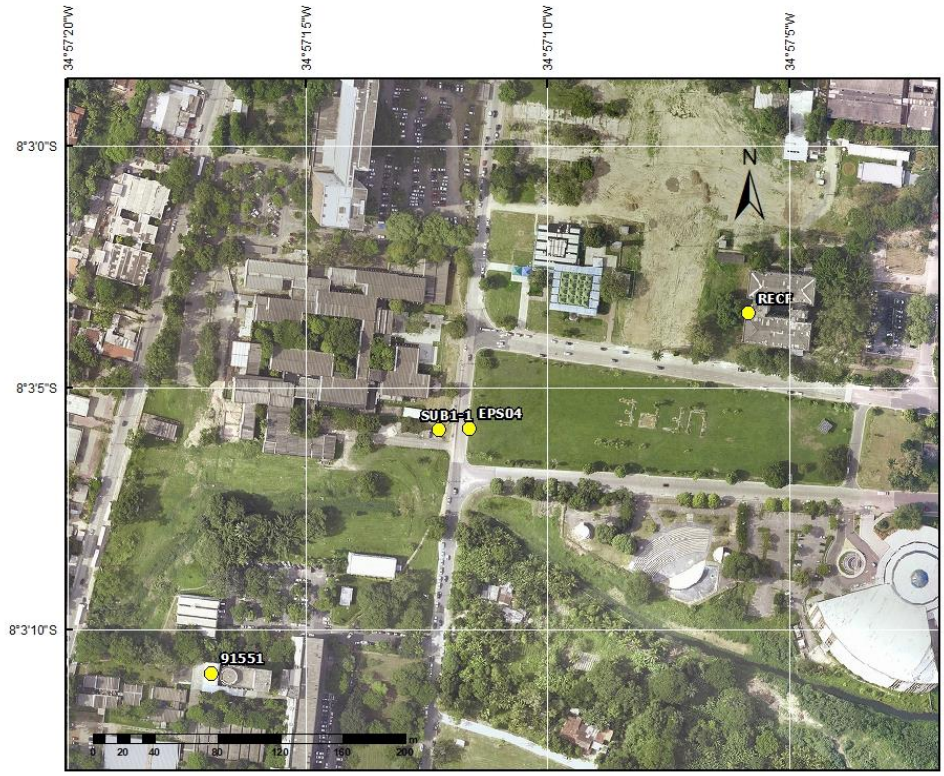
Figura 62 – Receptor cercado por altos edifícios e embaixo de rede de alta tensão

Fonte: Fotografia da autora, 2011.

4.2.1 Experimentação no Câmpus Recife da UFPE

Como rede de referência para o processamento dos dados GNSS, foram utilizados três pontos localizados no Câmpus Recife da UFPE: RECF (localizado na cobertura da Biblioteca Central do Câmpus Recife, conforme monografia apresentada no Anexo N, o ponto 91551 (localizado na cobertura do prédio de administração do Centro de Tecnologia e Geociências E (CTG) da UFP, conforme monografia apresentada no Anexo O, e um ponto (EPS-04) da rede geodésica do Câmpus Recife da UFPE. Esses pontos estão apresentados na Figura 63.

Figura 63 – Mapa com a localização da rede utilizada, Câmpus Recife da UFPE



Fonte: Elaboração própria.

Para simulação do fenômeno da subsidência, foi utilizado o ponto localizado entre os três marcos da rede de referência, denominado SUB1-1 (Figura 64) para a posição inicial da antena, cuja localização já foi explicitada no mapa da Figura 63.

Figura 64 – Receptor instalado no ponto de simulação de subsidência (SUB1-1), Câmpus Recife da UFPE

Fonte: Fotografia da autora, 2011.

O rastreio realizou-se em 22 de janeiro de 2013, no Câmpus Recife da UFPE em Recife. Foram utilizados um par de rastreadores GNSS da Topcon e um receptor GNSS Ashtech, todos com dupla frequência (L1 e L2); os receptores da Topcon rastrearam as constelações de satélites GPS e Glonass nos pontos SUB1-1 e 91551, enquanto o receptor Astech rastreou apenas a constelação GPS no ponto EPS-04, além do receptor da Trimble que rastreou o ponto RECF da RBMC (Figura 65).

Figura 65 – Receptores utilizados na rede local, Câmpus Recife da UFPE

a) 91551(receptor Topcon)

b) EPS-04 (receptor Astech).

c) RECF (receptor Trimble).

Fonte: Fotografia da autora, 2011.

O método de rastreio aplicado foi estático com duração de aproximadamente cinco horas. Para o ponto SUB1-1, no qual se simulou a subsidência, o tempo de rastreio foi de duas horas para cada uma das posições do bastão. O experimento consistiu em serem instalados inicialmente os receptores nas estações de referência 91551 e EPS-04, além da RECF, conforme o Quadro 9, com as informações de início e término do rastreio, tipo de receptor e altura da antena. Em seguida, instalou-se o receptor no ponto SUB1-1, fixado a um bastão de altura regulável. Inicialmente a altura do bastão foi regulada em 1,50 m, conforme mostra a Figura 66. O receptor permaneceu nessa posição por duas horas. Ao término dessa sessão, o receptor foi desligado, a altura foi alterada para 1,49 m (Figura 67) e iniciou-se uma nova

sessão, também com duração de duas horas. Para esta segunda posição do bastão, o ponto foi chamado de SUB1-2, conforme mostra o Quadro 10.

Quadro 9 – Informações das estações de referência

Estação	Alt. Antena (cm)	Início	Término	Receptor
91551	13,65	8h46 min	13h15min	Hiper (base)
EPS-04	0,00	9h2 min	13h15min	Ashtech
RECF	7,10	8h46 min	13h15min	Trimble

Quadro 10 – Informações do ponto de simulação da subsidência

Estação	Alt. Antena (m)	Início	Término	Receptor
SUB1-1	1,50	9h13 min	11h13min	Hiper (rover)
SUB1-2	1,49	11h15min	13h15min	Hiper (rover)

Figura 66 – Posição inicial do bastão (SUB1-1), Câmpus Recife da UFPE

Fonte: Fotografia da autora, 2013.

Figura 67 – Posição final do bastão (SUB1-2), Câmpus Recife da UFPE

Fonte: Fotografia da autora, 2013.

Santos (2005) afirma que os resultados obtidos para altitudes com tempos de observação variando entre 2, 4, 6, 8, 10, 12 e 24 horas tendem a se estabilizar com o aumento do tempo de observação quando comparados com uma solução padrão. A autora observa também que a discrepância média para o menor período de observação considerado, 2 horas, foi de 6 mm, o qual foi reduzido quase à metade com o acréscimo de 2 horas de observação e que a discrepância média da altitude estabiliza-se em torno de 3 mm para períodos de observação acima de 6 horas; no entanto, a metade dessa discrepância, ou seja, 1,5 mm, só é vista com aproximadamente 24 horas de observação.

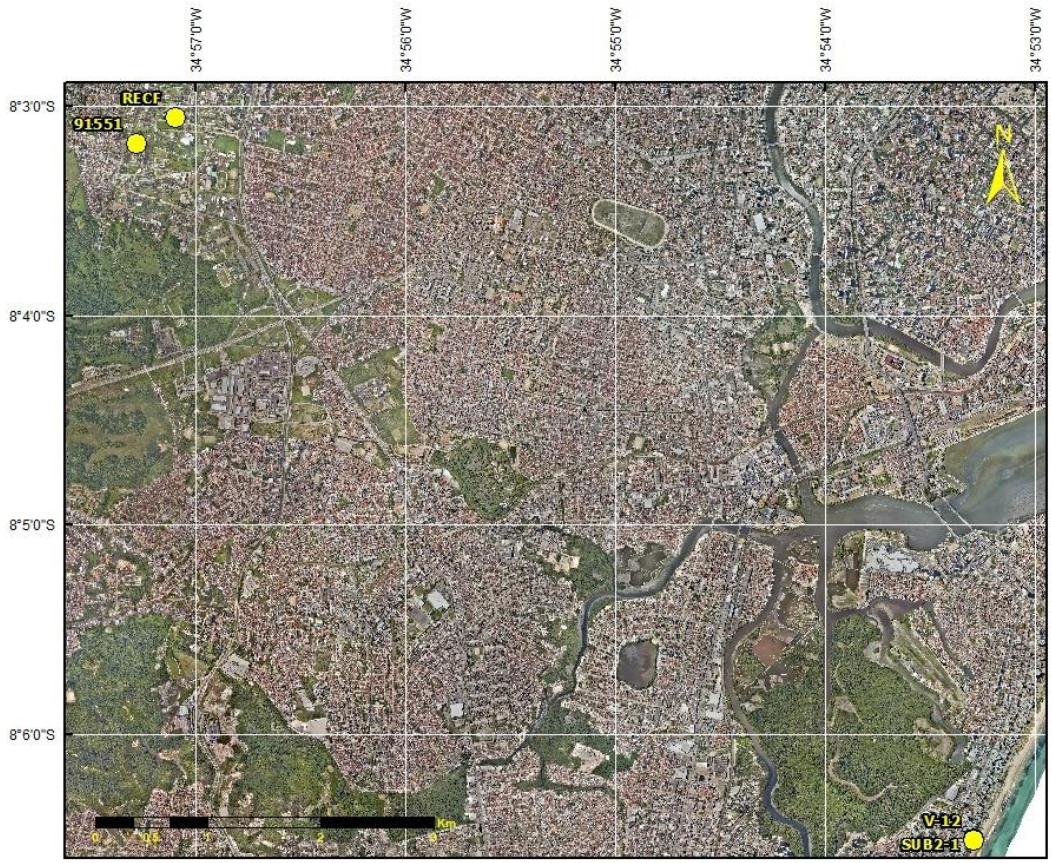
Para o processamento dos dados de rastreio, utilizou-se o software Topcon Tools versão 8.2, e os dados rastreados com os receptores Ashtech foram convertidos para o formato RINEX, para que pudessem ser processados com o mesmo *software*. Utilizou-se como ponto de referência fixa apenas a RBMC – estação de Recife (RECF) pertencente à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo –, por ter apresentado os melhores resultados. Os demais pontos serviram para oferecer estabilidade à configuração geométrica do experimento.

4.2.2 Experimentação na Praia de Boa Viagem

Como rede de referência para o processamento dos dados GNSS, foram utilizados três pontos, sendo dois localizados no Câmpus Recife da UFPE: RECF (na cobertura da biblioteca central do Câmpus), o ponto localizado na cobertura do prédio de administração do CTG

(91551) e um ponto da rede geodésica do SGB, o marco V-12 da Engefoto, próximo ao busto do Almirante Alfredo Carlos Dutra, em frente aos números 1998 e 1958, na Avenida Boa Viagem, conforme mapa apresentado na Figura 68.

Figura 68 – Mapa de localização da rede utilizada, Praia de Boa Viagem/Câmpus Recife da UFPE
UFPE



Fonte: Elaboração própria.

Para simulação do fenômeno da subsidência, utilizou-se o ponto SUB2-1, cuja localização já foi explicitada na Figura 68. O rastreio realizou-se em 30 de março de 2013, na Praia de Boa Viagem em Recife. Utilizou-se um par de rastreadores GNSS da Topcon e um receptor Ashtech, ambos com dupla frequência (L1 e L2). O receptor da Topcon rastreou as constelações de satélites GPS e Glonass, enquanto o receptor Astech rastreou apenas a constelação GPS, além do receptor da RBMC (Figura 65c). O método de rastreio aplicado foi estático com duração de aproximadamente cinco horas. Para o ponto SUB2-1, no qual simulou-se a subsidência, o tempo de rastreio foi de duas horas para cada uma das posições do bastão. O experimento consistiu em serem instalados inicialmente os receptores nas estações de referência 91551 e RECF. Em seguida, a equipe deslocou-se aproximadamente 9,5 km até

a praia e instalou os receptores nos pontos SUB2-1 e V-12, fixados a um bastão de altura regulável, distanciados entre si de aproximadamente 7,0 metros. Vale salientar a proximidade do ponto SUB2-1 de altos edifícios (Figura 69) e superfície do mar (Figura 70).

Figura 69 – Visualização da proximidade do ponto SUB2-1 aos altos edifícios na Praia de Boa Viagem e ao ponto V-12

Fonte: Fotografia da autora, 2013.

Figura 70 – Visualização da proximidade do ponto SUB2-1 à superfície do mar

Fonte: Fotografia da autora, 2013.

Inicialmente a altura do bastão foi regulada em 1,50 m, conforme mostra a Figura 71. Para essa posição o ponto foi chamado de SUB2-1. O receptor permaneceu nessa posição por duas horas. Ao término dessa sessão, o receptor foi desligado, a altura foi alterada para 1,49 m e iniciou-se uma nova sessão, também com duração de duas horas. Para esta segunda posição do bastão, o ponto foi chamado de SUB2-2 (Figura 72).

Figura 71 – Posição inicial do bastão (SUB2-1), Praia de Boa Viagem

Fonte: Fotografia da autora, 2013.

Figura 72 – Posição final do bastão (SUB2-2), Praia de Boa Viagem

Fonte: Fotografia da autora, 2013.

O Quadro 11 apresenta as informações de início e término do rastreio, tipo de receptor e altura da antena para as estações de referência e para o ponto de simulação da subsidência.

Quadro 11– Informações das estações de referência e do ponto de simulação da subsidência

Estação	Alt. Antena (m)	Início	Término	Receptor
RECF	7,1	7h32min	13h30min	Trimble
91551	16,55	7h36min	13h30min	Hiper (base)
V-12	2,00	8h23min	12h47min	Hiper
SUB2-1	1,50	8h40min	10h40min	Ashtech
SUB2-2	1,49	10h42min	12h2min	Ashtech

Fonte: Elaboração própria.

4.2.3 Experimentação no topo de quatro prédios no bairro de Boa Viagem

Em 2016, iniciou-se uma campanha GNSS usando receptores instalados em marcos que foram implantados no alto de quatro edifícios localizados no bairro de Boa Viagem. O Quadro 12 apresenta o nome dos marcos e endereço correlacionado com os edifícios.

Quadro 12 – Relação dos edifícios com respectivo endereço

ESTAÇÃO	EDIFÍCIO	ENDEREÇO
BV18	Brisa do Mar	Rua Dom José Lopes, n.º 573
BV19	La Vivance	Rua Sansão Ribeiro, n.º 99
BV20	Ciudad Real	Rua Poeta Zezito Neves, n.º 71
BV21	Equinócio	Av. Boa Viagem, n º 6688

Fonte: Elaboração própria.

O Quadro 13 apresenta informações com relação ao número de pavimentos de cada edifício e o respectivo tempo de construção até a data do experimento.

Quadro 13 – Número de pavimentos de cada edifício e o respectivo tempo de construção

ESTAÇÃO	EDIFÍCIO	N.º DE PAVIMENTOS E TEMPO DE CONSTRUÇÃO
BV18	Brisa do Mar	24 andares /8 anos
BV19	La Vivance	25 andares/6 anos
BV20	Ciudad Real	20 andares/12 anos
BV21	Equinócio	14 andares/38 anos

Fonte: Elaboração própria, 2017.

A escolha dos prédios foi feita considerando-se os seguintes aspectos:

a) acessibilidade (facilidade de acesso ao prédio em relação aos administradores dos condomínios;
b) apresentação de dois pontos (BV18 e BV19) dentro da área de rebaixamento crítico do lençol subterrâneo;
c) apresentação de dois pontos (BV20 e BV21) fora da área de rebaixamento crítico do lençol subterrâneo;
d) apresentação de condição de rastreio livre de obstrução, com máscara de elevação acima de 5°;
e) prédios com mais de cinco anos de construção.

A materialização dos marcos realizou-se por meio da colocação de uma chapa metálica, fixada à laje do edifício mediante cola (Figura 73), uma vez que a administração do condomínio não permitiu fixação utilizando furo na laje.

Figura 73 – Materialização dos marcos, com chapa metálica, no topo dos edifícios

Fonte: Fotografia da autora, 2016.

Para a fixação das chapas no topo dos edifícios, elaborou-se uma carta ao síndico e aos condôminos de cada edifício (APÊNDICES Q, R, S, T) solicitando a colaboração no sentido de permissão para instalação dos marcos e tecendo comentários a respeito do esclarecimento do fenômeno da subsidência e da necessidade de densificação dos pontos da rede de monitoramento de subsidência utilizando o topo dos edifícios. Os quatro condomínios concordaram plenamente, apenas fazendo ressalvas para não perfurar as lajes.

A localização dos marcos, distribuídos dentro e fora da área crítica com relação à explotação de águas subterrâneas, encontra-se no mapa da Figura 74.

Figura 74 – Mapa com a localização dos marcos no topo dos edifícios

Fonte: Elaboração própria.

Realizou-se o rastreio no dia 3 de agosto de 2016 utilizando-se em todos os pontos receptores Topcon de dupla frequência. Foram realizadas duas sessões, cujos dados de altura das antenas e tipo de receptor, além do intervalo de tempo em Universal Time Coordinated (UTC) de início e término do rastreio podem ser observados nos Quadros 14 e 15. Utilizou-se o método de rastreio estático.

Quadro 14 – Informações dos pontos de simulação da subsidência para a sessão 1 no topo dos edifícios

Estação	Alt. Antena (m)	Início	Término	Receptor
BV18	1,50	12h23min	18h30min	Hiper
BV19	1,50	13h11min	18h30min	Hiper
BV20	1,50	14h15min	18h29min	Hiper
BV21	2,00	15h40min	18h31min	Hiper

Fonte: Elaboração própria.

Quadro 15 – Informações dos pontos de simulação da subsidência para a sessão 2 no topo dos edifícios

Estação	Alt. Antena (m)	Início	Término	Receptor
BV18	1,49	18h36min	21h4 min	Hiper
BV19	1,49	18h36min	21h35 min	Hiper
BV20	1,49	19h19min	22h16 min	Hiper
BV21	1,98	18h36min	21h49 min	Hiper

Fonte: Elaboração própria.

Inicialmente, para a primeira sessão, os bastões foram regulados na altura 1,50 m para os receptores instalados nos marcos BV18, BV19 e BV20 e permaneceram nessa posição por aproximadamente seis horas, cinco horas e quatro horas respectivamente, devido à sequência de instalação dos receptores não ter sido realizada simultaneamente. Ao término dessa sessão, o receptor foi desligado, a altura foi alterada para 1,49 m e iniciou-se uma nova sessão, com duração de três horas para cada receptor.

Para o ponto BV21, inicialmente o bastão foi regulado em 2,00 m para o rastreio da primeira sessão, permanecendo nessa posição por um tempo de aproximadamente três horas. Após o término dessa sessão o receptor foi desligado, a altura alterada para 1,98 m (por causa do tipo de bastão utilizado nesse ponto) e iniciou-se uma nova sessão, também com duração de aproximadamente três horas. O tempo menor de rastreio para o BV21, na primeira sessão, deu-se em virtude desse ponto ter sido o último a ser instalado. Para a segunda sessão, o tempo de três horas para todos os quatro pontos foi proposital, uma vez que só não foi permitido pela administração dos condomínios dos edifícios a permanência no prédio após às 19h (equivalente às 22h no UTC).

A instalação dos receptores no alto dos edifícios pode ser visualizada na Figura 75 (BV18), Figura 76 (BV19), Figura 77 (BV20) e Figura 78 (BV21).

Figura 75 – Receptor instalado no ponto BV18 topo do Edifício Brisa do Mar

Fonte: Fotografia da autora, 2016.

Figura 76 – Receptor instalado no ponto BV19 topo do Edifício La Vivance

Fonte: Fotografia da autora, 2016.

Figura 77 – Receptor instalado no ponto BV20 topo do Edifício Ciudad Real

Fonte: Fotografia da autora, 2016.

Figura 78 – Receptor instalado no ponto BV21 topo do Edifício Equinócio

Fonte: Fotografia da autora, 2016.

Para o processamento dos dados de rastreio, com a finalidade de se obter informações considerando-se mais de uma fonte para obtenção das altitudes e possível registro das mudanças nas alturas das antenas, utilizaram-se os seguintes softwares e serviços:

a) Tools (comercial) versão 8.2.

b) AUSPOS (Online GPS Processing Service - Geoscience Australia), serviço *on-line* gratuito disponibilizado pelo governo Australiano que utiliza o software científico Berneese GNSS versão 5.2 para processamento dos dados GPS.

c) OPUS, serviço *on-line* gratuito disponibilizado pelo serviço geodésico nacional dos Estados Unidos para processamento de dados GNSS.

d) PPP (posicionamento por ponto preciso) disponibilizado *on-line* gratuitamente pelo IBGE o qual faz uso do aplicativo de processamento CSRS-PPP pelo Geodetic Survey Division of Natural Resources of Canada (NRCan).

De acordo com o IBGE (2017b), para receptores de duas frequências, como os que foram utilizados neste experimento, são esperados alguns desvios padrão, a depender do número de horas utilizadas no rastreio. A Tabela 11 mostra os desvios padrão esperados para um levantamento estático.

Tabela 11 – Desvios padrão esperados para um levantamento estático

Tipo de Receptor	Uma frequência		Duas frequências	
	Planimétrico (m)	Altimétrico (m)	Planimétrico (m)	Altimétrico (m)
Após 1 hora	0,450	1,000	0,030	0,050
Após 2 horas	0,300	0,800	0,015	0,025
Após 4 horas	0,200	0,500	0,006	0,015
Após 6 horas	0,180	0,400	0,004	0,010

Fonte: Adaptado do IBGE (2017b).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão descritos os resultados e a discussão a respeito das investigações de monitoramento da subsidência cuja subdivisão está organizada da seguinte forma. Em 5.1, apresentam-se e discutem-se os resultados provenientes do monitoramento utilizando-se o nivelamento geométrico de precisão.

Em 5.2, apresentam-se e discutem-se os resultados provenientes do monitoramento da subsidência quando da utilização da tecnologia GNSS mediante deslocamento controlado (simulação de subsidência) no Câmpus Recife da UFPE.

Em 5.3, estão os resultados e a discussão provenientes do monitoramento da subsidência quando da utilização da tecnologia GNSS por meio de deslocamento controlado (simulação de subsidência) na Avenida Boa Viagem, Praia de Boa Viagem.

Em 5.4, apresentam-se e discutem-se os resultados provenientes do monitoramento da subsidência quando da utilização da tecnologia GNSS por meio do deslocamento controlado (simulação de subsidência) no topo de quatro prédios localizados no bairro de Boa Viagem. Subdivide-se em quatro subseções de acordo com o processamento utilizado para obtenção dos resultados: em 5.4.1, utilizou-se o software Topcon Tools; em 5.4.2, o serviço *on-line* AUSPOS; em 5.4.3, o serviço *on-line* OPUS e em 5.4.4, utilizou-se o PPP.

5.1 Resultados das investigações de monitoramento da subsidência utilizando nivelamento geométrico de precisão

5.1.1 Resultados utilizando o nivelamento de precisão no ano de 1958: Nível WILD N-3 (Precisão ± 0,2mm/km)

O Quadro 16 apresenta o trecho da caderneta de nivelamento entre as RRNN em estudo e, conforme interpretação decodificada na Figura 57, corresponde aos trabalhos realizados nos dias 5 e 6 de agosto de 1958.

Quadro 16 – Trecho da caderneta de nivelamento do IBGE entre as RRNN 9319G e 9319M realizado em agosto de 1958

```
R              175500
       V05   04       181130
        085873211   -  05630  079      UCH 9319G        UCH 9319H      N   J
       R             116902
       V05   04       111252
        085873213   +  05650  079      UCH 9319G        UCH 9319H      C   J
       R             183506
       V05   01       183638
        085896503   -  00132  130      UCH 9319H        UCH 9319J      N   J
       R             184865
       V05   01       184719
        085896510   +  00146  130      UCH 9319H        UCH 9319J      C   J
       R             247331
       V05   01       251218
 163823 085896506   -  03887  173      UCH 9319J         CH  393O      N   J
       R             244484
       V05   01       240630
 163823 085896509   +  03854  173      UCH 9319J         CH  393O      C   J
       R             247514
       V06   01       251293
        085896513   -  03779  148       CH  393O        UCH 9319L      N   J
       R             251866
       V06   01       248101
        085896519   +  03765  148       CH  393O        UCH 9319L      C   J
       R             118941
       V06   01       118604
        085896515   +  00337  056      UCH 9319L        UCH 9319M      N   J
       R             117313
       V06   01       117655
        085896517   -  00342  056      UCH 9319L        UCH 9319M      C   J
```

Fonte: IBGE (2016b).

Os Quadros 17 e 18 ilustram como estavam as altitudes nessas duas RRNN do Ajustamento Altimétrico Global Preliminar – AAGP (1992-2006) disponíveis no acervo do banco de dados geodésicos do IBGE (2016b).

Quadro 17 – Parte da monografia da RN9319G

Estação	Município	Última visita	Situação do marco
RN9319G	Recife	8/4/2006	Bom
Dados Altimétricos			
Altitude ortométrica (m): 4,7562			
Fonte: Nivelamento geométrico			
Datum: Imbituba			
Data da medição: 5/8/1958			
Data cálculo: 1/12/1975			

Fonte: Adaptado do IBGE (2016b).

Quadro 18 – Parte da monografia da RN9319M

Estação	Município	Última visita	Situação do marco
RN9319M	Recife	11/5/2006	Bom
Dados Altimétricos			
Altitude ortométrica (m): 3,4460			
Fonte: Nivelamento geométrico			
Datum: Imbituba			
Data da medição: 6/8/1958			
Data cálculo: 1/12/1975			

Fonte: Adaptado do IBGE (2016b).

Os Quadros 19 e 20 ilustram como está atualmente a altitude nessas duas RRNN após o ajuste global da RAAP - Rede Altimétrica de Alta Precisão, disponíveis no acervo do banco de dados geodésicos do IBGE (2016b).

Quadro 19 – Parte da monografia da RN9319G: altitude atual

Estação	Município	Última visita	Situação do marco
RN9319G	Recife	8/4/2006	Bom
Dados Altimétricos			
Altitude ortométrica (m): 4,6702			
Fonte: Nivelamento geométrico			
Datum: Imbituba			
Data da medição: 5/8/1958			
Data cálculo: 15/6/2011			

Fonte: adaptado do IBGE (2016b).

Quadro 20 – Parte da monografia da RN9319M: altitude atual

Estação	Município	Última visita	Situação do marco
RN9319M	Recife	11/5/2006	Bom
Dados Altimétricos			
Altitude ortométrica (m): 3,3525			
Fonte: Nivelamento geométrico			
Datum: Imbituba			
Data da medição: 6/8/1958			
Data cálculo: 15/6/2011			

Fonte: Adaptado do IBGE (2016b).

O Quadro 21 apresenta o resultado do processamento da caderneta de nivelamento do IBGE, apresentado no Quadro 16, utilizando-se o software AstGeotop versão 2016, em que fica evidenciado um erro de fechamento de 1,8 mm em 5860 m, cuja precisão, conforme a Equação 2, é de 0,3 mm/km.

Quadro 21 – Relatório do processamento/ajustamento dos dados de 1958 do Quadro 16

Software AstGeoTop(2016): módulo nivelamento geométrico @ versão 2016.03.18

NIVELAMENTO	SEM AJUSTAMENTO	COM AJUSTAMENTO
ESTAÇÃO	ALTITUDE(m)	ALTITUDE(m)
9319M	3,3525	3,3525
9319L	3,3188	3,3185
393O	3,6967	3,6962
9319J	4,0854	4,0847
9319H	4,0986	4,0978
9319G	4,6616	4,6607

Número de Pontos ajustados Nivelamento = 5

CONTRANIVELAMENTO	SEM AJUSTAMENTO	AJUSTADAS
ESTAÇÃO	ALTITUDE(m)	ALTITUDE REDUZIDA(m)	AJUSTADA(m)
9319M	3,3629	3,3525	3,3525
9319L	3,3287	3,3183	3,3186
393O	3,7052	3,6948	3,6953
9319J	4,0906	4,0802	4,0809
9319H	4,1052	4,0948	4,0956
9319G	4,6702	4,6598	4,6607

Número de Pontos ajustados Contranivelamento = 5

AJUSTAMENTO COM VALORES MÉDIOS DOS PONTOS COMUNS

ESTAÇÃO	ALTITUDE NIV(m)	ALTITUDE CNIV(m)	MEDIA(m)
9319M	3,3525	3,3525	3,3525
9319L	3,3188	3,3183	3,3186
393O	3,6967	3,6948	3,6958
9319J	4,0854	4,0802	4,0828
9319H	4,0986	4,0948	4,0967
9319G	4,6616	4,6598	4,6607

Desnível entre 9319M e 9319G = 1,3082 m
Erro de fechamento = 0,0018 m => 1,8000 mm
Comprimento do circuito = 5860,00 m
Precisão = 0,372 mm/km

A Tabela 12 apresenta os desníveis e as respectivas discrepâncias entre as RRNN 9319G e 9319M pelas três fontes anteriormente citadas: nivelamento 1958 (processado com o software AstGeoTop), AAGP (1992-2006) e RAAP (IBGE, 2011a), mostrando que após o ajustamento da RAAP, a correção foi de aproximadamente 1 centímetro.

Tabela 12 – Discrepâncias dos desníveis entre as RRNN 9319M e 9319G

Descrição	**Niv. 1958**	**AAGP 2006**	**RAAP 2011**
Desnível RRNN 9319M para 9319G	1,3082 m	1,3102 m	1,3177 m
Discrepância	0,000 m (ref) *	0,0020 m	0,0095 m
Discrepância	-0,0020 m	0,000 m (ref) *	0,0075 m

* ref : Significa a RN usada como referência para calcular os desníveis para as demais.

No ajustamento da RAAP, levou-se em consideração o não paralelismo das equipotenciais. Assim, usando as latitudes das RRNN 9319G e 9319M (Figura 48) e as respectivas altitudes, nos Quadros 18 e 19, aplicando-se na Equação 10, obtém-se o valor de C_0 = 0,0044 mm, portanto valor negligenciável para o erro de fechamento e também para a ordem de incerteza obtida neste trabalho.

5.1.2 Resultados utilizando o nivelamento de precisão no ano de 2012: Nível AT-B2 Topcon (Precisão ± 0,7mm/km)

O Quadro 22 apresenta o resultado do processamento do nivelamento realizado com apenas os pontos de monitoramento. Foram omitidos os pontos auxiliares, pois o arquivo total consiste em mais de 350 linhas. O erro de fechamento entre o duplo nivelamento foi de 1,22 mm; o desnível ajustado entre as RN 9319G e RN 9319M foi de 1,2731 m, a precisão relativa foi de aproximadamente 0,3 mm/km.

Fazendo a análise nas altitudes do Quadro 22, entre o nivelamento e o contranivelamento reduzidos à mesma origem, percebe-se uma discrepância máxima no ponto BV01 de 1,09 cm, seguida pela BV02 com 8,6 mm, BV17 com 7,6 mm, BV15 com 7,1 mm e assim por diante. Então, quanto à qualidade do nivelamento, mesmo estando o erro de fechamento com 1,22 mm e precisão relativa na ordem de 0,3 mm/km, a incerteza que se tem chega a atingir a ordem do centímetro.

Quadro 22 – Relatório do ajustamento do nivelamento de 2012

```
Software AstGeoTop(2016): módulo nivelamento geométrico @ versão 2016.03.18

AJUSTAMENTO COM VALORES MÉDIOS DOS PONTOS COMUNS
ESTAÇÃO             ALTITUDE NIV(m) ALTITUDE CNIV(m) MEDIA(m)     Observação
-------------------------------------------------------------------
RN9319M                   3,3525       3,3525         3,3525       RN IBGE
BV03                      2,0609       2,0586         2,0598       Pino
BV14                      4,2439       4,2382         4,2410       Pino
BV15                      2,5446       2,5375         2,5411       Pino
BV02                      1,7140       1,7054         1,7097       Pino
BV01                      1,8455       1,8346         1,8400       Pino
BV09                      3,3907       3,3882         3,3895       Pino
BV16                      4,4803       4,4758         4,4780       Pino
BV05                      2,1826       2,1821         2,1824       Pino
BV06                      3,0003       2,9954         2,9979       Pino
BV08                      3,7819       3,7786         3,7802       Pino
BV17                      4,4536       4,4612         4,4574       Pino
BV13                      2,7278       2,7304         2,7291       Pino
BV12                      2,6468       2,6461         2,6464       Pino
RN9319G                   4,6262       4,6250         4,6256       RN IBGE
-------------------------------------------------------------------
Desnível entre RN9319M e RN9319G = 1,2731 m
Erro de fechamento = 0,0012 m     =>   1,2200 mm
Comprimento do circuito = 5560,00 m
Precisão = 0,254 mm/km
```

5.1.3 Resultados utilizando o nivelamento de precisão no ano de 2015: Nível DNA03 Leica (Precisão ± 0,3mm/km)

O Quadro 23 ilustra o resultado no nivelamento e contranivelamento juntando os três trechos do nivelamento de 2015 e processando de uma única vez no software AstGeoTop. Os pontos que receberam o símbolo (_) significa que a régua de ínvar foi colocada sobre a chapa de identificação do ponto, exemplo: BV15_, BV14_, BV17_, BV13_, BV12_. Os que estão sem o símbolo (_) foram medidos no pino e podem ser comparados diretamente com o nivelamento de 2012. Fazendo o cálculo das discrepâncias entre os valores obtidos pelo nivelamento e contranivelamento, Quadro 23, percebe-se que a máxima ocorreu no BV12 com 1,91 mm, seguida pelo BV13 com 1,84 mm, BV16 com 1,14 mm, BV14 com 0,73 mm e assim por diante. O erro de fechamento do circuito completo foi de -1,55 mm e a precisão relativa de acordo com a Equação 18 foi 0,329 mm/km. Então, quanto à qualidade do nivelamento, verifica-se, neste caso, uma incerteza na ordem do milímetro, erro inferior a 2 milímetros.

Quadro 23 – Relatório do ajustamento do nivelamento de 2015

```
Software AstGeoTop(2016): módulo nivelamento geométrico @ versão 2016.03.18
AJUSTAMENTO COM VALORES MÉDIOS DOS PONTOS  COMUNS
ESTAÇÃO             ALTITUDE NIV(m) ALTITUDE CNIV(m) MEDIA(m) observação
-------------------------------------------------------------------
RN9319M                  3,35250       3,35250        3,35250     RN IBGE
EXTRA                    2,72151       2,72114        2,72133     Pto Extsup
BV15_                    2,62883       2,62920        2,62901     Chapa
BV15                     2,54011       2,54025        2,54018     Pino
BV14                     4,24399       4,24326        4,24362     Pino
BV14_                    4,30925       4,30852        4,30889     Chapa
BV16                     4,47908       4,48022        4,47965     Pino
BV16_                    4,60039       4,60153        4,60096     Chapa
BV17                     4,45114       4,45158        4,45136     Pino
BV17_                    4,59736       4,59780        4,59758     Chapa
BV13                     2,72184       2,72368        2,72276     Pino
BV13_                    2,83930       2,84114        2,84022     Chapa
BV12                     2,64130       2,64321        2,64226     Pino
BV12_                    2,74730       2,74921        2,74826     Chapa
RN9319G                  4,62134       4,62289        4,62211     RN IBGE
-------------------------------------------------------------------
Desnível entre RN9319M e RN9319G = 1,26962 m
Erro de fechamento = -0,00155 m     =>   -1,55000 mm
Comprimento do circuito = 5559,74 m
Precisão = 0,329 mm/km
```

Utilizando as altitudes ajustadas dos nivelamentos do ano de 2012 e 2015, elaborou-se a Tabela 13, que é comparativa com o cálculo das discrepâncias entre altitudes médias nos pinos.

Tabela 13 – Comparação de discrepâncias entre os nivelamentos de 2012 e 2015

Nivelamento 2012				**Nivelamento 2015**			**Discre-pância**	
Ponto	Niv.	Cniv.	Média	Niv.	Cniv.	Média	mm	RN/Ponto
RN9319M	3,3525	3,3525	3,3525	3,35250	3,35250	3,35250	0,0000	RN IBGE
BV15	2,5446	2,5375	2,5411	2,54011	2,54025	2,54018	-0,9200	Pino
BV14	4,2439	4,2382	4,2410	4,24399	4,24326	4,24362	2,6200	Pino
BV16	4,4803	4,4758	4,4780	4,47908	4,48022	4,47965	1,6500	Pino
BV17	4,4536	4,4612	4,4574	4,45114	4,45158	4,45136	-6,0400	Pino
BV13	2,7278	2,7304	2,7291	2,72184	2,72368	2,72276	-6,3400	Pino
BV12	2,6468	2,6461	2,6464	2,64130	2,64321	2,64226	-4,1400	Pino
RN9319G	4,6262	4,6250	4,6256	4,62134	4,62289	4,62211	-3,4900	RN IBGE

Na Tabela 13, comparando-se as discrepâncias entre as altitudes dos pontos objeto, percebem-se sinais alternados BV14 e BV16 com sinal positivo e BV15, BV17, BV13 e BV12 com sinal negativo. Além disso, as discrepâncias estão com ordem inferior à incerteza

encontrada no nivelamento de 2012, ficando difícil afirmar que nesse período está ocorrendo subsidência.

A Tabela 14 mostra a diferença de nível entre as RRNN 9319M e 9319G e as respectivas discrepâncias, com base nos três levantamentos realizados: nivelamento de 1958, nivelamento de 2012 e nivelamento de 2015.

Tabela 14 – Discrepâncias dos desníveis entre as RRNN 9319M e 9319G com os dados de nivelamento IBGE 1958, nivelamento 2012 e nivelamento 2015

Descrição	Niv. 1958	Niv. 2012	Niv. 2015
Desnível RRNN 9319M para 9319G	1,3082 m	1,2731 m	1,2696 m
Discrepância	0,000 m (ref) *	-3,51 cm	-3,86 cm

* ref : Significa a RN usada como referência para calcular os desníveis para as demais.

Pelos dados de monitoramento disponíveis até o momento e supondo uma subsidência com variação linear para o trecho estudado, chega-se ao valor de velocidade do deslocamento vertical do solo de 0,68 mm/ano (38,6 mm/57 anos). Com a incerteza do último nivelamento realizado em 2015 (≅2 mm), seriam necessários pelo menos quatro anos para confirmações contemporâneas dessa subsidência, ou seja, entre 2019 e 2020.

5.2 Resultados das investigações de procedimentos técnicos utilizando receptores GNSS para a detecção do deslocamento da altura da antena inserida no bastão: simulação no Câmpus da UFPE

As informações relativas ao ponto de controle da RBMC em SIRGAS2000 e os resultados após o processamento dos dados estão explicitados na Tabela 15.

Tabela 15 – Resultados do deslocamento da altura da antena na simulação de subsidência no Câmpus Recife da UFPE

Ponto	Latitude	Longitude	Altitude Elipsoidal (m)	Desvio Padrão (m)
91551	08°03'10,89721" S	34°57'16,95435" W	49,213	0,003
SUB1-1	08°03'05,87946" S	34°57'12,24261" W	3,442	0,003
SUB1-2	08°03'05,87952" S	34°57'12,24271" W	3,434	0,003
RECF	08°03'03,46970" S	34°57'05,45910" W	20,180	0,002
EPS04	08°03'05,84152" S	34°57'11,62481" W	4,912	0,002

Comparando-se as alturas elipsoidais para os pontos SUB1-1 e SUB1-2, constata-se que a metodologia conseguiu detectar o deslocamento de 1 cm com uma incerteza de 2 mm, simulado para o ponto do experimento, com uma incerteza de ± 3 mm. Essa verificação foi feita considerando-se um baixo índice de obstrução para a área de estudo com valores de Position Dilution of Precision (PDOP) aceitáveis, abaixo de 2.

Os resultados desse experimento tenderiam a se estabilizar com um tempo de rastreio superior a 2 horas para cada uma das posições do bastão. A discrepância para o período de duas horas de rastreio foi de 2 milímetros.

5.3 Resultados das investigações de procedimentos técnicos utilizando receptores GNSS para a detecção do deslocamento da altura da antena inserida no bastão: simulação na orla da Praia de Boa Viagem

As informações relativas ao ponto de controle da RBMC em SIRGAS2000 e os resultados após o processamento dos dados estão expostos na Tabela 16.

Tabela 16 – Resultados do deslocamento da altura da antena na simulação de subsidência na Praia de Boa Viagem

Ponto	Latitude	Longitude	Altitude Elipsoidal (m)	Desvio Padrão (m)
91551	8°03'10,89163" S	34°57'16,9558" W	49,155	0,003
V-12	8°06'30,15868" S	34°53'17,3268" W	1,4612	0,000
SUB2_1	8°06'30,39827" S	34°53'17,3875" W	1,6064	0,0104
SUB2_2	8°06'30,39782" S	34°53'17,3881" W	1,5451	0,0309
RECF	8°03'03,46420" S	34°57'05,4607" W	20,1327	0,002

Comparando-se as altitudes elipsoidais para os pontos SUB2_1 e SUB2_2, constata-se que a metodologia, nessas condições, não conseguiu detectar o deslocamento de um centímetro, simulado para o ponto do experimento, indicando uma discrepância de 6 centímetros. Essa verificação foi feita considerando-se os valores apresentados na Tabela 16. Possivelmente, as observáveis foram degradadas afetando a qualidade do posicionamento. Além disso, deve-se observar que, com o aumento do comprimento da linha de base, aumentam também os cuidados necessários para se ter acurácia na altimetria, uma vez que pode ocorrer degradação nas observáveis, afetando a qualidade do posicionamento.

No experimento de simulação de subsidência, realizado na orla da Praia de Boa Viagem, em Recife, verificou-se que não foi possível detectar o valor de 1 cm simulado para o fenômeno, utilizando-se a mesma metodologia descrita neste trabalho aplicada no Câmpus Recife da UFPE.

Para tal experimento, a rede de referência utilizada para o processamento dos dados GNSS, composta por três estações, encontrava-se a uma distância de 9.500 m, aproximadamente, do ponto de simulação na orla de Boa Viagem, enquanto no experimento realizado no Câmpus Recife da UFPE, as linhas de base mediram pouco mais de 210 metros.

Além do aumento da linha de base, outro fator que pode ter afetado os resultados dessa simulação seria o fato de, ao longo dessa linha de base, existirem obstruções para os sinais GNSS devido à grande quantidade de edifícios, por ser essa uma área predominantemente urbanizada. A geometria dos satélites tem maior impacto quando o receptor GNSS é usado em áreas dessa natureza, já que a presença de obstrução pode provocar multicaminhos nos sinais enviados pelos satélites, diminuindo a acurácia do posicionamento.

5.4 Resultados das investigações de procedimentos técnicos utilizando receptores GNSS para a detecção do deslocamento da altura da antena inserida no bastão: simulação no topo dos prédios na Praia de Boa Viagem

Nesta seção serão apresentados os resultados com os diferentes tipos de softwares e serviços disponibilizados gratuitamente.

5.4.1 Processamento com *Topcon Tools* versão 8.2

O resultado do processamento para as linhas de base utilizando-se o software Topcon Tools versão 8.2 pode ser visto na Tabela 17.

Na Tabela 18, observam-se as diferenças de altitude entre as sessões 1 e 2 de cada estação monitorada, com exceção do ponto BV21, que, mesmo sendo processado com rede local, não foi possível detectar-se o deslocamento de 2 centímetros.

A estação BV19 foi utilizada como estação base por ter apresentado melhor resultado quando do processamento das linhas de base com a estação RECF.

Com exceção da estação BV21, em todas as outras estações, observou-se o deslocamento imputado de 1 cm, considerando-se uma rede local para o processamento dos dados GNSS conforme ilustrado nas Figuras 79 e 80.

Tabela 17 – Altitudes geométricas (elipsoidais) das estações no topo dos edifícios processadas com o software Topcon Tools

Estação	Latitude	Longitude	Altitude Elipsoidal (m)	Desvio Padrão (m)
BV18 (sessão 1)	8°07'36,40478”S	34°54'15,25879”W	84,540	0,001
BV18 (sessão 2)	8°07'36,40480”S	34°54'15,25879”W	84,531	0,002
BV19 (sessão 1)	8°07'51,39606”S	34°54'35,87741”W	88,955	0,001
BV19 (sessão 2)	8°07'51,39606”S	34°54'35,87741”W	88,945	0,001
BV20 (sessão 1)	8°06'44,08748”S	34°53'44,09484”W	58,041	0,002
BV20 (sessão 2)	8°06'44,08740”S	34°53'44,09482”W	58,031	0,003
BV21 (sessão 1)	8°08'49,90037”S	34°54'23,55971”W	52,405	0,002
BV21 (sessão 2)	8°08'49,90037”S	34°54'23,55971”W	52,391	0,003

Tabela 18 – Diferença entre as altitudes geométricas das estações no topo dos edifícios

Estação	Altitude Elipsoidal (m)	Diferença (m)
BV18 (sessão 1)	84,540	-0,009
BV18 (sessão 2)	84,531	
BV19 (sessão 1)	88,955	-0,010
BV19 (sessão 2)	88,945	
BV20 (sessão 1)	58,041	-0,010
BV20 (sessão 2)	58,031	
BV21 (sessão 1)	52,405	-0,011
BV21 (sessão 2)	52,391	

Figura 79 – Processamento com rede local: Sessão 1

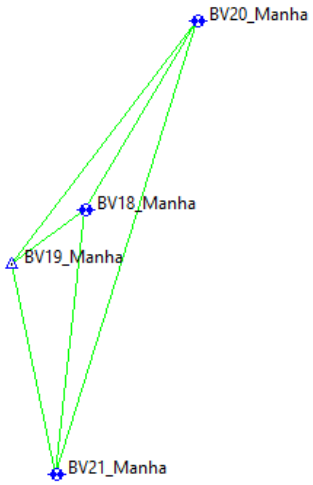
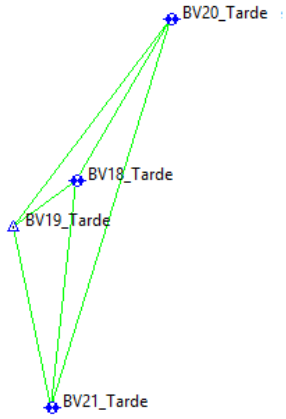


Figura 80 – Processamento com rede local: Sessão 2



A estimativa da rede ficou entre 3 mm e 4 mm, o que significa que, fazendo um monitoramento em longo prazo, pode-se estudar o fenômeno com rede local.

Nesses experimentos, verificou-se que, utilizando a tecnologia GNSS, é possível, com restrições, detectar-se deslocamentos verticais a partir de 1 cm desde que a área esteja livre de obstáculos e o tempo de rastreio seja de, no mínimo, duas horas.

5.4.2 Processamento com o serviço AUSPOS

A Tabela 19 apresenta os resultados do processamento da sessão 1 utilizando-se o serviço de processamento AUSPOS, que usou a rede de referência com 15 estações, escolhidas pelo próprio serviço, sem intervenção do usuário, mostradas no Quadro 24. A Tabela 20 apresenta os desvios padrão com 95% de confiança para o cálculo das coordenadas.

Tabela 19 – Resultado do processamento para a sessão 1 com o serviço AUSPOS

Estação	**Latitude**	**Longitude**	**Altitude Elipsoidal (m)**
BV18	-8°07'36,39858”	-34°54'15,26031”	84,472
BV19	-8°07'51,38981”	-34°54'35,87883”	88,895
BV20	-8°06'44,08109”	-34°53'44,09601”	57,972
BV21	-8°08'49,90037”	-34°54'23,55971”	52,355

Quadro 24 – Estações de referência utilizadas no processamento da sessão 1 com o serviço AUSPOS

Data/Hora	Estações rastreadas	Estações de referência					Tipo de órbita
3/8/2016 15h40min30	BV18, BV19, BV20, BV21	BOGT CRO1 PDEL	BRFT LPGS SBOK	BRMU MAS1 SFER	CHPI NKLG UNSA	CORD PARC WIND	IGS final

Tabela 20 – Resultado dos desvios padrão para o processamento da sessão 1 com o serviço AUSPOS

Estação	Latitude (m)	Longitude (m)	Altitude Elipsoidal
BV18	0,008	0,013	0,028
BV19	0,006	0,011	0,026
BV20	0,007	0,014	0,029
BV21	0,008	0,015	0,032

A Tabela 21 apresenta os resultados do processamento da sessão 2 utilizando-se o serviço de processamento AUSPOS, que utilizou a mesma rede de referência com 15 estações, escolhidas pelo próprio serviço, sem intervenção do usuário, mostradas no Quadro 25. A Tabela 22 apresenta os desvios padrão com 95% de confiança para o cálculo das coordenadas.

Tabela 21 – Resultado do processamento para a sessão 2 com o serviço AUSPOS

Estação	Latitude	Longitude	Altitude Elipsoidal (m)
BV18	-8°07'36,39840”	-34°54'15,26130”	84,424
BV19	-8°07'51,38974”	-34°54'35,88001”	88,838
BV20	-8°06'44,08090”	-34°53'44,09760”	57,905
BV21	-8°08'49,90033”	-34°54'23,56107”	52,287

Quadro 25 – Estações de referência utilizadas no processamento da sessão 2 com o serviço AUSPOS

Data/Hora	Estações rastreadas	Estações de referência					Tipo de órbita
3/8/2016 18h36min	BV18, BV19, BV20, BV21	BOGT CRO1 PDEL	BRFT LPGS SBOK	BRMU MAS1 SFER	CHPI NKLG UNSA	CORD PARC WIND	IGS final

Tabela 22 – Resultado dos desvios padrão para o processamento da sessão 2 com o serviço AUSPOS

Estação	Latitude (m)	Longitude (m)	Altitude Elipsoidal
BV18	0,012	0,026	0,064
BV19	0,010	0,026	0,053
BV20	0,010	0,026	0,057
BV21	0,009	0,025	0,053

Comparando-se as altitudes dos pontos de monitoramento para as duas sessões, observa-se que não foi possível detectar-se os deslocamentos imputados de 1 cm, como mostra a Tabela 23, mesmo sendo utilizada pelo serviço, a rede de referência ITRF2014.

Tabela 23 – Resultado das diferenças de altitude com o serviço AUSPOS

Pontos	Sessão 1 (m)	Sessão 2 (m)	Diferença (m)
BV18	84,472	84,424	0,048
BV19	88,895	88,838	0,057
BV20	57,972	57,905	0,067
BV21	52,355	52,287	0,068

5.4.3 Processamento com o serviço OPUS

A Tabela 24 apresenta os resultados do processamento da sessão 1 utilizando-se o serviço de processamento OPUS, que utilizou a rede de referência com 4 estações, escolhidas pelo próprio serviço, sem intervenção do usuário, mostradas no Quadro 26. A Tabela 25 apresenta os desvios padrão com 95% de confiança para o cálculo das coordenadas.

Tabela 24 – Resultado do processamento para a sessão 1 com o serviço OPUS

Estação	Latitude	Longitude	Altitude Elipsoidal (m)
BV18	-8° 7' 36,39867”	-34° 54' 15,26028”	84.487
BV19	-8° 7' 51,38981”	-34° 54' 35,87893”	88.904
BV20	-8° 6' 44,08129”	- 34° 53' 44,09634”	57.997
BV21	-8° 8' 49,90043”	-34° 54' 23,56009”	52.346

Quadro 26 – Estações de referência utilizadas
no processamento da sessão 1 com o serviço OPUS

Estações de referência	Tipo de órbita
CHPI UFPR SAVO BRFT	IGS final

Tabela 25 – Resultado dos desvios padrão para o processamento da sessão 1
com o serviço OPUS

Estação	Latitude (m)	Longitude (m)	Altitude Elipsoidal (m)
BV18	0,012	0,015	0,018
BV19	0,021	0,011	0,036
BV20	0,014	0,013	0,021
BV21	0,012	0,009	0,009

A Tabela 26 apresenta os resultados do processamento da sessão 2 utilizando-se o serviço de processamento OPUS, que utilizou a rede de referência com 5 estações, escolhidas pelo próprio serviço, sem intervenção do usuário, mostradas no Quadro 27. A Tabela 27 apresenta os desvios padrão com 95% de confiança para o cálculo das coordenadas.

Tabela 26 – Resultado do processamento para a sessão 2 com o serviço OPUS

Estação	Latitude	Longitude	Altitude Elipsoidal (m)
BV18	-8° 7' 36,39867”	-34° 54' 15,26013”	84,432
BV19	-8° 7' 51,38995”	-34° 54' 35,87874”	88,839
BV20	-8° 6' 44,08099”	-34° 53' 44,09608”	57,926
BV21	-8° 8' 49,90055”	-34° 54' 23,56121”	52,313

Quadro 27 – Estações de referência utilizadas no
Processamento da sessão 2 com o serviço OPUS

Estações de referência	Tipo de órbita
CHPI UFPR SAVO BRFT BRAZ	IGS final

Tabela 27 – Resultado dos desvios padrão para o processamento da sessão 2 com o serviço OPUS

Estação	Latitude (m)	Longitude (m)	Altitude Elipsoidal (m)
BV18	0,013	0,006	0,073
BV19	0,013	0,012	0,048
BV20	0,012	0,010	0,037
BV21	0,016	0,055	0,024

Comparando-se as altitudes dos pontos de monitoramento para as duas sessões, observa-se que não foi possível detectar os deslocamentos imputados de 1 cm, como mostra a Tabela 28, mesmo sendo utilizada pelo serviço, a rede de referência ITRF2014.

Tabela 28 – Resultado das diferenças de altitude com o serviço OPUS

Estação	Sessão 1 (m)	Sessão 2 (m)	Diferença (m)
BV18	84,487	84,432	0,055
BV19	88,904	88,839	0,065
BV20	57,997	57,926	0,071
BV21	52,346	52,313	0,033

5.4.4 Processamento PPP (IBGE)

A Tabela 29 apresenta os resultados do processamento da sessão 1 utilizando-se o serviço de processamento *on-line* PPP do IBGE, que obtém as posições dos pontos utilizando as observáveis da fase da onda portadora. A Tabela 30 apresenta os desvios padrão com 95% de confiança para o cálculo das coordenadas.

Tabela 29 – Resultado do processamento para a sessão 1 com o serviço PPP do IBGE

Estação	Latitude	Longitude	Altitude Elipsoidal (m)
BV18	-8° 07' 36,3984”	-34° 54' 15,2604”	84,454
BV19	-8° 07' 51,3897”	-34° 54' 35,8786”	88,855
BV20	-8° 06' 44,0810”	-34° 53' 44,0961”	57,957
BV21	-8° 08' 49,9002”	-34° 54' 23,5595”	52,304

Tabela 30 – Resultado dos desvios padrão para o processamento da sessão 1 com o serviço PPP do IBGE

Estação	Latitude (m)	Longitude (m)	Altitude Elipsoidal (m)
BV18	0,0011	0,0043	0,0073
BV19	0,0005	0,0022	0,0027
BV20	0,0006	0,0026	0,0032
BV21	0,0009	0,0035	0,0044

A Tabela 31 apresenta os resultados do processamento da sessão 2 utilizando-se o serviço de processamento *on-line* PPP do IBGE. A Tabela 32 apresenta os desvios padrão com 95% de confiança para o cálculo das coordenadas.

Tabela 31 – Resultado do processamento para a sessão 2 com o serviço PPP do IBGE

Estação	Latitude	Longitude	Altitude Elipsoidal (m)
BV18	-8° 07' 36,3980”	-34° 54' 15,2597”	84,450
BV19	-8° 07' 51,3896”	-34° 54' 35,8783”	88,832
BV20	-8° 06' 44,0806”	-34° 53' 44,0962”	57,925
BV21	-8° 08' 49,9001”	-34° 54' 23,5595”	52,267

Tabela 32– Resultado dos desvios padrão para o processamento da sessão 2 Com o serviço PPP do IBGE

Estação	Latitude (m)	Longitude (m)	Altitude Elipsoidal (m)
BV18	0,0039	0,0077	0,0169
BV19	0,0014	0,0030	0,0050
BV20	0,0011	0,0025	0,0052
BV21	0,0014	0,0024	0,0050

Comparando-se as altitudes dos pontos de monitoramento para as duas sessões, observa-se que não foi possível detectar-se os deslocamentos imputados de 1 cm, como mostra a Tabela 33.

Tabela 33 – Resultado das diferenças de altitude com o serviço PPP do IBGE

Estação	Sessão 1 (m)	Sessão 2 (m)	Diferença (m)
BV18	84,454	84,450	0,004
BV19	88,855	88,832	0,023
BV20	57,957	57,925	0,032
BV21	52,304	52,267	0,037

Observando-se os desvios padrão explicitados nas Tabelas 30 e 32 e comparando-se com os parâmetros apresentados na Tabela 11, percebem-se desvios satisfatórios para um levantamento estático; porém, ao analisar a Tabela 33, pode-se afirmar que o processamento não correspondeu às espectativas do deslocamento imputado às antenas, uma vez que, com excessão do marco BV18, os demais apresentaram uma discrepância superior a 1 centímetro.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 Conclusões

Existem poucos registros ou relatos de subsidência devido à explotação de águas subterrâneas no Brasil. Na Planície do Recife, até este ano de 2017, ainda não foi detectado nenhum registro, o que não significa que o fenômeno não esteja ocorrendo. Nesta pesquisa, realizou-se um estudo no trecho entre a Igreja de Nossa Senhora da Boa Viagem, no bairro de Boa Viagem e a Igreja de Nossa Senhora do Rosário no bairro do Pina. Nesse trecho está inserida a Zona A, considerada como de alta explotação de águas subterrâneas com rebaixamento real do nível piezométrico em até 100 metros.

Esta tese apresentou abordagens metodológicas que foram utilizadas para as investigações no monitoramento de subsidência do solo, envolvendo o nivelamento geométrico de precisão e o posicionamento GNSS. Nela, para comprovar se houve subsidência, foram utilizados dados de nivelamento geométrico de 1.ª ordem do IBGE, datado de 1958, e dados de nivelamento geométrico de precisão realizados por equipes do Decart em parceria com o Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da UFPE nos anos de 2012 e 2015, conforme descrito nas seções 4.1 e 5.1 desta tese.

A metodologia desenvolvida para os nivelamentos em 2012 e 2015 consistiu na realização de nivelamentos geométricos de precisão entre as RRNN 9319G e 9319M, localizadas nas igrejas dos bairros de Boa Viagem e Pina respectivamente. Fez-se, então, uma comparação entre os desníveis nessas RRNN medidos nos anos de 1958, 2012 e 2013. Com base nos resultados encontrados, levando-se em consideração a metodologia aplicada, chegou-se a uma subsidência com velocidade de deslocamento vertical do solo de 0,68 mm/ano (38,6 mm em cinquenta e sete anos). Se essa velocidade fosse linear e constante, em quinze anos, a área em estudo poderia apresentar um descolamento de aproximadamente 10 milímetros.

Tratando-se do monitoramento por meio do posicionamento GNSS, nesta tese desenvolveram-se três experimentações de investigações de procedimento técnico para a detecção do deslocamento da altura da antena inserida no bastão, conforme descrito nas seções 4.2, 5.2 e 5.3. O método de posicionamento utilizado foi o relativo estático. Em relação aos experimentos realizados, a metodologia adotada envolveu a coleta de dados em duas sessões variando aproximadamente de duas até seis horas de coleta. As altitudes obtidas em cada sessão foram analisadas para verificar se o deslocamento inputado às antenas havia sido

registrado. Essas investigações revelaram, nos resultados obtidos, que é possível se detectar deslocamentos verticais a partir de 1 cm desde que a área esteja livre de obstáculos e o tempo de rastreio seja de, no mínimo, duas horas, utilizando-se no processamento dos dados uma rede local, com linhas de base curtas, no valor de aproximadamente 220 m para a simulação realizada no Câmpus Recife da UFPE, e variando entre 780 m e 2.600 m, para a simulação realizada no topo dos edifícios na Praia de Boa Viagem. Para linhas de base maiores, em torno de 9.400 m, como foi o caso da simulação na Praia de Boa Viagem, com os receptores instalados no solo, o experimento não funcionou.

Com a finalidade de comparação, foram realizadas análises com a utilização de diferentes softwares no processamento dos dados GNSS. Aplicou-se nesta tese o seguinte software e serviços *on-line* respectivamente: Topcon Tools, AUSPOS, OPUS e PPP. Nesta tese, as soluções satisfatórias, para os experimentos com a tecnologia GNSS, foram obtidas apenas com a utilização do software comercial Topcon Tools.

A grande contribuição desta tese foi apresentar metodologias para a determinação da subsidência do solo, em região de explotação de aquíferos na plnície costeira da cidade do Recife em Pernambuco, mediante a realização de nivelamentos geométricos de precisão e realização de posicionamento relativo estático via GNSS. Outra grande contribuição foi a disponibilização de uma rede geodésica de seis pontos implantados na fachada de muros no bairro de Boa Viagem e de quatro pontos implantados no topo de quatro edifícios no mesmo bairro.

6.2 Recomendações

Há algum tempo, a ideia de bombeamento sustentável de águas subterrâneas analisava apenas quanto poderia ser bombeado indefinidamente de um aquífero; no entanto, o conceito atualizado de sustentabilidade do uso dos aquíferos requer que sejam levadas em conta as influências sobre os ecossistemas e o meio ambiente em sua totalidade. A aplicação desse conceito atual de sustentabilidade deve requerer que sejam considerados os riscos de subsidência (CABRAL SANTOS; PONTES FILHO, 2006).

O monitoramento da subsidência na Planície do Recife, sugerido nesta tese, contribui para o gerenciamento haja vista que fornece subsídios na tomada de decisões que sejam úteis, para evitar consequências negativas, por exemplo: rachaduras em pavimentos, fissuras em prédios, dificuldades de escoamento das águas pluviais e, em casos mais extremos, o alagamento de áreas baixas na ocasião das marés altas com chuva e marés de sizígia.

Considerando-se os estudos realizados com respeito à diminuição dos níveis de água subterrânea na Planície do Recife, faz-se necessário continuar e aprimorar o monitoramento, nessas áreas, para detecção dos deslocamentos verticais da superfície do solo. Para isso, devem ser usados não somente os levantamentos geodésicos como o nivelamento geométrico de alta precisão, mas também outras metodologias para fins comparativos de investigação como o posicionamento GNSS.

No entanto, não é tão fácil o uso da tecnologia GNSS para detecção do fenômeno da subsidência, principalmente quando a velocidade de deslocamento do solo é da mesma ordem de grandeza que a precisão obtida com o equipamento. Além disso, outros fatores também contribuem para a subsidência do solo, tais como a carga superficial adicionada pelo crescimento urbano que aumentou consideravelmente nas últimas décadas. Portanto, recomenda-se o monitoramento contínuo do fenômeno de subsidência utilizando-se a tecnologia GNSS, com instalação de receptores na rede geodésica materializada no topo de edifícios.

Ainda como recomendação, sugere-se monitorar, com nivelamento geométrico de precisão, os pontos materializados, descritos na seção 4.1 desta tese, a cada dois anos; uma vez que a incerteza obtida no nivelamento geométrico foi de 2 mm, a velocidade de deslocamento encontrada poderá ser constatada a partir do ano de 2019. Com isso, existe a possibilidade de comprovação de subsidência “no período contemporâneo”. No entanto, na continuidade deste estudo, outras análises deverão ser realizadas levando-se em consideração as distorções da Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP), bem como analisar outros trechos da cidade.

Sugere-se, também, a determinação de superfícies geoidais locais para melhor conhecimento do geoide, associado a dados gravimétricos para obtenção de modelos mais precisos, que apresentem resultados cujas precisões relativas e absolutas sejam melhores que as alcançadas pelo Mapa de Ondulação Geoidal disponivel para o Brasil. Isso não quer dizer que a Superfície Geoidal Local determinada seja utilizada para a determinação de altitudes ortométricas, substituindo o nivelamento geométrico de 1.ª ordem da NBR-13133 da ABNT, porém sua utilização estaria restrita à determinação de altitudes ortométricas aplicadas apenas para estudos preliminares e de viabilidade técnica. Podendo-se, porém, em alguns casos, utilizar essa Superfície Geoidal Local para determinar desníveis para estudos de diversas naturezas, devendo ser feita uma análise específica para cada caso.

REFERÊNCIAS

ABIDIN, H. Z. et al. Land Subsidence of Jakarta (Indonesia) and its geodeticmonitoring system. **Natural Hazards**, n. 23, p. 365-387, 2001.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13133**: execução de levantamento topográfico. Rio de Janeiro, 1994. 35 p.

_____. **NBR 6122**: projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 1996. 33 p.

ABREU, F. A. M.; CAVALCANTE, I. N. C.; MATTA, M. A. S. O sistema aquífero grande Amazônia – SAGA: um imenso potencial de água subterrânea no Brasil. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE MEIO AMBIENTE SUBTERRÂNEO, 3., 2013, São Paulo. **Anais**... São Paulo, 2013.

ABREU, M. A.; FONSECA JUNIOR, E. S. Comparação de ferramentas on-line para processamento de dados GPS. In: COLÓQUIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS, 4., 2005, Curitiba, PR. **Anais**... Curitiba, 2005.

ALENCAR, J. C. M. Sistema Nacional de Nivelamento de 1.ª Ordem. In: CONFERÊNCIA NACIONAL DE GEOCIÊNCIAS, IBGE, Rio de Janeiro, 1968.

ALLIS, R. G. Review of subsidence at Wairakei Field, New Zealand. **Geothermics**, v. 29, p. 455-478, 2000.

ALMÁSSY, E.; BUZÁS, Z. **Inventory of transboundary groundwaters**. Lelystad: Netherlands: United Nations Economic Commission for Europe, 1999.

ALMEIDA, M. S.; POZ, W. R. Posicionamento por ponto preciso e posicionamento relativo com GNSS: qual é o método mais acurado atualmente? **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 22, n. 1, p. 175-195, jan./mar. 2016. Disponível em: http://www.scielo.br/pdf/bcg/v22n1/1982-2170-bcg-22-01-00175.pdf>. Acesso em: 28 maio 2016.

ALVES, C. M. D. et al. Avaliação da qualidade do posicionamento por ponto preciso na sua forma *on-line*. In: Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 3., 2010, Recife. **Anais**... Recife, 2010. p. 1-7.

APAC. Georreferenciamento dos recursos hídricos subterrâneos do estado de Pernambuco através do programa ARCGIS. In: ENCONTRO INTERNACIONAL DAS ÁGUAS, 7., 2013, Recife. **Anais**… Recife, 2013.

BAKR, M. Influence of groundwater management on land subsidence in deltas a case study of Jakart, Indonesia. **Water Resources Management**, v. 29, p. 1541-1555, 2015.

BARTH, F. T. Aspectos Institucionais para o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos. In: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EDUCAÇÃO AGRÍCOLA SUPERIOR. **Encontro Nacional de Recursos Hídricos e Desenvolvimento Sustentável**. Brasília: ABEAS, 1996.

BATISTA, R. P. **Estudo hidrogeológico da planície do Recife**. 1984. 91 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 1984.
BIJUAN HUANG; LONGCANG SHU; YANG, Y. S. Groundwater overexploitation causing land subsidence: hazard risk assessment using field observation and spatial modelling**. Water Resources Management**, v. 26, n. 14, p. 4225-4239, 2012.

BITELLI, G.; BONSIGNORE, F.; UNGUENDOLI, M. Levelling and GPS networks to monitor ground subsidence in the Southern Po Valley. **Journal of Geodynamics**, v. 30, p. 355-369, 2000.

BLITZKOW, D.; CAMPOS, I. O.; FREITAS, S. R. C. Altitude: o que interessa e como equacionar. In: I SIMPÓSIO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 1., 2004, Recife. **Anais**.... Recife: UFPE, 2004.

BORBA, A. L. S; COSTA FILHO, W. D.; MASCARENHAS, J. C. Configuração geométrica dos aquíferos da região metropolitana do Recife. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 16., e ENCONTRO NACIONAL DE PERFURADORES DE POÇOS, 17., 2010, São Luís, MA. **Anais**... São Luiz, MA, 2010.

BORGHETTI, N. R. B.; BORGHETTI, J. R.; ROSA FILHO, E. F. **Aquífero Guarani**: a verdadeira integração dos países do Mercosul. Curitiba: Editora dos Autores, 2004.

BOTELHO, F. J. L. **Métodos de racionalização construtiva no posicionamento preciso de edificações prediais**. 2003. 100 p. Dissertação (Mestrado em em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

BROWN, R. G.; HWANG, P. Y. C. **Introduction to Random Signals and applied Kalman Filtering**: with Matlab exercises and solutions. 3. ed. Canada: John Wiley & Sons, 1997. v.3.
CABRAL, J. J. S. P. et al. Groundwater management in Recife. **Water International**, v. 33, n. 1, p. 86-99, Mar. 2008.

CABRAL, J. J. S. P.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Considerações sobre a sanilização dos aquíferos costeiros na planície de Recife. In: CABRAL, J. J. S. P. et al. (Org.). **Água subterrânea**: aquíferos costeiros e aluviões, vulnerabilidade e aproveitamento. Recife: Editora Universitária UFPE, 2004. cap. 5.

_____; SANTOS, S. M.; PONTES FILHO, I. D. S. Bombeamento intensivo de água subterrânea e riscos de subsidência do solo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 11, n. 3, p. 147-157, 2006.

CALCAGNO, A. **Identificação de área para a execução de programas e ações piloto e definição de termos de referência**: atividade 09 do Projeto Aquífero Guarani. Brasil: ANA, 2001.

CAMARGO, P. O. **Controle de qualidade aplicado ao Filtro de Kalman**. 1992. 94 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1992.

CARDOSO, P. J. C. **Determinação controlada de deslocamentos verticais de pontos com linha de base GPS de 425 metros de extensão**. 2005. 169 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Departamento de Engenharia Cartográfica do CTG, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2005.

_____ et al. Ensaios em linha de base GPS de curta distância com vistas à medição de recalque em estruturas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 2., 2008, Recife. **Anais**... Recife, 2008.

CARVALHO, M. J. M. Caminhos do rio: negros canoeiros em Recife na primeira metade do século XIX. **Afro/Ásia**, n. 19-20, 1997.

CAVALCANTI, G. L.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Aplicação de indicadores para águas subterrâneas como alerta para o estado atual de explotação dos aqüíferos intersticiais da região metropolitana do Recife, PE. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 18., 2009, Campo Grande, MS. **Anais**... Campo Grande, MS, 2009.

CHIA-CHYANG CHANG. Estimation of local subsidence using GPS and levelling combined data. **Surveying and Land Information Systems**, v. 60, n. 2, p. 85-94, 2000.

CONSOLI, N. C.; MILITITSKY, J.; SCHINAID, F. **Patologias das fundações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005. 191 p.

CORREIA, E. R. C. **Caracterização da vulnerabilidade natural do aquífero Boa Viagem no Município do Recife**: Método GOD. 2006. 89 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2006.

COSTA, W. D.; COSTA FILHO, W. D. A gestão dos aqüíferos costeiros de Pernambuco. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 13., 2004, Cuiabá. **Anais**... São Paulo: ABAS, 2004.

COSTA, W. D. et al. Zoneamento de explotação das águas subterrâneas na cidade do Recife, PE. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 10., 1998, São Paulo. **Anais**... São Paulo, 1998.

COSTA, W. D. et al. **Estudo hidrogeológico de Recife, Olinda, Camaragibe e Jaboatão dos Guararapes**: relatório técnico HIDROREC II. Recife: Secretaria de Recursos Hídricos, 2002.

COSTA, W. D. et al. Monitoramento dos aquíferos costeiros de Pernambuco na região do Recife, cap 9. In: CABRAL, J. J. S. P. et al. (Org.). **Água subterrânea**: aquíferos costeiros e aluviões, vulnerabilidade e aproveitamento. Recife: Editora Universitária UFPE, 2004.

COSTA, W. D. et al. Estudo geológico: o risco de uma subsidência no Recife. **Estudos Geológicos**, v. 15, p. 90-101, 2005.

CPRH. **Análise físico-química 1998-2002**. Recife, 2002.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. **Sistema de informações geoambientais da região metropolitana do Recife**. Recife, 2003. 127 p.

DEUMLICH, M. **Surveying instruments**. New York: Walter de Gruyter, 1982.

DINGSHENG CHEN. **Development of a fast ambiguity search filtering (FASF) method for GPS carrier phase ambiguity resolution**. Department of Geomatics Engineering, Calgary, Província de Alberta, Canada: University of Calgary, 1994.

DINIZ, J. A. O. Histórico da atuação dos órgãos públicos de pesquisa de água subterrânea na região Nordeste do Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÀGUAS SUBTERRÂNEAS, 15., 2008, Natal, RN **Anais**... Natal, RN: ABAS, 2008.

_____. Recursos hídricos e desenvolvimento sustentável no Nordeste brasileiro: alternativas de captações para o abastecimento integrado de pequenas comunidades. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 16. e ENCONTRO NACIONAL DE PERFURADORES DE POÇOS, 17., 2010, São Luís, MA. **Anais**... São Luiz, MA, 2010.

DRISCOLL, F. G. **Groundwater and Wells**. 2. ed. St. Paul, MN: Johnson Division, 1986.

ESPARTEL, L. **Curso de topografia**. 9. ed. Rio de Janeiro: Ed. Globo, 1987. 688 p.

ESTELLER, M. V.; DIAZ-DELGADO, C. Environmental effects of aquifer overexploitation**:** a case study in the Highlands of Mexico. **Environmental Management**, v. 29, n. 2, p. 266-278, 2002.

EXPLOTAÇÃO dos Aquíferos. **Folha de Pernambuco**, Recife, 24 maio 2015, p. 14-15.

FARIAS, V. P. **Estudo das águas subterrâneas na área do Complexo Médico Empresarial da Ilha do Leite e regiões adjacentes no município de Recife/PE**. 2003. 157 f. Dissertação (Mestrado em Gestão e Políticas Ambientais) – Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. Noções de hidroquímica. In: _____(Coord.). **Hidrogeologia**: conceitos e aplicações. Fortaleza: CPRM/REFO, LABHID/UFPE, 2000. p. 81-108.

FREITAS, S. R. C.; BLITZKOW, D. Altitudes e geopotencial. **IGeS Bulletin**, n. 9, p. 47-62, 1999.

GALLOWAY, D. L.; BURBEY, T. J. Review: regional land subsidence accompanying groundwater extraction. **Hydrogeology Journal**, v. 19, n. 8, p. 1459-1486, 2011.

GAMA, L. F. **Experimentos e análises metodológicas do desempenho de estruturas geodésicas planimétricas implantadas com GPS e estação total**: aplicações em levantamentos cadastrais urbanos. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

GAMA, L. F.; SILVA, E. V.; SEIXAS, A. Análise da qualidade de uma rede altimétrica local. **Revista Brasileira de Geomática**, v. 4, n. 2, p. 122-131, maio/ago., 2016. Pato Branco, PR: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.

GARNÉS, S. J. A. **Detalhamento dos modelos da realidade espacial da região metropolitana de Recife pelo refinamento dos elementos geodésicos**: desvio da vertical, geóide local, velocidade de placa tectônica e modelo digital de terreno: Relatório Técnico final. Recife: CNPq, 2016a. Processo 487489/2012-8. Jan. 2016.

_____. **Software AstGeoTop**: módulo nivelamento geométrico, versão 2016.03.18. Recife: Departamento de Engenharia Cartográfica, Universidade Federal de Pernambuco, 2016b.

GELB, A. et al. **Applied optimal estimation**. Cambridge, Massachusetts: The M.I.T. Press, 1974. 374 p.

GEMAEL, C. **Introdução à geodésia geométrica**: 2.ª parte. Curitiba: UFPR, 1988.

_____. **Introdução ao ajustamento de observaçõe**s: aplicações geodésicas. Curitiba: Editora da UFPR, 1994. 319 p.

_____. **Introdução à geodésia física**. Edição atual. Curitiba: UFPR, 1999. 304 p.

GENETTI, A. J. **Engineering and design**: survey markers and monumentation. Washington, DC: Department of the Army, 990. 54 p.

GONZÁLEZ-MORÁN, T.; RODRÍGUEZ, R.; CORTES, S. A. The basin of Mexico and its metropolitan area: water abstraction and related environmental problems. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 12, n. 6, p. 607-613, 1999.

GUERRA, Flávio. **Velhas igrejas e subúrbios históricos**. 3. ed. rev e aum. Recife: Editora Itinerário, 1978.

GUIMARÃES, G. N. **A geoid model in state of São Paulo**: an attempt for the evaluation of diferente methodologies. 2013. 144 f. Tese (Doutorado em Filosofia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

HACHICH, W. et al. **Fundações**: teoria e prática. São Paulo: Pini, 1996. 751 p.

HAIPENG GUO et al. Groundwater-derived land subsidence in the North China Plain. **Environmental Earth Science**, v. 74, n. 2, p. 1415-1427, 2015.

HATHAWAY, D. H. Solar cycle prediction and reconstruction using spherical advective magnetic flux transport codes. **AMS Seminar Series**, NASA Ames Research Center, Nov. 2015. Disponível em: <https://www.nas.nasa.gov/assets/pdf/ams/2015/AMS_20151103_Hathaway.pdf >. Acesso em: 18 jan. 2017.

HEISKANEN, W. A.; MORITZ, H. **Physical geodesy**. San Francisco and London: W. H. Freeman and Company, 1967. 364 p.

HENRIQUES, M. J. et al. Land subsidence in Lisbon area: validation of PSInSAR Results. TS03E - Land Deformation and SAR, 4997, FIG Working Week 2011, Bridging the Gap between Cultures - Marrakech, Morocco, 18-22 May 2011.

HOAR, G. J. **Satellite surveying**: theory, geodesy and map projections: application equipment and operations. Torrance, CA: Magnavox Advanced Products and Systems Company, 1982.

IBGE. **Resolução - PR nº 22, de 21-07-83**: especificações e normas gerais para levantamentos geodésicos. 1983. Disponível em: <http://www.inde.gov.br/images/inde/bservico1602.pdf>. Acesso em: 2 jul. 2016.

_____. **Especificações e normas gerais para levantamentos geodésicos**: coletânea das normas vigentes. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 17., 1995, Salvador, BA. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv25313.pdf>. Acesso em: 2 jul. 2016.

_____. **Ajustamento simultâneo da rede altimétrica de alta precisão do Sistema Geodésico Brasileiro**: relatório. Rio de Janeiro, 2011a.

_____. **Censo demográfico 2010**: características da população e dos domicílios: resultados do universo. Rio de Janeiro, 2011b. Disponível em: <http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/93/cd_2010_caracteristicas_populacao_domicilios.pdf>. Acesso em: 4 jan. 2017.

_____. **Modelo de ondulação geoidal**. 2016a. Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/modelo_geoidal.shtm. Acesso em: 19 dez. 2016.

_____. **Sistema geodésico brasileiro**. 2016b. Disponível em: <https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/altimetrica.shtm>. Acesso em: 14 dez. 2016.

_____. **Sistema Geodésico Brasileiro**: redes estaduais GPS. 2016c. Disponível em: <https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/estadual.shtm>. Acesso em: 14 dez. 2016.

_____. **RBMC**: Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS. 2016d. Disponível em: <https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rbmc/rbmc.shtm>. Acesso em: 14 dez. 2016.

_____. **RMPG - Rede Maregráfica Permanente para Geodésia**. 2017a. Disponível em: <https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rmpg/default_rmpg_int.shtm>. Acesso em: 19 jan. 2017.

_____. Diretoria de Geociências. Coordenação de Geodésia. **Manual do usuário**: aplicativo online IBGE-PPP. Rio de Janeiro, 2017b. Disponível em: <https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/ppp/manual_ppp.pdf>. Acesso em: 19 jan. 2017.

INFANTI JUNIOR, N.; FORNASARI FILHO, N. Processos de dinâmica superficial. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (Ed.). **Geologia de engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998. p.131-152.

JELINEK, A. R. **Apostila Topografia I**: altimetria. Porto Alegre: Instituto de Geociências, UFRS, 2009. cap. 3.

JORDAN, W. **Tratado general de topografia**. Barcelona: Ed. Gustavo Gili, 1944. v. 2, 572 p.

KAHMEN, H.; FAIG, W. **Surveying**. Berlin; New York: Walter de Gruyter, 1988. 578 p.

KAPLAN, E. D. **Understanding GPS**: principles and applications. 2. ed. Boston: Artech House, 1996. 554 p.

LARSON, K. J.; BASAGAOGLU, H.; MARIÑO, M. A. Prediction of optimal safeground water yield and land subsidence in the Los Banos-Kettleman City area, California, using a calibrated numerical simulation model. **Journal of Hydrology**, v. 242, n. 1, p. 79-102, 2001.

LEAKE, S. A. **Land subsidence from Ground-Water Pumping**. U. S. Geological Survey. 1997. Disponível em: <http://geochange.er.usgs.gov/sw/changes/anthropogenic/subside/>. Acesso em: 17 jul. 2017.

LEAL, A.S. **As águas subterrâneas no Brasil:** ocorrências, disponibilidades e uso. Brasília: ANEEL, 1999.

LIN ZHU et al. Land subsidence due to groundwater withdrawal in the northern Beijing plain, China. **Engineering Geology**, v. 193, p. 243-255, Jul. 2015.

LOBATO, Monteiro. Mundo da lua. In: _____. **Miscelâneas**. 7. ed. São Paulo: Brasiliense. 1956.

LUNA, R. M. R. et al. Resultados preliminares da estimativa de subsidência na planície de Recife com uso de nivelamento geométrico. SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 11., 2012, João Pessoa. **Anais**... João Pessoa: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2012.

_____ et al. Monitoramento da subsidência do solo com o uso do nivelamento geométrico de precisão em áreas costeiras da planície de Recife devido à superexplotação de águas subterrâneas. VIII CONGRESSO SOBRE PLANEJAMENTO E GESTÃO DAS ZONAS COSTEIRAS DOS PAÍSES DE EXPRESSÃO PORTUGUESA, 8., 2005, Lisboa. **Anais**... Lisboa: Associação Portuguesa de Recursos Hídricos, 2015.

_____ et al. Groundwater overexploitation and soil subsidence monitoring on the Recife plain (Brazil). Natural Hazards, v. 86, n. 3, Jan. 2017.

LUZ, T. R. **Estratégias para modernização da componente vertical do Sistema Geodésico Brasileiro e sua integração ao SIRGAS**. 2008. 207 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

LUZ, T. R. Cálculo de altitudes científicas e sua aplicação no reajustamento da rede altimétrica de alta precisão do Sistema Geodésico Brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia**, Rio de Janeiro, v. 61, n. 1, p. 79-97, jan/jun. 2016.

MANOEL FILHO, J. **Explotação de água subterrânea em zona urbana**: caso da Grande Recife. Anais do XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 13., 2004, Cuiabá, MT. Anais... Cuiabá, 2004.

MARQUES, H. A. **PPP em tempo real com estimativa das correções dos relógios dos satélites no contexto de rede GNSS**. 2012. 244 f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, SP, 2012.

_____. **Geodésia**: notas de aula. Recife: UFPE, 2013.

_____; MONICO, J. F. G. Ajustamento de Redes GPS em Conformidade com as Exigências da Lei 10.267/2001. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 15, p. 514- 526, 2009.

_____; PACHECO, A. P.; TANAJURA, E. L. X. Uma abordagem de monitoramento geoespacial de barragens hidroelétricas a partir do GNSS: resultados preliminares. **Estudos Geológicos**, v. 26, n. 2, p. 129-146, dez. 2016.

MATÉRIA tema: o papel essencial das águas subterrâneas. **Revista Saneas**, 9, edição 29, p. 6-17, abr./maio/jun. 2008. Disponível em: <http://aesabesp.org.br/arquivos/saneas/saneas29.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2017.

MINGORANCE, F. Manifestaciones de subsidência superficial en el Pastal, Norte de Mendoza, Argentina. **Revista de la Facultad de Ingeniería**, n. 41, p.5-16, 2000.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS**: descrição, fundamentos e aplicações. São Paulo: Ed. da Unesp, 2000a. 287 p.

_____. Posicionamento por ponto de alta precisão utilizando o GPS: uma solução para a geodinâmica. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 18, n. 1, 2000b.

_____. **Posicionamento pelo GNSS**: descrição, fundamentos e aplicações. 2. ed. São Paulo: Ed. daUnesp, 2008.

MONTEIRO, A. B. **Modelagem do fluxo subterrâneo nos aquíferos da planície do Recife e seus encaixes**. 2000. 180 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2000.

MONTENEGRO, S. M. G. L.; CABRAL, J. J. S. P.; PAIVA, A. L. R. Águas subterrâneas na zona costeira da planície do Recife, PE: Evolução da salinização e perspectivas de gerenciamento. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 14, n. 3, p. 81-93, jul./set. 2009.

MOREIRA, A. S. B. **Nivelamento trigonométrico e nivelamento geométrico classe IIN da NBR 13.133**: limites e condições de compatibilidade. 2003. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003.

PAIVA, A. L.R. et al. Problemas de salinização nos aquíferos costeiros da região central da cidade de Recife. In: CONGRESSO SOBRE PLANEJAMENTO E GESTÃO DAS ZONAS COSTEIRAS DOS PAÍSES DE EXPRESSÃO PORTUGUESA, 2., CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 9., e CONGRESSO DO QUATERNÁRIO DOS PAÍSES DE LÍNGUA IBÉRICAS, 2. 2003, Recife. **Anais**... Recife, 2003.

PARÓQUIA NOSSA SENHORA DA BOA VIAGEM. História: uma história de mais de 300 anos dedicados ao Nosso Senhor Jesus Cristo. [s. d.]. Disponível em: <http://www.paroquiadaboaviagem.org/historia/>. Acesso em: 23 maio 2017.

PEREZ, J. A. S.; MONICO, J. F. G.; CHAVES, J. C. Velocity field estimation using GPS precise point positioning: the South American Plate Case. **Journal of Global Positioning Systems**, v. 2, n. 2, p. 90-99, 2003.

PERNAMBUCO. Secretaria de Recursos Hídricos de Pernambuco. **Plano Estadual de Recursos Hídricos do estado de Pernambuco**. Recife: SRH, 1998.

_____. Lei n.º 14.028 de 26 de março de 2010. Cria a Agência Pernambucana de Águas e Clima – APAC, e dá outras providências. **Diário Oficial do Estado de Pernambuco**, Recife, PE, 27 mar. 2010.

PRACINHA de Boa Viagem em busca de harmonia. **Jornal do Commercio**, Recife, 24 mar. 2012. Disponível em: <http://jconline.ne10.uol.com.br/canal/cidades/geral/noticia/2012/03/24/pracinha-de-boa-viagem-em-busca-de-harmonia-36990.php>. Acesso em: 18 jan. 2017.

PROASNE. Projeto Água Subterrânea no Nordeste do Brasil. **A água subterrânea no mundo**. Brasília: Ministério das Minas e Energia, CPRM, 2012.

PSIMOULIS, P. et al. Subsidence and evolution of the Thessaloniki plain, Greece, based on historical leveling and GPS data**. Engineering Geology**, v. 90, n. 1-2, p. 55-70, Mar. 2006.

REBOUÇAS, A. C. **Diagnóstico do setor de hidrogeologia**. São Paulo: ABAS, 1996. 46 p. (Caderno Técnico).

_____. **Águas subterrâneas**. In: _____; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. **Águas doces no Brasil**: capital ecológico, uso e conservação. 2. ed. rev. e ampl. São Paulo: Escrituras, 2002. p. 119-151.

_____; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. **Águas doces no Brasil**: capital ecológico, uso e conservação. 2. ed. São Paulo: Escrituras, 2002. 748 p.

RHADAMEK, A. A. P. **Uma abordagem metodológica para a identificação, representação e monitoramento geodésico de uma encosta em risco natural**. 2008. 135 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

SANTOS, M. C. O Sistema de Posicionamento Global (GPS) e o sistema geodésico brasileiro (SGB). In: ENCONTRO NACIONAL DE PRODUTORES E USUÁRIOS DE INFORMAÇÕES SOCIAIS, ECONÔMICAS E TERRITORIAIS: INFORMAÇÃO PARA UMA SOCIEDADE MAIS JUSTA. III CONFERÊNCIA NACIONAL DE GEOGRAFIA E CARTOGRAFIA, 3., CONFERÊNCIA NACIONAL DE ESTATÍSTICA, 4., 1996, Rio de Janeiro. **Anais**... Rio de Janeiro, 1996.

SANTOS, S. M. **Investigações metodológicas sobre o monitoramento da subsidência do solo devido à extração de água subterrânea**: caso da região metropolitana de Recife. 2005. 231 f. Tese (Doutorado) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2005.

_____; CABRAL, J. J. S. P.; PONTES FILHO, I. D. S. Monitoring of soil subsidence in urban and coastal areas due to groundwater overexploitation using GPS. **Natural Hazards**, n. 64, p. 421-439, 2012.

_____ et al. Detecção de pequenos deslocamentos verticais usando GPS em áreas costeiras. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 62, n. 2, p. 137-144, jun. 2010.

SAPUCCI, L. F. **Estimativa do vapor d'água atmodférico e avaliação da modelagem do atraso zenital troposférico utilizando GPS**. 2001. 167 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciencias e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, SP, 2001.

SATO, H. P.; ABE, K.; OORAKI, O. GPS: measured land subsidence in Ojiya City, Niigata Prefecture, Japan. **Engineering Geology**, n. 67, p. 379-390, 2003.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy**. 2. ed. Berlin: Walter de Gruyter, 2003. 589 p.

SEIXAS, A. et al. O estabelecimento de padrões de referência altimétrica utilizando o nivelamento geométrico para a definição de alvos altos e inacessíveis. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 20, n. 2, p. 388-410, abr./jun. 2014.

SEVERO, T. C. et al. Estudo das correções gravimétricas para altitudes físicas aplicadas aos desníveis da RAAP. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, on-line, v. 19, n. 3, p. 472-497, jul.-set. 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S1982-21702013000300008>. Acesso em: 24 out. 2017.

SHIKLOMANOV, I. A. **World water resources**: a new appraisal and assessment for the 21st century. Paris: United Nations Educacional, Scientific and Cultural Organization - Unesco, 1998. 76 p.

SHUI-LONG SHEN; YE-SHUANG XU. Numerical evaluation of land subsidence induced by groundwater pumping in Shanghai. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 48, n. 9, p. 1378-1392, 2011.

SIDC. **Sunspot index graphics**. 2017. Disponível em: <http://sidc.oma.be/html/wolfaml.html>. Acesso em: 14 jan. 2017.

SILVA, A. B. **Hidrogeologia de meios cársticos** In: Núcleo de Estudos Hidrogeológicos do Meio Ambiente (Org.). Curso de Hidrogeologia de Aqüíferos Cársticos. Salvador: UFBA, 1995. Seção **3.2.**

SILVA, A. L. M. S. Águas subterrâneas: critérios em seu uso. FÓRUM INTERNACIONAL DAS ÁGUAS: A VIDA EM DEBATE, 1., 2003, Porto Alegre. **Anais**... Porto Alegre, 2003.

SILVA, A. L.; LIMA, M. A. A.; COSTA, S. M. A. Redes estaduais GPS: situação atual e perspectiva futura. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 2., 2008, Recife. **Anais**... Recife, 2008.

SILVA, D. J. N. **Avaliação da precisão de trechos da rede altimétrica de alta precisão do sistema geodésico brasileiro na cidade do Recife-PE**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Cartográfica) – Curso de Engenharia Cartográfica, Departamento de Engenharia Cartográfica, Universidade Federal de Pernambuco, 2014.

SILVA, G. P. **Uma abordagem geodésica da locação e controle dimensional de estruturas da construção civil**. 2014. 202 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Departamento de Engenharia Cartográfica do CTG, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014.

SILVA, S. R.; MONTEIRO, A. B.; FRANÇA, A. E. O gerenciamento das águas subterrâneas no estado de Pernambuco. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 13., 1999, Belo Horizonte-MG. **Anais**... Belo Horizonte, 1999.

SILVA, T. F.; SEIXAS, A.; ROMÃO, V. M. Conceituação de campo de pontos na medição de deformação de objetos. SIMPÓSIO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 1. 2004, Recife. **Anais**... Recife: UFPE, 2004. p. 1-7.

SNEED, M.; STORK, S. V.; IKEHARA, M. E. **Detection and measurement of land subsidence using global positioning system and interferometic synthetic aperture radar, Coachella Valley, California, 1998-2000**. U.S. Geological Survey. Water-Resources Investigations Report 02-4239. Sacramento, CA: U.S. Geological Survey, 2002. 29 p.

SNEED, M. et al. Detection and measurement of land subsidence using interferometric synthetic aperture radar and global positioning system, San Bernardino County, Mojave Desert, California. In: U.S. Geological Survey. **Water Resources Investigations Report**, 03-4015. Sacramento, CA, 2003. 69 p.

SPILKER JR., J. J. **Global position system**: theory and applications. Washington: American Institute of Aeronautics, 1996. v.1, cap. 18.

TEUNISSEN, P. J. G. (1998). Quality control and GPS. In: _____; KLEUSBER, A. **GPS for Geodesy**. 2. ed. Berlin: Springer-Verlag, 1998. 407 p.

THOMAZ, E. **Trincas em edifícios**: causas, prevenção e recuperação. São Paulo: Pini, 1989. 205 p.

TORGE, W. **Geodesy**. 3. ed. Berlin: Walter de Gruyter, 2001. 416 p.

THU, T. M.; FREDLUND, D. G. Modelling subsidence in the Hanoi City area, Vietnam. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 37, p. 621-637, 2000.

USTUN, A.; TUSAT, E.; YALVAC, S. **Preliminary results of land subsidence monitoring project in Konya Closed Basin between 2006-2009 by means of GNSS observations**. **2010**. **Natural Hazards**, n. 10, p. 1151-1157, Jun. 2010.

VAINSENCHER, Semira Adler. **Igreja de Nossa Senhora da Boa Viagem.** Recife, PE. Pesquisa Escolar On-Line, Fundação Joaquim Nabuco, Recife, 2007. Disponível em: <http://basilio.fundaj.gov.br/pesquisaescolar/index.php?option=com_content&view=article&id=689%3Aigreja-de-nossa-senhora-de-boa-viagem-recife-pe&catid=44%3Aletra-i&Itemid=1>. Acesso em: 23 maio 2017.

VANICEK, P.; KRAKIWSKY, E. J. **Geodesy**: the concepts. Amsterdam; New York: North Holland Publishing Company, 1982. 691 p.

VERONEZ, M. R. **Proposta de parâmetros de transformação entre os sistemas WGS-84 e o SAD-69 para a região de São Carlos, SP**. 1998. 131 f. Dissertação (Mestrado em Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

WOLF, P. R.; GHILANI, D. C. **Adjustment computations**: statistics and least squares in surveying and GIS. New York: John Wiley and Sons, 1997. 564 p.

WREGE, M. 44 Água subterrânea. In: _____. Termos hidrogeológicos básicos. **CPRM***:* Serviço Geológico do Brasil, dez. 1995. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/Redes-Institucionais/Rede-de-Bibliotecas---Rede-Ametista/Canal-Escola/Termos-Hidrogeologicos-Basicos-631.html **CPRM**: Serviço Geológico do Brasil. dez. 1995

WWDR. World Water Development Report. [Programa Mundial de Avaliação da Água das Nações Unidas] 2015. **Encarando os desafios**: estudos de caso e indicadores. Paris: Unesco, 2016. Disponível em: <http://unesdoc.unesco.org/images/0024/002440/244035por.pdf>. Acesso em: 27 dez. 2016.

YE-SHUANG XU. **Evaluation of behaviour of groundwater seepage and land subsudence via considering infrastructures penetrated into aquifers (in chinese)**. PhD Thesis, Shanghai Jiao Tong University, China, 2010.

_____ et al. Analysis of urbanization-induced land subsidence in Shanghai. **Natural Hazards,** v. 63, n. 2, p. 1255-1267, 2012.

YU HUANG; YANG YANG; JINGLIN LI. Numerical simulation of artificial groundwater recharge for controlling land subsidence. **KSCE Journalof Civil Engineering**, v. 19, n. 2, p. 418-426, 2015.

ZANETTI, M .A. Z. **Implicações atuais no relacionamento entre sistemas terrestres de referência de origem local e geocêntrica**. 2006. 111 p. Tese (Doutorado em Ciências). Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

APÊNDICES

APÊNDICE A – SOLICITAÇÃO DE INFORMAÇÕES À COMPESA SOBRE HIDRÔMETROS INSTALADOS NA RMR

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
GRUPO DE RECURSOS HÍDRICOS
Projeto Rede Novas Tecnologias em Hidrologia

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL - CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS

Recife, 11 de maio de 2015

À
Gerência de Hidrometria – GHI - Compesa
Att. Sr. Ricardo Costa - Gerente

Solicitamos de Vsa. informações referentes aos hidrômetros instalados em poços na Região Metropolitana do Recife, tais como: quantidade de hidrômetros, volume registrado/mês, se possível por cada um, localização (rua, bairro, quarteirão).

O referido material servirá ao projeto HIDRONTEC (Rede Novas Tecnologias em Hidrologia), da Universidade Federal de Pernambuco, que tem, entre outras, uma linha de pesquisa que estuda o monitoramento da subsidência do solo na planície do Recife.

Atenciosamente,

Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral
Coordenador do Projeto HIDRONTEC

APÊNDICE B – SOLICITAÇÃO DA UFPE DE PERMISSÃO PARA VERIFICAÇÃO DO FENÔMENO DA SUBSIDÊNCIA DO SOLO EM EDIFÍCIOS

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

ESCOLA DE ENGENHARIA DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROJETO DE AVALIAÇÃO DE SUBSIDÊNCIA

Recife, 06 de dezembro de 2011.

Ao Síndico e aos condôminos do Edifício_____

Prezados Senhores

A Universidade Federal de Pernambuco, através dos seus grupos de pesquisa em Recursos Hídricos e Geodésia Aplicada estão densificando a rede de monitoramento de subsidência do solo para o bairro de Boa Viagem na cidade do Recife.

A subsidência do solo é um fenômeno que consiste no rebaixamento da superfície do terreno devido à remoção de fluido do subsolo. Sendo mais específico, devido à retirada de água do subsolo para abastecimento humano, o solo pode deslocar-se na vertical gradativamente com o passar dos anos. Várias cidades possuem sistemas similares de monitoramento de subsidência em lugares onde existe demanda por recursos naturais do subsolo, principalmente água, petróleo e gás natural.

A escolha do vosso edifício obedeceu a critérios puramente geométricos, onde foi avaliada a posição do mesmo com relação à rua, a quadra e a distância a outros pontos de controle.

Pelo exposto, vimos solicitar a vossa colaboração com esse projeto. Precisamos instalar um pequeno pino metálico e uma plaqueta de identificação na parte externa do muro de vossa residência. O pino metálico é um pequeno cilindro de 4 cm x 5cm (praticamente do tamanho de uma pilha "D" utilizada em lanternas e rádios), ficará completamente embutido no muro, em local que não interferirá nas atividades do condomínio e a instalação não terá custos para os senhores. A única colaboração adicional que solicitamos é a disponibilização de uma tomada elétrica para ligar uma furadeira e água para o cimento e posterior limpeza do local.

Em breve, um dos membros de nossa equipe de campo, a professora Rejane Maria Rodrigues de Luna e/ou o Engenheiro Civil Severino Lopes entrarão em contato para saber de vossa concordância, bem como prestar esclarecimentos adicionais.

Atenciosamente,

Prof. Jaime Cabral
Coordenador Geral do Projeto

Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral
Professor Titular - Engenharia Civil - SIAPE 1130841
Universidade Federal de Pernambuco

APÊNDICE C – MONOGRAFIA DO PONTO DE MONITORAMENTO, BOA VIAGEM

Monografia do Ponto de Monitoramento

Estação:	***BV01***	***Tipo:***	***Referencia de Nivel (RN)***
Município:	*Recife*	*UF:*	*PE*
Data do Nivelamento:	*20/02/2012*		

DADOS ALTIMÉTRICOS

Altitude Ortométrica:	***1,88687 m***
Sigma Altitude(m):	***-0,00085 m***
Fonte:	*Nivelamento Geométrico*
Datum:	*Imbituba*
Data do nivelamento:	*20/02/2012*
Data dos cálculos:	*23/02/2012*

Localização

Localizado no município do Recife/PE, no bairro de Boa Viagem na Av. Eng. Domingos Ferreira entre as ruas Bruno Veloso e Rua Ribeiro de Brito na parte de trás do banco Itaú coberto por uma tampa de concreto.

Descrição

Bench mark coberto por uma tampa de concreto.
Fotos:

APÊNDICE D – MONOGRAFIA DO PONTO DE MONITORAMENTO, BOA VIAGEM

Monografia do Ponto de Monitoramento

Estação:	***BV02***	***Tipo:***	***Referencia de Nivel (RN)***
Município:	*Recife*	*UF:*	*PE*
Data do Nivelamento:	*20/02/2012*		

DADOS ALTIMÉTRICOS

Altitude Ortométrica:	***1,75638 m***
Sigma Altitude(m):	***-0,00158 m***
Fonte:	*Nivelamento Geométrico*
Datum:	*Imbituba*
Data do nivelamento:	*20/02/2012*
Data dos cálculos:	*23/02/2012*

Localização

Localizado no município do Recife/PE, no bairro de Boa Viagem na Av. Eng. Domingos Ferreira esquina com a Rua José Trajano coberto por uma tampa de concreto.

Descrição

Bench mark coberto por uma tampa de concreto.
Fotos:

APÊNDICE E – MONOGRAFIA DO PONTO DE MONITORAMENTO, BOA VIAGEM

Monografia do Ponto de Monitoramento

Estação:	***BV03***	***Tipo:***	***Referencia de Nível (RN)***
Município:	*Recife*	*UF:*	*PE*
Data do Nivelamento:	*20/02/2012*		

DADOS ALTIMÉTRICOS

Altitude Ortométrica:	***2,106464 m***
Sigma Altitude(m):	***-0,00268 m***
Fonte:	*Nivelamento Geométrico*
Datum:	*Imbituba*
Data do nivelamento:	*20/02/2012*
Data dos cálculos:	*23/02/2012*

Localização

Localizado no município do Recife/PE, no bairro de Boa Viagem na Av. Conselheiro Aguiar esquina com a Rua Antônio Falcão, enterrado na calçada da Farmácia Guararapes.

Descrição

Bench mark coberto por uma tampa de concreto.
Fotos:

APÊNDICE F – MONOGRAFIA DO PONTO DE MONITORAMENTO, BOA VIAGEM

Monografia do Ponto de Monitoramento

Estação:	***BV05***	***Tipo:***	***Referencia de Nível (RN)***
Município:	*Recife*	*UF:*	*PE*
Data do Nivelamento:	*20/02/2012*		

DADOS ALTIMÉTRICOS

Altitude Ortométrica:	***2,22755 m***
Sigma Altitude(m):	***0,00545 m***
Fonte:	*Nivelamento Geométrico*
Datum:	*Imbituba*
Data do nivelamento:	*20/02/2012*
Data dos cálculos:	*23/02/2012*

Localização

Localizado no município do Recife/PE, no bairro de Boa Viagem na Av. Conselheiro Aguiar entre as ruas Bruno Veloso e Ribeiro de Brito em frente ao Banco Itaú coberto por uma tampa de concreto.

Descrição

Bench mark coberto por uma tampa de concreto.
Fotos:

APÊNDICE G – MONOGRAFIA DO PONTO DE MONITORAMENTO, BOA VIAGEM

Monografia do Ponto de Monitoramento

Estação:	***BV06***	***Tipo:***	***Referencia de Nivel (RN)***
Município:	*Recife*	*UF:*	*PE*
Data do Nivelamento:	*20/02/2012*		

DADOS ALTIMÉTRICOS

Altitude Ortométrica:	***3,04182 m***
Sigma Altitude(m):	***0,00094 m***
Fonte:	*Nivelamento Geométrico*
Datum:	*Imbituba*
Data do nivelamento:	*20/02/2012*
Data dos cálculos:	*23/02/2012*

Localização

Localizado no município do Recife/PE, no bairro de Boa Viagem na Av. Conselheiro Aguiar entre as ruas Ernesto de Paula Santos e a Carlos Pereira Falcão em frente ao Banco Itaú Personalité.

Descrição

Bench mark coberto por uma tampa de concreto.
Fotos:

APÊNDICE H – MONOGRAFIA DO PONTO DE MONITORAMENTO, BOA VIAGEM

Monografia do Ponto de Monitoramento

Estação:	***BV08***	***Tipo:***	***Referencia de Nível (RN)***
Município:	*Recife*	*UF:*	*PE*
Data do Nivelamento:	*20/02/2012*		

DADOS ALTIMÉTRICOS

Altitude Ortométrica:	***3,82412 m***
Sigma Altitude(m):	***-0,00105 m***
Fonte:	*Nivelamento Geométrico*
Datum:	*Imbituba*
Data do nivelamento:	*20/02/2012*
Data dos cálculos:	*23/02/2012*

Localização

Localizado no município do Recife/PE, no bairro de Boa Viagem na Rua dos Navegantes esquina com a Rua Carlos Pereira Falcão coberto por uma tampa de concreto.

Descrição

Bench mark coberto por uma tampa de concreto.
Fotos:

APÊNDICE I – MONOGRAFIA DO PONTO DE MONITORAMENTO, BOA VIAGEM

Monografia do Ponto de Monitoramento

Estação:	***BV09***	***Tipo:***	***Referencia de Nivel (RN)***
Município:	*Recife*	*UF:*	*PE*
Data do Nivelamento:	*20/02/2012*		

DADOS ALTIMÉTRICOS

Altitude Ortométrica:	***3,43558 m***
Sigma Altitude(m):	***0,00184 m***
Fonte:	*Nivelamento Geométrico*
Datum:	*Imbituba*
Data do nivelamento:	*20/02/2012*
Data dos cálculos:	*23/02/2012*

Localização

Localizado no município do Recife/PE, no bairro de Boa Viagem na Rua dos Navegantes esquina com a Rua Sirinhaém próximo ao Edf. Holiday coberto por uma tampa de concreto.

Descrição

Bench mark coberto por uma tampa de concreto.
Fotos:

APÊNDICE J – CARTA DE SOLICITAÇÃO DA UFPE À EMLURB PARA AUTORIZAR A INSTALAÇÃO DE 10 MARCOS DE MONITORAMENTO

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
GRUPO DE RECURSOS HÍDRICOS
Projeto Rede Novas Tecnologias em Hidrologia

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL - CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS

Recife,04 dedezembro de 2015

À
Diretoria de Manutenção Urbana - EMLURB
Att. Sra. Fernandha Batista

Solicitamos de Vsa. autorização para colocação de tampa de proteção nos 10 (dez) marcos de referência para análise de subsidência do solo, atualmente implantados em calçadas no bairro de Boa Viagem. Apresentamos, em anexo, cópia de ofício, enviado por este órgão, autorizando a implantação destes marcos.

Os referidosmarcos servirão ao projeto "Rede Novas Tecnologias em Hidrologia", da Universidade Federal de Pernambuco, que tem, entre outras, uma linha de pesquisa que estuda o monitoramento da subsidência na planície do Recife.

Atenciosamente,

Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral
Coordenador do Projeto HIDRONTEC

APÊNDICE K – MONOGRAFIA DO PONTO DE MONITORAMENTO, BOA VIAGEM

Monografia do Ponto de Monitoramento

Estação:	***BV12***	***Tipo:***	***Referencia de Nível (RN)***
Município:	*Recife*	*UF:*	*PE*
Data do Nivelamento:	*20/02/2012*		

DADOS ALTIMÉTRICOS

Altitude Ortométrica:	***2,69047 m***
Sigma Altitude(m):	***0,00011 m***
Fonte:	*Nivelamento Geométrico*
Datum:	*Imbituba*
Data do nivelamento:	*20/02/2012*
Data dos cálculos:	*23/02/2012*

Localização

Localizado no município do Recife/PE, no bairro de Boa Viagem na Avenida Conselheiro Aguiar na parede da frente do Shopping Praia Sul N°4880.

Descrição

Chapa de bronze para identificação com pino de controle abaixo.
Fotos:

APÊNDICE L – MONOGRAFIA DO PONTO DE MONITORAMENTO, BOA VIAGEM

Monografia do Ponto de Monitoramento

Estação:	***BV13***	***Tipo:***	***Referencia de Nível (RN)***
Município:	*Recife*	*UF:*	*PE*
Data do Nivelamento:	*20/02/2012*		

DADOS ALTIMÉTRICOS

Altitude Ortométrica:	***2,77311 m***
Sigma Altitude(m):	***0,00493 m***
Fonte:	*Nivelamento Geométrico*
Datum:	*Imbituba*
Data do nivelamento:	*20/02/2012*
Data dos cálculos:	*23/02/2012*

Localização

Localizado no município do Recife/PE, no bairro de Boa Viagem na Avenida Conselheiro Aguiar na parede da frente do Edf. Costa Azul Nº4741.

Descrição

Chapa de bronze para identificação com pino de controle abaixo.

Fotos:

APÊNDICE M – MONOGRAFIA DO PONTO DE MONITORAMENTO, BOA VIAGEM

Monografia do Ponto de Monitoramento

Estação:	***BV14***	***Tipo:***	***Referencia de Nível (RN)***
Município:	*Recife*	*UF:*	*PE*
Data do Nivelamento:	*20/02/2012*		

DADOS ALTIMÉTRICOS

Altitude Ortométrica:	***4,28771 m***
Sigma Altitude(m):	***-0,00125 m***
Fonte:	*Nivelamento Geométrico*
Datum:	*Imbituba*
Data do nivelamento:	*20/02/2012*
Data dos cálculos:	*23/02/2012*

Localização

Localizado no município do Recife/PE, no bairro de Boa Viagem na Rua dos Navegantes na parede da frente do Edf. Natália N°1475.

Descrição

Chapa de bronze para identificação com pino de controle abaixo.

Fotos:

APÊNDICE N – MONOGRAFIA DO PONTO DE MONITORAMENTO, BOA VIAGEM

Monografia do Ponto de Monitoramento

Estação:	***BV15***	***Tipo:***	***Referencia de Nível (RN)***
Município:	*Recife*	*UF:*	*PE*
Data do Nivelamento:	*20/02/2012*		

DADOS ALTIMÉTRICOS

Altitude Ortométrica:	***2,58778 m***
Sigma Altitude(m):	***-0,00076 m***
Fonte:	*Nivelamento Geométrico*
Datum:	*Imbituba*
Data do nivelamento:	*20/02/2012*
Data dos cálculos:	*23/02/2012*

Localização

Localizado no município do Recife/PE, no bairro de Boa Viagem na Avenida Conselheiro Aguiar na parede da frente do Edf. Príncipe Alberto Nº3384.

Descrição

Chapa de bronze para identificação com pino de controle abaixo.
Fotos:

APÊNDICE O – MONOGRAFIA DO PONTO DE MONITORAMENTO, BOA VIAGEM

Monografia do Ponto de Monitoramento

Estação:	***BV16***	***Tipo:***	***Referencia de Nível (RN)***
Município:	*Recife*	*UF:*	*PE*
Data do Nivelamento:	*20/02/2012*		

DADOS ALTIMÉTRICOS

Altitude Ortométrica:	***4,52306 m***
Sigma Altitude(m):	***-0,00071 m***
Fonte:	*Nivelamento Geométrico*
Datum:	*Imbituba*
Data do nivelamento:	*20/02/2012*
Data dos cálculos:	*23/02/2012*

Localização

Localizado no município do Recife/PE, no bairro de Boa Viagem na Rua dos Navegantes na parede da frente do Edf. Vitória Régia N°993.

Descrição

Chapa de bronze para identificação com pino de controle abaixo.
Fotos:

APÊNDICE P – MONOGRAFIA DO PONTO DE MONITORAMENTO, BOA VIAGEM

Monografia do Ponto de Monitoramento

Estação:	***BV17***	***Tipo:***	***Referencia de Nivel (RN)***
Município:	*Recife*	*UF:*	*PE*
Data do Nivelamento:	*20/02/2012*		

DADOS ALTIMÉTRICOS

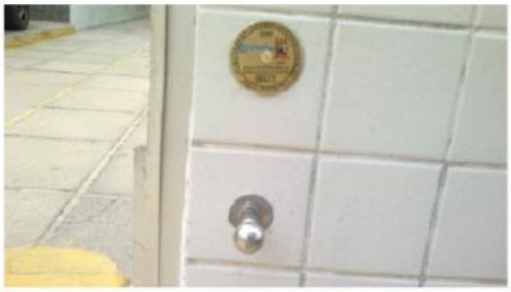
Altitude Ortométrica:	***4,50126 m***
Sigma Altitude(m):	***-0,00165 m***
Fonte:	*Nivelamento Geométrico*
Datum:	*Imbituba*
Data do nivelamento:	*20/02/2012*
Data dos cálculos:	*23/02/2012*

Localização

Localizado no município do Recife/PE, no bairro de Boa Viagem na Rua dos Navegantes na parede da frente do Edf. Coimbra N°513.

Descrição

Chapa de bronze para identificação com pino de controle abaixo.
Fotos:



APÊNDICE Q – CARTA DE SOLICITAÇÃO DA UFPE AO EDIFÍCIO BRISA DO MAR PARA AUTORIZAR A INSTALAÇÃO DE UM PINO METÁLICO E PLAQUETA DE IDENTIFICAÇÃO NA COBERTURA

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

ESCOLA DE ENGENHARIA DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROJETO DE AVALIAÇÃO DE SUBSIDÊNCIA

Recife, 14 de junho de 2016.

Ao Síndico e aos condôminos do **Edifício Brisa do Mar**

Prezados Senhores

A Universidade Federal de Pernambuco, através dos seus grupos de pesquisa em Recursos Hídricos e Geodésia Aplicada estão densificando a rede de monitoramento de subsidência do solo para o bairro de Boa Viagem na cidade do Recife.

A subsidência do solo é um fenômeno que consiste no rebaixamento da superfície do terreno devido à remoção de fluido do subsolo. Sendo mais específico, devido à retirada de água do subsolo para abastecimento humano, o solo pode deslocar-se na vertical gradativamente com o passar dos anos. Várias cidades possuem sistemas similares de monitoramento de subsidência em lugares onde existe demanda por recursos naturais do subsolo, principalmente água, petróleo e gás natural.

A escolha deste edifício obedeceu a critérios puramente geométricos, onde foi avaliada a posição do mesmo com relação à rua, a quadra e a distância a outros pontos de controle.

Pelo exposto, vimos solicitar a vossa colaboração com esse projeto. Precisamos instalar um pequeno pino metálico e uma plaqueta de identificação na laje externa da cobertura do edifício. O pino ficará completamente embutido na laje, em local que não interferirá nas atividades do condomínio e a instalação não terá custos para os senhores. A única colaboração adicional que solicitamos é a disponibilização de uma tomada elétrica para ligar uma furadeira, caso seja necessário.

Em breve, um dos membros de nossa equipe de campo, a professora Rejane Maria Rodrigues de Luna entrará em contato para saber de vossa concordância, bem como prestar esclarecimentos adicionais.

Atenciosamente,

Prof. Jaime Cabral
Coordenador Geral do Projeto

Jaime Cabral - jcabral@ufpe.br
Rejane Luna - rejane_luna@yahoo.com.br
(081)992721095

APÊNDICE R – CARTA DE SOLICITAÇÃO DA UFPE AO EDIFÍCIO LA VIVANCE PARA AUTORIZAR A INSTALAÇÃO DE UM PINO METÁLICO E PLAQUETA DE IDENTIFICAÇÃO NA COBERTURA

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

ESCOLA DE ENGENHARIA DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROJETO DE AVALIAÇÃO DE SUBSIDÊNCIA

Recife, 14 de junho de 2016.

Ao Síndico e aos condôminos do **Edifício La Vivance**

Prezados Senhores

A Universidade Federal de Pernambuco, através dos seus grupos de pesquisa em Recursos Hídricos e Geodésia Aplicada estão densificando a rede de monitoramento de subsidência do solo para o bairro de Boa Viagem na cidade do Recife.

A subsidência do solo é um fenômeno que consiste no rebaixamento da superfície do terreno devido à remoção de fluido do subsolo. Sendo mais específico, devido à retirada de água do subsolo para abastecimento humano, o solo pode deslocar-se na vertical gradativamente com o passar dos anos. Várias cidades possuem sistemas similares de monitoramento de subsidência em lugares onde existe demanda por recursos naturais do subsolo, principalmente água, petróleo e gás natural.

A escolha deste edifício obedeceu a critérios puramente geométricos, onde foi avaliada a posição do mesmo com relação à rua, a quadra e a distância a outros pontos de controle.

Pelo exposto, vimos solicitar a vossa colaboração com esse projeto. Precisamos instalar um pequeno pino metálico e uma plaqueta de identificação na laje externa da cobertura do edifício. O pino ficará completamente embutido na laje, em local que não interferirá nas atividades do condomínio e a instalação não terá custos para os senhores. A única colaboração adicional que solicitamos é a disponibilização de uma tomada elétrica para ligar uma furadeira, caso seja necessário.

Em breve, um dos membros de nossa equipe de campo, a professora Rejane Maria Rodrigues de Luna entrará em contato para saber de vossa concordância, bem como prestar esclarecimentos adicionais.

Atenciosamente,

Prof. Jaime Cabral
Coordenador Geral do Projeto

Jaime Cabral - jcabral@ufpe.br
Rejane Luna - rejane_luna@yahoo.com.br
(081)992721095

APÊNDICE S – CARTA DE SOLICITAÇÃO DA UFPE AO EDIFÍCIO CIUDAD REAL PARA AUTORIZAR A INSTALAÇÃO DE METÁLICO E PLAQUETA DE IDENTIFICAÇÃO NA COBERTURA

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

ESCOLA DE ENGENHARIA DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROJETO DE AVALIAÇÃO DE SUBSIDÊNCIA

Recife, 14 de junho de 2016.

Ao Síndico e aos condôminos do **Edifício Ciudad Real**

Prezados Senhores

A Universidade Federal de Pernambuco, através dos seus grupos de pesquisa em Recursos Hídricos e Geodésia Aplicada estão densificando a rede de monitoramento de subsidência do solo para o bairro de Boa Viagem na cidade do Recife.

A subsidência do solo é um fenômeno que consiste no rebaixamento da superfície do terreno devido à remoção de fluido do subsolo. Sendo mais específico, devido à retirada de água do subsolo para abastecimento humano, o solo pode deslocar-se na vertical gradativamente com o passar dos anos. Várias cidades possuem sistemas similares de monitoramento de subsidência em lugares onde existe demanda por recursos naturais do subsolo, principalmente água, petróleo e gás natural.

A escolha deste edifício obedeceu a critérios puramente geométricos, onde foi avaliada a posição do mesmo com relação à rua, a quadra e a distância a outros pontos de controle.

Pelo exposto, vimos solicitar a vossa colaboração com esse projeto. Precisamos instalar um pequeno pino metálico e uma plaqueta de identificação na laje externa da cobertura do edifício. O pino ficará completamente embutido na laje, em local que não interferirá nas atividades do condomínio e a instalação não terá custos para os senhores. A única colaboração adicional que solicitamos é a disponibilização de uma tomada elétrica para ligar uma furadeira, caso seja necessário.

Em breve, um dos membros de nossa equipe de campo, a professora Rejane Maria Rodrigues de Luna entrará em contato para saber de vossa concordância, bem como prestar esclarecimentos adicionais.

Atenciosamente,

Jaime Cabral

Prof. Jaime Cabral
Coordenador Geral do Projeto

Jaime Cabral - jcabral@ufpe.br
Rejane Luna - rejane_luna@yahoo.com.br
(081)992721095

APÊNDICE T – CARTA DE SOLICITAÇÃO DA UFPE AO EDIFÍCIO EQUINÓCIO PARA AUTORIZAR A INSTALAÇÃO DE PINO METÁLICO E PLAQUETA DE IDENTIFICAÇÃO NA COBERTURA

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

ESCOLA DE ENGENHARIA DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROJETO DE AVALIAÇÃO DE SUBSIDÊNCIA

Recife, 14 de junho de 2016.

Ao Síndico e aos condôminos do **Edifício Equinócio**

Prezados Senhores

A Universidade Federal de Pernambuco, através dos seus grupos de pesquisa em Recursos Hídricos e Geodésia Aplicada estão densificando a rede de monitoramento de subsidência do solo para o bairro de Boa Viagem na cidade do Recife.

A subsidência do solo é um fenômeno que consiste no rebaixamento da superfície do terreno devido à remoção de fluido do subsolo. Sendo mais específico, devido à retirada de água do subsolo para abastecimento humano, o solo pode deslocar-se na vertical gradativamente com o passar dos anos. Várias cidades possuem sistemas similares de monitoramento de subsidência em lugares onde existe demanda por recursos naturais do subsolo, principalmente água, petróleo e gás natural.

A escolha deste edifício obedeceu a critérios puramente geométricos, onde foi avaliada a posição do mesmo com relação à rua, a quadra e a distância a outros pontos de controle.

Pelo exposto, vimos solicitar a vossa colaboração com esse projeto. Precisamos instalar um pequeno pino metálico e uma plaqueta de identificação na laje externa da cobertura do edifício. O pino ficará completamente embutido na laje, em local que não interferirá nas atividades do condomínio e a instalação não terá custos para os senhores. A única colaboração adicional que solicitamos é a disponibilização de uma tomada elétrica para ligar uma furadeira, caso seja necessário.

Em breve, um dos membros de nossa equipe de campo, a professora Rejane Maria Rodrigues de Luna entrará em contato para saber de vossa concordância, bem como prestar esclarecimentos adicionais.

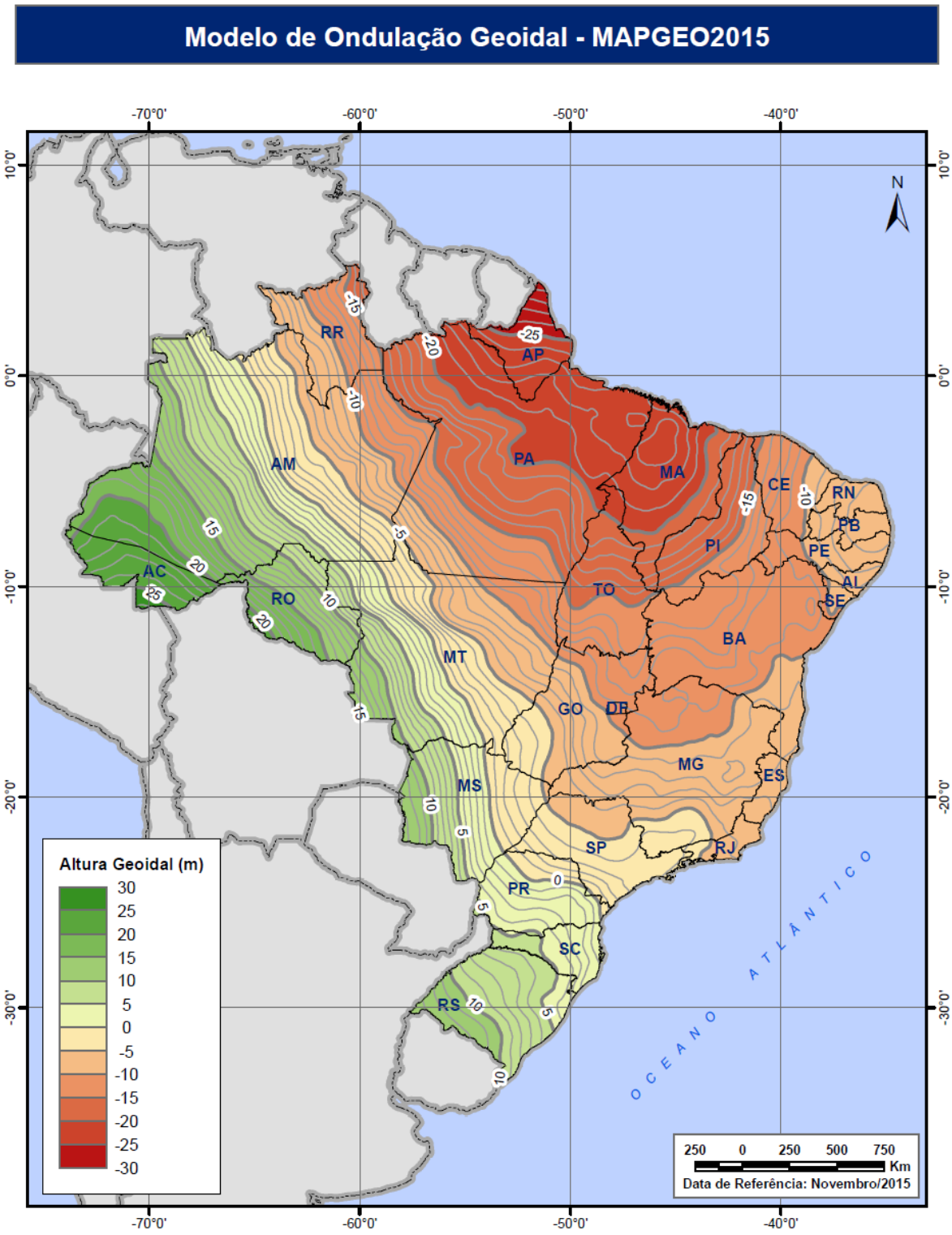
Atenciosamente,

Prof. Jaime Cabral
Coordenador Geral do Projeto

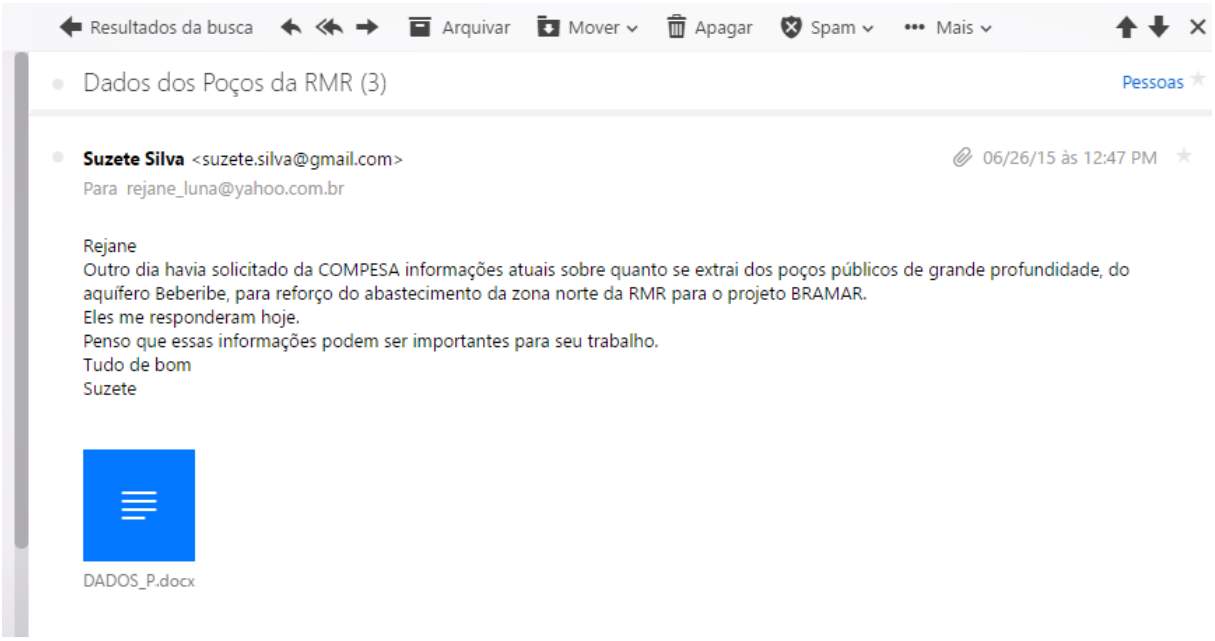
Jaime Cabral - jcabral@ufpe.br
Rejane Luna - rejane_luna@yahoo.com.br
(081)992721095

ANEXOS

ANEXO A – MAPGEO 2015: modelo de ondulação geoidal



ANEXO B – RESPOSTA DA COMPESA COM RELAÇÃO À INSTALAÇÃO DE HIDRÔMETROS EM POÇOS NA RMR



Resultados da busca | Arquivar | Mover | Apagar | Spam | Mais

Dados dos Poços da RMR (3) — Pessoas

Suzete Silva <suzete.silva@gmail.com> — 06/26/15 às 12:47 PM

Para rejane_luna@yahoo.com.br

Rejane
Outro dia havia solicitado da COMPESA informações atuais sobre quanto se extrai dos poços públicos de grande profundidade, do aquífero Beberibe, para reforço do abastecimento da zona norte da RMR para o projeto BRAMAR.
Eles me responderam hoje.
Penso que essas informações podem ser importantes para seu trabalho.
Tudo de bom
Suzete

DADOS_P.docx

ANEXO C – CARTA DE SOLICITAÇÃO AO SÍNDICO DO EDIFÍCIO VITÓRIA RÉGIA

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

ESCOLA DE ENGENHARIA DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROJETO DE AVALIAÇÃO DE SUBSIDÊNCIA

Recife, 06 de dezembro de 2011.

Ao Síndico e aos condôminos do Edifício Vitória Régia

Prezados Senhores

A Universidade Federal de Pernambuco, através dos seus grupos de pesquisa em Recursos Hídricos e Geodésia Aplicada estão densificando a rede de monitoramento de subsidência do solo para o bairro de Boa Viagem na cidade do Recife.

A subsidência do solo é um fenômeno que consiste no rebaixamento da superfície do terreno devido à remoção de fluido do subsolo. Sendo mais específico, devido à retirada de água do subsolo para abastecimento humano, o solo pode deslocar-se na vertical gradativamente com o passar dos anos. Várias cidades possuem sistemas similares de monitoramento de subsidência em lugares onde existe demanda por recursos naturais do subsolo, principalmente água, petróleo e gás natural.

A escolha do vosso edifício obedeceu a critérios puramente geométricos, onde foi avaliada a posição do mesmo com relação à rua, a quadra e a distância a outros pontos de controle.

Pelo exposto, vimos solicitar a vossa colaboração com esse projeto. Precisamos instalar um pequeno pino metálico e uma plaqueta de identificação na parte externa do muro de vossa residência. O pino metálico é um pequeno cilindro de 4 cm x 5cm (praticamente do tamanho de uma pilha "D" utilizada em lanternas e rádios), ficará completamente embutido no muro, em local que não interferirá nas atividades do condomínio e a instalação não terá custos para os senhores. A única colaboração adicional que solicitamos é a disponibilização de uma tomada elétrica para ligar uma furadeira e água para o cimento e posterior limpeza do local.

Em breve, um dos membros de nossa equipe de campo, a professora Rejane Maria Rodrigues de Luna e/ou o Engenheiro Civil Severino Lopes entrarão em contato para saber de vossa concordância, bem como prestar esclarecimentos adicionais.

Atenciosamente,

Prof. Jaime Cabral
Coordenador Geral do Projeto

Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral
Professor Titular - Engenharia Civil - SIAPE 1130841
Universidade Federal de Pernambuco

ANEXO D – CARTA DE SOLICITAÇÃO AO SÍNDICO DO EDIFÍCIO PRÍNCIPE ALBERTO

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

ESCOLA DE ENGENHARIA DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROJETO DE AVALIAÇÃO DE SUBSIDÊNCIA

Recife, 06 de dezembro de 2011.

Ao Síndico e aos condôminos do Edifício Príncipe Alberto

Prezados Senhores

A Universidade Federal de Pernambuco, através dos seus grupos de pesquisa em Recursos Hídricos e Geodésia Aplicada estão densificando a rede de monitoramento de subsidência do solo para o bairro de Boa Viagem na cidade do Recife.

A subsidência do solo é um fenômeno que consiste no rebaixamento da superfície do terreno devido à remoção de fluido do subsolo. Sendo mais específico, devido à retirada de água do subsolo para abastecimento humano, o solo pode deslocar-se na vertical gradativamente com o passar dos anos. Várias cidades possuem sistemas similares de monitoramento de subsidência em lugares onde existe demanda por recursos naturais do subsolo, principalmente água, petróleo e gás natural.

A escolha do vosso edifício obedeceu a critérios puramente geométricos, onde foi avaliada a posição do mesmo com relação à rua, a quadra e a distância a outros pontos de controle.

Pelo exposto, vimos solicitar a vossa colaboração com esse projeto. Precisamos instalar um pequeno pino metálico e uma plaqueta de identificação na parte externa do muro de vossa residência. O pino metálico é um pequeno cilindro de 4 cm x 5cm (praticamente do tamanho de uma pilha "D" utilizada em lanternas e rádios), ficará completamente embutido no muro, em local que não interferirá nas atividades do condomínio e a instalação não terá custos para os senhores. A única colaboração adicional que solicitamos é a disponibilização de uma tomada elétrica para ligar uma furadeira e água para o cimento e posterior limpeza do local.

Em breve, um dos membros de nossa equipe de campo, a professora Rejane Maria Rodrigues de Luna e/ou o Engenheiro Civil Severino Lopes entrarão em contato para saber de vossa concordância, bem como prestar esclarecimentos adicionais.

Atenciosamente,

Prof. Jaime Cabral
Coordenador Geral do Projeto

Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral
Professor Titular - Engenharia Civil - SIAPE 1130841
Universidade Federal de Pernambuco

De acordo,
Recife 20/12/2011
Andréa Cadena

ANEXO E – CARTA DE SOLICITAÇÃO AO DIRETOR DE MANUTENÇÃO URBANA

Ofício nº 12 /03 – DMU Recife, 20 de junho de 2003.

Senhor Diretor

Em resposta á correspondência de V.Sa, relacionado à colocação de marcos de referência para análise de subsidência do solo, informamos que a solicitação foi aprovada.

Portanto fica autorizada a execução de 10 (dez) marcos de referência de nível enterrados em praças e calçadas no bairro de Boa viagem, de modo que o topo do marco não ultrapasse o nível do terreno.

Atenciosamente,

JOSÉ MÁRIO DE ARAÚJO CAVALCANTI
Diretor de Manutenção Urbana

Ilmo. Sr.
Prof. JAIME CABRAL
Grupo de Recursos Hídricos
Centro de Tecnologia e Geociências
Universidade Federal de Pernambuco
N e s t a

ANEXO F – RELATÓRIO DA ESTAÇÃO GEODÉSICA 9319G

ANEXO F – RELATÓRIO DE ESTAÇÃO GEODÉSICA 9319G

Estação :	9319G	*Nome da Estação :*	9319G	*Tipo :*	Estação Altimétrica - RN
Município :	RECIFE			*UF :*	PE
Última Visita:	8/4/2006	*Situação Marco Principal :*	Bom		

	DADOS PLANIMÉTRICOS		DADOS ALTIMÉTRICOS		DADOS GRAVIMÉTRICOS
	Latitude	08 ° 07 ' 55 " S	*Altitude Ortométrica(m)*	4,7562	*Gravidade(mGal)*
	Longitude	34 ° 54 ' 02 "W	*Fonte*	Nivelamento Geométrico	*Sigma Gravidade(mGal)*
	Fonte	GPS Navegação	*Classe*	Preliminar	*Precisão*
	Origem	Transformada	*Datum*	Imbituba	*Datum*
S	*Datum*	SAD-69	*Data Medição*	5/8/1958	*Data Medição*
A	*Data Medição*	8/4/2006	*Data Cálculo*	1/12/1975	*Data Cálculo*
D	*Data Cálculo*		*Sigma Altitude Ortometrica(m)*		*Correção Topográfica*
6	*Sigma Latitude(m)*				*Anomalia Bouguer*
9	*Sigma Longitude(m)*				*Anomalia Ar-Livre*
	UTM(N)	9.100.621			*Densidade*
	UTM(E)	290.590			
	MC	-33			
	Latitude	08 ° 07 ' 56 " S			*Gravidade(mGal)*
S	*Longitude*	34 ° 54 ' 03 "W			*Sigma Gravidade(mGal)*
I	*Fonte*	GPS Navegação			*Precisão*
R	*Origem*				*Datum*
G	*Datum*	SIRGAS2000			*Data Medição*
A	*Data Medição*	8/4/2006			*Data Cálculo*
S	*Data Cálculo*				*Correção Topográfica*
2	*Sigma Latitude(m)*				*Anomalia Bouguer*
0	*Sigma Longitude(m)*				*Anomalia Ar-Livre*
0	*UTM(N)*	9.100.593			*Densidade*
0	*UTM(E)*	290.561			
	MC	-33			

** Último Ajustamento Planimétrico Global SAD-69 em 15/09/1996*
*** Ajustamento Planimétrico SIRGAS2000 em 23/11/2004 e 06/03/2006*
**** Dados Planimétricos para Fonte carta nas escalas menores ou igual a 1:250000, valores SIRGAS2000 = SAD-69*

Localização

RN da Prefeitura de Recife na parede, 43 cm acima do nível da calçada no lado direito de quem entra na porta principal da Igreja de Nossa Senhora da Boa Viagem, na rua Barão de Souza Leão, s/nº, na Pracinha de Boa Viagem, em Boa Viagem, Recife, PE.

Descrição

Chapa de aço da prefeitura medindo 12x12 cm de forma circular com pino de aço no seu topo.

Observação

Conhecedor da Estação: Monsenhor Edivaldo Bezerra da Silva, Pároco da Igreja; Marcelo Ferreira de Amorim, funcionário da Igreja - telefone: 081-3326-6161

Mantenha-se atualizado consultando periodicamente o BDG.
Agradecemos a comunicação de falhas ou omissões.
Para entrar em contato conosco, utilize os recursos abaixo :
Fale conosco: 0800 218181 Email: ibge@ibge.gov.br

ANEXO G – RELATÓRIO DA ESTAÇÃO GEODÉSICA 9319H

ANEXO G – RELATÓRIO DE ESTAÇÃO GEODÉSICA 9319H

Estação :	9319H	*Nome da Estação :*	9319H	*Tipo :*	Estação Altimétrica - RN
Município :	RECIFE			*UF :*	PE
Última Visita:	10/4/2006	*Situação Marco Principal :*	Não Encontrado		

	DADOS PLANIMÉTRICOS		DADOS ALTIMÉTRICOS		DADOS GRAVIMÉTRICOS
	Latitude	08 ° 07 ' 36 " S	*Altitude Ortométrica(m)*	4,1919	*Gravidade(mGal)*
	Longitude	34 ° 53 ' 55 "W	*Fonte*	Nivelamento Geométrico	*Sigma Gravidade(mGal)*
	Fonte	Carta 1:100000	*Classe*	Preliminar	*Precisão*
	Origem		*Datum*	Imbituba	*Datum*
S	*Datum*	SAD-69	*Data Medição*	5/8/1958	*Data Medição*
A	*Data Medição*	5/8/1958	*Data Cálculo*	1/12/1975	*Data Cálculo*
D	*Data Cálculo*		*Sigma Altitude Ortometrica(m)*		*Correção Topográfica*
6	*Sigma Latitude(m)*				*Anomalia Bouguer*
9	*Sigma Longitude(m)*				*Anomalia Ar-Livre*
	UTM(N)	9.101.206			*Densidade*
	UTM(E)	290.802			
	MC	-33			
	Latitude	08 ° 07 ' 37 " S			*Gravidade(mGal)*
S	*Longitude*	34 ° 53 ' 56 "W			*Sigma Gravidade(mGal)*
I	*Fonte*	Carta 1:100000			*Precisão*
R	*Origem*	Transformada			*Datum*
G	*Datum*	SIRGAS2000			*Data Medição*
A	*Data Medição*	5/8/1958			*Data Cálculo*
S	*Data Cálculo*				*Correção Topográfica*
2	*Sigma Latitude(m)*				*Anomalia Bouguer*
0	*Sigma Longitude(m)*				*Anomalia Ar-Livre*
0	*UTM(N)*	9.101.178			*Densidade*
0	*UTM(E)*	290.772			
	MC	-33			

** Último Ajustamento Planimétrico Global SAD-69 em 15/09/1996*

*** Ajustamento Planimétrico SIRGAS2000 em 23/11/2004 e 06/03/2006*

**** Dados Planimétricos para Fonte carta nas escalas menores ou igual a 1:250000, valores SIRGAS2000 = SAD-69*

Localização

Na calçada do prédio nº 4268 da Avenida Beira Mar. Chapa estampada RN SACS 130.

Descrição

Marco padrão IBGE

Mantenha-se atualizado consultando periodicamente o BDG.
Agradecemos a comunicação de falhas ou omissões.
Para entrar em contato conosco, utilize os recursos abaixo :
Fale conosco: 0800 218181 Email: ibge@ibge.gov.br

ANEXO H – RELATÓRIO DA ESTAÇÃO GEODÉSICA 9319J

ANEXO H – RELATÓRIO DE ESTAÇÃO GEODÉSICA 9319J

Estação :	9319J	*Nome da Estação :*	9319J	*Tipo :*	Estação Altimétrica - RN
Município :	RECIFE			*UF :*	PE
Última Visita:	10/4/2006	*Situação Marco Principal :*	Não Encontrado		

	DADOS PLANIMÉTRICOS		DADOS ALTIMÉTRICOS		DADOS GRAVIMÉTRICOS
	Latitude	08 ° 07 ' 00 " S	*Altitude Ortométrica(m)*	4,1776	*Gravidade(mGal)*
	Longitude	34 ° 53 ' 35 "W	*Fonte*	Nivelamento Geométrico	*Sigma Gravidade(mGal)*
	Fonte	Carta 1:100000	*Classe*	Preliminar	*Precisão*
	Origem		*Datum*	Imbituba	*Datum*
S	*Datum*	SAD-69	*Data Medição*	5/8/1958	*Data Medição*
A	*Data Medição*	5/8/1958	*Data Cálculo*	1/12/1975	*Data Cálculo*
D	*Data Cálculo*		*Sigma Altitude Ortometrica(m)*		*Correção Topográfica*
6	*Sigma Latitude(m)*				*Anomalia Bouguer*
9	*Sigma Longitude(m)*				*Anomalia Ar-Livre*
	UTM(N)	9.102.315			*Densidade*
	UTM(E)	291.409			
	MC	-33			
	Latitude	08 ° 07 ' 01 " S			*Gravidade(mGal)*
S	*Longitude*	34 ° 53 ' 36 "W			*Sigma Gravidade(mGal)*
I	*Fonte*	Carta 1:100000			*Precisão*
R	*Origem*	Transformada			*Datum*
G	*Datum*	SIRGAS2000			*Data Medição*
A	*Data Medição*	5/8/1958			*Data Cálculo*
S	*Data Cálculo*				*Correção Topográfica*
2	*Sigma Latitude(m)*				*Anomalia Bouguer*
0	*Sigma Longitude(m)*				*Anomalia Ar-Livre*
0	*UTM(N)*	9.102.287			*Densidade*
0	*UTM(E)*	291.379			
	MC	-33			

** Último Ajustamento Planimétrico Global SAD-69 em 15/09/1996*

*** Ajustamento Planimétrico SIRGAS2000 em 23/11/2004 e 06/03/2006*

**** Dados Planimétricos para Fonte carta nas escalas menores ou igual a 1:250000, valores SIRGAS2000 = SAD-69*

Localização

Na calçada do prédio n. 3.300 da av. Beira Mar. Chapa estampada SACS-128.

Descrição

Marco padrão IBGE

Mantenha-se atualizado consultando periodicamente o BDG.
Agradecemos a comunicação de falhas ou omissões.
Para entrar em contato conosco, utilize os recursos abaixo :
Fale conosco: 0800 218181 Email: ibge@ibge.gov.br

ANEXO I – RELATÓRIO DA ESTAÇÃO GEODÉSICA 393O

ANEXO I – RELATÓRIO DE ESTAÇÃO GEODÉSICA 393O

Estação :	393O	*Nome da Estação :*	393O	*Tipo :*	Estação Altimétrica - RN
Município :	RECIFE			*UF :*	PE
Última Visita:	10/4/2006	*Situação Marco Principal :*	Destruído(chapa danificada)		

	DADOS PLANIMÉTRICOS		DADOS ALTIMÉTRICOS		DADOS GRAVIMÉTRICOS
	Latitude	08 ° 06 ' 17 " S	*Altitude Ortométrica(m)*	3,9850	*Gravidade(mGal)*
	Longitude	34 ° 53 ' 12 "W	*Fonte*	Nivelamento Geométrico	*Sigma Gravidade(mGal)*
	Fonte	GPS Navegação	*Classe*	Ajustada - Alta Precisão	*Precisão*
	Origem	Transformada	*Datum*	Imbituba	*Datum*
S	*Datum*	SAD-69	*Data Medição*	5/8/1958	*Data Medição*
A	*Data Medição*	10/4/2006	*Data Cálculo*	1/12/1992	*Data Cálculo*
D	*Data Cálculo*		*Sigma Altitude Ortometrica(m)*		*Correção Topográfica*
6	*Sigma Latitude(m)*				*Anomalia Bouguer*
9	*Sigma Longitude(m)*				*Anomalia Ar-Livre*
	UTM(N)	9.103.639			*Densidade*
	UTM(E)	292.107			
	MC	-33			
	Latitude	08 ° 06 ' 18 " S			*Gravidade(mGal)*
S	*Longitude*	34 ° 53 ' 13 "W			*Sigma Gravidade(mGal)*
I	*Fonte*	GPS Navegação			*Precisão*
R	*Origem*				*Datum*
G	*Datum*	SIRGAS2000			*Data Medição*
A	*Data Medição*	10/4/2006			*Data Cálculo*
S	*Data Cálculo*				*Correção Topográfica*
2	*Sigma Latitude(m)*				*Anomalia Bouguer*
0	*Sigma Longitude(m)*				*Anomalia Ar-Livre*
0	*UTM(N)*	9.103.611			*Densidade*
0	*UTM(E)*	292.077			
	MC	-33			

** Último Ajustamento Planimétrico Global SAD-69 em 15/09/1996*

*** Ajustamento Planimétrico SIRGAS2000 em 23/11/2004 e 06/03/2006*

**** Dados Planimétricos para Fonte carta nas escalas menores ou igual a 1:250000, valores SIRGAS2000 = SAD-69*

Localização

Chapa cravada na calçada junto ao 1º degrau, na parte sul do pedestal do busto do paisagista J. J. Telles Júnior, no 2º jardim defronte a Rua Arthur Muniz, na Avenida Boa Viagem, em Recife, PE.

Descrição

Chapa padrão IBGE

Mantenha-se atualizado consultando periodicamente o BDG.
Agradecemos a comunicação de falhas ou omissões.
Para entrar em contato conosco, utilize os recursos abaixo :
Fale conosco: 0800 218181 Email: ibge@ibge.gov.br

ANEXO J – RELATÓRIO DA ESTAÇÃO GEODÉSICA 9319L

ANEXO J – RELATÓRIO DE ESTAÇÃO GEODÉSICA 9319L

Estação :	9319L	*Nome da Estação :*	9319L	*Tipo :*	Estação Altimétrica - RN
Município :	RECIFE			*UF :*	PE
Última Visita:	10/4/2006	*Situação Marco Principal :*	Não Encontrado		

	DADOS PLANIMÉTRICOS		DADOS ALTIMÉTRICOS		DADOS GRAVIMÉTRICOS
	Latitude	08 ° 05 ' 39 " S	*Altitude Ortométrica(m)*	3,4124	*Gravidade(mGal)*
	Longitude	34 ° 52 ' 59 "W	*Fonte*	Nivelamento Geométrico	*Sigma Gravidade(mGal)*
	Fonte	Carta 1:100000	*Classe*	Preliminar	*Precisão*
	Origem		*Datum*	Imbituba	*Datum*
S	*Datum*	SAD-69	*Data Medição*	6/8/1958	*Data Medição*
A	*Data Medição*	6/8/1958	*Data Cálculo*	1/12/1975	*Data Cálculo*
D	*Data Cálculo*		*Sigma Altitude Ortometrica(m)*		*Correção Topográfica*
6	*Sigma Latitude(m)*				*Anomalia Bouguer*
9	*Sigma Longitude(m)*				*Anomalia Ar-Livre*
	UTM(N)	9.104.809			*Densidade*
	UTM(E)	292.500			
	MC	-33			
	Latitude	08 ° 05 ' 40 " S			*Gravidade(mGal)*
S	*Longitude*	34 ° 53 ' 00 "W			*Sigma Gravidade(mGal)*
I	*Fonte*	Carta 1:100000			*Precisão*
R	*Origem*	Transformada			*Datum*
G	*Datum*	SIRGAS2000			*Data Medição*
A	*Data Medição*	6/8/1958			*Data Cálculo*
S	*Data Cálculo*				*Correção Topográfica*
2	*Sigma Latitude(m)*				*Anomalia Bouguer*
0	*Sigma Longitude(m)*				*Anomalia Ar-Livre*
0	*UTM(N)*	9.104.781			*Densidade*
0	*UTM(E)*	292.470			
	MC	-33			

** Último Ajustamento Planimétrico Global SAD-69 em 15/09/1996*

*** Ajustamento Planimétrico SIRGAS2000 em 23/11/2004 e 06/03/2006*

**** Dados Planimétricos para Fonte carta nas escalas menores ou igual a 1:250000, valores SIRGAS2000 = SAD-69*

Localização

Na calçada do prédio nº 118 da Av. Beira Mar. Chapa estampada SACS-122.

Descrição

Marco padrão IBGE

Mantenha-se atualizado consultando periodicamente o BDG.
Agradecemos a comunicação de falhas ou omissões.
Para entrar em contato conosco, utilize os recursos abaixo :
Fale conosco: 0800 218181 Email: ibge@ibge.gov.br

ANEXO K – RELATÓRIO DA ESTAÇÃO GEODÉSICA 9319M

ANEXO K – RELATÓRIO DE ESTAÇÃO GEODÉSICA 9319M

Estação :	9319M	*Nome da Estação :*	9319M	*Tipo :*	Estação Altimétrica - RN
Município :	RECIFE			*UF :*	PE
Última Visita:	11/5/2006	*Situação Marco Principal :*	Bom		

	DADOS PLANIMÉTRICOS		DADOS ALTIMÉTRICOS		DADOS GRAVIMÉTRICOS
	Latitude	08 ° 05 ' 20 " S	*Altitude Ortométrica(m)*	3,4460	*Gravidade(mGal)*
	Longitude	34 ° 53 ' 06 "W	*Fonte*	Nivelamento Geométrico	*Sigma Gravidade(mGal)*
	Fonte	GPS Navegação	*Classe*	Preliminar	*Precisão*
	Origem	Transformada	*Datum*	Imbituba	*Datum*
S	*Datum*	SAD-69	*Data Medição*	6/8/1958	*Data Medição*
A	*Data Medição*	11/5/2006	*Data Cálculo*	1/12/1975	*Data Cálculo*
D	*Data Cálculo*		*Sigma Altitude Ortometrica(m)*		*Correção Topográfica*
6	*Sigma Latitude(m)*				*Anomalia Bouguer*
9	*Sigma Longitude(m)*				*Anomalia Ar-Livre*
	UTM(N)	9.105.391			*Densidade*
	UTM(E)	292.283			
	MC	-33			
	Latitude	08 ° 05 ' 21 " S			*Gravidade(mGal)*
S	*Longitude*	34 ° 53 ' 07 "W			*Sigma Gravidade(mGal)*
I	*Fonte*	GPS Navegação			*Precisão*
R	*Origem*				*Datum*
G	*Datum*	SIRGAS2000			*Data Medição*
A	*Data Medição*	11/5/2006			*Data Cálculo*
S	*Data Cálculo*				*Correção Topográfica*
2	*Sigma Latitude(m)*				*Anomalia Bouguer*
0	*Sigma Longitude(m)*				*Anomalia Ar-Livre*
0	*UTM(N)*	9.105.364			*Densidade*
0	*UTM(E)*	292.253			
	MC	-33			

** Último Ajustamento Planimétrico Global SAD-69 em 15/09/1996*

*** Ajustamento Planimétrico SIRGAS2000 em 23/11/2004 e 06/03/2006*

**** Dados Planimétricos para Fonte carta nas escalas menores ou igual a 1:250000, valores SIRGAS2000 = SAD-69*

Localização

RN da Prefeitura do Recife, situado na parede 43 cm acima do nível da calçada do lado esquerdo de quem entra na porta principal da Igreja de Nossa Senhora do Rosário, mais conhecida com Igreja do Pina, na Av. Herculano Bandeira, nº 471, no bairro do Pina, em Recife, PE.

Descrição

Chapa de aço da Prefeitura medindo 12x12 cm de forma circular com pino também de aço no seu topo.

Observação

Conhecedor da Estação: Frei Evilásio Campelo de Medeiros, Pároco da Igreja - fone: 081-3467-7943 e a funcionária da Igreja Maria Cícera de Souza.

Mantenha-se atualizado consultando periodicamente o BDG.
Agradecemos a comunicação de falhas ou omissões.
Para entrar em contato conosco, utilize os recursos abaixo :
Fale conosco: 0800 218181 Email: ibge@ibge.gov.br

ANEXO L – RELATÓRIO DA ESTAÇÃO GEODÉSICA 9319M

ANEXO L – RELATÓRIO DE ESTAÇÃO GEODÉSICA 9319M

Estação :	9319M	*Nome da Estação :*	9319M	*Tipo :*	Referência de Nível - RN
Município :	RECIFE			*UF :*	PE
Última Visita:	11/05/2006	*Situação Marco Principal :*	Bom		

DADOS PLANIMÉTRICOS		DADOS ALTIMÉTRICOS		DADOS GRAVIMÉTRICOS	
Latitude	08 ° 05 ' 21 " S	*Altitude Ortométrica(m)*		3,3525	*Gravidade(mGal)*
Longitude	34 ° 53 ' 07 "W	*Fonte*		Nivelamento Geométrico	*Datum*
Fonte	GPS Navegação	*Sigma Altitude(m)*		0,09	*Data Medição*
Origem		*Datum*		Imbituba	*Data Cálculo*
Datum	SIRGAS2000	*Data Medição*		06/08/1958	
Data Medição	11/05/2006	*Data Cálculo*		15/06/2011	
Data Cálculo					
Sigma Latitude(m)					
Sigma Longitude(m)					
UTM(N)	9.105.364				
UTM(E)	292.253				
MC	-33				

- *Ajustamento Altimétrico Simultâneo da Rede Altimétrica em 15/06/2011 - Relatório em ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/relatorioajustamento.pdf*
- *Ajustamento Planimétrico SIRGAS2000 em 23/11/2004 e 06/03/2006 - Relatório em ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/rel_sirgas2000.pdf*
- *Para obtenção de Altitude Ortométrica referente a levantamento SAT utilizar o MAPGEO2015 disponível em http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/modelo_geoidal.shtm*
- *As informações de coordenadas estão relacionadas ao sistema SIRGAS2000, em conformidade com a RPR 01/2015 de 24/02/2015.*

Localização

RN da Prefeitura do Recife, situado na parede 43 cm acima do nível da calçada do lado esquerdo de quem entra na porta principal da Igreja de Nossa Senhora do Rosário, mais conhecida com Igreja do Pina, na Av. Herculano Bandeira, nº 471, no bairro do Pina, em Recife, PE.

Descrição

Chapa de aço da Prefeitura medindo 12x12 cm de forma circular com pino também de aço no seu topo.

Observação

Conhecedor da Estação: Frei Evilásio Campelo de Medeiros, Pároco da Igreja - fone: 081-3467-7943 e a funcionária da Igreja Maria Cícera de Souza.

Mantenha-se atualizado consultando periodicamente o BDG.
Agradecemos a comunicação de falhas ou omissões.
Para entrar em contato conosco, utilize os recursos abaixo :
Fale conosco: 0800 218181 Email: ibge@ibge.gov.br

ANEXO M – RELATÓRIO DA ESTAÇÃO GEODÉSICA 9319G

ANEXO M – RELATÓRIO DE ESTAÇÃO GEODÉSICA 9319G

Estação :	9319G	*Nome da Estação :*	9319G	*Tipo :*	Referência de Nível - RN
Município :	RECIFE			*UF :*	PE
Última Visita:	08/04/2006	*Situação Marco Principal :*	Bom		

DADOS PLANIMÉTRICOS		DADOS ALTIMÉTRICOS		DADOS GRAVIMÉTRICOS	
Latitude	08 ° 07 ' 56 " S	*Altitude Ortométrica(m)*		4,6702 *Gravidade(mGal)*	
Longitude	34 ° 54 ' 03 "W	*Fonte*		Nivelamento Geométrico *Datum*	
Fonte	GPS Navegação	*Sigma Altitude(m)*		0,09 *Data Medição*	
Origem		*Datum*		Imbituba *Data Cálculo*	
Datum	SIRGAS2000	*Data Medição*		05/08/1958	
Data Medição	08/04/2006	*Data Cálculo*		15/06/2011	
Data Cálculo					
Sigma Latitude(m)					
Sigma Longitude(m)					
UTM(N)	9.100.593				
UTM(E)	290.561				
MC	-33				

- *Ajustamento Altimétrico Simultâneo da Rede Altimétrica em 15/06/2011 - Relatório em ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/relatorioajustamento.pdf*
- *Ajustamento Planimétrico SIRGAS2000 em 23/11/2004 e 06/03/2006 - Relatório em ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/rel_sirgas2000.pdf*
- *Para obtenção de Altitude Ortométrica referente a levantamento SAT utilizar o MAPGEO2015 disponível em http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/modelo_geoidal.shtm*
- *As informações de coordenadas estão relacionadas ao sistema SIRGAS2000, em conformidade com a RPR 01/2015 de 24/02/2015.*

Localização

RN da Prefeitura de Recife na parede, 43 cm acima do nível da calçada no lado direito de quem entra na porta principal da Igreja de Nossa Senhora da Boa Viagem, na rua Barão de Souza Leão, s/nº, na Pracinha de Boa Viagem, em Boa Viagem, Recife, PE.

Descrição

Chapa de aço da prefeitura medindo 12x12 cm de forma circular com pino de aço no seu topo.

Observação

Conhecedor da Estação: Monsenhor Edivaldo Bezerra da Silva, Pároco da Igreja; Marcelo Ferreira de Amorim, funcionário da Igreja - telefone: 081-3326-6161.

Mantenha-se atualizado consultando periodicamente o BDG.
Agradecemos a comunicação de falhas ou omissões.
Para enfrar em contato conosco, utilize os recursos abaixo :
Fale conosco: 0800 218181 Email: ibge@ibge.gov.br

ANEXO N – RELATÓRIO DA ESTAÇÃO GEODÉSICA 93110

Relatório de Estação Geodésica

Estação :	93110	*Nome da Estação :*	93110	*Tipo :*	Estação GPS
Município :	RECIFE			*UF :*	PE
Última Visita:	26/03/2009	*Situação Marco Principal :*	Bom		
Conexões :	EG : 8131576 RN : 3640Z				

DADOS PLANIALTIMÉTRICOS		DADOS ALTIMÉTRICOS		DADOS GRAVIMÉTRICOS	
Latitude	08 ° 03 ' 03,4697 " S	*Altitude Ortométrica(m)*	25,6096	*Gravidade(mGal)*	978.154,37
Longitude	34 ° 57 ' 05,4591 "W	*Fonte*	Nivelamento Geométrico	*Datum*	RGFB
Altitude Geométrica(m)	20,179	*Sigma Altitude(m)*	0,09	*Data Medição*	26/03/2009
Fonte	GPS Geodésico	*Datum*	Imbituba	*Data Cálculo*	22/11/2011
Origem	Ajustada	*Data Medição*	17/11/2004		
Datum	SIRGAS2000	*Data Cálculo*	15/06/2011		
Data Medição	15/07/1999				
Data Cálculo	23/11/2004				
Sigma Latitude(m)	0,001				
Sigma Longitude(m)	0,002				
Sigma Altitude Geométrica(m)	0,002				
UTM(N)	9.109.554,895				
UTM(E)	284.931,043				
MC	-33				

- *Ajustamento Altimétrico Simultâneo da Rede Altimétrica em 15/06/2011 - Relatório em ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/relatorioajustamento.pdf*
- *Ajustamento Planimétrico SIRGAS2000 em 23/11/2004 e 06/03/2006 - Relatório em ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/rel_sirgas2000.pdf*
- *Para obtenção de Altitude Ortométrica referente a levantamento SAT utilizar o MAPGEO2015 disponível em http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/modelo_geoidal.shtm*
- *As informações de coordenadas estão relacionadas ao sistema SIRGAS2000, em conformidade com a RPR 01/2015 de 24/02/2015.*

Localização

1,37m do nível do terraço, na parte sul da lage de concreto da Biblioteca Central da UFPE, na Avenida dos Reitores, bairro Cidade Universitária e a 0,60 km além da RN 3640 X.

Descrição

Pino de centragem forçada com uma chapa cravada no pilar de concreto de base retangular, medindo 0,40 x 0,22 m e altura de 1,37 m acima da laje de concreto do prédio da Biblioteca.

Observação

Informante: Professor Adeildo Antão dos Santos - Professor do Departamento de Cartografia da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE.Tel.: (81)2126-8095.E-mail: aasantos@npd.ufpe.br. SAT 93110 = RN 3640Z = EG 8131576.

Foto(s)

Mantenha-se atualizado consultando periodicamente o BDG.
Agradecemos a comunicação de falhas ou omissões.
Para entrar em contato conosco, utilize os recursos abaixo :
Fale conosco: 0800 218181 Email: ibge@ibge.gov.br

ANEXO O – RELATÓRIO DA ESTAÇÃO GEODÉSICA 91551

IBGE Relatório de Estação Geodésica

Estação :	91551	*Nome da Estação :*	91551	*Tipo :*	Estação GPS
Município :	RECIFE			*UF :*	PE
Última Visita:	06/04/2006	*Situação Marco Principal :*	Bom		

DADOS PLANIALTIMÉTRICOS		DADOS ALTIMÉTRICOS	DADOS GRAVIMÉTRICOS
Latitude	08 ° 03 ' 10,8963 " S	*Altitude Ortométrica(m)*	*Gravidade(mGal)*
Longitude	34 ° 57 ' 16,9542 "W	*Fonte*	*Datum*
Altitude Geométrica(m)	48,912	*Sigma Altitude(m)*	*Data Medição*
Fonte	GPS Geodésico	*Datum*	*Data Cálculo*
Origem	Ajustada	*Data Medição*	
Datum	SIRGAS2000	*Data Cálculo*	
Data Medição	15/07/1991		
Data Cálculo	23/11/2004		
Sigma Latitude(m)	0,017		
Sigma Longitude(m)	0,050		
Sigma Altitude Geométrica(m)	0,036		
UTM(N)	9.109.325,023		
UTM(E)	284.580,105		
MC	-33		

- *Ajustamento Altimétrico Simultâneo da Rede Altimétrica em 15/06/2011 - Relatório em ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/relatorioajustamento.pdf*
- *Ajustamento Planimétrico SIRGAS2000 em 23/11/2004 e 06/03/2006 - Relatório em ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/rel_sirgas2000.pdf*
- *Para obtenção de Altitude Ortométrica referente a levantamento SAT utilizar o MAPGEO2015 disponível em http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/modelo_geoidal.shtm*
- *As informações de coordenadas estão relacionadas ao sistema SIRGAS2000, em conformidade com a RPR 01/2015 de 24/02/2015.*

Localização

Na cobertura do prédio de Administracao do Centro de Tecnologia da UFPE, Departamento de Engenharia Cartográfica, Rua Acadêmico Hélio Ramos s/n, Cidade Universitária, Recife - PE.

Descrição

Pilar de concreto com um pino incrustado em sua superficie.

Foto(s)

Mantenha-se atualizado consultando periodicamente o BDG.
Agradecemos a comunicação de falhas ou omissões.
Para entrar em contato conosco, utilize os recursos abaixo :
Fale conosco: 0800 218181 Email: ibge@ibge.gov.br