

Avaliação dos Aquíferos das Bacias
Sedimentares da Província Hidrogeológica
Amazonas no Brasil (escala 1:1.000.000) e
Cidades Pilotos (escala 1:50.000)



Volume XII - Resumo Executivo

Dezembro/2015

República Federativa do Brasil

Dilma Vana Roussef

Presidenta

Ministério do Meio Ambiente

Izabella Mônica Vieira Teixeira

Ministra

Agência Nacional de Águas

Diretoria Colegiada

Vicente Andreu Guillo - Diretor-Presidente

Gisela Forattini

João Gilberto Lotufo Conejo

Ney Maranhão

Paulo Lopes Varella Neto

Superintendência de Implementação e Programas e Projetos

Ricardo Medeiros de Andrade

Tibério Magalhães Pinheiro

Coordenação de Águas Subterrâneas

Fernando Roberto de Oliveira

Adriana Niemeyer Pires Ferreira

Fabício Bueno da Fonseca Cardoso (Gestor)

Leonardo de Almeida

Letícia Lemos de Moraes

Márcia Tereza Pantoja Gaspar

Comissão Técnica de Acompanhamento e Fiscalização

Aline Maria Meiguins de Lima (SEMAS/PA)

Audrey Nery Oliveira Ferreira (FEMARH/RR)

Cléa Maria de Almeida Dore (FEMARH/RR)

Fabício Bueno da Fonseca Cardoso (ANA)

Fernando Roberto de Oliveira (ANA)

Flávio Soares do Nascimento (ANA)

Glauco Lima Feitosa (IMAC/AC)

Jane Freitas de Góes Crespo (SEMGRH/AM)
José Trajano dos Santos (SEDAM/RO)
Luciani Aguiar Pinto (SEMGRH/AM)
Luciene Mota de Leão Chaves (SEMAS/PA)
Marco Vinicius Castro Gonçalves (ANA)
Maria Antônia Zabala de Almeida Nobre (SEMA/AC)
Miguel Martins de Souza (SEMGRH/AM)
Miguel Penha (SEDAM/RO)
Nilza Yuiko Nakahara (FEMARH/RR)
Olavo Bilac Quaresma de Oliveira Filho (SEMAS/PA)
Vera Lucia Reis (SEMA/AC)
Verônica Jussara Costa Santos (SEMAS/PA)

Consórcio PROJETEC/TECHNE (Coordenação Geral)

João Guimarães Recena
Luiz Alberto Teixeira
Antonio Carlos de Almeida Vidon
Fábio Chaffin

Gerência do Contrato

Marcelo Casiuch
Roberta Alcoforado

Membros da Equipe Técnica Executora

João Manoel Filho (Coordenador)
Alerson Falieri Suarez
Ana Nery Cadete
Antonio Carlos Tancredi
Carla Maria Salgado Vidal
Carlos Danilo Câmara de Oliveira
Cristiana Coutinho Duarte
Edilton Carneiro Feitosa
Fabianny Joanny Bezerra C. da Silva
Maria de Fátima França de Moura
Fernando Correia
Joanderson James Oliveira Moraes

Ludmilla Calado
Marcondes Assis
Maria Marlúcia Freitas Santiago
Mário Vicente Caputo
Nelson da Franca Ribeiro dos Anjos
Patrícia Celeste Lopes Jesuíno
Paulo de Melo da Cunha Pedrosa
Rilson Magalhão Cabral
Roseli da Rocha Paixão de Almeida
Rudson Fonseca
Thiago Franklin de Almeida
Wagner Vitor Araújo Ferreira
Waldir Duarte Costa
Walter Lucena
Wilton José Silva da Rocha

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA

Avaliação dos Aquíferos das Bacias
Sedimentares da Província Hidrogeológica
Amazonas no Brasil (escala 1:1.000.000) e
Cidades Pilotos (escala 1:50.000)

Volume XII - Resumo Executivo

Dezembro/2015

Agência Nacional de Águas - ANA
Setor Policial Sul, Área 5, Quadra 3, Bloco B, L e M
CEP: 70610-200, Brasília - DF
PABX: 2109-5400 / 2109-5252
Endereço eletrônico: <http://www.ana.gov.br>

Equipe:
Agência Nacional de Águas - ANA
Superintendência de Implementação de Programas e Projetos - SIP

Elaboração e execução:
Consórcio TECHNE- PROJETEC

Todos os direitos reservados
É permitida a reprodução de dados e de informações, desde que citada a fonte.

Avaliação dos Aquíferos das Bacias Sedimentares da Província Hidrogeológica Amazonas no Brasil (escala 1:1.000.000) e Cidades Pilotos (escala 1:50.000).

Volume XII – Resumo Executivo.

Brasília: ANA, SIP, 2015.

1. Recursos Hídricos
 2. Província Hidrogeológica Amazonas
- I. Agência Nacional de Águas
 - II. Consórcio TECHNE-PROJETEC

APRESENTAÇÃO

O relatório final de Avaliação dos Aquíferos das Bacias Sedimentares da Província Hidrogeológica Amazonas (PHA) no Brasil (escala 1:1.000.000) e Cidades Pilotos (escala 1:50.000) é constituído dos seguintes volumes:

- Volume I – Balanço Hídrico da Província Hidrogeológica Amazonas
- Volume II – Geologia da Província Hidrogeológica Amazonas
- Volume III – Hidrogeologia e Modelo Numérico de Fluxo da Província Hidrogeológica Amazonas
 - ✓ Tomo I - Texto
 - ✓ Tomo II - Mapas
- Volume IV – Hidrogeoquímica da Província Hidrogeológica Amazonas
 - ✓ Tomo I - Aquíferos: Aluvial, Rio Branco, Içá e Tucunaré
 - ✓ Tomo II - Aquífero Alter do Chão, Coberturas Cenozoicas de Porto Velho, Barreiras, Pirabas, Monte Alegre, Itaituba e Inominado (Cruzeiro do Sul)
- Volume V – Cidade Piloto: Macapá – AP
 - ✓ Tomo I - Texto
 - ✓ Tomo II - Mapas
- Volume VI – Cidade Piloto: Porto Velho – RO
 - ✓ Tomo I - Texto
 - ✓ Tomo II - Mapas
- Volume VII – Cidade Piloto: Rio Branco – AC
 - ✓ Tomo I - Texto
 - ✓ Tomo II - Mapas
- Volume VIII – Cidade Piloto: Santarém – PA
 - ✓ Tomo I - Texto
 - ✓ Tomo II - Mapas
- Volume IX – Cidade Piloto: Tabatinga – AM
 - ✓ Tomo I - Texto
 - ✓ Tomo II - Mapas
- Volume X – Proposta de Projeto para Proteção Ambiental e Gestão Sustentável das Águas Subterrâneas na Região Amazônica a ser Desenvolvido pelo Brasil e Países Vizinhos
- Volume XI – Banco de Dados
- Volume XII – Resumo Executivo

SUMÁRIO

1 – Introdução	18
1.1 - Objetivo do Estudo	19
2 – Balanço Hídrico da Província Hidrogeológica Amazonas	20
2.1 - Introdução	21
2.2 - Hidroclimatologia	21
2.3 - Balanço Hídrico	23
2.4 - Escoamento de Base na PHA	23
2.5 - Influxo Superficial na PHA	24
3 – Geologia da Província Hidrogeológica Amazonas	26
3.1 - Introdução	27
3.2 - Bacia do Marajó	29
3.3 - Bacia do Amazonas	31
3.4 - Bacia do Solimões	33
3.5 - Bacia do Acre	35
4 – Hidrogeologia e Modelo Numérico de Fluxo da Província Hidrogeológica Amazonas	37
4.1 – Revisão Bibliográfica Sobre os Principais Aquíferos da Província Hidrogeológica Amazonas no Brasil	38
4.2 – Síntese da Geologia e suas Relações com a Hidrogeologia da PHA no Brasil	43
4.3 – Discussão Sobre os Sistemas Aquíferos Regionais Descritos na PHA	51
4.4 – Sistema Aquífero Amazonas no Brasil (SAAB)	54
4.5 – Execução e Interpretação dos Testes de Bombeamento	66
4.6 – Parâmetros Hidráulicos Obtidos	67
4.7 – Reservas	74
4.8 – Situação da Exploração dos Aquíferos na PHA no Brasil	75
4.9 – Modelagem Numérica de Fluxo na PHA no Brasil	84
4.10 – Conclusões da Modelagem Numérica de Fluxo na PHA no Brasil	102
5 – Hidrogeoquímica da Província Hidrogeológica Amazonas	104
5.1 - Introdução	105
5.2 – Influência do Intemperismo Químico Regional na Qualidade das Águas Subterrâneas da Província Hidrogeológica Amazonas - PHA .	108
5.3 - Aquífero Aluvial	109
5.4 - Aquífero Rio Branco	113

5.5 – Aquífero Içá.....	117
5.6 - Aquífero Tucunaré	121
5.7 - Aquífero Alter do Chão	125
5.8 - Aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho	129
5.9 - Aquífero Barreiras.....	134
5.10 - Aquífero Pirabas	138
5.11 - Aquífero Monte Alegre.....	143
5.12 - Aquitardo Itaituba.....	144
5.13 - Aquífero Inominado (Cruzeiro do Sul).....	146
6 – Cidade Piloto: Macapá - AP	151
6.1 - Introdução.....	152
6.2 - Geologia.....	155
6.3 - Hidrogeologia e Hidrodinâmica	158
6.4 - Hidrogeoquímica.....	166
6.5 - Vulnerabilidade Natural do Aquífero Tucunaré	171
7 – Cidade Piloto: Porto Velho - RO.....	177
7.1 - Introdução.....	178
7.2 - Geologia.....	180
7.3 - Hidrogeologia e Hidrodinâmica	183
7.4 - Hidrogeoquímica.....	193
7.5 - Vulnerabilidade Natural do Aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho	198
8 – Cidade Piloto: Rio Branco - AC.....	204
8.1 - Introdução.....	205
8.2 - Geologia.....	207
8.3 - Hidrogeologia e Hidrodinâmica	209
8.4 - Hidrogeoquímica.....	219
8.5 - Vulnerabilidade Natural do Aquífero Rio Branco	224
9 – Cidade Piloto: Santarém - PA.....	230
9.1 - Introdução.....	231
9.2 - Geologia.....	233
9.3 - Hidrogeologia e Hidrodinâmica	236
9.4 - Hidrogeoquímica.....	245
9.5 - Vulnerabilidade Natural do Aquífero Alter do Chão.....	250
10 – Cidade Piloto: Tabatinga - AM.....	255

10.1 - Introdução.....	256
10.2 - Geologia.....	258
10.3 - Hidrogeologia e Hidrodinâmica	258
10.4 - Hidrogeoquímica.....	268
10.5 - Vulnerabilidade Natural do Aquífero Aluvial	273
11 – Referências Bibliográficas	278

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Áreas de drenagem, precipitações e descargas médias superficiais nas sub-bacias ANA e na Bacia Amazônica, em sua totalidade.	25
Tabela 2.2 - Resumo do balanço hídrico na PHA no Brasil, expresso em termos de lâminas escoadas, considerando os influxos superficiais externos.	25
Tabela 4.1 – Espessuras da seção argilosa superior da fase Pós-Rifte acima do topo da Formação Ramon em poços estratigráficos do BDEP perfurados na Bacia do Acre.	51
Tabela 4.2 – Unidades Litoestratigráficas (ULs) quaternárias, cenozoicas e cretácicas das bacias sedimentares da Amazônia e suas correlações (Abreu <i>et al.</i> , 2013).	54
Tabela 4.3 – Reservas do SAGA (segundo Abreu <i>et al.</i> , 2013) e espessuras obtidas considerando as áreas das bacias sedimentares.	54
Tabela 4.4 – Características dos 30 testes de bombeamento realizados no âmbito do Projeto ANA-PHA.	67
Tabela 4.5 – Valores médios obtidos pelo método de Cooper & Jacob (1946) no âmbito do Projeto ANA-PHA.	68
Tabela 4.6 – Distribuição por folha ao milionésimo dos 14.676 poços catalogados do SIAGAS em setembro de 2015 na PHA no Brasil.	78
Tabela 4.7 – Capacidade específica (produtividade) média de poços da PHA no Brasil segundo dados catalogados do SIAGAS em setembro de 2015.	79
Tabela 4.8 – Profundidade média dos poços catalogados do SIAGAS/CPRM 2015.	80
Tabela 4.9 – Espessuras dos aquíferos da PHA no Brasil.	80
Tabela 4.10 – Potencialidade dos aquíferos da PHA e do Sistema Aquífero Amazonas no Brasil (SAAB).	83
Tabela 4.11 – Síntese da avaliação dos recursos hídricos subterrâneos da PHA no Brasil.	84
Tabela 4.12 – Valores médios de condutividade hidráulica avaliados em cidades situadas na Depressão do Baixo Amazonas.	90
Tabela 4.13 – Valores médios de condutividade hidráulica obtidos em cidades situadas na Depressão do Solimões.	92
Tabela 4.14 - Sumário dos parâmetros ótimos do modelo numérico do SAAB.	95
Tabela 4.15 – Estimativa da vazão de escoamento natural do SAAB a partir do mapa potenciométrico de equilíbrio fornecido pelo modelo numérico de fluxo em seção transversal na região do baixo Amazonas na altura da cidade de Santarém – PA.	101
Tabela 4.16 – Valores da descarga de base e da vazão de escoamento natural do SAAB, estimada em seção transversal na planície do baixo rio Amazonas.	102

Tabela 5.1 – Quantitativos de poços analisados, cidades e seus respectivos aquíferos nas duas campanhas de amostragem na PHA.	107
Tabela 6.1 – Parâmetros hidráulicos avaliados para o aquífero Tucunaré na cidade de Macapá – AP, pelo método de Cooper & Jacob (1946).....	158
Tabela 6.2 – Parâmetros hidráulicos do Aquífero Tucunaré em Macapá - AP obtidos pelo modelo de Neuman (1975).	159
Tabela 6.3 - Reservas do aquífero Tucunaré na zona urbana de Macapá, na área de 109 km ² do balanço hidrogeológico.....	164
Tabela 7.1 – Parâmetros hidráulicos avaliados para o aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho na cidade de Porto Velho - RO, pelo método de Cooper & Jacob (1946).	184
Tabela 7.2 – Parâmetros hidráulicos do Aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho em Porto Velho - RO obtidos pelo modelo de Neuman (1975)...	184
Tabela 7.3 - Reservas do aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho na zona urbana de Porto Velho.....	188
Tabela 8.1 – Parâmetros hidráulicos avaliados pelo método semilogarítmico de Jacob para o aquífero “confinado” Rio Branco na cidade de Rio Branco – AC.	210
Tabela 8.2 – Parâmetros hidráulicos avaliados pelo método de Neuman (1975) para o aquífero Rio Branco na cidade de Rio Branco – AC.	210
Tabela 8.3 – Parâmetros hidráulicos do aquífero “confinado” Rio Branco na cidade de Rio Branco – AC, segundo Melo Jr. <i>et al.</i> (2010).....	210
Tabela 8.4 - Reservas do aquífero Rio Branco na zona urbana de Rio Branco.	214
Tabela 9.1 – Parâmetros hidráulicos avaliados para o aquífero Alter do Chão na cidade de Santarém - PA, pelo método de Cooper & Jacob (1946).....	237
Tabela 9.2 – Parâmetros hidráulicos do Aquífero Alter do Chão, avaliados pelo método de Walton (1962) baseado em Hantush & Jacob (1955).....	237
Tabela 9.3 – Parâmetros hidráulicos do Aquífero Alter do Chão em Santarém – PA, obtidos pelo modelo de Neuman (1975).....	237
Tabela 9.4 - Reservas do aquífero Alter do Chão na zona urbana de Santarém na área de 74 km ² do balanço hidrogeológico.....	243
Tabela 10.1 – Parâmetros hidráulicos avaliados pelo método semilogarítmico de Cooper & Jacob (1946) para o aquífero “confinado” aquífero Aluvial na cidade de Tabatinga – AM.....	259
Tabela 10.2 – Parâmetros hidráulicos avaliados pelo método de Neuman (1975) para o aquífero Aluvial na cidade de Tabatinga – AM.	259
Tabela 10.3 - Reservas do aquífero Aluvial na cidade de Tabatinga – AM....	264

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Localização da Porção Brasileira na Província Hidrogeológica Amazonas na América do Sul.	22
Figura 3.1 - Bacias sedimentares do Brasil.	28
Figura 3.2 - Bacias Sedimentares do Norte do Brasil, arcos, altos e profundidades do embasamento. Modificado de Wanderley Filho <i>et al.</i> (2010).	29
Figura 3.3 – Carta Cronoestratigráfica pós-paleozoica da Bacia do Marajó. Modificada de Zalán & Matsuda (2007).	30
Figura 3.4 - Carta cronoestratigráfica da Bacia do Amazonas, modificada de Cunha <i>et al.</i> (2007).	32
Figura 3.5 - Carta cronoestratigráfica da Bacia do Solimões, modificada de Wanderley Filho <i>et al.</i> (2007).	34
Figura 3.6 - Localização e Arcabouço estrutural da Bacia do Acre. Os sete poços estão posicionados pelas letras de A até G. A seção pré-cretácea ocupa uma área de apenas 23.231 km ² . (Modificado de Cunha, 2006).	35
Figura 3.7 - Carta cronoestratigráfica da Bacia do Acre, modificada de Cunha <i>et al.</i> (2007).	36
Figura 4.1 - Interpretação de seções sísmicas das Sub-bacias Mexiana, Limoeiro, Cametá e Mocajuba (Villegas, 1994 e Costa <i>et al.</i> , 2002), da bacia do Marajó. Fonte: Volume II - Geologia.	44
Figura 4.2 - Traçado de linhas sísmicas da Petrobras, na Bacia do Amazonas desde o Arco de Gurupá ao leste até o Arco de Purus ao oeste (Wanderley Filho <i>et al.</i> , 2005). Fonte: Volume II – Geologia.	45
Figura 4.3 - Seção geológica longitudinal da Bacia do Amazonas. Modificado de Caputo (1984). Fonte: Volume II – Geologia.	46
Figura 4.5 - Seção geológica transversal da Bacia do Amazonas Modificada de Caputo (1984). Fonte: Volume II – Geologia.	46
Figura 4.6 – Na seção geológica de Wanderley Filho & Travassos (2011) das bacias do norte do Brasil é indicada a movimentação vertical (epirogênese e subsidência) e sobrecargas laterais diferenciais durante o Fanerozoico. É feita distinção entre arco (que separa bacias) e alto (que não separa bacias). Fonte: Volume II - Geologia.	48
Figura 4.7 – A Orogenia Juruá afetou toda a Bacia do Solimões e Bacia do Acre. Ao longo de uma zona de falhamentos se originaram cinco trendes estruturais potencialmente produtores de hidrocarbonetos (Jandiatuba, Jutai, Ipixuna, Juruá e Urucu) e três séries de falhas com direções diferentes (Séries A, B e C) (Caputo, 1985; Caputo, 1991). A Orogenia Juruá, de idade neojurássica, causou soerguimento e a redução por erosão da área ocidental da Bacia do Solimões, quando vastas áreas do embasamento da bacia foram expostas e erodidas, e mais tarde encobertas pela Formação Javari no Cretáceo. A Bacia de Eirunepé e a Bacia do Acre foram desconectadas da Bacia do Solimões pelos arcos Jutai e Envira, respectivamente, causados pela Orogenia Juruá. Fonte: Volume II – Geologia.	48
Figura 4.8 – Seções longitudinais e transversais da Bacia do Solimões. (A) A região sob a 1ª soleira foi deprimida parcialmente pelo efeito do peso do diabásio e áreas periféricas foram soerguidas. (B) Os altos transpressionais foram elevados por mais de 1,5 km, com remoção de todas as formações	

paleozoicas sobrejacentes pela Orogenia Juruá. Fonte: Volume II – Geologia.	49
Figura 4.9 - Localização e Arcabouço estrutural da Bacia do Acre (modificado de Cunha, 2006). Fonte: Volume II – Geologia.	50
Figura 4.10 - Seção geológica esquemática da Bacia do Acre, segundo a linha A-B. da figura 4.9. A região da Falha Batã tornou-se um baixo do embasamento no lado oeste no mississipiano e também no Triássico-Jurássico. A depressão foi preenchida por sedimentos e nivelada no Permiano, Triássico e Jurássico. A falha de cavalgamento Batã aproveitou o plano de falha normal antigo e soergueu a região depois do Mesomioceno. Figura modificada de Cunha (2006). Fonte: Volume II – Geologia.	50
Figura 4.11 – O Sistema Aquífero Amazonas no Extremo Oeste da PHA no Brasil, adaptado de Rosário (2011).	53
Figura 4.12 – Modelo digital do terreno da Província Hidrogeológica Amazonas elaborado a partir de imagens SRTM (<i>Shuttle Radar Topographic Mission</i>). ..	57
Figura 4.13 – Bloco 3D do modelo litoestratigráfico da PHA no Brasil destacando o SAAB na parte superior repousando em discordância sobre derrames de diabásio, evaporitos, folhelhos e siltitos.	58
Figura 4.14 – Localização dos perfis hidrogeológicos longitudinal e dos perfis transversais na PHA no Brasil.	60
Figura 4.15 – Perfil Hidrogeológico Longitudinal da PHA no Brasil.	61
Figura 4.16 – Mapa de Isópacas do SAAB.	63
Figura 4.17 – Mapa Estrutural do Topo do SAAB.	64
Figura 4.18 – Mapa Estrutural da Base do SAAB.	65
Figura 4.19 – Mapa geológico da Província Hidrogeológica Amazonas com localização das cidades onde foram realizados testes de bombeamento.	69
Figura 4.20 – Bloco 3D do SAAB – Sistema Aquífero Amazonas no Brasil, com indicação do seu volume e reserva permanente.	76
Figura 4.21 - Mapa Hidrogeológico do Brasil ao Milionésimo com o índice das folhas e limite da PHA no Brasil. Fonte: CPRM, 2014.	77
Figura 4.22 – Espessuras máximas das unidades hidrogeológicas de fluxo (UHF) da Província Hidrogeológica Amazonas no Brasil.	81
Figura 4.23 – Discretização da área do modelo numa malha de 7.200 (120 x 60) células regulares de 15” x 15”, com apenas uma unidade hidrogeológica de fluxo (UHF), que representa o SAAB.	86
Figura 4.24 – Discretização do contorno da PHA com 2.493 células ativas....	86
Figura 4.25 – Cobertura fontes e sumidouros constando unicamente das condições de carga especificada (a leste e a oeste) e de fluxo nulo (ao norte e ao sul).	87
Figura 4.26 – Cobertura de recarga, representada por um único polígono no qual foi imposto um valor inicial correspondente à lâmina média de 220 mm/ano estimada pelo balanço hídrico da PHA.	88
Figura 4.27 – Modelo digital do terreno utilizado para obtenção da potenciometria do SAAB a partir das cotas de nível de água dos aquíferos nas cidades estudadas e dos rios no período de estiagem.	88
Figura 4.28 – Potenciometria do SAAB obtida a partir do modelo digital do terreno inferindo as cotas dos níveis de água dos aquíferos nas cidades estudadas e dos rios para o período de estiagem.	89

Figura 4.29 – Valores pontuais de condutividade hidráulica, avaliados nos 30 (trinta) testes de aquífero realizados em 14 (quatorze) cidades da PHA pelo método de Neuman (1975).....	91
Figura 4.30 – Condutividades hidráulicas obtidas por tentativa e erro na solução inicial usando o MODFLOW e que aproximam a potenciometria do mapa de cargas iniciais inferidas para o período de estiagem a partir do modelo digital do terreno.....	92
Figura 4.31 – Solução inicial de distribuição de cargas hidráulicas no SAAB obtida com MODFLOW 2000 em regime permanente, por tentativa e erro.	93
Figura 4.32 – Comportamento instável da recarga na primeira solução automática.....	94
Figura 4.33 – Diagrama ilustrativo da sensibilidade dos parâmetros hidráulicos mostrando que o parâmetro recarga tem sensibilidade muito baixa, podendo assumir um valor constante qualquer e não influir nas soluções.	95
Figura 4.34 – Potenciometria da solução obtida com estimativa automática de parâmetros pelo método zonal (PEST Zonal).	96
Figura 4.35 – Distribuição final das cargas hidráulicas do SAAB calibrada com PEST Zonal, mostrando que todas as células do modelo se apresentam inundadas.....	96
Figura 4.36 – Desvios da reta de 45° entre cargas observadas e cargas calculadas, com um erro absoluto de -0,05 m e um erro relativo de -0,1, considerado bastante pequeno.	97
Figura 4.37 – Potenciometria de equilíbrio do SAAB fornecido pelo modelo de fluxo adotado.....	98
Figura 4.38 – Seção transversal de cálculo do fluxo natural do SAAB na planície do baixo Amazonas a jusante de Santarém – PA, com área de 101,911 km ²	99
Figura 4.39 – Localização da seção de cálculo do fluxo natural do SAAB na planície do baixo Amazonas a jusante de Santarém – PA.....	100
Figura 4.40 – Avaliação do gradiente hidráulico do SAAB na seção de cálculo do fluxo natural na região do baixo Amazonas na altura da cidade de Santarém – PA.	101
Figura 5.1 – Localização das cidades analisadas nas duas campanhas de amostragem na PHA.	106
Figura 6.1 – Localização do município de Macapá e da área de estudo.....	154
Figura 6.2 – Mapa geológico da folha de 15 minutos e da área de estudo na cidade de Macapá – AP.	157
Figura 6.3a - Profundidade do nível estático das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré em abril de 2012 na cidade de Macapá - AP.	160
Figura 6.3b - Profundidade do nível estático das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré em outubro de 2012 na cidade de Macapá - AP.	161
Figura 6.4a - Hidrogeologia e superfície potenciométrica das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré em abril de 2012 na cidade de Macapá - AP.	162
Figura 6.4b - Hidrogeologia e superfície potenciométrica das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré em outubro de 2012 na cidade de Macapá - AP.	163
Figura 6.5 – Distribuição espacial da vazão dos poços cadastrados e catalogados na região de Macapá – AP.....	165

Figura 6.6 – Localização dos pontos de amostragem no aquífero Tucunaré na cidade de Macapá - AP.....	167
Figura 6.7a – Zoneamento da vulnerabilidade do aquífero Tucunaré na zona urbana de Macapá na coleta de abril de 2012 – Método DRASTIC.....	173
Figura 6.7b – Zoneamento da vulnerabilidade do aquífero Tucunaré na zona urbana de Macapá coleta de outubro de 2012 – Método DRASTIC.	174
Figura 6.8a – Distribuição espacial da vulnerabilidade média do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (abril de 2012) na cidade de Macapá – AP pelo método GOD.....	175
Figura 6.8b – Distribuição espacial da vulnerabilidade média do Aquífero Tucunaré no período seco (outubro de 2012) na cidade de Macapá – AP pelo método GOD.....	176
Figura 7.1 – Localização do município de Porto Velho e da área de estudo.	179
Figura 7.2 – Mapa geológico da região de Porto Velho baseado no modelo digital do terreno e modificado de CPRM (2004; 2007), com localização de seções geológicas esquemáticas.....	182
Figura 7.3a – Profundidade do nível estático das águas subterrâneas do aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho em abril de 2012 na cidade de Porto Velho – RO.....	186
Figura 7.3b – Profundidade do nível estático das águas subterrâneas do aquífero Coberturas Cenozoicas em outubro de 2012 na cidade de Porto Velho – RO.....	187
Figura 7.4a – Mapa hidrogeológico com superfície potenciométrica das águas subterrâneas do aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho em abril de 2012 na cidade de Porto Velho – RO.....	189
Figura 7.4b – Mapa hidrogeológico com superfície potenciométrica das águas subterrâneas do aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho em outubro de 2012 na cidade de Porto Velho – RO.....	190
Figura 7.5 – Distribuição espacial da vazão dos poços cadastrados e catalogados na região de Porto Velho – RO.....	192
Figura 7.6 – Localização dos pontos de amostragem das análises físico-químicas e bacteriológicas no aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho, na cidade de Porto Velho - RO.....	194
Figura 7.7a – Distribuição espacial da vulnerabilidade do aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho no período chuvoso (abril de 2012), na cidade de Porto Velho - RO, pelo método DRASTIC.....	200
Figura 7.7b – Distribuição espacial da vulnerabilidade do aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho no período seco (outubro de 2012), na cidade de Porto Velho - RO, pelo método DRASTIC.....	201
Figura 7.8a – Distribuição espacial da vulnerabilidade do aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho no período chuvoso (abril de 2012), na cidade de Porto Velho - RO, pelo método GOD.	202
Figura 7.8b – Distribuição espacial da vulnerabilidade do aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho no período seco (outubro de 2012), na cidade de Porto Velho - RO, pelo método GOD.	203
Figura 8.1 – Localização da área de estudo no município de Rio Branco.	206
Figura 8.2 – Mapa geológico da folha de 15 minutos e da área de estudo com localização de seção topográfica transversal ao vale do Rio Acre na zona urbana de Rio Branco – AC.....	208

Figura 8.3a – Profundidade do nível estático das águas subterrâneas do aquífero Rio Branco em abril de 2012 na cidade de Rio Branco – AC.....	212
Figura 8.3b – Profundidade do nível estático das águas subterrâneas do aquífero Rio Branco em outubro de 2012 na cidade de Rio Branco – AC.	213
Figura 8.4a – Mapa hidrogeológico com potenciometria das águas subterrâneas do aquífero Rio Branco em abril de 2012, na cidade de Rio Branco – AC.....	215
Figura 8.4b – Mapa hidrogeológico com potenciometria das águas subterrâneas do aquífero Rio Branco em outubro de 2012, na cidade de Rio Branco – AC.....	216
Figura 8.5 – Distribuição espacial da vazão dos poços cadastrados e catalogados na região de Rio Branco – AC.	218
Figura 8.6 – Localização dos pontos de amostragem no aquífero Rio Branco na cidade de Rio Branco.....	220
Figura 8.7a – Zoneamento da vulnerabilidade do aquífero Rio Branco na zona urbana de Rio Branco, na coleta de abril de 2012 – Método DRASTIC.....	226
Figura 8.7b – Zoneamento da vulnerabilidade do aquífero Rio Branco na zona urbana de Rio Branco, na coleta de outubro de 2012 – Método DRASTIC. ..	227
Figura 8.8a – Zoneamento da vulnerabilidade do aquífero Rio Branco na zona urbana de Rio Branco, na coleta de abril de 2012 - Método GOD.	228
Figura 8.8b – Zoneamento da vulnerabilidade do aquífero Rio Branco na cidade de Rio Branco, na coleta de outubro de 2012 - Método GOD.	229
Figura 9.1 – Localização do município de Santarém e da área de estudo....	232
Figura 9.2 - Mapa geológico da folha de 15 minutos da região de Santarém – PA.	235
Figura 9.3a - Profundidade do nível estático das águas subterrâneas do aquífero Alter do Chão em abril de 2012 na cidade de Santarém - PA.....	239
Figura 9.3b - Profundidade do nível estático das águas subterrâneas do aquífero Alter do Chão em outubro de 2012 na cidade de Santarém - PA. ...	240
Figura 9.4a - Hidrogeologia e superfície potenciométrica das águas subterrâneas do aquífero Alter do Chão em abril de 2012 na cidade de Santarém - PA.....	241
Figura 9.4b - Hidrogeologia e superfície potenciométrica das águas subterrâneas do aquífero Alter do Chão em outubro de 2012 na cidade de Santarém - PA.....	242
Figura 9.5 – Distribuição espacial da vazão dos poços cadastrados e catalogados na região de Santarém – PA.....	244
Figura 9.6 – Localização dos pontos de amostragem no aquífero Alter do Chão na cidade de Santarém - PA.	246
Figura 9.7a – Zoneamento da vulnerabilidade do aquífero Alter do Chão na zona urbana de Santarém na coleta de abril de 2012 – Método DRASTIC. ..	251
Figura 9.7b – Zoneamento da vulnerabilidade do aquífero Alter do Chão na zona urbana de Santarém coleta de outubro de 2012 – Método DRASTIC... ..	252
Figura 9.8a – Distribuição espacial da vulnerabilidade do Aquífero Alter do Chão no período chuvoso (abril de 2012) na cidade de Santarém – PA pelo método GOD.	253
Figura 9.8b – Distribuição espacial da vulnerabilidade do Aquífero Alter do Chão no período seco (outubro de 2012) na cidade de Santarém – PA pelo método GOD.	254

Figura 10.1 – Localização da área de estudo no município de Tabatinga – AM.	257
Figura 10.2 - Mapa geológico da folha de 15 minutos da região de Tabatinga – AM.....	260
Figura 10.3a – Profundidade do nível estático das águas subterrâneas do aquífero Aluvial em abril de 2012 na cidade de Tabatinga - AM.....	262
Figura 10.3b – Profundidade do nível estático das águas subterrâneas do aquífero Aluvial em outubro de 2012 na cidade de Tabatinga - AM.....	263
Figura 10.4a – Mapa hidrogeológico com a potenciometria das águas subterrâneas do aquífero Aluvial em abril de 2012 na cidade de Tabatinga - AM.....	265
Figura 10.4b – Mapa hidrogeológico com a potenciometria das águas subterrâneas do aquífero Aluvial em outubro de 2012 na cidade de Tabatinga - AM.....	266
Figura 10.5 – Distribuição espacial da vazão dos poços cadastrados e catalogados na região de Tabatinga – AM.....	267
Figura 10.6 – Localização dos pontos de amostragem no aquífero Aluvial na cidade de Tabatinga - AM.	269
Figura 10.7a – Zoneamento da vulnerabilidade do aquífero Aluvial na zona urbana de Tabatinga na coleta de abril de 2012 – Método DRASTIC.....	274
Figura 10.7b – Zoneamento da vulnerabilidade do aquífero Aluvial na zona urbana de Tabatinga coleta de outubro de 2012 – Método DRASTIC.	275
Figura 10.8a – Distribuição espacial da vulnerabilidade do Aquífero Aluvial no período chuvoso (abril de 2012) na cidade de Tabatinga – AM pelo método GOD.	276
Figura 10.8b – Distribuição espacial da vulnerabilidade do Aquífero Aluvial no período seco (outubro de 2012) na cidade de Tabatinga – AM pelo método GOD.	277

1 – Introdução

1.1 - Objetivo do Estudo

A água é o recurso natural essencial à vida humana, cerca de 71% da superfície da Terra é coberta por água em estado líquido, porém desse total, 97% está disponível em oceanos e mares, ou seja, água salgada, 2% encontram-se em geleiras inacessíveis e apenas 1% de água doce disponível em rios, lagos e fontes subterrâneas.

Com o crescimento populacional e a maximização da utilização dos recursos naturais, a água vem sofrendo sucessivas reduções de oferta, haja vista o crescimento da demanda para os mais diversos usos, principalmente o abastecimento humano.

Estima-se que cerca de 40% da população global atualmente vive sob a situação de estresse hídrico. Essas pessoas habitam regiões onde a oferta anual é inferior a 1.700 m³/hab, limite mínimo considerado seguro pela Organização das Nações Unidas (ONU).

Apesar de o Brasil ser considerado um dos países mais ricos em termos de disponibilidade de água doce do planeta, as cidades enfrentam crises de abastecimento, o que intensifica os processos de pesquisa acerca de possíveis mananciais para abastecimento.

Por conta dessa competição crescente pelos recursos hídricos disponíveis, surgiu um programa de aquíferos transfronteiriços das Américas (ISARM-Américas), onde foram identificados 59 aquíferos transfronteiriços, sendo 35 na América do Sul, 13 na América Central, 3 no Caribe e 8 na América do Norte. Dentre esses aquíferos identificados, no Brasil surgiu em destaque o Sistema Aquífero Amazonas (SAA), que a princípio englobava as formações Içá, Solimões e Alter do Chão, no Brasil, compartilhado territorialmente também com a Bolívia, Colômbia, Equador, Peru e Venezuela (Ferreira *et al.*, 2006).

No ISARM-Américas ficou estabelecida a necessidade de um modelo de gestão para que fossem criados mecanismos de proteção e preservação ambiental ao sistema aquífero descoberto.

Para tanto, a Agência Nacional de Águas (ANA) iniciou o estudo das águas subterrâneas do SAA, através do projeto de Avaliação dos Aquíferos das Bacias Sedimentares da Província Hidrogeológica Amazonas no Brasil na escala de 1:1.000.000 e Cidades Pilotos na escala 1:50.000 como instrumento para obter informações acerca dos aspectos geológicos, hidrogeológicos e hidrogeoquímicos, visando, sobretudo, no futuro a gestão das águas.

Nesse contexto, foi desenvolvido esse projeto, um processo de planejamento que envolveu os mais diversos setores, integrados por representantes da ANA, Estados (Acre, Amazonas, Rondônia, Roraima, Pará e Amapá), entre outras instituições.

O relatório final contempla 12 (doze) produtos, dos quais esse resumo executivo procura o descrever de forma sucinta nos capítulos a seguir.

2 – Balanço Hídrico da Província Hidrogeológica Amazonas

2.1 - Introdução

O relatório do balanço hídrico da Província Hidrogeológica Amazonas (PHA) no Brasil abordou os seguintes conteúdos: caracterização hidroclimatológica baseada nas Normais Climatológicas do Brasil (1961-1990) disponibilizadas pelo INMET (2009); levantamento e análise dos dados de precipitações normais no período de 1961 a 1990 durante os 12 meses do ano para a caracterização do excesso normal de água na PHA no Brasil; levantamento e análise do acervo de dados pluviométricos e fluviométricos disponibilizados pela ANA no portal Hidroweb; balanço hídrico mensal utilizando dados recentes (1981-2010) de 64 postos pluviométricos; e balanço hídrico de 1981-2010 usando dados diários de 52 postos pluviométricos.

2.2 - Hidroclimatologia

A Província Hidrogeológica Amazonas no Brasil (**figura 2.1**) possui uma área estimada de 2 milhões de km² e está inserida na bacia Amazônica. Tem um clima quente e úmido, com temperaturas anuais variando entre 21°C e 42°C. A temperatura média anual é de 28°C. Caracteriza-se por umidade elevada durante todo o ano, com médias compreendidas entre 82,5% em setembro, crescendo até 89% em abril e novamente decrescendo de abril até setembro, o que favorece a formação da cobertura vegetal de floresta ombrófila, com árvores de grande porte e folhagens sempre verdes.

A precipitação média na PHA no Brasil é de 2.351,8 mm, onde a máxima ocorre em Belém com 2.921,8 mm, e a mínima em Rio Branco com 1.947,5 mm. Março é o mês mais chuvoso e setembro o mês mais seco. As chuvas em certos períodos provocam enchentes, inundando vastas regiões e fertilizando a terra. As precipitações contribuem para a cheia dos rios e auxiliam na transformação das paisagens amazônicas no meio tempo entre a estiagem e o período de chuvas.

De acordo com os dados do INMET (2009) para o período de 1961 a 1990, o valor médio anual de pressão atmosférica na PHA no Brasil é de 1.002,7 mb. A máxima ocorre em Belém com 1.010,2 mb e a mínima em Cruzeiro do Sul com 988,8 mb.

No período chuvoso, de janeiro a maio, a velocidade dos ventos é de 1,3 m/s a 1,15 m/s, enquanto que no período de estiagem, a velocidade média dos ventos é de 1,2 m/s em junho a 1,6 m/s em novembro. O regime dos ventos é classificado como Calmo em Cruzeiro do Sul, Rio Branco, Fonte Boa, Tefé, Belém, Itaituba e Porto Velho; tem direção predominante Nordeste em Manaus, Parintins, Barcelos e Macapá; direção Norte em Santarém e Humaitá.

A insolação média anual é de 1.886,1 horas, com máxima anual de 2.335,2 horas em Macapá e mínima de 1.467,6 horas em Lábrea.

Segundo as Normais Climatológicas de 1961-1990, a evaporação total média anual é de 727,6 mm, com mínima média anual de 490,7 mm em Fonte Boa e a máxima de 1.074,2 mm em Macapá.

O trabalho de Vila Nova *et al.* (1976) é uma das principais referências sobre evapotranspiração potencial (ETP) na Bacia Amazônica. Esses autores obtiveram o valor mínimo de evapotranspiração de 104,7 mm/mês em junho e o valor máximo de 141,6 mm/mês em outubro.

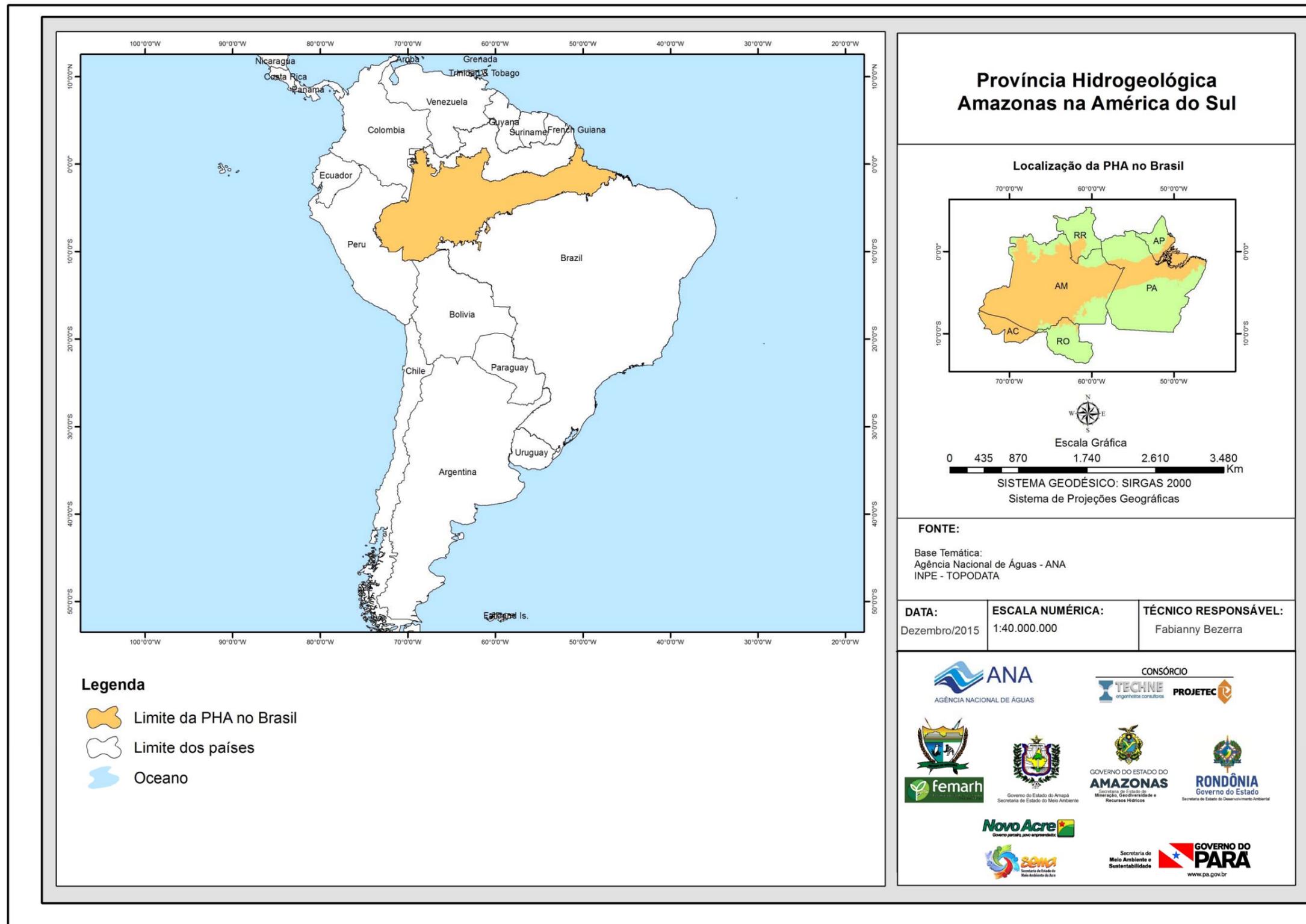


Figura 2.1 - Localização da Porção Brasileira na Província Hidrogeológica Amazonas na América do Sul.

A declividade média da PHA no Brasil é de 3,4 m/km, o que sugere que o seu relevo é significativamente diferente do existente no restante da Bacia do Amazonas, que varia de 12,7 a 17,3 m/km.

2.3 - Balanço Hídrico

O balanço hídrico foi feito pelo método de Thornthwaite, utilizando a equação: $P + RU = ETR + EX$, onde P é a precipitação (mm); Ru é a reserva útil de água utilizada pelas plantas retida no solo; ETR é a evapotranspiração real (mm); EX é o somatório do escoamento superficial direto (R) para os rios (mm) e a infiltração (I) em mm.

A precipitação média anual da PHA no Brasil no período de 1961-1990 foi de 2.487,8 mm/ano, calculada a partir de dados de 36 postos pluviométricos mediante aplicação do método de Thiessen, cujo método consiste em adotar pesos de acordo com a área de influência de cada posto pluviométrico.

A distribuição temporal das normais se processa em duas estações, uma no primeiro semestre onde ocorrem 69% das chuvas (1.717 mm), e outra no segundo semestre com 31% (771 mm) das chuvas.

Para o cálculo do Balanço Hídrico de 1981-2010 foram selecionados 64 postos pluviométricos no portal Hidroweb da ANA a partir dos 855 existentes nos seis Estados inseridos na PHA, onde se obteve a precipitação média anual de 2.299,4 mm/ano. O excedente hídrico do balanço mensal no período de 1981-2010 mostra que a lâmina média anual disponível para escoamento é de 846,7 mm, sendo que 89,8% escoam no primeiro semestre e apenas 10,2% no segundo semestre. Os maiores excedentes ocorrem em abril e os mínimos em dezembro.

O balanço hídrico diário foi feito usando apenas 52 postos do total de 64 pluviométricos, devido a inconsistência na série de dados. A média dos totais mensais da chuva diária na PHA no Brasil alcança um total anual de 2.286,7 mm, distribuído entre um máximo mensal de 290,4 mm (12,7%) em março e um mínimo de 96,7 mm (4,2%) em agosto. Os valores médios indicam uma lâmina anual de 858,0 mm disponível para escoamento.

2.4 - Escoamento de Base na PHA

Adotou-se uma metodologia simplificada e adaptada da concepção de Linsley *et al.* (1958) para a separação do escoamento de base nos hidrogramas selecionados na porção brasileira da PHA, o qual consiste em separar o fluxo de base no hidrograma, de um dado ano hidrológico.

O estudo do escoamento de base para avaliação da recarga dos aquíferos foi realizado através da análise dos hidrogramas de descargas médias diárias em 24 postos. Ressalta-se que dentre os 24 postos, apenas 20 foram usados no cálculo de descarga de base da PHA no Brasil, pois o posto 19200000 não se encontra localizado na Formação Alter do Chão, assim como os postos fluviométricos 1432500, 12850000 e 12845000 não se consegue identificar o período de recessão no hidrograma.

Os resultados encontrados para o escoamento básico por Unidade Hidrogeológica de Fluxo (UHF) através da análise das recessões foi de 180 mm/ano no aquífero Alter do Chão, 245 mm/ano no aquífero Içá, 195 mm/ano

no aquífero Solimões e 219 mm/ano no Sistema Aquífero Amazonas no Brasil (SAAB).

O escoamento básico deduzido das variações sazonais de nível de água nas 18 cidades foi de 185 mm/ano no aquífero Aluvial, 245 mm/ano no aquífero Içá, 343 mm/ano no aquífero Alter do Chão, 265 mm/ano no aquífero Tucunaré, 117 mm/ano no aquífero Solimões e 222 mm/ano para o SAAB.

Dadas as dimensões continentais da área de estudo, pode-se dizer que os valores encontrados na província a partir das recessões (219 mm) são relativamente próximos aos obtidos através das variações sazonais de nível d'água (222 mm), permitindo estimar um valor médio de 205 mm/ano como representativo do fluxo de base na PHA.

2.5 - Influxo Superficial na PHA

Molinier *et al.* (1995) caracterizaram o regime hidrológico do rio Amazonas e de seus principais afluentes, onde obtiveram uma descarga específica média para a bacia Amazônica de 37,5 l/s.km², enquanto que Vila Nova *et al.* (1976) obtiveram um valor de 29,2 l/s.km², resultados próximos aos obtidos no balanço hídrico da PHA no Brasil de 31,8 l/s.km².

Os resultados de descarga específica obtidos no interior e exterior da PHA demonstram que o relevo pode influenciar na descarga, haja vista que os valores no exterior são mais elevados (34,1 l/s.km²), pois a declividade é mais acentuada, com valores superiores a 7 m/km, enquanto que no interior a descarga é menor (27,1 l/s.km²) por se tratar de terreno com menores declividades, que variam de 0 a 7 m/km.

O valor do influxo superficial de 154.879 m³/s (**tabela 2.1**) gerado na área externa da PHA (4,125 x 10⁶ km²) corresponde a uma lâmina de 2.439 mm na área da PHA no Brasil (2 x 10⁶ km²).

Tabela 2.1 - Áreas de drenagem, precipitações e descargas médias superficiais nas sub-bacias ANA e na Bacia Amazônica, em sua totalidade.

Rio	Sub-Bacia	Área de Drenagem (km ²)			Chuva (mm/ano)	Descarga média (m ³ /s)		
		Interior da PHA	Exterior da PHA	Total		Interior da PHA	Exterior da PHA	Total
Amazonas (Nascente-Javari)	10	80.244	0	72.800	2.900	2170	0	2.485
Amazonas (Javari-Auati)	11	43.423	868.450	946.903	2.336	1176	32.607	32.311
Amazonas (Auati-Coari)	12	366.765	154.516	494.211	2.880	9925	5.802	16.864
Amazonas (Coari-Purus)	13	396.945	35.648	397.376	2.566	10743	1.339	13.559
Negro	14	293.769	493.291	781.994	2.780	7948	18.521	26.683
Madeira	15	151.219	938.398	1.117.794	1.940	4092	35.233	38.142
Madeira/Trombetas	16	160.297	138.494	290.150	2.520	4336	5.200	9.900
Tapajós	17	47.671	402.602	463.959	2.250	1290	15.116	15.832
Xingu-Paru	18	91.224	447.772	550.672	1.930	2470	16.812	18.790
Amazonas (Xingu-Foz)	19	216.757	143.329	346.427	2.460	5865	5.382	11.820
Tocantins - Araguaia		151.684	502.500	662.713	1.660	4105	18.867	22.614
Total		2.000.000	4.125.000	6.125.000	-	54.121	154.879	209.000

O balanço hídrico na PHA no Brasil expresso em termos de lâminas escoadas considerando os influxos superficiais externos se resume como indicado na **tabela 2.2**.

Tabela 2.2 - Resumo do balanço hídrico na PHA no Brasil, expresso em termos de lâminas escoadas, considerando os influxos superficiais externos.

Parâmetros	Entradas (mm/ano)	Saídas (mm/ano)
Precipitação média (PHA)	2.293	-
Influxo superficial (entradas externas na PHA)	2.439	-
Evapotranspiração real na PHA	-	-1.383
Variação da reserva útil do solo (Ru) na PHA	-	-58
Infiltração temporária para os aquíferos	272	-
Restituição dos aquíferos aos rios (I*) na PHA	-	-272
Deflúvio superficial (I*+R) na PHA	-	-852
Deflúvio na Foz (Amazonas e Tocantins-Araguaia)	-	-2.439
Lâmina de Fluxo total	5.109	5.109

(*) Infiltração

3 – Geologia da Província Hidrogeológica Amazonas

3.1 - Introdução

A Província Hidrogeológica Amazonas no Brasil situa-se em 4 bacias sedimentares denominadas Marajó, Amazonas, Solimões e Acre (**figura 3.1**), localizadas na região norte do país, distribuídas nos estados do Amapá, Pará, Amazonas, Acre, Roraima e Rondônia, ocupando uma área de 2 milhões de km². Limita-se pelo Escudo das Guianas ao norte e Escudo Brasileiro ao sul, com complexa evolução pré-cambriana (**figura 3.2**).

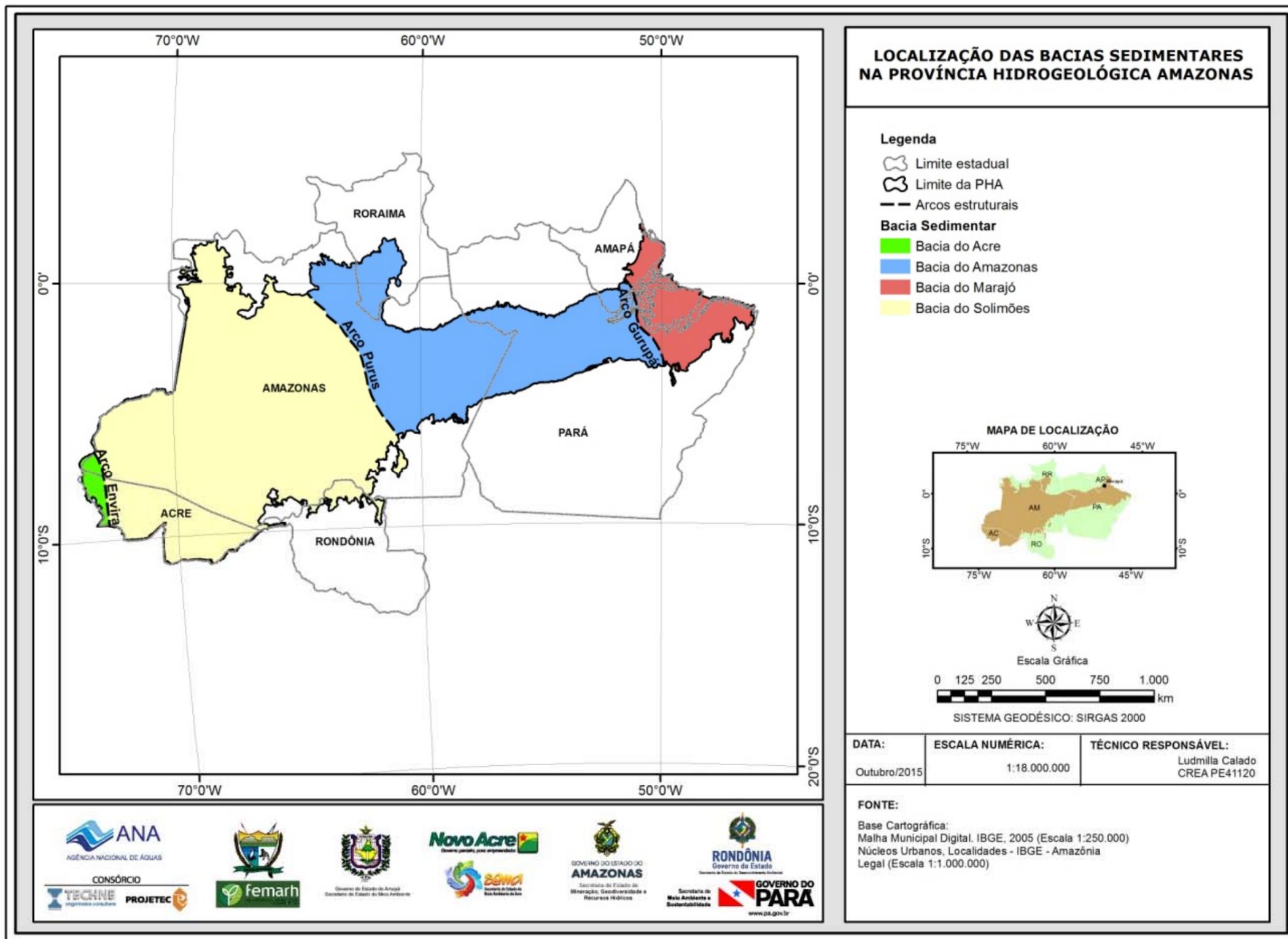


Figura 3.1 - Bacias sedimentares do Brasil.

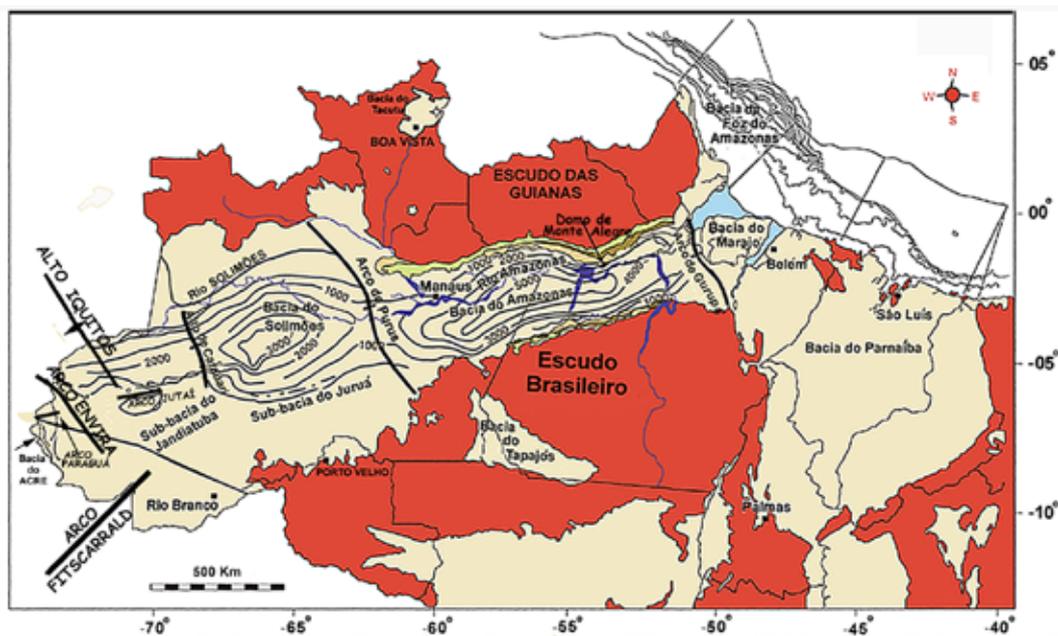


Figura 3.2 - Bacias Sedimentares do Norte do Brasil, arcos, altos e profundidades do embasamento. Modificado de Wanderley Filho *et al.* (2010).

3.2 - Bacia do Marajó

A Bacia do Marajó, situada em sua maior parte no Estado do Pará e parcialmente no Estado do Amapá, também é chamada de fossa tectônica, rifte ou aulacógeno do Marajó. A região do rifte apresenta uma área de cerca de 55.000 km²; na zona insular do Arquipélago do Marajó e nas adjacências continentais, entre aproximadamente os paralelos 0° e 4° S e os meridianos 48° e 51° W e área da cobertura cenozoica possui uma área aproximada de 177.000 km².

A porção profunda do sistema, limitado por falhas mesozoicas e cenozoicas, apresenta em planta uma forma aproximada de bumerangue, nas direções NE e SE e compartimentação em quatro sub-bacias. As bacias são de norte para sul, com dimensões e aspectos distintos: I - Mexiana (segmento NE-SW); II - Limoeiro (segmento NW-SE); III - Cameté (segmento WNW-ESE); IV - Mocajuba (segmento Sul).

Na bacia do Marajó, segundo o relatório de geologia da PHA no Brasil (Volume II), a espessura do pacote sedimentar é superior a 10 km. A carta cronoestratigráfica dessa bacia (**figura 3.3**) mostra que somente na fase Sin-Rifte existem 10.000 m de sedimentos sendo 6.000 m da Formação Breves (fases Rifte I e Rifte II) e 4.000 m da Formação Itapecuru na fase Rifte III.

Além dessa formidável espessura ainda se somam 7.500 m de litologias arenosas na fase Pós-Rifte, do Neocretáceo ao Pleistoceno, contemplando as Formações Anajás (1.200 m), Limoeiro (3.000 m), Marajó (2.000 m), Barreiras (700 m) e Tucunaré (600 m).

A **Formação Anajás** é composta por arenitos finos, siltitos, e folhelhos. A **Formação Limoeiro** é composta por arenitos friáveis, finos a grossos, com

intercalações conglomeráticas e de argilito cinza escuro. A **Formação Marajó** é composta por arenitos, argilitos, folhelhos e calcários.

A **Formação Barreiras** é composta por sedimentos siliciclásticos, conglomerados, arenitos e argilitos. O Grupo Pará é representado apenas pela **Formação Tucunaré** na Bacia do Marajó (Schaller *et al.*, 1971), que é composta basicamente de arenitos. Sua espessura é variável e na Bacia do Marajó é de cerca de 600 m.

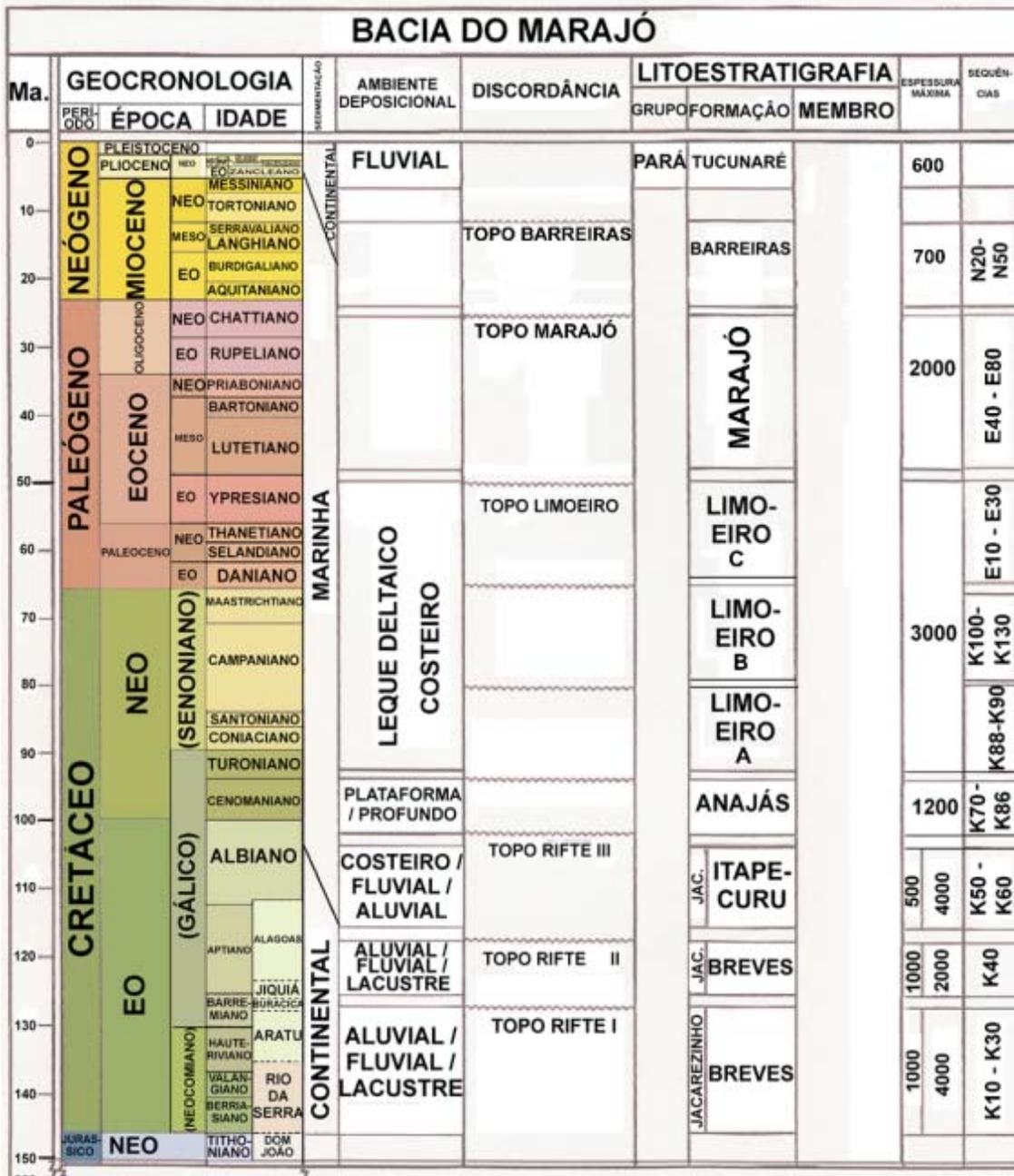


Figura 3.3 – Carta Cronoestratigráfica pós-paleozoica da Bacia do Marajó. Modificada de Zalán & Matsuda (2007).

3.3 - Bacia do Amazonas

A Bacia do Amazonas tem forma alongada, quase elipsoidal na direção WSW-ENE e localiza-se na região subequatorial do norte do Brasil, ocupando partes dos estados do Amazonas e do Pará e, em menor proporção, parte dos Estados do Amapá e Roraima. Trata-se de uma bacia paleozoica intracratônica com 619.113 km² de área, com 1.300 km de comprimento e 380 km de largura média. Separa-se da Bacia do Marajó pelo Arco de Gurupá ao leste e da Bacia do Solimões pelo Arco de Purus ao oeste. Limita-se ao norte com o Escudo das Guianas e ao sul com o Escudo Brasileiro. O preenchimento sedimentar e ígneo da bacia de cerca de 5.000 a 6.000 m de espessura no depocentro consiste principalmente de rochas paleozoicas conhecidas, do Ordoviciano ao Permiano, intrudidas por diques e soleiras de diabásio do final do Triássico e recobertas por camadas cenozoicas (formações Alter do Chão, Solimões e Içá).

As unidades da fase Pós-Rifte (do Eocretáceo ao Pleistoceno), com espessura máxima de 1.780 m, são representadas pelas formações Jazida da Fazendinha (250 m), Alter do Chão (1.280 m), Solimões (100 m) e Içá (150 m), consideradas de interesse para o aproveitamento de água subterrânea (**figura 3.4**).

A **Formação Jazida da Fazendinha** é a sedimentação cretácea da Bacia do Amazonas e está depositada sobre os sedimentos paleozoicos e o Diabásio Penatecaua. É composta por arenito fino a grosso, conglomerados e folhelhos de cor cinza, cinza esverdeado e vermelho na parte inferior. A sequência superior é composta por espessos pacotes de arenito de cor branca, fino a médio (Dino *et al.*, 1999, 2000).

A **Formação Alter do Chão** é a primeira com sedimentação cenozoica na Bacia do Amazonas. É formada por intercalação de arenitos, argilitos, siltitos e conglomerados de coloração vermelha.

A **Formação Solimões** é constituída por argilitos e siltitos cinza e variegados, moles, maciços ou laminados, frequentemente piritosos e arenitos desde finos a grosseiros, brancos, castanhos e vermelhos.

A **Formação Içá** é composta de camadas mais arenosas que a Formação Solimões. Sua pequena distribuição na Bacia do Amazonas, assim como a Formação Solimões fica restrita a região do Arco de Purus.

Aluviões quaternários mais novos que a Formação Içá estão presentes ao longo das margens dos rios sob a forma de terraços e ilhas holocênicas.

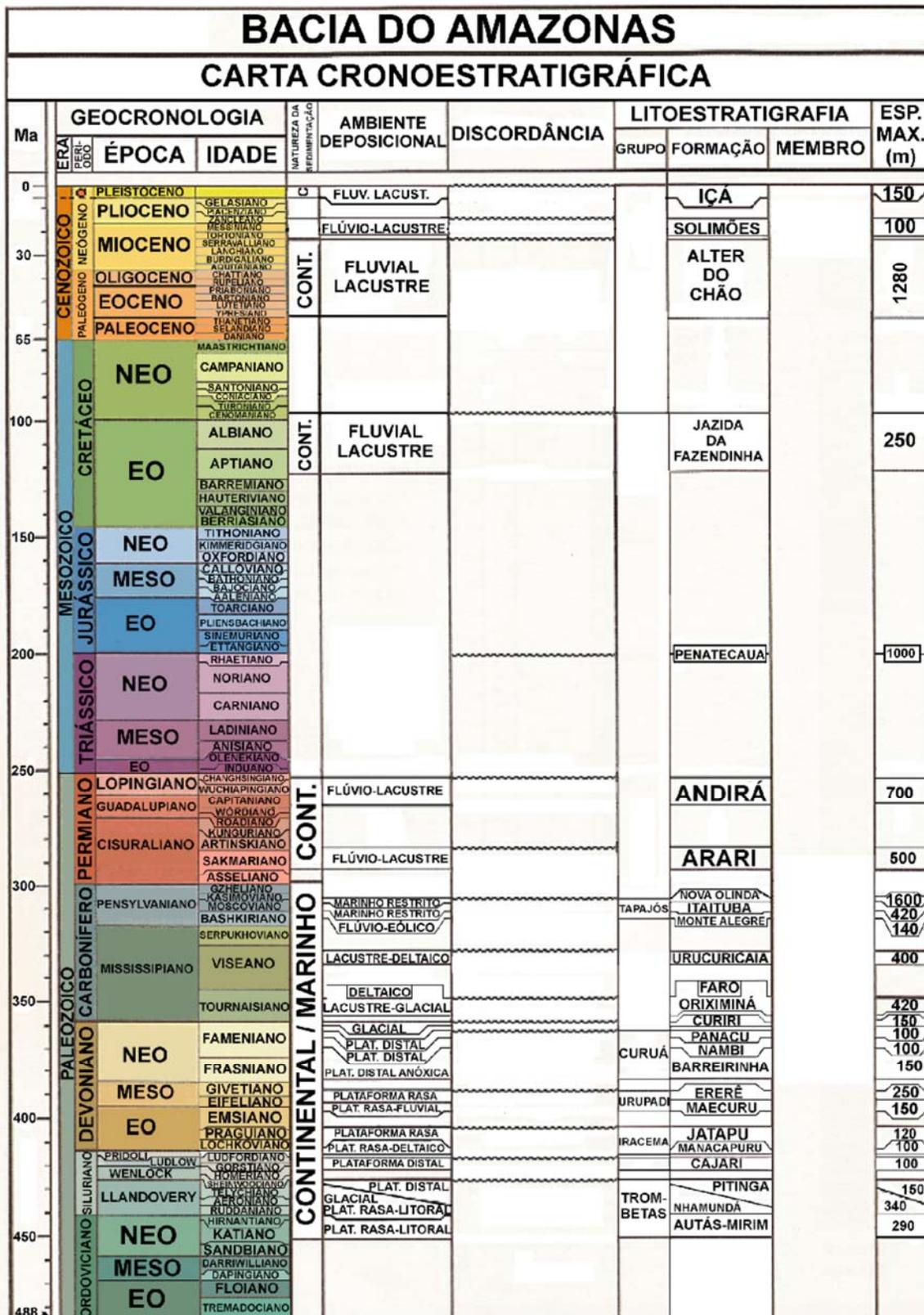


Figura 3.4 - Carta cronoestratigráfica da Bacia do Amazonas, modificada de Cunha et al. (2007).

3.4 - Bacia do Solimões

A Bacia do Solimões situa-se na Região Norte do Brasil (Estados do Amazonas, Acre e Rondônia), entre os paralelos de 2° e 8° S e meridianos 62° e 72° W, com uma área total de 1.181.145 km².

A bacia é orientada na direção aproximada E-W e limitada geologicamente pelos escudos das Guianas e Brasileiro ao norte e ao sul, respectivamente. Está separada da Bacia do Acre pelo Arco Envira e da Bacia do Amazonas pelo Arco do Purus.

Na bacia do Solimões, a sequência sedimentar alcança de 3 a 6 km de espessura. Nesse pacote, segundo a carta cronoestratigráfica da **figura 3.5**, encontram-se 19 ULs, das quais 15 ULs, com espessura máxima que soma 2.145 m, depositadas entre o Paleozoico (Ordoviciano) e o Mesozoico Inferior (Barremiano) e culminam com o diastrofismo Penatecaua, revelado pela presença de soleiras de diabásio sobre uma espessura máxima de 1.040 m.

Na fase Pós-Rifte encontra-se uma sequência com 1.800 m de espessura, que começa com 1.000 m de arenitos da Formação Javari, seguida de 650 m de sedimentos pelíticos com finas intercalações de arenitos das formações Repouso e Solimões, culminando com 150 m de arenitos da Formação Içá. Recobrimo esta sequência nessa bacia, encontram-se naturalmente nos talwegues da rede hidrográfica depósitos de aluviões e terraços fluviais de natureza que incluem areias e argilas. Essas formações são descritas abaixo:

Formação Javari é aqui proposta para designar uma seção não aflorante da bacia, composta de arenitos cretáceos, localizada sob a Formação Solimões e acima da seção paleozoica e das soleiras de diabásio na Bacia do Solimões.

Formação Repouso é uma unidade cenozoica formada por argilitos e siltitos cinza escuro e esverdeado claro, plásticos, laminados ou maciços, calcíferos e piritosos. Intercalações de arenito fino cinza esverdeado, frequentemente sílticos, estão presentes calcário branco e cinza esverdeado ocorre em pequena proporção.

Formação Solimões é composta principalmente de argila variegada mole, cinza clara, cinza média e cinza azulada, laminada ou maciça com intercalações de lentes delgadas de linhito.

Formação Içá é constituída principalmente por arenitos amarelo-avermelhados, friáveis, de granulometria fina a conglomerática, às vezes sílticos argilosos e conglomerados, siltitos e folhelhos cinza e variegados depositados em meio continental ao longo das margens dos rios da região.

Os conglomerados existentes na seção basal, geralmente lenticulares e pouco litificados, são formados por clastos arredondados de quartzo hialino ou enfumaçado, calcedônia, sílex e fragmentos de rochas com matriz argilo-arenosa.

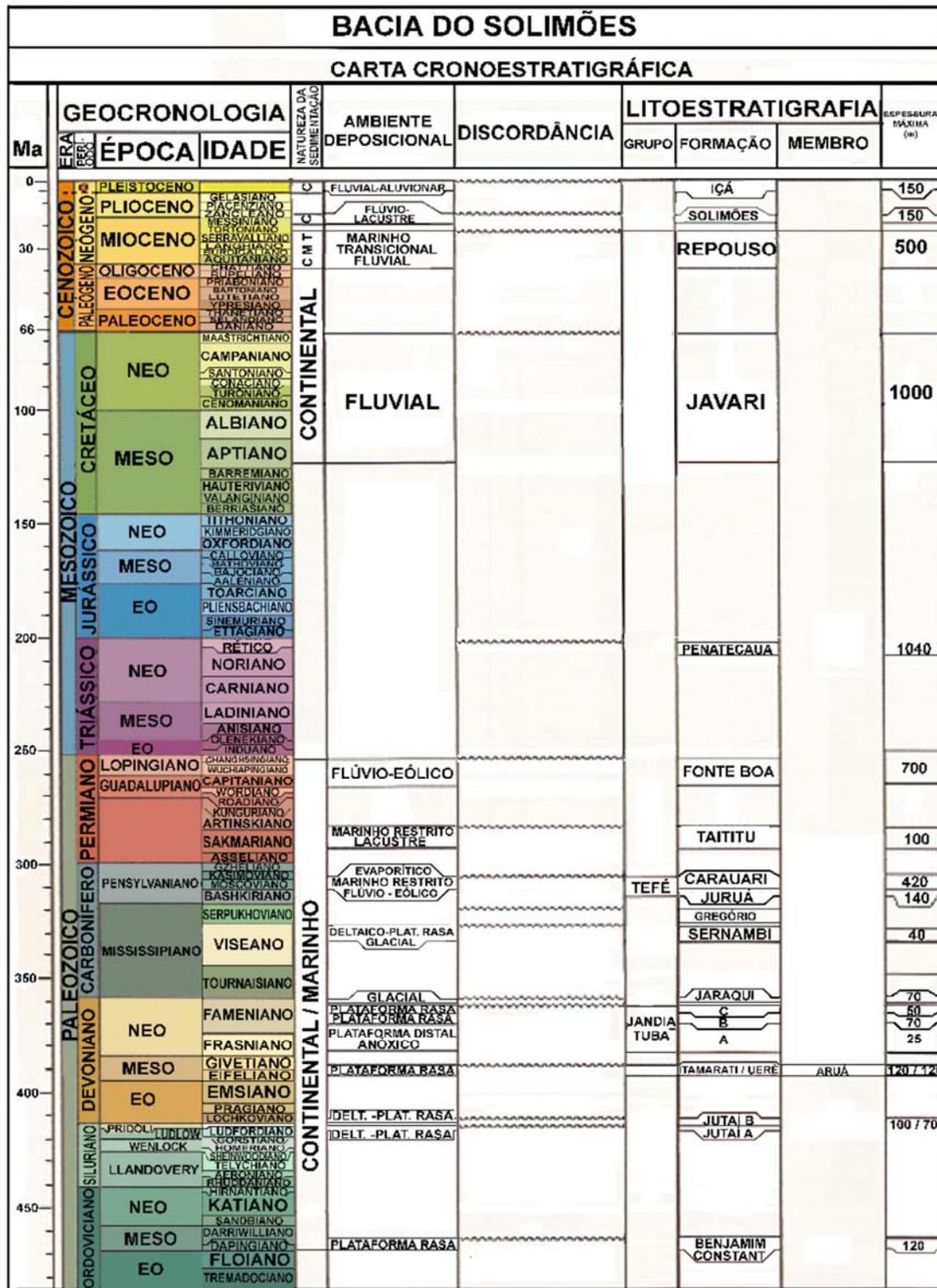


Figura 3.5 - Carta cronoestratigráfica da Bacia do Solimões, modificada de Wanderley Filho et al. (2007).

3.5 - Bacia do Acre

A Bacia Sedimentar do Acre possui uma área de 23.231 km², correspondentes à subafloramentos de idade pré-cretácea (Cunha *et al.*, 2007). A bacia se situa na região mais ocidental do Brasil, entre os paralelos 6° e 9° S e os meridianos 69° 30' e 74° W, na parte norte do Estado do Acre e na extremidade oeste do Estado do Amazonas (figura 3.6). Esta bacia é separada da Bacia do Solimões, ao leste pelo Arco Envira; ao noroeste tem continuidade parcial com a Bacia do Marañon no Peru; ao oeste é separada da Bacia de Ucayali do Peru pelo *divortium aquarum* da Serra do Divisor.



Figura 3.6 - Localização e Arcabouço estrutural da Bacia do Acre. Os sete poços estão posicionados pelas letras de A até G. A seção pré-cretácea ocupa uma área de apenas 23.231 km². (Modificado de Cunha, 2006).

A bacia do Acre abriga uma sequência sedimentar que alcança mais de 3 km de espessura. Na fase Sin-Rifte são encontradas do Carbonífero ao Jurássico 5 ULs, totalizando 2.220 m de espessura máxima, incluindo as formações: Apuí (250 m), Cruzeiro do Sul (850 m), Serra do Divisor (200 m), Rio do Moura (400 m) e Juruá-Mirim (520 m). Na fase Pós-Rifte a espessura máxima total atinge 4.000 m e é constituída de uma seção inferior predominantemente arenosa, com 1.250 m de espessura máxima, na qual se encontram as formações:

Capanaua (100 m), Moa (100 m), Rio Azul (750 m), Divisor (100 m) e Ramon (200 m), e uma seção superior predominantemente argilosa que inclui várias formações ainda pouco conhecidas, com 2.750 m de espessura, considerada pela Petrobras como Formação Solimões. De acordo com a **figura 3.7**, a Formação Ramon é subdividida em 2 (duas) unidades inominadas, com 1.600 de espessura, das quais a mais superior é correlata da Formação Pozo no Peru e a ela se seguem as formações Repouso (600 m), Solimões (400 m) e Içá (150 m).

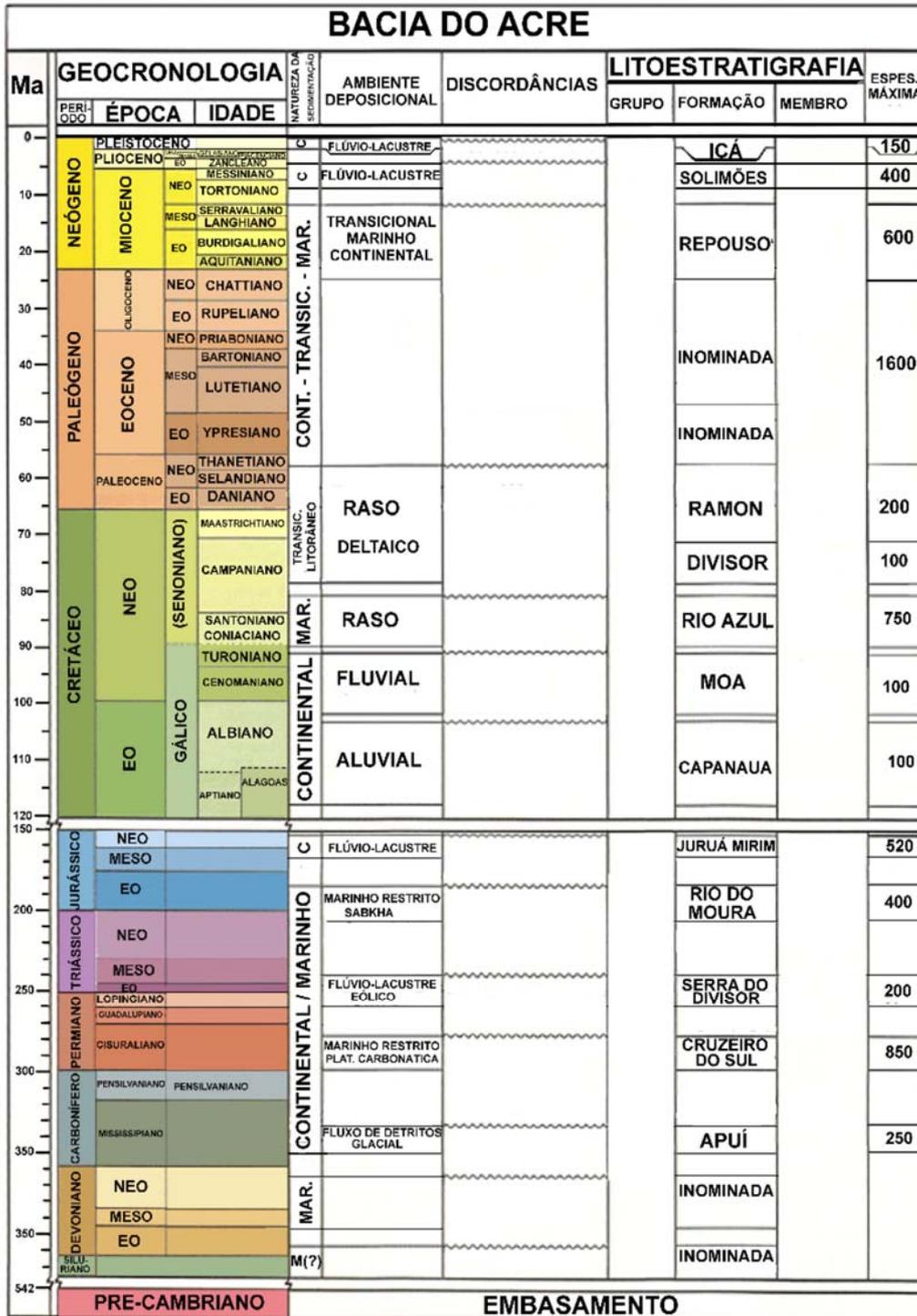


Figura 3.7- Carta cronoestratigráfica da Bacia do Acre, modificada de Cunha *et al.* (2007).

4 – Hidrogeologia e Modelo Numérico de Fluxo da Província Hidrogeológica Amazonas

4.1 – Revisão Bibliográfica Sobre os Principais Aquíferos da Província Hidrogeológica Amazonas no Brasil

Do ponto de vista do abastecimento, o aquífero Solimões-Repouso e os aquíferos Alter do Chão, Içá, Aluvial, Barreiras, Pirabas, Tucunaré, Coberturas Cenozoicas de Porto Velho e Rio Branco são os mais importantes da Província Hidrogeológica Amazonas no Brasil, inclusive com informações existentes.

Aquífero Alter do Chão

O aquífero Alter do Chão é do tipo livre e ocorre na região centro-norte do Pará, leste do Amazonas e extremo sul Amapá, ocupando área aproximada de 290.500 km. Esse aquífero é muito importante para o abastecimento das cidades de Manaus e Santarém.

A Formação Alter do Chão é de idade cenozoica e constituída de intercalações de arenitos, argilitos, siltitos e, subordinadamente, conglomerados, predominantemente vermelhos. As camadas de granulação grosseira mostram composição ortoquartzítica a arcósica, com feldspatos frequentemente alterados para caulinita. Ocorrem normalmente arenitos brancos caulínicos. A espessura máxima perfurada da unidade foi 1.266 metros em poço da Petrobras, mas espessuras entre 200 e 400 metros são as mais comuns.

Tancredi (1996) observou que no sistema hidrogeológico da Formação Alter do Chão ocorrem aquíferos confinados de espessuras que perfazem 430 m, intercalados a aquícludes e/ou aquíferos, cujas reservas de água subterrânea reguladora alcança volume de $226 \times 10^6 \text{ m}^3$ e reserva permanente de $86.550 \times 10^6 \text{ m}^3$, ou seja, volumes considerados expressivos.

De acordo com Aguiar & Mourão (2012), o aquífero Alter do Chão, na cidade de Manaus, apresenta-se com uma espessura média de aproximadamente 160 metros (porção saturada e arenosa da formação). As maiores profundidades estão nos setores sudeste e nordeste, correspondendo a quase toda a porção oriental da cidade de Manaus.

A análise da transmissividade sugere que os maiores valores ocorrem nos setores sudoeste, norte e leste da cidade, e os menores na zona central. A pesquisa obteve resultados de alguns parâmetros hidrodinâmicos, como transmissividade de $4,7 \text{ m}^2/\text{h}$, condutividade hidráulica de $2,9 \times 10^{-2} \text{ m/h}$, porosidade efetiva de 18%, inclinação (gradiente) das águas da ordem de 0,002 e velocidade em torno de 2 cm/dia (muito pequena).

França *et al.* (2005) realizaram estudo com cerca de 120 poços em Manaus captando os níveis mais inferiores da Formação Alter do Chão e bombeando vazões da ordem de $70 \text{ m}^3/\text{h}$. Por meio de testes de aquífero efetuados em 36 poços nesse aquífero, obtiveram os valores médios, respectivamente, de transmissividade e condutividade hidráulica de $1,48 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ e $1,54 \times 10^{-5} \text{ m/s}$.

Oliveira *et al.* (2000) relata que a sede do Distrito de Alter do Chão, município de Santarém, conta com mais de uma dezena de poços tubulares, com vazões que chegam a atingir $500 \text{ m}^3/\text{h}$.

Aquífero Içá

O aquífero Içá é do tipo livre a semi-confinado, ocorrendo principalmente na região central do Estado do Amazonas, onde ocupa mais da metade de seu território. Também se estende para o sudoeste de Roraima, norte de Rondônia e há um pequeno fragmento no noroeste do Acre. Ao total ocupa uma área aproximada de 932.700 km². Em algumas cidades da região, como Coari, Fonte Boa e Barcelos, esse aquífero é a principal fonte de abastecimento.

A Formação Içá é de idade pleistocênica, sendo formada predominantemente por camadas de arenito fino a médio, por vezes silte/argilosos, pouco consolidado, com estratificação cruzada, típica de ambiente fluvial. Podem apresentar, principalmente na parte mais basal, níveis enriquecidos em matéria orgânica e/ou ferro. A espessura máxima do aquífero é de 143 metros (Maia & Marmos, 2010), mas geralmente é reduzida e inferior a 100 metros (CPRM, 2009).

Segundo Maia & Marmos (2010), a Formação Içá é agrupada com a Formação Alter do Chão na categoria de aquífero muito produtivo, com vazão dos poços acima de 50 m³/h.

Os dados disponíveis mostram uma capacidade específica razoavelmente elevada, com valores médios em torno de 3,6 m³/h/m. Na cidade de Tefé, a transmissividade é de 6×10^{-4} m²/s e a condutividade hidráulica assumindo o valor de $1,7 \times 10^{-5}$ m/s (Maia & Marmos, 2010). Apresenta vazões elevadas, normalmente superiores a 40 m³/h (CPRM, 2009).

A extensão desse aquífero no estado do Acre não é tão expressiva se comparada à extensão total desse aquífero na Amazônia, no entanto adquire importância fundamental por ser o único manancial subterrâneo econômico na região. Localizados principalmente nas sedes dos municípios de Guajará e Cruzeiro do Sul, 12 poços tubulares são de grande importância para o abastecimento dessas comunidades.

Aquífero Aluvial

O aquífero Aluvial se caracteriza pela presença de depósitos de planícies aluvionares. Segundo CPRM (2006), os principais rios que integram as bacias Solimões e Amazonas denotam expressivas áreas de planícies aluvionares, chegando a atingir dezenas de quilômetros de largura e de extensão. Têm destaque as bacias dos rios Madeira, Purus, Solimões, Japurá, Juruá, Jutai, Amazonas, Uatumã e Jatapu. Revelam uma morfologia característica de planície sedimentar onde é comum o padrão de canais fluviais meandранtes, lagos de variada conformação e meandros abandonados que registram a migração lateral do curso dos rios.

Segundo Pereira & Cajazeiras (2012), este é um aquífero contínuo, poroso, com permeabilidade baixa. A espessura dessa unidade é em geral inferior a 40 metros. A transmissividade em Rondônia varia de $6,6 \times 10^{-6}$ m²/s a $4,27 \times 10^{-3}$ m²/s, com valor médio de $6,03 \times 10^{-4}$ m²/s (CPRM, 1998). Os parâmetros hidráulicos em Rio Branco/AC são superiores, com transmissividade acima de 120 m²/dia e capacidade específica maior que 3 m³/h/m, caracterizando-os como aptos para abastecimento público (Melo Junior, 2010). A melhor vazão, 15 m³/h, foi encontrada em poço tubular no distrito de São Carlos, município de

Porto Velho, em Rondônia. As capacidades específicas variam de 0,3 a 1,9 m³/h/m.

Aquitardo Solimões-Repouso

O aquitardo Solimões-Repouso, denominado como aquífero Solimões em alguns trabalhos anteriores (ANA, 2005; CPRM, 2010), aflora no Brasil em uma área de cerca 417 mil km². Ocorre em quase todo o Estado do Acre, parte oeste do Amazonas e extremo noroeste de Rondônia.

As unidades geológicas que formam o aquitardo Solimões-Repouso têm continuidade lateral nas bacias vizinhas de outros países como Peru (formações Pebas, Ipunuro e Nauta) e Colômbia (Terciário Amazônico e Camadas La Tagua), segundo Hoorn (1993).

O pacote sedimentar composto pelas formações Solimões e Repouso é composto principalmente de argila variegada mole, cinza clara, cinza média e cinza esverdeada, laminada ou maciça com intercalações de lentes delgadas de linhito. Na parte superior da seção ocorrem intercalações de arenitos finos a grosseiros brancos. Sua idade é cenozoica e sua espessura pode atingir até 760 metros (Caputo *et al.*, 1972), mas a espessura média é de 300 metros, afirma Galvão (2011).

Segundo ANA (2005), neste aquitardo a vazão média dos poços é de 27,3 m³/h e a capacidade específica média é de 3,062 m³/h/m. Tais valores configuram um sistema de média produtividade. Entretanto para CPRM (2010a), este aquitardo, aflorante no extremo oeste-sudoeste do Amazonas, é caracterizado por vazões baixas (<10 m³/h), devido à sua constituição predominantemente argilosa.

Aquífero Barreiras

O aquífero Barreiras na Província Hidrogeológica Amazonas pode ser encontrado aflorante na faixa litorânea do Estado do Pará até o Arco de Gurupá, na porção sul da Bacia do Marajó; e em subsuperfície também é encontrado no Pará e no Amapá. É utilizado principalmente no abastecimento público, sendo fonte importante para Belém, a capital do Pará.

Esse é o sistema hidrogeológico mais conhecido e mais explorado na Região Metropolitana de Belém (RMB) e corresponde aos sedimentos do Grupo Barreiras, cujas expressões litológicas são bastante heterogêneas. Nele estão incluídos desde argilitos até arenitos grossos com lentes conglomeráticas. Ocorrem também leitos lateríticos e argilosos caulinizados.

Matta (2002) se refere a dois níveis aquíferos na Formação Barreiras na RMB: o nível superior e o inferior. O primeiro tem comportamento de semi-confinado a livre, sendo captado por poços perfurados até cerca de 40 metros, que produzem de 1 a 3 m³/h, com vulnerabilidade alta à contaminação. O segundo é confinado e ocorre em profundidade média de 25 a 90 metros, com espessura em torno de 65 metros. Os poços que captam nesse nível têm cerca de 90 metros de profundidade máxima, produzindo vazões de até 100 m³/h, com vulnerabilidade moderada à contaminação.

Segundo IPT (1984), em um estudo realizado em Barcarena/PA, também foi possível distinguir o sistema aquífero Barreiras na região mencionada em aquífero superior e aquífero inferior. O aquífero superior é caracterizado por

uma matriz arenosa fina a média e de espessura variável, onde os poços apresentam vazão de 35,6 m³/h. O aquífero inferior é caracterizado por uma matriz arenosa, grosseira, heterogênea e com espessura relativamente constante, onde os poços apresentam vazão de 180 m³/h.

Aquífero Pirabas

De acordo com Oliveira *et al.* (2006), a Formação Pirabas ocorre na Plataforma Continental Norte-Brasileira, do Pará ao Amapá. No continente, essa formação ocorre em quase toda a costa paraense, prolongando-se para sul até, pelo menos o Rio Guamá (Matta *et al.*, 2000). Sabe-se que, na região costeira, ela se assenta sobre o embasamento cristalino e é capeada descontinuamente por sedimentos do Grupo Barreiras.

Segundo Oliveira *et al.* (1998), o Aquífero Pirabas é formado por dois sistemas aquíferos do tipo multicamadas, denominados de Pirabas (ou Pirabas superior) e Pré-Pirabas (ou Pirabas inferior).

O Aquífero Pirabas Superior apresenta camadas de argila calcífera de cor cinza esverdeada e leitos de calcário duro, cinza esbranquiçado, que se alternam com camadas de arenito calcífero, siltitos e areias. Essas camadas são confinadas e situam-se geralmente no intervalo de 70 a 180 metros de profundidade. Produzem vazões da ordem de 100 a 200 m³/h em poços muito caros, acessíveis somente ao poder público e empresários.

O Aquífero Pirabas Inferior é composto predominantemente por camadas repetitivas de arenitos cinza esbranquiçados de granulação fina a conglomerática, com intercalações espessas de argilas e siltitos avermelhados, ocorre em profundidades de 180 a 280 m, com espessura média de 47 m. Segundo Matta (2002), são possíveis descargas de até 600 m³/h, sendo a água de excelente potabilidade e apresentando teores de ferro muito baixos ou ausentes. O Pirabas Inferior, entretanto, é pouco captado na Região Metropolitana de Belém (RMB) por conta das grandes profundidades e do alto custo das perfurações.

Aquífero Tucunaré

A Formação Tucunaré (basicamente arenitos) localiza-se na Bacia do Marajó, possuindo idade atribuída ao Plio-Pleistoceno e mais de 1.000 metros de espessura na plataforma continental (Bacia da Foz do Amazonas). Os arenitos Tucunaré sobrepõem parcialmente e passam lateralmente aos argilitos Pirarucu da Bacia da Foz do Amazonas. Sua espessura é variável e na Bacia do Marajó é de cerca de 600 metros na parte leste da ilha do Marajó, na sub-Bacia de Mexiana. Na plataforma do Amapá ocorre a Formação Tucunaré e sedimentos recentes diretamente sobre o embasamento cristalino. Corresponde aos sedimentos pós-Barreiras da Plataforma Bragantina. A espessura na Plataforma do Amapá, em Macapá, é variável, com espessura máxima de aproximadamente 300 metros.

É importante ressaltar que vários autores afirmam que na região de Macapá aflora o Grupo Barreiras (Lima *et al.*, 1991; Oliveira *et al.*, 2004). No entanto, os levantamentos de campo efetuados no âmbito deste projeto, na cidade de Macapá, permitiram caracterizar a ocorrência de 03 (três) unidades distintas: a) sedimentos argilo-arenosos na base, b) areno-argilosos e c) materiais arenosos

e conglomeráticos, reconhecidos como quaternários e atribuídos no âmbito desse projeto como Formação Tucunaré.

Segundo Oliveira *et al.* (2004), os aquíferos na região de Macapá são do tipo livre (entre 06 e 14 m) e/ou sistemas aquíferos semi-confinados situados entre profundidades de 30 a 70 m, tendo estes últimos vazões médias de 2 a 5 m³/h, mas que podem atingir até 14 m³/h, de acordo com informações obtidas na área de estudo.

Contudo, de acordo com a Companhia de Águas e Esgoto do Amapá (CAESA), concessionária responsável pelo abastecimento de água em Macapá, na região são explorados alguns poços com profundidade entre 120 e 150 metros, os quais produzem vazões em média de 150 a 200 m³/h.

Aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho

O aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho, denominado em diversos trabalhos anteriores como aquífero Jaciparaná (Adamy & Romanini, 1990; Lima *et al.*, 2008), está localizado no município de Porto Velho, em Rondônia, em uma área de cerca de 511 km².

O mapeamento regional do Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2007) delinea e discute os sedimentos recentes (Terciário/Quaternário), associados ao Rio Madeira e assentados sobre o embasamento cristalino na área de Porto Velho. Nessa área, o mapeamento distingue as seguintes unidades, da mais recente para a mais antiga:

Q2a - Holoceno. Depósitos aluvionares arenosos, siltosos e argilosos, com níveis de cascalho.

Q1t - Pleistoceno. Terraços fluviais característicos de sistemas meandrantés. Constituídos de sedimentos arenosos e siltosos, cascalhos inconsolidados, ferruginosos ou não, com níveis de matéria orgânica.

NQi - Pleistoceno/Neógeno. Coberturas sedimentares indiferenciadas, incluindo: depósitos de areia, silte, argila e cascalho; restos de materiais lateríticos; sedimentos aluviais, coluviais e eluviais indiferenciados.

NQdl - Pleistoceno/Neógeno. Coberturas detrito-lateríticas, incluindo: depósitos argilo-arenosos ricos em concreções ferruginosas; crosta laterítica concrecionária; materiais coluviais e eluviais ricos em detritos lateríticos e fragmentos de quartzo.

O mapeamento geológico descrito por CPRM (2007) não inclui a Formação Jaciparaná na área estudada em Porto Velho. Nessa região, os poços cadastrados na zona urbana captam apenas a unidade designada de NQi, ou seja, coberturas sedimentares indiferenciadas. A Formação Jaciparaná, no mapeamento discutido (CPRM, 2007) fica restrita a pequenas ocorrências no baixo vale do rio Jaciparaná e nas imediações da sua foz, cerca de 80 km a sudoeste da cidade de Porto Velho.

O Aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho possui uma condutividade hidráulica média de aproximadamente $8,10 \times 10^{-5}$ m/s, permeabilidade média de aproximadamente 7 m/dia e os poços possuem uma vazão média de 15 m³/h, podendo chegar a 30 m³/h (Campos, 1998). As capacidades específicas são superiores a 2 m³/h/m (Campos & Morais, 1999).

Aquífero Rio Branco

Em Rio Branco, Oliveira & Ferreira (2008) descrevem o pacote aluvial sobreposto ao aquífero Solimões-Repouso, em discordância erosiva, como uma cobertura argilosa, inferior a 20 metros de espessura e com a presença de fósseis e concreções carbonáticas em sua base, definida como unidade Panorama.

Melo Jr. & Marmos (2006) executaram e interpretaram dados de sondagens existentes, com o objetivo de investigar as litologias do pacote aluvial. Os resultados obtidos levaram esses autores a propor, nesse pacote, a existência de duas camadas distintas. A camada mais superficial é constituída predominantemente de argila, argila siltosa e argila siltico-arenosa. A segunda camada, designada de Aquífero Rio Branco, se caracteriza por areia fina a média, ocorrendo algumas vezes material siltico, clastos milimétricos de laterita e nódulos de argila rica em matéria orgânica. Esta segunda camada é de fundamental importância para o abastecimento da capital do Acre.

Melo Jr. & Marmos (2006) verificaram que as espessuras da camada de areia variam de 1 a 9 m, com média de 5 m, enquanto que as espessuras totais dos aluviões (que, de fato, constituem o aquífero Rio Branco) variam de 7 a 14 metros. Os valores de vazão entre 3,33 a 10 m³/h e de capacidade específica entre 0,92 a 4,1 m³/h/m obtidos nos testes foram considerados baixos.

De acordo com CPRM (2010b), o aquífero Rio Branco apresenta vazões que variam de 4,7 a 11,3 m³/h.

O Aquífero Rio Branco, dadas suas pequenas espessuras, e salvo melhor avaliação futura, não parece ter vocação para abastecimento público ou irrigação, mas, tão somente, para o atendimento de demandas residenciais, comerciais e de algumas indústrias de menor porte.

4.2 – Síntese da Geologia e suas Relações com a Hidrogeologia da PHA no Brasil

A Província Hidrogeológica Amazonas no Brasil cobre uma superfície aproximada de 2,0 milhões de km² e nela estão incluídas as bacias sedimentares do Marajó (176.511 km²), do Amazonas (619.113 km²), do Solimões (1.181.145 km²) e do Acre (23.231 km²). A PHA no Brasil inclui o Estado do Acre, grande parte do estado do Amazonas e partes dos Estados do Pará, Amapá, Roraima e Rondônia (**figura 3.1**).

Na bacia do Marajó a espessura do pacote sedimentar é superior a 10.000 m, como ilustram as seções sísmicas transversais apresentadas na **figura 4.1**. Embora essa grande espessura seja constituída de sedimentos essencialmente arenosos, somente os primeiros 1.000 m da cobertura neogênica, contemplando os aquíferos Tucunaré e Barreiras, são considerados úteis para fins de aproveitamento e estão incluídos no Sistema Aquífero Amazonas no Brasil (SAAB). Isto porque em profundidades superiores a 1.000 m as velocidades do fluxo subterrâneo e a recarga são provavelmente desprezíveis e implicam em riscos de salinização.

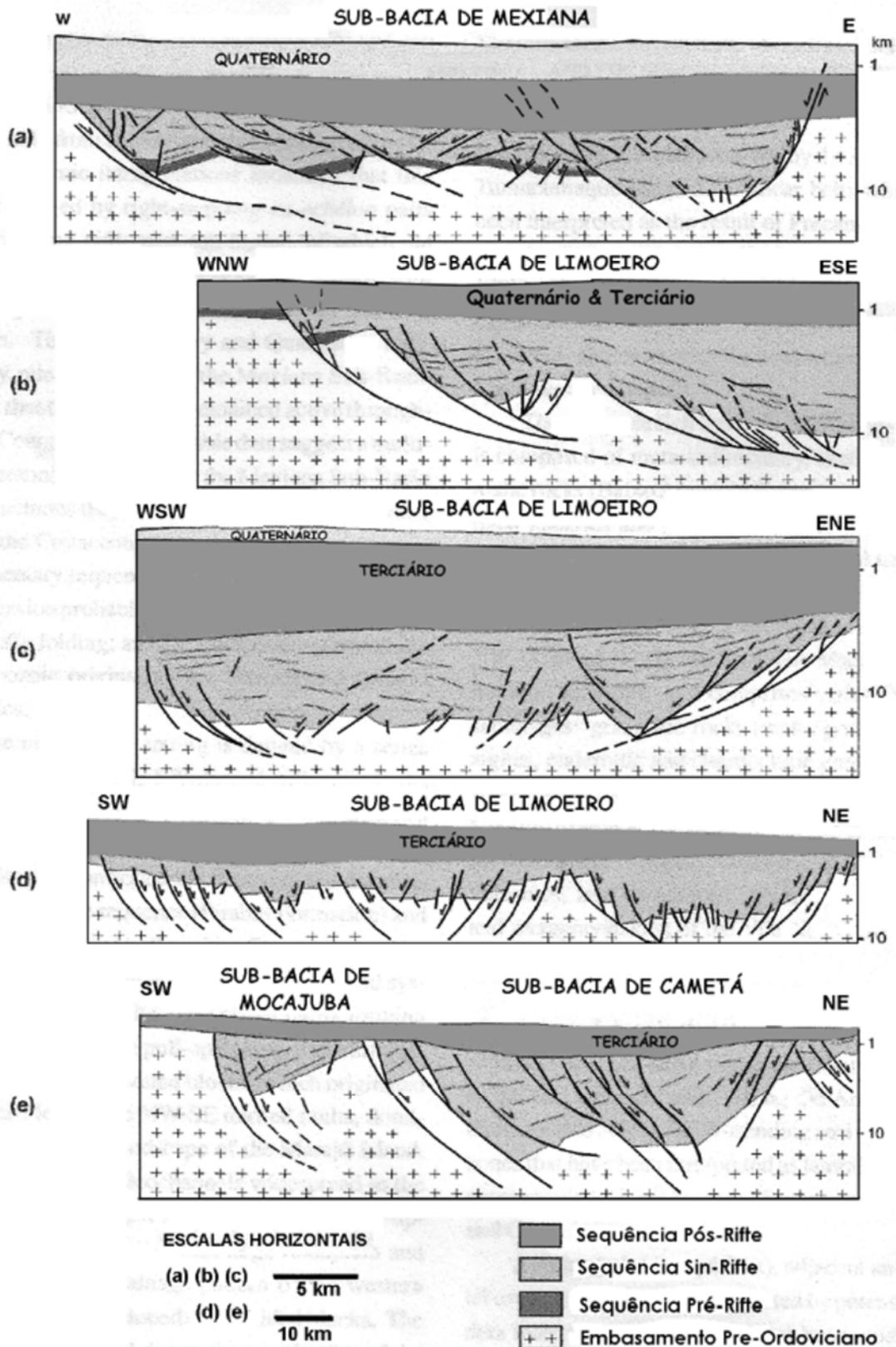


Figura 4.1 - Interpretação de seções sísmicas das Sub-bacias Mexiana, Limoeiro, Cametá e Mocajuba (Villegas, 1994 e Costa *et al.*, 2002), da bacia do Marajó. Fonte: Volume II - Geologia.

Na bacia do Amazonas, as linhas sísmicas ilustradas na **figura 4.2** deram o suporte para a elaboração das seções geológicas esquemáticas das **figuras 4.3 e 4.4**, que indicam espessuras da ordem de 5 a 6 km.

A carta cronoestratigráfica (**figura 3.4**) mostra a ocorrência de 25 Unidades Litoestratigráficas (ULs), das quais 21 ULs são depósitos, sobretudo pelíticos intercalados por soleiras de diabásio do diastrofismo Penatecaua das fases Pré-Rifte e Sin-Rifte que dominaram do Paleozoico ao Mesozoico. Do ponto de vista hidrogeológico, além dessas características desfavoráveis, essas unidades em subsuperfície, com espessura máxima total de 8.180 m, são provavelmente destituídas de circulação e passíveis de conter água salgada. Por esse motivo, apenas as unidades da fase Pós-Rifte (do Eocretáceo ao Pleistoceno), das quais 4 (quatro) com espessura total máxima de 1.930 m, representadas pelas formações Jazida da Fazendinha (250 m), Alter do Chão, (1.280 m), Solimões (100 m) e Içá (150 m) de forma não contínua, recobertas nos talwegues da rede hidrográfica por aluviões e terraços fluviais, são consideradas de interesse para o aproveitamento de água subterrânea.

Neste sentido, mesmo tomando como referência uma das situações mais favoráveis à captação do Paleozoico de subsuperfície, conclui-se que o empreendimento é por demais arriscado. É o caso do poço de Belterra (1-BR-1A-PA), no qual o topo da Formação Andirá se encontra sob o pacote Alter do Chão/Jazida da Fazendinha a uma profundidade “confortável” de 603 m. Na seção situada entre 603 e 1.000 m, com 397 m de espessura, na qual os arenitos são predominantes (55,4%), certamente não seria recomendável, aprofundar um poço para captar as finas intercalações de arenitos da Formação Andirá, tanto pelos custos envolvidos, quanto pela presença de anidrita, que implica em alto risco de salinização.

BACIA DO AMAZONAS

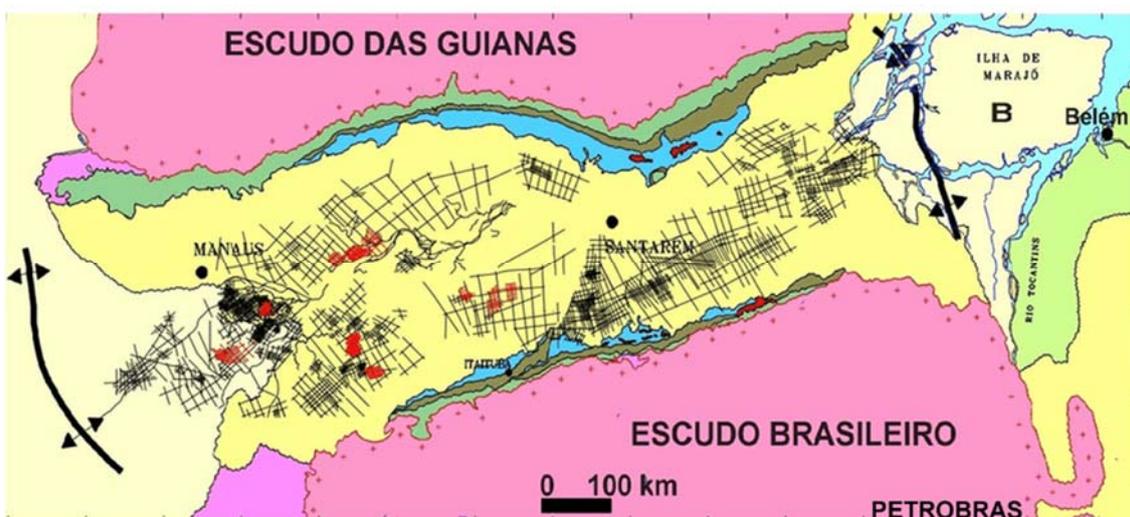


Figura 4.2 - Traçado de linhas sísmicas da Petrobras, na Bacia do Amazonas desde o Arco de Gurupá ao leste até o Arco de Purus ao oeste (Wanderley Filho *et al.*, 2005).
Fonte: Volume II – Geologia.

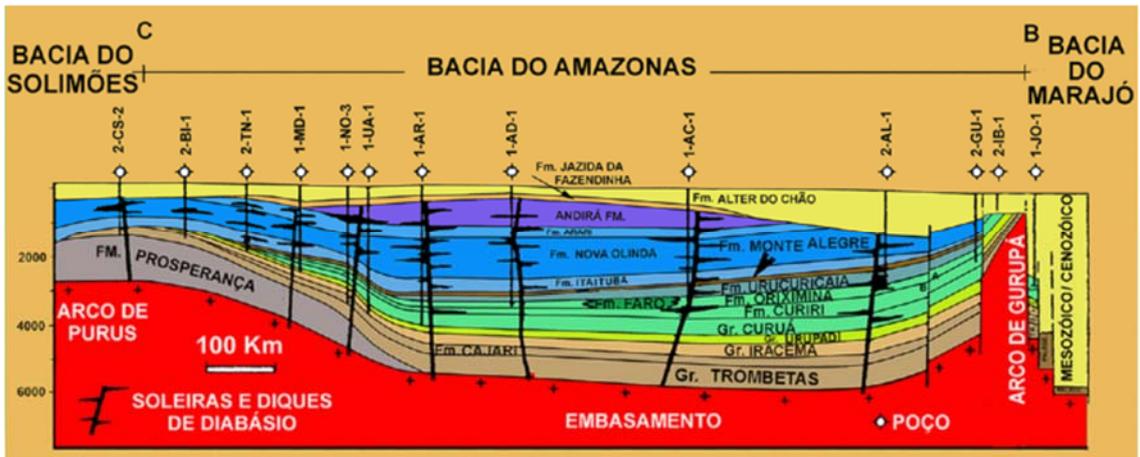


Figura 4.3 - Seção geológica longitudinal da Bacia do Amazonas. Modificado de Caputo (1984). Fonte: Volume II – Geologia.

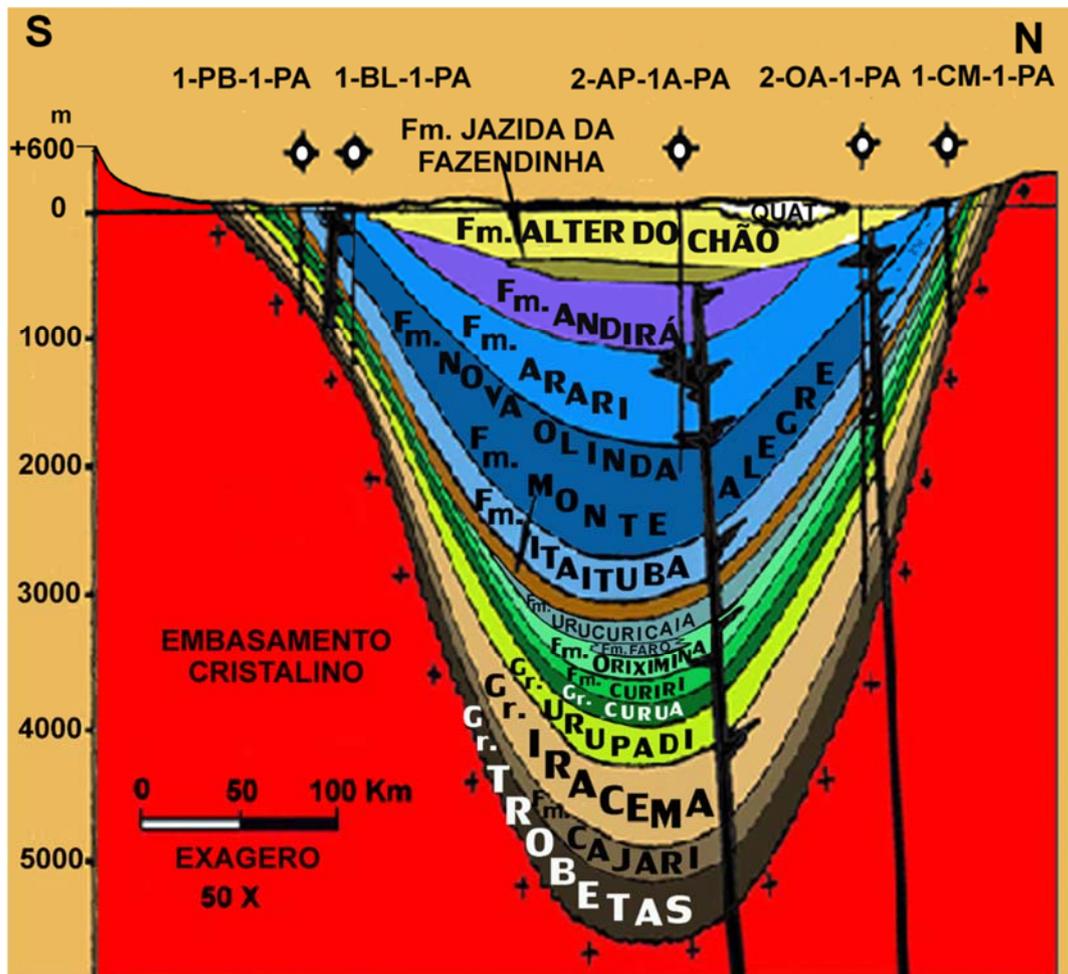


Figura 4.5 - Seção geológica transversal da Bacia do Amazonas Modificada de Caputo (1984). Fonte: Volume II – Geologia.

Na bacia do Solimões, as seções geológicas esquemáticas ilustradas nas **figuras 4.6 a 4.8** revelam que a sequência sedimentar alcança de 3 a 6 km de espessura. Nesse pacote, segundo a carta cronoestratigráfica da **figura 3.5**,

encontram-se 19 ULs, das quais 15 ULs com espessura máxima que soma 2.145 m, depositadas entre o Paleozoico (Ordoviciano) e o Mesozoico Inferior (Barremiano) e culminam com o diastrofismo Penatecaua, revelado pela presença de soleiras de diabásio sobre uma espessura máxima de 1.040 m.

Na fase Pós- Rife, encontra-se uma sequência com 1.800 m de espessura, que começa com 1.000 m de arenitos da Formação Javari, seguida de 650 m de sedimentos pelíticos com finas intercalações de arenito das formações Repouso e Solimões, culminando com 150 m de arenitos da Formação Içá. Recobrimo esta sequência nessa bacia, encontram-se naturalmente nos talwegues da rede hidrográfica depósitos de aluviões e terraços fluviais de natureza que incluem areias e argilas.

BACIA DO SOLIMÕES

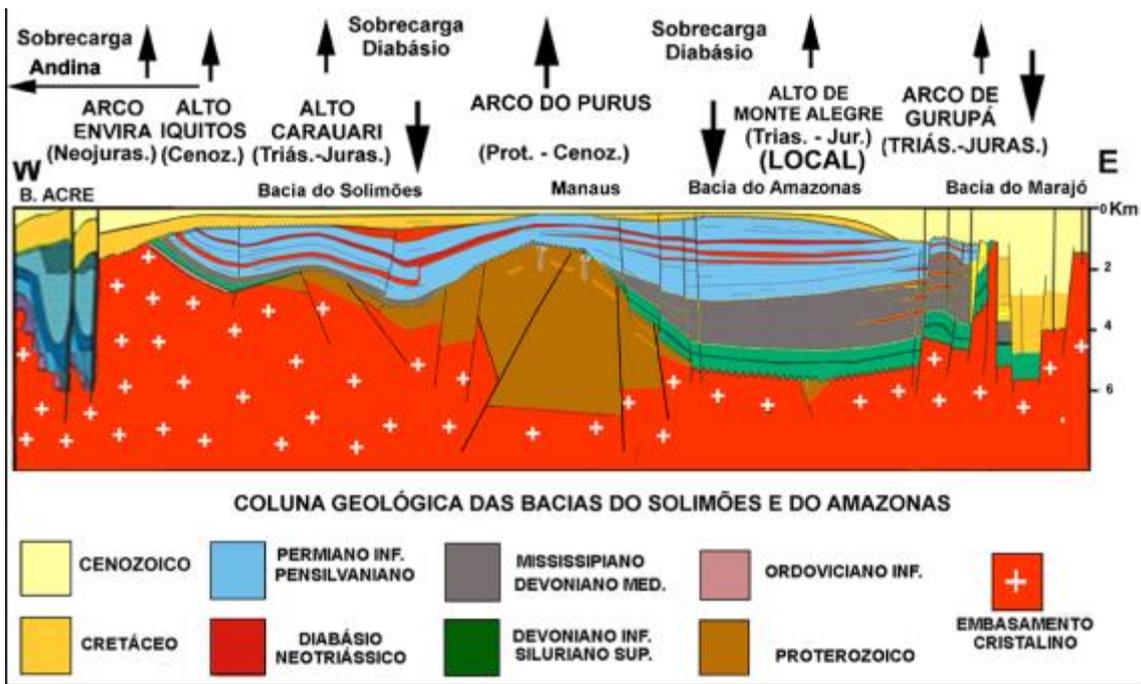


Figura 4.6 – Na seção geológica de Wanderley Filho & Travassos (2011) das bacias do norte do Brasil é indicada a movimentação vertical (epirogênese e subsidência) e sobrecargas laterais diferenciais durante o Fanerozoico. É feita distinção entre arco (que separa bacias) e alto (que não separa bacias). Fonte: Volume II - Geologia.

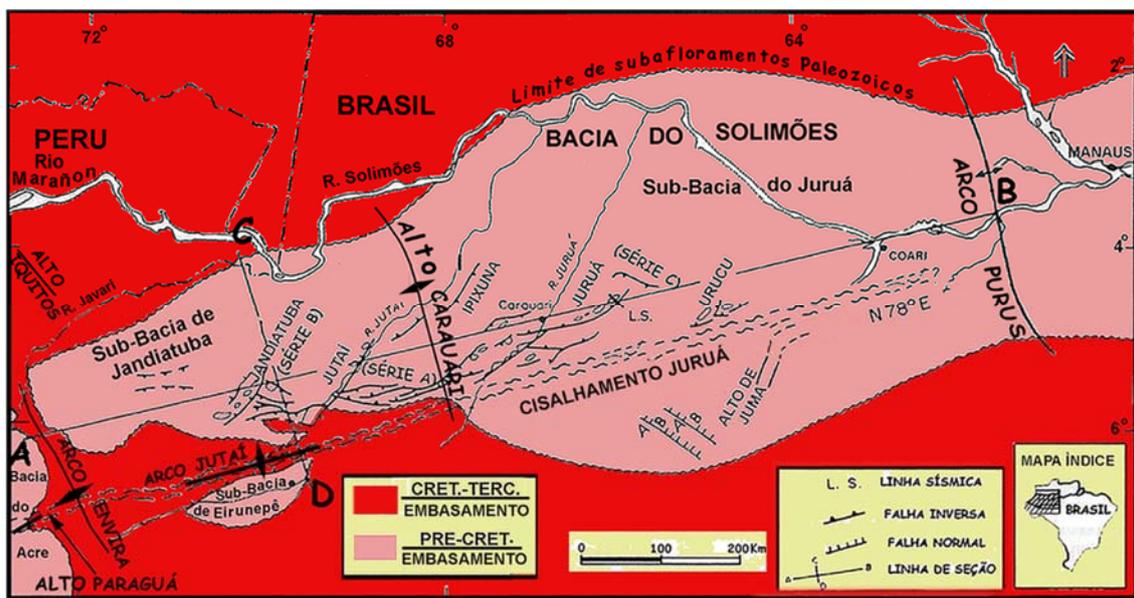


Figura 4.7 – A Orogenia Juruá afetou toda a Bacia do Solimões e Bacia do Acre. Ao longo de uma zona de falhamentos se originaram cinco trends estruturais potencialmente produtores de hidrocarbonetos (Jandiatuba, Jutai, Ipixuna, Juruá e Uruçu) e três séries de falhas com direções diferentes (Séries A, B e C) (Caputo, 1985; Caputo, 1991). A Orogenia Juruá, de idade neojurássica, causou soerguimento e a redução por erosão da área ocidental da Bacia do Solimões, quando vastas áreas do embasamento da bacia foram expostas e erodidas, e mais tarde encobertas pela Formação Javari no Cretáceo. A Bacia de Eirunepé e a Bacia do Acre foram desconectadas da Bacia do Solimões pelos arcos Jutai e Envira, respectivamente, causados pela Orogenia Juruá. Fonte: Volume II – Geologia.

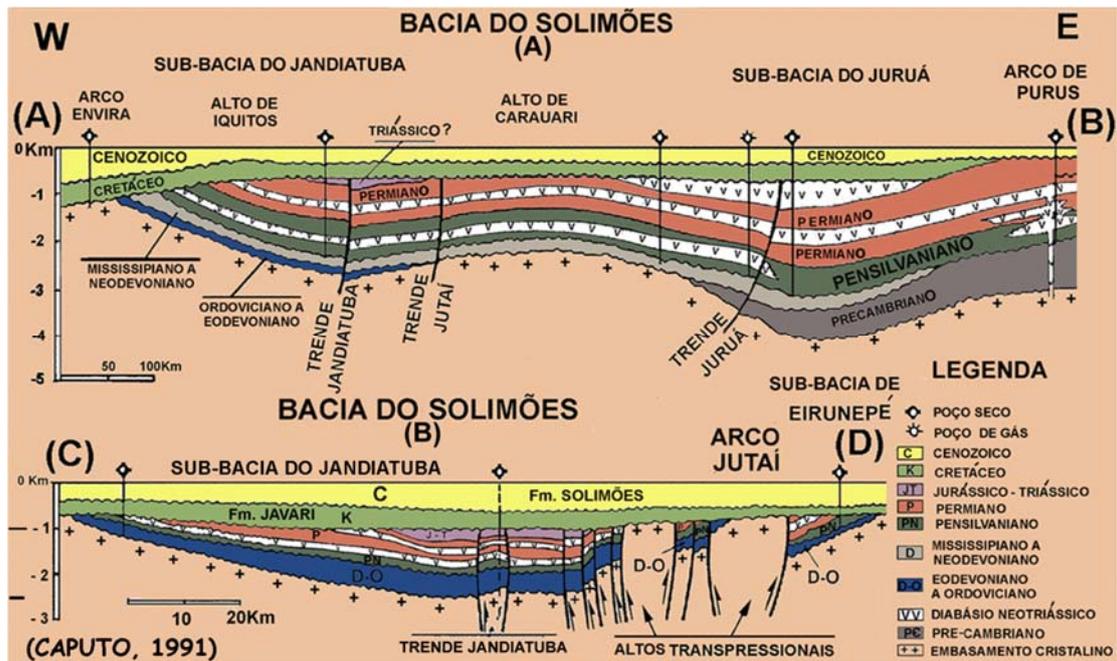


Figura 4.8 – Seções longitudinais e transversais da Bacia do Solimões. (A) A região sob a 1ª soleira foi deprimida parcialmente pelo efeito do peso do diabásio e áreas periféricas foram soerguidas. (B) Os altos transpressionais foram elevados por mais de 1,5 km, com remoção de todas as formações paleozoicas sobrejacentes pela Orogenia Juruá. Fonte: Volume II – Geologia.

A bacia do Acre, conforme sugerem o arcabouço estrutural (**figura 4.9**) e a seção geológica SSW-ENE (**figura 4.10**), abriga uma sequência sedimentar que alcança mais de 3 km de espessura. Contudo, no âmbito desse projeto e de acordo com a carta cronoestratigráfica (**figura 3.7**), do Carbonífero ao Pleistoceno a espessura máxima total de sedimentos alcança 6.220 m.

Existem, todavia, várias discordâncias e conforme se observa na **figura 3.17**, esta seção está acima da Formação Ramon e é subdividida em 2 (duas) unidades inominadas, com 1.600 m de espessura, das quais a mais superior é correlata da Formação Pozo no Peru e a ela se seguem as formações Repouso (600 m), Solimões (400 m) e Içá (150 m).

Como será visto no mapa de isópacas (**figura 4.20**) a referida seção argilosa com 2.750 m de espessura é a principal responsável pela drástica redução de espessura da seção arenosa do SAAB. De fato, o percentual médio de arenitos nesta seção, deduzido da análise dos perfis de poços estratigráficos do BDEP perfurados na bacia do Acre, é de apenas 13,4%, como indicado na **tabela 4.1**.

BACIA DO ACRE



Figura 4.9 - Localização e Arcabouço estrutural da Bacia do Acre (modificado de Cunha, 2006). Fonte: Volume II – Geologia.

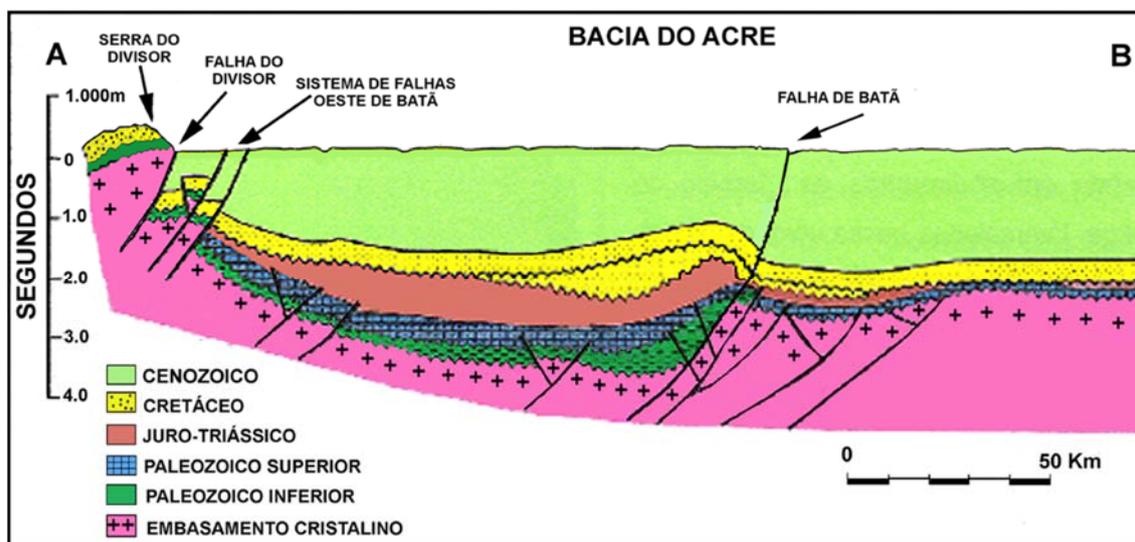


Figura 4.10 - Seção geológica esquemática da Bacia do Acre, segundo a linha A-B, da figura 4.9. A região da Falha Batã tornou-se um baixo do embasamento no mississipiano e também no Triássico-Jurássico. A depressão foi preenchida por sedimentos e nivelada no Permiano, Triássico e Jurássico. A falha de cavalgamento Batã aproveitou o plano de falha normal antigo e soergueu a região depois do Mesomioceno. Figura modificada de Cunha (2006). Fonte: Volume II – Geologia.

Tabela 4.1 – Espessuras da seção argilosa superior da fase Pós-Rifte acima do topo da Formação Ramon em poços estratigráficos do BDEP perfurados na Bacia do Acre.

Poço	Sigla	UF	x	y	Espessura da seção argilosa (m)	% Arenito	Topo Ramon
BATAN-1	1-BT-1-AM	AM	-73,19	-6,80	1.248	7,9	1.463
JAQUIRANA-1	1-JQ-1-AM	AM	-73,11	-6,25	2.094	18,8	2.100
RIO DO MOURA-1	1-RM-1-AC	AC	-73,22	-8,04	1.809	8,1	1.815
RIO AZUL-1	1-RZ-1-AC	AC	-73,17	-7,53	1.645	6,4	1.873
SERRA DO DIVIDOR-1	1-SD-1-AC	AC	-73,38	-8,18	1.564	-	1.570
CRUZEIRO DO SUL-1	2-CDST-1-AC	AC	-72,65	-7,73	1.301	20,4	1.326
RIO IPIXUNA-1	1-RPX-1-AM	AM	-73,09	-7,11	1.696	25,5	1.710
RIO IPIXUNA - 1	2-INST-1-AM	AM	-72,31	-7,23	592	6,4	1.700
Média					1.493	13,4	1.694

Na bacia do Acre, a área usada para a modelagem hidrogeológica da PHA no Brasil não inclui a Serra do Divisor porque nela o cristalino foi soerguido e se encontra provavelmente em condição de subafloramento sob as formações cretácicas Moa e Ramon, que mergulham para oeste em direção ao Peru. Na região, ao longo da Falha do Divisor, a seção geológica esquemática da **figura 4.10** sugere que o cristalino é aflorante na vertente leste, mas isto provavelmente ocorre em pequenas áreas não mapeáveis na escala ao milionésimo.

Do ponto de vista geológico, a PHA no Brasil abriga uma ampla e diversificada sequência sedimentar com mais de 60 (sessenta) unidades litoestratigráficas (ULs), distribuídas por 4 (quatro) bacias sedimentares com espessuras variáveis de 3 a mais de 10 km. Essas espessuras incluem camadas das fases Pré-Rifte, Sin-Rifte e Pós-Rifte, cronologicamente distribuídas do Paleozoico ao Terciário–Quaternário.

Em subsuperfície, as unidades abaixo do Cretáceo não foram incluídas no sistema aquífero modelado, aqui denominado como Sistema Aquífero Amazonas no Brasil (SAAB), porque além de profundamente afetadas pelo diastrorfismo Penatecaua, com inúmeras soleiras e diques de diabásio, são, sobretudo argilosas e ainda incluem camadas de halita (NaCl), silvita (KCl) e anidrita (CaSO₄ anidro), que são sais minerais passíveis de produzir nas águas subterrâneas salmouras cujas concentrações podem chegar a 220 g/L, conforme relatos da geologia no âmbito desse projeto. Por esse motivo também não se cogita da extração de água subterrânea em profundidades além de 1.000 m, em face dos altos custos dos poços e dos altos riscos de salinização.

4.3 – Discussão Sobre os Sistemas Aquíferos Regionais Descritos na PHA

No ano de 2005 alguns grupos de hidrogeólogos em diferentes instituições iniciaram uma discussão sobre a existência de um sistema aquífero único na Amazônia, o qual englobava as formações geológicas cenozoicas e cretácicas

da região. Dentre os trabalhos acerca do tema, os que mais se destacam estão descritos a seguir.

Sistema Aquífero Amazonas (SAA) – Ferreira et al. (2006)

Segundo Ferreira *et al.* (2006) e UNESCO (2007), o agrupamento dos aquíferos Javari, Jazida da Fazendinha, Alter do Chão, Solimões, Repouso e Içá, de acordo com a definição no âmbito desse projeto, trazem como hipótese a formação de um sistema aquífero único denominado Sistema Aquífero Amazonas (SAA). As bacias sedimentares do Amazonas e Orinoco são recobertas por sedimentos cretáceos e cenozoicos consolidados a não consolidados, com espessura de até 2.200 metros. Descrevem que esse sistema aquífero tem aproximadamente uma extensão de 3.950.000 km², ocorrendo em terras do Brasil, Bolívia, Colômbia, Equador, Peru e Venezuela.

Estas formações em questão podem ser individualizadas do ponto de vista litológico, paleontológico e estratigráfico, mas o fato de serem em grande parte síncronas ao longo do Cenozoico e Cretáceo e a ocorrência de importantes seções arenosas em todas elas favorecem sobremaneira suas comunicações hidráulicas. Sendo assim, do ponto de vista hidrogeológico, é possível admitir que as formações Javari, Jazida da Fazendinha, Alter do Chão, Solimões, Repouso e Içá possam constituir um reservatório único, embora heterogêneo e complexo, o qual foi chamado de Sistema Aquífero Amazonas (ANA, 2012).

A definição do SAA em Ferreira *et al.* (2006) e UNESCO (2006), especialmente nas bacias do Solimões e do Acre, integra a este sistema as sequências arenosas que se encontram geralmente a profundidades superiores a 1.000 metros. Esta é uma circunstância que deve ser avaliada, uma vez que em horizontes após essa profundidade as águas subterrâneas apresentam baixa velocidade de fluxo associada à falta de renovação nas camadas mais profundas, o que aumenta os riscos de sua salinização, além de custos muito elevados para a sua captação.

Sistema Aquífero Tikuna (SAT) – Rosário (2011)

De acordo com Rosário (2011), o Sistema Aquífero Amazonas (SAA), compreende dois subsistemas, o Sistema Aquífero Solimões (SAS) e o Sistema Aquífero Tikuna (SAT).

O SAA ocupa uma área de 2.700.000 km², que inclui as bacias sedimentares brasileiras do Amazonas, Solimões e Acre e se prolonga pelas bacias subandinas Marañon/Pastaza e Ucayali, no Peru, Oriente, no Equador, parte das bacias Madre de Dios e Beni, na Bolívia, e Putamayo, na Colômbia.

O SAT é formado por rochas cretáceas predominantemente arenosas, ocorrendo sob os sedimentos predominantemente argilosos do SAS, entre as profundidades de cerca de 350 e cerca de 750 m. O topo do SAT sobe na direção leste e, na altura do Arco de Purus, se conecta a Formação Alter do Chão aflorante e por ela tida também como Cretáceo, sem menção à Formação Jazida da Fazendinha, com profundidade média de 350 m, como demonstra a **figura 4.11**.

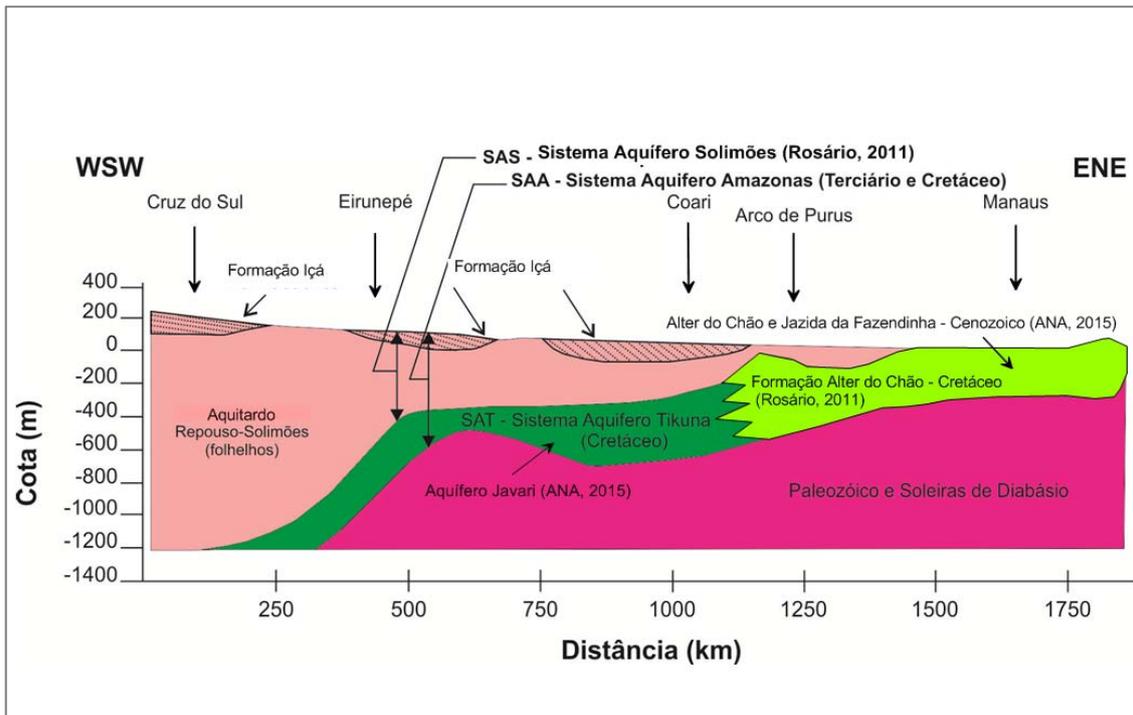


Figura 4.11 – O Sistema Aquífero Amazonas no Extremo Oeste da PHA no Brasil, adaptado de Rosário (2011).

A continuidade física entre o SAT e o Aquífero Alter do Chão, proposta pela autora em pauta, resulta da idade cretácica atribuída a este último. No âmbito desse projeto, este importante aquífero está no Terciário, isto é, síncrono à Formação Repouso. Além disso, observou-se que o aquífero Javari na Bacia do Solimões possui conexão hidráulica com o SAT, em contraposição ao proposto pela autora, que afirma a conexão hidráulica entre o aquífero Alter do Chão e o SAT, o que não seria possível, pois na Bacia do Acre tal conexão nem sequer existe com o aquífero Divisor em face da subida do embasamento cristalino na Serra do Divisor, conforme mostra a **figura 4.10**.

Sistema Aquífero Grande Amazonas (SAGA) – Abreu et al. (2013)

Abreu *et al.* (2013) definiram o Sistema Aquífero Grande Amazônia (SAGA) como a unidade representada pelas unidades litoestratigráficas (ULs) posicionadas do Eo-Neo Cretáceo à Era Cenozoica, que ocorre no Brasil nas bacias do Marajó, do Amazonas, do Solimões e do Acre (**tabela 4.2**). Os autores destacam que o SAGA “recobre unidades litoestratigráficas de idades variadas do Pré-Cambriano, bem como sequências sedimentares que se estendem do Paleozóico ao Jurássico, onde se alojam importantes corpos ígneos, sob a forma de soleiras, *sills* e diques.”

Tabela 4.2 – Unidades Litoestratigráficas (ULs) quaternárias, terciárias e cretácicas das bacias sedimentares da Amazônia e suas correlações (Abreu *et al.*, 2013).

Bacia	Acre	Solimões	Amazonas	Marajó	Idade
UNIDADE LITOESTRATIGRÁFICA	Içá	-	-	Tucunaré	Quaternária
	Solimões	Solimões	Alter do Chão	Marajó Limoeiro	Terciária
	Ramon	Javari	Jazida da Fazendinha	Anajás, Breves Jacarezinho	Cretácica
	Divisor				
	Rio Azul				
	Moa				
	Capanaua				
	Embasamento Cristalino				

De acordo com a **tabela 4.3**, a razão entre os volumes das reservas estimadas por Abreu *et al.* (2013) e as áreas das bacias sedimentares implica em espessuras médias de 110 m na bacia do Solimões, 306 m na bacia do Amazonas, 2.116 m na bacia do Marajó e de 5.157 m na bacia do Acre.

Tabela 4.3 – Reservas do SAGA (segundo Abreu *et al.*, 2013) e espessuras obtidas considerando as áreas das bacias sedimentares.

Bacia	$V=AhS_y$ (km ³)	S_y	A (km ²)	$h=V/AS_y$ (m)	$V_0= V/0,9$ (km ³)
Acre	23.960	0,20	23.231	5.157	26.622
Solimões	25.950	0,20	1.181.145	110	28.833
Amazonas	37.900	0,20	620.113	306	42.111
Marajó	74.710	0,20	176.511	2.116	83.011
Total	162.520	0,20	2.001.000	406	180.578

V = volume do SAGA com redução de 10% do Volume V_0 a título de “camadas arenosas não saturadas”; S_y = porosidade efetiva; A = área das bacias conforme item 1.2; h = espessura deduzida da razão entre volumes (km³) e áreas (km²), na equação de cálculo das reservas.

Segundo os autores, em termos de exploração, as reservas mais importantes seriam aquelas situadas em profundidades de até 500 - 600 m. Os aquíferos situados abaixo de 1.000 m de profundidade representam reservas estratégicas e nas condições atuais de exploração de água subterrânea na região deverão ser pouco consideradas.

Contudo, de acordo com a interpretação dos perfis litológicos dos poços estratigráficos do BDEP e com as conclusões do Projeto ANA-PHA (2015) sobre a falta de renovação das águas subterrâneas profundas, é muito alto o risco de que essas águas sejam **salgadas**. Todavia, mesmo supondo que sejam **doces**, acredita-se que as reservas de saturação situadas a grandes profundidades não são explotáveis.

4.4 – Sistema Aquífero Amazonas no Brasil (SAAB)

A análise da litologia de 187 poços do BDEP na Província Hidrogeológica Amazonas no Brasil no âmbito do Projeto ANA-PHA (2015) revela um predomínio considerável de formações arenosas sobre uma superfície 797.000

km², nas bacias sedimentares do Amazonas (620.113 km²) e do Marajó (176.511 km²). As espessuras dessas camadas, desde a superfície do terreno, variam em média de 500 m a mais de 1.000 m na Bacia do Amazonas e chegam a mais de 4.000 m na Bacia do Marajó. Nas bacias do Solimões e do Acre, as sequências arenosas se encontram geralmente na parte superior, até os 150 m, ou ainda, a profundidades superiores a 1.000 m, como já foi mencionado.

Na formulação de um modelo hidrogeológico conceitual, muito mais importante do que os nomes e/ou as idades das unidades litoestratigráficas (formações geológicas ou ULs), é a natureza litológica dessas formações e a superfície de cargas potenciométricas associada com as unidades hidrogeológicas de fluxo (UHF's) existentes nas mesmas.

O modelo hidrogeológico de fluxo da PHA no Brasil adotou como hipótese de trabalho uma mesma superfície potenciométrica para todas as camadas cenozoicas e do Cretáceo, extensivas em cerca de 3% da PHA no Brasil, às formações paleozoicas aflorantes. Essa hipótese significa que todas as formações, independente da sua natureza arenosa ou pelítica, estão interligadas, seja por variações laterais de fácies seja por curtos circuitos de fluxo através de fraturas que as integram em um só meio poroso e formam um grande sistema de águas subterrâneas, multibacias e multicamadas definido como SAAB, Sistema Aquífero Amazonas no Brasil, no qual o fluxo subterrâneo é governado por uma única superfície potenciométrica, de cargas livres, conectadas com os rios. Para este sistema, a superfície potenciométrica de cargas iniciais foi deduzida do modelo digital do terreno a partir dos níveis da grande rede de cursos de água perenes, inferidos para o período de estiagem.

Nos poços estratigráficos perfurados pela Petrobras obtidos pela ANA da base de dados de exploração de petróleo – BDEP/ANP, grande parte dos quais atravessando toda a sequência sedimentar até o embasamento cristalino, não existem dados de carga hidráulica e, portanto, não há como individualizar as distintas superfícies potenciométricas das camadas confinadas eventualmente existentes em escala de blocos estruturais. Ademais, isso não seria possível na escala do modelo adotado. Assim sendo, considera-se que a superfície de cargas potenciométricas médias do SAAB, ao longo da vertical, é governada pelas cargas hidráulicas da rede hidrográfica, toda ela constituída de rios perenes.

Quanto à base do SAAB, para fins de aproveitamento, considera-se que corresponde à profundidade limite de 1.000 m, pois abaixo dessa profundidade acredita-se que as águas subterrâneas apresentam baixa velocidade de fluxo associada à falta de renovação nas camadas mais profundas, o que aumenta os riscos de sua salinização, além de custos muito elevados para a sua captação.

O SAAB é constituído pelas seguintes formações, cujas intercomunicações hidráulicas são sugeridas pelas suas relações estratigráficas:

- As aluviões quaternárias, aflorantes em todas as bacias;
- A Formação Barreiras, do Terciário, aflorante na região de Belém e na Plataforma Bragantina;

- A Formação Pirabas, do Terciário, recoberta pela Formação Barreiras na Região de Belém e parcialmente aflorante na Plataforma Bragantina;
- A Formação Tucunaré, do Quaternário, aflorante e na Bacia do Marajó;
- A Formação Alter do Chão, aflorante na Bacia do Amazonas;
- O Paleozoico aflorante na bacia do Amazonas;
- A Formação Içá, do Quaternário, aflorante recobrimo descontinuamente a Formação Solimões nas bacias do Amazonas, Solimões e do Acre;
- A Formação Jazida da Fazendinha, do Cretáceo, na Bacia do Amazonas, recoberta pela Formação Alter do Chão;
- A Formação Javari, do Cretáceo, na porção oriental da Bacia do Solimões, predominantemente arenosa;
- As formações Repouso e Solimões predominantemente argilosas com finas intercalações de arenitos;
- Na bacia do Acre o SAAB é representado pela seção argilosa superior da fase Pós-Rift que inclui parte da Formação Repouso (450 a 600 m) e a Formação Solimões (400 m) e pela Formação Içá (150 m), predominantemente arenosa;
- Na bacia do Acre, as sequências cretácicas arenosas sotopostas, situadas a mais de 1.500 m de profundidade, ficam fora do limite de 1.000 de profundidade do SAAB;
- As formações cretácicas da bacia do Acre na Serra do Divisor não fazem parte do SAAB, pois as águas subterrâneas a partir desse trecho escoam para a Bacia de Ucayali, no Peru.

A vazão de escoamento natural do SAAB mostra que a circulação de água subterrânea ocorre a pequena profundidade, pois quase toda a recarga é restituída à rede hidrográfica. O escoamento subterrâneo natural quase desprezível sugere não haver praticamente circulação de água subterrânea oriunda de recarga. Devido à pequena profundidade da superfície freática as águas infiltradas são logo restituídas à rede hidrográfica.

Modelo Litoestratigráfico do SAAB

Na elaboração do modelo litoestratigráfico da PHA utilizou-se dados de imagens SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*), a partir do qual se elaborou Modelo Digital de Terreno (**figura 4.12**); mapa hidrogeológico ao milionésimo (CPRM, 2014); relatório da geologia da PHA no Brasil (Volume II); perfis compostos por 187 poços estratigráficos obtidos do Banco de Dados de Exploração de Petróleo (BDEP), a partir do qual se elaborou o Bloco 3D do modelo litoestratigráfico da PHA no Brasil (**figura 4.13**).

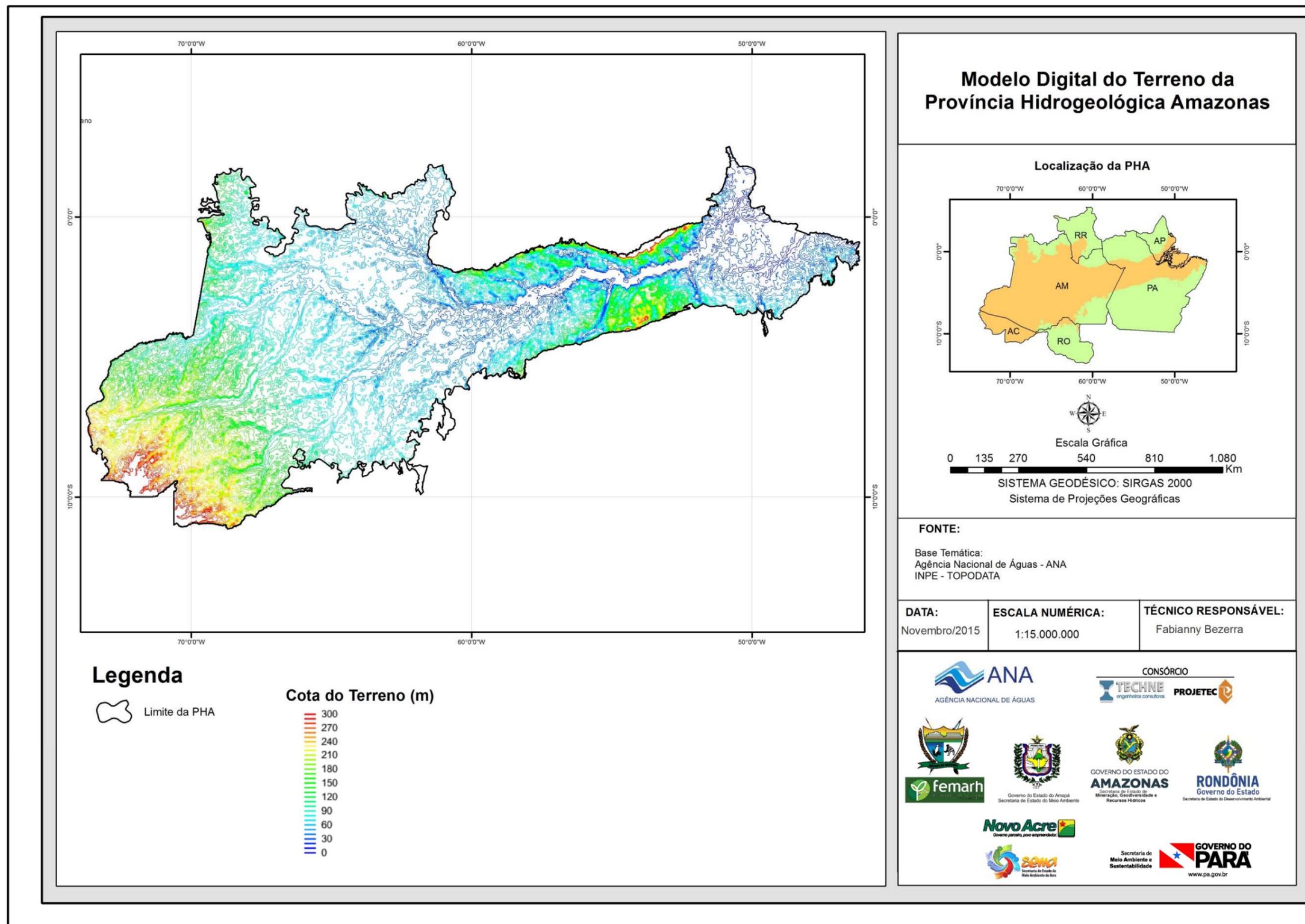


Figura 4.12 – Modelo digital do terreno da Província Hidrogeológica Amazonas elaborado a partir de imagens SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission).

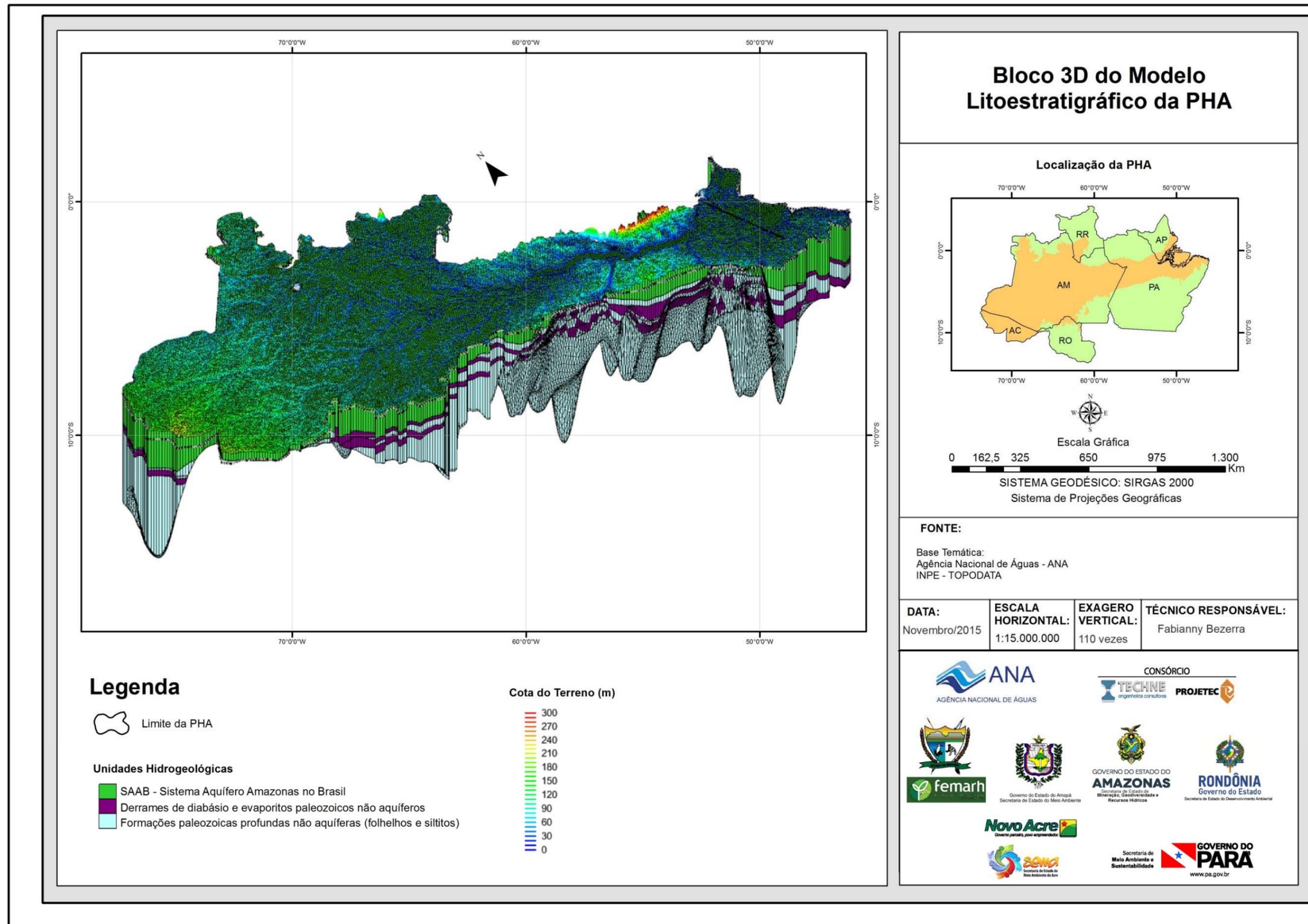


Figura 4.13 – Bloco 3D do modelo litoestratigráfico da PHA no Brasil destacando o SAAB na parte superior repousando em discordância sobre derrames de diabásio, evaporitos, folhelhos e siltitos.

Litologia, Dimensões e Perfis Elaborados

No âmbito dos estudos da PHA no Brasil, a ANA obteve do BDEP os perfis compostos de 187 poços profundos distribuídos mais ou menos uniformemente ao longo da PHA no Brasil, entre a região de Belém e a região de Cruzeiro do Sul, no Acre.

Do ponto de vista geológico esses perfis fornecem informações extremamente detalhadas das unidades litoestratigráficas (ULs) e da distribuição vertical da natureza litológica das camadas que as compõem. De modo geral são encontradas alternâncias de camadas permeáveis e pouco permeáveis em todas as ULs. Verticalmente, essas alternâncias se distribuem por milhares de metros de espessura ao longo dos quais podem ser vistas nos perfis intercalações de camadas aquíferas e não aquíferas com até 1 m de espessura. Ao nível de detalhe dos perfis, a distribuição espacial dessas intercalações é aleatória, variando tanto na direção horizontal quanto na vertical, de um poço para outro.

Considerando os objetivos do estudo e a escala de trabalho, optou-se por separar grandes pacotes predominantemente arenosos de grandes pacotes predominantemente argilosos. Para tanto, adotou-se os seguintes critérios: pacotes aquíferos foram individualizados quando havia predominância de termos arenosos; Pacotes considerados como aquíferos foram individualizados quando havia predominância de termos argilosos; profundidade de 1.000 m como limite. Foram elaborados um perfil longitudinal e oito perfis transversais, cujas posições são mostradas na **figura 4.14**.

Perfil Longitudinal

Na elaboração do perfil longitudinal foram utilizados 41 poços da Petrobras, os quais foram dispostos de cima para baixo, no sentido de Oeste para Leste, conforme pode ser observado na **figura 4.15**.

O perfil longitudinal mostra que o SAAB atinge suas maiores espessuras entre Santarém e a região de Belém, onde os arenitos aquíferos alcançam mais de 1.000 metros. Esses arenitos constituem a Formação Alter do Chão, terciária, que, extravasando o Arco de Gurupá¹, grada lateralmente em subsuperfície para a Formação Barreiras na Bacia do Marajó. A Formação Tucunaré (600 m), juntamente com as Formações Barreiras (700 m) e Marajó sotoposta (2.000 m), conferem aos sedimentos aquíferos, nesta bacia, uma espessura total de 3.300 m. Ainda no perfil longitudinal verifica-se que as espessuras do SAAB ficam restritas à faixa dos 300 a 400 metros no trecho compreendido entre Parintins e o Alto de Purus², em função de um alçamento do topo da Formação Nova Olinda, do Paleozoico.

¹ O Arco de Gurupá é um pronunciado alto do embasamento cristalino. Situa-se abaixo da profundidade alcançada pelo perfil longitudinal (figura 4.15).

² O Arco de Purus foi esculpido em sedimentos pré-Paleozoicos (Formação Prosperança). Essa estrutura, muito profunda condicionou mais fortemente a deposição das formações paleozoicas e de forma mais atenuada, embora perceptível, a sedimentação cretácica. Ele não se manifesta estruturalmente, de forma ostensiva, no topo do Paleozoico, pelo menos no perfil longitudinal elaborado (figura 4.15).

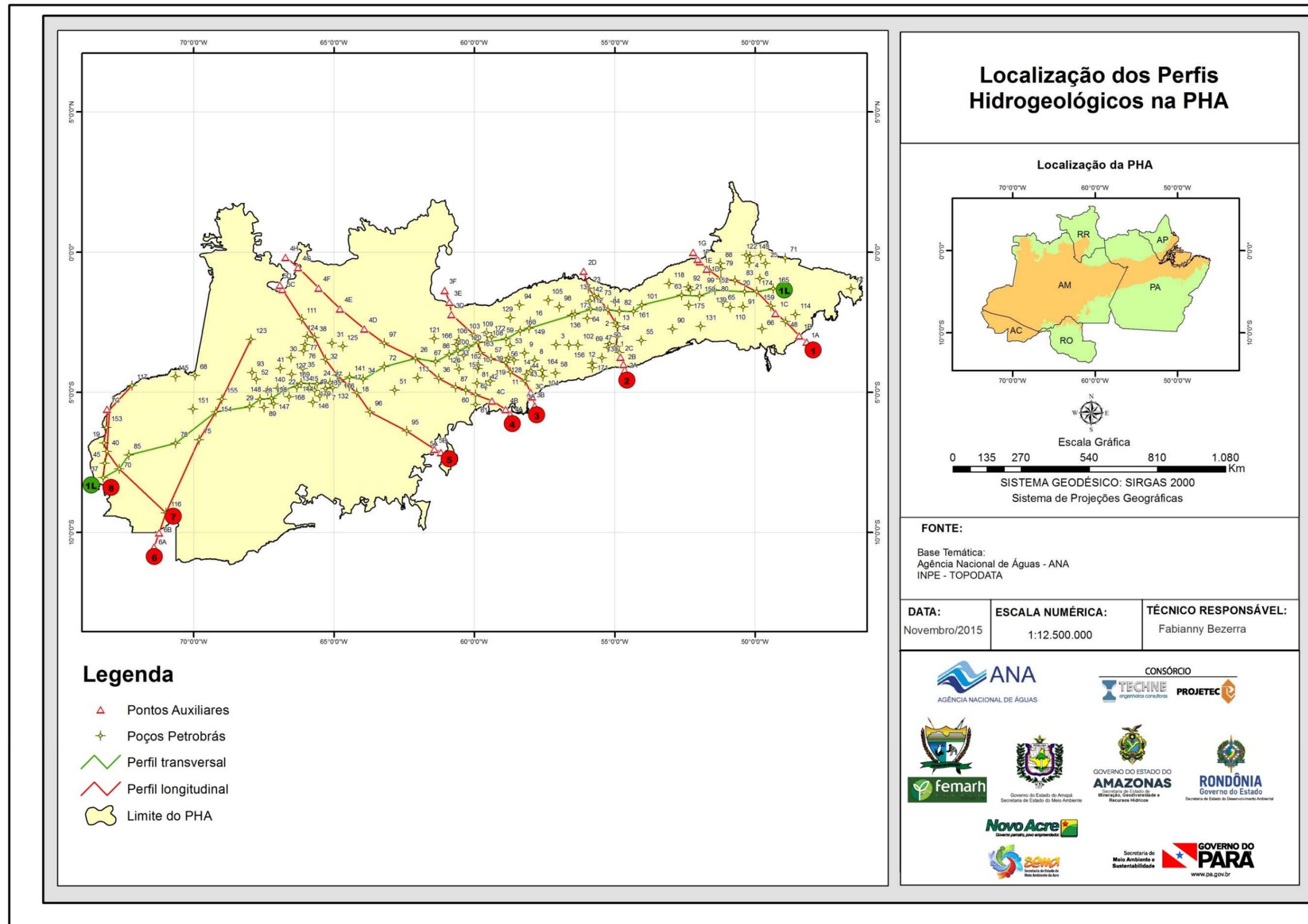


Figura 4.14 – Localização dos perfis hidrogeológicos longitudinal e dos perfis transversais na PHA no Brasil.

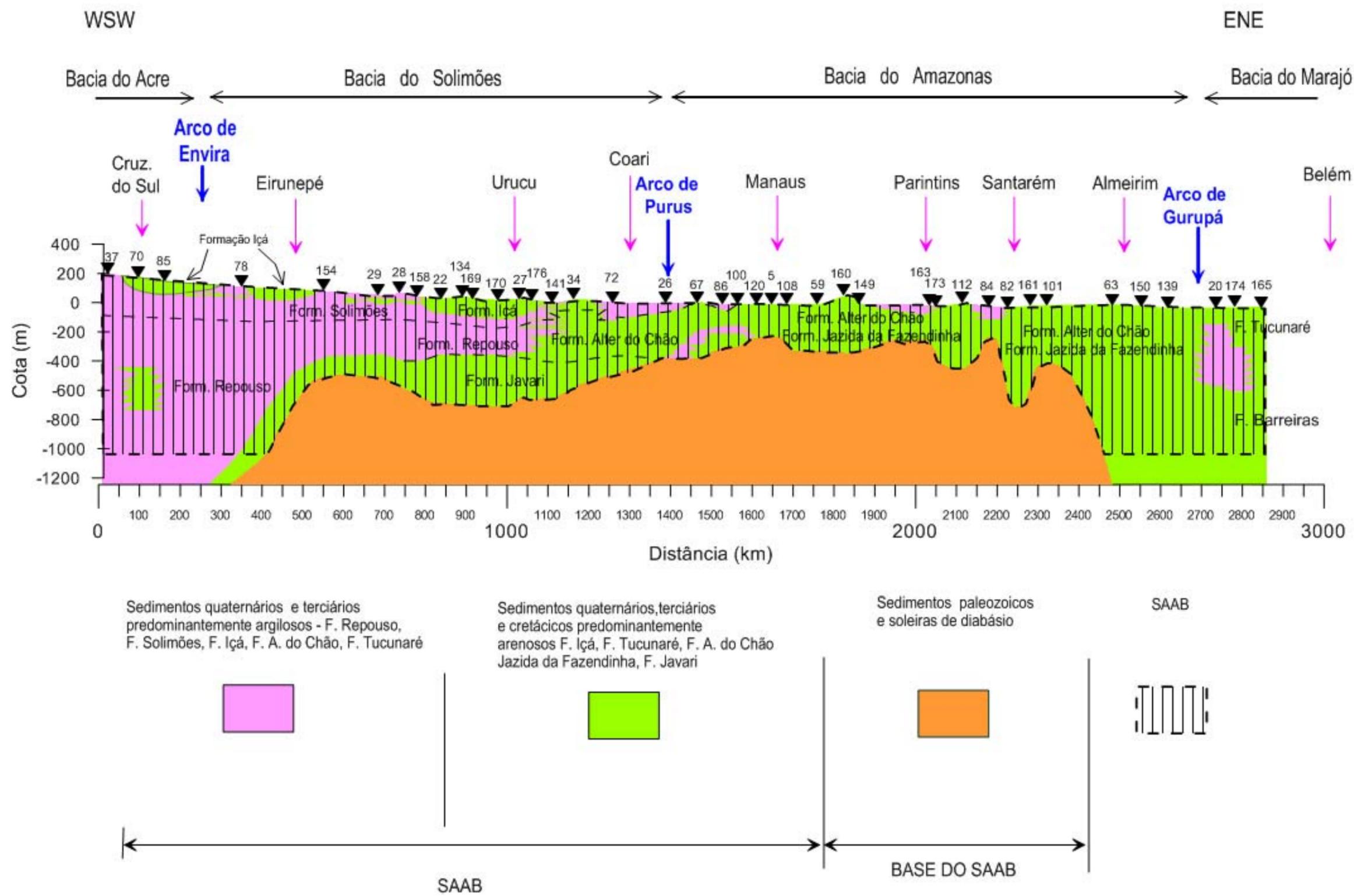


Figura 4.15 – Perfil Hidrogeológico Longitudinal da PHA no Brasil.

Do Arco de Purus para oeste, na bacia do Solimões, passa a ocorrer a Formação Javari, cretácica, repousando sobre sedimentos paleozoicos e sobre o embasamento cristalino nas plataformas. Sobre ela, jaz a Formação Repouso. A Formação Içá, o pacote Repouso-Solimões e a Formação Javari constituem o SAAB na bacia do Solimões, exibindo espessuras que atingem os 1.000 m.

Mapas de Isópacas, Topo e Base do SAAB

Dentre o total de 187 poços fornecidos pelo BDEP foram usados 176 poços para a elaboração dos mapas de topo e base do SAAB, e de isópacas da unidade de fluxo da PHA. Esses mapas foram elaborados com o auxílio do *software* ArcGIS, utilizando como método de interpolação o *IDW (Inverse Distance Weighted)*.

Na elaboração dos mapas de topo e base adotou-se que o SAAB é considerado como um sistema aquífero livre e aflorante. Assim, seu topo coincide sempre com a superfície freática e a sua base sempre sobre os sedimentos paleozoicos e/ou sobre o embasamento cristalino. O volume compreendido entre essas duas superfícies (topo e base) pode ser encarado como o volume do SAAB. Eventuais intercalações ou recobrimentos argilosos, embora existentes, não foram individualizados no SAAB, devido às dimensões da área de estudo. As espessuras do SAAB foram obtidas dos perfis elaborados e da análise dos demais poços da Petrobras. Nos poços e nos pontos auxiliares onde o SAAB é considerado inexistente, atribuiu-se a espessura igual a zero. Na falta de poços nos perfis, foram atribuídos valores aos pontos auxiliares em função das suas posições nos perfis e também com o auxílio da geologia de superfície (CPRM, 2005; 2006).

Na montagem do mapa de isópacas (**figura 4.16**), considerou-se o SAAB como um sistema aquífero heterogêneo. Esse mapa resulta da diferença entre as superfícies de topo (**figura 4.17**) e base (**figura 4.18**) do SAAB.

Observa-se que a deposição dos sedimentos arenosos que constituem o sistema aquífero estudado se desenvolveu de oeste para leste, ao longo da calha do rio Amazonas. As maiores espessuras, atingindo mais de 1.000 m, ocorrem entre Santarém e a ilha do Marajó.

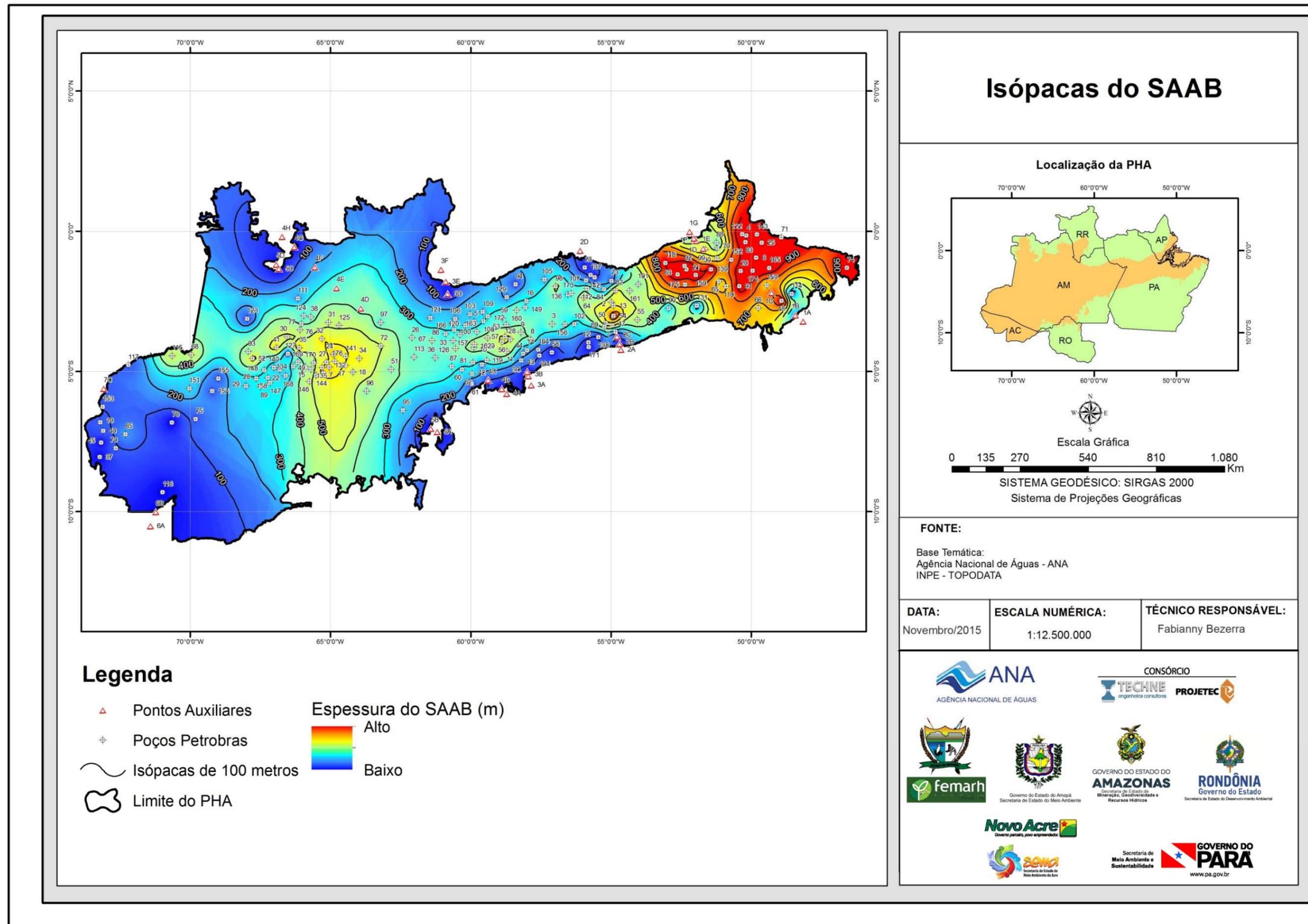


Figura 4.16 – Mapa de Isópacas do SAAB.

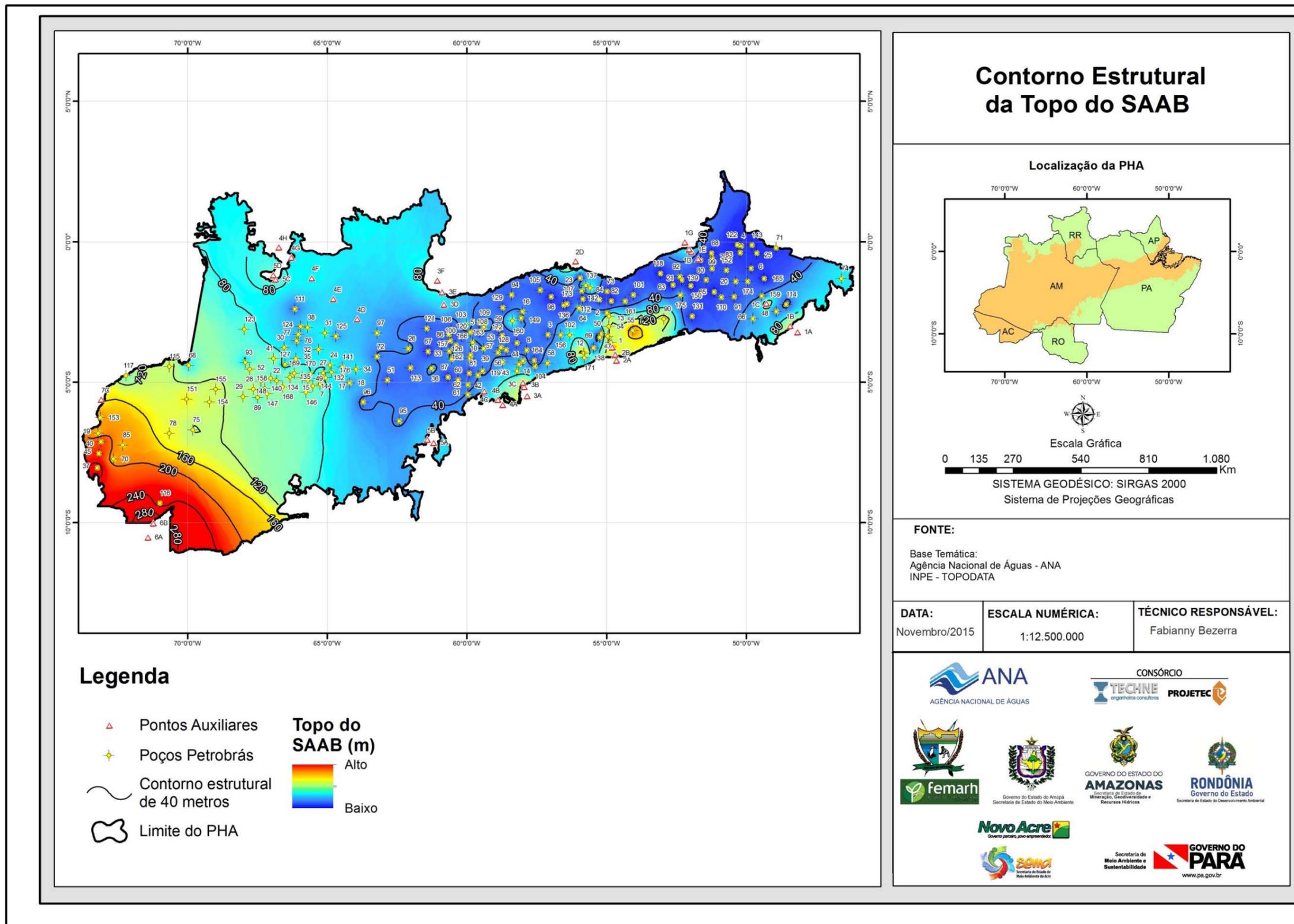


Figura 4.17 – Mapa Estrutural do Topo do SAAB.

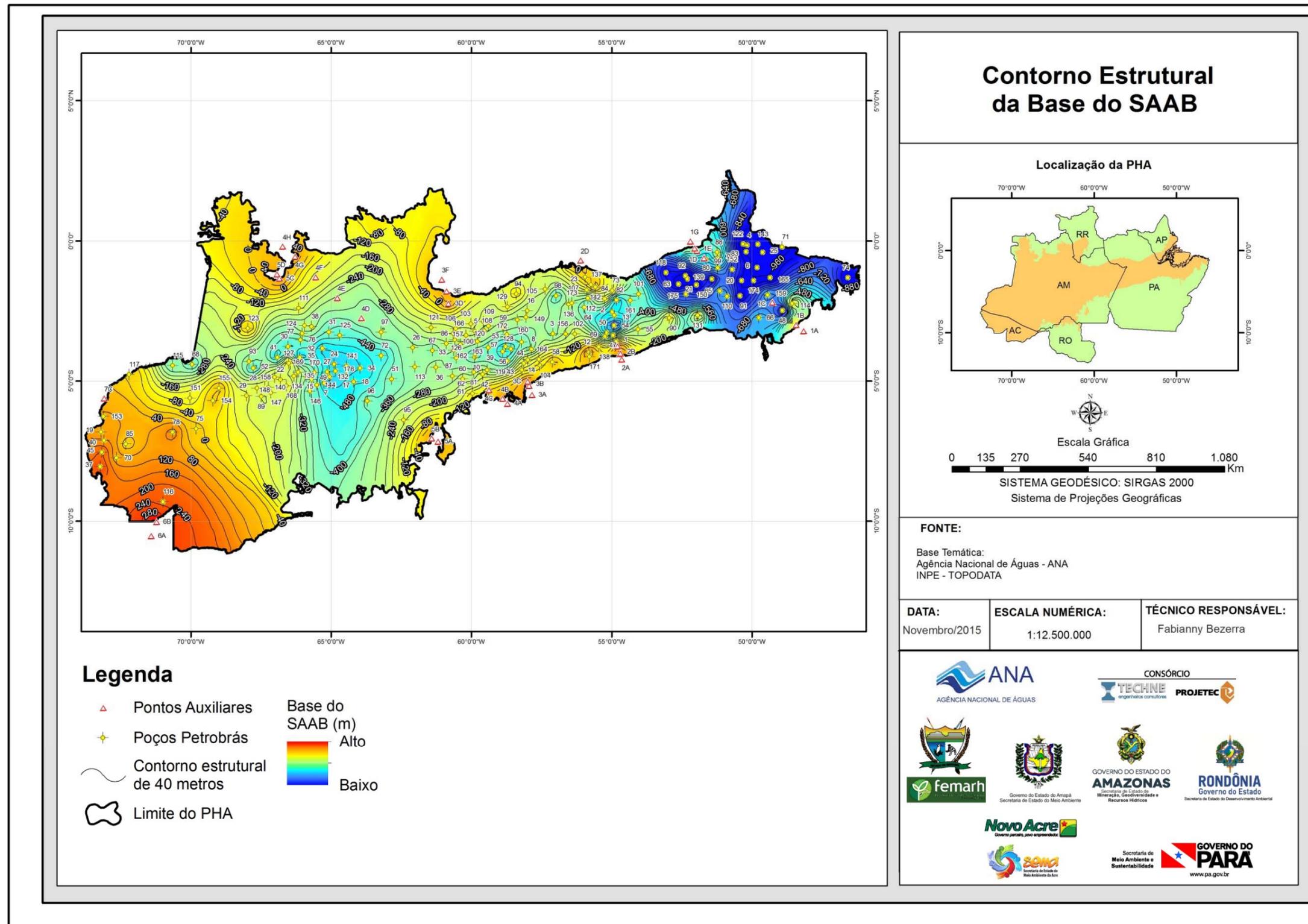


Figura 4.18 – Mapa Estrutural da Base do SAAB.

4.5 – Execução e Interpretação dos Testes de Bombeamento

A realização de testes de bombeamento ou mais adequadamente denominados de testes de aquífero teve por objetivo fundamental a obtenção dos valores dos coeficientes de transmissividade, de condutividade hidráulica e de armazenamento, parâmetros hidrodinâmicos de fundamental importância para posterior avaliação das reservas hídricas acumuladas no aquífero.

Os testes de aquífero consistem no bombeamento de um poço com uma vazão constante (ou estabilizada ao longo do teste) e, sempre que possível, no acompanhamento da evolução dos rebaixamentos produzidos em um ou mais poços de observação. Quando inexistem poços de observação ou piezômetros, o coeficiente de armazenamento pode ser avaliado de forma aproximada, supondo que o raio do poço é infinitamente pequeno.

No âmbito do projeto ANA-PHA foi possível utilizar poços de observação em apenas 10% dos poços testados, ou seja, três poços. Isto ocorreu, pois os poços próximos aos poços usados no teste ou ficavam a distâncias inadequadas para reagir ao bombeamento do poço testado ou, em vários outros casos, não se conseguia a autorização do seu proprietário para a sua paralisação durante as 24 horas do teste além das 12 horas que antecediam a sua execução.

Os parâmetros hidrodinâmicos dos aquíferos variam muito de um local para outro em função da variação de espessura, heterogeneidade e anisotropia dos sistemas aquíferos. Nos testes realizados as medidas de nível dinâmico foram executadas com uma sonda elétrica sonora e a medição de vazão através de método volumétrico. Ressalta-se que a programação de testes levou em conta a importância que cada aquífero exerce no contexto hidrogeológico regional. Com efeito, os quatro principais e mais extensos aquíferos da PHA são o Alter do Chão (bacia do Amazonas), o Tucunaré (bacia do Marajó) e o Içá (bacia do Solimões), além do aquífero Aluvial, presente em todas as bacias, enquanto os demais ocorrem em áreas mais restritas e/ou com importância secundária devido à sua reduzida potencialidade. Na **tabela 4.4** são mostradas as características dos 30 (trinta) testes realizados, com indicação das cidades nas quais eles foram realizados, dos níveis estáticos e dinâmicos, bem como da vazão, da vazão específica e da espessura saturada.

Na interpretação dos testes de bombeamento foram utilizados dois métodos: o semilogarítmico de Cooper & Jacob (1946), previsto para **aquífero confinado**, homogêneo e isotrópico, com fluxo radial circular horizontal para o poço; e o de Neuman (1975), previsto para **aquífero livre**, homogêneo e anisotrópico nos testes em que foram observados efeitos de fluxo vertical produzido por drenagem gravitacional retardada.

O método de Neuman (1975) foi aplicado nos estudos hidrogeológicos na escala 1:50.000 das cidades piloto de Macapá, Porto Velho, Rio Branco, Santarém e Tabatinga, nas quais foi necessário conhecer a porosidade efetiva para fins de avaliação da recarga potencial direta (RPD) usando as variações sazonais do nível freático.

Tabela 4.4 – Características dos 30 testes de bombeamento realizados no âmbito do Projeto ANA-PHA.

Aquífero	Teste	Poço	Cidade	UF	Prof.* (m)	NE (m)	ND (m)	Q (m ³ /h)	Qsp (m ³ /h/m)	ho(m)
Alter do Chão	1	Matinha 2	Almeirim	PA	22	3,85	5,67	10	5,49	18
		Matinha 1 (Obs)	Almeirim	PA	-	-	-	-	-	-
	2	Matinha 1	Almeirim	PA	20	4,27	9,47	20	3,85	16
		Matinha 2 (Obs)	Almeirim	PA	-	-	-	-	-	-
	3	T.R. Ville	Almeirim	PA	186	25,87	36,89	19,63	1,78	160
	4	A.M. Jutai	Almeirim	PA	85	46,81	48,25	9,41	6,53	38
	5	São José	Manaus	AM	100	48,35	63,55	35	2,30	52
	6	Nova Floresta	Manaus	AM	90	23,42	56,59	42	1,27	67
7	Novo Israel	Manaus	AM	120	23,2	78,35	58	1,05	97	
8	Cidade de Deus	Manaus	AM	204	136,43	161,2	9,62	0,39	68	
Aluvial	9	Portobras	Tabatinga	AM	32	9,74	11,74	1,2	0,60	22
	10	Brilhante	Tabatinga	AM	24	8,85	9,59	1,29	1,74	15
Inominado (Cruzeiro do Sul)	11	CZS DEPASA	Cruzeiro do Sul	AC	120	59,21	67,25	54,55	6,78	61
		Teatro Nava	Cruzeiro do Sul	AC	-	-	-	-	-	-
	12	DEPASA 2	Cruzeiro do Sul	AC	130	52,17	56,37	35	8,33	78
Coberturas Cenozoicas de Porto Velho	13	Escola Pública	Porto Velho	RO	80	12,66	12,94	1,9	6,79	67
	14	Cuniã	Porto Velho	RO	80	2,86	23,09	2	0,10	77
Içá	15	ETA Lábrea	Lábrea	AM	80	8,73	24,7	33,95	2,13	71
	16	Centro Lábrea	Lábrea	AM	80	5,75	14,8	15,16	1,68	74
	17	EIR Fátima	Eirunepé	AM	60	6,58	8,65	25,72	12,43	53
	18	CRI06 União	Coari	AM	58	12,95	19,03	11,88	1,95	45
	19	CRI07 União 2	Coari	AM	52	11,27	12,2	20,03	21,54	41
	20	FB06 Centro	Fonte Boa	AM	60	14,37	42,23	24	0,86	46
	21	FB07 Centro	Fonte Boa	AM	60	10,79	25,68	48	3,22	49
	22	BAR C.Turístico	Barcelos	AM	42	7,29	11,4	20,57	5,00	35
Rio Branco	23	Bombeiros	Rio Branco	AC	50	2,76	3,5	1,52	2,05	47
	24	Belo Jardim	Rio Branco	AC	50	4,76	4,95	0,63	3,32	45
Barreiras-Pirabas	25	BEL Infraero	Belém	PA	160	14,47	25,11	27	2,54	146
	26	UFPA	Belém	PA	250	8,3	39,64	60	1,91	242
	27	CERPA	Belém	PA	304	22,4	33,56	295,8	26,51	282
	28	BEL COSANPA	Belém	PA	270	36,13	44,7	185	21,59	234
Tucunaré	29	CAESA 1	Macapá	AP	160	11,44	20,92	75	7,91	149
	30	CAESA 2	Macapá	AP	158	13,26	22,34	240	26,43	145

*Prof. = Profundidade do poço; NE= Nível estático; ND = Nível dinâmico; Q = Vazão; Qsp = Vazão específica; ho = Espessura saturada.

4.6 – Parâmetros Hidráulicos Obtidos

O **Método de Cooper & Jacob (1946)** é um procedimento clássico válido para **aquífero confinado**, homogêneo, isotrópico com fluxo horizontal, muitas vezes também usado para aquífero livre. Considerando que praticamente todos os parâmetros hidráulicos constantes da literatura citada foram avaliados por esse

método, decidiu-se inicialmente também utilizá-lo no Projeto ANA-PHA, uma vez que a maioria dos testes foi realizada sem poços de observação e porque isto permitiria comparar os resultados com os da literatura.

O **Método de Neuman (1975)** se aplica a **aquífero livre**, homogêneo, anisotrópico, com fluxo horizontal e que leva em conta a ocorrência de fluxo vertical produzido por drenagem gravitacional.

Dos 30 (trinta) testes realizados existem 18 (dezoito) onde as condições hidráulicas predominantes são de aquífero livre, de modo que a análise realizada por ambos os métodos tende a fornecer resultados mais consistentes pelo método de Neuman (1975). Os 12 (doze) testes restantes revelam condições hidráulicas que podem variar, em 10 (dez) testes, de semilivres a semiconfinadas (em Almeirim, Manaus e Belém), casos em que ambos os métodos podem fornecer resultados aproximados um pouco mais confiáveis pelo método de Neuman (1975). Nos 02 (dois) testes restantes foram evidenciadas condições hidráulicas plenamente confinadas no poço bombeado no aquífero Içá, no Centro de Lábrea, e no poço de observação a 430 m de distância, no Teatro na cidade de Cruzeiro do Sul, este somente interpretável pelo método de Cooper & Jacob (1946) que nada mais é do que uma aproximação do clássico método de Theis.

Na **figura 4.19** apresenta-se um mapa geológico da Província Hidrogeológica Amazonas com a localização das cidades onde foram realizados testes de bombeamento no âmbito do projeto ANA-PHA.

Aquífero Alter do Chão

Na região de Santarém, o Aquífero Alter do Chão é aflorante e está representado por sua porção superior constituída por uma sequência predominantemente arenosa, contendo intercalações argilosas. Os arenitos são finos a grossos, localmente conglomeráticos, esbranquiçados a avermelhados, friáveis, caulínicos, apresentando intercalações de argilas avermelhadas a mosqueadas (Oliveira & Pastana, 1999). Na verdade, não é apenas a porção superior, mas todo o pacote Aquífero Alter do Chão-Jazida da Fazendinha que é constituído de arenitos com intercalações argilosas.

O percentual de camadas arenosas no pacote Alter do Chão-Jazida da Fazendinha varia de 31,1 a 98,4%, o que sugere haver entre 1,6 e 68,9% de camadas argilosas neste pacote aquífero. Os valores médios obtidos pelo método de Cooper & Jacob (1946) estão apresentados na **tabela 4.5**.

Tabela 4.5 – Valores médios obtidos pelo método de Cooper & Jacob (1946) no âmbito do Projeto ANA-PHA.

Cidade	UF	Nº de testes	Coefficiente de Transmissividade (m ² /s) - Médio	Condutividade Hidráulica (m/s) - Médio	Coefficiente de Armazenamento (adm) - Médio
Almeirim	PA	02	8,10.10 ⁻³	2,53.10 ⁻⁴	7,28.10 ⁻³
Manaus	AM	04	7,01.10 ⁻⁴	2,74.10 ⁻⁶	1,68.10 ⁻³
Santarém	PA	02	2,04.10 ⁻³	7,99.10 ⁻⁶	3,92.10 ⁻³

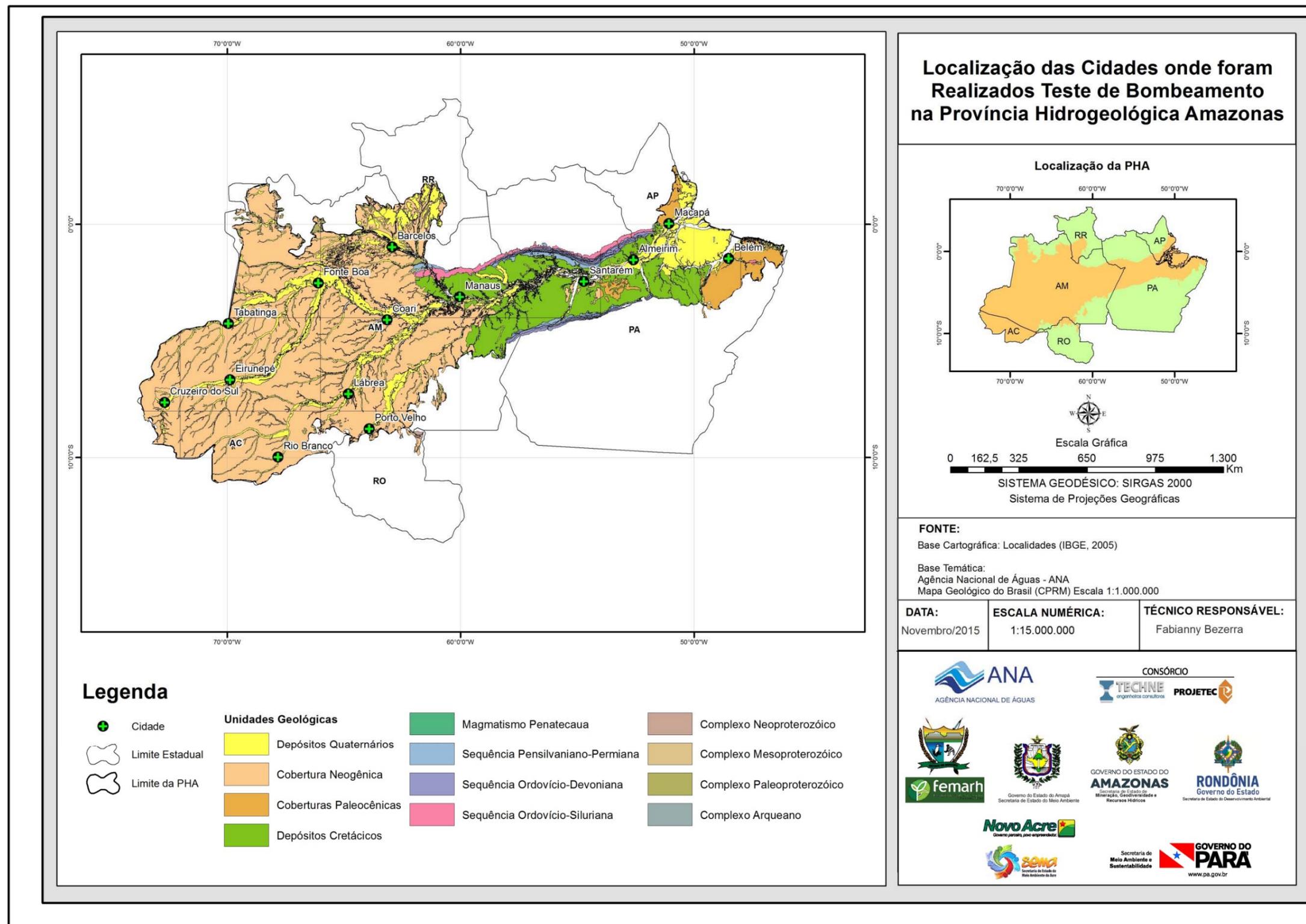


Figura 4.19 – Mapa geológico da Província Hidrogeológica Amazonas com localização das cidades onde foram realizados testes de bombeamento.

Os resultados dos testes de bombeamento mostram uma significativa variação de transmissividade nas cidades de Manaus, Santarém e Almeirim. Esse fato se deve, certamente, às condições de ocorrência da formação geológica aquífera, que é constituído de camadas cenozoicas da Formação Alter do Chão que cobrem toda a bacia do Amazonas onde se encontram todas as 03 (três) cidades mencionadas e cuja espessura é consideravelmente maior em Almeirim. Embora o poço testado em Almeirim seja muito pouco penetrante (22 m), ele atinge, de acordo com o perfil do poço, o aquífero Alter do Chão entre as profundidades de 17 e 22 m. Nesse poço, o aquífero Alter do Chão possui espessura de 1.249 m, com o topo a 17 m e a base a 1.266 m, enquanto que em Manaus e Santarém, com poços de mais de 100 m de profundidade, a espessura total é de 261 m.

Segundo os testes, essa diferença também pode ser explicada pela alta condutividade hidráulica, que em Almeirim é 114 vezes maior do que em Manaus. As condições hidráulicas do aquífero Alter do Chão variam de confinadas ($4,1E-04$) a praticamente livres ($1,2E-02$) em Almeirim e se mostram pouco confinadas, refletindo uma descompressão pelas explorações, em Manaus ($1,2E-03 \leq S \leq 2,4E-03$) e em Santarém ($5,5E-03 \leq S \leq 7,3E-03$).

Os valores médios obtidos pelo método de Neuman (1975) nas cidades de Almeirim, Santarém e Manaus apresentaram transmissividade de 270,3 m²/dia ($3,13 E-03$ m²/s), condutividade hidráulica de 15 m/dia, coeficiente de armazenamento de $4,3E-04$ e porosidade efetiva de 0,13.

Aquífero Içá

O Aquífero Içá encontra-se numa formação de idade neo-terciária/quaternária que recobre grande extensão da Bacia Amazônica. Devido a sua pouca espessura e similaridade com os depósitos terciários da Formação Solimões, muitos autores não reconhecem a existência da Formação Içá como uma unidade individualizada, englobando-a na Formação Solimões.

Apesar de o Aquífero Içá ocorrer extensivamente na bacia do Solimões e em parte da bacia do Amazonas, a maioria das cidades localizadas no seu domínio não capta suas águas, e sim as águas dos depósitos aluvionares e terraços sobre os quais estão assentadas diretamente. Entretanto, em algumas cidades como Lábrea, Eirunepé, Coari, Fonte Boa e Barcelos, esse aquífero é a principal fonte de abastecimento. Os resultados obtidos pelo método de Cooper & Jacob (1946) apresentaram valores médios de coeficiente de transmissividade de 514,9 m²/dia, condutividade hidráulica de 2,4 m/dia e coeficiente de armazenamento de $1,6E-02$.

Pelo método de Neuman (1975) verificou-se que na cidade de Lábrea as curvas de teste do aquífero Içá exibem um comportamento de aquífero semilivre e confinado, enquanto que nas demais cidades (Eirunepé, Fonte Boa, Coari e Barcelos) o aquífero Içá se caracteriza como livre.

Comparando os dois métodos conclui-se que para o aquífero Içá o método de Neuman (1975) é o mais indicado, conforme mostra os parâmetros médios obtidos de condutividade hidráulica horizontal de 1,0 m/dia, coeficiente de armazenamento de $6,5E-05$ e porosidade efetiva de 0,18.

Aquífero Inominado (Cruzeiro do Sul)

A Formação Cruzeiro do Sul ocorre sobreposta a feições tipo terraço, sendo sua maior exposição localizada a sudoeste da cidade de Cruzeiro do Sul, na confluência dos Rios Moa e Juruá. Ocorre ainda ao Sul até próximo à cidade de Porto Walter. São sedimentos depositados por correntes fluviais, flúvio-lacustres e em leques aluviais, compostos por arenitos finos, friáveis, maciços, argilosos, coloração amarelo-escura, rosada e esbranquiçada, com intercalações de argilitos lenticulares e estratificação cruzada, sobretudo em sua porção inferior (Cavalcante, 2005).

Embora esta seja uma região de falhas ativas até os dias atuais, com ocorrência de sismos, não há como garantir, na escala do presente projeto, que as litologias encontradas nos poços catalogados do SIAGAS na cidade de Cruzeiro do Sul sejam da Formação Cruzeiro do Sul

Até o momento nenhum autor definiu formalmente o “aquífero Cruzeiro do Sul” como o manancial subterrâneo explorado na cidade de Cruzeiro do Sul, embora se tenha informalmente conhecimento de que essa denominação de fato existe. Isto tanto pode resultar da crença de que os poços captam águas subterrâneas da Formação Cruzeiro do Sul ou do fato dos poços estarem localizados na cidade de Cruzeiro do Sul, o que é mais provável, pois os mapeamentos regionais conhecidos têm indicado, em superfície, a ocorrência da Formação Solimões (topo do pacote Repouso-Solimões).

Dos perfis analisados, 74% (17/23) são litológicos e construtivos e 26% (6/23) são apenas litológicos, o que sugere poços que não foram completados. Em 20 (vinte) dos poços, a litologia dominante é de argilas calcíferas e calcários intercalados com camadas de arenito. O percentual de arenitos varia de 5% a 41%, com média de 21%, o que permitiria classificar a UHF captada pelos poços como aquífero, a julgar pelos quase 80% de pelitos. Não se sabe se é “Aquífero Repouso-Solimões” ou “Aquífero Cruzeiro do Sul”. Curiosamente as vazões são significativas, com média de 28,2 m³/h, porém incompatíveis com as litologias descritas. Outra curiosidade sugerida pelos dados é que em três poços com profundidade variando de 71 a 87 m e litologia constituída, em média, de 90% de areia fina e quase nenhuma intercalação argilosa (aquífero lçá) a vazão varia de 0,8 a 9 m³/h, com média de 6,1 m³/h.

Diante desse quadro duvidoso não há como chegar a uma conclusão segura sobre o aquífero explorado na cidade de Cruzeiro do Sul, razão pela qual considera-se prudente classificar a UHF em questão como “Inominada” (Cruzeiro do Sul), já que o assunto carece de maiores estudos.

Os valores médios obtidos pelo método de Cooper & Jacob (1946) de coeficiente de transmissividade de 181,4 m²/dia, condutividade hidráulica de 0,4 m/dia e coeficiente de armazenamento de 3,18.10⁻³ indicam compatibilidade com areias siltsas e areias finas em consonância com as litologias dos perfis analisados, além de aquífero confinado tendendo a livre.

Os valores médios obtidos pelo método de Neuman (1975) confirmam a condição de aquífero essencialmente confinado, com coeficiente de armazenamento igual a 2,3E-04. Os baixos valores da porosidade efetiva, de 0,2% a 1%, podem ser uma confirmação da tendência de mudança da condição hidráulica para livre, já sugerida pelo método anterior. O efeito de

filtração vertical é muito pequeno como se pode deduzir da condutividade hidráulica vertical de 0,02 m/dia.

Aquífero Barreiras-Pirabas

A Formação Pirabas é formada por duas sequências de sedimentos denominadas Pirabas Superior e Inferior, respectivamente. A primeira é caracterizada por sedimentos marinhos, fossilíferos, composto por argila calcífera cinza-esverdeada e leitos de calcário duro cinza-esbranquiçado, que se alternam sucessivamente com camadas de arenito calcífero, siltitos e areias. A sequência Pirabas Inferior constitui-se predominantemente de camadas repetitivas de arenitos cinza-esbranquiçado, granulação fina a conglomerática, com intercalações mais espessas de argilas e siltitos esverdeados. Sobreposta à Formação Pirabas ocorre a Formação Barreiras, composta por conglomerados, arenitos e argilitos. Do ponto de vista hidrogeológico, o conjunto dessas formações constitui um sistema aquífero onde o Pirabas é do tipo semiconfinado e o Barreiras do tipo livre.

Os testes desenvolvidos no âmbito do projeto e analisados pelo método de Cooper & Jacob (1946) sugerem altos valores de transmissividade (801,8 m²/dia) e coeficiente de armazenamento de $1,12 \cdot 10^{-2}$, superior ao citado pela literatura, o que se deve à descompressão produzida no sistema Barreiras-Pirabas pela exploração ou eventualmente pela captação conjunta dos dois aquíferos.

Pelo método de Neuman (1975), as curvas de rebaixamento mostram que existem efeitos de fluxo vertical e de anisotropia que refletem de forma bastante consistente a existência de conexão hidráulica entre camadas aquíferas das formações Barreiras e Pré-Barreiras. Em média, a transmissividade avaliada pelo método é de 379,7 m²/dia, considerada mais apropriada, haja vista que o outro método não considera o fluxo vertical.

Aquífero Tucunaré

Na área de estudo da PHA, o aquífero Tucunaré ocorre na bacia do Marajó, sendo constituído basicamente de arenitos espessos que alcançam mais de 1.000 m na plataforma continental (Bacia da Foz do Amazonas).

Os testes realizados no Projeto ANA-PHA, interpretados pelo método de Cooper & Jacob (1946), indicaram valores médios de transmissividade igual a $1,97 \cdot 10^{-2}$ m²/dia, muito superiores aos citados na literatura, o que se deve provavelmente a descompressão pela exploração de muitos poços, e de um coeficiente de armazenamento de $3,20 \cdot 10^{-2}$, que indica aquífero livre e de maior potencialidade.

Considerando que o aquífero Tucunaré foi caracterizado como um sistema livre, localmente confinado, os testes do aquífero realizados na cidade piloto de Macapá foram interpretados pelo método de Neuman (1975), através do qual foi possível compreender o comportamento da liberação de água por descompressão (armazenamento confinado, S) e da liberação de água por drenagem gravitacional retardada (porosidade efetiva ou armazenamento livre, S_y). Importante destacar que os poços testados, pertencentes à CAESA, são poços produtores que funcionam diariamente há muito tempo. Sendo assim, o efeito da liberação de água do armazenamento por descompressão ocorre em um tempo tão curto depois que a bomba é ligada, que não é possível registrar

a transmissividade, sendo calculada apenas a porosidade efetiva com valor de 0,08.

Aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho

Esse aquífero tem o seu domínio restrito à região de Porto Velho, sendo constituído de depósitos de origem fluvial e colúvio-aluvial, formado por intercalações de areia, argila e silte, com espessura média de 50 metros, podendo alcançar, em algumas localidades, mais de 90 metros (Adamy & Romanini, 1990). Esse aquífero, cuja denominação antiga (Jaciparaná), teve os parâmetros hidrodinâmicos avaliados e interpretados pelo método de Cooper & Jacob (1946), com valor médio de coeficiente de transmissividade de 10,1 m²/dia, condutividade hidráulica de 1,5 m/dia e coeficiente de armazenamento de $2,4 \cdot 10^{-3}$, sugerindo condição de aquífero livre, localmente confinado. Os valores encontrados no âmbito do projeto foram muito superiores aos encontrados na literatura, o que possivelmente é explicado pela intensa exploração dos vários poços domésticos.

Os testes de bombeamento avaliados pelo método de Neuman (1975) separam os efeitos da liberação de água por descompressão (coeficiente de armazenamento de $1,2 \cdot 10^{-4}$) e da liberação de água por drenagem gravitacional retardada (porosidade efetiva igual a 0,14).

Aquífero Rio Branco

Os sedimentos do pacote aluvial que compõem o aquífero Rio Branco possuem na base predominância de areia fina a média, ocorrendo algumas vezes materiais siltosos, clastos milimétricos de laterita e grãos de argila rica em matéria orgânica. A camada sobrejacente ao aquífero é constituída principalmente por argila siltosa e argila silto-arenosa, conferindo um caráter de baixa capacidade de infiltração direta da água precipitada na superfície, mas que não é totalmente impermeável.

Trata-se de depósitos inconsolidados que ocorrem no vale aluvial do rio Acre sobrepostos à Formação Solimões, que na região da cidade de Rio Branco recebem a designação de argilitos “salão” e são considerados como muito pouco permeáveis (Melo Jr. & Marmos, 2006).

Os testes realizados no Projeto ANA-PHA e interpretados pelo método de Cooper & Jacob (1946) indicaram valores médios de transmissividade igual a 175,4 m²/dia, coeficiente de armazenamento de $4,44 \cdot 10^{-3}$, indicando aquífero praticamente livre. Os valores observados no âmbito do projeto são distintos da literatura, o que é justificável pela distinção entre os poços usados e interferências dos cones de depressão dos poços em exploração.

Os valores interpretados pelo método de Neuman (1975) apresentam condutividade hidráulica de 0,89 m/dia e grau de anisotropia. O coeficiente de armazenamento confinado é de $3,2 \cdot 10^{-5}$ e a porosidade efetiva 0,12.

Aquífero Aluvial

O aquífero Aluvial corresponde aos sedimentos aluvionares indiferenciados que se distribuem ao longo das planícies dos vales dos rios. Esses sedimentos variam de areia fina a média por vezes conglomerática com algum teor de argila, geralmente sendo cobertos por uma camada argilosa ou silto-argilosa, o que lhes confere o caráter de semiconfinamento.

Os resultados dos testes de bombeamento interpretados pelo método de Cooper & Jacob (1946) apresentaram valores médios de coeficiente de transmissividade de 102,3 m²/dia, condutividade hidráulica de 4,9 m/dia e coeficiente de armazenamento de $3,63 \cdot 10^{-3}$, o que demonstra a tendência de aquífero praticamente livre. Esses resultados sugerem condições relativamente homogêneas e indicativas da presença de areias relativamente permeáveis nos poços testados.

Os testes de bombeamento também foram avaliados pelo método de Neuman (1975), através do qual foi possível separar os efeitos da liberação de água por descompressão (coeficiente de armazenamento de $2,75 \cdot 10^{-5}$, confinado) e da liberação de água por drenagem gravitacional retardada (porosidade efetiva de 0,125, ou armazenamento livre), condutividade hidráulica vertical de 0,17 m/dia e o grau de anisotropia.

Conclusões

Embora os testes de bombeamento não tenham sido realizados nas condições ideais da teoria, que prescrevem aquíferos inicialmente em repouso e sem interferência de outros poços e malgrado tenha sido o coeficiente de armazenamento avaliado, na maioria dos casos, sem poços de observação, os resultados obtidos são julgados satisfatórios por apresentarem ordens de grandeza perfeitamente compatíveis com os tipos de aquíferos avaliados e por se tratarem de valores aproximados por procedimentos perfeitamente válidos para ajustar as exigências da teoria às condições reais de campo.

A conclusão sobre os resultados obtidos é que em apenas 02 (dois) testes foram evidenciadas condições hidráulicas de aquífero confinado com fluxo puramente horizontal, passíveis de descrição pelo método de Cooper & Jacob (1946). Nos 28 (vinte e oito) testes restantes ocorreram condições hidráulicas de aquíferos livres, semilivres e semiconfinados, indicativas de contribuições externas por fluxos verticais que somente puderam ser descritas através do método de Neuman (1975).

Assim sendo, todas as referências feitas a parâmetros hidráulicos de condutividade hidráulica (4,53 m/dia), coeficiente de armazenamento ($2,17 \cdot 10^{-4}$) e porosidade efetiva (0,13) se aplicam aos que foram avaliados pelo método de Neuman (1975), tanto para as estimativas de reservas quanto para o modelo numérico de fluxo.

4.7 – Reservas

A avaliação das reservas foi feita seguindo as diretrizes estabelecidas no documento intitulado: Conjuntura dos Recursos Hídricos do Brasil (ANA, 2013).

Recarga Reguladora ou Recarga Potencial Direta (RPD)

A RPD corresponde à parcela da precipitação pluviométrica média anual que infiltra e efetivamente alcança os aquíferos livres, constituindo assim a reserva renovável ou reguladora (ANA, 2013). Na estimativa dessa reserva são levados em consideração: variação sazonal de nível freático, valor médio registrado nas duas campanhas de amostragem (abril e outubro de 2012), área do SAAB de $2,0 \cdot 10^6$ km² e porosidade efetiva igual a 0,13.

A RPD obtida foi de 626 km³/ano ou 313 mm/ano. Este valor é realmente uma recarga potencial, pois conforme sugere o resultado da modelagem, após

alcançar o freático ela retorna aos rios, ou seja, é restituída para a rede hidrográfica composta de igarapés e de rios de médio e grande porte sem participar da vazão de escoamento natural do SAAB.

Reserva Potencial Explotável Estimada (RPE)

A reserva potencial explotável é dada pelo produto da recarga potencial direta pelo coeficiente de sustentabilidade (CS), que no caso do SAAB na PHA no Brasil é igual a 0,4 (ANA, 2013). A RPE obtida para o SAAB foi igual a 250 km³/ano.

Reserva Permanente

O SAAB foi concebido como um grande sistema de águas subterrâneas livres e, portanto, o modelo numérico de fluxo não contempla reservas sob pressão e a sua reserva permanente corresponde à reserva de saturação.

O bloco 3D do SAAB e seu respectivo volume usado para a estimativa da Reserva Permanente podem ser observados na **figura 4.20**.

A Reserva Permanente do SAAB igual a 123.838 km³ foi obtida a partir do volume do bloco 3D (0,9526.10⁶ km³) e da porosidade efetiva média (S_y) de 0,13.

4.8 – Situação da Explotação dos Aquíferos na PHA no Brasil

Para avaliar a situação da explotação de água subterrânea na PHA no Brasil foram realizadas consultas nos anos de 2014 e 2015 ao Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) por aquífero ou unidade hidrogeológica de fluxo (UHF).

A pesquisa indicou a ocorrência de 13.759 poços catalogados, dos quais 6.465 possuem vazão informada e apenas 412 tem regime de bombeamento informado (horas por dia, dias por semana e meses por ano). Importante ressaltar que os poços com vazão informada não coincidem com os poços de regime de bombeamento informado.

Sendo assim, tornou-se necessário o preenchimento das lacunas referentes às vazões. Para tanto, inicialmente analisou-se estatisticamente a série de vazões, onde se obteve média igual a 6 m³/h, média amostral da distribuição de 11,28 m³/h, moda igual a 2 m³/h e média aritmética dos dados de 16,1 m³/h.

Os dados amostrais de vazão foram ajustados mediante aplicação de equação exponencial, onde o valor mais representativo para o preenchimento da lacuna de vazões foi a média amostral da distribuição (11,28 m³/h).

Importante destacar que as informações no SIAGAS acerca da situação do funcionamento dos poços é bastante precária, não sendo identificadas as unidades que estão bombeando, paralisadas, abandonadas ou desativadas. Desse modo, para fins de preenchimento das lacunas das vazões, considerou-se que todos os poços estão bombeando. Vale ressaltar que tal premissa não superestima a disponibilidade, pois os dados catalogados são em quantidade inferior aos poços efetivamente existentes.

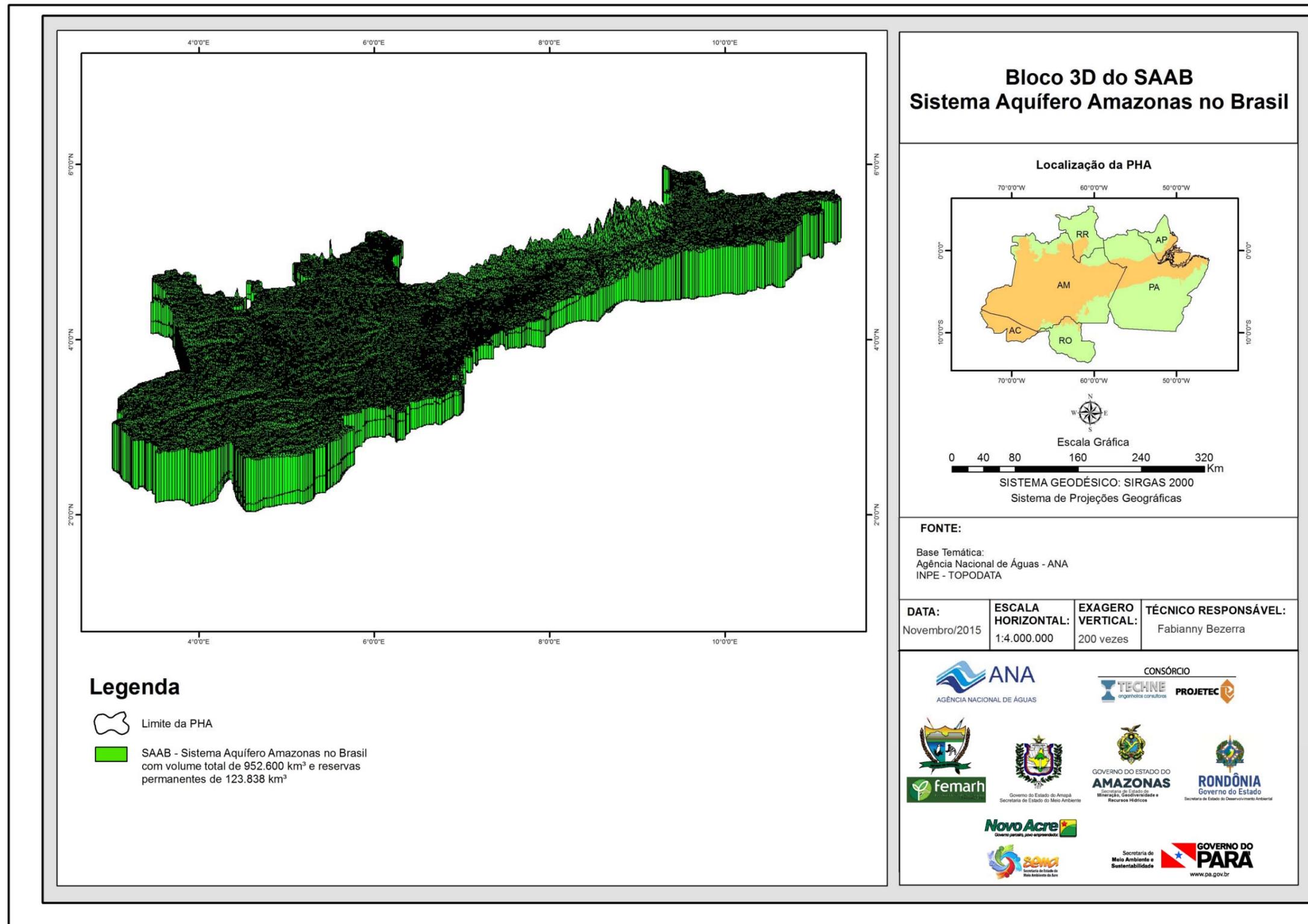


Figura 4.20 – Bloco 3D do SAAB – Sistema Aquífero Amazonas no Brasil, com indicação do seu volume e reserva permanente.

Para o preenchimento das lacunas referentes às horas de bombeamento foi analisada estatisticamente a distribuição de frequência dos 412 regimes de bombeamento informados (horas anuais de bombeamento), onde se obteve mediana igual a 504 horas anuais, média da distribuição de 2.730,6 horas anuais, moda de 750 horas anuais, média aritmética de 1.466,95 horas anuais e 76% dos valores ficam compreendidos entre 500 e 3.500 horas anuais.

Os dados amostrais do regime de bombeamento foram ajustados mediante aplicação de equação exponencial, onde o valor mais representativo para o preenchimento de lacuna foi a média da distribuição (2.730,6 horas anuais).

Após as etapas de análise estatística dos dados dos poços e preenchimento de lacunas de vazões e de regime de bombeamento foram realizados o estudo da produção geral dos poços, onde se observou a **Produção Efetiva** (PE) de 0,6 km³/ano e a **Produção Potencial** (PP) de 1,95 km³/ano.

Produtividade dos Poços

O Mapa Hidrogeológico do Brasil ao Milionésimo (CPRM, 2014) é mostrado na **figura 4.21**, na qual se destaca a Província Hidrogeológica Amazonas (PHA) no Brasil e a correspondente articulação das 15 (quinze) folhas ao milionésimo que a recobrem.

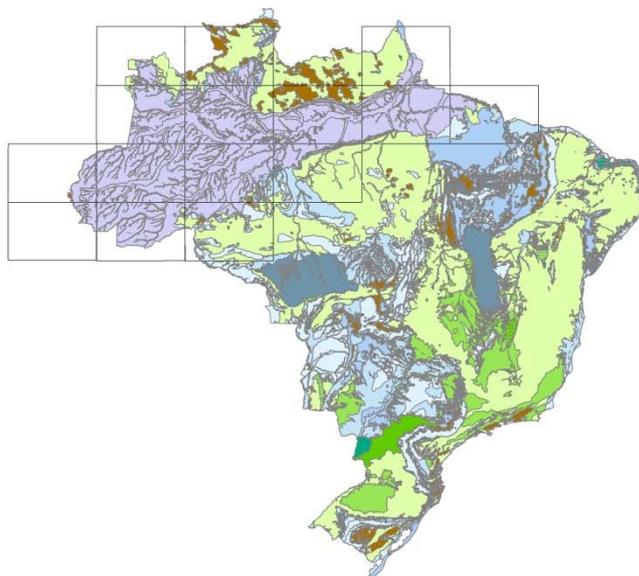


Figura 4.21 - Mapa Hidrogeológico do Brasil ao Milionésimo com o índice das folhas e limite da PHA no Brasil. Fonte: CPRM, 2014.

Esse mapa, usando classificação modificada de Struckmeier & Margat (1995), apresenta uma caracterização das águas subterrâneas definindo 06 (seis) classes de **produtividade de aquífero**, definida como igual à produtividade de poços (capacidade específica - Q/s) nos aquíferos granulares e como igual à vazão dos poços, nos aquíferos fraturados e cársticos:

- Classe 1 – Muito alta – fornecimento de água de importância regional e nacional ($Q/s > 4,0 \text{ m}^3/\text{h/m}$);
- Classe 2 – Alta – de importância regional dentro da média nacional de bons aquíferos ($2,0 \leq Q/s < 4,0 \text{ m}^3/\text{h/m}$);

- Classe 3 – Moderada – de importância local ($1,0 \leq Q/s < 2,0 \text{ m}^3/\text{h/m}$);
- Classe 4 – Geralmente baixa e localmente moderada ($0,4 \leq Q/s < 1,0 \text{ m}^3/\text{h/m}$);
- Classe 5 – Geralmente muito baixa e localmente baixa ($0,04 \leq Q/s < 0,4 \text{ m}^3/\text{h/m}$);
- Classe 6 – Pouco produtiva ou não aquífera ($Q/s < 0,04 \text{ m}^3/\text{h/m}$).

Para os aquíferos granulares da PHA no Brasil, a classificação de produtividade de aquífero baseada em capacidade específica de poços sem conhecimento da condutividade hidráulica não é satisfatória como indicadora de potencialidade dos aquíferos na escala 1:1.000.000. Sendo assim, realizou-se consulta aos dados do SIAGAS em setembro de 2015, de modo a avaliar a potencialidade dos aquíferos. A consulta indicou a existência de 14.476 poços catalogados, dentre os quais, 1.528 (11%) sem aquífero informado, e a ocorrência irregular da distribuição dos poços por folha ao milionésimo, o que fornece conhecimento hidrogeológico extremamente localizado, como destaca a **tabela 4.6**.

Tabela 4.6 – Distribuição por folha ao milionésimo dos 14.676 poços catalogados do SIAGAS em setembro de 2015 na PHA no Brasil.

Folha	Nome	Número de poços	Aquífero não informado	Aquífero informado
NA-19	PICO DA NEBLINA	03	-	03
NA-20	BOA VISTA	08	-	08
NA-22	MACAPÁ	41	-	41
SC-18	CONTAMANA	14	14	-
SC-20	PORTO VELHO	720	655	65
SA-22	BELÉM	2.587	200	2.387
SA-20	MANAUS	3.950	3	3.947
SB-20	PURUS	521	-	521
SA-21	SANTARÉM	3.764	27	3.737
SA-23	SÃO LUÍS	1.312	88	1.224
SA-19	IÇÁ	152	-	152
SB-18	JAVARI	535	121	414
SB-19	JURUÁ	265	-	265
SC-19	RIO BRANCO	632	383	249
SB-21	TAPAJÓS	172	37	135
TOTAL		14.676	1.528	13.148

Os valores de produtividade média dos poços em 14 (quatorze) unidades litoestratigráficas (ULs) dos aquíferos estudados na PHA no Brasil podem ser observados na **tabela 4.7**. A Formação Alter do Chão, com uma capacidade específica média de $1,6 \text{ m}^3/\text{h/m}$ pertence à classe 3 – Produtividade Moderada; enquanto que a Formação Faro, do Paleozoico aflorante, aparece na classe 2 - Produtividade alta, o que provavelmente se deve à diferença de tamanho das amostras, como sugere o erro padrão de $0,1 \text{ m}^3/\text{h/m}$ para a Formação Alter do Chão (com 3.201 valores) e de $0,9 \text{ m}^3/\text{h/m}$ para a Formação Faro (com apenas

3 valores). Aliado a isso, a profundidade média de apenas 85 m na Formação Alter do Chão, que muito provavelmente corresponde à situação desse aquífero na cidade de Manaus, ou seja, reflete uma condição local.

Em escala regional, os dados obtidos de 86 poços estratigráficos do BDEP mostram que a espessura do aquífero Alter do Chão varia de 22 a 1.244 m, com média de 380 m e possui um percentual de areia que varia de 31,1 a 98,1%.

Tabela 4.7 – Capacidade específica (produtividade) média de poços da PHA no Brasil segundo dados catalogados do SIAGAS em setembro de 2015.

Unidade Litoestratigráfica (UL)	Média Q/s (m ³ /h/m)	N válidos	Erro padrão	Classe	Produtividade de Poços*
Formação Pirabas	7,2	393	0,9	1	Muito alta
Aluviões	4,4	248	0,5	1	Muito alta
Formação Tucunaré	3,8	37	0,4	2	Alta
Formação Barreiras	3,3	1.443	0,2	2	Alta
Formação Faro	3,3	3	0,9	2	Alta
Formação Içá	3,1	248	0,3	2	Alta
Formação Alter do Chão	1,6	3.201	0,1	3	Moderada
Formação Monte Alegre	1,4	23	0,3	3	Moderada
Formação Nova Olinda	1,3	10	0,4	3	Moderada
Grupo Urupadi	1,3	6	0,4	3	Moderada
Formação Itaituba	1,1	66	0,1	3	Moderada
Paleozoico aflorante (indiferenciado)	1,1	153	0,1	3	Moderada
Grupo Curuá	0,9	10	0,2	4	Geralmente baixa (localmente moderada)
Grupo Trombetas	0,5	33	0,1	4	Geralmente baixa (localmente moderada)

* Produtividade de aquífero (CPRM, 2014).

As ULs do Paleozoico aflorante ficam restritas a uma superfície de 3,4% da PHA e nelas as espessuras médias de camadas aquíferas foram deduzidas das profundidades médias apresentadas na **tabela 4.8**. Admite-se que as ULs são granulares e somente aquelas com percentual médio de arenito superior a 50% são classificadas como aquíferos, enquanto que as demais são consideradas aquíferos.

Essas profundidades são quase desprezíveis em relação às espessuras máximas indicadas para as UHF's nas cartas crono e litoestratigráficas das bacias sedimentares da PHA, condensadas na **figura 4.22**. Como a potencialidade foi avaliada com base na transmissividade, as espessuras foram ajustadas com base na geologia desenvolvida no âmbito do projeto e dos dados dos poços estratigráficos do BDEP, como apresentado na **tabela 4.9**.

Diante desses motivos, ao invés de 6 (seis) classes de *produtividade de aquífero*, no âmbito desse projeto serão utilizadas 4 (quatro) classes de *potencialidade de aquífero*: *muito alta*, *alta*, *média* e *baixa*, baseada na transmissividade e nas áreas de ocorrência dos aquíferos.

Tabela 4.8 – Profundidade média dos poços catalogados do SIAGAS/CPRM 2015.

Unidade Hidrogeológica de Fluxo (UHF)	Profundidade média dos poços (m)	Mínima (m)	Máxima (m)	N válidos
Aquífero Aluvial	22	0,1	183,5	624
Aquífero Içá	41	0,8	130	1.644
Aquífero Alter do Chão	85	0,9	280	6.849
Aquífero Barreiras	35	7,6	276	2.092
Aquífero Pirabas	123	11	310	498
Aquitardo Solimões	26	1	240	480
Aquífero Tucunará	62	16	160	37
Aquitardo Paleozoico aflorante	62	0,5	364	355
Aquífero Trombetas	52	0,5	364	202
Aquífero Urupadi	160	28	277	12
Aquitardo Curuá	129	35	230	18
Aquífero Monte Alegre	75	32	258	28
Aquitardo Itaituba	59	11	280	68
Aquífero Base Nova Olinda	85	28	258	11

Tabela 4.9 – Espessuras dos aquíferos da PHA no Brasil.

Unidade Hidrogeológica de Fluxo (UHF)	Média (m)	Mínima (m)	Máxima (m)
Aquífero Aluvial	22	10	183
Aquífero Içá	100	20	150
Aquífero Tucunará	300	16	600
Aquífero Alter do Chão-Jazida da Fazendinha	450	22	1.530
Sistema Barreiras-Pirabas	200	10	1.010
Aquífero Javari	400	100	1.000
Aquífero Trombetas	155	10	364
Aquífero Monte Alegre	142	32	258
Aquífero Base Nova Olinda	194	28	258

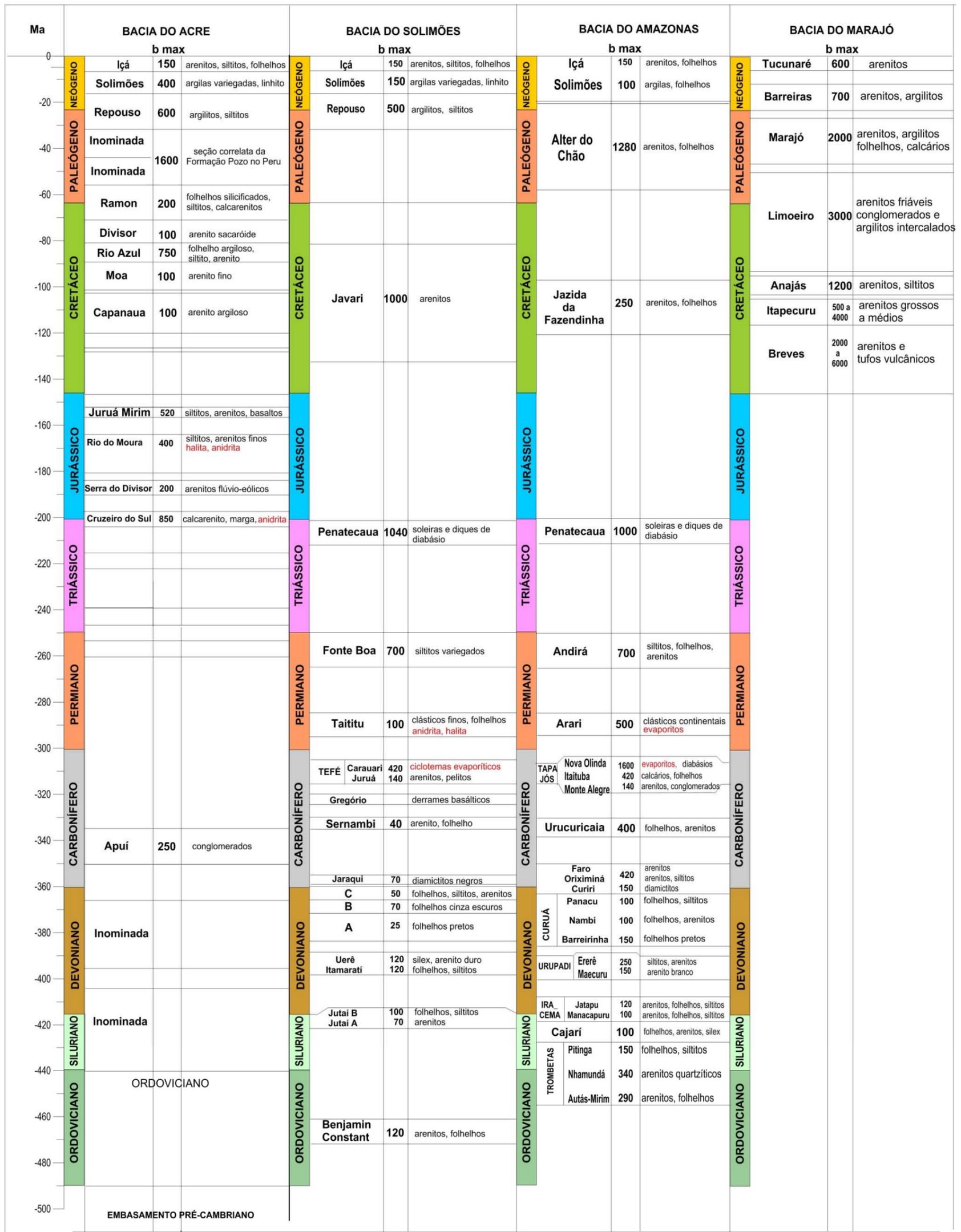


Figura 4.22 – Espessuras máximas das unidades hidrogeológicas de fluxo (UHF) da Província Hidrogeológica Amazonas no Brasil.

Potencialidade dos Aquíferos

No âmbito desse projeto foram adotadas as seguintes denominações e conceitos:

- *Aquífero*: unidade litoestratigráfica permeável capaz de armazenar e de transmitir quantidades significativas de água subterrânea para aproveitamento;
- *Aquitardo*: unidade litoestratigráfica semipermeável capaz de armazenar e de transmitir quantidades pouco significativas de água subterrânea para aproveitamento;
- *Aquiclude*: unidade litoestratigráfica pouco permeável capaz de armazenar e de transmitir apenas quantidades insignificantes de água subterrânea para aproveitamento.

Importante destacar que diante das definições ora apresentadas, não foi levado em consideração à avaliação de potencialidade para aquíferos e nem para aquícludes, mas somente para aquíferos, pois são as únicas unidades litoestratigráficas capazes de fornecer quantidades significativas de água para aproveitamento. Neste sentido, todos aquíferos e aquícludes são definidos no âmbito desse projeto como de baixa potencialidade, independente de qualquer outra característica.

Conforme explicado anteriormente, a classificação da produtividade dos aquíferos no âmbito do projeto foi dividida em 04 (quatro) classes:

- *Potencialidade muito alta* $\Rightarrow Pot > 1.000 \text{ km}^3/\text{ano}$;
- *Potencialidade alta* $\Rightarrow 100 \leq Pot < 1.000 \text{ km}^3/\text{ano}$;
- *Potencialidade média* $\Rightarrow 10 \leq Pot < 100 \text{ km}^3/\text{ano}$;
- *Potencialidade baixa* $\Rightarrow Pot < 10 \text{ km}^3/\text{ano}$.

Para a estimativa da potencialidade do SAAB (**tabela 4.10**), inicialmente obteve-se os dados de condutividade hidráulica nos testes dos aquíferos Aluvial, Içá, Tucunaré, Alter do Chão-Jazida da Fazendinha e Barreiras-Pirabas. Posteriormente, estimou-se a transmissividade do aquífero, usando os dados de condutividade hidráulica e espessura do aquífero livre. Para os aquíferos do Paleozoico aflorante (Trombetas, Monte Alegre e Base Nova Olinda) como não se dispõe de informações sobre parâmetros hidráulicos foi possível estimar as transmissividades desses aquíferos a partir do conhecimento das capacidades específicas de poços neles perfurados (**tabela 4.7**).

A potencialidade das formações cretácicas Moa (731 km²) e Ramon (1.131 km²), aflorantes na Serra do Divisor na bacia do Acre, não constam na **tabela 4.10** pelo fato de não existirem poços cadastrados nessas formações e também de não se dispor de valores de transmissividade. Devido, porém, às reduzidas dimensões das suas áreas de afloramento, a sua potencialidade é considerada baixa. Além disso, elas não fazem parte do SAAB porque estão em repouso sobre o embasamento cristalino numa região divisória de águas que escoam para oeste em direção ao Peru.

Tabela 4.10 – Potencialidade dos aquíferos da PHA e do Sistema Aquífero Amazonas no Brasil (SAAB).

Unidade Hidrogeológica de Fluxo (UHF)	K (m/dia)	Espessura média (m)	(Q/s)* (m ³ /h/m)	T (m ² /dia)	T (km ² /ano)	Área (km ²)	Largura média (km)	Potencialidade (km ³ /ano)	Classe
Aquífero Aluvial	0,79	22	-	17	6,34E-03	318.394	564	4	Média
Aquífero Tucunaré	6,05	226	-	1.367	4,99E-01	77.779	279	139	Alta
Aquífero Alter do Chão- Jazida da Fazendinha	14,99	265	-	3.972	1,45E+00	552.155	743	1077	Muito Alta
Sistema Barreiras-Pirabas	7,9	200	-	1.580	5,77E-01	88.608	298	172	Alta
Aquífero Içá	1,01	100	-	101	3,69E-02	724.420	851	31	Média
Aquífero Javari	14,99	124	-	1.859	6,78E-01	787.642	887	602	Alta
Aquífero Trombetas	0,41	155	0,55	64	2,32E-02	19.779	141	3	Baixa
Aquífero Monte Alegre	3,19	142	2,8	453	1,65E-01	3.040	55	9	Baixa
Aquífero Base Nova Olinda	1,5	194	1,32	291	1,06E-01	11.037	105	11	Baixa
SAAB	-	-	-	-	-	-	-	2.049	Muito Alta

* K = condutividade hidráulica; Q/s = capacidade específica de poços; T = transmissividade; A espessura média adotada para estimativa da potencialidade do SAAB não foi a que consta na tabela 1.45, mas sim a espessura média deduzida da diferença entre as superfícies de topo e base do SAAB.

Considerações Finais

As reservas permanentes do SAAB, a RPD e a RPE apresentadas na **tabela 4.11**, foram avaliadas para o conjunto dos aquíferos com uma porosidade efetiva de 13%.

Tabela 4.11 – Síntese da avaliação dos recursos hídricos subterrâneos da PHA no Brasil.

Reservas permanentes do SAAB	Saturação (km ³)	123.838,00
Produção dos Poços	Efetiva (km ³ /ano)	0,60
	Potencial (km ³ /ano)	1,95
Potencialidade do SAAB		2.049,00
Recarga Potencial Direta - RPD (km ³ /ano)		626,00
Reserva Potencial Explotável - RPE (km ³ /ano)		250,00

A produção efetiva de poços na PHA no Brasil (0,6 km³/ano) representa apenas 0,34% da RPE. Mesmo que a produção efetiva na PHA no Brasil fosse dez vezes maior que o número aqui avaliado, ela representaria apenas 3,4% da RPE, isto é, da reserva potencial explotável do SAAB.

A produção potencial (24/24 h) é 3,25 vezes maior que a produção efetiva estimada, enquanto que a potencialidade do SAAB é 3.415 vezes maior do que a produção efetiva. Isso traduz o fato de que um grande número dentre os poços cadastrados é constituído de poços domésticos que funcionam poucas horas por dia.

Os valores obtidos para a produção efetiva devem ser considerados como mínimos e muito aquém da realidade, pois acredita-se que as produções reais são muito maiores, pois muitos poços existentes nas capitais da PHA no Brasil não estão registrados no SIAGAS.

Pelos dados do SIAGAS têm-se na PHA no Brasil no ano de 2015 14.676 poços, numa área de 2x10⁶ km². Isso nos dá uma densidade de 0,007 poços/km², compreensivelmente baixa em função das imensas áreas desabitadas e da desatualização do banco de dados da CPRM, principalmente nas áreas urbanas, onde a concentração de poços é maior.

4.9 – Modelagem Numérica de Fluxo na PHA no Brasil

A modelagem numérica do fluxo de água subterrânea é hoje reconhecida como uma ferramenta de grande relevância para a caracterização do fluxo subterrâneo, tanto em escala regional quanto local, servindo, portanto, de suporte à tomada de decisões na gestão de aquíferos.

No caso do projeto PHA no Brasil, por tratar-se de uma avaliação regional, com cerca de 2 milhões de km² e sem dados de monitoramento, optou-se por uma modelagem extremamente simples, tendo como objetivos estimar e reproduzir a potenciometria do SAAB em regime permanente para inclusão no Mapa Hidrogeológico da Província Hidrogeológica Amazonas no Brasil, na escala 1:1.000.000.

Em relação à recarga convém destacar algumas considerações e conclusões de estudos recentes realizados em várias partes do mundo sobre os fatores mais influentes na sua quantificação, usando modelagem unidimensional na zona de aeração. Em perfis litológicos de solos mais arenosos, que são mais permeáveis, a água infiltrada da chuva atinge o nível estático relativamente

rápido durante os eventos de precipitação, todavia, em perfis de solos com distribuição litológica mais complexa, marcada pela alternância de camadas argilosas e arenosas, maior quantidade de água é transpirada pela vegetação após eventos de chuva, reduzindo assim a recarga. Esse controle da vegetação é confirmado pelo fato de que em regiões simuladas sem vegetação a correlação entre chuva e infiltração é virtualmente a mesma em todos os perfis litológicos de solos. Em síntese, nos modelos de recarga os parâmetros e os processos mais sensíveis dependem das características físicas do sistema, que são sempre incertas.

Essa é uma das razões pelas quais se justifica no modelo conceitual do SAAB, no projeto ANA-PHA no Brasil, a hipótese de um sistema aquífero regionalmente livre, composto de uma única camada, em um meio que na verdade se constitui de inúmeras unidades litológicas superpostas e descontínuas, porém passíveis de comunicação hidráulica através de caminhos preferenciais de fluxo ou de processos complexos que controlam a recarga.

Taxas negativas de recarga ocorrem tipicamente em simulações nas quais as profundidades das raízes das plantas ficam próximas da zona de saturação. Mesmo para níveis estáticos mais profundos, a recarga ainda se revela praticamente nula para outros tipos de vegetação. Tal premissa é compatível com as condições da PHA no Brasil, pois fatores como clima, cobertura vegetal e profundidade do nível estático e das raízes das plantas e, sobretudo, os afluxos externos de águas superficiais provenientes de 2/3 da bacia hidrográfica do rio Amazonas, desempenham um papel importante na recarga, que não pode ser interpretada como unicamente resultante de infiltrações pluviométricas.

Na construção do modelo numérico do SAAB na PHA foi utilizado o *software* MODFLOW-2000 (McDonald & Harbaugh, 1984; Harbaugh *et al.*, 2000), com interface do *GMS (Groundwater Modeling System)* que, por sua vez, contém interface para um modelo de inversão chamado *PEST (Parameter Estimation)* que permite a estimativa de parâmetros no processo de calibração (Doherty, 2004).

A área modelada possui uma superfície de $2,0 \times 10^6$ km², localizada no interior de um retângulo cujo lado maior está alinhado na direção Leste-Oeste, limitado entre os meridianos de 45°W e 75°W, com cerca de 3.300 km e entre os paralelos de 3°N e 12°S com aproximadamente 1.650 km, na direção Norte-Sul. Para a realização da modelagem a área do modelo foi discretizada em 120 x 60 células regulares de 15 minutos de lado e com apenas uma unidade hidrogeológica de fluxo (UHF) representativa do SAAB, como ilustrado na **figura 4.23**.

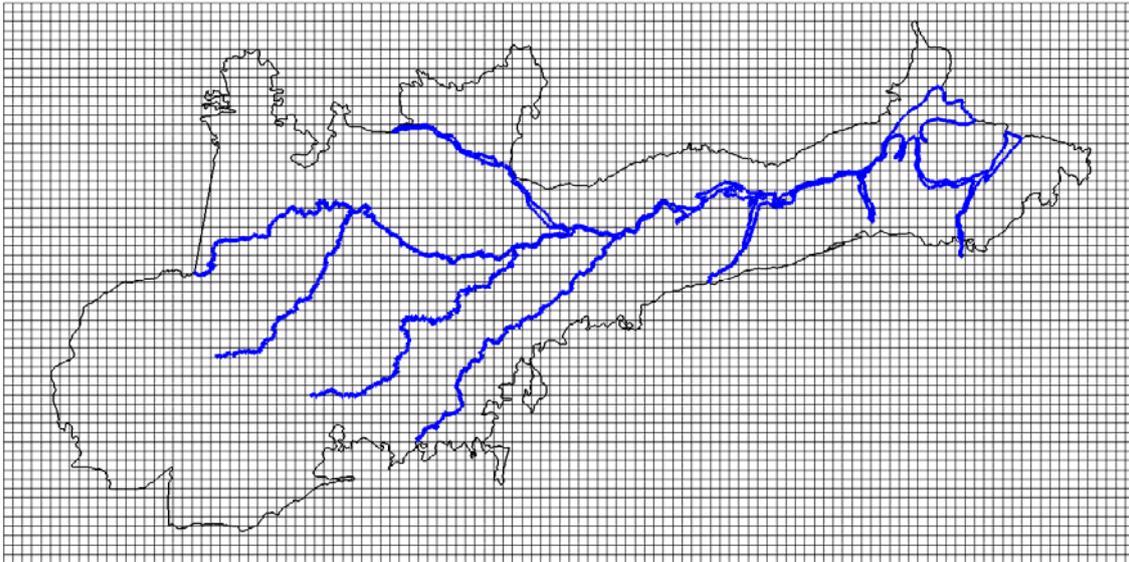


Figura 4.23 – Discretização da área do modelo numa malha de 7.200 (120 x 60) células regulares de 15" x 15", com apenas uma unidade hidrogeológica de fluxo (UHF), que representa o SAAB.

Das 7.200 células da área total do modelo, apenas 2.493 (**figura 4.24**) se encontram no interior do domínio da PHA e constituem as células ativas. Na escolha dessa malha, cada célula possui dimensão de 15 minutos x 15 minutos (cerca de 750 km²) correspondente ao tamanho de uma folha mapeada no âmbito do Projeto ANA-PHA, nas cidades pilotos, na escala de 1:50.000. Essa escolha faz sentido, haja vista que, em relação à área do modelo, cada célula representa tão somente 0,04% da mesma. É, portanto, uma discretização que se pode considerar apropriada para a escala da PHA, principalmente quando a informação disponível dos poços estratigráficos do BDEP corresponde a 1 poço para cada 10.695 km².

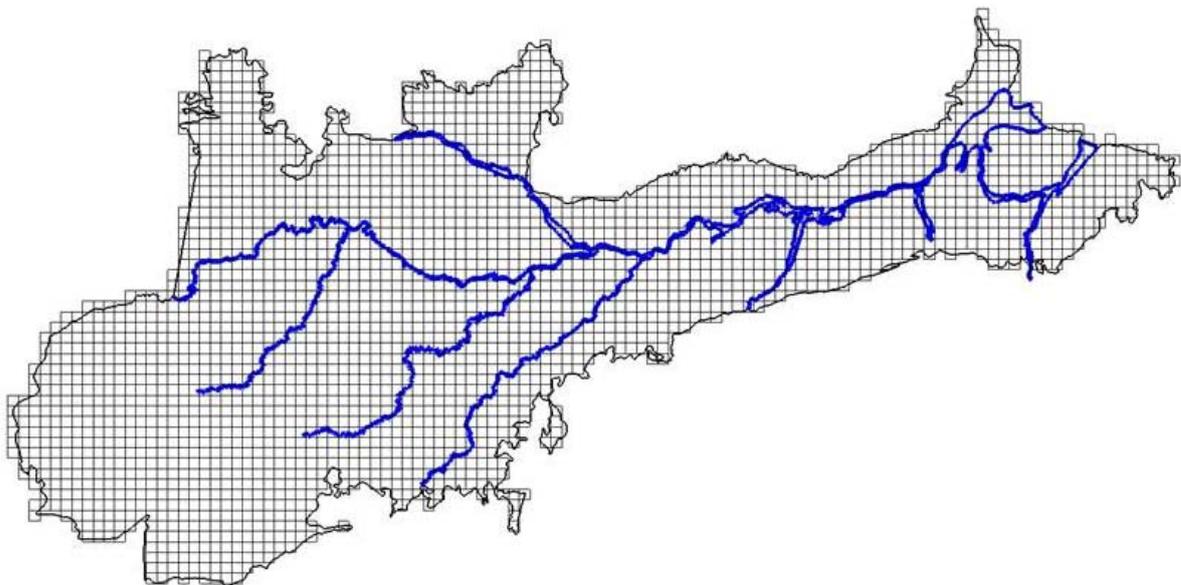


Figura 4.24 – Discretização do contorno da PHA com 2.493 células ativas.

Condições de Contorno

As condições de contorno foram estabelecidas em 03 (três) camadas ou coberturas, conforme se descreve a seguir:

Coberturas Fontes e Sumidouros

Nessa cobertura (**figura 4.25**) são impostos apenas os limites de carga especificada a Leste e a Oeste e os limites impermeáveis ou de fluxo nulo, ao Sul e ao Norte da PHA, considerando apenas uma única camada ou unidade hidrogeológica de fluxo (UHF), representativa do SAAB.

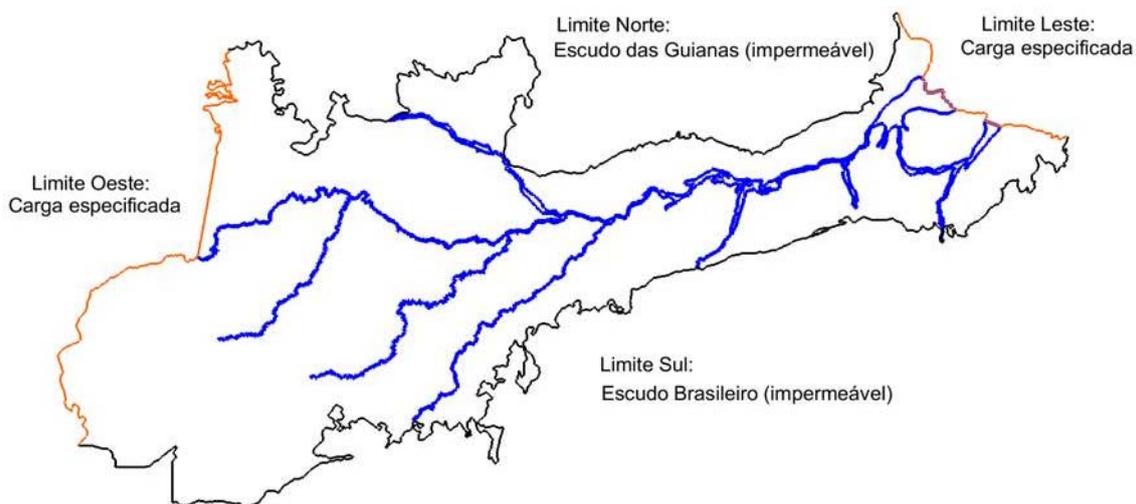


Figura 4.25 – Cobertura fontes e sumidouros constando unicamente das condições de carga especificada (a leste e a oeste) e de fluxo nulo (ao norte e ao sul).

Nenhuma condição de contorno envolvendo fluxos do tipo fonte/sumidouro (por exemplo, rios) ou do tipo sumidouro (por exemplo, poços) foi considerada, porque o modelo conceitual ignora completamente os fluxos dos rios e está focado unicamente nas suas cargas hidráulicas (obtidas a partir do MDT), as quais, em última instância, por hipótese, são interpretadas como “afloramentos” da superfície freática do SAAB. A inclusão de poços, por outro lado, está totalmente fora de cogitação na escala dessa modelagem, cujo objetivo fica restrito à avaliação do comportamento do fluxo subterrâneo, ou seja, à caracterização da potenciométrica da PHA para inclusão no mapa hidrogeológico ao milionésimo do SAAB.

Cobertura Recarga

A cobertura recarga (**figura 4.26**) foi constituída de um único polígono, no qual foi imposta inicialmente uma lâmina de 220 mm/ano, conforme sugerido pelo balanço hídrico da PHA.

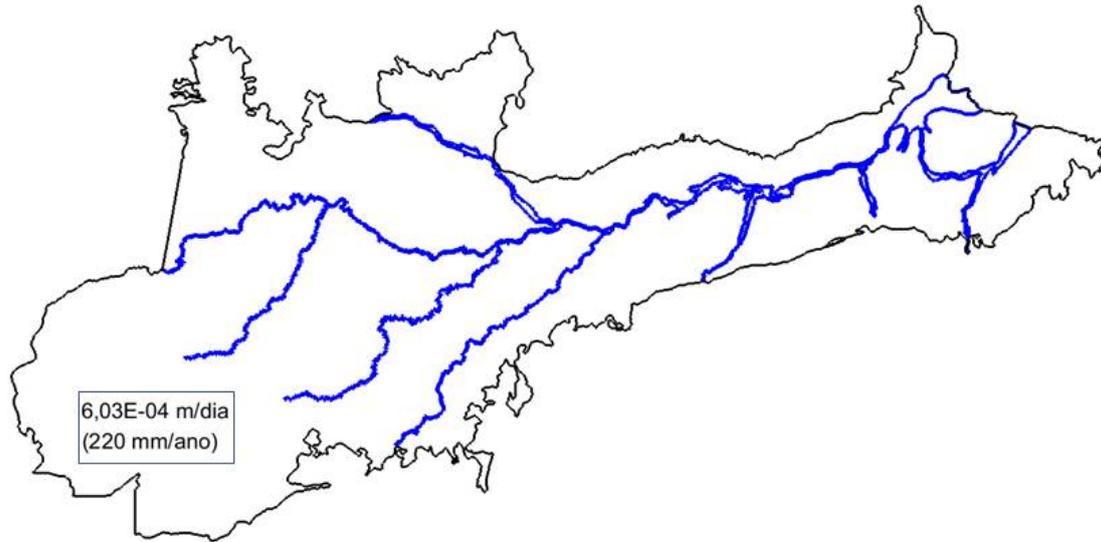


Figura 4.26 – Cobertura de recarga, representada por um único polígono no qual foi imposto um valor inicial correspondente à lâmina média de 220 mm/ano estimada pelo balanço hídrico da PHA.

Cargas Iniciais

As cargas iniciais do modelo são as obtidas no mapa potenciométrico da PHA no Brasil apresentado na **figura 4.28** e que foi elaborado a partir do modelo digital do terreno (**figura 4.27**). Admite-se que esse mapa representa a potencimetria de equilíbrio do SAAB, que deve ser reproduzida pelo modelo de fluxo, em regime permanente. Considerou-se como hipótese de trabalho que a superfície potenciométrica do SAAB é livre e pode ser inferida das cargas dos rios no período de estiagem.

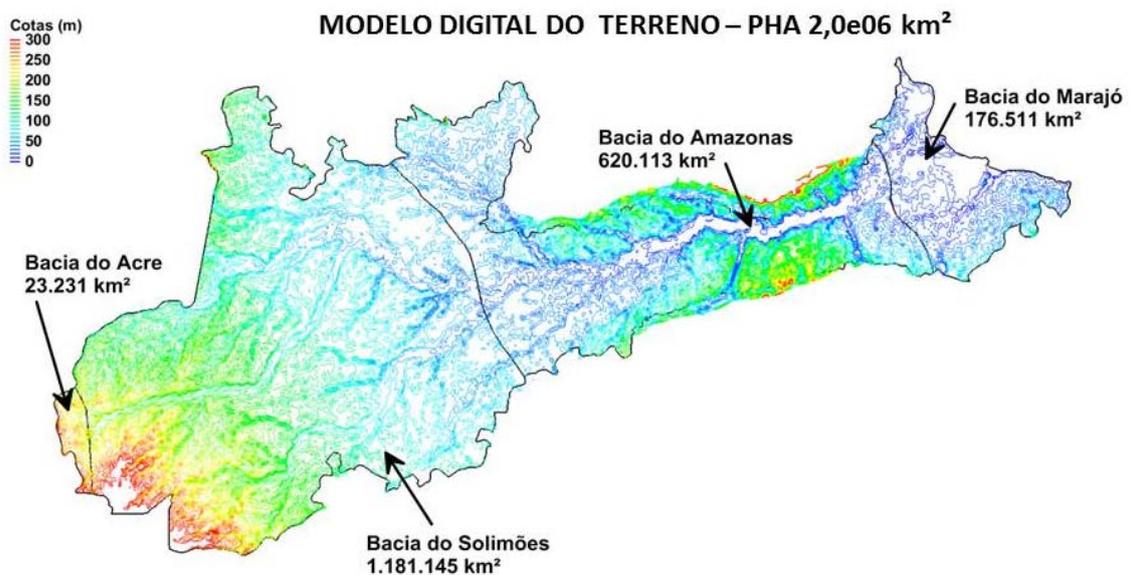


Figura 4.27 – Modelo digital do terreno utilizado para obtenção da potencimetria do SAAB a partir das cotas de nível de água dos aquíferos nas cidades estudadas e dos rios no período de estiagem.

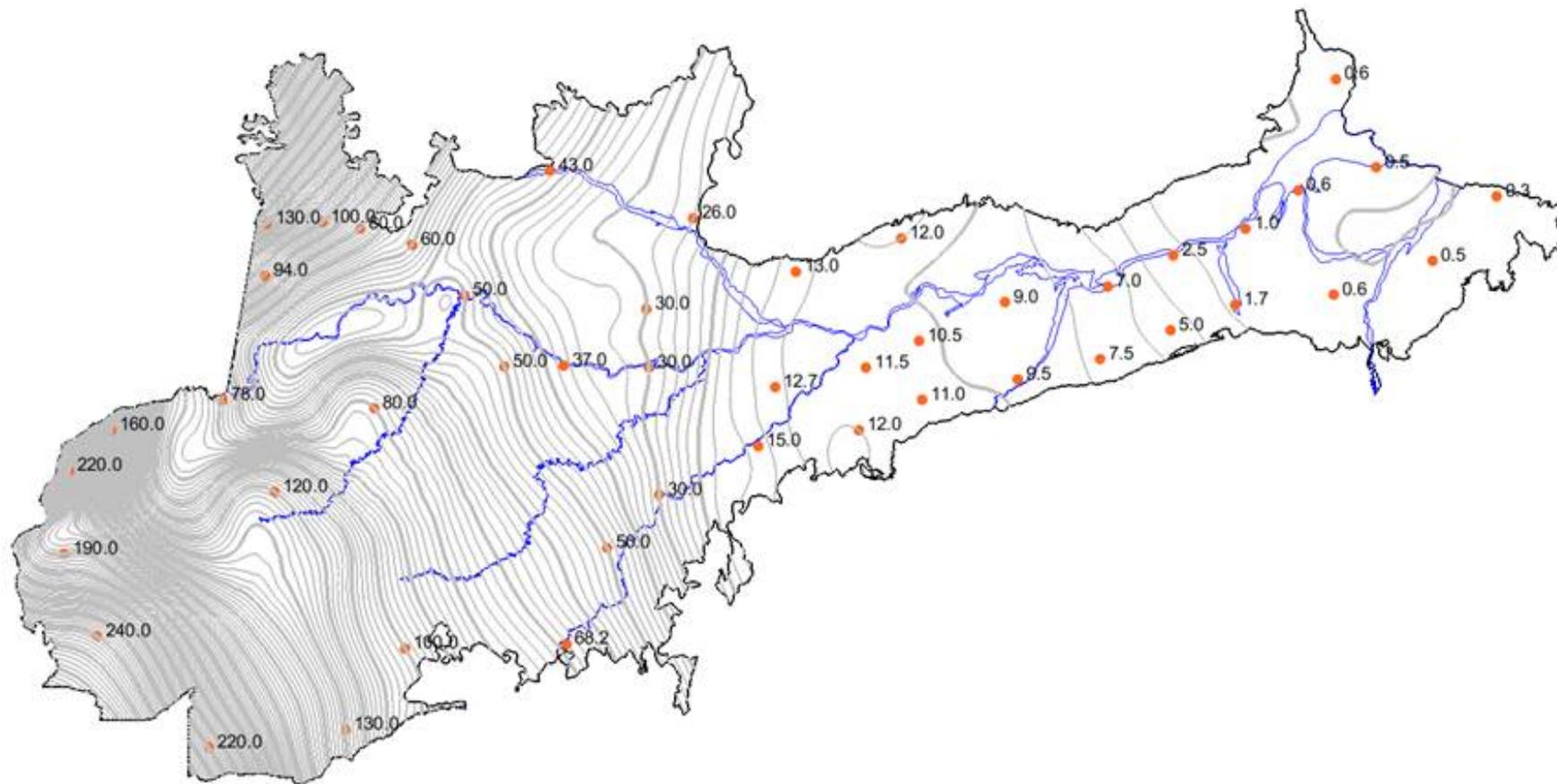


Figura 4.28 – Potenciometria do SAAB obtida a partir do modelo digital do terreno inferindo as cotas dos níveis de água dos aquíferos nas cidades estudadas e dos rios para o período de estiagem.

A distribuição espacial das cargas potenciométricas da superfície freática do SAAB, como se vê na **figura 4.28**, é marcada pela ocorrência de gradientes hidráulicos mais fracos no setor leste e mais fortes no setor oeste. Admite-se que isto decorre da geomorfologia, que engloba o relevo e a litologia das formações aflorantes. De fato, na escala da PHA no Brasil, segundo IBGE (1997), duas grandes unidades geomorfológicas se distinguem: a *Depressão do Baixo Amazonas* e a *Depressão do Solimões*.

Cobertura de Condutividade Hidráulica

Para fins de entrada no modelo, em consonância com os gradientes hidráulicos do mapa de cargas iniciais da **figura 4.28**, foi possível distinguir 4 (quatro) zonas de condutividade hidráulica (K1, K2, K3 e K4). A zona de condutividade hidráulica K1 coincide com a Depressão do Baixo Amazonas, cuja área é de aproximadamente 604.000 km², enquanto que as zonas K2, K3 e K4 se encontram na Depressão do Solimões que cobre uma superfície aproximada de 1.396.000 km².

Os valores médios pontuais de condutividade hidráulica nas 14 (quatorze) cidades, avaliados a partir dos testes de aquífero e os valores médios em cada uma das zonas são indicados na **figura 4.29**.

A condutividade hidráulica média obtida para a zona K1 através dos testes realizados em 5 (cinco) cidades localizadas na Depressão do Baixo Amazonas é igual a 10,37 m/dia, conforme indicado na **tabela 4.12**. Na **tabela 4.13** são mostrados os valores médios de condutividade hidráulica para as zonas K2, K3 e K4, na Depressão do Solimões.

Tabela 4.12 – Valores médios de condutividade hidráulica avaliados em cidades situadas na Depressão do Baixo Amazonas.

Cidade	Condutividade hidráulica (m/dia)				Média
Almeirim	3,18	32,40	2,72	108,72	36,76
Belém	2,21	12,70	3,84	12,88	7,91
Macapá	2,90	9,20	-	-	6,05
Manaus	0,79	0,16	0,17	0,06	0,30
Santarém	0,27	1,38	-	-	0,83
Média na zona K1					10,37

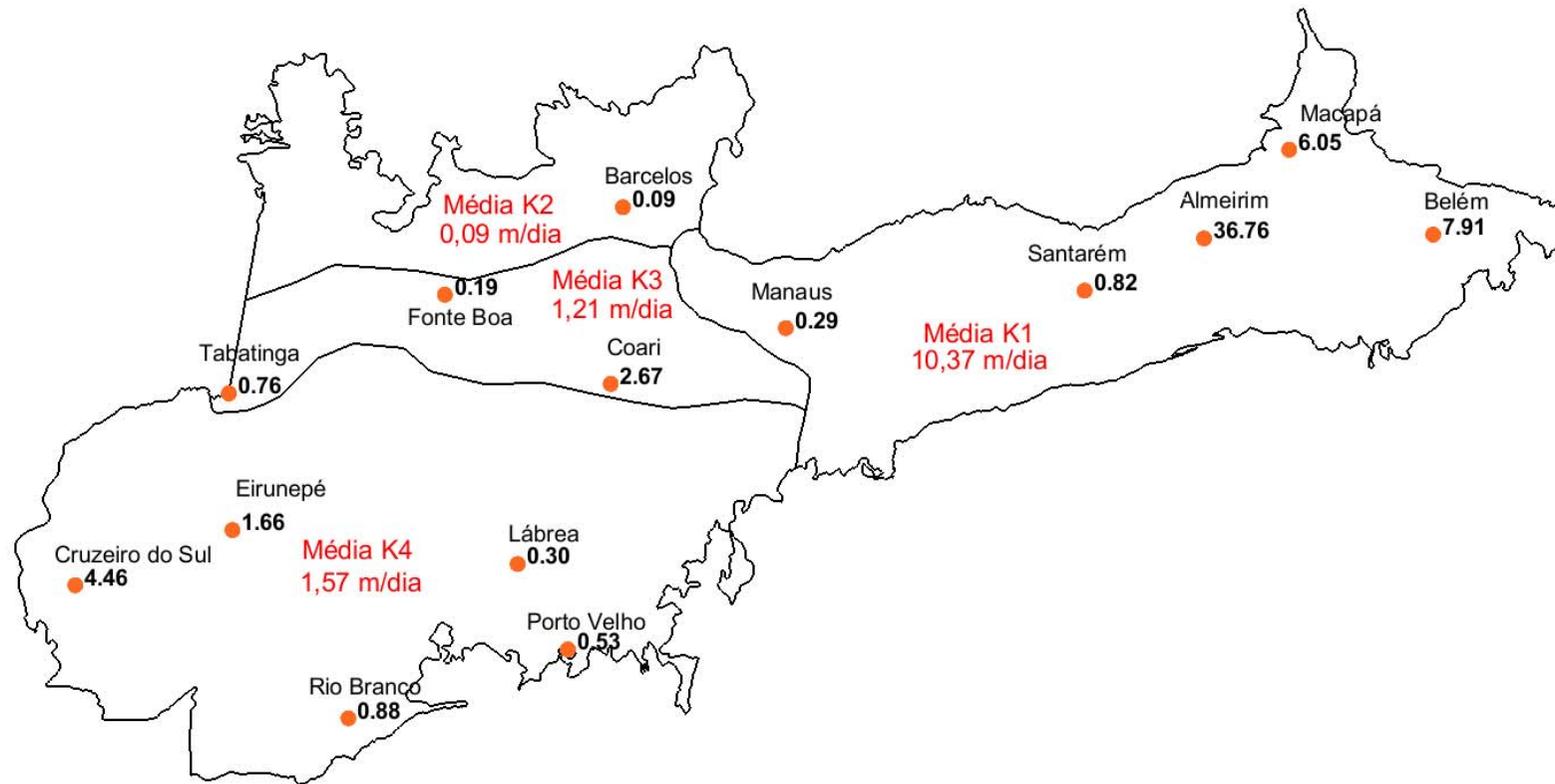


Figura 4.29 – Valores pontuais de condutividade hidráulica, avaliados nos 30 (trinta) testes de aquífero realizados em 14 (quatorze) cidades da PHA pelo método de Neuman (1975).

Tabela 4.13 – Valores médios de condutividade hidráulica obtidos em cidades situadas na Depressão do Solimões.

Cidade	Condutividade hidráulica (m/dia)			Média
Barcelos	0,09	-	-	0,09
Média na Zona K2				0,09
Coari	0,40	4,95	-	2,68
Fonte Boa	0,11	0,26	-	0,19
Tabatinga	0,75	0,77	-	0,76
Média na Zona K3				1,21
Cruzeiro do Sul	0,95	11,48	0,94	4,46
Eirunepé	1,66	-	-	1,66
Lábrea	0,21	0,39	-	0,30
Porto Velho	0,94	0,12	-	0,53
Rio Branco	0,78	0,98	-	0,88
Média na Zona K4				1,57

Solução Manual

Usando o software MODFLOW 2000, inseriram-se os dados de recarga e de condutividade hidráulica para obter através do método de tentativa e erro a distribuição de cargas (**figura 4.31**) e as condutividades hidráulicas (**figura 4.30**). Para tanto, manteve-se constante os dados de recarga e alterou-se a cada tentativa a condutividade hidráulica, sendo realizadas 20 tentativas no total.

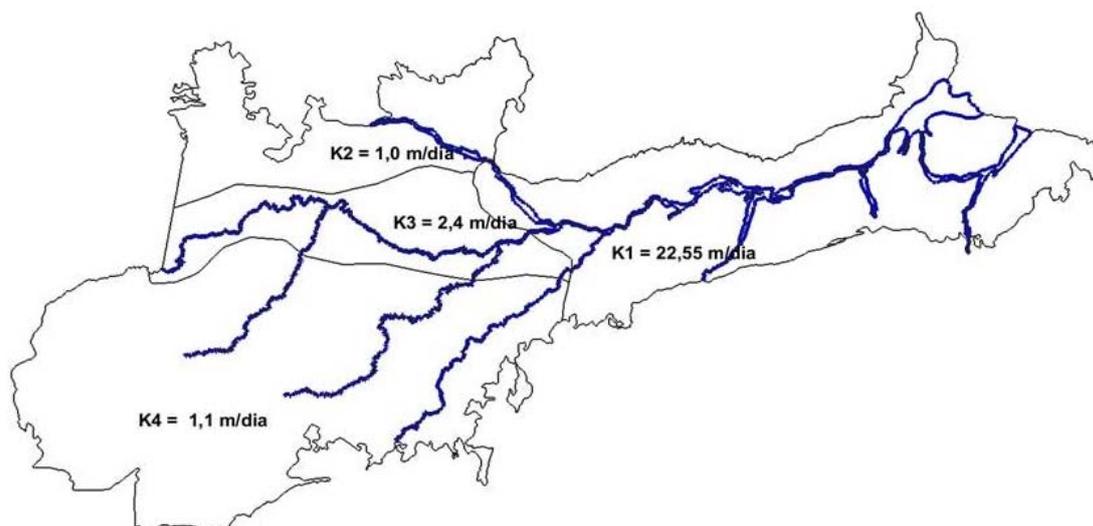


Figura 4.30 – Condutividades hidráulicas obtidas por tentativa e erro na solução inicial usando o MODFLOW e que aproximam a potentiometria do mapa de cargas iniciais inferidas para o período de estiagem a partir do modelo digital do terreno.

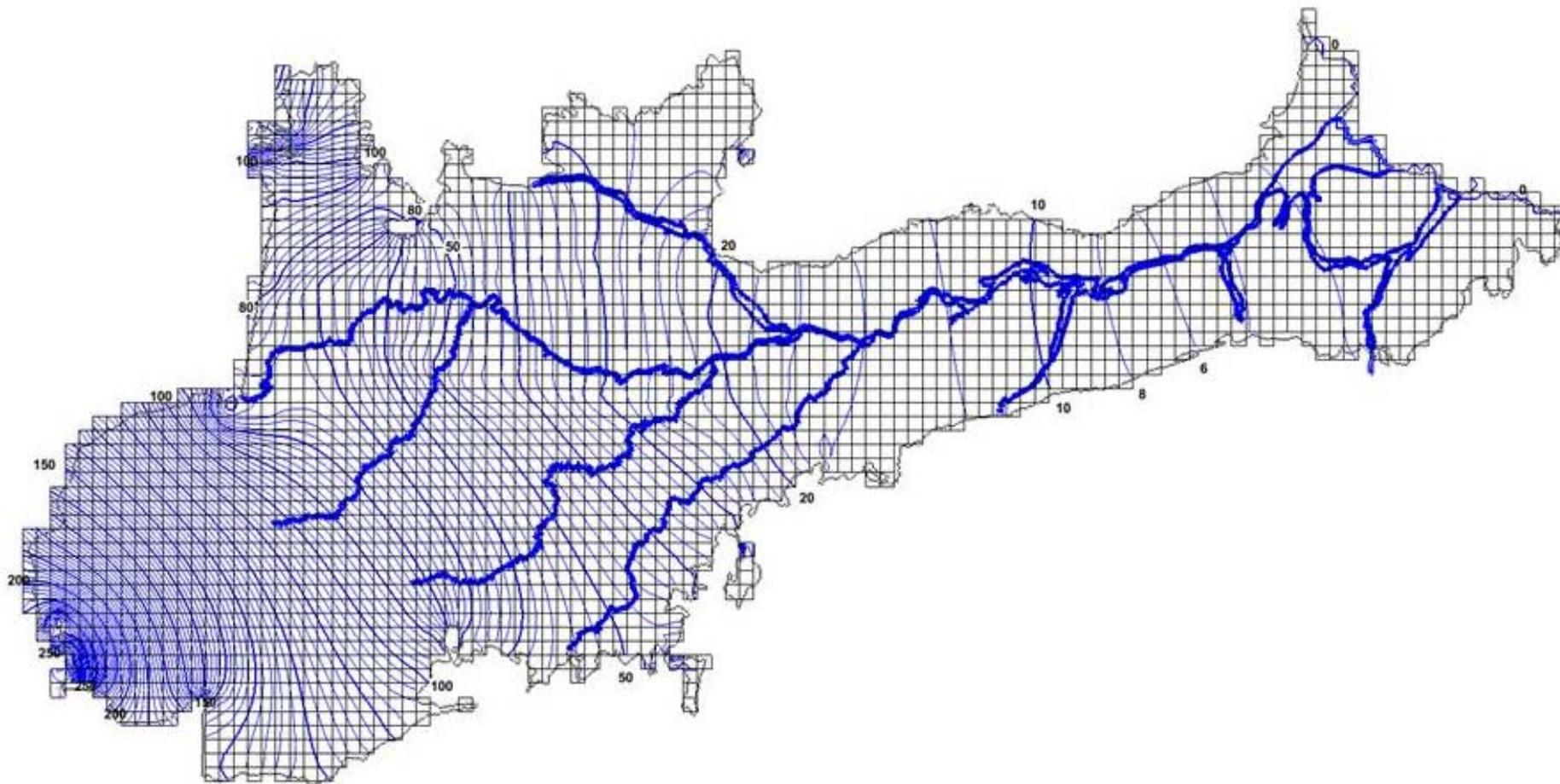


Figura 4.31 – Solução inicial de distribuição de cargas hidráulicas no SAAB obtida com MODFLOW 2000 em regime permanente, por tentativa e erro.

Calibração do Modelo

A calibração em regime estacionário foi realizada através da interface PEST pelo método zonal, no qual as condutividades K1 a K4 são associadas a parâmetros, com valores chaves, improváveis de -10, -20, -30 e -40 e a recarga com valor chave improvável de -110.

Uma primeira solução automática, iniciada com os valores de condutividade hidráulica da **figura 4.31** e uma recarga de 220 mm/ano ($6,03E-04$ m/dia), foi obtida após 8 (oito) iterações e indicou como parâmetros ótimos: K1 = 2,68 m/dia, K2 = 0,07 m/dia, K3 = 0,25 m/dia, K4 = 0,12 m/dia e recarga de 253 mm/ano ($6,93E-4$ m/dia).

Nesta solução a recarga mostrou comportamento instável, passando por extremos de 365 mm/ano na quarta iteração, 163 mm/ano na quinta e daí crescendo até 253 mm/ano na oitava e última iteração (**figura 4.32**).

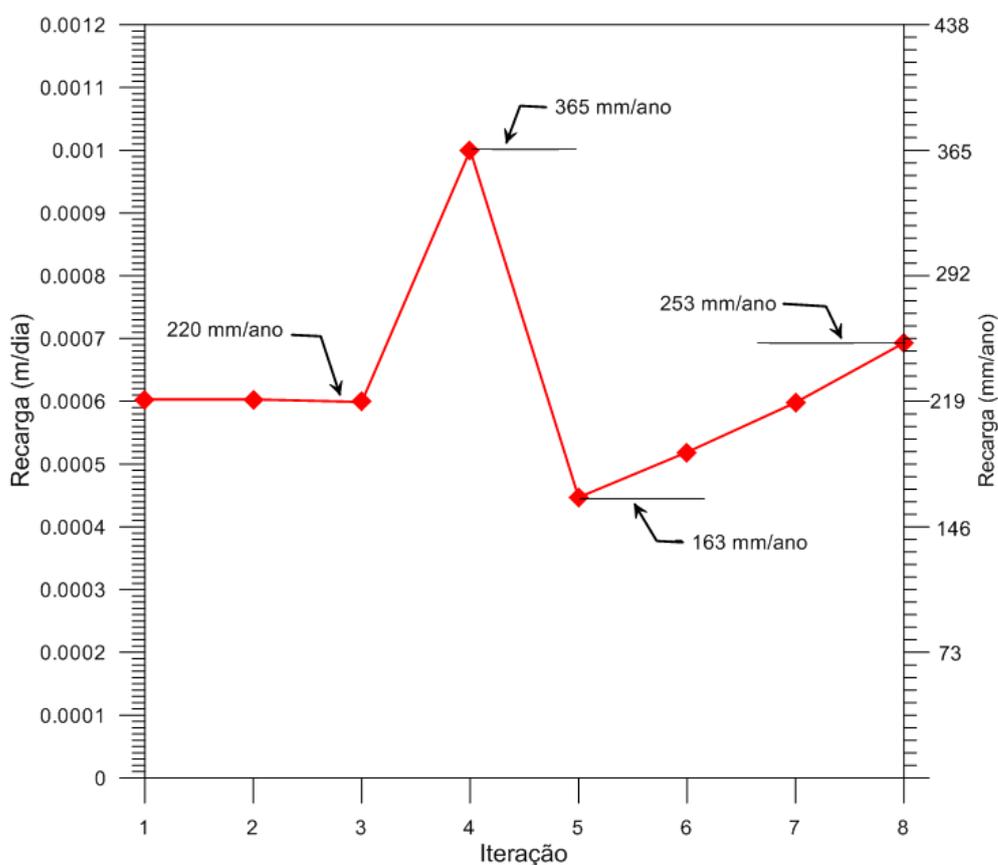


Figura 4.32 – Comportamento instável da recarga na primeira solução automática.

Sensibilidade dos Parâmetros

O comportamento instável da recarga nesta primeira solução automática não é consistente com a análise de sensibilidade dos parâmetros. Neste sentido, a **figura 4.33** mostra que a sensibilidade do parâmetro recarga é muito baixa e, assim sendo, não deve influir nas soluções e o seu valor pode ser considerado constante.

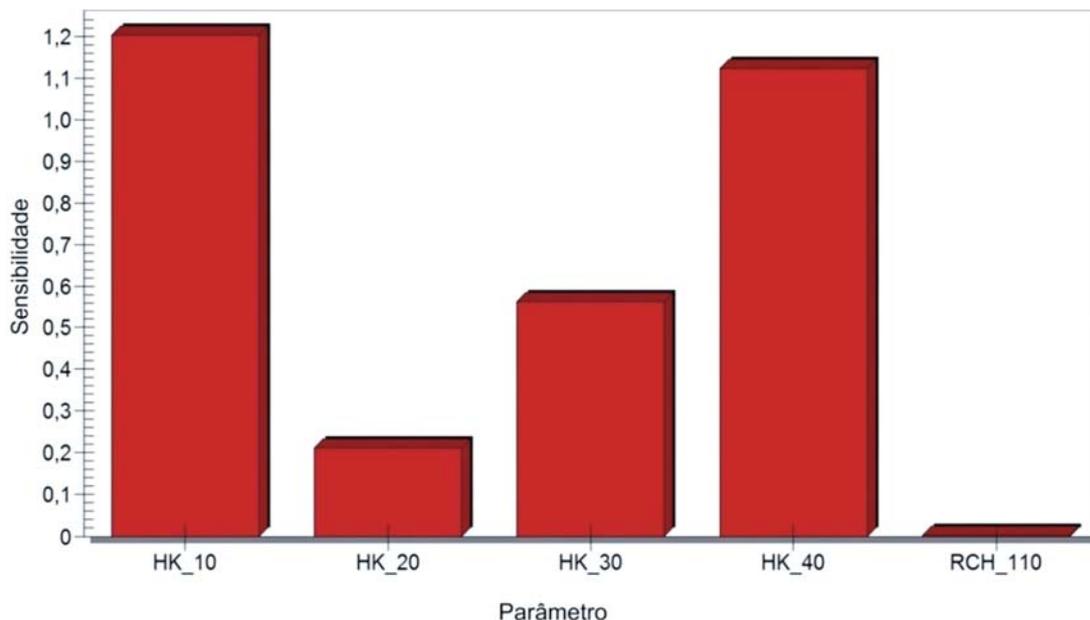


Figura 4.33 – Diagrama ilustrativo da sensibilidade dos parâmetros hidráulicos mostrando que o parâmetro recarga tem sensibilidade muito baixa, podendo assumir um valor constante qualquer e não influir nas soluções.

A conclusão decorrente da **figura 4.33** é comprovada pelas novas simulações realizadas com 3 (três) diferentes valores constantes de recarga iguais a 110, 22 e 0,22 mm/ano e que levam, em termos práticos, à mesma solução.

Os resultados finais do modelo sugerem como valores ótimos uma condutividade hidráulica média de 27,46 m/dia na Depressão do Baixo Amazonas (zona K1) e uma condutividade média de 1,55 m/dia na Depressão do Solimões (Zonas K2, K3 e K4). Não foi possível avaliar a recarga através do modelo, pois esse parâmetro se revela insensível, como mostram as soluções apresentadas na **tabela 4.14**. A potentiometria obtida pode ser observada na **figura 4.34**.

Tabela 4.14 - Sumário dos parâmetros ótimos do modelo numérico do SAAB.

Simulação	Condutividade hidráulica (m/dia)				Recarga (mm/ano)
	K1	K2	K3	K4	
1	27,82	0,80	2,63	1,28	110,00
2	27,30	0,78	2,59	1,26	22,00
3	27,26	0,78	2,58	1,26	0,22
Média	27,46	0,79	2,60	1,27	-

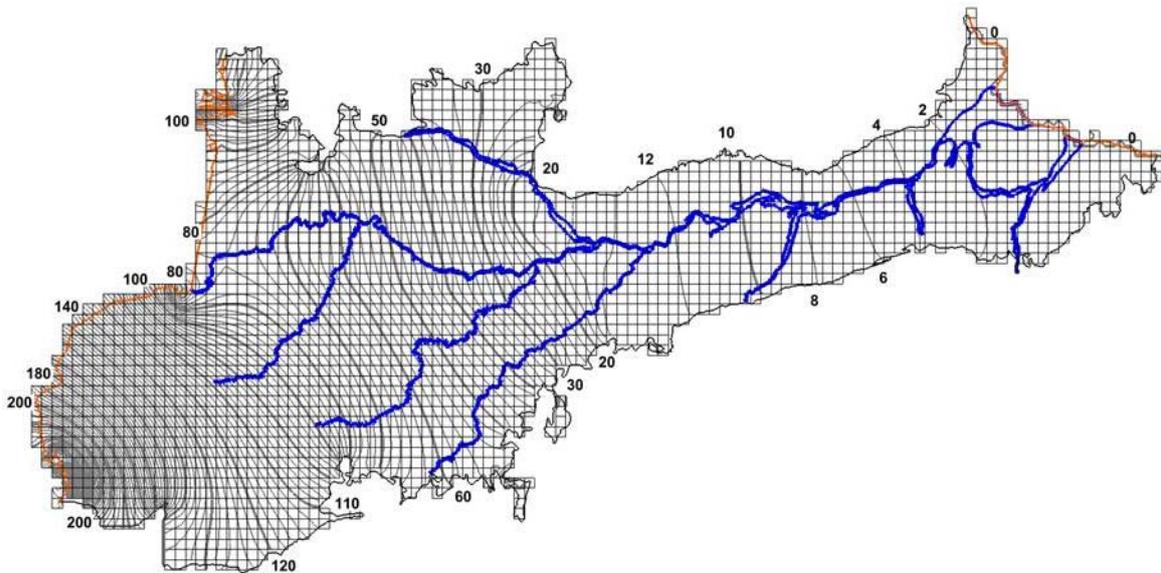


Figura 4.34 – Potenciometria da solução obtida com estimativa automática de parâmetros pelo método zonal (PEST Zonal).

Células Inundadas

A **figura 4.35** apresenta a distribuição final de cargas hidráulicas estacionárias, as quais, mesmo avaliadas com diferentes recargas, devido à baixa sensibilidade desse parâmetro, fornecem praticamente os mesmos valores de condutividade hidráulica. Isso decorre do fato de que todas as células do modelo permanecem inundadas, o que é consistente com a realidade, já que nas zonas baixas é muito pequena a profundidade dos níveis de água subterrânea do SAAB e nas zonas altas sempre existem águas em descenso devido à abundância de água superficial que constitui a rede perene de rios e igarapés da PHA.

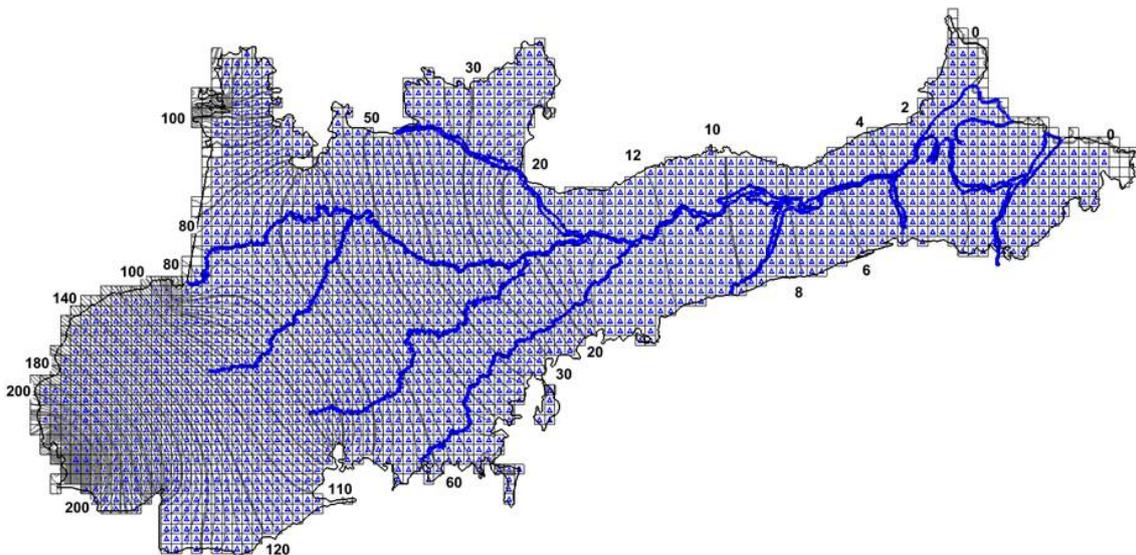


Figura 4.35 – Distribuição final das cargas hidráulicas do SAAB calibrada com PEST Zonal, mostrando que todas as células do modelo se apresentam inundadas.

Cargas Calculadas e Cargas Observadas

Após a obtenção dos resultados da calibração com 256 pontos de observação em regime permanente, foi estimado o erro absoluto (-0,05 m) e o erro relativo (-0,1) entre as cargas observadas e calculadas (**figura 4.36**).

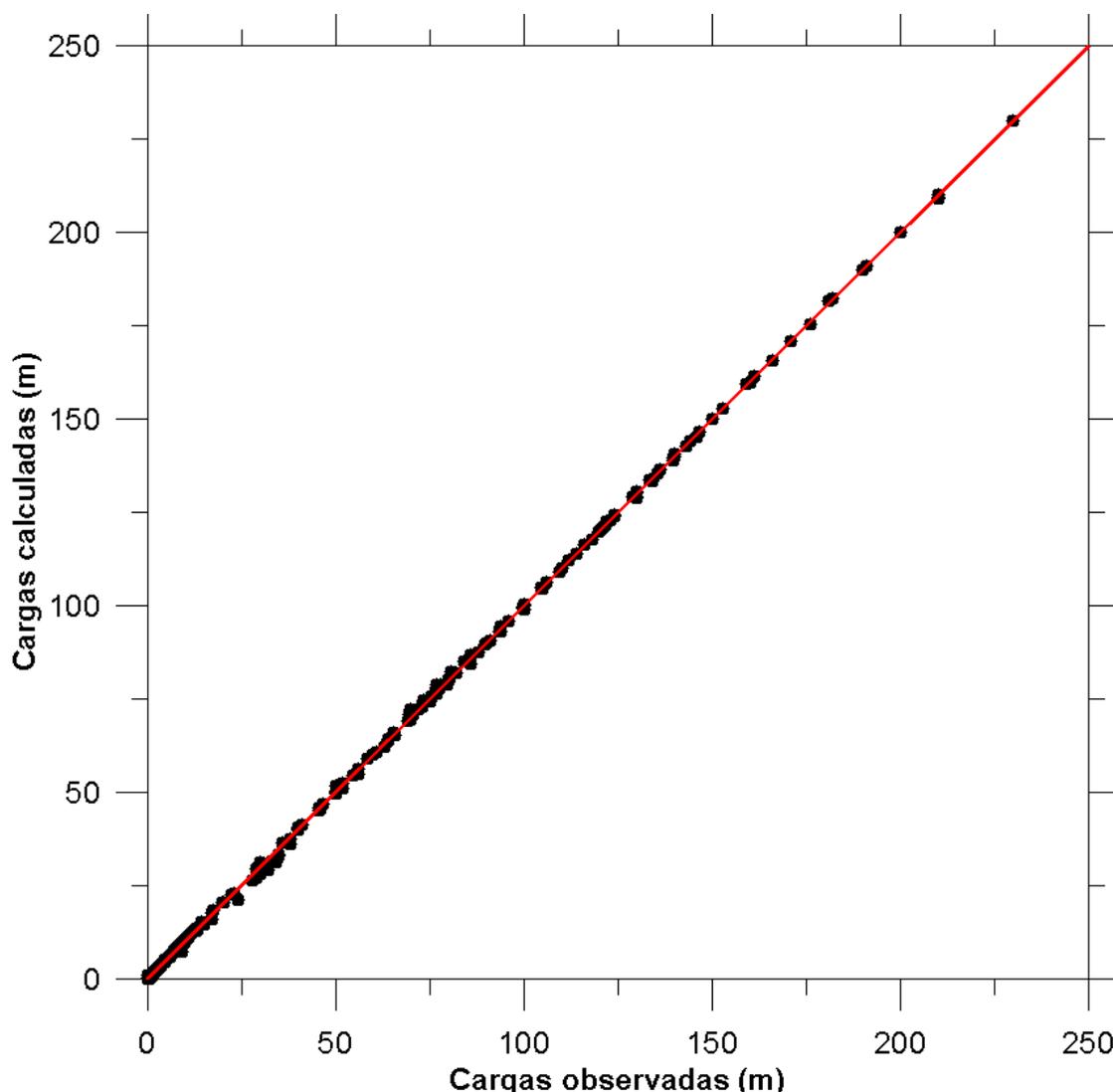


Figura 4.36 – Desvios da reta de 45° entre cargas observadas e cargas calculadas, com um erro absoluto de -0,05 m e um erro relativo de -0,1, considerado bastante pequeno.

Diante das dimensões da área modelada da PHA ($2 \times 10^6 \text{ km}^2$) e as influências externas que recebe sob a forma de influxos de água superficial provenientes de uma área 02 (duas) vezes maior ($4 \times 10^6 \text{ km}^2$), podemos concluir que o erro absoluto de -0,05 entre as cargas observadas e calculadas é extremamente baixo.

Mapa Potenciométrico de Equilíbrio

Os resultados do modelo numérico de fluxo se expressam na forma do mapa potenciométrico de equilíbrio do SAAB na PHA, apresentado na **figura 4.37**, no qual se inclui a articulação das folhas do Mapa Hidrogeológico ao Milionésimo, objeto do estudo.

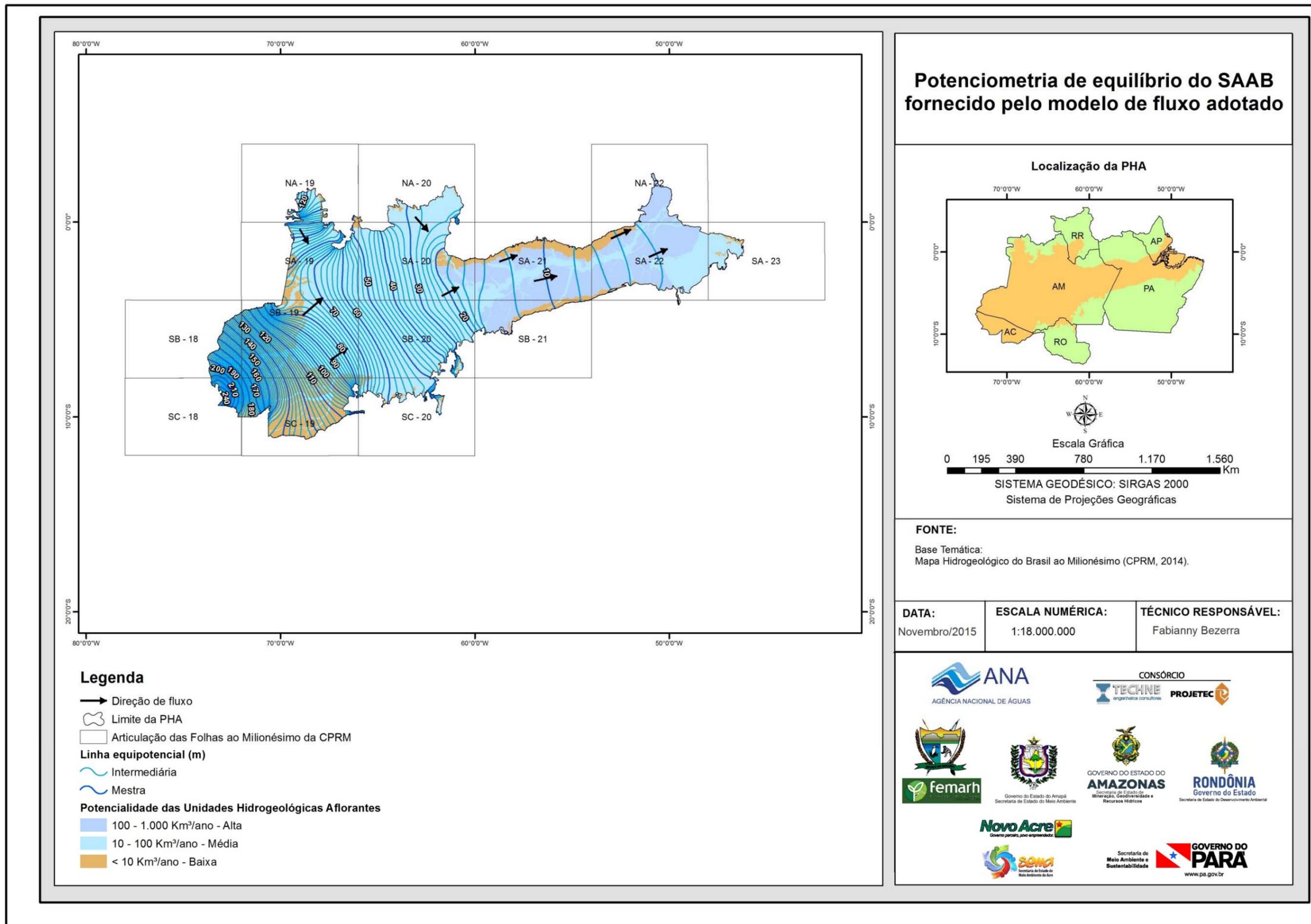


Figura 4.37 – Potenciometria de equilíbrio do SAAB fornecido pelo modelo de fluxo adotado.

Vazão de escoamento Natural

Para estimativa da vazão de escoamento natural do SAAB foi escolhida uma seção transversal (**figura 4.38**), na qual a espessura saturada do SAAB é conhecida em 02 (dois) poços estratigráficos do BDEP e varia de 510 m no poço 1-MA-1-PA (Monte Alegre) a 383 m no poço 1-TU-1-PA (Tucumã). Todavia, considerando que a área da seção é de 101,911 km² e a sua largura de 280,5 km, a espessura média saturada é de 0,363 km ou 363 m.

A escolha desta seção se justifica por estar à mesma localizada numa das porções mais estreitas da PHA mostrada na **figura 2.21** e situada na planície do baixo Amazonas, a jusante de Santarém. Ela representa um local ideal para avaliar a descarga de saída de água subterrânea do SAAB para o exutório final que é o oceano.

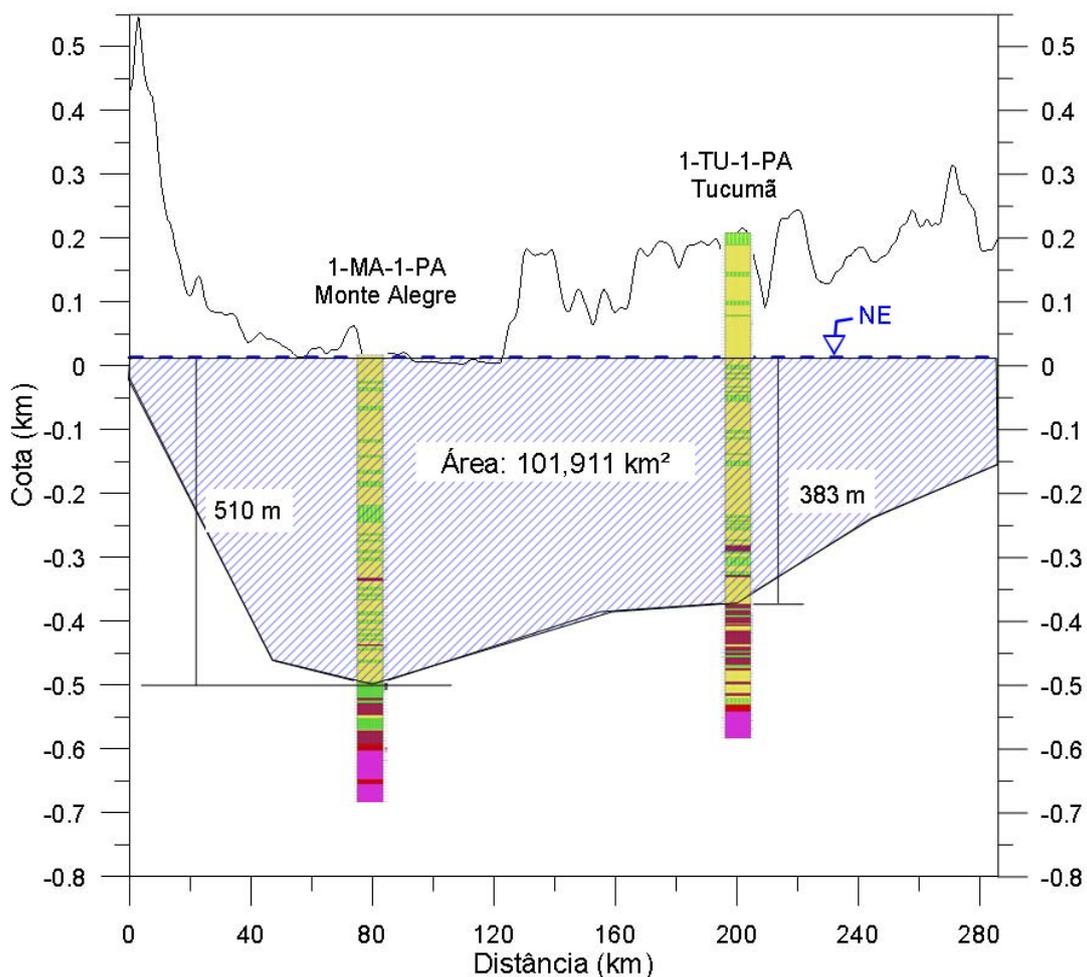


Figura 4.38 – Seção transversal de cálculo do fluxo natural do SAAB na planície do baixo Amazonas a jusante de Santarém – PA, com área de 101,911 km².

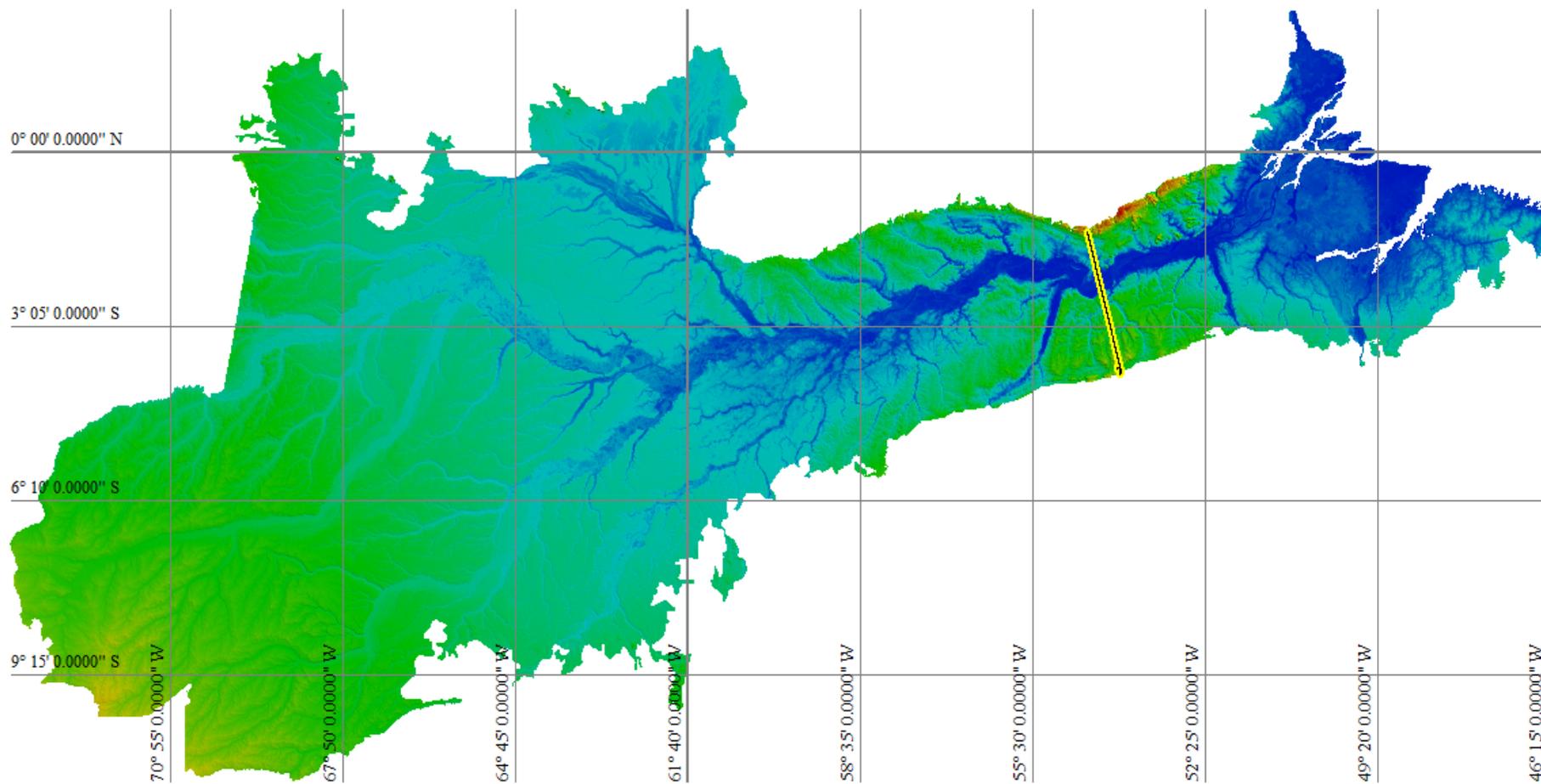


Figura 4.39 – Localização da seção de cálculo do fluxo natural do SAAB na planície do baixo Amazonas a jusante de Santarém – PA.

De acordo com a potenciometria fornecida pelo modelo (**figura 4.40**), o gradiente hidráulico médio do SAAB na região do baixo Amazonas é igual a $1,13 \times 10^{-5}$ (**tabela 4.15**).

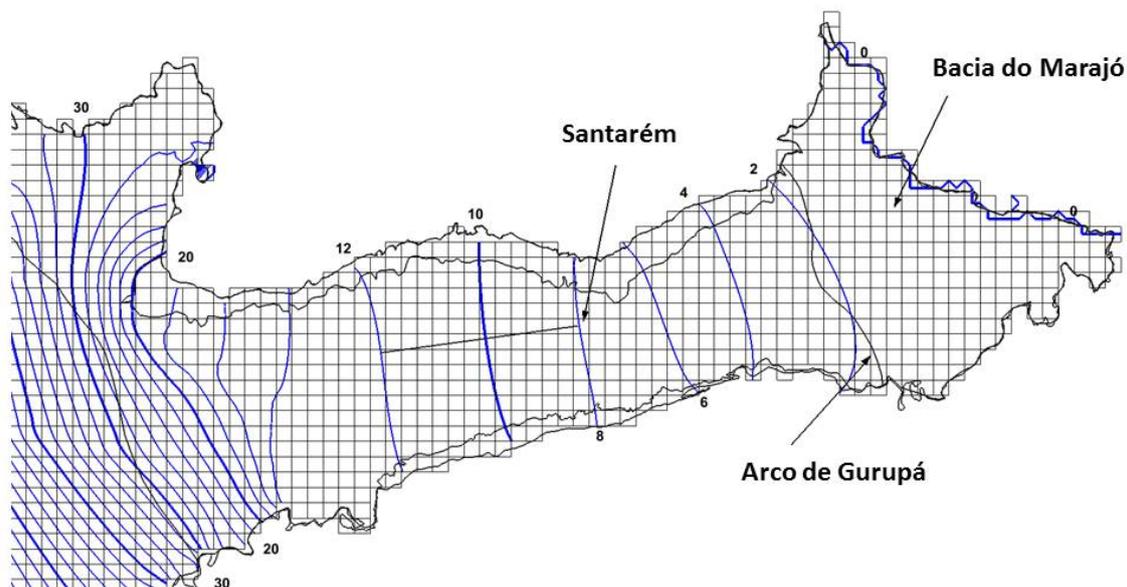


Figura 4.40 – Avaliação do gradiente hidráulico do SAAB na seção de cálculo do fluxo natural na região do baixo Amazonas na altura da cidade de Santarém – PA.

A partir da potenciometria (**figura 4.37**), entre as equipotenciais de 8 e 12 m, foram obtidos os valores de comprimento e largura da seção transversal para fins de estimativa da vazão de escoamento natural do SAAB na região do baixo Amazonas (**tabela 4.15**). O valor da espessura média saturada foi estimado em 363 m deduzido da área da seção (101,911 km²) e cuja largura é de 280,5 km (**tabela 4.15**).

Tabela 4.15 – Estimativa da vazão de escoamento natural do SAAB a partir do mapa potenciométrico de equilíbrio fornecido pelo modelo numérico de fluxo em seção transversal na região do baixo Amazonas na altura da cidade de Santarém – PA.

Largura (m)	dW1 (m)	Largura (m)	dW2	Largura (m)	W
Equipotencial E12	343.200	Equipotencial E10	312.400	Equipotencial E12	343.200
Equipotencial E10	312.400	Equipotencial E8	217.800	Equipotencial E8	217.800
dW médio (m)	327.800	dW médio (m)	265.100	dW médio (m)	280.500
Comprimento (m)	dL1 (m)	Comprimento (m)	dL2	Comprimento (m)	L
Entre E12 e E10	185.900	Entre E10 e E8	169.400	Entre E12 e E8	355.300
				dL =DL1+dL2	355300
dh (m)	2	dh (m)	2	dh (m)	4
dh/dL	1,08E-05	dh/dL	1,18E-05	dh/dL	1,13E-05
dh/dL (m/km)	0,01	dh/dL (m/km)	0,012	dh/dL (m/km)	0,011
T	0,115		0,115		1,15E-01
T x (dh/dL) x W		T x dh/dL x W		T x dh/dL x W	0,365
K = 27,46 m/dia					
b =363					
T=Kb= 0,115 m ² /s					

Como resultado da modelagem numérica foi obtido para a Depressão do Baixo Amazonas (**tabela 4.16**) uma condutividade hidráulica de 27,46 m/dia (2,65 vezes maior do que a indicada na **tabela 4.12**), enquanto que na Depressão do Solimões a condutividade hidráulica média foi de 1,41 m/dia, ou apenas 10% maior do que a indicada na **tabela 4.13**.

Conclui-se, portanto, que a velocidade média real de fluxo no SAAB, igual a 0,87 m por ano é muito baixa. A velocidade do fluxo subterrâneo tende a diminuir com a profundidade e isto aumenta as chances de se encontrar água salinizada abaixo de 1.000 m, tanto pela falta de circulação quanto pela ocorrência bastante frequente de camadas de sais em profundidade, comprovada em muitos dos poços estratigráficos estudados.

Comparação entre a Vazão de Escoamento Natural e a Descarga de Base do SAAB

De acordo com a **tabela 4.16**, a vazão de escoamento natural do SAAB é desprezível em relação à descarga de base deduzida do balanço hídrico da PHA, a qual se afigura aproximadamente 30 mil vezes maior.

Tabela 4.16 – Valores da descarga de base e da vazão de escoamento natural do SAAB, estimada em seção transversal na planície do baixo rio Amazonas.

FLUXOS	Vazão		A (km ²)*	Descargas	
	m ³ /s	m ³ /ano		m ³ /km ² .ano	mm/ano
Subterrâneo (Lei de Darcy)	0,365	11,5E+06	1.617.224	7,109	0,007
Descarga de base	11.295	3,56E+11	1.617.224	220.000	220

*A = área a montante da seção transversal selecionada na planície do baixo Amazonas para a estimativa do fluxo natural do SAAB.

Segundo o modelo numérico de fluxo, não é possível avaliar a recarga porque a sensibilidade desse parâmetro é muito baixa (**figura 4.37**), como ficou comprovado pela obtenção da mesma solução com 03 (três) diferentes valores de recarga (110 mm/ano, 22 mm/ano e 0,2 mm/ano). Isto é consistente com o fato de que nos 03 (três) casos as células da *grid* tridimensional do MODFLOW ficam inundadas. Pela lei de Darcy a recarga é praticamente desprezível, já que o seu valor é de apenas 0,007 mm/ano (**tabela 4.16**).

4.10 – Conclusões da Modelagem Numérica de Fluxo na PHA no Brasil

Através da modelagem numérica do fluxo regional na Província Hidrogeológica Amazonas PHA no Brasil, foi possível obter um mapa potenciométrico (**figura 4.37**) que caracteriza o escoamento das águas subterrâneas no Sistema Aquífero Amazonas no Brasil (SAAB).

Na região Leste da PHA, que corresponde à Depressão do Baixo Amazonas, no domínio das bacias do Amazonas e do Marajó, a condutividade hidráulica média obtida foi de 27,46 m/s sobre uma superfície aproximada de 604.000 km², o que sugere uma predominância de formações essencialmente permeáveis e aquíferas, em 30% do território da PHA.

Na região Oeste, correspondente à Depressão do Solimões, no domínio das bacias do Solimões e do Acre, sobre uma superfície aproximada de 1.396.000 km², a condutividade hidráulica avaliada pelo modelo foi de 1,55 m/dia,

indicativo de formações aquíferas aproximadamente 18 vezes menos permeáveis do que na Depressão do Baixo Amazonas.

Quanto à potencialidade do SAAB, os resultados obtidos ($65.048 \text{ m}^3/\text{s}$) em termos práticos pouco têm a ver com as suas reservas permanentes (que são praticamente inatingíveis) e das quais representa apenas 1,7% ($2.049/123.838$), mas sim com a grande potencialidade da reserva reguladora ou recarga potencial direta (RPD) de $626 \text{ km}^3/\text{ano}$ ou $19.873 \text{ m}^3/\text{s}$.

A modelagem numérica regional do fluxo mostrou que a vazão de escoamento natural do SAAB é praticamente desprezível ($0,365 \text{ m}^3/\text{s}$) porque o gradiente hidráulico na planície Amazônica é muito baixo. Mostrou ainda que a superfície potenciométrica de equilíbrio se encontra conectada com os rios e por esse motivo todas as células do modelo ficam inundadas, indicando que o sistema aquífero praticamente não tem condições de receber recarga porque existe água superficial em excesso. Portanto, a descarga de base, que é de 220 mm/ano ($11.295 \text{ m}^3/\text{s}$), tem caráter essencialmente potencial, retornando à rede hidrográfica tão logo alcança a superfície freática, indicada no mapa potenciométrico fornecido pelo modelo.

A velocidade média do fluxo subterrâneo é de apenas $0,87 \text{ m/ano}$ e se deve ao fraquíssimo gradiente hidráulico da superfície freática na planície Amazônica que é de apenas $1,13\text{E-}05$, ou seja, $1,13 \text{ cm/km}$.

Como fator de risco para uma exploração mais intensiva através de poços muito profundos, superior a 500 m de profundidade, destaca-se a possibilidade de ocorrência de água salgada em profundidade, que pode impactar e limitar a exploração do SAAB.

Tal premissa se baseia nos resultados de pequena vazão de escoamento natural, que é indicativa da falta de renovação sazonal das reservas de água subterrânea. Além disso, a baixa velocidade de circulação do fluxo subterrâneo, estimada em apenas 87 cm por ano, o que contribui para o aumento do teor salino das águas subterrâneas.

Outro fator que corrobora é a ocorrência de paleoáguas, segundo resultados obtidos através de análises isotópicas de trício e de carbono-14, em várias unidades aquíferas (UHF) do SAAB, como o aquífero Alter do Chão, na bacia do Amazonas, onde os resultados analíticos de amostras coletadas em Manaus a menos de 200 m de profundidade indicaram águas com idade superior a 2 mil anos; e do aquífero Tucunaré em Macapá, na bacia do Marajó e dos aquíferos Barreiras e Pirabas em Belém, na Plataforma Bragantina, ambos com paleoáguas de mais de 20 mil anos.

Aliado a isso, a ocorrência de camadas de sais nas formações paleozoicas profundas, conforme mostraram os perfis compostos dos poços estratigráficos do BDEP.

5 – Hidrogeoquímica da Província Hidrogeológica Amazonas

5.1 - Introdução

Na avaliação da qualidade das águas, as impurezas presentes são retratadas por suas características físicas, químicas e biológicas, que são traduzidas em termos de parâmetros que permitem classificá-las por seu conteúdo mineral, caracterizar a sua potabilidade e apontar as anomalias de substâncias tóxicas.

A Resolução CONAMA 396/2008 considera que os aquíferos se apresentam em diferentes contextos hidrogeológicos e podem ultrapassar os limites de bacias hidrográficas, e que as águas subterrâneas possuem características físicas, químicas e biológicas intrínsecas, com variações hidrogeoquímicas, sendo necessário que o seu enquadramento em classes de qualidade seja pautado nessas especificidades.

Desse modo, com o intuito de avaliar a potabilidade das águas subterrâneas dos aquíferos Aluvial, Rio Branco, Içá, Tucunaré, Alter do Chão, Coberturas Cenozoicas de Porto Velho, Barreiras, Pirabas, Monte Alegre, Itaituba e Inominado (Cruzeiro do Sul), inseridos na Província Hidrogeológica Amazonas (PHA) no Brasil, bem como a presença dos elementos nela dissolvidos, foram realizadas duas campanhas de amostragem em 250 poços, sendo uma no período chuvoso (abril de 2012) e outra no período de estiagem (outubro de 2012), com seis meses de intervalo.

As coletas foram realizadas em 18 cidades: Almeirim, Barcelos, Belém, Coari, Cruzeiro do Sul, Eirunepé, Fonte Boa, Humaitá, Itaituba, Lábrea, Macapá, Manaus, Parintins, Porto Velho, Rio Branco, Santarém, Tabatinga e Tefé (**figura 5.1**).

O monitoramento em ambas as campanhas de amostragem foi composto de análises físico-químicas, por meio dos parâmetros: cor, turbidez, condutividade elétrica (CE), temperatura, sólidos totais dissolvidos (STD), pH *in situ*, pH a 20°C, potencial redox (Eh), alcalinidade, dureza, sódio, potássio, cálcio, magnésio, cloreto, sulfato, carbonato, bicarbonato, nitrito, nitrato, amônia, nitrogênio orgânico, nitrogênio total kjeldahl, nitrogênio total, ferro e manganês; e análises bacteriológicas, através dos parâmetros Coliformes Totais e Termotolerantes (*E. Coli*). O quantitativo de poços analisados nas duas campanhas de amostragem, as cidades e seus respectivos aquíferos podem ser verificados na **tabela 5.1**.

Na segunda campanha de amostragem, além dos exames supracitados, também foram realizadas análises dos metais pesados: arsênio, bário, cádmio, chumbo, cobre, cromo, mercúrio, níquel e zinco; BTEX formado pelo benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos (orto, meta e para); Fenóis; e Isótopos ambientais: deutério, oxigênio-18, trício e carbono-14.

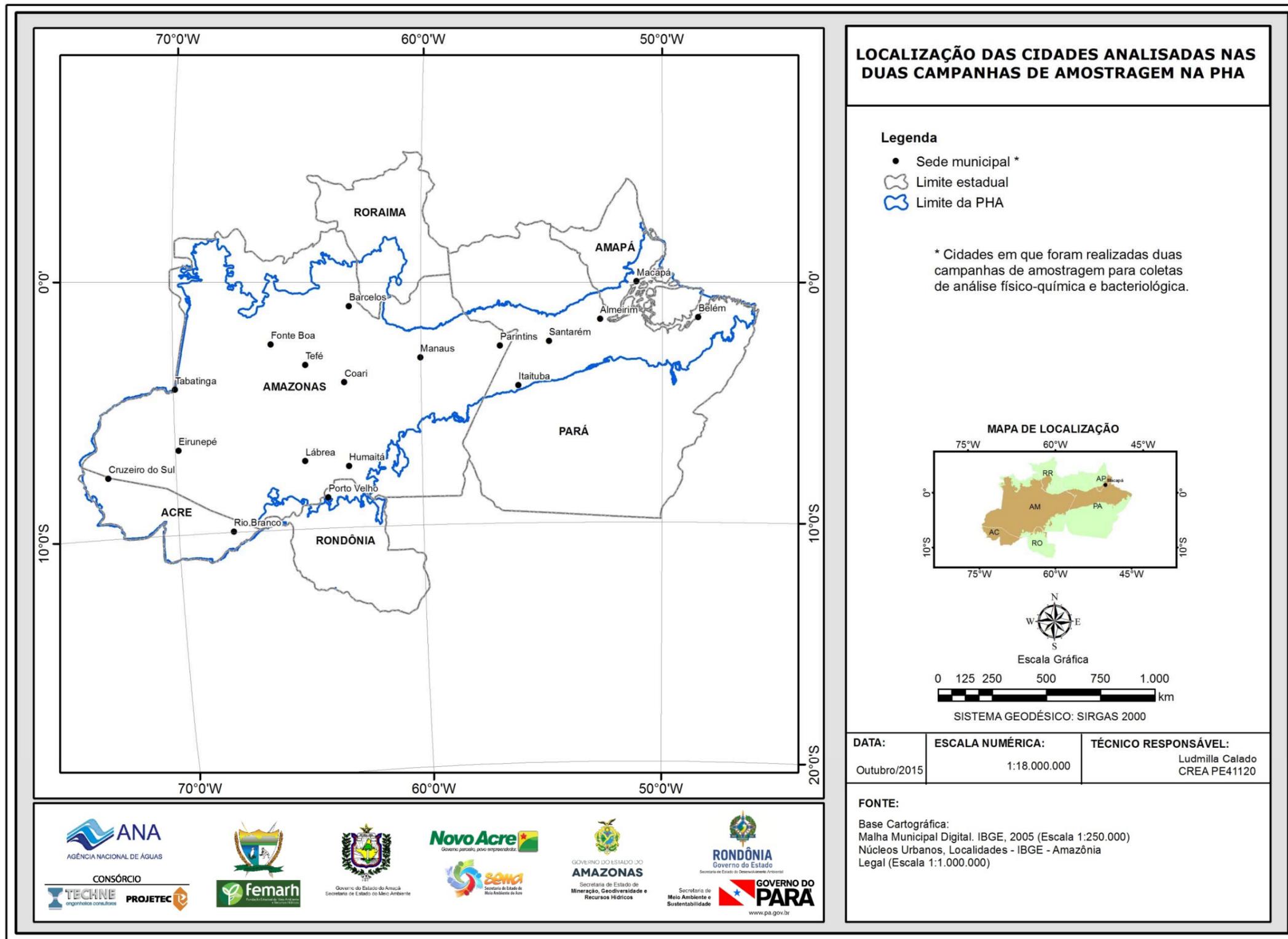


Figura 5.1 – Localização das cidades analisadas nas duas campanhas de amostragem na PHA.

Tabela 5.1 – Quantitativos de poços analisados, cidades e seus respectivos aquíferos nas duas campanhas de amostragem na PHA.

Aquífero	Cidades	UF	Quantidade de poços analisados						
			Análise Físico-química e bacteriológica		Btex, Fenóis e Metais pesados *	Isótopos Ambientais *			
			Coleta 1	Coleta 2		Trício	Deutério	Oxigênio-18	Carbono-14
Aluvial	Belém	PA	2	2	-	-	-	-	-
	Itaituba	PA	2	2	-	1	1	1	1
	Eirunepé	AM	5	5	-	2	2	2	-
	Tabatinga	AM	15	15	5	6	3	3	1
Total			24	24	5	9	6	6	2
Rio Branco	Rio Branco	AC	30	30	10	7	4	4	-
Total			30	30	10	7	4	4	0
Içá	Barcelos	AM	5	5	-	2	2	2	1
	Coari	AM	5	5	-	2	1	1	1
	Lábrea	AM	5	5	-	2	2	2	-
	Tefé	AM	5	5	-	2	2	2	-
	Fonte Boa	AM	5	5	-	2	2	2	-
	Humaitá	AM	5	5	-	2	2	2	1
Total			30	30	0	12	11	11	3
Tucunará	Macapá	AP	30	30	10	7	4	4	2
Total			30	30	10	7	4	4	2
Alter do Chão	Almeirim	PA	5	5	-	2	2	2	-
	Manaus	AM	30	30	-	2	3	3	4
	Parintins	AM	5	5	-	2	2	2	-
	Santarém	PA	30	30	10	7	4	4	4
Total			70	70	10	13	11	11	8
Coberturas Cenozoicas de Porto Velho	Porto Velho	RO	30	30	11	4	1	1	1
Total			30	30	11	4	1	1	1
Barreiras	Belém	PA	18	18	-	1	1	1	1
Total			18	18	0	1	1	1	1
Pirabas	Belém	PA	10	10	0	1	1	1	2
Total			10	10	0	1	1	1	2
Monte Alegre	Itaituba	PA	1	1	0	-	-	-	-
Total			1	1	0	0	0	0	0
Itaituba	Itaituba	PA	2	2	0	1	1	1	1
Total			2	2	0	1	1	1	1
Inominado	Cruzeiro do Sul	AC	5	5	-	2	2	2	-
Total			5	5	0	2	2	2	0

* Realizada apenas na segunda coleta.

A seleção dos poços nas 18 cidades inseridas na PHA foi feita com base em 07 (sete) critérios: poços predominantemente produtores, anuência do proprietário para a coleta no poço, captar prioritariamente um sistema aquífero único, estar

distribuído o mais uniformemente possível na área de estudo, possuir perfil construtivo e litológico, ser georreferenciado com GPS e com altímetro barométrico, equipados com bomba e ligados a rede de energia.

Dessa forma, os poços que apresentassem maior quantidade de critérios atendidos foram analisados do ponto de vista físico-químico e bacteriológico.

Todos os resultados obtidos nas análises físico-química, bacteriológica, de metais pesados, BTEX, fenóis e isótopos ambientais, bem como a classificação das águas subterrâneas segundo a composição química e uso, podem ser visualizados detalhadamente no **Volume IV - Hidrogeoquímica da PHA**.

5.2 – Influência do Intemperismo Químico Regional na Qualidade das Águas Subterrâneas da Província Hidrogeológica Amazonas - PHA

A formação da composição química dos tipos de águas naturais oriundas de precipitações é útil para a interpretação dos resultados das análises físico-químicas realizadas na PHA.

Como parte do ciclo hidrológico a água que evapora dos oceanos é transportada para o interior dos continentes. O vapor d'água, durante a sua passagem através da baixa atmosfera, tem a possibilidade de entrar em equilíbrio com os gases ali existentes, cuja composição média está sujeita a variações consideráveis, principalmente de alguns constituintes menores, tais como dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), dióxido de enxofre (SO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x), etc., que são produtos de processos de combustão e estão associados com a poluição do ar em comunidades urbanas e industriais.

Quando precipita sobre a superfície do terreno, a água da chuva entra em contato com rochas, sedimentos, solos, áreas urbanas, animais e plantas. Desse contato decorrem reações químicas que posteriormente modificam a composição da água. As reações químicas dos ácidos da água da chuva com os minerais constituintes das rochas alteram esses minerais através de um processo chamado de **intemperismo químico**. Trata-se de um processo que depende exclusivamente da água.

Os fatores condicionantes deste processo são inúmeros, começando pelo clima, marcado por altas temperaturas e alta pluviosidade associadas a uma vasta cobertura vegetal, incluindo ainda relevo, circulação de água, condições de potencial redox (Eh) e pH, variações no nível freático e, sobretudo, tempo de atuação desses fatores.

Na PHA no Brasil esse processo vem atuando sobre as formações cenozoicas, nas quais se encontram os principais aquíferos, desde o Neomioceno até os dias atuais, ou seja, há milhões de anos, e dele resultaram como produtos: resíduos e solutos.

- **Resíduos:** são elementos “insolúveis” em água, tais como alumínio e ferro, que dão origem a depósitos de bauxita e laterita, respectivamente, além do quartzo que resulta em areia;
- **Solutos:** são elementos móveis em solução: sódio, potássio, cálcio, magnésio, cloreto, sulfato e bicarbonato, que são lixiviados no processo de intemperismo e quase totalmente (99%) transportados pelos rios, daí porque é de se esperar que na PHA esses íons não mais existam em quantidade significativa nos sedimentos e que hoje estes provenham, sobretudo, da

água da chuva e de influências antrópicas, já que todas as amostras foram coletadas em zonas urbanas na porção brasileira da PHA.

Portanto, a origem desses solutos nas águas subterrâneas dos aquíferos da PHA, nos quais predominam materiais arenosos, provavelmente pouco se deve ao processo de intemperismo, que praticamente já está consumado. As baixas concentrações se devem ao fato de os íons provêm quase totalmente da chuva.

Em praticamente toda a PHA no Brasil, as águas subterrâneas apresentam baixos teores de Sólidos Totais Dissolvidos (STD), Condutividade Elétrica (CE), cálcio, magnésio, potássio, sódio, carbonato e bicarbonato, mas possuem altos teores de ferro, que afetam 29% das amostras na primeira campanha e 27% na segunda, de forma a ultrapassar o VMP de potabilidade para consumo humano da Portaria do Ministério da Saúde - MS 2914/2011.

A presença desses teores de ferro na água subterrânea não se deve diretamente ao intemperismo, pois este não gera ferro solúvel e sim à dissolução do dióxido de ferro existente na laterita (39,34% em peso) pela água de infiltração oriunda da chuva, que possui normalmente pH ácido na região Amazônica, variável geralmente de 4 a 5,3.

5.3 - Aquífero Aluvial

O aquífero Aluvial se caracteriza pela presença de depósitos de planícies aluvionares. A planície encontra-se representada por sedimentos arenosos a argilosos inconsolidados a semiconsolidados, associando-lhes níveis de cascalho e matéria orgânica.

Com o intuito de avaliar a qualidade das águas subterrâneas do Aquífero Aluvial, foram selecionados 24 poços para análises físico-químicas e bacteriológicas nas cidades de Belém e Itaituba no Pará, e de Eirunepé e Tabatinga no Amazonas. Além dessas análises, também foram realizadas leituras de metais pesados, BTEX, fenóis e isótopos ambientais (trício, deutério, oxigênio-18 e carbono-14).

De acordo com os resultados obtidos nas duas campanhas de amostragem verificou-se que, em termos médios, 98% dos poços apresentaram resultados de cor abaixo do limite de detecção de 5 uH; e que 100% dos poços obtiveram valores de cor dentro dos padrões de potabilidade para consumo humano de 15 uH, definido pela Portaria MS 2914/2011, indicando que as águas do aquífero Aluvial não possuem restrições quanto a esse parâmetro.

Com relação à turbidez, 31% dos poços apresentaram resultados abaixo do limite de detecção de 0,1 uT; e apenas o poço ITB001, no município de Itaituba, na primeira campanha, alcançou o valor 5,5 uT, ultrapassando o padrão de 5 uT definido pela Portaria MS 2914/2011 para consumo humano. Os valores de turbidez foram mais elevados no período chuvoso, pois na época de cheias, a água da chuva escoou pelo solo e carrega consigo sedimentos que permanecem em suspensão na água tornando-a mais turva, a qual entra em contato com as águas subterrâneas.

A condutividade elétrica (CE) das águas do aquífero Aluvial variou de 16 a 653 $\mu\text{S}/\text{cm}$ no período chuvoso, com média de 111,67, e no período seco a variação entre o mínimo e o máximo foi de 17 a 348 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com média de

110,42 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Os valores de condutividade elétrica (CE) obtidos sugerem que as águas do aquífero Aluvial são potáveis, uma vez que se encontram no intervalo de 50 a 1.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

A temperatura das águas do aquífero Aluvial varia no mínimo de 24°C ao máximo de 33,5 °C. Os valores máximos de temperatura encontrados nas duas campanhas possivelmente decorrem da influência da temperatura ambiente, uma vez que as águas do aquífero Aluvial são pouco profundas.

Os teores de Sólidos Totais Dissolvidos (STD) no aquífero Aluvial variam no período chuvoso de 12 a 371 mg/L, com média de 82,42 mg/L, e no período de estiagem, o mínimo observado foi de 9 mg/L e o máximo de 249 mg/L, com média de 81,85 mg/L. Todos os valores encontrados estão distantes do máximo recomendado (1.000 mg/L) para consumo humano pela Portaria MS 2914/2011 e Resolução CONAMA 396/2008.

As águas do aquífero Aluvial são essencialmente ácidas, pois os valores de pH *in situ* encontrados no período chuvoso ficaram compreendidos entre 2,3 e 7,2, com média de 5,36, e no período seco, os valores oscilaram entre um mínimo de 3,9 e um máximo de 7,5, apresentando média de 5,34.

Os resultados de potencial redox (Eh) altos e positivos sugerem, em termos médios, que 94% dos poços possuem águas em condições oxidantes, ou seja, baixa atividade de elétrons.

Os baixos teores de sódio, potássio, cálcio e magnésio encontrados nas duas coletas de amostragem estão ligados ao intemperismo químico da região Amazônica, associados à elevada precipitação regional que favorece a constante renovação das águas subterrâneas.

Os teores de sódio nas águas do aquífero Aluvial variaram entre 0,009 e 16,5 mg/L no período chuvoso, com média de 5,26 mg/L, e no período de estiagem os teores ficaram compreendidos entre 0,38 e 17,3 mg/L, com média de 6,93 mg/L. Todos os valores de sódio encontrados estão abaixo do Valor Máximo Permitido (VMP) de 200 mg/L da Portaria MS 2914/2011 e Resolução CONAMA 396/2008, indicando que as águas podem ser usadas para consumo humano e recreação.

As águas apresentaram teores de cloreto mais elevados no período chuvoso, indicando que há influência antrópica devido à ausência de esgotamento sanitário na região, haja vista que se verificou uma forte correlação entre os parâmetros cloreto e STD. Apenas o poço ITB004 no município de Itaituba, na primeira campanha, alcançou o valor de 108,37 mg/L, ultrapassando o VMP de 100 mg/L definido pela Resolução CONAMA 396/2008, sugerindo que esta água não é adequada para irrigação. Os demais poços apresentaram teor de cloreto dentro dos padrões para consumo humano, irrigação e recreação de acordo com Resolução CONAMA 396/2008.

Os teores de sulfato nas águas subterrâneas do aquífero Aluvial no período chuvoso variaram de 0,49 a 25,03 mg/L, apresentando média de 2,78 mg/L, e no período seco, os teores variaram de 0,49 a 10,26 mg/L, com média de 1,74 mg/L. Apesar de todas as amostras analisadas apresentarem teores de sulfato inferiores aos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 396/2008 para consumo humano (250 mg/L), dessedentação animal (1.000 mg/L) e recreação (400 mg/L), bem como dentro dos padrões organolépticos de potabilidade

definidos pela Portaria MS 2914/2011, a presença desse parâmetro sugere contaminações de ordem antrópica, principalmente por falta de sistema de esgotamento sanitário.

Em ambas as campanhas 21% das amostras obtiveram valores de bicarbonato iguais à zero. No período chuvoso, as concentrações de bicarbonato oscilaram entre 0,0 e 180 mg/L, com média de 29,46 mg/L, e no período de estiagem as concentrações ficaram compreendidas entre 0,0 e 188 mg/L, com média de 26,92 mg/L. Os teores de bicarbonato são mais elevados no período de estiagem devido a maior presença de gás carbônico no solo, gerado por meio da decomposição de matéria orgânica e respiração das raízes das plantas.

No tocante a dureza, as águas do aquífero Aluvial no período chuvoso oscilaram entre 0,83 e 169,6 mg/L, com média de 25,22 mg/L, e no período de estiagem variou de 1,33 a 174,2 mg/L, com média de 22,14 mg/L. Tais resultados permitem classificar as águas como do tipo mole, pois 90% das amostras apresentaram valores inferiores a 50 mg/L. Nas duas campanhas nenhum dos poços amostrados ultrapassou o VMP recomendável pela Portaria MS 2914/2011, de 500 mg/L para consumo humano.

A presença de nitrato e de amônia nas águas do aquífero Aluvial, em ambas as campanhas, se deve provavelmente a proximidade das fossas sanitárias com os poços, os quais em muitos casos não possuem a devida proteção sanitária, o que favorece a infiltração do esgoto *in natura* e conseqüentemente a contaminação das águas subterrâneas. Nenhuma das amostras analisadas ultrapassou o VMP de potabilidade de 10 mg/L de nitrato, contudo 4% e 8% das amostras na primeira e segunda campanhas, respectivamente ultrapassaram o VMP de 1,5 mg/L de amônia recomendável pela Portaria MS 2914/2011.

Com relação ao nitrito, em ambas as campanhas, todas as amostras analisadas apresentaram teores abaixo do limite de detecção de 0,02 mg/L e, portanto, dentro dos padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria MS 2914/2011 de 1 mg/L, e da Resolução CONAMA 396/2008, indicando que as águas podem ser usadas para o consumo humano, dessedentação de animais, irrigação e recreação.

Os teores de ferro nas águas do aquífero Aluvial no período chuvoso ficaram compreendidos entre 0,00009 e 10,02 mg/L, com média de 0,74 mg/L, e no período seco os valores oscilaram entre 0,0009 a 16,69 mg/L, com média de 1,30 mg/L. Dentre o total de amostras analisadas, 38% dos poços no período chuvoso e 29% no período de estiagem apresentaram valores que ultrapassaram o VMP de potabilidade recomendável pela Portaria MS 2914/2011, além de não serem indicadas para consumo humano e para recreação, segundo a Resolução CONAMA 396/2008. Além disso, 4% dos poços amostrados na primeira campanha e 8% dos poços na segunda campanha apresentaram teores de ferro que ultrapassaram os limites recomendados para irrigação, de acordo com a Resolução CONAMA 396/2008.

As concentrações de manganês nas águas do aquífero Aluvial no período chuvoso variam de 0,003 a 0,50 mg/L, com média de 0,10 mg/L, e no período seco os valores oscilam entre mínimo de 0,008 e máximo de 0,64 mg/L, com média de 0,09 mg/L. Observou-se que 25% e 8% dos poços, respectivamente na primeira e segunda campanha, apresentaram teores de manganês acima do

VMP de 0,1 mg/L estabelecido pela Portaria MS 2914/2011, bem como ultrapassaram os limites previstos na Resolução CONAMA 396/2008, no que se refere aos usos da água para consumo humano e recreação. Além disso, 42% dos poços amostrados em ambas as campanhas apresentaram teores de manganês que ultrapassaram os limites recomendados para dessedentação animal, de acordo com a Resolução CONAMA 396/2008. Cerca de 13% dos poços no período chuvoso e 8% no período seco ultrapassaram o limite recomendado para irrigação, de acordo com a Resolução CONAMA 396/2008.

Todas as amostras analisadas para os metais pesados arsênio, cádmio, chumbo, cromo e mercúrio apresentaram teores abaixo do limite de detecção, ao passo que bário, cobre, níquel e zinco obtiveram teores abaixo do VMP definido pela Portaria MS 2914/2011 e Resolução CONAMA 396/2008.

No que se refere às análises de BTEX e fenóis, todas as amostras obtiveram valores abaixo do limite de detecção, bem como respeitaram os limites de potabilidade definidos pela Portaria MS 2914/2011 e Resolução CONAMA 396/2008.

As análises de oxigênio-18 e deutério levaram a concluir que a recarga do aquífero Aluvial possui 96% de perda por evaporação, o que se deve a abundância da chuva na região, que gera águas mais leves e propícias à evaporação.

Segundo as datações efetuadas com trício as águas do aquífero estudado possuem mistura de água submoderna com recarga recente.

Quanto às idades convencionais de carbono-14, verificou-se presença de água moderna, ou seja, água com tempo de residência inferior a 200 anos.

A avaliação dos parâmetros biológicos indicou a presença de Coliformes totais no período chuvoso em 46% dos casos e de 50% no período de estiagem. No que se refere à contaminação por *E. Coli*, a presença foi detectada em 17% dos casos apenas no período chuvoso. Esses resultados correspondem contaminação das águas subterrâneas por fossas sépticas devido à ausência de sistema de esgotamento sanitário na região e também pelo fato de que os poços tubulares, em sua maioria, serem pouco profundos e construídos com técnicas inapropriadas, que deixam os espaços anelares sem a devida proteção sanitária. A ocorrência desses parâmetros biológicos é extremamente preocupante, pois pode ocasionar doenças de veiculação hídrica na população local, que utiliza dessas águas para os mais diversos usos, incluindo consumo humano.

No que se refere à classificação das águas subterrâneas de acordo com a composição química, é possível verificar que as águas do aquífero Aluvial em sua maioria são Cloretadas Sódicas e de boa potabilidade, segundo indicação dos diagramas de Piper e Schoeller-Berkaloff, respectivamente; e de acordo com os diagramas de Stiff se classificam em Cloretadas Sódicas e Bicarbonatadas Sódicas.

No que concerne à avaliação das águas para irrigação obtida pela Razão de Adsorção do Sódio (SAR), verifica-se que as águas do aquífero Aluvial possuem risco de sódio baixo e salinidade entre fraquíssima a média, indicando que as águas podem ser usadas para o cultivo de boa parte dos vegetais.

De acordo com a Metodologia de Mckee & Wolf (1963), as águas do aquífero Aluvial podem ser utilizadas para a dessedentação animal sem restrições, haja vista que os teores de STD encontrados em ambas as campanhas foram baixos.

5.4 - Aquífero Rio Branco

No contexto regional, o aquífero Rio Branco está localizado na Província Amazonas, que representa uma das bacias sedimentares fanerozoicas do Brasil (CPRM, 2003). No contexto local, o aquífero Rio Branco está situado na Bacia do Solimões. O aquífero Rio Branco pode ser definido como o pacote de sedimentos holocênicos e terraços fluviais pleistocênicos, que inclui leitos de argila siltosa, de argila siltico-arenosa, areia siltosa e areia fina, na planície aluvial do rio Acre, em repouso sobre uma base impermeável constituída pelos argilitos da Formação Solimões.

Com o intuito de avaliar a qualidade das águas subterrâneas do Aquífero Rio Branco, foram selecionados 30 poços para análises físico-químicas e bacteriológicas nas cidades de Rio Branco, no Acre. Além dessas análises, também foram realizadas leituras de metais pesados, BTEX, fenóis e isótopos ambientais (trício, deutério e oxigênio-18).

De acordo com os resultados obtidos nas duas campanhas de amostragem, verificou-se que 95% dos poços apresentaram resultados de cor abaixo do limite de detecção de 5 uH; e que apenas o poço RBR22 na segunda campanha obteve valor de cor igual a 20 uH, fora dos padrões de potabilidade para consumo humano de 15 uH, definido pela Portaria MS 2914/2011.

Com relação à turbidez, 30% dos poços na primeira campanha e 10% na segunda campanha apresentaram resultados acima do padrão de 5 uT, definido pela Portaria MS 2914/2011 para consumo humano. Os valores de turbidez mais elevados estão associados a águas ricas em ferro e ao elevado teor de sedimentos das águas superficiais que infiltram principalmente no período chuvoso.

Os valores de condutividade elétrica (CE) no período chuvoso variou de 20 a 688 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com média de 145,3 $\mu\text{S}/\text{cm}$, e no período seco a variação entre o mínimo e o máximo foi de 19 a 992 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com média de 153,8 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Os valores de condutividade elétrica (CE) obtidos sugerem que as águas do aquífero Rio Branco são potáveis, uma vez que se encontram no intervalo de 50 a 1.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

A temperatura das águas do aquífero Rio Branco varia no mínimo de 26,4°C ao máximo de 31,1 °C. Os valores máximos de temperatura encontrados nas duas campanhas possivelmente decorrem da influência da temperatura ambiente, uma vez que as águas do aquífero Rio Branco são pouco profundas e influenciadas pelas águas superficiais.

Os teores de STD no período chuvoso variaram de 13 a 521 mg/L, com média de 106,3 mg/L, e no período de estiagem o mínimo observado foi de 14 mg/L e o máximo de 815 mg/L, com média de 119,2 mg/L. De modo geral, os valores de STD obtidos nas águas do aquífero Rio Branco são baixos, o que pode ser justificado pela constante renovação das águas associada à elevada precipitação pluviométrica, da ordem de 2.000 mm/ano e do grande número de dias de chuvas. Os valores de STD obtidos nas duas campanhas estão abaixo

do VMP de 1.000 mg/L da Portaria MS 2914/2011 e da Resolução CONAMA 396/2008, indicando que as águas podem ser usadas para consumo humano.

As águas do aquífero Rio Branco são essencialmente ácidas, com pH *in situ* no período chuvoso variando de 4,0 a 6,7, com média igual a 4,9; e no período seco oscilando entre mínimo de 3,0 e máximo de 5,6, com média de 4,7.

Os resultados de potencial redox (Eh) altos e positivos sugerem em termos médios que 95% dos poços possuem águas em condições oxidantes, ou seja, baixa atividade de elétrons.

De modo geral, os teores de sódio, potássio, cálcio e magnésio encontrados nas duas coletas de amostragem são baixos e se devem a presença de cátions nas águas oriundos dos solos mais ricos provenientes de rochas cristalinas.

Os teores de sódio nas águas do aquífero Rio Branco variaram entre 0,3 e 61,6 mg/L no período chuvoso, com média de 15,5 mg/L, e no período de estiagem os teores ficaram compreendidos entre 0,7 e 81,5 mg/L, com média igual a 15,7 mg/L. Em ambas as campanhas, todas as amostras apresentaram resultados de sódio abaixo do limite estabelecido pela Portaria MS 2914/2011 e Resolução CONAMA 396/2008, de 200 e 300 mg/L, indicando que as águas podem ser usadas para consumo humano e recreação, respectivamente.

As concentrações de potássio no período chuvoso oscilaram entre 0,1 e 8,5 mg/L, com média de 1,6 mg/L, e na estiagem a variação foi de 0,2 a 7,4 mg/L, com média de 1,7 mg/L.

Os valores medidos de cálcio no período chuvoso ficaram compreendidos entre 0,03 e 71,2 mg/L, com média de 4,2 mg/L; enquanto que na estiagem, as concentrações variaram de 0,1 a 84,7 mg/L, com média igual a 5,1 mg/L.

Os teores de magnésio no período chuvoso variaram de 0,1 a 23,2 mg/L, com média de 3,5 mg/L, enquanto que na estiagem os valores se revelaram bem próximos, oscilando entre 0,2 e 31,8 mg/L, com média de 3,1 mg/L.

Os valores de sulfato na primeira coleta variaram de 0,49 a 340,6 mg/L, apresentando média de 17,7 mg/L; enquanto que na segunda coleta, os teores variaram de 0,49 a 470,1 mg/L, com média de 28,3 mg/L.

Cerca de três poços (RBR14, RBR01 e RBR02) apresentaram valores anômalos de cálcio, magnésio e sulfato, e ao que tudo indica há uma influência antrópica com a prática agrícola, que possivelmente deve utilizar algum tipo de fertilizante. Sendo assim, com exceção desses 3 (três) poços supracitados, todas as demais amostras apresentaram teores de sulfato inferiores aos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 396/2008 para consumo humano (250 mg/L), dessedentação animal (1.000 mg/L) e recreação (400 mg/L).

Os teores de cloreto no período chuvoso variaram de 0,9 a 54,5 mg/L, com média de 16,6 mg/L; enquanto que na estiagem, a variação entre o mínimo e o máximo foi de 0,49 a 53,0 mg/L, com média de 15,3 mg/L. Em ambas as coletas, todas as amostras apresentaram teores de cloreto inferiores aos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 396/2008, de 250 mg/L para consumo humano; 100 a 700 mg/L para irrigação; e de 400 mg/L para recreação, indicando que as águas do aquífero Rio Branco podem ser empregadas para tais usos.

As análises de bicarbonato revelaram que 40% e 53,3% das amostras, respectivamente na primeira e segunda campanha, obtiveram valores iguais à zero. As concentrações de bicarbonato oscilaram no período chuvoso entre 0 e 38 mg/L, com média de 7,52 mg/L; enquanto que no período de estiagem as concentrações ficaram compreendidas entre 0 e 39 mg/L, com média de 8,1 mg/L. Os teores de bicarbonato se apresentaram mais elevados no período chuvoso devido à presença de dióxido de carbono existente nas águas de chuvas, que reagem com a água do aquífero, produzindo ácido carbônico que se dissocia em bicarbonato.

Com relação à dureza, no período chuvoso os valores oscilaram entre 0,4 e 273,1 mg/L, com média de 24,9 mg/L; enquanto que na estiagem, variou de 1,3 a 342,1 mg/L, com média de 25,6 mg/L. Tais resultados permitem classificar as águas do aquífero Rio Branco como do tipo mole, pois 91,5% das amostras apresentaram valores inferiores a 50 mg/L. Nas duas campanhas, nenhum dos poços amostrados ultrapassou o VMP recomendável pela Portaria MS 2914/2011, de 500 mg/L para consumo humano.

A presença de nitrato e de amônia nas águas do aquífero, nas duas campanhas, se deve provavelmente a proximidade dos poços com as fossas sanitárias.

As concentrações de nitrato no período chuvoso variaram de 0,09 a 10,2 mg/L, com média de 2,4 mg/L; enquanto que no período seco, os teores ficaram compreendidos entre 0,09 a 11,8 mg/L, com média de 2,2 mg/L. Apenas 7% dos poços no período chuvoso e 3% no período de estiagem apresentaram valores de nitrato que ultrapassaram o VMP de potabilidade recomendável pela Portaria MS 2914/2011, além de não serem indicadas para consumo humano e para recreação segundo a Resolução CONAMA 396/2008. Porém, todas as amostras analisadas nas duas campanhas poderiam ser utilizadas para a dessedentação animal, haja vista que não ultrapassaram os limites definidos pela Resolução citada.

De modo geral, a ocorrência de nitrito no aquífero é praticamente desprezível, haja vista que respectivamente na primeira e segunda campanha, 93% e 100% das amostras apresentaram teores abaixo do limite de detecção, e o máximo valor obtido foi de 0,133 mg/L, na primeira coleta. Todas as amostras analisadas nas duas coletas apresentaram teores de nitrito dentro do padrão de potabilidade estabelecido pela Portaria MS 2914/2011, de 1 mg/L, assim como poderiam ser usadas para o consumo humano, dessedentação de animais, irrigação e recreação, de acordo com a Resolução CONAMA 396/2008.

As concentrações de amônia no período chuvoso variaram de 0,09 a 1,2 mg/L, com média de 0,14 mg/L; enquanto que no período seco, os teores ficaram compreendidos entre 0,09 a 0,6 mg/L, com média de 0,15 mg/L. Nenhuma das amostras analisadas nas duas campanhas apresentou valores de amônia que ultrapassassem o VMP recomendável pela Portaria MS 2914/2011 para consumo humano de 1,5 mg/L.

Os teores de ferro no período chuvoso ficaram compreendidos entre 0,02 e 10,17 mg/L, com média de 1,65 mg/L; enquanto que no período seco variaram de 0,04 mg/L a 24,63 mg/L, com média de 2,75 mg/L. Dentre o total de amostras analisadas, 53% dos poços no período chuvoso e 57% no período de

estiagem, apresentaram valores que ultrapassaram o VMP de potabilidade recomendável pela Portaria MS 2914/2011, além de não serem indicadas para consumo humano e para recreação, segundo a Resolução CONAMA 396/2008. Além disso, 13% dos poços amostrados em ambas as coletas apresentaram teores de ferro que ultrapassaram os limites recomendados para irrigação, de acordo com a Resolução CONAMA 396/2008.

As concentrações de manganês no período chuvoso variaram de 0,002 a 3,41 mg/L, com média de 0,36 mg/L; enquanto que no período seco, oscilaram entre 0,002 mg/L e 3,99 mg/L, com média igual a 0,44 mg/L. Em ambas as campanhas, observou-se a ocorrência de 57% de valores acima do VMP de 0,1 mg/L estabelecido pela Portaria MS 2914/2011, bem como a não indicação dessas águas para consumo humano e para recreação segundo a Resolução CONAMA 396/2008. Além disso, 87% dos poços no período chuvoso e 80% no período de estiagem apresentaram teores de manganês que ultrapassaram os limites recomendados para dessedentação animal, de acordo com a Resolução CONAMA 396/2008. Com relação ao uso das águas para irrigação, verificou-se que 47% das amostras no período chuvoso e 43% no período seco ultrapassaram os limites de 0,2 mg/L definidos na resolução CONAMA 396/2008.

Os valores de ferro e de manganês mais elevados na estiagem, inclusive acima do VMP, são resultados da influência da zona de aeração, que especialmente no período chuvoso se encontra quase totalmente saturada por águas de infiltração, e volta a ter espaços vazios preenchidos por oxigênio, o que, conseqüentemente, eleva o valor de potencial redox, produzindo a oxidação do ferro e do manganês.

As amostras analisadas dos metais pesados arsênio, cádmio, cromo e mercúrio apresentaram teores abaixo do limite de detecção, ao passo que as de bário, chumbo, cobre e zinco obtiveram teores abaixo do VMP definido pela Portaria MS 2914/2011 e Resolução CONAMA 396/2008. O níquel foi o único metal pesado que ultrapassou o limite estabelecido pela Resolução CONAMA, no poço RBR19, onde suas águas não seriam recomendadas para consumo humano. Ao que tudo indica, esse resultado está associado ao descarte inadequado de tintas usadas na sinalização de veículos na área de propriedade do Corpo de Bombeiros.

No que se refere às análises de BTEX, a maioria das amostras apresentaram resultados abaixo do limite de detecção, assim como não ultrapassaram os limites de potabilidade definidos pela Portaria MS 2914/2011 e Resolução CONAMA 396/2008.

Com relação às análises de fenóis, apenas o poço RBR09 apresentou valor superior ao limite permitido para dessedentação animal e recreação, podendo ser utilizado apenas para o consumo humano, segundo os padrões da resolução CONAMA 396/2008. Esse resultado pode estar associado à contaminação por postos de combustível.

Os resultados de isótopos ambientais de oxigênio-18 e deutério mostraram que as águas são provenientes de recarga de chuvas diretas, com perda de 28% por evaporação.

Segundo as datações efetuadas com Trício, as águas do aquífero Rio Branco possuem mistura de água submoderna com recarga recente.

A avaliação dos parâmetros biológicos indicou a presença de Coliformes totais em 77% dos casos no período chuvoso e de 80% no período seco. No que se refere à contaminação por *E. coli*, verificou-se a presença em 37% das amostras no período chuvoso e de 33% no período seco. Essas amostras estão fora dos padrões biológicos recomendados pela Portaria MS 2914/2011, bem como nos limites definidos pela Resolução CONAMA 396/2008, indicando que as suas águas não podem ser utilizadas para consumo humano, dessedentação animal e recreação. Isto se deve a contaminação das águas subterrâneas por fossas sépticas devido à ausência de sistema de esgotamento sanitário na região e também pelo fato de que os poços tubulares, em sua maioria, serem pouco profundos e construídos com técnicas inapropriadas, que deixam os espaços anelares sem a devida proteção sanitária, o que pode acarretar doenças de veiculação hídrica.

Quanto à classificação das águas subterrâneas de acordo com a composição química é possível verificar que as águas do aquífero Rio Branco são Cloretadas Sódicas em sua maioria, segundo indicação dos diagramas de Piper e Stiff; e possuem águas de boa potabilidade exceto pelo parâmetro sulfato, com classificação passável, de acordo com os diagramas de Schoeller-Berkaloff.

No que concerne à avaliação das águas para irrigação, obtida por meio da Razão de Adsorção do Sódio (SAR), verifica-se que as águas do aquífero Rio Branco, em 97% dos casos, possuem risco de sódio baixo e salinidade que varia de fraquíssima a alta, indicando que as águas, com exceção do poço RBR01, podem ser usadas para o cultivo de boa parte dos vegetais.

De acordo com a Metodologia de Mckee & Wolf (1963), as águas do aquífero Rio Branco podem ser utilizadas para a dessedentação animal sem restrições, haja vista que os teores de STD encontrados em ambas as campanhas foram baixos.

5.5 – Aquífero Içá

No contexto regional, o aquífero Içá está situado na Bacia do Solimões, do Amazonas e do Acre.

A Formação Içá sobrepõe discordantemente a Formação Solimões. Exibe espessura de até 150 m e consiste em siltitos, arenitos finos a médio e conglomerados intraformacionais (seixos de pelitos), brancos a rosados e raros argilitos cinza com restos de vegetais. Exibe estratificação cruzada acanalada, estratificação inclinada heterolítica, estratificação plano paralela relacionadas a depósitos fluviais meandrantés (Maia *et al.*, 1977; Sarges *et al.*, 2010).

Com o intuito de avaliar a qualidade das águas subterrâneas do Aquífero Içá foram selecionados 30 poços para análises físico-químicas e bacteriológicas nas cidades de Barcelos, Coari, Lábrea, Tefé, Fonte Boa e Humaitá no Estado do Amazonas. Além dessas análises, também foram realizadas leituras dos isótopos ambientais: trício, deutério, oxigênio-18 e carbono-14.

Os resultados obtidos no aquífero Içá mostraram que 80% e 83% das amostras, respectivamente na primeira e segunda campanha, apresentaram

resultados inferiores ao limite de detecção de 5 uH. Dentre os valores quantificáveis, 10% no período chuvoso e 3% na estiagem ultrapassaram o VMP de potabilidade de 15 uH da Portaria MS 2914/2011, sugerindo que estas águas não são próprias para consumo humano. Esses resultados acima do VMP foram obtidos nos poços CRI01 (25 uH), CRI02 (40 uH) e CRI05 (24 uH) na cidade de Coari, na primeira campanha; e no poço TFF03 (24 uH), em Tefé, na segunda campanha.

No aquífero Içá, 23% das amostras no período chuvoso apresentaram valores de turbidez abaixo do limite de detecção de 0,1 uT, enquanto que no período de estiagem foram 60% das análises. Na primeira campanha 10% dos poços apresentaram valores acima do VMP de potabilidade da Portaria MS 2914/2011, ao passo que na segunda campanha apenas 3% dos poços ultrapassam os padrões para consumo humano. Os resultados acima do VMP no período chuvoso foram obtidos nos poços CRI01 (6,4 uT) e CRI02 (8,8 uT) na cidade de Coari, e no poço LBR05 (52 uT) na cidade de Lábrea; enquanto que na estiagem o poço fora do padrão foi o CRI05 (14 uT) na cidade de Coari.

A condutividade elétrica das águas do aquífero Içá variou no período chuvoso de 12 a 647 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com média de 76,8 $\mu\text{S}/\text{cm}$; enquanto que no período seco, a variação entre o mínimo e o máximo foi de 11 a 511 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com média de 78,67 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Os valores de condutividade elétrica obtidos no aquífero Içá são baixos, haja vista que 91,5% dos poços apresentaram resultados inferiores a 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$, o que permite classificar as águas do aquífero como potáveis. Isto é reflexo do clima da região amazônica, com alta incidência de chuvas, o que assegura a renovação constante das águas dos aquíferos e dos rios ali presentes.

A temperatura das águas do aquífero Içá varia no mínimo de 25,8°C ao máximo de 41,7 °C. Os valores máximos de temperatura encontrados nas duas campanhas possivelmente decorrem da influência da temperatura ambiente.

Os teores de STD variaram no período chuvoso de 6 a 444 mg/L, com média de 53,5 mg/L; enquanto que na estiagem, o mínimo observado foi de 8 mg/L e o máximo de 252 mg/L, com média de 53,03 mg/L. Os valores de STD obtidos nas duas campanhas estão abaixo do VMP de 1.000 mg/L da Portaria MS 2914/2011 e da Resolução CONAMA 396/2008, indicando que as águas podem ser usadas para consumo humano.

As águas do aquífero Içá são essencialmente ácidas, com pH *in situ* variando na primeira coleta de 3,9 a 6,2, com média de 5,2; e na segunda coleta de 4,2 a 6,5, com média de 5,46.

Os resultados de potencial redox (Eh) altos e positivos sugerem que 96,5% dos poços possuem águas em condições oxidantes, ou seja, baixa atividade de elétrons.

De modo geral, os teores de sódio, potássio, cálcio e magnésio encontrados nas duas coletas de amostragem são baixos e podem ser justificados pela alta pluviosidade na região amazônica, a qual favorece a constante renovação das águas e conseqüentemente a diluição dos elementos presentes.

Os teores de sódio variaram entre 0,16 e 12,8 mg/L no período chuvoso, com média de 3,37 mg/L; e no período de estiagem, os teores estão compreendidos entre 0,14 e 26,38 mg/L, com média de 4,97 mg/L. De acordo com a Portaria

MS 2914/2011, todos os valores de sódio encontrados nas duas campanhas estão abaixo do VMP de 200 mg/L, padrão definido como de potabilidade para consumo humano.

Os teores de cloreto no período chuvoso variaram de 0,9 a 36,54 mg/L, com média de 4,12 mg/L; e no período de estiagem, oscilaram de 0,49 a 40,94 mg/L, com média de 4,77 mg/L.

Os teores de sulfato no período chuvoso oscilaram de 0,49 a 3,12 mg/L, com média de 1,02 mg/L; enquanto que no período seco, variaram de 0,49 a 9,71 mg/L, com média de 1,05 mg/L.

Todos os poços amostrados em ambas as campanhas apresentaram resultados de cloreto e sulfato inferiores ao VMP de 250 mg/L estabelecido pelo Portaria MS 2914/2011, bem como estiveram dentro dos padrões da Resolução CONAMA 396/2008, indicando que as águas do aquífero podem ser usadas para consumo humano, irrigação e recreação.

As análises de teores de bicarbonato revelaram que 37% dos poços, em ambas as campanhas de amostragem, os valores obtidos foram iguais à zero. No período chuvoso os valores oscilaram entre 0,0 e 35 mg/L, com média de 11,17 mg/L; enquanto que na estiagem, as concentrações ficaram compreendidas entre 0,0 e 40,0 mg/L, com média de 10,63 mg/L. Os teores de bicarbonato são mais elevados no período de estiagem devido à presença de gás carbônico no solo gerado por meio da decomposição de matéria orgânica e respiração das raízes das plantas.

No tocante a dureza, os valores oscilaram entre 0,63 e 81,30 mg/L, com média de 8,19 mg/L no período chuvoso; enquanto que na estiagem, variou de 0,61 a 68,43 mg/L, com média de 8,88 mg/L. Esses teores de dureza permitem classificar as águas do aquífero como do tipo mole, pois 97% das amostras apresentaram valores inferiores a 50 mg/L. Nas duas campanhas, nenhum dos poços amostrados ultrapassou o VMP recomendável pela Portaria MS 2914/2011, de 500 mg/L para consumo humano.

Dentre o total de amostras analisadas nas duas campanhas, 7% dos poços no período chuvoso e 3% no período de estiagem apresentaram valores de nitrato que ultrapassaram o VMP de potabilidade de 10 mg/L recomendável pela Portaria MS 2914/2011, além de não serem indicadas para consumo humano e para recreação segundo a Resolução CONAMA 396/2008. Contudo, todas as amostras analisadas nas duas campanhas poderiam ser utilizadas para a dessedentação animal. Os valores de nitrato encontrados nas águas do aquífero Içá superiores aos limites permitidos para consumo humano se devem a contaminação oriunda principalmente da ausência de saneamento básico, haja vista em muitos casos, há a proximidade das fossas com os poços.

A presença de nitrito e amônia no aquífero Içá são praticamente desprezíveis, uma vez que a maioria das amostras, em média 99%, apresentaram resultados abaixo do limite de detecção, o que é coerente, pois esses elementos são convertidos facilmente em nitrato, o que corrobora com a presença de nitrato elevado no aquífero, inclusive com amostras acima do padrão de potabilidade.

Os teores de ferro e manganês no aquífero são elevados, sobretudo no período de estiagem, apresentando respectivamente 32% e 11,5% dos poços com teores que se encontram acima do padrão de potabilidade para consumo

humano segundo a Portaria MS 2914/2011 e Resolução CONAMA 396/2008, além de não serem indicadas em alguns casos o uso da água para irrigação e dessedentação animal (28,5% das amostras) no caso do manganês.

A presença de ferro e manganês elevada no aquífero se deve sobretudo às águas ácidas da região Amazônica e ao intemperismo químico regional da PHA.

A avaliação dos parâmetros biológicos indicou a presença de Coliformes totais na primeira coleta em 63% dos casos, e de 70% na segunda coleta. Além disso, há a presença de *E. Coli* em 20% e 30% dos poços, respectivamente na primeira e segunda campanha. Esses resultados sugerem que as águas do aquífero Içá estão fora dos padrões microbiológicos definidos pela Portaria MS 2914/2011 e Resolução CONAMA 396/2008, indicando que as suas águas não podem ser utilizadas para consumo humano, dessedentação animal e recreação. Isto resulta da contaminação das águas subterrâneas por fossas sépticas devido à ausência de sistema de esgotamento sanitário na região e também pelo fato de que os poços tubulares, em sua maioria serem pouco profundos e construídos com técnicas inapropriadas, que deixam os espaços anelares sem a devida proteção sanitária. A ocorrência desses parâmetros biológicos é extremamente preocupante, pois pode ocasionar doenças de veiculação hídrica na população que utiliza dessas águas para os mais diversos usos, incluindo consumo humano.

Os resultados das análises de isótopos ambientais de oxigênio-18 e deutério levaram a concluir que a recarga do aquífero Içá possui 84,96% de perda por evaporação, o que se deve a abundância da chuva na região, que gera águas mais leves e propícias a evaporação;

Segundo as datações efetuadas com trício, no aquífero Içá, há presença de água submoderna com recarga anterior a 1952, e mistura de água submoderna com recarga recente.

Quanto às idades convencionais de carbono-14, há presença de águas modernas com menos de 200 anos BP, ou seja, águas mais rasas, e de paleoáguas com idade da ordem de 200 anos, o que indica águas mais profundas.

No que se refere à classificação das águas subterrâneas de acordo com a composição química é possível verificar que as águas do aquífero Içá em sua maioria são Bicarbonatadas Sódicas e Cloretadas Sódicas, e de boa potabilidade, segundo indicação dos diagramas de Piper, Stiff e Schoeller-Berkaloff.

No que concerne à avaliação das águas para irrigação, obtida por meio da Razão de Adsorção do Sódio (SAR), verifica-se que as águas do aquífero Içá possuem risco de sódio baixo e salinidade que varia entre fraquíssima a média, indicando que as águas podem ser usadas para o cultivo de boa parte dos vegetais.

De acordo com a Metodologia de Mckee & Wolf (1963), as águas do aquífero Içá podem ser utilizadas para a dessedentação animal sem restrições, haja vista que os teores de STD encontrados em ambas as campanhas foram baixos.

5.6 - Aquífero Tucunaré

No contexto regional, o aquífero Tucunaré está localizado na Província Amazonas, que representa uma das bacias sedimentares fanerozoicas do Brasil, enquanto que no contexto local, o aquífero Tucunaré está situado na Bacia do Marajó. A litologia dos depósitos da Formação Tucunaré é constituída de materiais areno-argilosos, arenosos e conglomeráticos.

O aquífero Tucunaré na região de Macapá é fortemente influenciado pelo **Fenômeno das Ressacas**, o qual pode ser definido pelo aumento do nível do mar provocado pela elevação da maré astronômica e/ou maré meteorológica, acompanhado de ondas com amplitude maior que o normal. O termo “áreas de ressaca” é utilizado regionalmente no Amapá para designar as zonas baixas que possuem bacias de acumulação de águas influenciadas pelo regime das marés e das chuvas.

Essas zonas baixas do ponto de vista geológico representam planícies interiores ocupadas por depósitos aluviais e flúvio-marinhos. Os depósitos de planície localizados nas proximidades do rio Amazonas estão sujeitos a inundações, principalmente no pico da cheia de março e abril, que coincide com o período chuvoso da região, o que acarreta, do ponto de vista da qualidade de água subterrânea, aumento significativo nos teores de sólidos totais dissolvidos. Esse aumento significativo em grande parte dos teores se realiza por influência da faixa de transição entre as águas doces e salgadas, que constitui uma zona de mistura, originada pelo fenômeno da dispersão hidrodinâmica.

A qualidade das águas subterrâneas do Aquífero Tucunaré foi avaliada mediante a seleção de 30 poços para análises físico-químicas e bacteriológicas na cidade de Macapá, no Amapá. Além dessas análises, também foram realizadas leituras de metais pesados, BTEX, fenóis e isótopos ambientais (trício, deutério, oxigênio-18 e carbono-14).

Os resultados obtidos no aquífero Tucunaré mostraram que 92% das amostras coletadas apresentaram valores de cor inferior ao limite de detecção de 5 uH; apenas 1 poço (MPA29), com valor de 690 uH na primeira campanha, ultrapassou o VMP de potabilidade de 15 uH da Portaria MS 2914/2011, sugerindo que esta água não é própria para consumo humano. Esse resultado provavelmente se deve a contaminação por lançamento de esgoto *in natura*, próximo ao local de instalação do poço, que se encontra em terreno alagado e baldio em uma zona de ressaca.

No período chuvoso e de estiagem, respectivamente, 23% e 53% das análises apresentaram valores de turbidez abaixo do limite de detecção de 0,1 uT; na primeira e segunda campanha, simultaneamente, 13% e 10% dos poços apresentaram valores de turbidez acima do VMP de potabilidade de 5 uT da Portaria MS 2914/2011.

Os teores da condutividade elétrica (CE) no período chuvoso variaram de 46 a 274 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com média de 141,9 $\mu\text{S}/\text{cm}$; enquanto que no período seco a variação foi de 11 a 236 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com média de 83 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Os valores de CE obtidos no aquífero Tucunaré, em sua maioria, são baixos, haja vista que 73% e 97% dos poços, respectivamente na primeira e segunda coleta, apresentaram resultados inferiores a 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Tais resultados permitem

classificar as águas do aquífero como potáveis. Isto é reflexo do clima da região amazônica, com alta incidência de chuvas, o que assegura a renovação constante das águas dos aquíferos e dos rios ali presentes. Os valores de CE apresentaram forte correlação com o parâmetro nitrato nas duas campanhas de amostragem, sugerindo que há contaminação das águas subterrâneas a partir da infiltração do esgoto *in natura*.

A temperatura das águas do aquífero Tucunaré varia no mínimo de 24,4°C ao máximo de 32,3 °C.

No período chuvoso, os teores de STD variaram de 38 a 229 mg/L, com média de 105,2 mg/L; enquanto que no período de estiagem, o mínimo observado foi de 5 mg/L e o máximo de 159 mg/L, com média igual a 58,6 mg/L. Os valores de STD se apresentaram mais elevados no período chuvoso. Ao que tudo indica é resultado do Fenômeno das Ressacas na região, onde ocorrem infiltrações de origem fluvial através do rio Amazonas no pico do período de altas águas, que inundam as áreas de ressaca. Além desse fenômeno natural, outro fator que contribui para esse resultado é a ausência de esgotamento sanitário na região, que permite infiltração de *esgoto in natura* principalmente no período de cheias. Os valores de STD obtidos nas duas campanhas estão abaixo do VMP de 1.000 mg/L da Portaria MS 2914/2011 e da Resolução CONAMA 396/2008, indicando que as águas podem ser usadas para consumo humano.

As águas do aquífero Tucunaré são essencialmente ácidas, com pH *in situ* variando no período chuvoso entre 4,0 e 6,4, com média de 5,3; e no período seco oscilando entre 4,5 e 5,7, com média de 5,1.

Os resultados de potencial redox (Eh) altos e positivos sugerem em termos médios que 95% dos poços possuem águas em condições oxidantes, ou seja, baixa atividade de elétrons.

Os teores de potássio no período chuvoso oscilaram entre 0,02 e 12,5 mg/L, com média de 2,3 mg/L; ao passo que no período de estiagem, a variação foi de 0,1 a 4,1 mg/L, com média de 1,0 mg/L. Os teores de potássio encontrados nas duas coletas de amostragem são baixos e podem ser justificados pela alta pluviosidade na região amazônica, a qual favorece a constante renovação das águas e conseqüentemente a diluição dos elementos presentes.

Os teores de sódio, cálcio, magnésio e cloreto se apresentaram mais elevados no período chuvoso, indicando a influência do fenômeno ressaca, que favorece a intrusão de águas marinhas através das "áreas de ressaca" na região, que se constituem em planícies aluviais, as quais são periodicamente inundadas pelo rio Amazonas.

Os teores de sódio variaram entre 2 e 39,4 mg/L no período chuvoso, com média de 15,7 mg/L; e no período de estiagem oscilaram entre 0,8 e 28,6 mg/L, com média de 10,1 mg/L. De acordo com a Portaria MS 2914/2011, todos os valores de sódio encontrados nas duas campanhas estão abaixo do VMP de 200 mg/L, padrão definido como de potabilidade para consumo humano, assim como dentro dos limites da Resolução CONAMA 396/2008, indicando que as águas podem ser usadas para consumo humano e recreação.

Os teores de cloreto variaram de no mínimo 0,8 mg/L a 51,6 mg/L nas duas campanhas de amostragem, valores muito abaixo do VMP de potabilidade de

250 mg/L da Portaria MS 2914/2011 e da Resolução CONAMA 396/2008, sugerindo que as águas podem ser usadas para consumo humano, irrigação e recreação.

Os teores de sulfato no período chuvoso variaram de 0,49 a 6,4 mg/L, apresentando média de 1,4 mg/L; enquanto que no período seco, os teores variaram de 0,49 a 6,8 mg/L, com média de 1,2 mg/L. Apesar de nenhuma das amostras ultrapassar o VMP de potabilidade para sulfato definido pela Portaria MS 2914/2011 e Resolução CONAMA 396/2008, a sua presença nas águas do aquífero Tucunaré, em ambas as campanhas, se deve provavelmente ao contato dos poços com as fossas sanitárias, as quais em muitos casos são construídas muito próximas, o que favorece a infiltração do esgoto *in natura* e consequentemente a contaminação das águas subterrâneas.

De modo geral, os teores de bicarbonato são baixos e muito próximos nas duas coletas, indicando que não há influência da sazonalidade atuando neste parâmetro, haja vista que 83% das amostras em ambas as campanhas obtiveram valores iguais à zero.

Os teores da dureza no período chuvoso oscilaram entre 0,4 e 29,3 mg/L, com média de 5,8 mg/L; e no período de estiagem, variou de 0,6 a 15,1 mg/L, com média de 3,9 mg/L. Esses valores revelam que as águas do aquífero Tucunaré são do tipo mole, pois 100% das amostras apresentaram valores inferiores a 50 mg/L. Nas duas campanhas, nenhum dos poços amostrados ultrapassou o VMP recomendável pela Portaria MS 2914/2011, de 500 mg/L para consumo humano.

Dentre o total de amostras analisadas nas duas campanhas, 30% dos poços no período chuvoso e 10% no período de estiagem, apresentaram valores de nitrato que ultrapassaram o VMP de potabilidade de 10 mg/L, recomendável pela Portaria MS 2914/2011, além de não serem indicadas para consumo humano e para recreação segundo a Resolução CONAMA 396/2008. Contudo, todas as amostras analisadas nas duas campanhas poderiam ser utilizadas para a dessedentação animal, haja vista que não ultrapassaram os limites definidos pela Resolução citada. Tais resultados sugerem que no período chuvoso, quando ocorre o fenômeno da ressaca na região, provavelmente as fossas sépticas transbordam juntamente com as galerias pluviais, que se misturam as águas superficiais e posteriormente infiltram no lençol freático, ocasionando a contaminação das águas subterrâneas.

Os teores de nitrito são praticamente desprezíveis nas águas do aquífero, uma vez que 98,5% das amostras apresentaram resultados abaixo do limite de detecção, e o único valor quantificável foi de 0,11 mg/L na segunda campanha, muito abaixo do VMP de 1 mg/L de potabilidade da Portaria MS 2914/2011 e Resolução CONAMA 396/2008, indicando que as águas podem ser usadas para o consumo humano, dessedentação de animais, irrigação e recreação.

Na primeira e segunda campanha, respectivamente, 20% e 10% das amostras analisadas apresentaram valores de amônia que ultrapassaram o VMP recomendável pela Portaria MS 2914/2011 para consumo humano de 1,5 mg/L.

Os teores de ferro nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré variaram de no mínimo 0,005 a máximo de 9,5 mg/L nas duas campanhas. No período chuvoso e de estiagem, respectivamente, 37% e 30% dos poços apresentaram

valores que ultrapassaram o VMP de potabilidade recomendável pela Portaria MS 2914/2011, além de não serem indicadas para consumo humano e para recreação segundo a Resolução CONAMA 396/2008. Além disso, 7% dos poços amostrados na primeira campanha apresentaram teores de ferro que ultrapassaram os limites recomendados para irrigação, de acordo com a Resolução CONAMA 396/2008.

Os teores de manganês no período chuvoso variaram de 0,00009 a 0,08 mg/L, com média de 0,008 mg/L; e no período seco, oscilou de 0,0009 a 0,06 mg/L, com média igual a 0,006 mg/L. Em ambas as campanhas, observou-se que nenhum dos poços apresentou teores de manganês acima do VMP de 0,1 mg/L estabelecido pela Portaria MS 2914/2011, bem como ultrapassou os limites previstos na Resolução CONAMA 396/2008, no que se refere aos usos da água para consumo humano, irrigação e recreação. Apenas 3% dos poços em ambas as campanhas apresentaram teores de manganês que ultrapassaram os limites recomendados para dessedentação animal, de acordo com a Resolução CONAMA 396/2008. Os resultados acima do VMP foram obtidos nos poços MPA12 (0,08 mg/L) e MPA04 (0,06 mg/L), respectivamente na primeira e segunda campanha.

A avaliação dos parâmetros biológicos indicou a presença de Coliformes totais no período chuvoso em 63% dos casos e no período de estiagem em 40% das amostras. Além da presença de C. totais, também foi verificada a ocorrência de *E. Coli* em 10% das amostras em ambas as coletas. Isto significa que as águas do aquífero Tucunaré estão fora dos padrões biológicos recomendados pela Portaria MS 2914/2011 e pela Resolução CONAMA 396/2008, indicando que as suas águas não podem ser utilizadas para consumo humano, dessedentação animal e recreação. Esses resultados correspondem à contaminação das águas subterrâneas por fossas sépticas, devido à ausência de sistema de esgotamento sanitário na região e também pelo fato de que os poços tubulares em sua maioria serem pouco profundos e construídos com técnicas inapropriadas, que deixam os espaços anelares sem a devida proteção sanitária, podendo acarretar diversas doenças de veiculação hídrica.

Todas as amostras analisadas dos metais pesados arsênio, cádmio, cromo e mercúrio apresentaram teores abaixo do limite de detecção, ao passo que bário e zinco obtiveram teores abaixo do VMP definido pela Portaria MS 2914/2011 e Resolução CONAMA 396/2008.

Alguns poços identificados nas proximidades de áreas com presença de descarte inadequado de resíduos sólidos apresentaram teores de chumbo, cobre e níquel acima dos limites definidos pela Portaria MS 2914/2011 e da Resolução CONAMA 396/2008, não sendo suas águas indicadas para consumo humano. Os resultados acima do VMP de chumbo (0,019 mg/L) e cobre (0,23 mg/L) foram obtidos no poço MPA14; enquanto que o valor fora do padrão de níquel foi verificado no poço MPA28 (0,07 mg/L).

No que se refere às análises de BTEX e fenóis, a maioria das amostras apresentaram resultados inferiores ao limite de detecção, bem como todas estiveram dentro dos limites de potabilidade definidos pela Portaria MS 2914/2011 e Resolução CONAMA 396/2008.

Os resultados dos isótopos ambientais revelaram que a recarga do aquífero Tucunaré provém de águas de chuva, de acordo com as análises de oxigênio-

18 e deutério. Segundo as datações efetuadas com trício as águas do aquífero têm idade submoderna com recarga anterior a 1952 e mistura de água submoderna com recarga recente.

Quanto às idades convencionais de carbono-14, há presença de águas modernas com menos de 200 anos, ou seja, águas mais rasas, e de paleoáguas com idade da ordem de 20.000 anos, o que indica águas mais profundas.

No que se refere à classificação das águas subterrâneas de acordo com a composição química é possível verificar que as águas do aquífero Tucunaré em sua maioria são Cloretadas Sódicas e de boa potabilidade, segundo indicação dos diagramas de Piper, Stiff e Schoeller-Berkaloff.

No que concerne à avaliação das águas para irrigação, obtida pela Razão de Adsorção do Sódio (SAR), verifica-se que as águas do aquífero Tucunaré possuem risco de sódio que varia de baixo a médio e salinidade entre fraquíssima a média, indicando que as águas podem ser usadas para o cultivo de boa parte dos vegetais.

De acordo com a Metodologia de Mckee & Wolf (1963), as águas do aquífero Tucunaré podem ser utilizadas para a dessedentação animal sem restrições, haja vista que os teores de STD encontrados em ambas as campanhas foram baixos.

5.7 - Aquífero Alter do Chão

No contexto regional, o aquífero Alter do Chão está localizado na bacia sedimentar da Província Amazonas, enquanto que no contexto local o aquífero Alter do Chão está situado na Bacia do Amazonas. De acordo com o relatório de geologia da PHA (**Volume II**) a Formação Alter do Chão é constituída por clásticos continentais de idade cenozoica (Paleoceno-Neomioceno), representados por arenitos caulínicos, finos a grossos, às vezes com níveis conglomeráticos. Intercaladas na sequência arenosa, ocorrem camadas argilosas, cuja coloração varia de avermelhada a mosqueada, esbranquiçada, creme e lilás, geralmente pouco consolidadas, às vezes contendo lentes de arenito friável.

Com o intuito de avaliar a qualidade das águas subterrâneas do aquífero Alter do Chão, foram selecionados 70 poços, distribuídos nas cidades de Almeirim e Santarém no Pará, e de Manaus e Parintins no Amazonas, para análises físico-químicas e bacteriológicas. Além dessas análises, também foram realizadas leituras de metais pesados, BTEX, fenóis e isótopos ambientais (trício, deutério, oxigênio-18 e carbono-14).

Os resultados obtidos no aquífero Alter do Chão mostraram que no período chuvoso e de estiagem, respectivamente, 66% e 93% das amostras coletadas apresentaram valores de cor inferior ao limite de detecção de 5 uH; apenas 10% dos poços na primeira campanha ultrapassaram o VMP de potabilidade de 15 uH da Portaria MS 2914/2011, sugerindo que estas águas não são próprias para consumo humano.

Na primeira e segunda campanha, respectivamente, 21% e 96% das amostras apresentaram valores de turbidez abaixo do limite de detecção de 0,1 uT. No período chuvoso, 3% dos poços apresentaram valores acima do VMP de

potabilidade da Portaria MS 2914/2011, enquanto que no período de estiagem, foi apenas 1% dos poços.

A condutividade elétrica (CE) das águas do aquífero Alter do Chão variou no período chuvoso de 12 a 338 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com média de 94,27 $\mu\text{S}/\text{cm}$; enquanto que no período seco a variação foi de 8,7 a 321 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com média igual a 91,26 $\mu\text{S}/\text{cm}$. De modo geral, os valores de CE no aquífero são baixos, haja vista que 89% e 84% dos poços, respectivamente na primeira e segunda campanha, apresentaram valores abaixo de 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$, o que permite classificar as águas como potáveis. Tais resultados são reflexo dos altos índices de precipitação pluviométrica da Região Amazônica, associada a elevada frequência das chuvas, que assegura uma quase permanente renovação das águas dos aquíferos e dos rios ali presentes.

A temperatura das águas do aquífero Alter do Chão varia no mínimo de 26°C ao máximo de 33,5 °C.

Os teores de STD no aquífero Alter do Chão variaram no período chuvoso de 9 a 241 mg/L, com média de 65,43 mg/L; e no período de estiagem, oscilaram entre 5 e 228 mg/L, com média de 63,83 mg/L. Todos os valores de STD obtidos estão abaixo do VMP de 1.000 mg/L da Portaria MS 2914/2011 e da Resolução CONAMA 396/2008, indicando que as águas podem ser usadas para consumo humano.

As águas do aquífero Alter do Chão são essencialmente ácidas, com pH *in situ* variando no período chuvoso entre 3,12 e 8,2 com média de 5,16; e no período seco, oscilando entre o mínimo de 3,9 e o máximo de 6,0 com média igual a 4,96.

Os resultados de potencial redox (Eh) altos e positivos sugerem em termos médios que 97,5% dos poços possuem águas em condições oxidantes, ou seja, baixa atividade de elétrons.

De modo geral, os teores de sódio, potássio, cálcio e magnésio encontrado nas duas coletas de amostragem são baixos e podem ser justificados pelo intemperismo químico da região, bem como à constante renovação das águas subterrâneas devido à elevada precipitação da Região Amazônica.

Os teores de sódio variam entre 0,13 e 30,69 mg/L no período chuvoso, com média de 6,84 mg/L; e no período de estiagem oscilam entre 0,24 e 23,66 mg/L, com média de 6,08 mg/L. De acordo com a Portaria MS 2914/2011, todos os valores de sódio encontrados nas duas campanhas estão abaixo do VMP de 200 mg/L, padrão definido como de potabilidade para consumo humano, assim como dentro dos limites da Resolução CONAMA 396/2008, indicando que as águas podem ser usadas para consumo humano e recreação.

Os valores de cloreto no período chuvoso variaram de 0,99 a 28,91 mg/L, com média de 7,54 mg/L, e no período de estiagem, a variação entre o mínimo e o máximo foi de 0,49 a 24,81 mg/L, com média de 7,06 mg/L. Todos os poços amostrados, em ambas as campanhas, apresentaram resultados de cloreto inferiores ao VMP estabelecido pela Portaria MS 2914/11, assim como dentro dos padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA 396/2008, indicando que as águas do aquífero Alter do Chão podem ser empregadas para consumo humano, irrigação e recreação.

Os teores de sulfato nas águas subterrâneas do aquífero Alter do Chão no período chuvoso variam de 0,49 a 11,15 mg/L, com média de 0,99 mg/L, e no período seco, oscilam entre 0,49 a 8,8 mg/L, com média de 1,01 mg/L. Apesar de nenhuma das amostras ultrapassar os limites recomendados da Portaria MS 2914/2011 e da Resolução CONAMA 396/2008, a presença de sulfato em ambas campanhas nas águas do aquífero Alter do Chão sugere que está ocorrendo contaminação das águas subterrâneas por infiltração do esgoto *in natura*, fato que se deve provavelmente ao contato dos poços com as fossas sanitárias.

As análises de bicarbonato revelaram, de modo geral, resultados muito baixos, inclusive com teores iguais à zero em 71% das amostras na primeira campanha e 84% na segunda campanha. No período chuvoso os valores foram mais elevados, oscilando entre 0 e 260 mg/L, com média igual a 6,25 mg/L; enquanto que na estiagem, os valores ficaram compreendidos entre 0 e 14 mg/L, com média de 1,41 mg/L. Isto provavelmente se deve à presença de dióxido de carbono existente nas águas de chuvas, que reagem com a água do aquífero produzindo ácido carbônico que se dissocia em bicarbonato.

Os teores de dureza nas águas do aquífero Alter do Chão no período chuvoso oscilaram entre 0,13 e 32,53 mg/L, com média de 5,68 mg/L; e no período de estiagem, variou de 0,09 a 27,46 mg/L, com média de 6,0 mg/L. Esses resultados permitem concluir que as águas do aquífero são do tipo mole, pois 100% das amostras apresentaram valores inferiores a 50 mg/L. Nas duas campanhas nenhum dos poços amostrados ultrapassou o VMP recomendável pela Portaria MS 2914/2011, de 500 mg/L para consumo humano.

Dentre o total de amostras, 17% dos poços no período chuvoso e 14% no período de estiagem apresentaram valores de nitrato que ultrapassaram o VMP de potabilidade recomendável pela Portaria MS 2914/2011, além de não serem indicadas para consumo humano e para recreação, segundo a Resolução CONAMA 396/2008. Porém, todas as amostras analisadas nas duas campanhas poderiam ser utilizadas para a dessedentação animal, haja vista que não ultrapassaram os limites definidos pela Resolução citada. Esses resultados são coerentes, pois se verificou que há uma forte correlação entre o parâmetro nitrato e as variáveis CE, cloreto e STD, o que sugere contaminação de ordem antrópica, como por exemplo, esgoto *in natura*.

Os teores de nitrito no aquífero Alter do Chão são praticamente desprezíveis, uma vez que, em termos médios, 99% das amostras apresentaram valores abaixo do limite de detecção. Apenas o poço MAU07 na cidade de Manaus, em ambas as campanhas de amostragem, apresentou valores quantificáveis, respectivamente de 0,075 mg/L e 0,289 mg/L, teores muito abaixo do VMP de 1 mg/L, padrão de potabilidade da Portaria MS 2914/2011, o que sugere que as águas poderiam ser usadas para o consumo humano, dessedentação de animais, irrigação e recreação, de acordo com a Resolução CONAMA 396/2008.

Dentre o total de amostras analisadas, apenas 4% dos poços na segunda campanha, apresentaram valores de amônia que ultrapassaram o VMP recomendável pela Portaria MS 2914/2011 para consumo humano de 1,5 mg/L.

No período chuvoso e de estiagem, respectivamente, 10% e 4% dos poços apresentaram valores de ferro que ultrapassaram o VMP de potabilidade

recomendável pela Portaria MS 2914/2011, além de não serem indicadas para consumo humano e para recreação, segundo a Resolução CONAMA 396/2008. Todas as amostras analisadas nas duas campanhas poderiam ser utilizadas para a irrigação, conforme a Resolução CONAMA 396/2008, com exceção do poço MAU07 na cidade de Manaus na segunda campanha que ultrapassou o limite definido para a irrigação, não podendo suas águas ser utilizadas para esse fim.

Os valores de ferro no período chuvoso ficaram compreendidos entre 0,00009 e 3,67 mg/L, com média de 0,16 mg/L; enquanto que no período seco, os teores variaram de 0,0009 mg/L a 7,27 mg/L, com média de 0,18 mg/L. Os teores de ferro dissolvido nas águas do aquífero Alter do Chão são mais baixos quando comparados a outros aquíferos inseridos na Província Hidrogeológica Amazonas, o que reflete a elevada taxa de circulação (renovação) da água subterrânea no sistema hidrológico dessa formação. Contudo, a presença de altos teores em alguns pontos isolados se deve provavelmente a reações de oxi-redução, atuantes sobre o ferro insolúvel residual do intemperismo químico regional resultante da alta pluviosidade associada a elevadas temperaturas e acidez das águas, as quais favoreceram a decomposição das rochas ao longo do tempo geológico.

As concentrações de manganês no período chuvoso variam de 0,00009 a 0,048 mg/L, com média de 0,008 mg/L, e no período seco oscilam de 0,0009 mg/L a 0,086 mg/L, com média de 0,01 mg/L. Em ambas as campanhas, nenhuma das amostras apresentou teores de manganês acima do VMP estabelecido pela Portaria MS 2914/2011, podendo ser indicado o uso dessas águas para consumo humano, recreação e irrigação, segundo a Resolução CONAMA 396/2008. Apenas 4% dos poços na segunda campanha apresentaram teor de manganês que ultrapassaram o limite recomendado para dessedentação animal, de acordo com a Resolução CONAMA 396/2008. Os poços que apresentaram teores de manganês fora dos padrões para dessedentação animal foram PIN32 (0,0572 mg/L), STM05 (0,0853 mg/L) e MAU07 (0,0858 mg/L), localizados respectivamente nas cidades de Parintins, Santarém e Manaus.

A avaliação dos parâmetros biológicos indicou a presença de Coliformes totais em 34% dos casos no período chuvoso e de 39% na estiagem. Além da presença de C. totais, também se verificou a ocorrência de *E. coli* em 11% dos poços em ambas as campanhas de amostragem. Esses resultados indicam que as águas do aquífero Alter do Chão estão fora dos padrões biológicos recomendados pela Portaria MS 2914/2011 e Resolução CONAMA 396/2008, indicando que as suas águas não podem ser utilizadas para consumo humano, dessedentação animal e recreação, haja vista que podem ocasionar doenças de veiculação hídrica. Isto se deve a contaminação das águas subterrâneas por fossas sépticas devido à ausência de sistema de esgotamento sanitário na região, e também pelo fato de que os poços tubulares, em sua maioria, são pouco profundos e construídos com técnicas inapropriadas, que deixam os espaços anelares sem a devida proteção sanitária.

Todas as amostras analisadas para os metais pesados arsênio, cádmio, cromo e níquel apresentaram teores abaixo do limite de detecção, ao passo que bário, chumbo, cobre, mercúrio e zinco obtiveram teores abaixo do VMP definido pela Portaria MS 2914/2011 e Resolução CONAMA 396/2008.

No que se refere às análises de BTEX e fenóis, a maioria das amostras apresentaram teores abaixo do limite de detecção, bem como todas respeitaram os limites de potabilidade definidos pela Portaria MS 2914/2011 e Resolução CONAMA 396/2008.

Os resultados dos isótopos ambientais a partir das análises de oxigênio-18 e deutério levaram a concluir que a recarga do aquífero Alter do Chão provém de águas meteóricas, ou seja, águas de chuva com 5,72% de perda por evaporação.

Segundo as datações efetuadas com trício, as águas do aquífero Alter do Chão têm água submoderna com recarga anterior a 1952, e mistura de água submoderna com recarga recente.

Quanto à datação radiométrica de carbono-14, as análises revelaram a presença de água moderna com menos de 200 anos BP e paleoáguas com idades compreendidas entre 2130 e 2700 BP, o que deve corresponder a amostras coletadas em profundidade na parte superior do aquífero regional intitulado Sistema Aquífero Amazonas no Brasil (SAAB).

No que se refere à classificação das águas subterrâneas de acordo com a composição química, é possível verificar que as águas do aquífero Alter do Chão em sua maioria são Cloretadas Sódicas, segundo indicação dos diagramas de Piper e Stiff.

Nas duas campanhas de amostragem, as águas foram classificadas como de boa potabilidade de acordo com o diagrama de Schoeller-Berkaloff, com exceção do parâmetro bicarbonato na primeira coleta que apresentou a classificação passável no poço MAU05, na cidade de Manaus.

No que concerne à avaliação das águas para irrigação por meio da Razão de Adsorção de Sódio (SAR) verifica-se que as águas do aquífero Alter do Chão possuem risco de sódio baixo e salinidade que varia de fraquíssima a média, indicando que as águas podem ser usadas para o cultivo de boa parte dos vegetais.

De acordo com a Metodologia de Mckee & Wolf (1963), as águas do aquífero Alter do Chão podem ser utilizadas para a dessedentação animal sem restrições, haja vista que os teores de STD encontrados em ambas as campanhas foram baixos.

5.8 - Aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho

No contexto regional, o aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho está localizado na bacia sedimentar fanerozoica da Província Amazonas, enquanto que no contexto local, o aquífero estudado está situado na Bacia do Solimões. Os sedimentos de origem essencialmente fluvial que ocorrem sobre o embasamento cristalino na cidade de Porto Velho são coberturas sedimentares indiferenciadas de idade cenozoica, e foram designadas no âmbito desse estudo como *Aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho* para o aquífero captado na zona urbana de Porto Velho, ao invés da denominação mais conhecida, ou seja, Aquífero Jaciparaná, que se considera regionalmente do tipo livre e que pode apresentar localmente condições de fraco confinamento.

Com o intuito de avaliar a qualidade das águas subterrâneas do Aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho foram selecionados 30 poços para

análises físico-químicas e bacteriológicas na cidade de Porto Velho, no Estado de Rondônia. Além dessas análises, também foram realizadas leituras de metais pesados, BTEX, fenóis e isótopos ambientais (trício, deutério, oxigênio-18 e carbono-14).

Os resultados obtidos no aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho mostraram que no período chuvoso e de estiagem, respectivamente, 100% e 90% das amostras coletadas apresentaram valores de cor inferior ao limite de detecção de 5 uH; apenas 1 poço (PVH24) na segunda campanha ultrapassou o VMP de potabilidade de 15 uH da Portaria MS 2914/2011, sugerindo que as águas deste poço não são próprias para consumo humano.

Na primeira e segunda campanha, respectivamente, 33% e 70% das amostras apresentaram valores de turbidez abaixo do limite de detecção de 0,1 uT. No período chuvoso, 23% dos poços apresentaram valores acima do VMP de potabilidade da Portaria MS 2914/2011, enquanto que no período de estiagem foi apenas 3,3% dos poços.

A condutividade elétrica (CE) variou no período chuvoso de 8,9 a 369 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com média de 77,85 $\mu\text{S}/\text{cm}$; e no período seco oscilou de 11 a 214 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com média de 48,7 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Os valores de CE obtidos no aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho, em sua maioria, são baixos, haja vista que 93% e 97% dos poços, respectivamente na primeira e segunda coletas, apresentaram resultados inferiores a 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Tais resultados permitem classificar as águas do aquífero como potáveis. Isto é reflexo do clima da região amazônica, com alta incidência de chuvas, o que assegura a renovação constante das águas dos aquíferos e dos rios ali presentes.

A temperatura das águas do aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho varia no mínimo de 24,9°C ao máximo de 36,3 °C.

Os teores de STD variam de 6 a 246 mg/L, com média de 54,5 mg/L no período chuvoso; e oscila de 7 a 125 mg/L, com média de 35,5 mg/L no período de estiagem. Todos os valores de STD obtidos estão abaixo do VMP de 1.000 mg/L da Portaria MS 2914/2011 e da Resolução CONAMA 396/2008, indicando que as águas podem ser usadas para consumo humano.

Os valores de pH *in situ* encontrados no período chuvoso ficaram compreendidos entre 4,2 e 7,2, com média igual a 5,5; e no período seco, oscilaram entre 3,0 e 6,3, com média de 5,2. De modo geral é possível dizer que as águas do aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho são essencialmente ácidas.

Os resultados de potencial redox (Eh) altos e positivos sugerem que 95% dos poços possuem águas em condições oxidantes, ou seja, baixa atividade de elétrons.

Os teores de sódio variam entre 0,14 e 42,4 mg/L no período chuvoso, com média de 6,79 mg/L; e no período de estiagem oscila entre 0,14 e 33,53 mg/L, com média de 4,71 mg/L. De acordo com a Portaria MS 2914/2011, todos os valores de sódio encontrados nas duas campanhas estão abaixo do VMP de 200 mg/L, padrão definido como de potabilidade para consumo humano, assim como dentro dos limites da Resolução CONAMA 396/2008, indicando que as águas podem ser usadas para consumo humano e recreação.

As concentrações medidas de potássio no período chuvoso oscilaram entre 0,13 e 4,60 mg/L, com média de 1,28 mg/L; e no período de estiagem a variação foi de 0,08 a 2,90 mg/L, com média de 0,87 mg/L.

Os teores de cálcio obtidos no período chuvoso estão compreendidos entre 0,009 e 19,1 mg/L, com média de 2,71 mg/L; e na estiagem variam de 0,001 a 4,8 mg/L, com média de 0,94 mg/L.

Os teores de magnésio coletados no período chuvoso variam de 0,04 a 9,3 mg/L, com média de 0,83 mg/L; e no período de estiagem oscilou de 0,02 a 1,24 mg/L, com média de 0,42 mg/L.

De modo geral, os teores de sódio, potássio, cálcio e magnésio são baixos, o que pode ser justificado pela alta pluviosidade na região amazônica, a qual favorece a constante renovação das águas e conseqüentemente a diluição dos elementos presentes.

Os resultados das análises de sódio, potássio, cálcio e magnésio revelam que os valores são mais elevados no período chuvoso. Ao que tudo indica ocorre a influência da química do solo, pois segundo Leprun *et al.* (1989), no estado de Rondônia, após a chuva cair no solo e iniciar o processo de percolação das águas, estas entram em contato com os solos da região, os quais são quimicamente mais ricos, elevando os teores de cátions como cálcio, magnésio, potássio e sódio, especialmente no período chuvoso.

Os teores de cloreto no período chuvoso variaram de 0,99 a 79,97 mg/L, com média de 8,44 mg/L; e no período de estiagem oscilou de 0,49 a 34,7 mg/L, com média de 5,93 mg/L. Todos os poços amostrados, em ambas as campanhas, apresentaram resultados de cloreto inferiores ao VMP estabelecido pela Portaria MS 2914/11, assim como dentro dos padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA 396/2008, indicando que as águas do aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho podem ser empregadas para consumo humano, irrigação e recreação.

Os teores de sulfato no período chuvoso variam de 0,49 a 16,1 mg/L, apresentando média de 2,07 mg/L; e no período seco os teores oscilaram de 0,49 a 2,03 mg/L, com média de 0,68 mg/L. Em ambas as coletas, todas as amostras apresentaram teores de sulfato inferiores aos limites estabelecidos pela Portaria MS 2914/2011, assim como dentro dos padrões definidos pela Resolução CONAMA 396/2008 para consumo humano, dessedentação animal e recreação.

As análises de bicarbonato revelaram que 30% e 70% das amostras, respectivamente na primeira e segunda campanha, obtiveram valores iguais a zero. No período chuvoso, as concentrações de bicarbonato foram mais elevadas, oscilando entre 0,0 e 56 mg/L, com média de 9,81 mg/L e variando no período de estiagem entre 0,0 e 26,0 mg/L, com média de 4,2 mg/L. Isto se deve à presença de dióxido de carbono existente nas águas de chuvas, que reagem com a água do aquífero produzindo ácido carbônico, que se dissocia em bicarbonato.

Os teores de dureza oscilaram entre 0,52 e 78,9 mg/L, com média de 10,16 mg/L; e no período de estiagem variou de 0,099 a 15,59 mg/L, com média de 4,07 mg/L. Esses valores sugerem que as águas deste aquífero são do tipo mole, pois 96,5% das amostras apresentaram teores de dureza inferiores a 50

mg/L. Nas duas campanhas nenhum dos poços amostrados ultrapassou o VMP recomendável pela Portaria MS 2914/2011, de 500 mg/L para consumo humano.

No período chuvoso e de estiagem, respectivamente, 7% e 3% dos poços apresentaram valores de nitrato que ultrapassaram o VMP de potabilidade recomendável pela Portaria MS 2914/2011, além de não serem indicadas para consumo humano e para recreação segundo a Resolução CONAMA 396/2008. Contudo, todas as amostras analisadas poderiam ser utilizadas para a dessedentação animal, uma vez que não ultrapassaram os limites definidos pela Resolução citada. Esses resultados se devem a contaminação oriunda principalmente da ausência de saneamento básico e, em muitos casos, a proximidade das fossas com os poços.

De modo geral, os teores de nitrito no aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho são praticamente desprezíveis, pois 93,5% dos poços apresentaram valores abaixo do limite de detecção. Todas as amostras analisadas nas duas coletas apresentaram teores de nitrito dentro dos padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria MS 2914/2011 de 1 mg/L, assim como poderiam ser usadas para o consumo humano, dessedentação de animais, irrigação e recreação, de acordo com a Resolução CONAMA 396/2008.

Em ambas as campanhas, 3% das amostras analisadas apresentaram valores de amônia que ultrapassaram o VMP recomendável pela Portaria MS 2914/2011 para o consumo humano de 1,5 mg/L. Os poços que apresentaram tais teores foram PVH17 e PVH38, respectivamente na primeira e segunda campanha.

Dentre o total de amostras analisadas nas duas campanhas, 13% dos poços no período chuvoso e 17% no período de estiagem apresentaram valores de ferro que ultrapassaram o VMP de potabilidade recomendável pela Portaria MS 2914/2011, além de não serem indicadas para consumo humano e para recreação, segundo a Resolução CONAMA 396/2008. Além disso, 3% dos poços na primeira campanha apresentaram teores de ferro que ultrapassaram os limites recomendados para irrigação, de acordo com a Resolução CONAMA 396/2008.

Observou-se que 7% dos poços na primeira campanha apresentaram teores de manganês acima do VMP de 0,1 mg/L estabelecido pela Portaria MS 2914/2011, bem como ultrapassaram os limites previstos na Resolução CONAMA 396/2008 no que se refere aos usos da água para consumo humano e recreação. Além disso, 17% dos poços no período chuvoso e 3% dos poços no período de estiagem apresentaram teores de manganês que ultrapassaram os limites recomendados para dessedentação animal, de acordo com a Resolução CONAMA 396/2008. Apenas 3% dos poços no período chuvoso ultrapassaram o limite recomendado para irrigação, segundo a Resolução CONAMA 396/2008.

Os altos teores de ferro e manganês dissolvidos em alguns pontos isolados nas águas do aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho se devem a reações de oxi-redução, que atuam sobre o ferro insolúvel residual do intemperismo químico regional resultante da alta pluviosidade associada a elevadas

temperaturas e acidez das águas, as quais favoreceram a decomposição das rochas ao longo do tempo geológico.

A avaliação dos parâmetros biológicos indicou a presença de Coliformes totais no período chuvoso em 43% dos casos e de 70% das amostras no período de estiagem. Além da presença de C. totais, também se verificou a ocorrência de *E. coli* em 10% dos poços na primeira campanha e de 13% das amostras na segunda campanha. Esses resultados sugerem que as águas dos poços estão fora dos padrões biológicos recomendados pela Portaria MS 2914/2011 e Resolução CONAMA 396/2008, indicando que as suas águas não podem ser utilizadas para consumo humano, dessedentação animal e recreação. Isto ocorre devido à contaminação das águas subterrâneas por fossas sépticas devido à ausência de sistema de esgotamento sanitário na região e também pelo fato de que os poços tubulares, em sua maioria, são pouco profundos e construídos com técnicas inapropriadas, que deixam os espaços anelares sem a devida proteção sanitária, o que pode ocasionar doenças de veiculação hídrica.

Todas as amostras analisadas para os metais pesados arsênio, cádmio, chumbo, cromo, mercúrio e níquel apresentaram teores abaixo do limite de detecção, ao passo que bário, cobre e zinco obtiveram teores abaixo do VMP definido pela Portaria MS 2914/2011 e Resolução CONAMA 396/2008.

No que se refere às análises de BTEX e fenóis, todas as amostras respeitaram os limites de potabilidade definidos pela Portaria MS 2914/2011 e Resolução CONAMA 396/2008, inclusive com a maioria das amostras com teores abaixo do limite de detecção.

Os resultados dos isótopos ambientais oxigênio-18 e deutério revelaram que o aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho possui perda de apenas 0,3% por evaporação, o que sugere que 99,7% da água de recarga do aquífero provém de águas de chuva, e que praticamente não há sinais de recarga fluvial a partir do rio Madeira.

Segundo as datações efetuadas com trício, as águas do aquífero estudado possuem mistura de água submoderna com recarga recente.

Quanto às idades convencionais de carbono-14, há presença de água moderna, ou seja, água com tempo de residência inferior a 200 anos, o que é coerente com a natureza aluvial dos sedimentos pleistocênicos/holocênicos indiferenciados da região do aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho.

No que se refere à classificação das águas subterrâneas de acordo com a composição química, é possível verificar que as águas do aquífero em sua maioria são Cloretadas Sódicas e de boa potabilidade, segundo indicação dos diagramas de Piper, Stiff e Schoeller-Berkaloff.

No que concerne à avaliação das águas para irrigação de acordo com Razão de Adsorção de Sódio (SAR), verifica-se que as águas do aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho possuem risco de sódio baixo e salinidade entre fraquíssima a média, indicando que as águas podem ser usadas para o cultivo de boa parte dos vegetais.

Conforme a Metodologia de McKee & Wolf (1963), as águas deste aquífero podem ser utilizadas para a dessedentação animal sem restrições, haja vista que os teores de STD encontrados em ambas as campanhas foram baixos.

5.9 - Aquífero Barreiras

O aquífero está situado na Bacia do Marajó. O Grupo Barreiras é constituído litologicamente por uma sequência de sedimentos argilo-arenosos e inconsolidados, de coloração amarelo alaranjada no topo, variando para diversos tons de cinza a variegada na base. Às vezes essas camadas argilosas são compactas e apresentam níveis de lateritas duros e abrasivas. São destacados níveis arenosos com seleção regular no topo e moderada na base, arredondamentos sub-angular a sub-arredondado e esfericidade regular (Oliveira *et al.*, 2014). A sequência litológica dos sedimentos clásticos do Grupo Barreiras tem distribuição espacial bastante irregular, com camadas horizontais a sub-horizontais, de espessura e continuidade lateral muito variáveis. A espessura total do Grupo Barreiras atinge em torno de 100 m. Sotoposta ao Grupo Barreiras encontra-se a Formação Pirabas (Cortez *et al.*, 2000).

O aquífero Barreiras sofre forte influência ambiental e antrópica da Baía de Guajará - estuário do rio Pará, que fica localizada a noroeste da ilha de Marajó. A água da baía é barrenta e, no período de baixa pluviosidade na região, fica salobra devido ao avanço das águas do oceano, caracterizando um estuário temporário (Moreira, 1966). A baía é suprida por sedimentos arenosos, de coloração avermelhada devido ao capeamento por óxido de ferro, que tem como rocha-fonte o arenito ferruginoso conhecido como "grés-do-Pará", na Formação Barreiras (Gregório & Mendes, 2009).

As zonas baixas da baía de Guajará estão sujeitas a inundações pela influência da maré e pelo pico de cheia que ocorre entre março e abril, período que coincide com a estação chuvosa da região, o que acarreta, do ponto de vista da qualidade de água subterrânea, aumento significativo nos teores de sólidos totais dissolvidos. Esse aumento significativo em grande parte dos teores se realiza por influência da faixa de transição entre as águas doces e salgadas, que constitui uma zona de mistura, originada pelo fenômeno das marés da região.

Além dos fenômenos de ordem ambiental que afetam a região, existe também a influência antrópica, pois de acordo com Santos *et al.* (2014), a ocupação urbana na baía de Guajará cresce de forma desorganizada, contribuindo para o aumento indiscriminado de lançamento de esgoto sem nenhum tratamento prévio. Segundo Ribeiro (2004), a baía de Guajará é o principal corpo receptor da rede de esgoto de Belém, que recebe um alto volume diário de efluentes proveniente da Estação de Tratamento de Esgoto do Una. Além das redes de esgoto convencional, são utilizadas as redes de galerias de águas pluviais para recebimento de dejetos vindos das unidades habitacionais, através de ligações clandestinas na rede principal, levando esse material em direção aos rios e à baía de Guajará (PMB, 1999).

A qualidade das águas subterrâneas do aquífero Barreiras foi avaliada mediante seleção de 18 poços para análises físico-químicas e bacteriológicas na cidade de Belém, no Estado do Pará. Além dessas análises, também foram realizadas leituras de isótopos ambientais (trício, deutério, oxigênio-18 e carbono-14).

Os resultados obtidos no aquífero Barreiras mostraram que no período chuvoso e de estiagem, respectivamente, 94% e 78% das amostras coletadas apresentaram valores de cor inferior ao limite de detecção de 5 uH; apenas 6% dos poços em ambas as campanhas ultrapassaram o VMP de potabilidade de 15 uH da Portaria MS 2914/2011, sugerindo que estas águas não são próprias para consumo humano.

Na primeira e segunda campanha, respectivamente, 6% e 72% das amostras apresentaram valores de turbidez abaixo do limite de detecção de 0,1 uT. No período chuvoso, 17% dos poços apresentaram valores acima do VMP de potabilidade da Portaria MS 2914/2011, enquanto que no período de estiagem foi apenas 6% dos poços. Os teores de turbidez mais elevados na primeira coleta se devem a proximidade dos poços com a Baía de Guajará, onde os rios apresentam elevada turbidez, e no período chuvoso, a região é inundada pelas águas superficiais, que infiltram e entram em contato com as águas subterrâneas.

A condutividade elétrica (CE) variou de 8,1 a 390 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com média de 264,12 $\mu\text{S}/\text{cm}$ no período chuvoso e oscilou de 33 a 433 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com média de 231 $\mu\text{S}/\text{cm}$ no período seco. Os valores de CE obtidos no aquífero Barreiras são baixos, o que permite classificar as suas águas como potáveis, uma vez que os seus valores se encontram na faixa de 50 a 1.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Isto é reflexo do clima chuvoso e da frequência das chuvas na região, que assegura uma quase permanente renovação das águas dos aquíferos e dos rios da Amazônia.

A temperatura das águas do aquífero Barreiras varia no mínimo de 25,9°C ao máximo de 31,5 °C.

Os teores de STD variaram no período chuvoso de 6 mg/L a 288 mg/L, com média de 186 mg/L; e no período de estiagem oscilaram de 26 mg/L a 301 mg/L, com média de 153,83 mg/L. Todos os valores de STD obtidos estão abaixo do VMP de 1.000 mg/L da Portaria MS 2914/2011 e da Resolução CONAMA 396/2008, indicando que as águas podem ser usadas para consumo humano.

As águas do aquífero Barreiras são essencialmente ácidas, com valores de pH *in situ* variando no período chuvoso entre 4,5 e 7,3, com média de 6,46; e no período seco, oscila entre um mínimo de 4,5 e um máximo de 7,9, apresentando média de 6,09.

Os resultados de potencial redox (Eh) baixos e negativos em 56% das amostras no período chuvoso sugerem condições redutoras; enquanto que os valores altos e positivos em 83% das amostras no período de estiagem sugerem águas em condições oxidantes, ou seja, baixa atividade de elétrons.

De modo geral, os teores de potássio, cálcio e magnésio encontrados nas duas coletas de amostragem se apresentaram mais elevados no período chuvoso, o que provavelmente se deve a influência das águas da baía de Guajará, que inundam a região, pois de acordo com Ramos (2004), a baía de Guajará e o rio Guamá apresentam características que permitem incluí-los nas classes de água branca, as quais, de acordo com Sioli (1985), são as águas amazônicas que possuem intensa produção primária devido a sua riqueza em cátions como cálcio, potássio e magnésio, por conta da elevada carga de sedimentos argilosos em suspensão vinda dos Andes.

Os teores de sódio variam entre 1,54 e 13,03 mg/L no período chuvoso, com média de 4,83 mg/L; e no período de estiagem oscilam entre 2,26 e 25,16 mg/L, com média igual a 6,97 mg/L. De acordo com a Portaria MS 2914/2011, todos os valores de sódio encontrados nas duas campanhas estão abaixo do VMP de 200 mg/L, padrão definido como de potabilidade para consumo humano, assim como dentro dos limites da Resolução CONAMA 396/2008, indicando que as águas podem ser usadas para consumo humano e recreação.

Os teores de cloreto no período chuvoso variaram de 0,99 a 13,51 mg/L, com média de 4,41 mg/L; enquanto que no período de estiagem oscilaram entre 1,52 a 23,24 mg/L, com média de 7,49 mg/L. Todos os poços amostrados em ambas as campanhas apresentaram resultados de cloreto inferiores ao VMP estabelecido pela Portaria MS 2914/11, assim como estiveram dentro dos padrões da Resolução CONAMA 396/2008, indicando que as águas do aquífero Barreiras podem ser usadas para consumo humano, irrigação e recreação. A presença de cloreto em ambas as campanhas sugere contaminações locais, o que foi comprovado pela forte correlação entre os parâmetros cloreto, sulfato, nitrato e amônia, o que é justificável, pois a área de estudo está localizada nas proximidades da baía de Guajará, um dos principais receptores de esgoto da cidade de Belém.

Os teores de sulfato no período chuvoso variaram de 0,49 a 15,73 mg/L, apresentando média de 5,63 mg/L, enquanto que no período seco, a oscilação foi de 3,02 a 24,95 mg/L, com média de 10,09 mg/L. Todas as amostras analisadas apresentaram teores de sulfato inferiores aos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 396/2008 para consumo humano, dessedentação animal e recreação, bem como dentro dos padrões organolépticos de potabilidade definidos pela Portaria MS 2914/2011.

As análises de bicarbonato revelaram que 17% das amostras na primeira campanha e 28% na segunda campanha obtiveram valores iguais à zero. Os teores de bicarbonato são mais elevados no período chuvoso devido à presença de dióxido de carbono existente nas águas de chuvas, que reagem com a água do aquífero produzindo ácido carbônico, que se dissocia em bicarbonato.

Os teores de dureza no período chuvoso oscilaram entre 2,13 e 233,35 mg/L, com média igual a 129,43 mg/L; e no período de estiagem variou de 5,15 a 196,38 mg/L, com média de 81,29 mg/L. Esses resultados revelam que as águas do aquífero Barreiras no período chuvoso em sua maioria (67%) são do tipo dura, pois as amostras apresentaram valores entre 150 e 300 mg/L; enquanto que no período de estiagem, as águas são na maioria (55%) do tipo mole, ou seja, possuem valores abaixo de 50 mg/L. Nas duas campanhas, nenhum dos poços amostrados ultrapassou o VMP recomendável pela Portaria MS 2914/2011, de 500 mg/L para consumo humano. Isto provavelmente se deve a influência das águas da baía de Guajará, que inundam a região, e possuem intensa produção primária devido a sua riqueza em cátions como cálcio, potássio e magnésio, por conta da elevada carga de sedimentos argilosos em suspensão vinda dos Andes.

As concentrações de nitrato no período chuvoso variaram de 0,09 a 8,11 mg/L, com média de 1,21 mg/L; e no período seco oscilaram de 0,09 a 6,82 mg/L, com média de 2,19 mg/L. Nenhuma das amostras analisadas nas duas

campanhas ultrapassou o VMP para nitrato recomendável pela Portaria MS 2914/2011, assim como estiveram dentro dos padrões indicados para consumo humano, dessedentação animal e recreação segundo a Resolução CONAMA 396/2008. A presença de nitrato nas águas do aquífero Barreiras nas duas campanhas sugere contaminações oriundas de esgoto *in natura*, pois a área de estudo está inserida numa região bastante urbanizada, onde a baía de Guajará é considerada um dos maiores corpos receptores de esgoto da região metropolitana de Belém.

Os teores de nitrito nas águas do aquífero Barreiras são desprezíveis, pois 100% das amostras nas duas campanhas de amostragem apresentaram valores abaixo do limite de detecção. Isto se deve ao fato do nitrito ser facilmente convertido a nitrato, o que justifica a presença de nitrato nas duas campanhas.

Na primeira e segunda campanha, respectivamente, 6% e 22% das amostras analisadas apresentaram valores de amônia que ultrapassaram o VMP recomendável pela Portaria MS 2914/2011 para consumo humano de 1,5 mg/L.

Dentre o total de amostras analisadas, 72% dos poços no período chuvoso e 44% no período de estiagem apresentaram valores que ultrapassaram o VMP de ferro de potabilidade recomendável pela Portaria MS 2914/2011, além de não serem indicadas para consumo humano e para recreação, segundo a Resolução CONAMA 396/2008. Além disso, 6% dos poços na primeira campanha apresentaram teores de ferro que ultrapassaram os limites recomendados para irrigação, de acordo com a Resolução CONAMA 396/2008.

Os altos teores de ferro nas águas do aquífero Barreiras são explicados pelo fato de que a baía de Guajará é suprida por sedimentos arenosos, de coloração avermelhada devido ao capeamento por óxido de ferro, que tem como rocha-fonte o arenito ferruginoso conhecido como "grés-do-Pará", na Formação Barreiras (Gregório & Mendes, 2009).

Observou-se que 61% e 22% (4/18) dos poços, respectivamente na primeira e segunda campanha, apresentaram teores de manganês acima do VMP de 0,1 mg/L estabelecido pela Portaria MS 2914/2011, bem como ultrapassaram os limites previstos na Resolução CONAMA 396/2008 no que se refere aos usos da água para consumo humano e recreação. Além disso, 67% dos poços no período chuvoso e 44% dos poços no período de estiagem apresentaram teores de manganês que ultrapassaram os limites recomendados para dessedentação animal, conforme a Resolução CONAMA 396/2008. Na segunda campanha, 6% dos poços ultrapassaram o limite recomendado para irrigação, de acordo com a Resolução CONAMA 396/2008.

A avaliação dos parâmetros biológicos indicou no período chuvoso a presença de Coliformes totais em 61% dos casos, enquanto que na estiagem a presença foi em 39% das amostras. Além da ocorrência de C. totais, também se verificou a presença de *E. Coli* no período chuvoso em 33% dos casos e no período seco em 6% das análises. Esses resultados sugerem que as águas do aquífero estão fora dos padrões biológicos recomendados pela Portaria MS 2914/2011 e Resolução CONAMA 396/2008, indicando que as suas águas não podem ser utilizadas para consumo humano, dessedentação animal e recreação. A fonte de poluição dos aquíferos da região metropolitana de Belém é decorrente da contaminação feita pela rede de coleta de esgoto sem tratamento, pois é

despejada diretamente um volume diário de 18,294 m³/dia nos igarapés e canais que drenam grande parte da metrópole, se destinando a baía de Guajará e ao rio Guamá (Bahia *et al.*, 2008).

Segundo as datações efetuadas com trício, as águas do aquífero Barreiras têm mistura de água submoderna com recarga anterior a 1952.

A datação radiométrica de carbono-14 revelou a presença de paleoáguas, com tempo de residência superior a 200 anos.

No que se refere à classificação das águas subterrâneas de acordo com a composição química, é possível verificar que as águas do aquífero Barreiras em sua maioria são Bicarbonatadas Cálcicas, segundo indicação dos diagramas de Piper e Stiff, e de boa potabilidade conforme diagrama de Schoeller-Berkaloff.

No que concerne à avaliação das águas para irrigação por meio da Razão de Adsorção de Sódio (SAR), verifica-se que as águas do aquífero Barreiras possuem risco de sódio baixo e salinidade entre fraquíssima a média, indicando que as águas devem ser usadas com cuidado para a irrigação, pois a maioria das amostras apresentaram salinidade média.

De acordo com a Metodologia de Mckee & Wolf (1963), as águas do aquífero Barreiras podem ser utilizadas para a dessedentação animal sem restrições, haja vista que os teores de STD encontrados em ambas as campanhas foram baixos.

5.10 - Aquífero Pirabas

O aquífero Pirabas no Estado do Pará é encontrado em subsuperfície em toda a Plataforma Bragantina, e em superfície na faixa litorânea da Zona do Salgado (Oliveira *et al.*, 2014).

A Formação Pirabas é formada por dois sistemas aquíferos do tipo multicamadas, denominados de Pirabas (ou Pirabas superior) e Pré-Pirabas (ou Pirabas inferior). O sistema aquífero Pirabas é caracterizado por sedimentos marinhos, fossilíferos, compostos por argilas calcíferas de cor cinza-esverdeada e por leitos de calcário duro, de coloração cinza-esbranquiçada, que se alternam sucessivamente com camadas de arenito calcífero, calcário e folhelho e são encontrados a partir de 100 metros de profundidade. A produtividade desse aquífero é moderada, contudo, se pode esperar boas vazões, principalmente nos arenitos de maior granulação (Oliveira *et al.*, 1998).

O sistema aquífero Pré-Pirabas constitui-se predominantemente de camadas repetitivas de arenitos de cor cinza-esbranquiçada, granulação fina a conglomerática, com intercalações mais espessas de argilas e siltitos avermelhados. Esse sistema ocorre abaixo de 180 metros e tem se mostrado como excelente aquífero, com vazões de até 600 m³/h e água de boa potabilidade, na maioria das vezes com teores de ferro baixíssimos, ou até mesmo com ausência desse elemento (Oliveira *et al.*, 1998).

A qualidade das águas subterrâneas do aquífero Pirabas foi avaliada mediante seleção de 10 poços para análises físico-químicas e bacteriológicas na cidade de Belém, no Estado do Pará. Além dessas análises, também foram realizadas leituras de isótopos ambientais (trício, deutério, oxigênio-18 e carbono-14).

Os resultados obtidos no aquífero Pirabas no período chuvoso e de estiagem, respectivamente, mostraram em 100% e 90% das amostras valores de cor abaixo do limite de detecção de 5 uH; em ambas as campanhas de amostragem, os teores de cor não ultrapassam o VMP da Portaria MS 2914/2011 de 15 uH, indicando que as águas podem ser usadas para consumo humano.

As amostras de água do aquífero Pirabas apresentaram, respectivamente na primeira e segunda campanha de amostragem, 40% e 50% valores de turbidez abaixo do limite de detecção de 0,1 uT. Cerca de 20% dos poços, na primeira campanha apresentaram valor de turbidez acima do VMP de potabilidade da Portaria MS 2914/2011, enquanto que na segunda campanha apenas 10% dos poços ultrapassaram os padrões.

A condutividade elétrica (CE) das águas do aquífero Pirabas variou de 59 a 442 $\mu\text{S}/\text{cm}$ nas duas campanhas, o que permite classificar as águas do aquífero como potáveis, uma vez que se enquadram na faixa de 50 a 1.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. É importante frisar que na segunda campanha de amostragem, os valores de CE são mais elevados devido à presença de maiores teores de dureza no período de estiagem, pois nessa época existe menor fluxo descendente de águas do aquífero Barreiras, ou seja, ocorre uma mistura de águas de aquíferos sobrepostos menos intensa, o que faz com que a influência da litologia carbonática do aquífero Pirabas seja maior nesse período.

A temperatura das águas do aquífero Pirabas variou de mínimo de 27,63°C a máximo de 41,73°C. O valor máximo encontrado, apesar de atípico, resulta de valores medidos efetivamente em campo e que possivelmente decorre da influência da temperatura ambiente sobre as águas subterrâneas.

Os teores de STD nas águas subterrâneas do aquífero Pirabas variam no período chuvoso de 49 mg/L a 307 mg/L, com média de 183,70 mg/L; e no período de estiagem oscilam entre 92 mg/L e 246 mg/L, com média de 206,20 mg/L. Todos os valores de STD obtidos nas duas campanhas estão abaixo do VMP de 1.000 mg/L da Portaria MS 2914/2011 e da Resolução CONAMA 396/2008, sugerindo que as águas podem ser usadas para consumo humano. Os teores de STD foram mais elevados na segunda coleta, possivelmente devido a presença de maiores teores de cálcio, magnésio e bicarbonato na estiagem.

De modo geral, as águas do aquífero Pirabas se caracterizam como levemente ácidas a neutras, uma vez que os valores de pH *in situ* < 7,0 estão presentes em 70% e 80% dos poços, respectivamente na primeira e segunda campanha de amostragem. Contudo, as águas se apresentaram mais ácidas no período chuvoso, o que provavelmente se deve ao fato de que nessa época ocorrem inundações periódicas que fazem com que as águas superficiais ricas em CO₂ dissolvido da água da chuva se misturem as águas dos aquíferos sobrepostos ao aquífero Pirabas, deixando as águas mais ácidas, enquanto que no período de estiagem, com a cessação das cheias, a hidrogeoquímica da litologia carbonática do aquífero Pirabas passa a predominar, tornando as águas mais neutras.

No período chuvoso e de estiagem, respectivamente, 70% e 50% das amostras apresentaram resultados de potencial redox (Eh) altos e positivos, o que

sugere que as águas estão em condições oxidantes, ou seja, baixa atividade de elétrons.

De modo geral, os teores de sódio, potássio, cálcio e magnésio encontrados em ambas as campanhas de amostragem são baixos, o que se deve provavelmente ao intemperismo químico da região, bem como à constante renovação das águas subterrâneas devido à elevada precipitação regional.

Os teores de sódio variam entre 2,06 e 25,45 mg/L, com média de 10,53 mg/L no período chuvoso, e no período de estiagem ficaram compreendidos entre 0,73 e 11,60 mg/L, com média igual a 4,14 mg/L. De acordo com a Portaria MS 2914/2011, todos os valores de sódio encontrados nas duas campanhas estão abaixo do VMP de 200 mg/L, padrão definido como de potabilidade para consumo humano, bem como dentro dos limites da Resolução CONAMA 396/2008, indicando que as águas podem ser usadas para consumo humano e recreação.

Os teores de sódio, potássio, cloreto, nitrato e amônia do período chuvoso são maiores do que no período seco. Este comportamento é consistente com a ideia de que existe maior influência antrópica, quando ocorre uma maior “mistura” das águas do Pirabas com águas provenientes dos aquíferos sobrepostos e aflorantes (Barreiras e Pós-Barreiras), o que faz com que neste período ocorra maiores teores oriundos das águas desses aquíferos.

No período seco, os teores de cálcio, magnésio, bicarbonato e dureza são mais elevados, pois prevalece um ambiente com menor contribuição do fluxo descendente, ou seja, há um menor aporte por filtração vertical de águas dos aquíferos Barreiras e Pós-Barreiras e disso resulta um predomínio do comportamento das águas carbonáticas do aquífero Pirabas.

Os teores de cloreto amostrados no período chuvoso variaram de 1,98 a 33,03 mg/L, com média de 12,39 mg/L; enquanto que na estiagem, a oscilação foi de 1,18 a 18,13 mg/L, com média de 3,80 mg/L. Todos os poços amostrados em ambas as campanhas apresentaram resultados de cloreto inferiores ao VMP de potabilidade para consumo humano definido pela Portaria MS 2914/11, assim como dentro dos padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA 396/2008, indicando que as águas do aquífero Pirabas podem ser usadas para consumo humano, irrigação e recreação. A presença de cloreto nas águas do aquífero possivelmente decorre da influência das inundações periódicas na região, onde o transbordamento de fossas sépticas permite que os dejetos se misturem às águas superficiais, de modo que pode haver infiltração de água contaminada, principalmente no período chuvoso, haja vista que os poços tubulares rasos usados pela maioria da população são construídos nas proximidades imediatas das fossas sépticas. Tal premissa pode ser ratificada pela forte correlação entre os parâmetros cloreto x amônia e cloreto x nitrato.

Os teores de sulfato no aquífero Pirabas no período chuvoso variam de 0,49 a 27,32 mg/L, apresentando média de 10,43 mg/L; enquanto que no período seco, os teores oscilam de 2,74 a 9,45 mg/L, com média de 5,10 mg/L. Em ambas as coletas, todas as amostras apresentaram teores de sulfato inferiores aos limites estabelecidos pela Portaria MS 2914/2011, assim como dentro dos padrões definidos pela Resolução CONAMA 396/2008 para consumo humano, dessedentação animal e recreação. A presença de sulfato no aquífero Pirabas

se deve à oxidação de sulfeto de ferro (pirita) existente na formação, além da lixiviação da gipsita, que ocorrem especialmente no período de estiagem.

Os teores de dureza revelam que as águas do aquífero no período chuvoso são 40% do tipo mole, pois as amostras apresentaram valores abaixo de 50 mg/L e 40% do tipo moderada, com valores entre 50 e 150 mg/L; enquanto que no período de estiagem, as águas são 50% do tipo moderada, com valores entre 50 e 150 mg/L e 40% do tipo dura, com valores entre 150 e 300 mg/L. Nas duas campanhas, nenhum dos poços amostrados ultrapassou o VMP recomendável pela Portaria MS 2914/2011, de 500 mg/L para consumo humano. Esses resultados se devem a litologia da formação Pirabas que é caracterizada por leitos de calcário ricamente fossilíferos.

As concentrações de nitrato variaram de 0,09 a 8,16 mg/L, com média de 3,0 mg/L no período chuvoso, e no período seco a oscilação ficou entre 0,09 a 4,49 mg/L, com média de 0,61 mg/L. Nenhuma das amostras analisadas nas duas campanhas ultrapassou o VMP de nitrato de potabilidade recomendável pela Portaria MS 2914/2011, assim como estiveram dentro dos padrões indicados para consumo humano, dessedentação animal e recreação segundo a Resolução CONAMA 396/2008.

Os teores de nitrito são praticamente desprezíveis, uma vez que 90% e 100% das amostras, respectivamente no período chuvoso e de estiagem, apresentaram valores abaixo do limite de detecção. Apenas o poço BEL029 na primeira campanha apresentou valor quantificável de 0,042 mg/L, resultado muito baixo quando comparado ao VMP de 1 mg/L de potabilidade estabelecido pela Portaria MS 2914/2011, sugerindo que as águas poderiam ser usadas para o consumo humano, dessedentação de animais, irrigação e recreação, de acordo com a Resolução CONAMA 396/2008.

Apenas no período chuvoso, 20% das amostras analisadas ultrapassaram os padrões de VMP de amônia recomendável pela Portaria MS 2914/2011 para consumo humano de 1,5 mg/L.

Os teores de ferro oscilaram entre 0,021 mg/L e 26,63 mg/L nas duas campanhas de amostragem. No período chuvoso e de estiagem, respectivamente, 20% e 90% dos poços apresentaram valores que ultrapassaram o VMP de potabilidade recomendável pela Portaria MS 2914/2011, além de não serem indicadas para consumo humano e para recreação, segundo a Resolução CONAMA 396/2008. Além disso, 10%, dos poços na segunda campanha apresentaram teores de ferro que ultrapassaram os limites recomendados para irrigação, de acordo com a Resolução CONAMA 396/2008. Segundo Picanço *et al.* (2002), apesar da Formação Pirabas ser uma unidade menos favorável à liberação de ferro, uma vez que é constituída basicamente por calcários puros e diversificados, existe nessa formação a ocorrência de nontronita (esmectita rica em ferro) e pirita (sulfeto de ferro). Vale ressaltar que quando os valores de ferro são altos é de se supor que o poço em produção também esteja bombeando água dos aquíferos superiores (CPRM, 2002), que no caso da área de estudo trata-se do aquífero Barreiras, rico em ferro.

Os teores de manganês variaram de 0,00062 a 0,17 mg/L, nas duas campanhas. Na primeira e segunda campanha, respectivamente, 30% e 70% dos poços apresentaram teores de manganês acima do VMP estabelecido pela

Portaria MS 2914/2011 para consumo humano, bem como ultrapassou os limites previstos na Resolução CONAMA 396/2008 no que se refere aos usos da água para consumo humano e recreação. Além disso, 40% dos poços amostrados no período chuvoso, e 90% dos poços no período de estiagem, apresentaram teores de manganês que ultrapassaram os limites recomendados para dessedentação animal, de acordo com a Resolução CONAMA 396/2008. Nenhuma das amostras ultrapassou os limites máximos permitidos para irrigação, conforme a Resolução CONAMA 396/2008.

A avaliação dos parâmetros biológicos indicou a presença de Coliformes totais no período chuvoso em 30% dos casos, enquanto que no período de estiagem a presença foi detectada em 50% das amostras. Além de C. totais, detectou-se a ocorrência de *E. Coli* em 10% das amostras apenas na segunda campanha. As análises sugerem que as águas estão fora dos padrões biológicos recomendados pela Portaria MS 2914/2011 e Resolução CONAMA 396/2008, indicando que as suas águas não podem ser utilizadas para consumo humano, dessedentação animal e recreação. Tais resultados são provenientes da falta de saneamento básico, em virtude da ineficiência das redes de esgotamento sanitário e das respectivas estações de tratamento na Região Metropolitana de Belém. Os aquíferos mais superficiais, os mais utilizados pela população periférica, estão, em parte, contaminados pela infiltração dos resíduos sólidos decompostos e de efluentes. Essa contaminação está associada à geologia local, com terreno predominantemente arenoso, e à construção de poços sem critérios técnicos adequados (CPRM, 2002).

A ocorrência desses parâmetros biológicos é extremamente preocupante, pois pode ocasionar doenças de veiculação hídrica na população local, que utiliza dessas águas para os mais diversos usos, incluindo consumo humano.

Segundo as datações efetuadas com trício, as águas do aquífero Pirabas têm água submoderna com recarga anterior a 1952.

A datação radiométrica de carbono-14 revelou a presença de paleoáguas, com tempo de residência superior a 20.000 anos, o que sugere a existência de águas mais antigas armazenadas em profundidade no aquífero Pirabas.

No que se refere à classificação das águas subterrâneas de acordo com a composição química, é possível verificar que as águas do aquífero em sua maioria são Bicarbonatadas Cálcicas, segundo indicação dos diagramas de Piper e Stiff; e de potabilidade boa e passável, de acordo com os diagramas de Schoeller-Berkaloff.

No que concerne à avaliação das águas para irrigação através da Razão de Adsorção de Sódio (SAR), verifica-se que as águas do aquífero Pirabas possuem risco de sódio baixo e salinidade entre fraquíssima a média, indicando que as águas devem ser usadas com cuidado para a irrigação, pois a maioria das amostras apresentou salinidade média.

De acordo com a Metodologia de Mckee & Wolf (1963), as águas do aquífero Pirabas podem ser utilizadas para a dessedentação animal sem restrições, haja vista que os teores de STD encontrados em ambas as campanhas foram baixos.

5.11 - Aquífero Monte Alegre

No contexto regional, o aquífero Monte Alegre está localizado na Província Amazonas, que representa uma das bacias sedimentares fanerozoicas do Brasil, enquanto que no contexto local, o aquífero Monte Alegre está situado na Bacia do Amazonas.

A Formação Monte Alegre, em subsuperfície, tem espessura máxima de 140 m, depositada como não conformidade sobre as unidades siliciclásticas do Mississipiano. Seus depósitos são caracterizados por uma extensa sequência de arenitos fluviais e eólicos, intercalados com siltitos e folhelhos de interdunas e lagos, e carbonatos em direção ao topo da seção, os quais vêm sendo considerados como marcadores das primeiras ingressões marinhas no Pensilvaniano da Bacia do Amazonas (Scomazzon, 2004).

Com o intuito de avaliar a qualidade das águas subterrâneas do Aquífero Monte Alegre, foi selecionado 01 poço para análise físico-química e bacteriológica na cidade de Itaituba, no Estado do Pará.

O estudo hidrogeoquímico das águas do aquífero Monte Alegre indicou que, de forma geral, os teores analisados se encontram em baixíssimas concentrações, devido ao clima chuvoso da Floresta Tropical Amazônica.

Apesar de nenhum dos parâmetros físico-químicos analisados ultrapassar o VMP de potabilidade estabelecido pela Portaria MS 2914/2011 e nem alcançar os limites dos usos preponderantes definidos pela Resolução CONAMA 396/2008, a simples presença sugere contaminações de ordem antrópica, a exemplo, do cloreto, sulfato, nitrato e amônia.

A análise dos parâmetros físico-químicos coletados nas duas campanhas de amostragem realizadas em abril e outubro de 2012 revelou teores mais elevados no período de estiagem para os elementos: cor, CE, STD, Eh, sódio, potássio, cálcio, magnésio, cloreto, bicarbonato e dureza; enquanto que turbidez, sulfato, nitrato, amônia, ferro e manganês estiveram mais altos no período chuvoso.

De modo geral, verificou-se que os parâmetros que apresentaram comportamento sazonal destacado no período chuvoso se devem provavelmente a maior contribuição antrópica devido à infiltração das águas oriundas dos aquíferos Aluviais, sobrepostos diretamente ao Aquífero Monte Alegre.

Ao passo que aqueles parâmetros que se apresentaram com maior destaque no período de estiagem podem ser justificados pela redução da drenança oriunda das partes superiores, o que reduz a mistura de águas subterrâneas e condiciona maior concentração de íons das litologias carbonáticas presentes, sobretudo do aquífero Itaituba, sobreposto ao Aquífero Monte Alegre.

A presença de Coliformes totais nas duas campanhas e de *E. Coli* apenas na primeira coleta no aquífero Monte Alegre é justificável. Isto ocorre devido à infiltração das águas oriundas dos aquíferos Aluviais sobrepostos ao aquífero Monte Alegre, os quais são muito susceptíveis a contaminações locais, principalmente de ordem antrópica, como é o caso da infiltração do esgoto *in natura* devido à proximidade dos poços com as fossas sépticas.

Quanto ao pH *in situ*, os resultados mostram que as águas são levemente ácidas no período chuvoso devido a maior contribuição da infiltração das águas dos aquíferos sobrepostos (Aluviais), enquanto que no período seco são alcalinas, devido a maior influência da litologia carbonática do aquífero Itaituba sobreposto ao Aquífero Monte Alegre.

No que se refere à classificação das águas subterrâneas de acordo com a composição química, é possível verificar que as águas do aquífero Monte Alegre são Cloretadas Sódicas por indicação dos diagramas de Piper; sulfatada sódica e cloretada sódica segundo os diagramas de Stiff; e de boa potabilidade, segundo diagrama de Schoeller-Berkaloff.

No que concerne à avaliação das águas para irrigação por meio da Razão de Adsorção de Sódio (SAR), verifica-se que as águas do aquífero Monte Alegre possuem risco de sódio baixo e salinidade que varia entre baixa a média, indicando que as águas podem ser usadas para o cultivo de boa parte dos vegetais.

Por meio da metodologia de McKee & Wolf (1963), as águas do aquífero Monte Alegre podem ser utilizadas para a dessedentação animal sem restrições, haja vista que os teores de STD encontrados em ambas as campanhas foram baixos.

5.12 - Aquífero Itaituba

No contexto regional, o aquífero Itaituba está localizado na Província Amazonas, que representa uma das bacias sedimentares fanerozoicas do Brasil, enquanto que no contexto local, o aquífero está situado na Bacia do Amazonas.

A Formação Itaituba varia em espessura entre 110 e 420 metros, e marca o estabelecimento de amplas condições marinhas durante este intervalo. É constituída por intercalações de carbonatos e evaporitos, com folhelhos, siltitos e arenitos que representam depósitos transgressivo-regressivos de moderada energia e ambiente marinho raso de infra e inter-maré (Scomazzon, 2004).

De acordo com a litologia acima descrita, há uma predominância de carbonatos com arenitos e folhelhos intercalados, o que classifica a formação Itaituba do ponto de vista hidrogeológico como aquífero.

A qualidade das águas subterrâneas do aquífero Itaituba foi avaliada mediante seleção de 02 poços para análises físico-químicas e bacteriológicas na cidade de Itaituba, no Estado do Pará. Além dessas análises, também foram realizadas leituras de isótopos ambientais (trício, deutério, oxigênio-18 e carbono-14).

O estudo hidrogeoquímico das águas do aquífero Itaituba indicou que, de forma geral, os teores analisados se encontram em baixíssimas concentrações, devido ao clima chuvoso da Floresta Tropical Amazônica, com exceção dos parâmetros nitrato e amônia que se deve a fatores antrópicos e o manganês por conta da geologia local.

A concentração de nitrato no período chuvoso variou de 7,33 a 9,93 mg/L, enquanto que no período seco a oscilação foi de 0,19 a 7,69 mg/L. Nenhuma das amostras analisadas ultrapassou o VMP de potabilidade recomendável pela Portaria MS 2914/2011, assim como estiveram dentro dos padrões

indicados para consumo humano, dessedentação animal e recreação segundo a Resolução CONAMA 396/2008.

Os teores de amônia em sua maioria estão abaixo do limite de detecção, apenas o poço ITB003 apresentou valor quantificável de 2,10 mg/L, ultrapassando o VMP recomendável pela Portaria MS 2914/2011 para consumo humano de 1,5 mg/L.

A presença de alguns parâmetros físico-químicos nas águas, como por exemplo, nitrato e amônia sugerem contaminação local, que provavelmente ocorre a partir da infiltração das águas oriundas dos aquíferos Aluviais sobrepostos ao aquífero Itaituba, os quais possuem influência das águas superficiais e são muito utilizados pela população por meio de poços que geralmente são construídos com técnicas inapropriadas nas proximidades das fossas sanitárias, o que permite a infiltração do esgoto *in natura* e consequentemente a contaminação das águas subterrâneas.

A análise dos parâmetros físico-químicos coletados nas duas campanhas de amostragem realizadas em abril e outubro de 2012 revelou teores mais elevados no período de estiagem para os elementos: CE, STD, cálcio, magnésio, bicarbonato, dureza, ferro e manganês. Isto provavelmente ocorre devido à cessação do período de cheias, que faz com que a mistura das águas dos aquíferos sobrepostos (Aluviais) se minimizem de modo a prevalecer na estiagem os resultados dos horizontes carbonáticos presentes no aquífero Itaituba.

Alguns parâmetros, a exemplo da cor e nitrito não foi verificada influência da sazonalidade, pois a maioria dos resultados estava abaixo do limite de detecção.

Não foi possível avaliar a influência da sazonalidade nos parâmetros turbidez, temperatura, sódio, potássio, Eh, cloreto, sulfato e nitrato, pois o aquífero Itaituba só possui análises de 2 (dois) poços.

A avaliação dos parâmetros biológicos indicou a presença de Coliformes totais e de *E. Coli* nas duas campanhas, o que corresponde à contaminação das águas subterrâneas por fossas sépticas, devido à ausência de sistema de esgotamento sanitário na região, e também pelo fato de que os poços tubulares são construídos com técnicas inapropriadas, que deixam os espaços anelares sem a devida proteção sanitária.

Quanto ao pH *in situ*, os resultados mostram que as águas são levemente ácidas no período chuvoso (4,46 a 5,14) devido a maior contribuição da infiltração das águas dos aquíferos sobrepostos (Aluviais), enquanto que no período seco são alcalinas (5,8 a 7,9), devido a maior influência da litologia carbonática do aquífero Itaituba.

Segundo as datações efetuadas com Trício, as águas do aquífero Itaituba têm mistura de água submoderna com recarga recente.

A datação radiométrica de carbono-14 revelou a presença de paleoáguas, com tempo de residência superior a 200 anos, o que sugere a existência de águas mais antigas armazenadas no aquífero Itaituba.

No que se refere à classificação das águas subterrâneas de acordo com a composição química, é possível verificar que as águas do aquífero Itaituba

são Cloretadas Sódicas e Bicarbonatadas Cálcicas por indicação dos diagramas de Piper e Stiff; e de boa potabilidade, segundo diagrama de Schoeller-Berkaloff.

No que concerne à avaliação das águas para irrigação de acordo com a Razão de Adsorção de Sódio (SAR), verifica-se que as águas do aquífero Itaituba possuem risco de sódio baixo e salinidade fraca, indicando que as águas podem ser usadas para o cultivo de boa parte dos vegetais.

Segundo a metodologia de McKee & Wolf (1963), as águas do aquífero Itaituba podem ser utilizadas para a dessedentação animal sem restrições, haja vista que os teores de STD encontrados em ambas as campanhas foram baixos.

5.13 - Aquífero Inominado (Cruzeiro do Sul)

No contexto regional, o aquífero Inominado (Cruzeiro do Sul) está localizado na Província Amazonas, que representa uma das bacias sedimentares fanerozoicas do Brasil, ao passo que no contexto local, o aquífero está situado na Bacia do Solimões.

A Formação Cruzeiro do Sul foi definida primeiramente referindo-se aos sedimentos arenosos que se encontram sobrepostos aos terraços inferiores, localizados nas imediações da cidade de Cruzeiro do Sul, no estado do Acre, correspondendo ainda à porção superior da Formação Ramon (Bouman, 1959). Para Barros *et al.* (1977) e demais levantamentos do Projeto Radambrasil na região, tais sedimentos plio-pleistocênicos existentes a leste da Serra do Divisor pertencem à Formação Solimões (Caputo, 1973) e aqueles que ocorrem a oeste desta, à Formação Ramon.

A Formação Cruzeiro do Sul ainda é pouco estudada em suas características específicas, devido a sua recente criação a partir da Formação Solimões, por tal motivo decidiu-se, no âmbito do Projeto PHA, utilizar a denominação de aquífero Inominado (Cruzeiro do Sul), pois ainda há controvérsias na área acadêmica quanto a sua denominação, o que requer estudos mais aprofundados na região, inclusive com sondagens para definição mais concreta quanto a sua terminologia e potencialidades.

A qualidade das águas subterrâneas do aquífero Inominado (Cruzeiro do Sul) foi avaliada mediante seleção de 05 poços para análises físico-químicas e bacteriológicas na cidade de Cruzeiro do Sul, no Estado do Acre. Além dessas análises, também foram realizadas leituras de isótopos ambientais (trício, deutério e oxigênio-18).

Os resultados obtidos no aquífero Inominado (Cruzeiro do Sul) na primeira e segunda campanha respectivamente mostraram em 100% e 60% das amostras valores de cor abaixo do limite de detecção de 5 uH. Em ambas as campanhas de amostragem, os teores de cor não ultrapassam o VMP da Portaria MS 2914/2011.

Os valores de turbidez no período chuvoso variaram de 0,48 a 9,0 uT, com média de 3,84 uT; enquanto que no período seco, os valores se distribuíram entre 0,09 a 10 uT, com média igual a 2,36 uT. Cerca de 40% dos poços na primeira campanha e 20% na segunda campanha apresentaram valor de turbidez acima do VMP de potabilidade da Portaria MS 2914/2011.

Os resultados de turbidez se apresentaram mais elevados na primeira campanha. Isso se deve provavelmente ao fato de que as amostras foram coletadas na época de cheias da região, quando a água da chuva que escoou pelo solo, carrega consigo sedimentos que permanecem em suspensão na água, tornando-a mais turva, a qual entra em contato com as águas subterrâneas por meio dos poços mal protegidos.

A condutividade elétrica (CE) das águas do aquífero Inominado (Cruzeiro do Sul) variou de mínimo de 51 a 319 $\mu\text{S}/\text{cm}$, permitindo que as águas sejam classificadas como potáveis, haja vista que a CE encontra-se na faixa de 50 a 1.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

A temperatura das águas coletadas no aquífero variou de 25,6°C a 26,7°C, enquanto que no período de estiagem, as temperaturas variaram de 25,8°C a 26,9°C. Nas duas campanhas de amostragem, houve uma amplitude térmica de 1,1°C.

Os teores de STD no período chuvoso variaram de 38 a 212 mg/L, com média de 104,80 mg/L; enquanto que na estiagem, a oscilação foi de 30 mg/L a 197 mg/L, com média de 113 mg/L. Os valores de STD obtidos nas duas campanhas estão abaixo do VMP da Portaria MS 2914/2011 e da Resolução CONAMA 396/2008, que recomenda o valor de 1.000 mg/L como padrão organoléptico de potabilidade para consumo humano.

Os valores de pH *in situ* encontrados no período chuvoso ficaram compreendidos entre 6,6 e 8,2, enquanto que no período seco, os valores oscilaram entre um mínimo de 5,0 e um máximo de 7,4.

No período chuvoso, 100% das amostras apresentaram resultados de Eh positivo, enquanto que no período de estiagem 40% das amostras obtiveram valores de Eh positivos, indicando que as águas do aquífero Inominado (Cruzeiro do Sul) se encontram em condições oxidantes.

Os teores de sódio nas águas do aquífero Inominado (Cruzeiro do Sul) variam no mínimo de 1,44 e 42,9 mg/L. De acordo com a Portaria MS 2914/2011, todos os valores de sódio encontrados nas duas campanhas estão abaixo do VMP de 200 mg/L, padrão definido como de potabilidade para consumo humano. Em ambas as campanhas, todas as amostras apresentaram resultados abaixo do limite estabelecido pela Resolução CONAMA 396/2008, indicando que as águas podem ser usadas para consumo humano e recreação.

De modo geral, os teores de sódio, potássio, cálcio e magnésio encontrados em ambas as campanhas de amostragem são baixos, o que se deve provavelmente ao intemperismo químico da região, bem como à constante renovação das águas subterrâneas devido à elevada precipitação regional.

Os teores de cálcio se apresentaram mais elevados no período chuvoso, o que provavelmente se deve ao fato de que em Cruzeiro do Sul predominam solos distróficos, cujo teor de cálcio trocável é elevado, principalmente em superfície (Dos Anjos *et al.*, 2013).

As concentrações de cloreto nas águas do aquífero Inominado (Cruzeiro do Sul) no período chuvoso variaram de 0,9 a 2,14 mg/L, com média de 1,43 mg/L; enquanto que no período de estiagem a oscilação foi de 0,49 a 1,47 mg/L, com média de 0,81 mg/L. Todos os poços amostrados em ambas as

campanhas apresentaram resultados de cloreto inferiores ao VMP de 250 mg/L estabelecido pela Portaria MS 2914/11, assim como estiveram dentro dos limites definidos pela Resolução CONAMA 396/2008, indicando que as águas do aquífero podem ser usadas para consumo humano, irrigação e recreação.

Os teores de sulfato no período chuvoso variam de 0,49 a 1,27 mg/L, apresentando média de 0,69 mg/L; e no período seco ficam compreendidos entre 0,49 a 7,31 mg/L, com média de 1,96 mg/L. Todas as amostras analisadas apresentaram teores de sulfato inferiores aos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 396/2008 para consumo humano, dessedentação animal e recreação, bem como dentro dos padrões organolépticos de potabilidade definidos pela Portaria MS 2914/2011.

As concentrações de bicarbonato oscilaram no período chuvoso entre 7,0 e 151,0 mg/L, com média de 66,20 mg/L; enquanto que no período de estiagem, as concentrações ficaram compreendidas entre 0,0 e 115,0 mg/L, com média de 60,60 mg/L. Os teores de bicarbonato são mais elevados na primeira campanha devido à presença de dióxido de carbono existente nas águas das chuvas, que reagem com a água do aquífero produzindo ácido carbônico, que se dissocia em bicarbonato.

Os teores de dureza no período chuvoso oscilaram entre 21,24 e 168,44 mg/L, com média de 78,03 mg/L; enquanto que na estiagem ficaram compreendidos entre 13,99 a 73,81 mg/L, com média de 48,84 mg/L. Esses resultados revelam que as águas deste aquífero no período chuvoso na maioria (60%) são do tipo mole, pois as amostras apresentaram valores abaixo de 50 mg/L; enquanto que no período de estiagem, as águas são 40% do tipo mole, com valores abaixo de 50 mg/L e 60% do tipo moderada, com valores entre 50 e 150 mg/L. Nas duas campanhas, nenhum dos poços amostrados ultrapassou o VMP recomendável pela Portaria MS 2914/2011, de 500 mg/L para consumo humano.

Os teores de nitrato obtidos no período chuvoso variaram de 0,09 a 2,91 mg/L, com média de 0,79 mg/L; enquanto que no período seco oscilaram de 0,19 a 2,89 mg/L, com média de 0,77 mg/L. Nenhuma das amostras analisadas nas duas campanhas ultrapassou VMP de potabilidade de nitrato recomendável pela Portaria MS 2914/2011, assim como estiveram dentro dos padrões indicados para consumo humano, dessedentação animal e recreação segundo a Resolução CONAMA 396/2008. Apesar de nenhum dos poços ultrapassar o VMP de nitrato recomendável pelas resoluções sanitárias supracitadas, a simples presença desse elemento nas águas do aquífero, em ambas as campanhas, se deve provavelmente a proximidade dos poços com as fossas sanitárias, os quais em muitos casos não possuem a devida proteção sanitária, o que favorece a infiltração do esgoto *in natura* e conseqüentemente a contaminação das águas subterrâneas.

Os teores de nitrito presentes nas águas subterrâneas do aquífero Inominado (Cruzeiro do Sul) são desprezíveis, pois todos os poços amostrados tiveram concentrações abaixo do limite de detecção de 0,02 mg/L. Dessa forma, em ambas as campanhas, todas as amostras analisadas apresentaram teores de nitrito dentro dos padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria MS 2914/2011 de 1 mg/L, assim como poderiam ser usadas para o consumo

humano, dessedentação de animais, irrigação e recreação de acordo com a Resolução CONAMA 396/2008.

Nas duas campanhas de amostragem, 100% dos poços tiveram concentrações de amônia abaixo do limite de detecção de 0,1 mg/L. Assim, em ambas as campanhas, todas as amostras analisadas apresentaram teores de amônia abaixo do VMP recomendável pela Portaria MS 2914/2011 para consumo humano, de 1,5 mg/L.

O teores de ferro no período chuvoso ficaram compreendidos entre 0,0019 e 0,26 mg/L, com média de 0,07 mg/L; enquanto que na estiagem oscilaram entre 0,0056 a 0,48 mg/L, com média de 0,12 mg/L. Apenas o poço CZS03 na segunda campanha apresentou valor de ferro igual a 0,477 mg/L, ultrapassando o VMP de potabilidade recomendável pela Portaria MS 2914/2011, não sendo indicado a utilização das suas águas para consumo humano e para recreação segundo a Resolução CONAMA 396/2008. Todas as demais amostras analisadas, em ambas as campanhas, apresentaram teores de ferro dentro dos limites recomendados para irrigação de acordo com a Resolução CONAMA 396/2008.

Apenas o poço CZS02 na primeira campanha apresentou teor de manganês igual a 0,109 mg/L, valor considerado acima do VMP estabelecido pela Portaria MS 2914/2011 e Resolução CONAMA 396/2008 no que se refere aos usos da água para consumo humano e recreação. Em ambas as campanhas de amostragem, 40% dos poços apresentaram teores de manganês que ultrapassaram os limites recomendados para dessedentação animal de acordo com a Resolução CONAMA 396/2008. Nenhum dos poços analisados nas duas campanhas ultrapassou o limite recomendado para irrigação de acordo com a Resolução CONAMA 396/2008.

Os altos teores de ferro e manganês dissolvidos em alguns pontos isolados nas águas do aquífero Inominado (Cruzeiro do Sul) se devem a reações de oxirredução, que atuam sobre o ferro insolúvel residual do intemperismo químico regional, resultante da alta pluviosidade associada a elevadas temperaturas e acidez das águas, as quais favoreceram a decomposição das rochas ao longo do tempo geológico.

No período chuvoso (abril de 2012), as águas do aquífero Inominado (Cruzeiro do Sul) apresentaram em 60% dos casos a presença de coliformes totais, enquanto que no período de estiagem (outubro de 2012), a presença ocorreu em 80% das amostras, indicando que as águas estão fora dos padrões microbiológicos para consumo humano definido pela Portaria MS 2914/2011.

Com base nos resultados das análises, verifica-se que 100% dos poços na primeira campanha e 80% na segunda campanha apresentaram padrões biológicos recomendados de *E. coli* pela Portaria MS 2914/2011, bem como nos limites definidos pela Resolução CONAMA 396/200, indicando que em relação a este parâmetro as suas águas podem ser utilizadas para consumo humano, dessedentação animal e recreação.

Segundo as datações efetuadas com trício, as águas do aquífero estudado possuem mistura de água submoderna com recarga anterior a 1952.

No que se refere à classificação das águas subterrâneas de acordo com a composição química, é possível verificar que as águas do aquífero Inominado

(Cruzeiro do Sul) em sua maioria são Bicarbonatadas Cálcicas e de boa potabilidade, segundo indicação dos diagramas de Piper, Stiff e Schoeller-Berkaloff.

No que concerne à avaliação das águas para irrigação de acordo com a Razão de Adsorção de Sódio (SAR), verifica-se que as águas do aquífero Inominado (Cruzeiro do Sul) possuem risco de sódio baixo e salinidade entre fraquíssima a média, indicando que as águas podem ser usadas para o cultivo de boa parte dos vegetais.

Diante da análise efetuada através da metodologia de McKee & Wolf (1963), as águas deste aquífero podem ser utilizadas para a dessedentação animal sem restrições, haja vista que os teores de STD encontrados em ambas as campanhas foram baixíssimos.

6 – Cidade Piloto: Macapá - AP

6.1 - Introdução

Este estudo visou realizar a caracterização dos aspectos fisiográficos, geológicos, hidrogeológicos, hidrogeoquímicos e a vulnerabilidade natural do aquífero Tucunaré na cidade piloto de Macapá, principalmente no que diz respeito à qualidade de suas águas.

O município de Macapá localiza-se na região Sudeste do Estado do Amapá, entre as coordenadas geográficas de 49°46'15"W e 51°37'19"W e 0°35'16"S a 1°22'37"N, estendendo-se pela margem esquerda do Rio Amazonas desde o limite com Santana, a sudoeste, até o litoral atlântico. É cortado pela linha do Equador e sua altitude, na cidade sede, varia de 0 a 40 m.

A área da folha de 15 minutos da região de Macapá cobre uma superfície de 775 km², dos quais apenas 144 km² correspondem à área de estudo (**figura 6.1**) propriamente dita, na qual foi realizado o monitoramento dos poços nas duas campanhas de medições de níveis e de coleta de água.

O clima do município de Macapá é do tipo Af de Köppen, tropical úmido ou equatorial quente-úmido, com temperatura média mensal entre 25,7°C e 28°C, com uma média anual de 26,6°C. Caracteriza-se por umidade elevada durante todo o ano, com média compreendida entre 75% no mês mais seco (outubro) a 89% no mês mais chuvoso do ano (abril).

A precipitação média em Macapá oscila entre 31,9 mm em outubro a 407,7 mm em março, com uma média anual de 2561,3 mm/ano.

A área de estudo é caracterizada por três diferentes unidades morfológicas: Planície Amazônica (57 km²) com cotas entre 0 e 10 m; Planície Flúvio-Marinha (80 km²) com altitudes > 10 m até 20 m; Tabuleiro Costeiro Dissecado (7,2 km²) com cotas de 20-30 m.

O rio Amazonas passa pela cidade de Macapá com uma largura de 11 km e as áreas de ressaca predominam nas bacias do rio Matapí (3 km²), do rio Curiaú (19 km²), Setentrional do Igarapé da Fortaleza, onde se encontra a região Metropolitana de Macapá, com área de drenagem de 109 km²; e Meridional do Igarapé da Fortaleza (13 km²).

A caracterização dos solos na área de estudo se baseou na classificação de Santos *et al.* (2004), onde se verificou a ocorrência de seis classes: Plintossolo Háplico Distrófico (FXd) com 4 km², Gleissolo Háplico Tb Eutrófico (GXbe) com 2,5 km², Gleissolo Háplico Ta Eutrófico (GXve) com 12 km², Latossolo Amarelo Distrófico (LAd) com 130 km², e Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (PVAd), com área de 54 km².

Na área de estudo de Macapá, segundo Santos *et al.* (2004), as áreas de ocupação antrópica e de vegetação natural se distribuem em culturas cíclicas (47,6 km²), área urbanizada (22 km²), floresta ombrófila densa aluvial (5,5 km²), Floresta Ombrófila Densa Aluvial Dossel Uniforme (78 km²) e Savana Parque com Floresta de Galeria (63,4 km²)

A região de Macapá é fortemente influenciada pelo fenômeno das ressacas, onde ocorre o aumento do nível do mar provocado pela elevação da maré astronômica e/ou maré meteorológica, acompanhado de ondas com amplitude maior que o normal, segundo Bitencourt *et al.* (2002).

As zonas baixas de planícies interiores ocupadas por depósitos aluviais e flúvio-marinhos são conhecidas como ressacas em Macapá. Os depósitos de planície localizados nas proximidades do rio Amazonas estão sujeitos a inundações, principalmente no pico de cheia de março e abril, que coincide com o período chuvoso da região, o que acarreta, do ponto de vista da qualidade de água subterrânea, aumento significativo nos teores de sólidos totais dissolvidos.

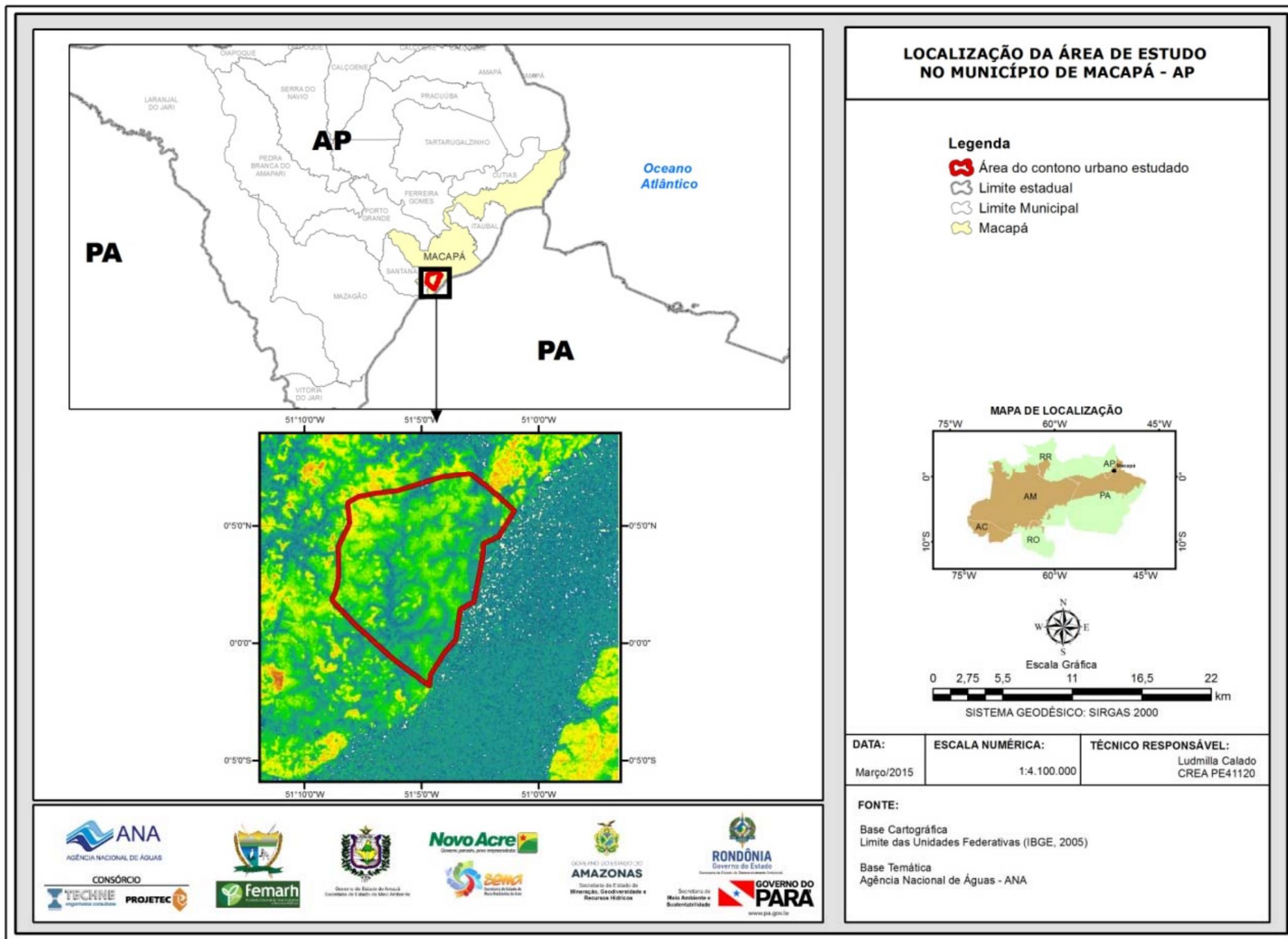


Figura 6.1 – Localização do município de Macapá e da área de estudo.

6.2 - Geologia

A bacia do Marajó é constituída por um conjunto de blocos que incluem zonas profundas (fossas e grabens) e zonas rasas (horsts) que constituem as plataformas rasas, também chamadas ombreiras.

As zonas profundas da bacia do Marajó são divididas em 4 sub-bacias (Mexiana, Limoeiro, Cametá e Mocajuba) e a Plataforma do Amapá.

Na escala da folha de 15 minutos da região de Macapá, do ponto de vista geológico, a cidade de Macapá situa-se no bloco estrutural denominado *Plataforma do Amapá*, que se encontra no setor noroeste da Bacia do Marajó, ou mais exatamente da sub-bacia de Mexiana. A espessura na Plataforma do Amapá, em Macapá, é variável, com espessura máxima de aproximadamente 300 m.

A litoestratigrafia do Cenozoico na vizinha região da Ilha de Marajó revela que a Formação Marajó (eocênica-eomiocênica) ocorre em subsuperfície e corresponde em superfície à Formação Pirabas na Plataforma Bragantina. A Formação Barreiras ocorre em subsuperfície e também em superfície na Plataforma Bragantina. A Formação Tucunaré ocorre em subsuperfície e corresponde em superfície aos sedimentos pós-Barreiras, que na Plataforma do Amapá considera-se estar em repouso discordantemente sobre o embasamento cristalino.

Na região ocorre a junção da geologia da Bacia do Amazonas com a da Bacia do Marajó. A Formação Alter do Chão da Bacia do Amazonas foi datada como cenozoica (Eoceno-Mesomioceno). Portanto, as formações Marajó e Barreiras (Eoceno-Eomioceno e Eomioceno-Mesomioceno), em termos de idade, são em parte equivalentes e também contidas na Formação Alter do Chão.

Na Plataforma de Macapá somente ocorrem sedimentos Quaternários e as águas subterrâneas livres da região de Macapá podem ser caracterizadas como pertencentes ao **aquífero Tucunaré**, com espessura máxima de aproximadamente 300 m, no qual se incluem os sedimentos flúvio-marinhos.

A litologia dos depósitos da Formação Tucunaré, dentro da folha de 15 minutos da área de estudo, é constituída de três unidades distintas de sedimentos: argilo-arenosos, arenoso-argilosos e arenoso-conglomeráticos, reconhecidos como sendo de idade quaternária. Sua espessura é variável e na Bacia do Marajó é de cerca de 600 m na parte leste da ilha, na sub-Bacia de Mexiana.

Os **depósitos Aluviais e Flúvio-Marinhos** ocorrem nas zonas mais baixas da região de Macapá e são de origem fluvial, flúvio-estuarina e flúvio-marinha. Não há diferença significativa entre a sua natureza litológica ou composição granulométrica, porém a sua morfologia permite verificar que pertencem a períodos distintos ao longo da história da formação da planície do baixo Amazonas (Santos *et al.*, 2004).

De modo geral todas essas zonas baixas de planícies interiores ocupadas por depósitos aluviais e flúvio-marinhos são conhecidas localmente como zonas de ressacas ou simplesmente como **ressacas**. Os depósitos de planície localizados nas proximidades do rio Amazonas são interpretados como **várzeas**, “pois embora possam assemelhar-se aos **sistemas de ressacas**”,

segundo Takiyama & Silva (2003), “a dinâmica de inundação e o tipo de solo permitem que sejam distinguidas das **ressacas**”.

Não obstante, do ponto de vista litoestratigráfico, todos esses depósitos quaternários no sistema de igarapés da Fortaleza, conforme revelam resultados de análises granulométricas realizadas por Torres & Oliveira (2003), são constituídos de silte, silte-arenoso até areia média a fina, com presença de matéria orgânica, motivo pelo qual são interpretados no mapa geológico da região de Macapá, elaborado a partir de imagens SRTM TOPODATA (**figura 6.2**), como depósitos aluviais indiferenciados de planície de inundação (Qa).

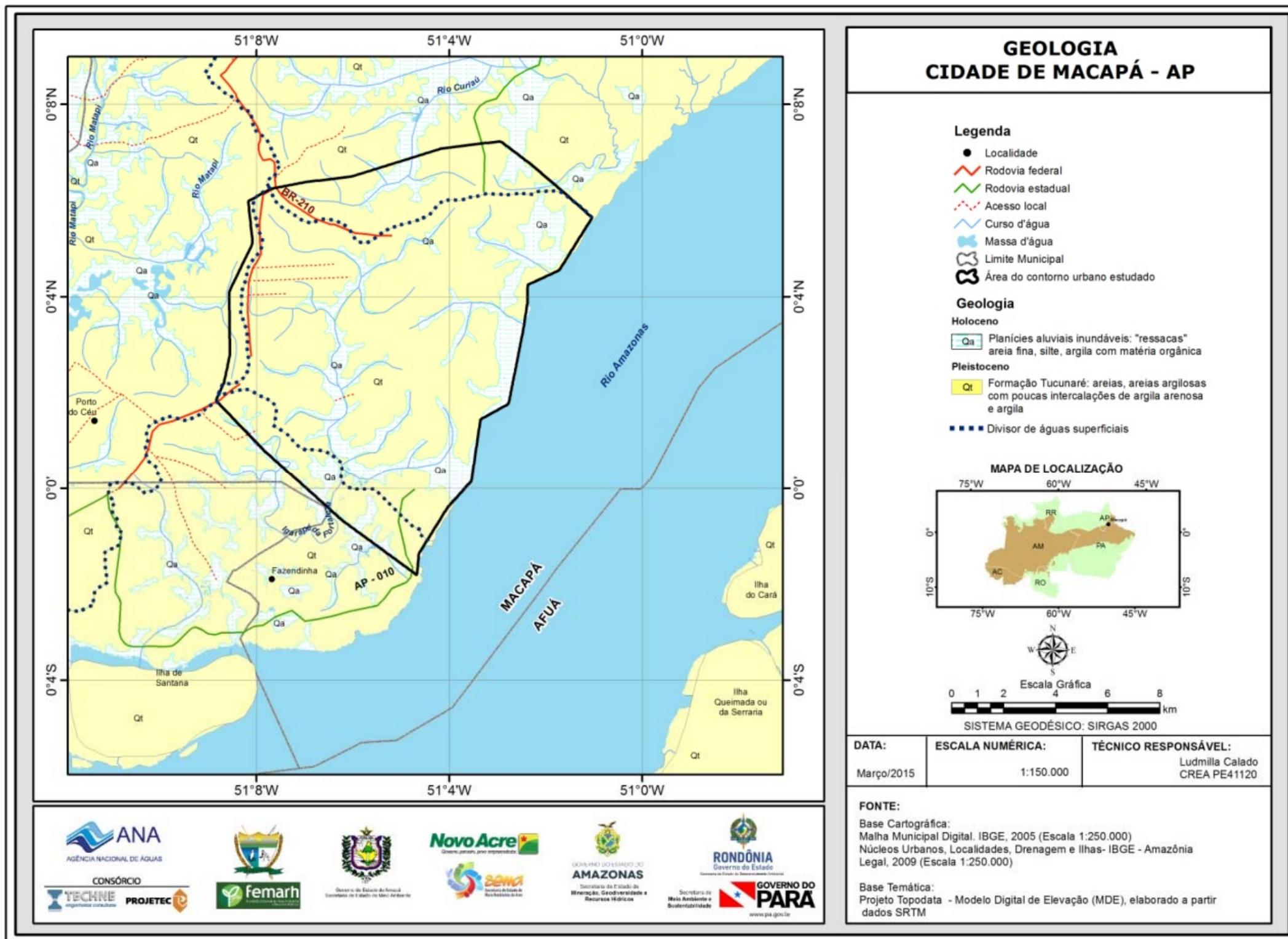


Figura 6.2 – Mapa geológico da folha de 15 minutos e da área de estudo na cidade de Macapá – AP.

6.3 - Hidrogeologia e Hidrodinâmica

Na cidade de Macapá, o aquífero local é formado pelos depósitos pleistocênicos da **Formação Tucunaré** e pelos aluviões holocênicos das planícies aluviais inundáveis. Esse aquífero supostamente repousa sobre o embasamento cristalino na Plataforma do Amapá.

De acordo com os perfis litológicos dos poços catalogados no SIAGAS (CPRM, 2010), essa formação é constituída, sobretudo, de sedimentos arenosos com intercalações de areias argilosas, argilas arenosas e ainda lentes de argila. Em termos de dimensões e limites, o aquífero Tucunaré ocupa dentro da área de 109 km² uma superfície aflorante de 86 km², sendo os 23 km² restantes ocupados pelas planícies aluviais de inundação do rio Amazonas.

As **propriedades hidráulicas** do **aquífero Tucunaré** foram avaliadas através de 2 testes de bombeamento conduzidos no âmbito desse Projeto e ainda através de valores compilados e disponíveis na literatura para a cidade de Macapá. Os testes de aquífero consistem no bombeamento de um poço com uma vazão constante (ou estabilizada ao longo do teste) e, sempre que possível, no acompanhamento da evolução dos rebaixamentos produzidos em um ou mais poços de observação. Quando inexistem poços de observação ou piezômetros, o coeficiente de armazenamento pode ser avaliado de forma aproximada supondo que o raio do poço é infinitamente pequeno. Com essa hipótese o armazenamento no poço se torna desprezível e o armazenamento do aquífero pode ser estimado a 1 m de distância, ou seja, nas proximidades imediatas do poço para permitir o uso dos dados do poço bombeado como se fossem de um poço de observação a essa distância.

No caso específico do estudo executado em Macapá, 2 (dois) testes de bombeamento foram realizados no aquífero Tucunaré, usando os poços CAESA 1 e CAESA 2 sem utilização de poços de observação. A escolha desses poços foi feita por se tratarem de poços profundos (158 e 160 m, respectivamente) e estarem devidamente equipados e em boas condições para teste. As medidas de nível dinâmico foram executadas com uma sonda elétrica sonora e a medição de vazão através de método volumétrico.

Para a **interpretação dos testes de bombeamento** foram utilizados dois métodos, o semilogarítmico de Cooper & Jacob (1946), previsto para aquífero confinado, homogêneo e isotrópico, cujos resultados podem ser vistos na **tabela 6.1**; e o método de Neuman (1975) para aquífero livre, homogêneo e anisotrópico, cujos resultados podem ser observados na **tabela 6.2**. Isto porque, o aquífero Tucunaré apresenta comportamento de aquífero livre.

Tabela 6.1 – Parâmetros hidráulicos avaliados para o aquífero Tucunaré na cidade de Macapá – AP, pelo método de Cooper & Jacob (1946).

Poço	UF	Longitude Decimal	Latitude Decimal	Aquífero	T (m ² /dia)	b (m)	K (m/dia)	S (adm)
CAESA 1	AP	-51,0544	-0,0328	Tucunaré	1158	160	7,24	0,022
CAESA 2	AP	-51,0767	-0,045	Tucunaré	2238	158	10,04	0,042
		Média			1710	159	8,64	

T = transmissividade; K = condutividade hidráulica; S = coeficiente de armazenamento; b=Espessura saturada

Tabela 6.2 – Parâmetros hidráulicos do Aquífero Tucunaré em Macapá - AP obtidos pelo modelo de Neuman (1975).

Poço	Longitude	Latitude	T (m ² /dia)	Kh (m/dia)	Kv (m/dia)	KD (adm)	Sy
CAESA 1	-51,0540	-0,0328	69,1	2,9	0,0125	0,004	0,04
CAESA 2	-51,0767	-0,045	220,3	9,2	0,037	0,004	0,11
Média			145	6	0,025	0,004	0,08

T = transmissividade; Kh = condutividade hidráulica; horizontal; Kv= condutividade hidráulica vertical; Sy= Porosidade efetiva; KD= Grau de anisotropia.

Os valores finais considerados representativos do aquífero como um todo, correspondem a uma condutividade hidráulica horizontal de 6 m/dia e uma porosidade efetiva (Sy) média de 8%. A espessura saturada já conhecida através de poços existentes é de 159 m, mas não penetra totalmente o aquífero Tucunaré, o que leva a supor que a real potencialidade do mesmo é superior.

Como os valores do coeficiente de armazenamento (S) avaliados com o modelo de Cooper & Jacob (1946) foram inconsistentes, houve a necessidade de reavaliação dos testes pelo modelo de Neuman (1975), o qual forneceu valores plenamente satisfatórios para uma caracterização confiável do aquífero Tucunaré como sendo do tipo livre, homogêneo e anisotrópico com drenagem gravitacional.

A partir das medições de **profundidade do nível estático** dos poços localizados no município de Macapá, foram elaborados para o aquífero Tucunaré os mapas de profundidade de nível e de potenciométrica para cada período de medição (chuvoso e estiagem), onde se obteve uma variação média sazonal de 3,31 m.

A distribuição espacial da profundidade de nível das águas subterrâneas, referente ao período chuvoso (abril de 2012), ilustrada na **figura 6.3a**, mostra que os níveis estáticos do aquífero Tucunaré variam de 2 m a 10 m, enquanto que na estiagem, os níveis estáticos se acham mais profundos, variando desde 6 m até 14 m (**figura 6.3b**).

A **potenciométrica** do aquífero Tucunaré em abril de 2012 é apresentada na **figura 6.4a** e em outubro de 2012 na **figura 6.4b**. As cargas hidráulicas variam de 5 a 40 m no período chuvoso e de 5 a 35 m na estiagem, exibindo um comportamento indicativo da influência da exploração do aquífero pela rede de poços produtores. Isto é revelado pelas curvas fechadas, deprimidas por bombeamento, que formam cones de depressão, e/ou curvas em forma de domos, que sugerem níveis de água localmente em recuperação.

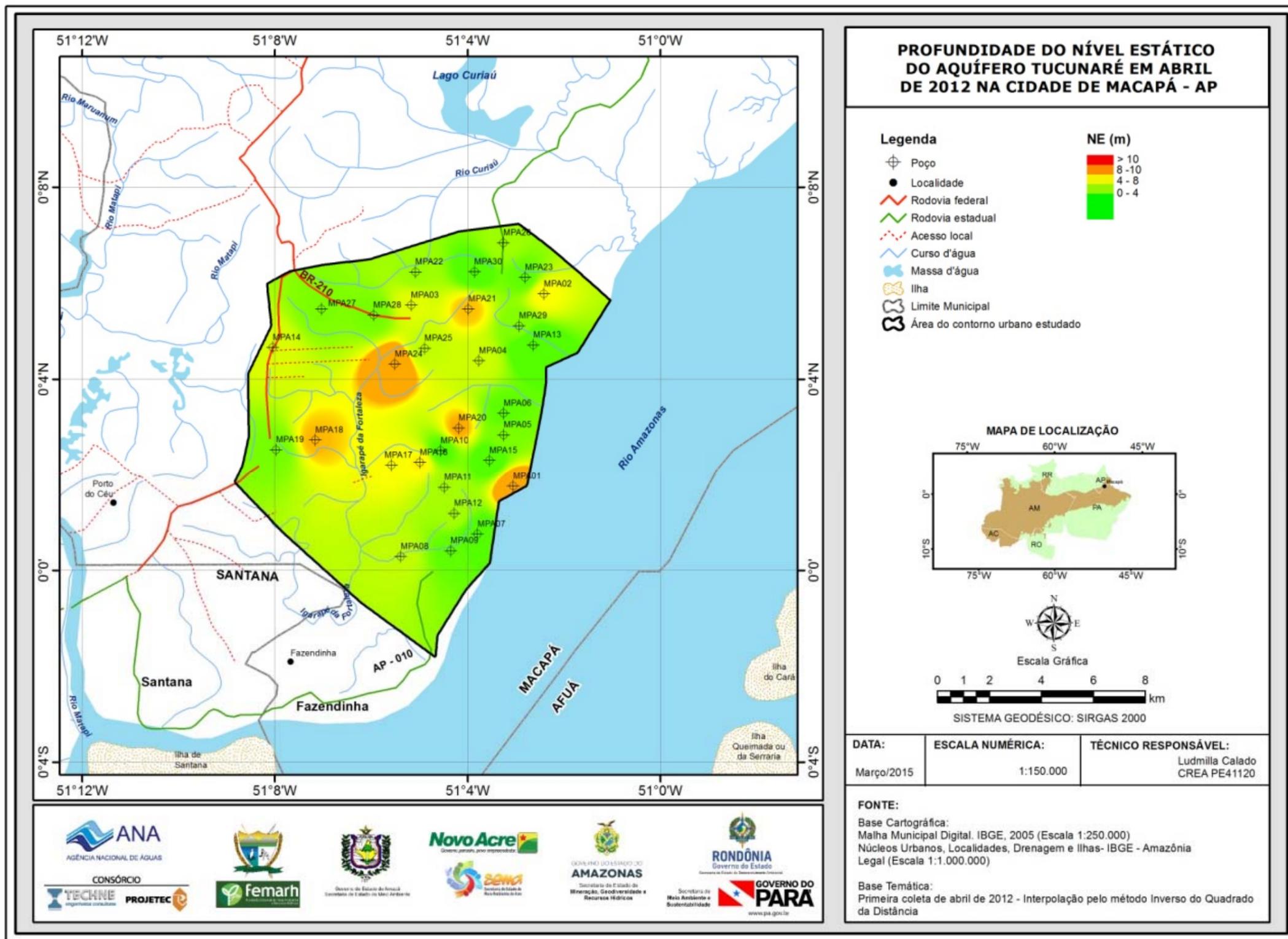


Figura 6.3a - Profundidade do nível estático das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré em abril de 2012 na cidade de Macapá - AP.

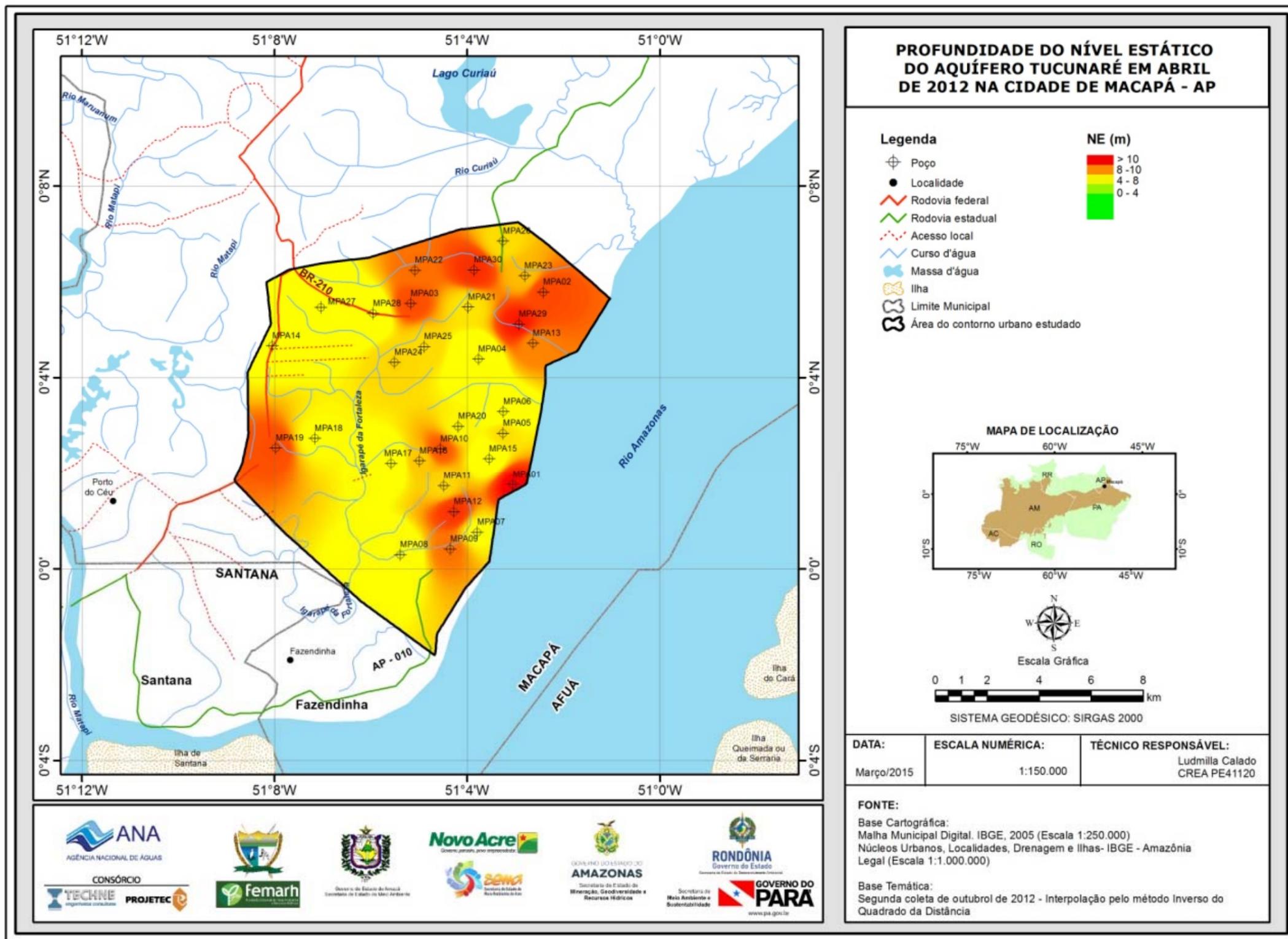


Figura 6.3b - Profundidade do nível estático das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré em outubro de 2012 na cidade de Macapá - AP.

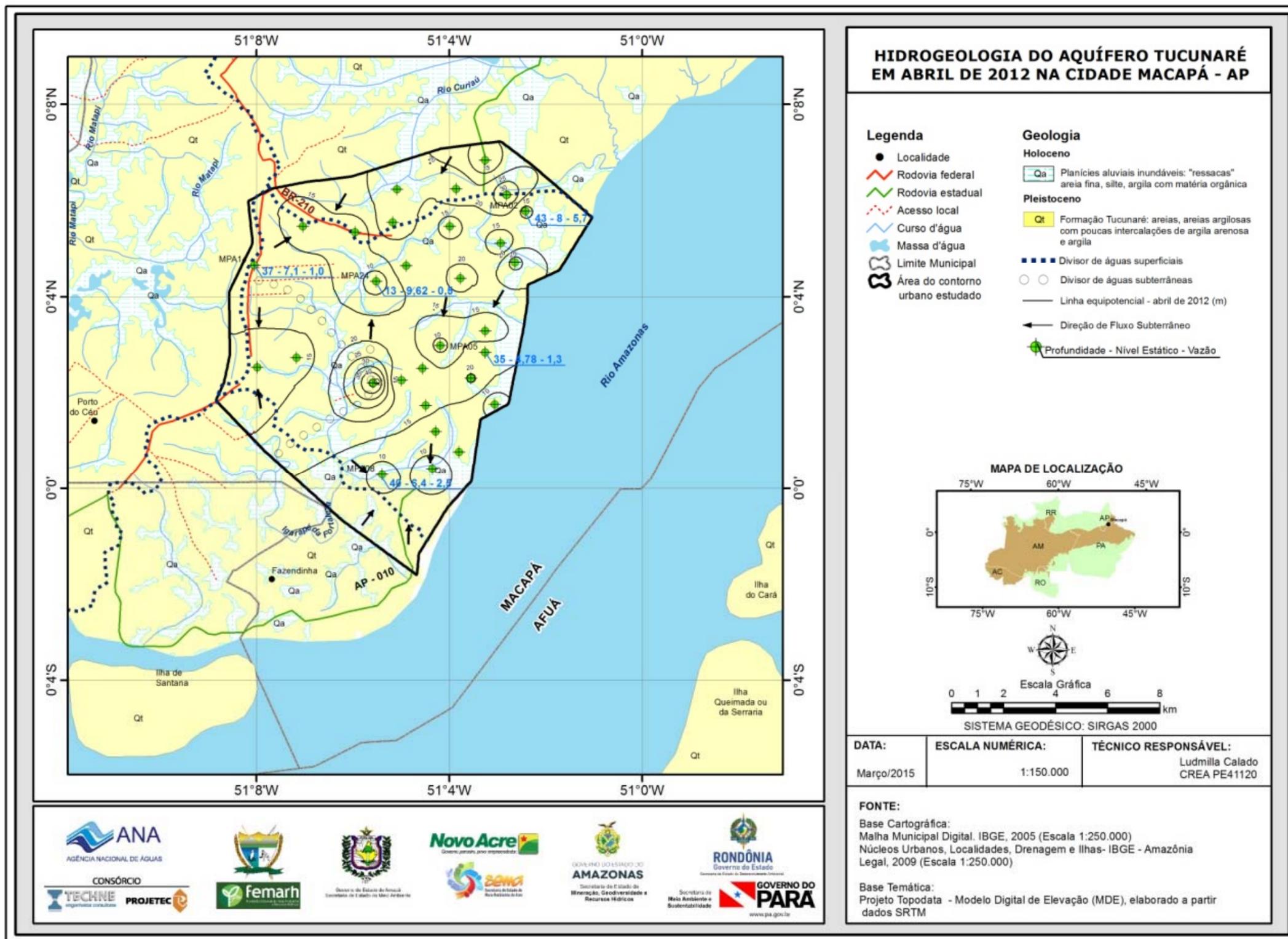


Figura 6.4a - Hidrogeologia e superfície potenciométrica das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré em abril de 2012 na cidade de Macapá - AP.

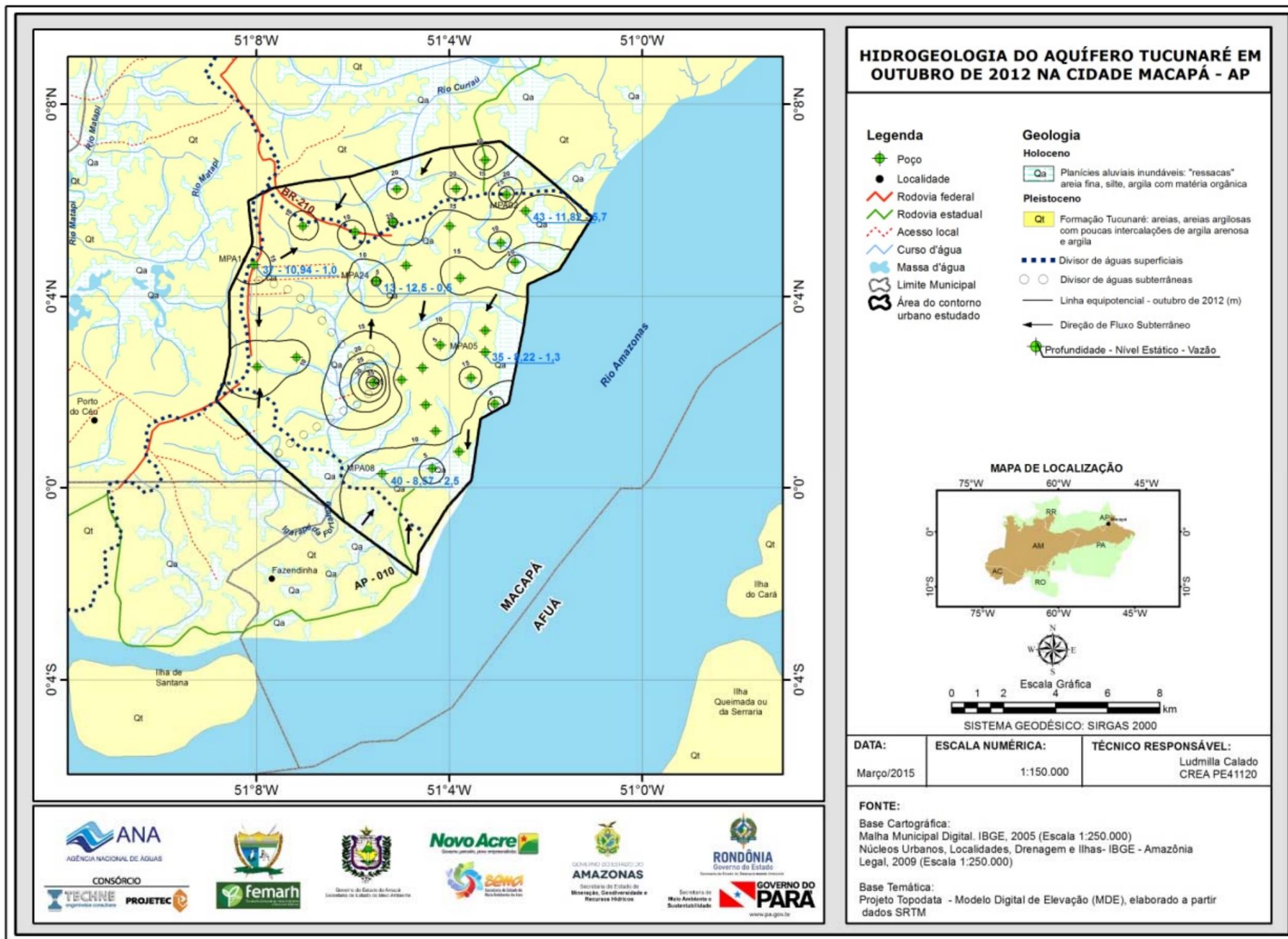


Figura 6.4b - Hidrogeologia e superfície potenciométrica das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré em outubro de 2012 na cidade de Macapá - AP.

Em escala local da folha de 15 minutos de Macapá, o escoamento das águas subterrâneas se faz para os poços existentes em operação e também ao longo de uma frente de escoamento natural de direção Sudeste, não capturada pelos poços. Esse escoamento natural tem como área de recarga efetiva a área da bacia setentrional do Igarapé da Fortaleza, com 109 km², já que nos 35 km² restantes da área de estudo as águas infiltradas escoam para outras bacias hidrográficas.

De acordo com as linhas potenciométricas da **figura 6.4a**, as águas subterrâneas que escapam da convergência para poços existentes em exploração escoam em direção ao longo de uma frente natural de direção sudeste, no sentido do rio Amazonas. No período de estiagem (**figura 6.4b**), o comportamento do fluxo subterrâneo se mantém similar ao do final do período chuvoso.

Para estimativa da **Recarga Potencial Direta (RPD)**, **Reserva Potencial Explotável (RPE)** e **Reserva Permanente (RP)**, apresentadas na **tabela 6.3**, utilizou-se a área de 109 km², delimitada para o balanço hidrogeológico na zona urbana de Macapá, correspondente à bacia hidrográfica setentrional do igarapé da Fortaleza, onde se verificou uma variação sazonal média da superfície freática entre as duas campanhas de medições de nível de 3,31 m. Adotou-se para o aquífero Tucunaré em Macapá, o coeficiente de sustentabilidade (CS) de 0,4; a espessura média saturada (b) de 150 m; e a porosidade efetiva (Sy) de 8%.

Tabela 6.3 - Reservas do aquífero Tucunaré na zona urbana de Macapá, na área de 109 km² do balanço hidrogeológico.

Reservas	Unidade	Valor
Reserva reguladora ou Recarga potencial direta (RPD)	m ³ /s	0,916
Reserva potencial explotável (RPE)	m ³ /s	0,366
Reserva permanente (RP)	m ³	1,27 x 10 ⁹

A pesquisa hidrogeológica desenvolvida na cidade de Macapá baseou-se em dados dos 136 poços constantes no SIG ANA PHA 2013, dos quais 22 poços são catalogados no SIAGAS – Sistema de Informações de Águas Subterrâneas do Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2010) e 114 são novos poços cadastrados pela ANA, no âmbito desse Projeto.

A profundidade desses poços varia de 6 a 160 m, contudo a maioria dos poços, cerca de 86%, possui profundidade total inferior a 40 m.

Os níveis estáticos ficam compreendidos entre 2 a 38 m, porém quase 68% dos poços possuem níveis estáticos <10 m.

A vazão oscila de 1 a 90 m³/h, porém ressalta-se que 82% dos poços com profundidade <60 m possuem vazões <5 m³/h, enquanto que apenas 11,5% possui vazão acima de 10 m³/h (**figura 6.5**).

Quanto ao uso da água subterrânea para os 136 poços em Macapá, verifica-se que 90% são destinados ao abastecimento; 1% ao abastecimento múltiplo; e os 9% restantes não relataram o tipo de uso.

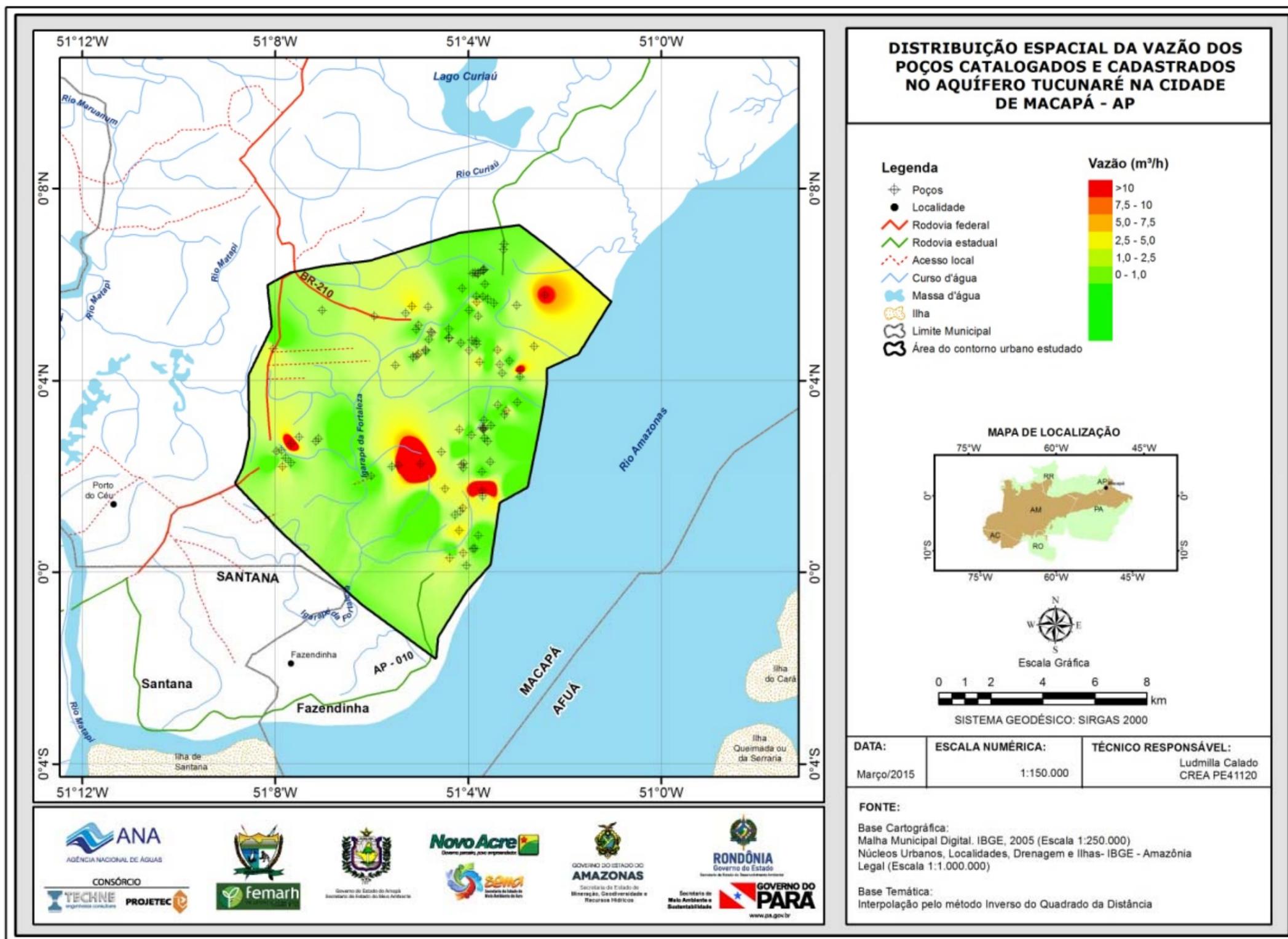


Figura 6.5 – Distribuição espacial da vazão dos poços cadastrados e catalogados na região de Macapá – AP.

6.4 - Hidrogeoquímica

Com o intuito de avaliar a qualidade das águas subterrâneas do Aquífero Tucunaré na cidade de Macapá, foram realizadas 30 (trinta) análises físico-químicas e bacteriológicas; 10 (dez) análises de metais pesados, BTEX e fenóis; 04 (quatro) análises de isótopos ambientais estáveis - deutério e oxigênio-18; 07 (sete) análises do isótopo ambiental radioativo – trício; e 02 (duas) análises do isótopo ambiental - carbono 14.

As análises físico-químicas e bacteriológicas avaliaram os seguintes parâmetros: cor, turbidez, condutividade elétrica (CE), temperatura, sólidos totais dissolvidos (STD), pH *in situ*, potencial redox (Eh), sódio, potássio, cálcio, magnésio, dureza, cloreto, sulfato, bicarbonato, nitrito, nitrato, amônia, ferro, manganês, Coliformes Totais e Termotolerantes (*E. Coli*).

Foram realizadas duas campanhas de amostragem, com 6 (seis) meses de defasagem, sendo uma no período chuvoso (abril de 2012) e outra no período de estiagem (outubro de 2012). As análises de metais pesados, BTEX, fenóis e isótopos ambientais foram efetuadas apenas na segunda campanha de amostragem. A localização dos pontos de amostragem na área de estudo pode ser observada na **figura 6.6**.

O estudo hidrogeoquímico das águas do aquífero Tucunaré na cidade piloto de Macapá indicou que, de forma geral, os teores analisados se encontram em baixíssimas concentrações devido ao clima chuvoso da Floresta Tropical Amazônica, e que alguns poucos valores extremos encontrados, inclusive acima do VMP estabelecido como de potabilidade pela Portaria MS 2914/2011, assim como os usos preponderantes da água subterrânea definidos pela Resolução CONAMA 396/2008, se devem em grande parte a fatores antrópicos. As únicas exceções são os parâmetros ferro e manganês que são provenientes da condição geológica local.

Os resultados obtidos no aquífero Tucunaré em Macapá mostraram que 92% das amostras coletadas apresentaram valores de cor inferior ao limite de detecção de 5 uH; apenas 1 poço (MPA29), com valor de 690 uH na primeira campanha, ultrapassou o VMP de potabilidade de 15 uH da Portaria MS 2914/2011, sugerindo que esta água não é própria para consumo humano. Esse resultado provavelmente se deve a contaminação por lançamento de esgoto *in natura*, próximo ao local de instalação do poço, que se encontra em terreno alagado e baldio em uma zona de ressaca.

No período chuvoso e de estiagem, respectivamente, 23% e 53% das análises apresentaram valores de turbidez abaixo do limite de detecção de 0,1 uT; na primeira e segunda campanha, simultaneamente, 13% e 10% dos poços apresentaram valores de turbidez acima do VMP de potabilidade de 5 uT da Portaria MS 2914/2011.

Os teores da condutividade elétrica (CE) no período chuvoso variaram de 46 a 274 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com média de 141,9 $\mu\text{S}/\text{cm}$; enquanto que no período seco a variação foi de 11 a 236 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com média de 83 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Os valores de CE obtidos no aquífero Tucunaré em Macapá, em sua maioria, são baixos, haja vista que 73% e 97% dos poços, respectivamente na primeira e segunda coleta, apresentaram resultados inferiores a 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

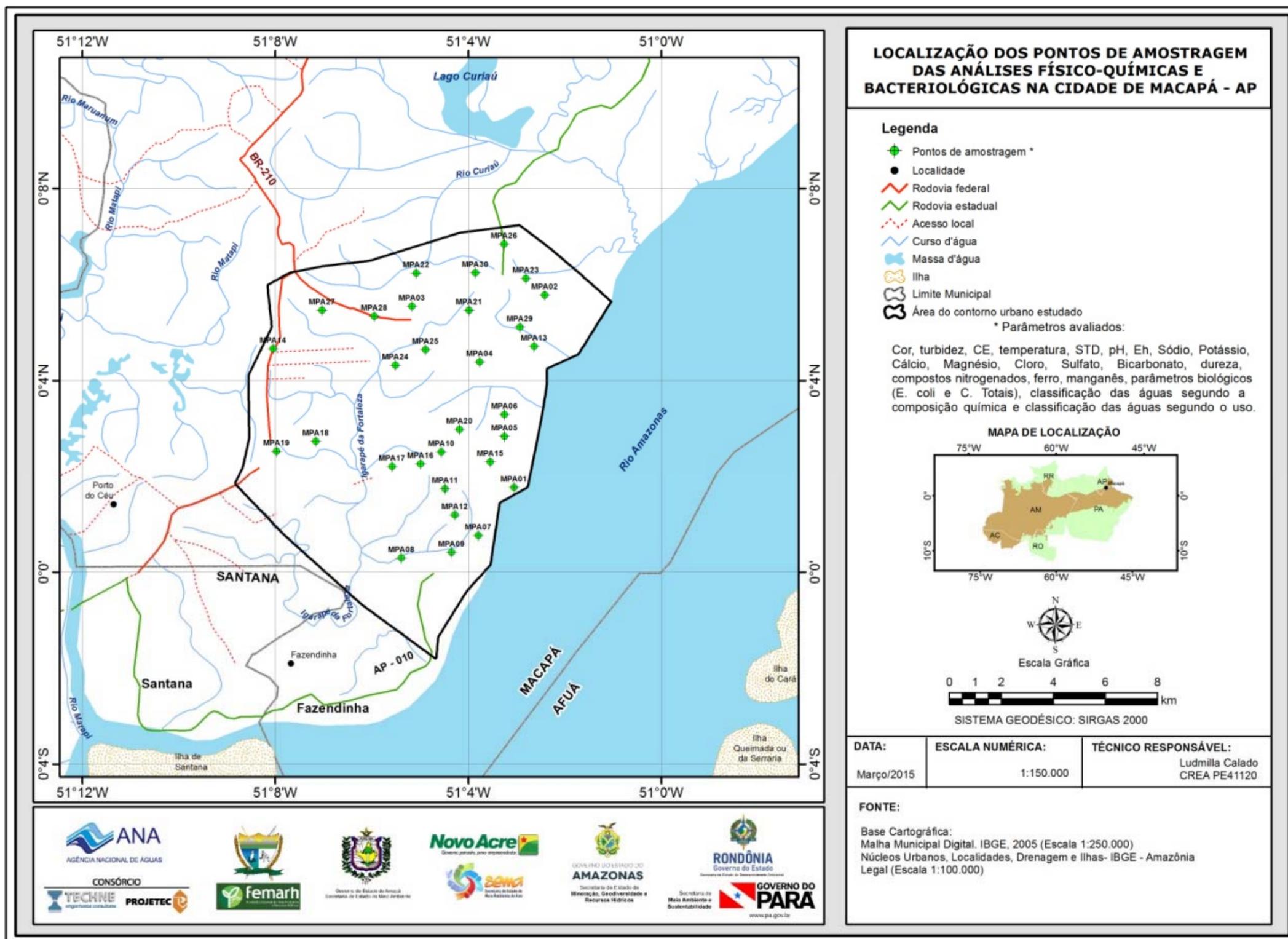


Figura 6.6 – Localização dos pontos de amostragem no aquífero Tucunará na cidade de Macapá - AP.

Tais resultados permitem classificar as águas do aquífero como potáveis. Isto é reflexo do clima da região amazônica, com alta incidência de chuvas, o que assegura a renovação constante das águas dos aquíferos e dos rios ali presentes. Os valores de CE apresentaram forte correlação com o parâmetro nitrato nas duas campanhas de amostragem, sugerindo que há contaminação das águas subterrâneas a partir da infiltração do esgoto *in natura*.

A temperatura das águas do aquífero Tucunaré em Macapá varia no mínimo de 24,4°C ao máximo de 32,3 °C.

No período chuvoso, os teores de STD variaram de 38 a 229 mg/L, com média de 105,2 mg/L; enquanto que no período de estiagem, o mínimo observado foi de 5 mg/L e o máximo de 159 mg/L, com média igual a 58,6 mg/L. Os valores de STD se apresentaram mais elevados no período chuvoso. Ao que tudo indica é resultado do Fenômeno das Ressacas na região, onde ocorrem infiltrações de origem fluvial através do rio Amazonas no pico do período de altas águas, que inundam as áreas de ressaca. Além desse fenômeno natural, outro fator que contribui para esse resultado é a ausência de esgotamento sanitário na região, que permite infiltração de *esgoto in natura* principalmente no período de cheias. Os valores de STD obtidos nas duas campanhas estão abaixo do VMP de 1.000 mg/L da Portaria MS 2914/2011 e da Resolução CONAMA 396/2008, indicando que as águas podem ser usadas para consumo humano.

As águas do aquífero Tucunaré em Macapá são essencialmente ácidas, com pH *in situ* variando no período chuvoso entre 4,0 e 6,4, com média de 5,3; e no período seco oscilando entre 4,5 e 5,7, com média de 5,1.

Os resultados de potencial redox (Eh) altos e positivos sugerem em termos médios que 95% dos poços possuem águas em condições oxidantes, ou seja, baixa atividade de elétrons.

Os teores de potássio no período chuvoso oscilaram entre 0,02 e 12,5 mg/L, com média de 2,3 mg/L; ao passo que no período de estiagem, a variação foi de 0,1 a 4,1 mg/L, com média de 1,0 mg/L. Os teores de potássio encontrados nas duas coletas de amostragem são baixos e podem ser justificados pela alta pluviosidade na região amazônica, a qual favorece a constante renovação das águas e conseqüentemente a diluição dos elementos presentes.

Os teores de sódio, cálcio, magnésio e cloreto se apresentaram mais elevados no período chuvoso, indicado a influência do fenômeno ressaca, que favorece a intrusão de águas marinhas através das “áreas de ressaca” em Macapá, que se constituem em planícies aluviais, as quais são periodicamente inundadas pelo rio Amazonas.

As concentrações de sódio variaram entre 2 e 39,4 mg/L no período chuvoso, com média de 15,7 mg/L; e no período de estiagem oscilaram entre 0,8 e 28,6 mg/L, com média de 10,1 mg/L. De acordo com a Portaria MS 2914/2011, todos os valores de sódio encontrados nas duas campanhas estão abaixo do VMP de 200 mg/L, padrão definido como de potabilidade para consumo humano, assim como dentro dos limites da Resolução CONAMA 396/2008, indicando que as águas podem ser usadas para consumo humano e recreação.

Os teores de cloreto variaram de no mínimo 0,8 mg/L a 51,6 mg/L nas duas campanhas de amostragem, valores muito abaixo do VMP de potabilidade de

250 mg/L da Portaria MS 2914/2011 e da Resolução CONAMA 396/2008, sugerindo que as águas podem ser usadas para consumo humano, irrigação e recreação.

Os teores de sulfato no período chuvoso variaram de 0,49 a 6,4 mg/L, apresentando média de 1,4 mg/L; enquanto que no período seco, os teores variaram de 0,49 a 6,8 mg/L, com média de 1,2 mg/L. Apesar de nenhuma das amostras ultrapassar o VMP de potabilidade para sulfato definido pela Portaria MS 2914/2011 e Resolução CONAMA 396/2008, a sua presença nas águas do aquífero Tucunaré, em ambas as campanhas, se deve provavelmente ao contato dos poços com as fossas sanitárias, as quais em muitos casos são construídas muito próximas, o que favorece a infiltração do esgoto *in natura* e consequentemente a contaminação das águas subterrâneas.

De modo geral, os teores de bicarbonato são baixos e muito próximos nas duas coletas, indicando que não há influência da sazonalidade atuando neste parâmetro, haja vista que 83% das amostras em ambas as campanhas obtiveram valores iguais à zero.

Os teores da dureza no período chuvoso oscilaram entre 0,4 e 29,3 mg/L, com média de 5,8 mg/L; e no período de estiagem, variou de 0,6 a 15,1 mg/L, com média de 3,9 mg/L. Esses valores revelam que as águas do aquífero Tucunaré são do tipo mole, pois 100% das amostras apresentaram valores inferiores a 50 mg/L. Nas duas campanhas, nenhum dos poços amostrados ultrapassou o VMP recomendável pela Portaria MS 2914/2011, de 500 mg/L para consumo humano.

Dentre o total de amostras analisadas nas duas campanhas, 30% dos poços no período chuvoso e 10% no período de estiagem, apresentaram valores de nitrato que ultrapassaram o VMP de potabilidade de 10 mg/L, recomendável pela Portaria MS 2914/2011, além de não serem indicadas para consumo humano e para recreação segundo a Resolução CONAMA 396/2008. Contudo, todas as amostras analisadas nas duas campanhas poderiam ser utilizadas para a dessedentação animal, haja vista que não ultrapassaram os limites definidos pela Resolução citada. Tais resultados sugerem que no período chuvoso, quando ocorre o fenômeno da ressaca na região, provavelmente as fossas sépticas transbordam juntamente com as galerias pluviais, que se misturam as águas superficiais e posteriormente infiltram no lençol freático, ocasionando a contaminação das águas subterrâneas.

Os teores de nitrito são praticamente desprezíveis nas águas do aquífero, uma vez que 98,5% das amostras apresentaram resultados abaixo do limite de detecção, e o único valor quantificável foi de 0,11 mg/L na segunda campanha, muito abaixo do VMP de 1 mg/L de potabilidade da Portaria MS 2914/2011 e Resolução CONAMA 396/2008, indicando que as águas podem ser usadas para o consumo humano, dessedentação de animais, irrigação e recreação.

Na primeira e segunda campanha, respectivamente, 20% e 10% das amostras analisadas apresentaram valores de amônia que ultrapassaram o VMP recomendável pela Portaria MS 2914/2011 para consumo humano de 1,5 mg/L.

Os teores de ferro nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré variaram de no mínimo 0,005 a máximo de 9,5 mg/L nas duas campanhas. No período chuvoso e de estiagem, respectivamente, 37% e 30% dos poços apresentaram

valores que ultrapassaram o VMP de potabilidade recomendável pela Portaria MS 2914/2011, além de não serem indicadas para consumo humano e para recreação segundo a Resolução CONAMA 396/2008. Além disso, 7% dos poços amostrados na primeira campanha apresentaram teores de ferro que ultrapassaram os limites recomendados para irrigação, de acordo com a Resolução CONAMA 396/2008.

Os teores de manganês no período chuvoso variaram de 0,00009 a 0,08 mg/L, com média de 0,008 mg/L; e no período seco, oscilou de 0,0009 a 0,06 mg/L, com média igual a 0,006 mg/L. Em ambas as campanhas, observou-se que nenhum dos poços apresentou teores de manganês acima do VMP de 0,1 mg/L estabelecido pela Portaria MS 2914/2011, bem como ultrapassou os limites previstos na Resolução CONAMA 396/2008, no que se refere aos usos da água para consumo humano, irrigação e recreação. Apenas 3% dos poços em ambas as campanhas apresentaram teores de manganês que ultrapassaram os limites recomendados para dessedentação animal, de acordo com a Resolução CONAMA 396/2008. Os resultados acima do VMP foram obtidos nos poços MPA12 (0,08 mg/L) e MPA04 (0,06 mg/L), respectivamente na primeira e segunda campanha.

A avaliação dos parâmetros biológicos indicou a presença de Coliformes totais no período chuvoso em 63% dos casos e no período de estiagem em 40% das amostras. Além da presença de C. totais também foi verificada a ocorrência de *E. Coli* em 10% das amostras em ambas as coletas. Isto significa que as águas do aquífero Tucunaré estão fora dos padrões biológicos recomendados pela Portaria MS 2914/2011 e pela Resolução CONAMA 396/2008, indicando que as suas águas não podem ser utilizadas para consumo humano, dessedentação animal e recreação. Esses resultados correspondem à contaminação das águas subterrâneas por fossas sépticas, devido à ausência de sistema de esgotamento sanitário na região e também pelo fato de que os poços tubulares em sua maioria serem pouco profundos e construídos com técnicas inapropriadas, que deixam os espaços anelares sem a devida proteção sanitária, podendo acarretar diversas doenças de veiculação hídrica.

Todas as amostras analisadas dos metais pesados arsênio, cádmio, cromo e mercúrio apresentaram teores abaixo do limite de detecção, ao passo que bário e zinco obtiveram teores abaixo do VMP definido pela Portaria MS 2914/2011 e Resolução CONAMA 396/2008.

Alguns poços identificados nas proximidades de áreas com presença de descarte inadequado de resíduos sólidos apresentaram teores de chumbo, cobre e níquel acima dos limites definidos pela Portaria MS 2914/2011 e da Resolução CONAMA 396/2008, não sendo suas águas indicadas para consumo humano. Os resultados acima do VMP de chumbo (0,019 mg/L) e cobre (0,23 mg/L) foram obtidos no poço MPA14; enquanto que o valor fora do padrão de níquel foi verificado no poço MPA28 (0,07 mg/L).

No que se refere às análises de BTEX e fenóis, a maioria das amostras apresentaram resultados inferiores ao limite de detecção, bem como todas estiveram dentro dos limites de potabilidade definidos pela Portaria MS 2914/2011 e Resolução CONAMA 396/2008.

Os resultados dos isótopos ambientais revelaram que a recarga do aquífero Tucunaré provém de águas de chuva, de acordo com as análises de oxigênio-

18 e deutério. Segundo as datações efetuadas com trício as águas do aquífero têm idade submoderna com recarga anterior a 1952 e mistura de água submoderna com recarga recente.

Quanto às idades convencionais de carbono-14, há presença de águas modernas com menos de 200 anos, ou seja, águas mais rasas, e de paleoáguas com idade da ordem de 20.000 anos, o que indica águas mais profundas.

No que se refere à classificação das águas subterrâneas de acordo com a composição química é possível verificar que as águas do aquífero Tucunaré em Macapá em sua maioria, são Cloretadas Sódicas e de boa potabilidade, segundo indicação dos diagramas de Piper, Stiff e Schoeller-Berkaloff.

No que concerne à avaliação das águas para irrigação, obtida pela Razão de Adsorção do Sódio (SAR), verifica-se que as águas do aquífero Tucunaré nesta cidade possuem risco de sódio que varia de baixo a médio e salinidade entre fraquíssima a média, indicando que as águas podem ser usadas para o cultivo de boa parte dos vegetais.

De acordo com a Metodologia de Mckee & Wolf (1963), as águas do aquífero Tucunaré na região de Macapá podem ser utilizadas para a dessedentação animal sem restrições, haja vista que os teores de STD encontrados em ambas as campanhas foram baixos.

Além dos fatores antrópicos que influenciam bastante a área de estudo, também é importante destacar o aumento significativo em alguns parâmetros, tais como, STD, sódio, potássio, magnésio, cloreto e condutividade elétrica no período chuvoso, o que sugere uma elevada quantidade de íons nas águas, indicativos da intrusão de águas marinhas através das "áreas de ressaca" na região, que são as planícies aluviais, as quais são periodicamente inundadas pelo rio Amazonas, que também representa uma fonte de recarga do aquífero Tucunaré em Macapá. Aliado a isso, tem-se ainda a hipótese de que a recarga por precipitações se verifica, sobretudo, no trimestre maio-julho, motivo pelo qual as águas subterrâneas no período de estiagem se apresentam mais diluídas do que no período chuvoso.

6.5 - Vulnerabilidade Natural do Aquífero Tucunaré

A vulnerabilidade de um aquífero é a sensibilidade da qualidade da água subterrânea ante uma carga contaminante imposta, determinada pelas características intrínsecas do aquífero e do seu recobrimento. Por tal motivo é tão importante a sua avaliação, que pode ser usada por diferentes métodos. Contudo, no âmbito desse projeto, optou-se pelos mais utilizados na literatura que são o **DRASTIC** (Aller *et al.*, 1985) e o **GOD** (Foster & Hirata, 1988).

A vulnerabilidade do aquífero Tucunaré em Macapá variou de **moderada a alta**, no período chuvoso (abril de 2012), onde o **índice DRASTIC** apresentou resultados entre 131 a 159 (**figura 6.7a**); enquanto que no período de estiagem (outubro de 2012), os resultados do índice variaram de 131 a 149, configurando a vulnerabilidade do aquífero em moderada (**figura 6.7b**).

Mediante avaliação dos parâmetros utilizados pelo método **GOD**, foi possível estimar o Índice de Vulnerabilidade Natural do Aquífero Tucunaré na cidade de Macapá, o qual assumiu valores que variaram de 0,38 a 0,43 na primeira

campanha (abril de 2012), ilustrada na **figura 6.8a**, e um valor constante de 0,38 na segunda campanha (outubro de 2012), o que sugere vulnerabilidade média (**figura 6.8b**).

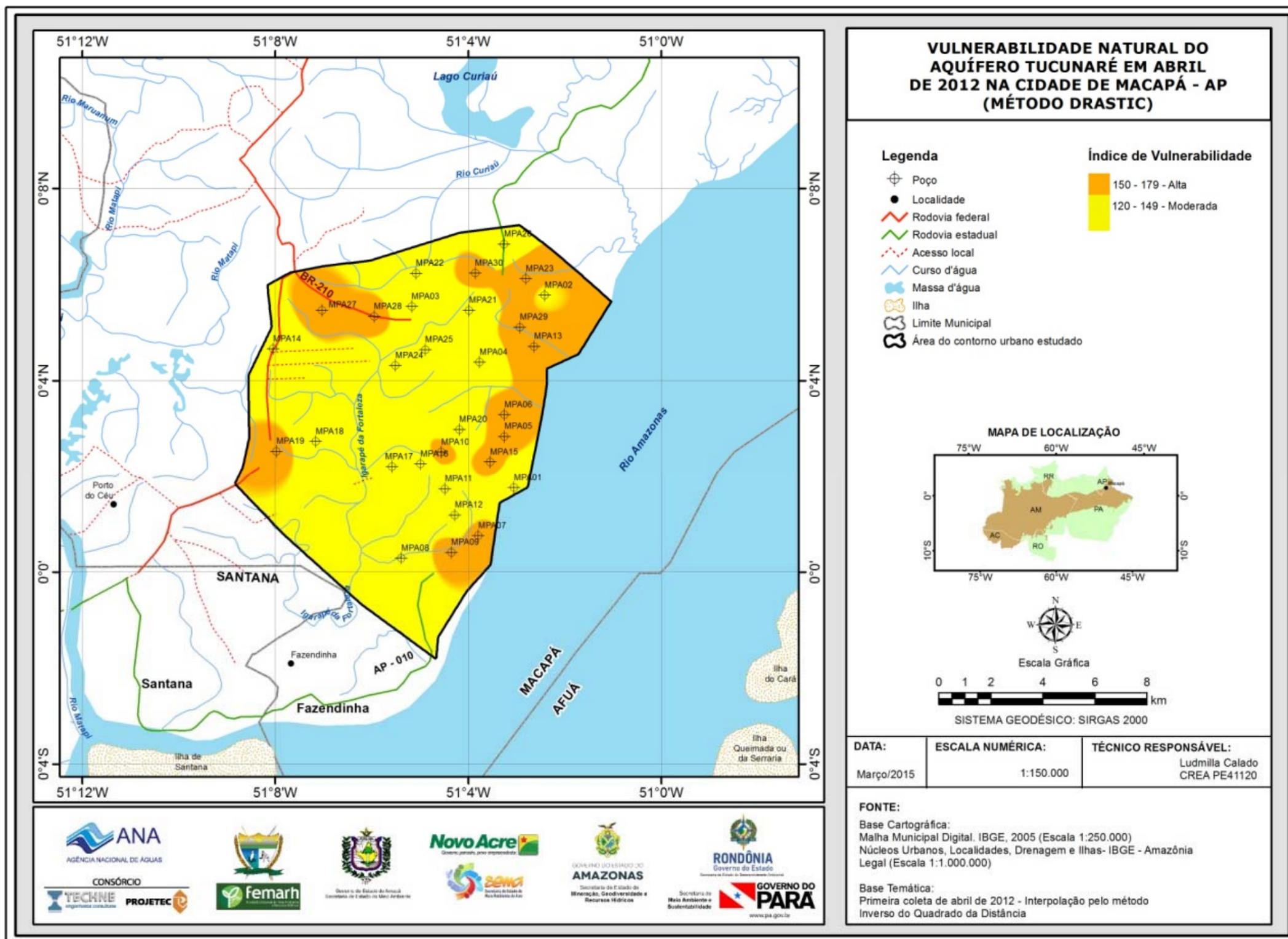


Figura 6.7a – Zoneamento da vulnerabilidade do aquífero Tucunaré na zona urbana de Macapá na coleta de abril de 2012 – Método DRASTIC.

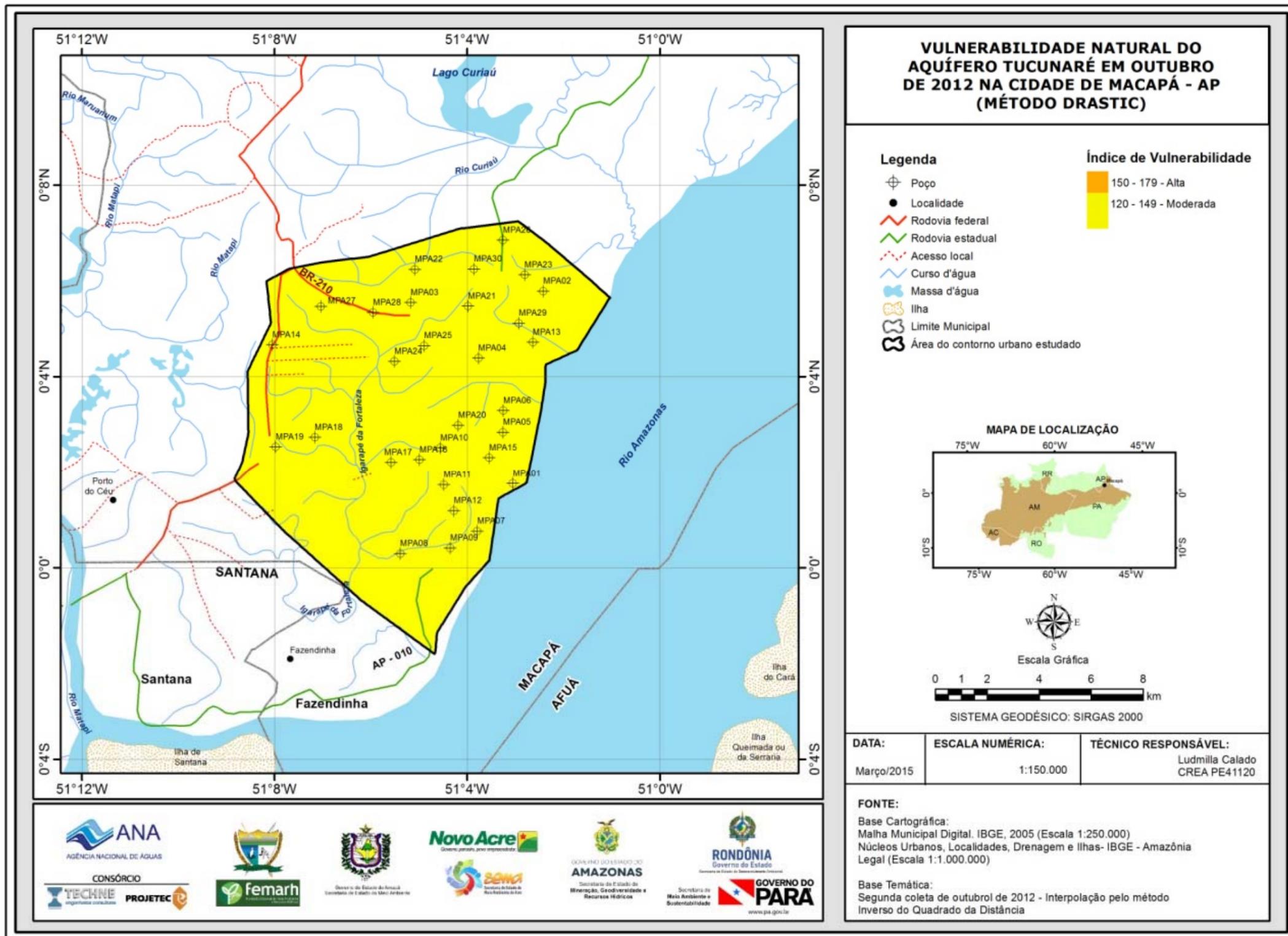


Figura 6.7b – Zoneamento da vulnerabilidade do aquífero Tucunaré na zona urbana de Macapá coleta de outubro de 2012 – Método DRASTIC.

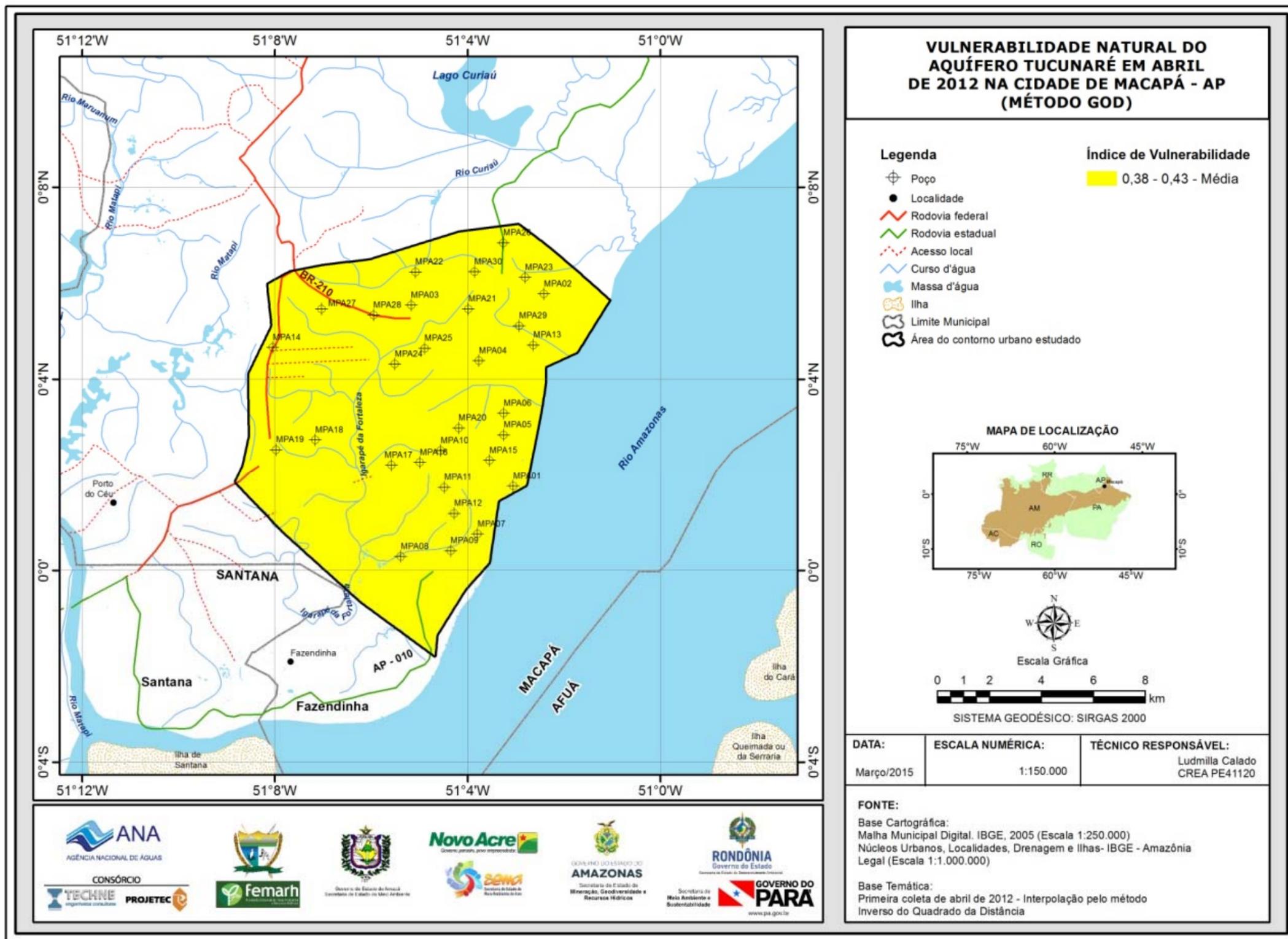


Figura 6.8a – Distribuição espacial da vulnerabilidade média do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (abril de 2012) na cidade de Macapá – AP pelo método GOD.

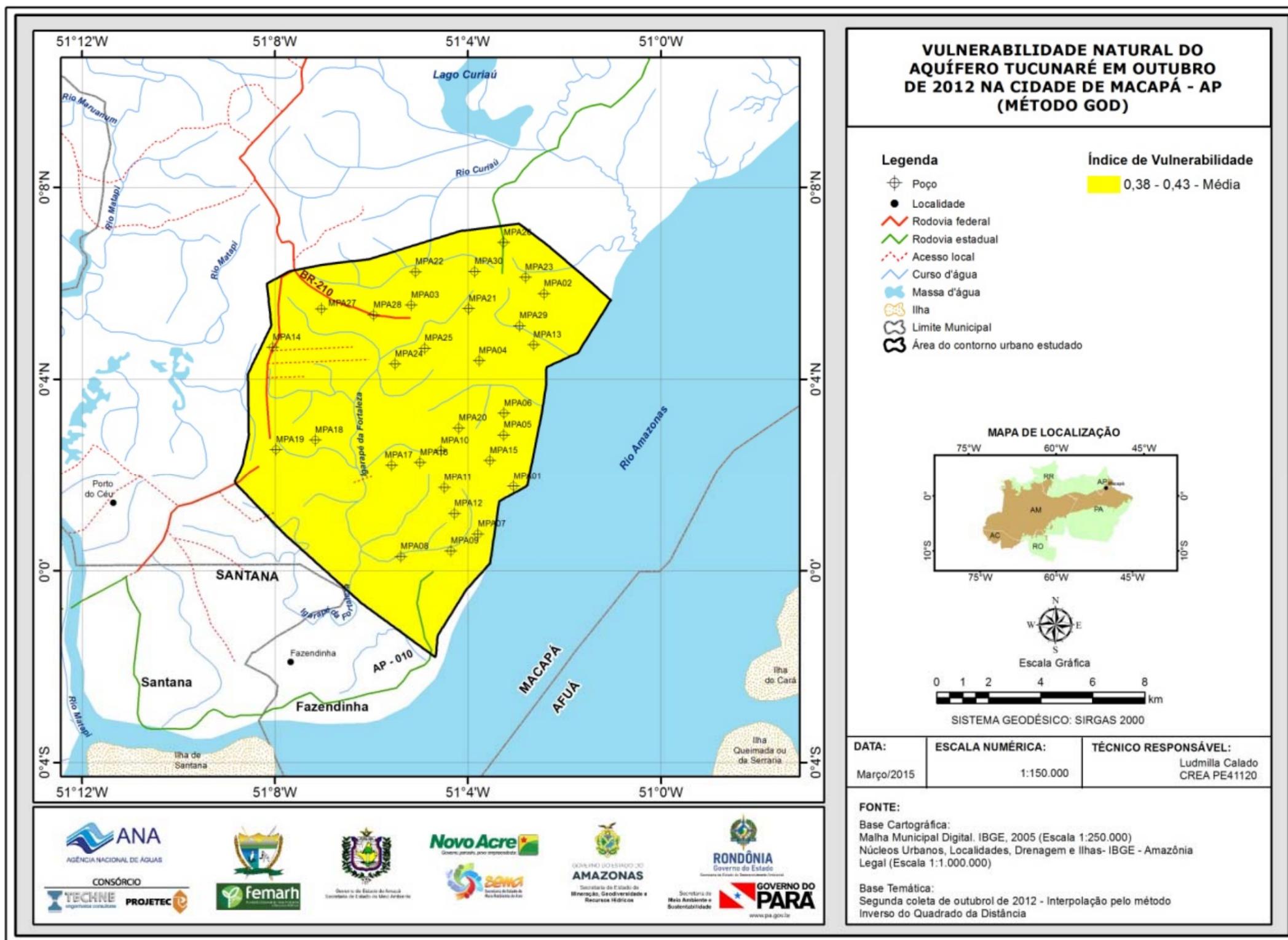


Figura 6.8b – Distribuição espacial da vulnerabilidade média do Aquífero Tucunaré no período seco (outubro de 2012) na cidade de Macapá – AP pelo método GOD.

7 – Cidade Piloto: Porto Velho - RO

7.1 - Introdução

Este estudo visou realizar a caracterização dos aspectos fisiográficos, geológicos, hidrogeológicos, hidrogeoquímicos e a vulnerabilidade natural do aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho na cidade piloto de Porto Velho, principalmente no que diz respeito à qualidade de suas águas.

A cidade de Porto Velho, capital do Estado de Rondônia, está situada na margem direita do rio Madeira, afluente do rio Amazonas, na região Norte do Brasil e tem o centro urbano localizado nas coordenadas geográficas 08°45'43"S e 63°54'14"W. O município de Porto Velho limita-se ao Norte com os municípios de Lábrea, Canutama e Humaitá, no Amazonas; a Leste com os municípios de Machadinho D'Oeste, Cujubim, Itapuã do Oeste e Candeias do Jamari; a Oeste com o município de Acrelândia, no Acre; e ao Sul com os municípios de Alto Paraíso, Buritis e Nova Mamoré (IBGE, 2012).

A área da folha de 15 minutos da região de Porto Velho cobre uma superfície de 756 km², dos quais apenas 166 km² correspondem à área de estudo (**figura 7.1**) propriamente dita, na qual foi realizado o monitoramento dos poços nas duas campanhas de medições de níveis e de coleta de água.

O clima do município de Porto Velho, de acordo com a classificação de Köppen é do tipo Am tropical monçônico megatérmico, com temperatura média mensal compreendidas entre 24,6°C e 26,2°C, com uma média anual de 25,6°C. Caracteriza-se por umidade elevada durante todo o ano, com média compreendida 80% em agosto a 88% em dezembro.

A precipitação média em Porto Velho oscila entre 24,2 mm (julho) e 319,1 mm (dezembro). A média anual é de 2.255,4 mm/ano, dos quais 59% (1.338 mm) precipitam no primeiro semestre e 41% (917,5 mm) no segundo semestre.

A área de estudo é caracterizada por 4 principais níveis de aplainamento: Planície Aluvial Holocênica (5 km²) com cotas entre 25 e 70 m; Terraços Aluviais Pleistocênicos (135 km²) com as cotas variando de mais de 70 até 90 m; Resíduos de Terraços Cenozoicos (17 km²) com cotas compreendidas entre mais de 90 até 100 m; e Resíduos da Superfície Cenozoica Cimeira (9 km²).

Segundo Bezerra *et al.* (2012), o território de Porto Velho contém 3 sub-bacias hidrográficas: a do Igarapé do Belmont ou da Penal (ao Norte), a do Igarapé dos Tanques (no Centro) e a do Igarapé Grande (no Sul). Na escala da folha de 15 minutos, o rio Madeira é o grande curso d'água que atravessa a área da cidade de Porto Velho, escoando de Sul para Norte pelo setor oeste-noroeste, recebendo pequenos tributários, tanto pela margem esquerda quanto pela margem direita.

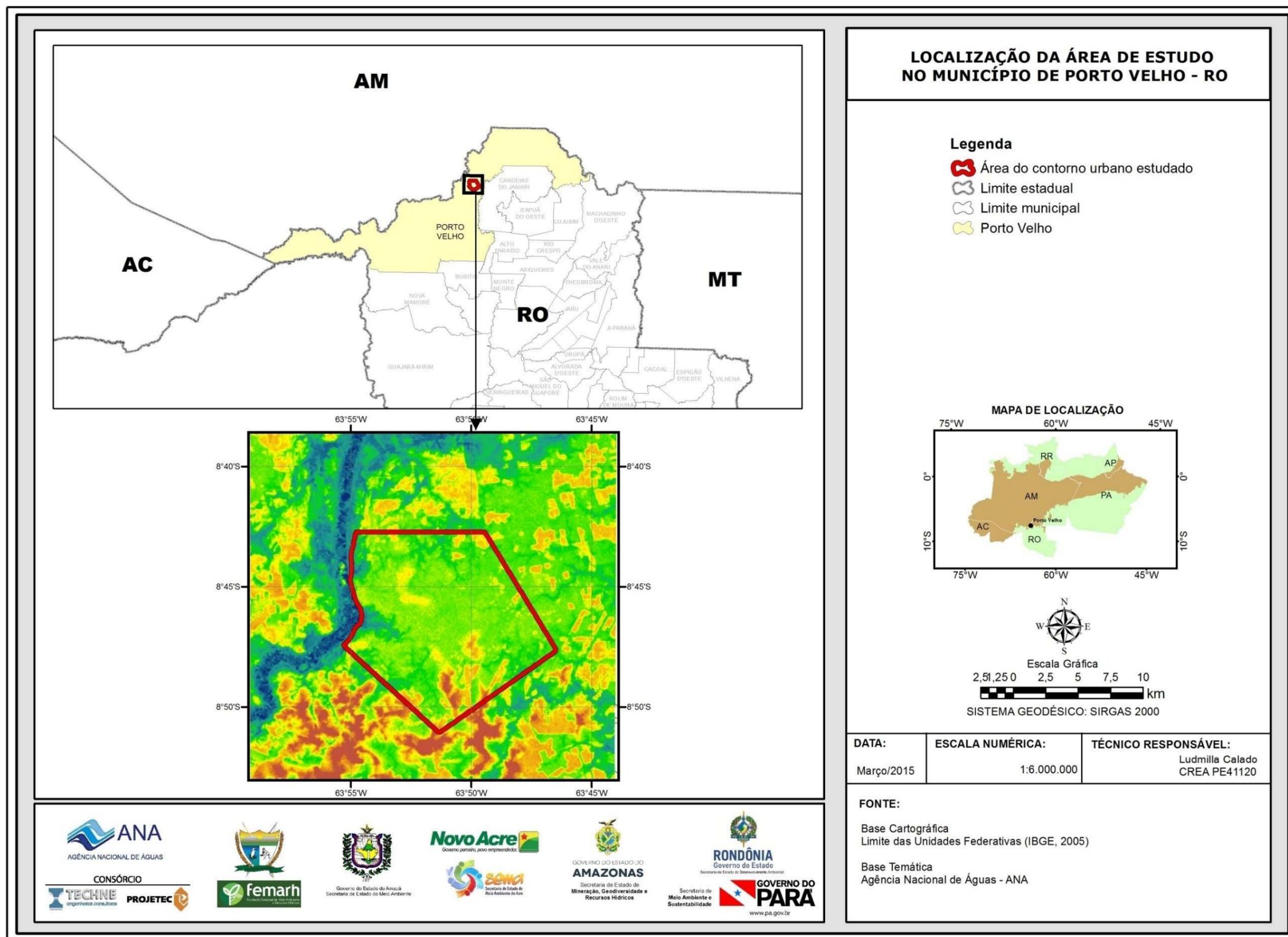


Figura 7.1 – Localização do município de Porto Velho e da área de estudo.

A caracterização dos solos na área de estudo da região de Porto Velho se baseia no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006), através do qual foi possível verificar as seguintes classes de solos: Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (PVAd) com 164 km²; Latossolo Amarelo Distrófico (LAd) com 2 km²; Neossolo Litólico Distrófico (RLd) com 13 km².

A vegetação natural da área de estudo, de acordo com a classificação encontrada em Veloso *et al.* (1991), é composta pelas seguintes unidades: Floresta Ombrófila Aberta Submontana com Palmeiras (7 km²), Floresta Ombrófila Aberta Terras Baixas com Palmeiras (1 km²) e área urbanizada de 75 km². Além dessas unidades existem outras formações de vegetação na região que não ocorrem na área de estudo, como a Floresta Ombrófila Densa Terras Baixas Dossel Emergente e as Formações Pioneiras com Influência Fluvial e/ou Lacustre.

7.2 - Geologia

Localmente, a estrutura e tectônica da região de Porto Velho se afiguram extremamente simples, uma vez que ali apenas ocorrem sedimentos recentes, arenosos e argilo-arenosos de ambiente fluvial, em repouso sobre o embasamento cristalino. Isto é revelado pelos dados de poços tubulares com profundidade de 40 a 140 m existentes na zona urbana de Porto Velho, os quais exibem apenas sedimentos cenozoicos de cobertura, assentados sobre rochas cristalinas.

São de interesse para água subterrânea na área de estudo e suas proximidades, portanto, apenas depósitos terciários e quaternários associados ao rio Madeira. Diversos autores, entre os quais Silva Filho & Campos (2001) e Campos *et al.* (2004), referem-se a esses depósitos como Formação Jaciparaná ou, mais vagamente, como Formação Rio Madeira. Lima *et al.* (2008b) afirmam na revista *Vita et Sanitas* que “na geologia local predomina a Formação Jaciparaná, de idade pleistocênica, colúvio-aluvionar”.

O termo Formação Jaciparaná, em realidade, foi proposto por Adamy & Romanini (1990) para designar os sedimentos associados ao regime do baixo curso do rio Jaciparaná (afluente pela margem direita do rio Madeira), que aí ocorrem recobrando rochas do embasamento, cerca de 80 km a SW da cidade de Porto Velho.

A Formação Rio Madeira, por sua vez, foi descrita por Rizzotto (2005) e Quadros *et al.* (2006), também cerca de 80 km a SW da cidade de Porto Velho. Segundo os autores citados, a Formação Rio Madeira é recoberta por sedimentos mais finos e mais novos que constituem a Formação Jaciparaná.

Estudos mais recentes realizados no âmbito do mapeamento regional do Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2007) delinea e discute os sedimentos recentes do Terciário/Quaternário associados ao Rio Madeira e assentados sobre o embasamento cristalino na área de Porto Velho. Nessa área, o mapeamento distingue as seguintes unidades, da mais recente para a mais antiga:

- Q2a – Holoceno. Depósitos aluvionares arenosos, siltosos e argilosos, com níveis de cascalho.

- Q1t - Pleistoceno. Terraços fluviais característicos de sistemas meandранtes. Constituídos de sedimentos arenosos e siltsos, cascalhos inconsolidados, ferruginosos ou não, com níveis de matéria orgânica.
- NQi – Pleistoceno/Neógeno. Coberturas sedimentares indiferenciadas, incluindo: depósitos de areia, silte, argila e cascalho; restos de materiais lateríticos; sedimentos aluviais, coluviais e eluviais indiferenciados.
- NQdl – Pleistoceno/Neógeno. Coberturas detrito-lateríticas, incluindo: depósitos argilo-arenosos ricos em concreções ferruginosas; crosta laterítica concrecionária; materiais coluviais e eluviais ricos em detritos lateríticos e fragmentos de quartzo.

No âmbito do projeto PHA, a geologia é interpretada de forma ligeiramente distinta em relação ao trabalho da CPRM (2007), levando-se em consideração os perfis litológicos dos 8 (oito) poços tubulares localizados na área de estudo (**figura 7.2**) e as imagens SRTM TOPODATA do INPE, com resolução de 30 m. Tais dados permitem evidenciar a ocorrência de terraços antigos em cotas médias de 100 a 105 m, bem como a planície aluvial com cota média de 85 a 87 m em ambas as margens do rio Madeira e não apenas na margem esquerda.

Como resultado dessa análise e das informações compiladas dos mapeamentos da CPRM (Rizzotto *et al.*, 2004; CPRM, 2007) foi elaborado o mapa geológico apresentado na **figura 7.2**, no qual os depósitos Quaternários do Pleistoceno-Neógeno mapeados pela CPRM (2007) como NQdl (fácies detrito-laterítica) e NQi (fácies indiferenciada), foram reunidos numa só unidade, designada de NQi representativa de depósitos cenozoicos indiferenciados.

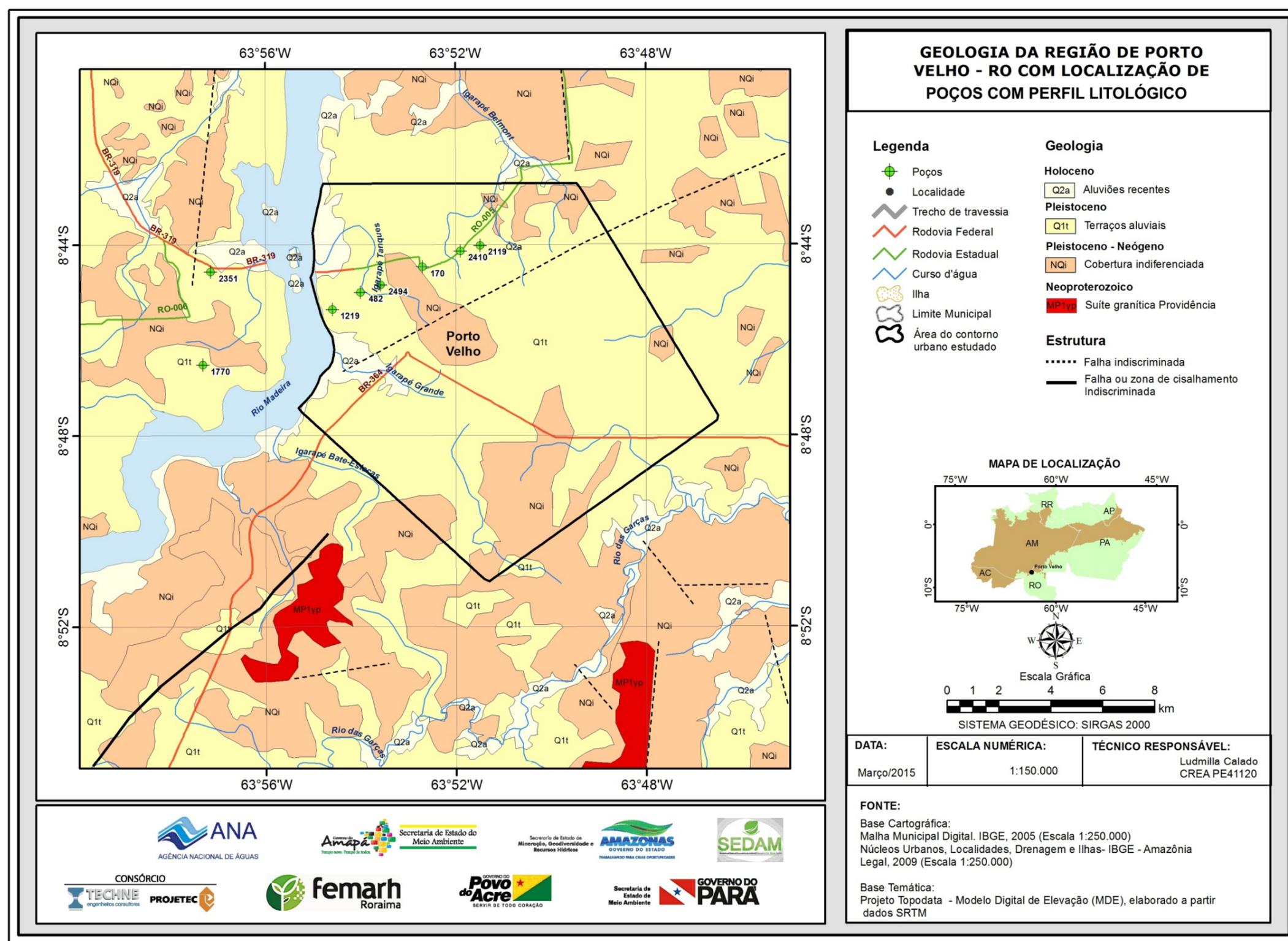


Figura 7.2 – Mapa geológico da região de Porto Velho baseado no modelo digital do terreno e modificado de CPRM (2004; 2007), com localização de seções geológicas esquemáticas.

7.3 - Hidrogeologia e Hidrodinâmica

Os sedimentos de origem essencialmente fluvial que ocorrem sobre o embasamento cristalino na cidade de Porto Velho são coberturas sedimentares indiferenciadas de idade cenozoica. Dado esse conhecimento, fica aqui estabelecido como Aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho para o aquífero captado na zona urbana de Porto Velho, até então conhecido como Aquífero Jaciparaná, que se considera regionalmente do tipo livre e que pode apresentar localmente condições de fraco confinamento.

De acordo com Campos (1998), os sedimentos aluviais na zona urbana de Porto Velho mostram interdigitações de termos mais argilosos com termos mais arenosos. Os intervalos produtores de água, assim, se apresentam frequentemente sob a forma de lentes de variadas dimensões. Campos & Morais (1999), não obstante, baseados nos dados dos poços SIAGAS/CPRM, definiram um paleocanal nos sedimentos aluviais, na porção central da área urbana. A feição apresenta, pelo menos, 9 km de extensão na direção NW-SE, com largura mínima de 2 km. No âmbito do paleocanal os termos arenosos são mais desenvolvidos, com espessura média de 20 m, podendo alcançar até 32 m em alguns locais. A granulometria varia de média a grosseira. Ocorre sempre, no topo da sequência arenosa, uma camada argilosa com cerca de 10 m de espessura, proporcionando uma relativa proteção às águas subterrâneas deste sistema aluvial.

As **propriedades hidráulicas** do aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho foram avaliadas através de 2 testes de bombeamento conduzidos no âmbito desse Projeto e ainda através de valores compilados e disponíveis na literatura para a cidade de Porto Velho.

No caso específico do estudo de Porto Velho, 2 (dois) testes de bombeamento foram realizados no aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho, usando os poços PVH18 e PVH15, sem utilização de poços de observação.

A escolha desses poços foi feita porque a equipe de campo contou com a boa vontade dos proprietários e ainda por estarem os poços devidamente equipados e em boas condições para teste. Ambos os poços possuem 80 m de profundidade. As medidas de nível dinâmico foram executadas com uma sonda elétrica sonora e as medições de vazão através de método volumétrico.

Para a **interpretação dos testes de bombeamento** foram utilizados dois métodos, o semilogarítmico de Cooper & Jacob (1946), previsto para aquífero confinado, homogêneo e isotrópico, cujos resultados podem ser vistos na **tabela 7.1**; e o método de Neuman (1975) para aquífero livre, homogêneo e anisotrópico, cujos resultados podem ser observados na **tabela 7.2**.

Tabela 7.1 – Parâmetros hidráulicos avaliados para o aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho na cidade de Porto Velho - RO, pelo método de Cooper & Jacob (1946).

Poço	UF	Local	Longitude Decimal	Latitude Decimal	Aquífero	T (m ² /dia)	K (m/dia)	S (adm)
PVH18	RO	Av. 7 de setembro	-63,90404	-8,77070	Coberturas Cenozoicas de Porto Velho	196,99	2,93	5,4E-06
PVH15	RO	Rua Vila Rios	-63,85919	-8,80083	Coberturas Cenozoicas de Porto Velho	1,24	0,016	2,7E-03
Média						99	1,5	1,35E-3

T = transmissividade; K = condutividade hidráulica; S = coeficiente de armazenamento

Tabela 7.2 – Parâmetros hidráulicos do Aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho em Porto Velho - RO obtidos pelo modelo de Neuman (1975).

Poço	Longitude	Latitude	b (m)	T (m ² /dia)	Kh (m/dia)	Kv (m/dia)	KD (adm)	Sy
PVH18	-63,90404	-8,77070	20	18,7	0,94	0,75	0,8	0,13
PVH15	-63,85919	-8,80083	20	2,9	0,12	0,10	0,8	0,15
Média			20	10,8	0,53	0,43	0,8	0,14

b=Espessura saturada; T = transmissividade; Kh = condutividade hidráulica; horizontal; Kv= condutividade hidráulica vertical ; KD= Grau de anisotropia; Sy= Porosidade efetiva.

Embora tenha sido feita uma correção de perdas de carga singulares no poço PVH15, a condutividade hidráulica, que é o parâmetro fundamental de transporte, se revela quase 8 vezes inferior ao valor determinado no poço PVH18. Isto se explica pela variação de fácies dos sedimentos no aquífero das Coberturas Cenozoicas de Porto Velho. A porosidade efetiva, no entanto, indica valores bastante próximos, que variam de 0,13 a 0,15 em ambos os poços e indicam para o aquífero um valor médio de $Sy = 0,14$.

Em Porto Velho os valores do coeficiente de armazenamento (S) avaliados com o modelo de Cooper & Jacob (1946), assim como os parâmetros de transporte (transmissividade e condutividade hidráulica), são muito altos e inconsistentes porque não levam em conta fluxos verticais. Isso mostrou a necessidade de reavaliação dos testes pelo modelo de Neuman (1975) que forneceu valores plenamente satisfatórios para uma caracterização confiável do aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho, como sendo do tipo livre, homogêneo e anisotrópico com drenagem gravitacional.

A partir das medições de **profundidade do nível de água** dos poços localizados na cidade de Porto Velho, foram elaborados para o aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho os mapas de variação de nível estático para cada período de medição (chuvoso e estiagem).

A distribuição espacial da profundidade das águas subterrâneas em Porto Velho, no período chuvoso (**figura 7.3a**), mostra que os níveis do aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho são pouco profundos e assumem valores em duas faixas principais: inferiores a 5 m no Leste da área, e compreendidos entre 5 e 10 m no setor Oeste. As zonas com níveis entre 10 e 15 m e superiores a 15 m constituem manchas isoladas em torno de poços que se distribuem na direção aproximadamente paralela ao rio Madeira.

No período de estiagem (**figura 7.3b**), a distribuição espacial da profundidade das águas subterrâneas mantém um padrão análogo ao que se observa no período chuvoso, porém com níveis mais profundos, que oscilam na faixa de 5 a 10 m no Leste, e na faixa de 10 a 15 m no setor Oeste. Valores acima de 15 m ficam restritos a manchas isoladas no setor Oeste, paralelamente à margem direita do rio Madeira.

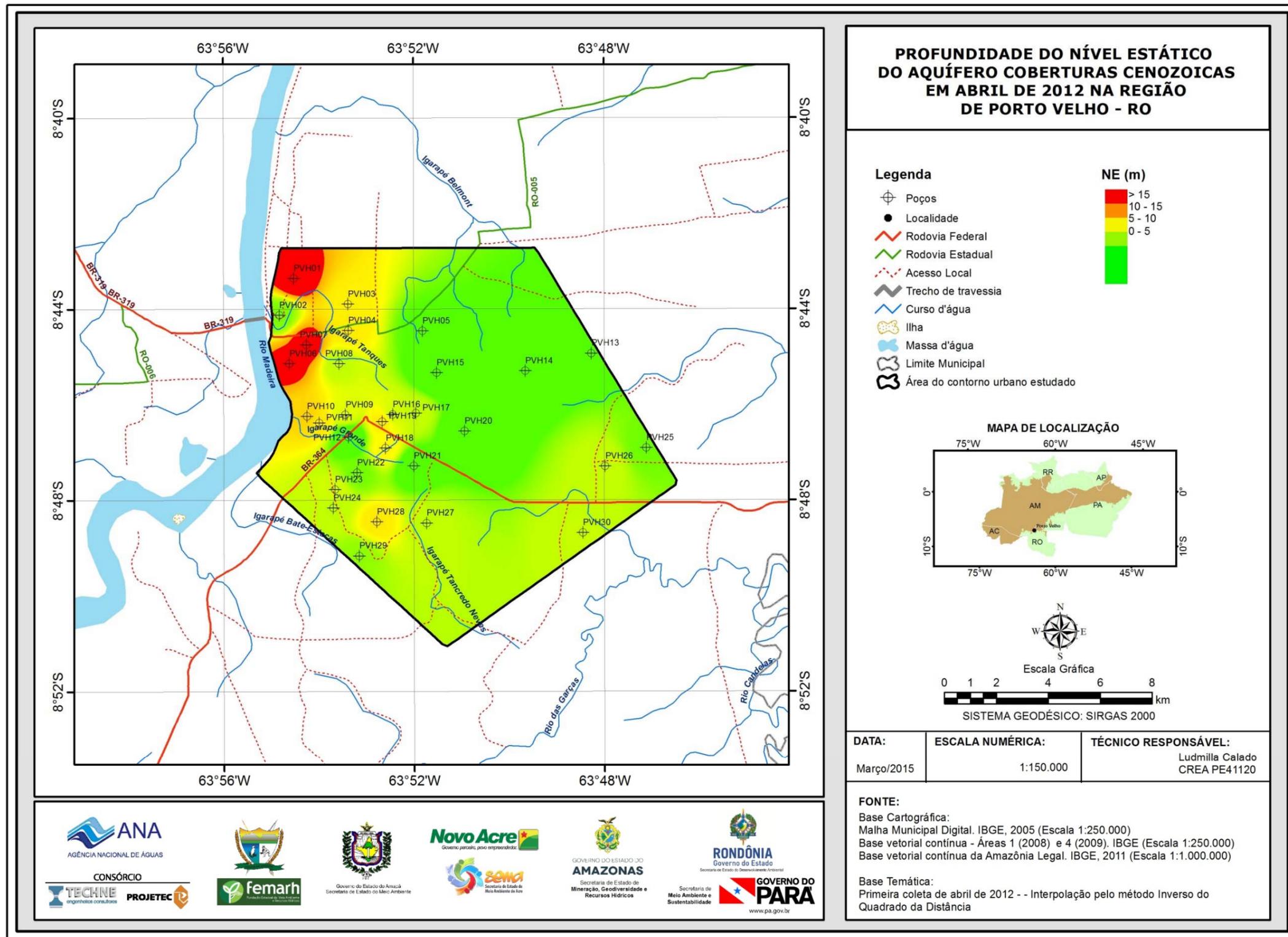


Figura 7.3a – Profundidade do nível estático das águas subterrâneas do aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho em abril de 2012 na cidade de Porto Velho – RO.

A **potenciometria** do aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho no período chuvoso é apresentada na **figura 7.4a**, e no período de estiagem na **figura 7.4b**. As cargas hidráulicas variam de 55 a 82 m no período chuvoso e de 50 a 82 m na estiagem, exibindo um comportamento indicativo da influência da exploração do aquífero pela rede de poços produtores. Isto é revelado pelas curvas fechadas, deprimidas por bombeamento, que formam cones de depressão e/ou curvas em forma de domos, que sugerem níveis de água localmente em recuperação. Percebe-se, ao longo da frente de escoamento geral para Oeste (Frente W), que a eventual conexão lateral do rio Madeira com o aquífero em exploração é mascarada pela influência dos bombeamentos dos poços mais próximos da margem do rio, para os quais é bem nítida a convergência de quase todo o fluxo subterrâneo para oeste.

Considerando que o fluxo subterrâneo observado em Porto Velho em 2012 foi de 10,9 L/s no período chuvoso e nulo no período de estiagem, pode-se concluir que no ano de 2012 houve influência significativa da sazonalidade no fluxo subterrâneo natural, na escala da zona urbana de Porto Velho. Assim sendo, os exutórios da recarga natural na área de estudo são os poços existentes em exploração.

Para estimativa da **Recarga Potencial Direta (RPD)**, **Reserva Potencial Explotável (RPE)** e **Reserva Permanente (RP)** apresentados na **tabela 7.3**, utilizou-se a área de 166 km², delimitada para o balanço hidrogeológico na zona urbana de Porto Velho, onde se verificou uma variação sazonal média da superfície freática entre as duas campanhas de medições de nível de 2,98 m. Adotou-se para o aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho, em Porto Velho, o coeficiente de sustentabilidade (CS) de 0,4; a espessura média saturada (b) de 46 m; e a porosidade efetiva (Sy) de 14%.

Tabela 7.3 - Reservas do aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho na zona urbana de Porto Velho.

Reservas	Unidade	Valor
Reserva reguladora ou Recarga potencial direta (RPD)	m ³ /s	2,2
Reserva potencial explotável (RPE)	m ³ /s	0,880
Reserva permanente (RP)	m ³	1,07 x 10 ⁹

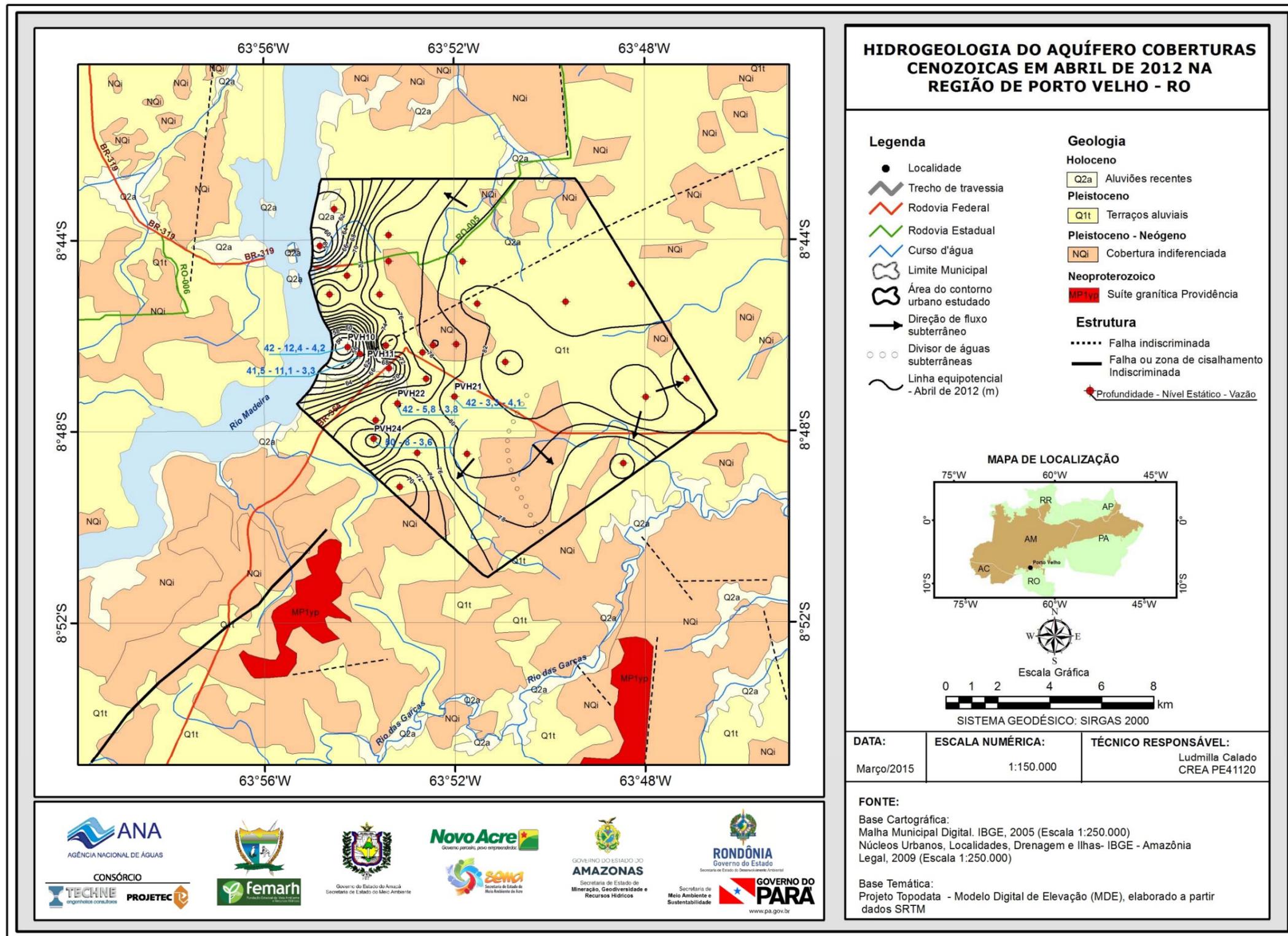


Figura 7.4a – Mapa hidrogeológico com superfície potenciométrica das águas subterrâneas do aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho em abril de 2012 na cidade de Porto Velho – RO.

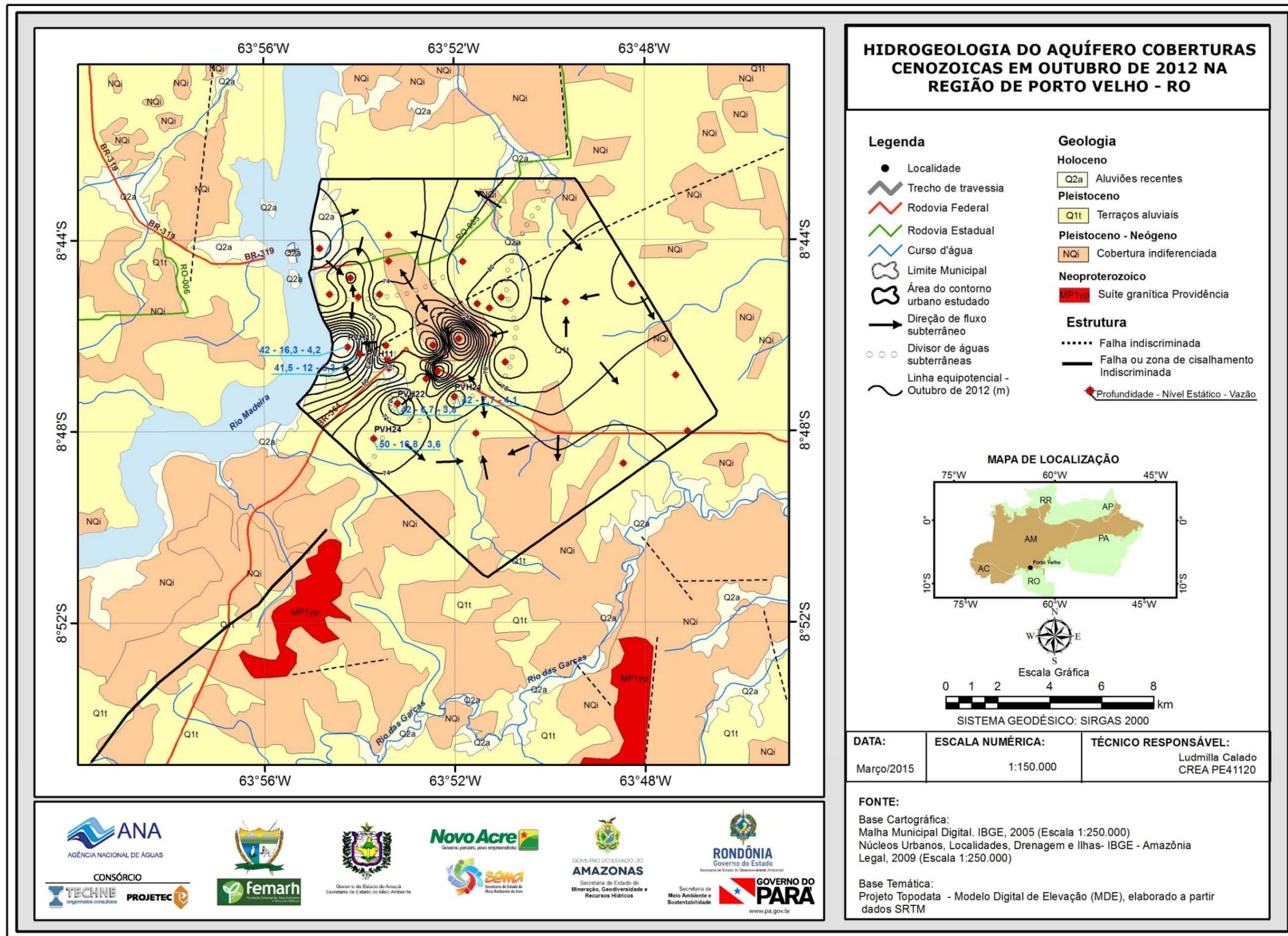


Figura 7.4b – Mapa hidrogeológico com superfície potenciométrica das águas subterrâneas do aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho em outubro de 2012 na cidade de Porto Velho – RO.

A pesquisa hidrogeológica desenvolvida na cidade de Porto Velho baseou-se em dados dos 446 poços constantes no SIG ANA PHA 2013, dos quais 346 catalogados no SIAGAS – Sistema de Informações de Águas Subterrâneas do Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2010) e 100 novos poços cadastrados pela ANA, no âmbito desse Projeto.

A profundidade desses poços inventariados variou de 9 a 150 m, com média aproximada de 56 m, sendo que os poços com mais de 50 m, embora constituam a classe mais frequente (43%), geralmente penetram o cristalino alterado e a própria rocha cristalina.

Os níveis estáticos ficam compreendidos entre 2,2 a 40 m, porém quase 75% dos poços possuem níveis estáticos entre 5 e 15 m de profundidade. Esses níveis são rasos porque o aquífero é do tipo livre e se encontra numa planície banhada por um rio perene e de grande porte, que é o rio Madeira. Vale ressaltar que a rigor esses níveis não são “estáticos”, pois a superfície das águas subterrâneas freáticas sofre notável influência dos poços existentes em exploração.

A vazão oscila de 0,5 a 60 m³/h, porém ressalta-se que 66% dos poços possuem vazões de até 6,6 m³/h, enquanto que nos 34% restantes oscilam entre mais de 10 m³/h até 60 m³/h (**figura 7.5**).

Quanto ao uso da água subterrânea para os 446 poços em Porto Velho, verifica-se que 52% é destinada ao abastecimento, 11% ao uso múltiplo, 7% industrial, 3,8% atendimento comunitário, 0,4% uso comercial, 3,8% outros usos não mencionados anteriormente, 0,4% sem uso, e 22% não informaram o tipo de uso.

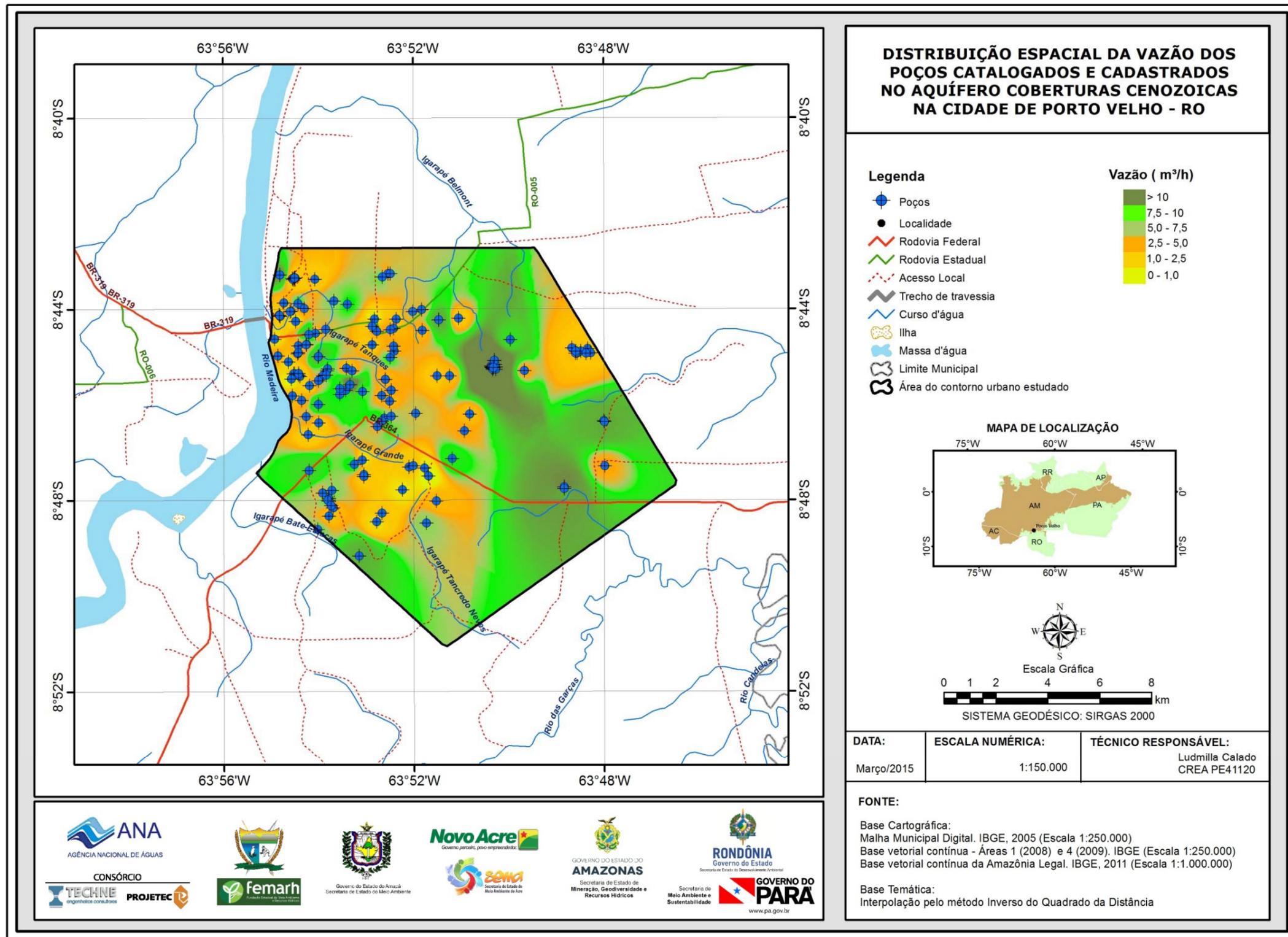


Figura 7.5 – Distribuição espacial da vazão dos poços cadastrados e catalogados na região de Porto Velho – RO.

7.4 - Hidrogeoquímica

Com o intuito de avaliar a qualidade das águas subterrâneas do Aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho, na cidade de Porto Velho, foram realizadas 30 (trinta) análises físico-químicas e bacteriológicas; 11 (onze) análises de metais pesados, BTEX e fenóis; 4 (quatro) análises de isótopos ambientais estáveis - deutério e oxigênio-18; 07 (sete) análises do isótopo ambiental radioativo – trício; e 01 (uma) análise do isótopo ambiental - carbono 14.

As análises físico-químicas e bacteriológicas avaliaram os seguintes parâmetros: cor, turbidez, condutividade elétrica (CE), temperatura, sólidos totais dissolvidos (STD), pH *in situ*, potencial redox (Eh), sódio, potássio, cálcio, magnésio, dureza, cloreto, sulfato, bicarbonato, nitrito, nitrato, amônia, ferro, manganês, Coliformes Totais e Termotolerantes (*E. Coli*).

Foram realizadas duas campanhas de amostragem, com 6 (seis) meses de defasagem, sendo uma no período chuvoso (abril de 2012) e outra no período de estiagem (outubro de 2012). As análises de metais pesados, BTEX, fenóis e isótopos ambientais foram efetuadas apenas na segunda campanha de amostragem. A localização dos pontos de amostragem na área de estudo pode ser observada na **figura 7.6**.

O estudo hidrogeoquímico das águas do aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho, na cidade piloto de Porto Velho, indicou que, de forma geral, os teores analisados se encontram em baixíssimas concentrações devido ao clima chuvoso da Floresta Tropical Amazônica, e que alguns poucos valores extremos encontrados, inclusive acima do VMP estabelecido como de potabilidade pela Portaria MS 2914/2011, assim como os usos preponderantes da água subterrânea definidos pela Resolução CONAMA 396/2008, se devem em grande parte a fatores antrópicos, com exceção dos parâmetros ferro e manganês que se devem as condições geológicas locais.

A análise estatística dos parâmetros físico-químicos coletados em duas campanhas de amostragem, realizadas em abril e outubro de 2012, revelou efeito de sazonalidade sobre alguns parâmetros, tais como, turbidez, CE, STD, sódio, potássio, cálcio, magnésio, cloreto, sulfato, bicarbonato, dureza e nitrato, cujos teores foram mais elevados no período chuvoso em relação aos do período de estiagem.

Os resultados obtidos no aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho mostraram que no período chuvoso e de estiagem, respectivamente, 100% e 90% das amostras coletadas apresentaram valores de cor inferior ao limite de detecção de 5 uH; apenas 1 poço (PVH24) na segunda campanha ultrapassou o VMP de potabilidade de 15 uH da Portaria MS 2914/2011, sugerindo que as águas deste poço não são próprias para consumo humano.

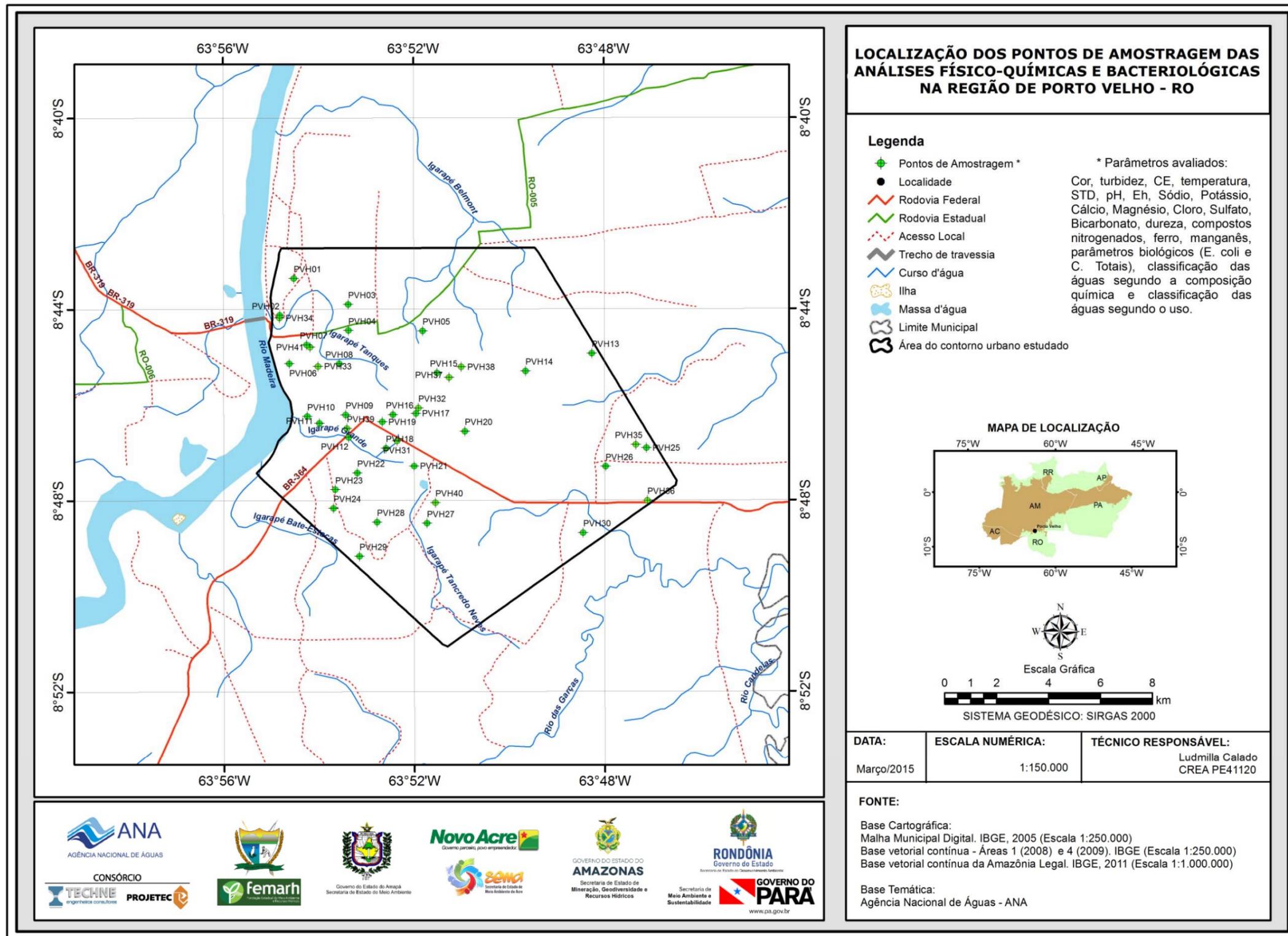


Figura 7.6 – Localização dos pontos de amostragem das análises físico-químicas e bacteriológicas no aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho, na cidade de Porto Velho - RO.

Na primeira e segunda campanha, respectivamente, 33% e 70% das amostras apresentaram valores de turbidez abaixo do limite de detecção de 0,1 uT. No período chuvoso, 23% dos poços apresentaram valores acima do VMP de potabilidade da Portaria MS 2914/2011, enquanto que no período de estiagem foi apenas 3,3% dos poços.

A condutividade elétrica (CE) variou no período chuvoso de 8,9 a 369 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com média de 77,85 $\mu\text{S}/\text{cm}$; e no período seco oscilou de 11 a 214 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com média de 48,7 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Os valores de CE obtidos no aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho, em sua maioria, são baixos, haja vista que 93% e 97% dos poços, respectivamente na primeira e segunda coletas, apresentaram resultados inferiores a 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Tais resultados permitem classificar as águas do aquífero como potáveis. Isto é reflexo do clima da região amazônica, com alta incidência de chuvas, o que assegura a renovação constante das águas dos aquíferos e dos rios ali presentes.

A temperatura das águas do aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho varia no mínimo de 24,9°C ao máximo de 36,3 °C.

Os teores de STD variam de 6 a 246 mg/L, com média de 54,5 mg/L no período chuvoso; e oscila de 7 a 125 mg/L, com média de 35,5 mg/L no período de estiagem. Todos os valores de STD obtidos estão abaixo do VMP de 1.000 mg/L da Portaria MS 2914/2011 e da Resolução CONAMA 396/2008, indicando que as águas podem ser usadas para consumo humano.

Os valores de pH *in situ* encontrados no período chuvoso ficaram compreendidos entre 4,2 e 7,2, com média igual a 5,5; e no período seco, oscilaram entre 3,0 e 6,3, com média de 5,2. De modo geral é possível dizer que as águas do aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho são essencialmente ácidas.

Os resultados de potencial redox (Eh) altos e positivos sugerem que 95% dos poços possuem águas em condições oxidantes, ou seja, baixa atividade de elétrons.

Os teores de sódio variam entre 0,14 e 42,4 mg/L no período chuvoso, com média de 6,79 mg/L; e no período de estiagem oscila entre 0,14 e 33,53 mg/L, com média de 4,71 mg/L. De acordo com a Portaria MS 2914/2011, todos os valores de sódio encontrados nas duas campanhas estão abaixo do VMP de 200 mg/L, padrão definido como de potabilidade para consumo humano, assim como dentro dos limites da Resolução CONAMA 396/2008, indicando que as águas podem ser usadas para consumo humano e recreação.

As concentrações medidas de potássio no período chuvoso oscilaram entre 0,13 e 4,60 mg/L, com média de 1,28 mg/L; e no período de estiagem a variação foi de 0,08 a 2,90 mg/L, com média de 0,87 mg/L.

Os teores de cálcio obtidos no período chuvoso estão compreendidos entre 0,009 e 19,1 mg/L, com média de 2,71 mg/L; e na estiagem variam de 0,001 a 4,8 mg/L, com média de 0,94 mg/L.

Os teores de magnésio coletados no período chuvoso variam de 0,04 a 9,3 mg/L, com média de 0,83 mg/L; e no período de estiagem oscilou de 0,02 a 1,24 mg/L, com média de 0,42 mg/L.

De modo geral, os teores de sódio, potássio, cálcio e magnésio são baixos, o que pode ser justificado pela alta pluviosidade na região amazônica, a qual favorece a constante renovação das águas e conseqüentemente a diluição dos elementos presentes.

Os resultados das análises de sódio, potássio, cálcio e magnésio revelam que os valores são mais elevados no período chuvoso. Ao que tudo indica ocorre a influência da química do solo, pois segundo Leprun *et al.* (1989), no estado de Rondônia, após a chuva cair no solo e iniciar o processo de percolação das águas, estas entram em contato com os solos da região, os quais são quimicamente mais ricos, elevando os teores de cátions como cálcio, magnésio, potássio e sódio, especialmente no período chuvoso.

Os teores de cloreto no período chuvoso variaram de 0,99 a 79,97 mg/L, com média de 8,44 mg/L; e no período de estiagem oscilou de 0,49 a 34,7 mg/L, com média de 5,93 mg/L. Todos os poços amostrados, em ambas as campanhas, apresentaram resultados de cloreto inferiores ao VMP estabelecido pela Portaria MS 2914/11, assim como dentro dos padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA 396/2008, indicando que as águas do aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho podem ser empregadas para consumo humano, irrigação e recreação.

Os teores de sulfato no período chuvoso variam de 0,49 a 16,1 mg/L, apresentando média de 2,07 mg/L; e no período seco, os teores oscilaram de 0,49 a 2,03 mg/L, com média de 0,68 mg/L. Em ambas as coletas, todas as amostras apresentaram teores de sulfato inferiores aos limites estabelecidos pela Portaria MS 2914/2011, assim como dentro dos padrões definidos pela Resolução CONAMA 396/2008 para consumo humano, dessedentação animal e recreação.

As análises de bicarbonato revelaram que 30% e 70% das amostras, respectivamente na primeira e segunda campanha, obtiveram valores iguais a zero. No período chuvoso, as concentrações de bicarbonato foram mais elevadas, oscilando entre 0,0 e 56 mg/L, com média de 9,81 mg/L e variando no período de estiagem entre 0,0 e 26,0 mg/L, com média de 4,2 mg/L. Isto se deve à presença de dióxido de carbono existente nas águas de chuvas, que reagem com a água do aquífero produzindo ácido carbônico, que se dissocia em bicarbonato.

Os teores de dureza oscilaram entre 0,52 e 78,9 mg/L, com média de 10,16 mg/L; e no período de estiagem variou de 0,099 a 15,59 mg/L, com média de 4,07 mg/L. Esses valores sugerem que as águas deste aquífero são do tipo mole, pois 96,5% das amostras apresentaram teores de dureza inferiores a 50 mg/L. Nas duas campanhas nenhum dos poços amostrados ultrapassou o VMP recomendável pela Portaria MS 2914/2011, de 500 mg/L para consumo humano.

No período chuvoso e de estiagem, respectivamente, 7% e 3% dos poços apresentaram valores de nitrato que ultrapassaram o VMP de potabilidade recomendável pela Portaria MS 2914/2011, além de não serem indicadas para consumo humano e para recreação segundo a Resolução CONAMA 396/2008. Contudo, todas as amostras analisadas poderiam ser utilizadas para a dessedentação animal, uma vez que não ultrapassaram os limites definidos pela Resolução citada. Esses resultados se devem a contaminação oriunda

principalmente da ausência de saneamento básico e, em muitos casos, a proximidade das fossas com os poços.

De modo geral, os teores de nitrito no aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho são praticamente desprezíveis, pois 93,5% dos poços apresentaram valores abaixo do limite de detecção. Todas as amostras analisadas nas duas coletas apresentaram teores de nitrito dentro dos padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria MS 2914/2011 de 1 mg/L, assim como poderiam ser usadas para o consumo humano, dessedentação de animais, irrigação e recreação, de acordo com a Resolução CONAMA 396/2008.

Em ambas as campanhas, 3% das amostras analisadas apresentaram valores de amônia que ultrapassaram o VMP recomendável pela Portaria MS 2914/2011 para o consumo humano de 1,5 mg/L. Os poços que apresentaram tais teores foram PVH17 e PVH38, respectivamente na primeira e segunda campanha.

Dentre o total de amostras analisadas nas duas campanhas, 13% dos poços no período chuvoso e 17% no período de estiagem apresentaram valores de ferro que ultrapassaram o VMP de potabilidade recomendável pela Portaria MS 2914/2011, além de não serem indicadas para consumo humano e para recreação, segundo a Resolução CONAMA 396/2008. Além disso, 3% dos poços na primeira campanha apresentaram teores de ferro que ultrapassaram os limites recomendados para irrigação, de acordo com a Resolução CONAMA 396/2008.

Observou-se que 7% dos poços na primeira campanha apresentaram teores de manganês acima do VMP de 0,1 mg/L estabelecido pela Portaria MS 2914/2011, bem como ultrapassaram os limites previstos na Resolução CONAMA 396/2008 no que se refere aos usos da água para consumo humano e recreação. Além disso, 17% dos poços no período chuvoso e 3% dos poços no período de estiagem apresentaram teores de manganês que ultrapassaram os limites recomendados para dessedentação animal, de acordo com a Resolução CONAMA 396/2008. Apenas 3% dos poços no período chuvoso ultrapassaram o limite recomendado para irrigação, segundo a Resolução CONAMA 396/2008.

Os altos teores de ferro e manganês dissolvidos em alguns pontos isolados nas águas do aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho se devem a reações de oxi-redução, que atuam sobre o ferro insolúvel residual do intemperismo químico regional resultante da alta pluviosidade associada a elevadas temperaturas e acidez das águas, as quais favoreceram a decomposição das rochas ao longo do tempo geológico.

A avaliação dos parâmetros biológicos indicou a presença de Coliformes totais no período chuvoso em 43% dos casos e de 70% das amostras no período de estiagem. Além da presença de C. totais, também se verificou a ocorrência de *E. coli* em 10% dos poços na primeira campanha e de 13% das amostras na segunda campanha. Esses resultados sugerem que as águas dos poços estão fora dos padrões biológicos recomendados pela Portaria MS 2914/2011 e Resolução CONAMA 396/2008, indicando que as suas águas não podem ser utilizadas para consumo humano, dessedentação animal e recreação. Isto ocorre devido à contaminação das águas subterrâneas por fossas sépticas

devido à ausência de sistema de esgotamento sanitário na região e também pelo fato de que os poços tubulares, em sua maioria, são pouco profundos e construídos com técnicas inapropriadas, que deixam os espaços anelares sem a devida proteção sanitária, o que pode ocasionar doenças de veiculação hídrica.

Todas as amostras analisadas para os metais pesados arsênio, cádmio, chumbo, cromo, mercúrio e níquel apresentaram teores abaixo do limite de detecção, ao passo que bário, cobre e zinco obtiveram teores abaixo do VMP definido pela Portaria MS 2914/2011 e Resolução CONAMA 396/2008.

No que se refere às análises de BTEX e fenóis, todas as amostras respeitaram os limites de potabilidade definidos pela Portaria MS 2914/2011 e Resolução CONAMA 396/2008, inclusive com a maioria das amostras com teores abaixo do limite de detecção.

Os resultados dos isótopos ambientais oxigênio-18 e deutério revelaram que o aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho possui perda de apenas 0,3% por evaporação, o que sugere que 99,7% da água de recarga do aquífero provém de águas de chuva, e que praticamente não há sinais de recarga fluvial a partir do rio Madeira.

Segundo as datações efetuadas com trício, as águas do aquífero estudado possuem mistura de água submoderna com recarga recente.

Quanto às idades convencionais de carbono-14, há presença de água moderna, ou seja, água com tempo de residência inferior a 200 anos, o que é coerente com a natureza aluvial dos sedimentos pleistocênicos/holocênicos indiferenciados da região do aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho.

No que se refere à classificação das águas subterrâneas de acordo com a composição química, é possível verificar que as águas do aquífero em sua maioria são Cloretadas Sódicas e de boa potabilidade, segundo indicação dos diagramas de Piper, Stiff e Schoeller-Berkaloff.

No que concerne à avaliação das águas para irrigação de acordo com Razão de Adsorção de Sódio (SAR), verifica-se que as águas do aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho possuem risco de sódio baixo e salinidade entre fraquíssima a média, indicando que as águas podem ser usadas para o cultivo de boa parte dos vegetais.

Conforme a Metodologia de Mckee & Wolf (1963), as águas deste aquífero podem ser utilizadas para a dessedentação animal sem restrições, haja vista que os teores de STD encontrados em ambas as campanhas foram baixos.

7.5 - Vulnerabilidade Natural do Aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho

A vulnerabilidade de um aquífero é a sensibilidade da qualidade da água subterrânea ante uma carga contaminante imposta, determinada pelas características intrínsecas do aquífero e do seu recobrimento. Por tal motivo é tão importante a sua avaliação, que pode ser usada por diferentes métodos, contudo no âmbito desse projeto optou-se pelos mais utilizados na literatura que são o **DRASTIC** (Aller *et al.*, 1985) e o **GOD** (Foster & Hirata, 1988).

A vulnerabilidade pelo método **DRASTIC** no aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho, na cidade de Porto Velho, no período chuvoso, se apresentou como **baixa** em 10% (3/30) dos poços; **moderada** em 87% dos poços (26/30) e **alta** em apenas 3% dos poços (1/30), como pode ser observado na **figura 7.7a**. No período de estiagem (**figura 7.7b**) verificou-se a ocorrência de vulnerabilidade **moderada** em 80% dos casos (24/30) e vulnerabilidade **baixa** em 20% dos casos (6/30).

Mediante avaliação dos parâmetros utilizados pelo método **GOD**, foi possível estimar o índice de vulnerabilidade natural do aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho, na cidade de Porto Velho, o qual assumiu valores que variaram de 0,40 a 0,45 na primeira campanha (**figura 7.8a**) e de 0,35 a 0,45 na segunda campanha (outubro de 2012), os quais se encontram na faixa de **vulnerabilidade média**, como pode ser observado na **figura 7.8b**.

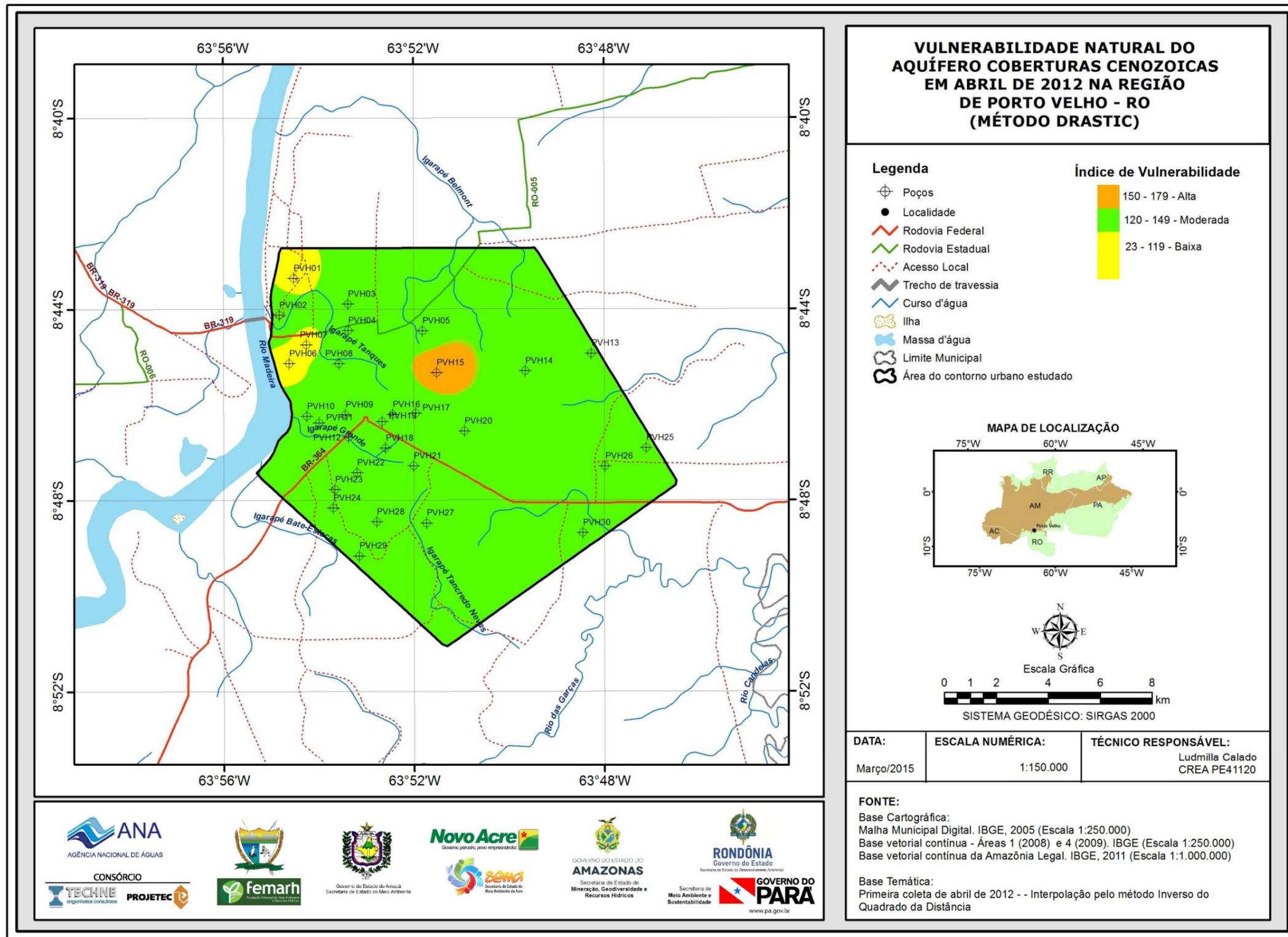


Figura 7.7a – Distribuição espacial da vulnerabilidade do aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho no período chuvoso (abril de 2012), na cidade de Porto Velho - RO, pelo método DRASTIC.

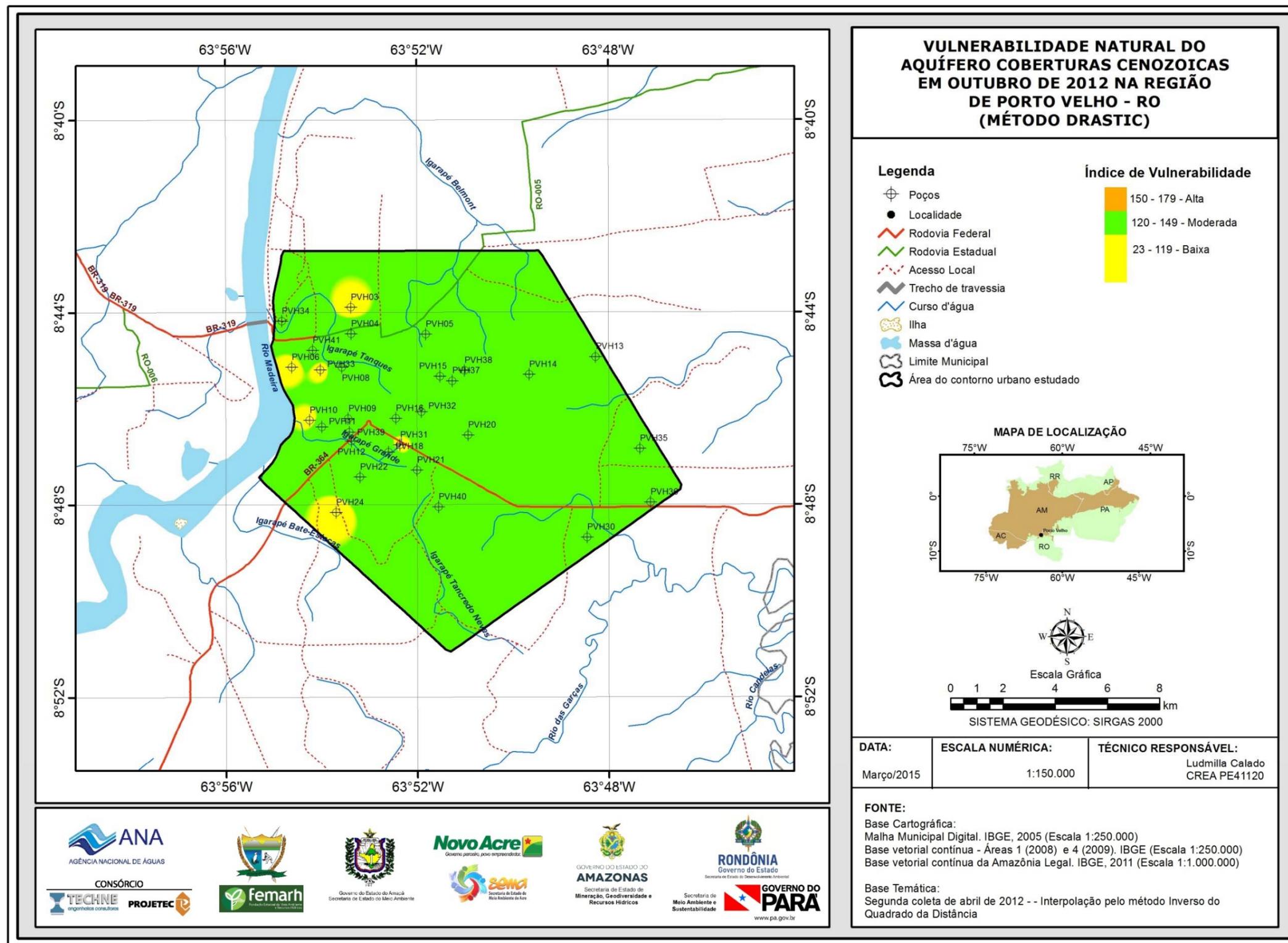


Figura 7.7b – Distribuição espacial da vulnerabilidade do aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho no período seco (outubro de 2012), na cidade de Porto Velho - RO, pelo método DRASTIC.

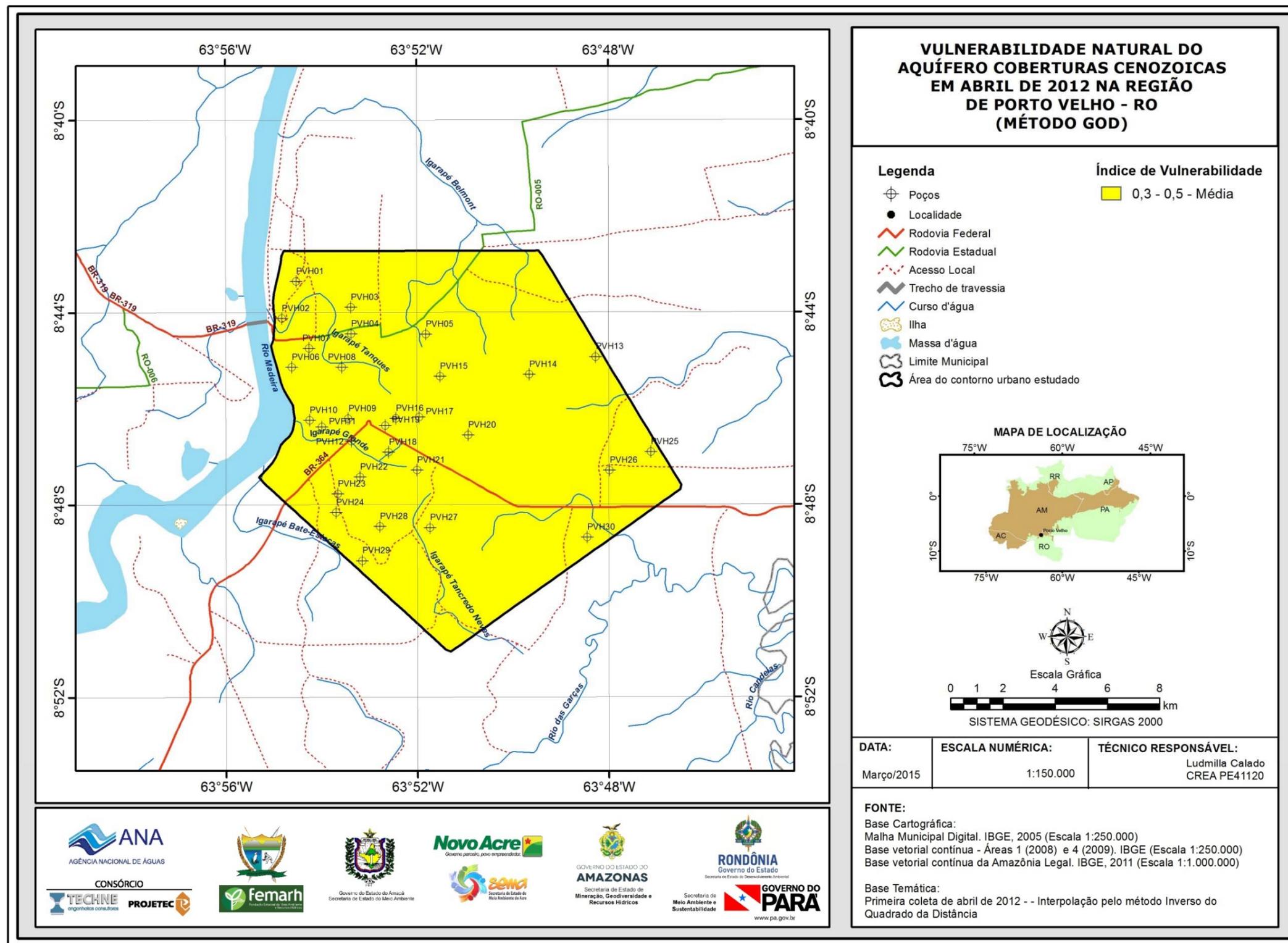


Figura 7.8a – Distribuição espacial da vulnerabilidade do aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho no período chuvoso (abril de 2012), na cidade de Porto Velho - RO, pelo método GOD.

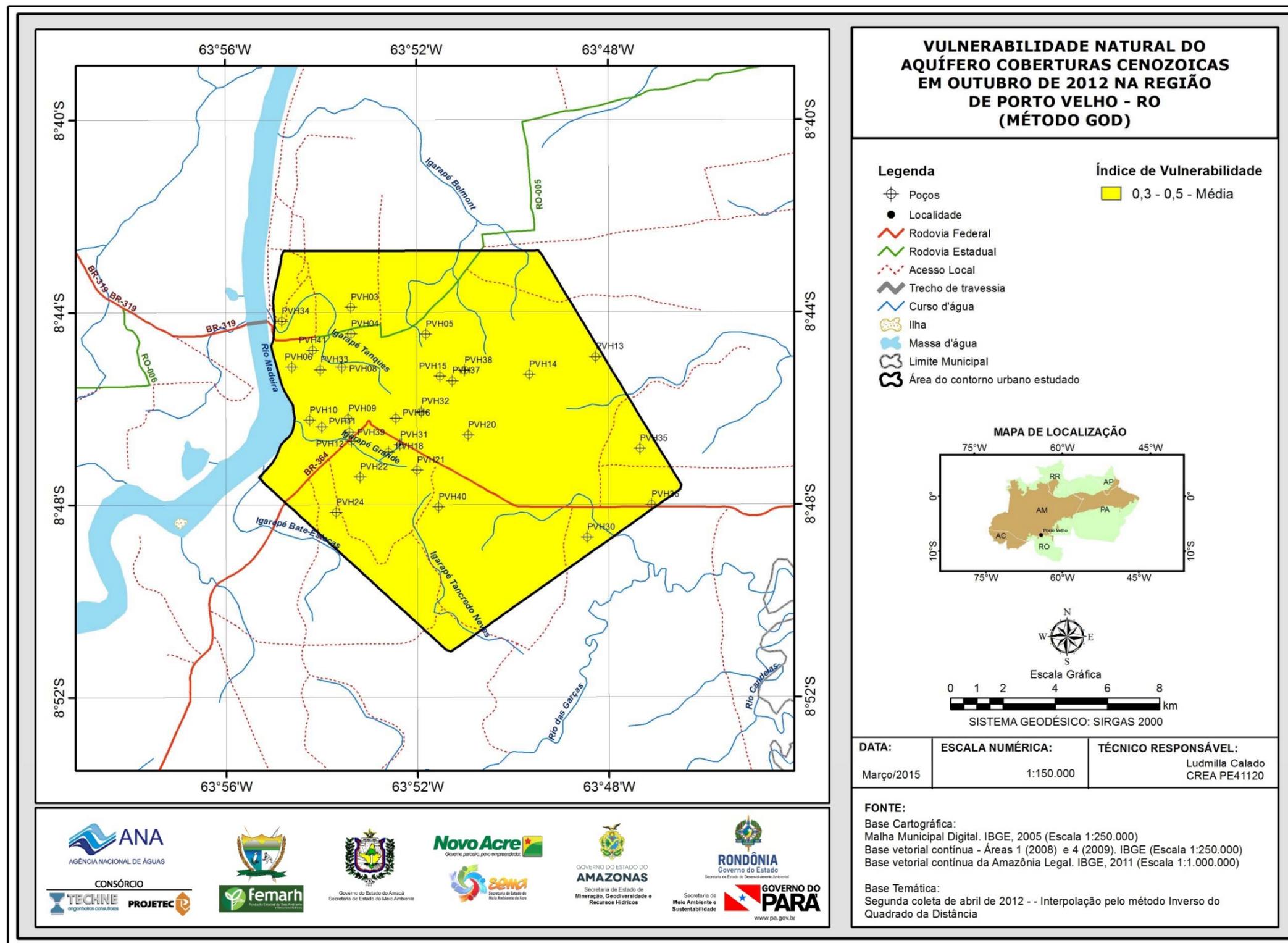


Figura 7.8b – Distribuição espacial da vulnerabilidade do aquífero Coberturas Cenozoicas de Porto Velho no período seco (outubro de 2012), na cidade de Porto Velho - RO, pelo método GOD.

8 – Cidade Piloto: Rio Branco - AC

8.1 - Introdução

Este estudo visou realizar a caracterização dos aspectos fisiográficos, geológicos, hidrogeológicos, hidrogeoquímicos e a vulnerabilidade natural do aquífero Rio Branco na cidade piloto de Rio Branco - AC, principalmente no que diz respeito à qualidade de suas águas.

A cidade de Rio Branco, capital do Estado do Acre, nasceu e se desenvolveu na margem esquerda do Rio Acre. A expansão urbana, entretanto, estendeu-se à margem direita onde hoje existem, a par de áreas rurais, vários bairros residenciais. Essa área da margem direita passou a chamar-se de Distrito II, pelo que a área principal, na margem esquerda e onde se situa o centro de Rio Branco, passou a ser chamada de Distrito I. As coordenadas do centro de Rio Branco (Hotel Terra Verde) são 09° 58' 28" S e 67° 48' 20" W.

A área da folha de 15 minutos da região de Rio Branco cobre uma superfície de 750 km², dos quais apenas 145 km² correspondem à área de estudo (**figura 8.1**) propriamente dita, na qual foi realizado o monitoramento dos poços nas duas campanhas de medições de níveis e de coleta de água.

O clima do município de Rio Branco segundo classificação de Köppen é do tipo Am tropical monçônico megatérmico, com temperatura média mensal entre 23,2°C e 25,7°C, com uma média anual de 24,8°C. Caracteriza-se por umidade relativa alta o ano todo, compreendida entre 77% no mês mais seco (agosto) a 87% no mês mais chuvoso do ano (dezembro).

A precipitação média em Rio Branco oscila entre 31,6 mm em junho a 289 mm em janeiro, com uma média anual de 1.947,5 mm/ano.

A área de estudo é caracterizada por 3 diferentes unidades morfológicas: Planície Amazônica com cotas entre 125 e 150 m; Depressão Rio Branco com altitudes de 150 m até 175 m; e Depressão Endimari-Abunã com cotas de 175 e 200 m.

O principal curso d'água na área de estudo é o rio Acre, que corta Rio Branco e deságua no rio Purus pela sua margem direita. Destacam-se na zona urbana de Rio Branco como afluentes do rio Acre, os igarapés Judia, pela margem direita, e São Francisco, pela margem esquerda.

A caracterização dos solos na área de estudo se baseou nos estudos do Zoneamento Econômico Ecológico do Estado do Acre (SEMA, 2006), onde se verificou a ocorrência de quatro classes: Luvisolo Háptico Órtico (TXo) com 57 km², Gleissolo Háptico Ta Eutrófico (GXve) com 18 km², Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico (LVAd) com 24 km² e Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (PVAd) com 46 km².

Na área de estudo de Rio Branco, segundo o SEMA (2006), as áreas de ocupação antrópica e de vegetação natural se distribuem em área urbanizada (139,2 km²), Floresta Ombrófila Aberta aluvial com palmeiras (2,4 km²), Floresta Ombrófila Aberta de terras baixas com palmeiras (1,2 km²), e Floresta Ombrófila Densa de terras baixas com dossel emergente (2,2 km²).

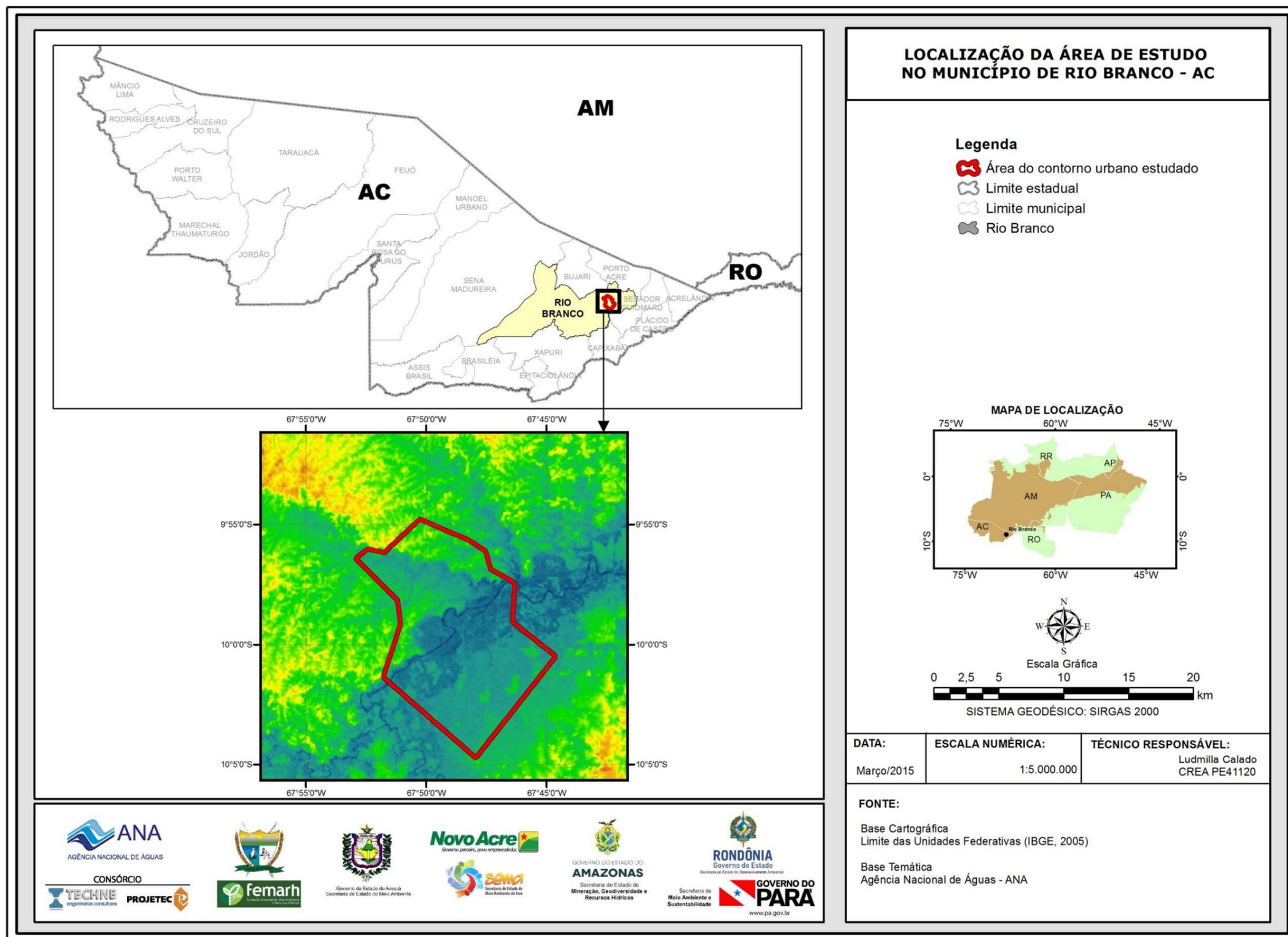


Figura 8.1 – Localização da área de estudo no município de Rio Branco.

8.2 - Geologia

A região de Rio Branco não faz parte da Bacia do Acre, apesar de estar situada no Estado do Acre. Ela faz parte da Bacia do Solimões onde existem as Formações Javari, Repouso, Solimões e Içá.

Em Rio Branco, a sequência terciária com predominância argilosa que aflora extensivamente no estado do Acre corresponde a uma seção de cobertura da Bacia do Solimões, composta (com absoluto predomínio) de argilas de cor vermelha, cinza e variegada. Ocorrem, subordinadamente, cinzas vulcânicas, arenitos, calcários e conglomerados pouco consolidados. Macrofósseis de vertebrados, madeiras fósseis carbonizadas e níveis de linhito são frequentes nesta sequência. Na base desta sequência, que assenta sobre a Formação Javari, ocorre uma seção argilosa, com intercalações de arenito e siltito, denominada de Formação Repouso, a qual foi considerada como sendo a Formação Solimões em todos os trabalhos de palinologia da bacia até então, devido à semelhança litológica entre ambas as unidades. Acima da Formação Repouso aparece a Formação Solimões.

Na folha de 15 minutos da região de Rio Branco e na área de estudo situada na zona urbana de Rio Branco, com base em estudos existentes da CPRM (Melo Jr. & Marmos, 2006; Melo Jr. *et al.*, 2010) e na análise geomorfológica de imagens SRTM, em consonância com a geologia da Folha SC-19 da carta geológica do Brasil ao milionésimo (CPRM, 2004), três unidades litoestratigráficas podem ser consideradas, da base para o topo: i) Pacote Repouso-Solimões; ii) Terraços fluviais pleistocênicos; iii) depósitos aluvionares holocênicos (**figura 8.2**).

Em Rio Branco, o pacote **Repouso-Solimões** aflora extensivamente com sedimentos argilosos nas colinas dos setores noroeste e sudeste do vale do rio Acre.

Os **Terraços Fluviais Pleistocênicos**, na região estudada, apresentam duas gerações em níveis médios de aplainamento aproximados de 160 m (segundo terraço) e 150 m (primeiro terraço). Esses terraços são constituídos de materiais semiconsolidados representados por argilas, siltes e areias, que juntamente com as aluviões constituem o Aquífero Rio Branco.

Os **Depósitos Aluvionares Holocênicos** são constituídos de argilas na parte superior e de areias na parte inferior, distribuídos na planície do Rio Acre, ocorrem na cota média de 137 m. Em Rio Branco, Ferreira & Oliveira (2008) descrevem o pacote aluvial sobreposto à Formação Solimões em discordância erosiva, como uma cobertura argilosa, inferior a 20 m de espessura. Trata-se de material argiloso, de cor em geral cinza a marrom esverdeada, que evolui nas posições mais superiores do perfil de solo para argilas mosqueadas vermelhas a castanho claro.

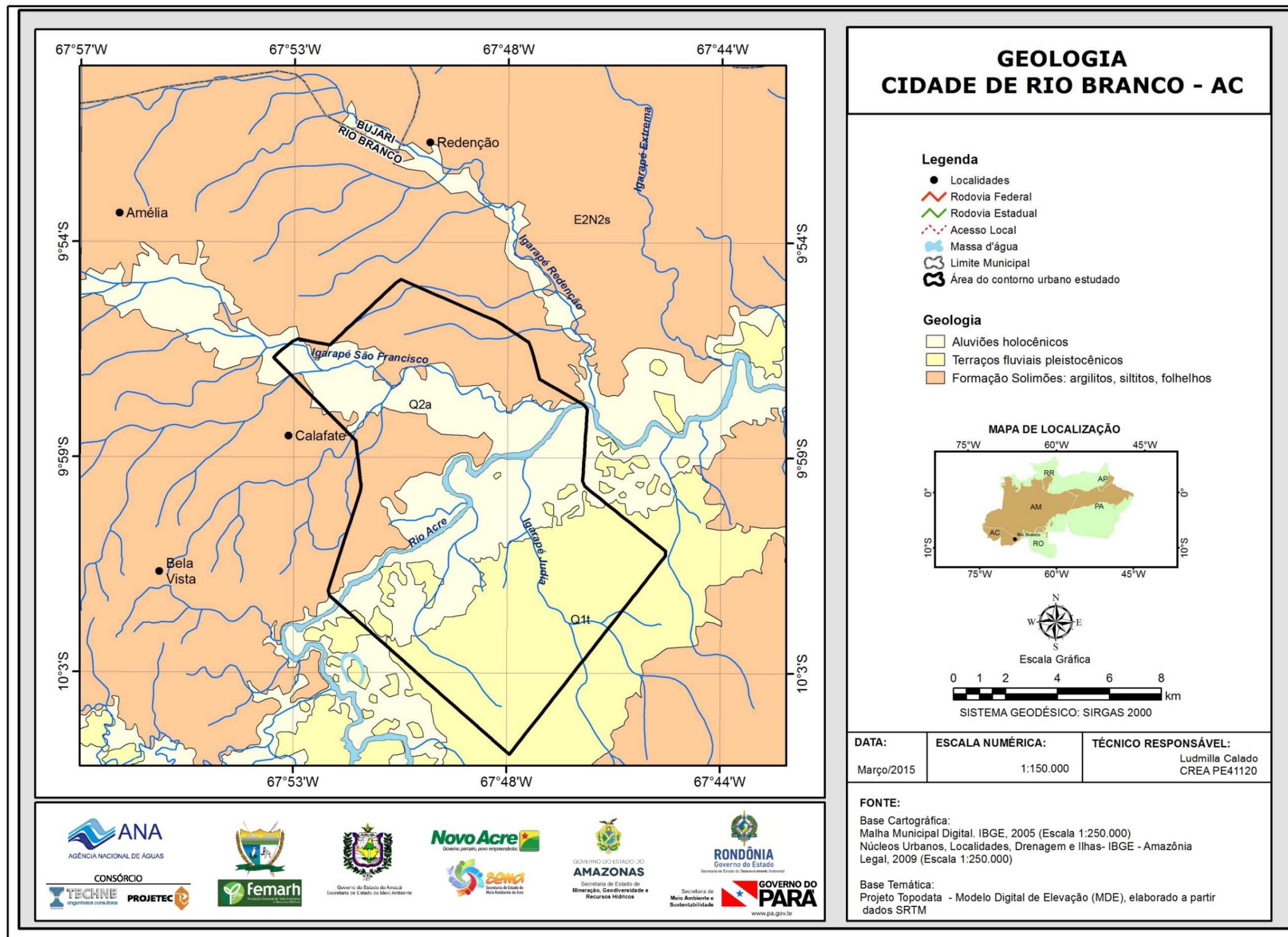


Figura 8.2 – Mapa geológico da folha de 15 minutos e da área de estudo com localização de seção topográfica transversal ao vale do Rio Acre na zona urbana de Rio Branco – AC.

8.3 - Hidrogeologia e Hidrodinâmica

O aquífero Rio Branco pode ser definido como o pacote de sedimentos holocênicos e terraços fluviais pleistocênicos, que inclui leitos de argila siltosa, de argila siltico-arenosa, areia siltosa e areia fina, na planície aluvial do rio Acre, em repouso sobre uma base impermeável constituída pelos argilitos da Formação Solimões.

O pacote de sedimentos que constitui os depósitos aluviais holocênicos e terraços fluviais pleistocênicos da planície do rio Acre, embora contendo significativa ocorrência de níveis argilosos no topo (a camada mais superficial é constituída predominantemente de argila, argila siltosa e argila siltico-arenosa) apresenta, na sua parte inferior, uma camada de areia fina a média e até grosseira.

A planície aluvial, onde ocorre o aquífero Rio Branco, se desenvolve predominantemente na margem direita do Rio Acre, uma vez que o leito desse rio corre frequentemente no extremo noroeste da planície, no contato aluviões/Formação Solimões.

A área do aquífero Rio Branco, envolvendo aluviões e terraços dentro da área de estudo, cobre 78 km² no Segundo Distrito, a sudeste do rio Acre (**figura 8.2**).

Através do bloco 3D elaborado no âmbito do projeto sobre uma área de 171 km², na planície do rio Acre, verificou-se que o volume do aquífero Rio Branco é de $2,3 \times 10^9$ m³, o que corresponde a uma espessura média de 13,45 m para o pacote de aluviões e terraços. Levando-se em conta a profundidade média do nível estático de 3,4 m obtido nas duas campanhas de amostragem, a espessura média saturada do aquífero Rio Branco estimada foi de 10 m, a mesma considerada na interpretação dos testes de bombeamento.

As **propriedades hidráulicas** do **aquífero Rio Branco** foram avaliadas através de 02 (dois) testes de bombeamento conduzidos no âmbito desse Projeto e ainda através de valores compilados disponíveis na literatura para a cidade de Rio Branco. Os testes de bombeamento, também denominados de teste de aquífero, tem por objetivo fundamental a obtenção dos valores dos coeficientes de transmissividade, de condutividade hidráulica e de armazenamento, parâmetros hidrodinâmicos de fundamental importância para posterior avaliação das reservas hídricas acumuladas no aquífero.

Os testes de aquífero consistem no bombeamento de um poço com uma vazão constante (ou estabilizada ao longo do teste) e, sempre que possível, no acompanhamento da evolução dos rebaixamentos produzidos em um ou mais poços de observação. Quando inexitem poços de observação ou piezômetros, o coeficiente de armazenamento pode ser avaliado de forma aproximada supondo que o raio do poço é infinitamente pequeno. Com essa hipótese o armazenamento no poço se torna desprezível e o armazenamento do aquífero pode ser estimado a 1 m de distância, ou seja, nas proximidades imediatas do poço para permitir o uso dos dados do poço bombeado como se fossem de um poço de observação a essa distância.

No caso específico do estudo de Rio Branco, usaram-se os pontos RBR19 e RBR01 sem utilização de poços de observação. As medidas de nível dinâmico

foram executadas com uma sonda elétrica sonora e a medição de vazão através de método volumétrico.

Para a **interpretação dos testes de bombeamento** foram utilizados dois métodos, o semilogarítmico de Cooper & Jacob (1946), previsto para aquífero confinado, homogêneo e isotrópico, cujos resultados podem ser vistos na **tabela 8.1**; e o método de Neuman (1975) para aquífero livre, homogêneo e anisotrópico, cujos resultados podem ser observados na **tabela 8.2**. Isto porque, o aquífero Rio Branco apresenta comportamento de aquífero livre.

Tabela 8.1 – Parâmetros hidráulicos avaliados pelo método semilogarítmico de Jacob para o aquífero “confinado” Rio Branco na cidade de Rio Branco – AC.

Código	UF	Local	Longitude Decimal	Latitude Decimal	Aquífero	T (m ² /dia)	K (m/dia)	S (adm)
RBR19	AC	Bombeiros	-67,80557	-10,01079	Rio Branco	73,06	14,61	1,68E-04
RBR01	AC	Belo Jardim	-67,78519	-10,01066	Rio Branco	277,02	55,40	8,71E-03
Média						175,04	35,01	4,44E-03

T = transmissividade; K = condutividade hidráulica; S = coeficiente de armazenamento.

Tabela 8.2 – Parâmetros hidráulicos avaliados pelo método de Neuman (1975) para o aquífero Rio Branco na cidade de Rio Branco – AC.

Poço	T m ² /dia	b (m)	K (m/dia)	β	r (m)	S	Sy	KD
RBR19	7,92	10	0,79	0,2	10	3,45E-05	0,08	1/5
RBR01	9,78	10	0,98	0,2	10	3,05E-05	0,17	1/5
Média		10	0,89	0,2	10	3,25E-05	0,12	1/5

T = transmissividade; b=Espessura saturada; K = condutividade hidráulica; β = fator de drenagem gravitacional; r = distância de avaliação do armazenamento; S = coeficiente de armazenamento; Sy= Porosidade efetiva; KD= Grau de anisotropia.

Também obtidos pelo método aproximativo de Cooper & Jacob (1946) foram compilados de Melo Jr. *et al.* (2010) os parâmetros hidráulicos de testes realizados em 3 (três) poços mostrados na **tabela 8.3**.

Tabela 8.3 – Parâmetros hidráulicos do aquífero “confinado” Rio Branco na cidade de Rio Branco – AC, segundo Melo Jr. *et al.* (2010).

Poço	b (m)	T			K			S
		m ² /s	m ² /h	m ² /dia	m/s	m/h	m/dia	
1	5,0	2,47E-03	0,059	213,20	4,94E-04	0,012	42,64	7,66E-01
2	5,0	3,88E-04	0,009	33,51	7,76E-05	0,002	6,70	5,60E-03
3	5,0	2,57E-04	0,006	22,18	5,13E-05	0,001	4,44	3,70E-03
Média		3,2E-04	0,008	27,8	6,4E-05	0,002	17,92	4,7E-03

b = espessura do aquífero confinado; T = transmissividade do aquífero confinado; K = condutividade hidráulica do aquífero confinado; S= coeficiente de armazenamento do aquífero confinado.

Os parâmetros hidráulicos obtidos pelo método de Cooper & Jacob (1946), tanto pela ANA-PHA quanto por Melo Jr. *et al.* (2010), se revelaram inconsistentes por serem muito discrepantes e superestimados. Isso se deve ao fato de que o método empregado não é apropriado para as condições do aquífero livre Rio Branco. Isso motivou a reavaliação dos parâmetros pelo método de Neuman (1975). Os resultados confirmaram que o aquífero Rio

Branco é do tipo livre, homogêneo, anisotrópico e não se restringe à camada arenosa inferior, mas a todo o pacote aluvial, com espessura média saturada de 10 m.

A partir das medições de **profundidade do nível estático** dos poços localizados na cidade de Rio Branco foram elaborados para o aquífero Rio Branco os mapas de variações de nível estático e de potenciometria para cada período de medição (chuvoso e estiagem). A distribuição espacial da profundidade das águas subterrâneas em Rio Branco no período chuvoso de abril de 2012, ilustrada na **figura 8.3a**, mostra que os níveis predominantes do aquífero Rio Branco são pouco profundos, na faixa de 0 a 2 m, que se distribui por toda a área de estudo. Secundariamente, a faixa de 2 a 4 m de profundidade ocorre no setor centro-sul, enquanto que níveis superiores a 6 m ficam restritos a manchas isoladas.

No período de estiagem (**figura 8.3b**), em outubro de 2012, as águas subterrâneas da área noroeste se distribuem em manchas nas faixas de profundidades de 0 a 2 m e de 4 a 6 m a SW. A faixa predominante de profundidade dos níveis de água é a de 2 a 4 m, distribuída nos setores NE, SE e centro da área. Níveis com profundidade superior a 6 m se observam em 3 (três) manchas isoladas orientadas na direção NW-SE.

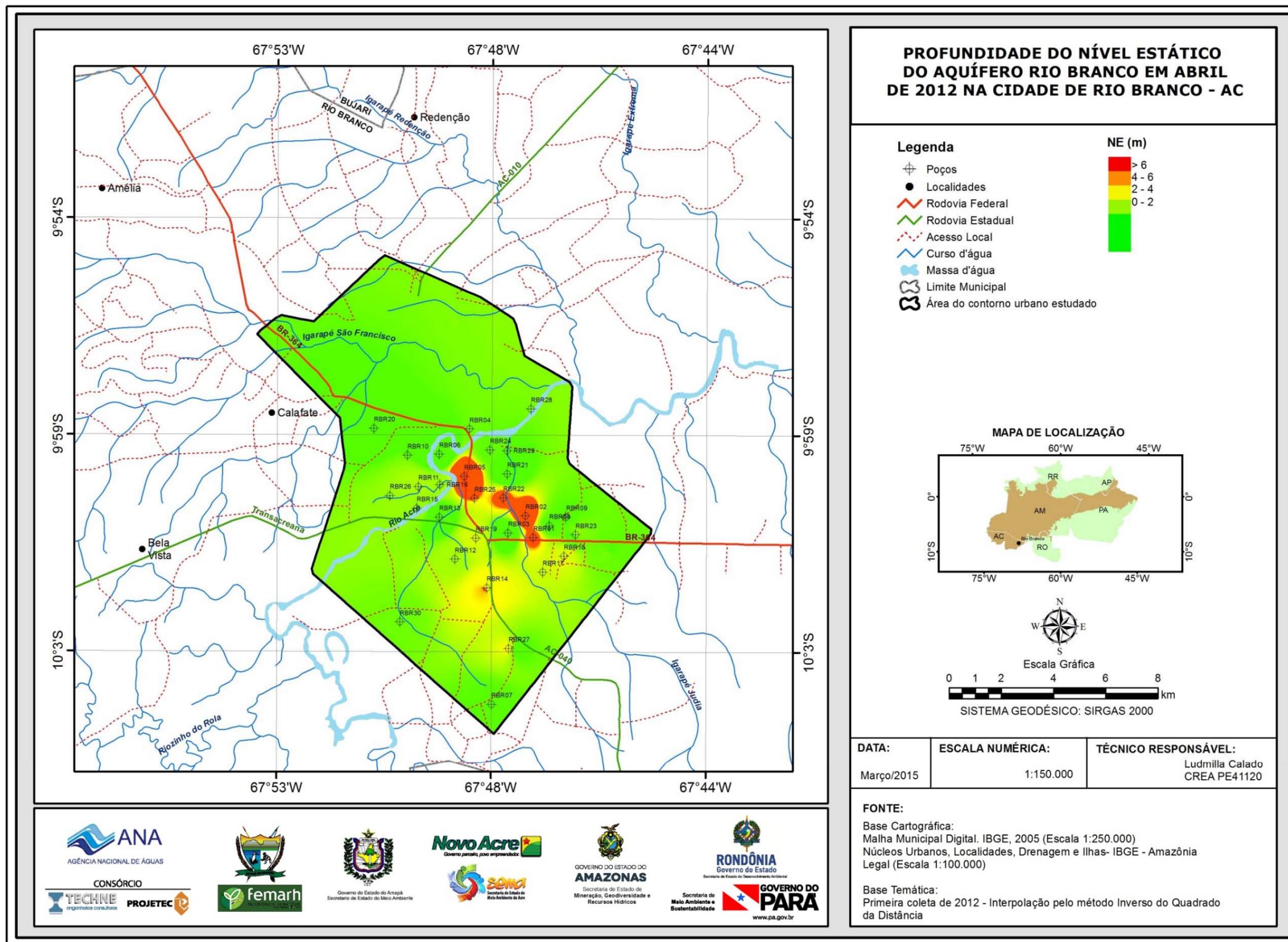


Figura 8.3a – Profundidade do nível estático das águas subterrâneas do aquífero Rio Branco em abril de 2012 na cidade de Rio Branco – AC.

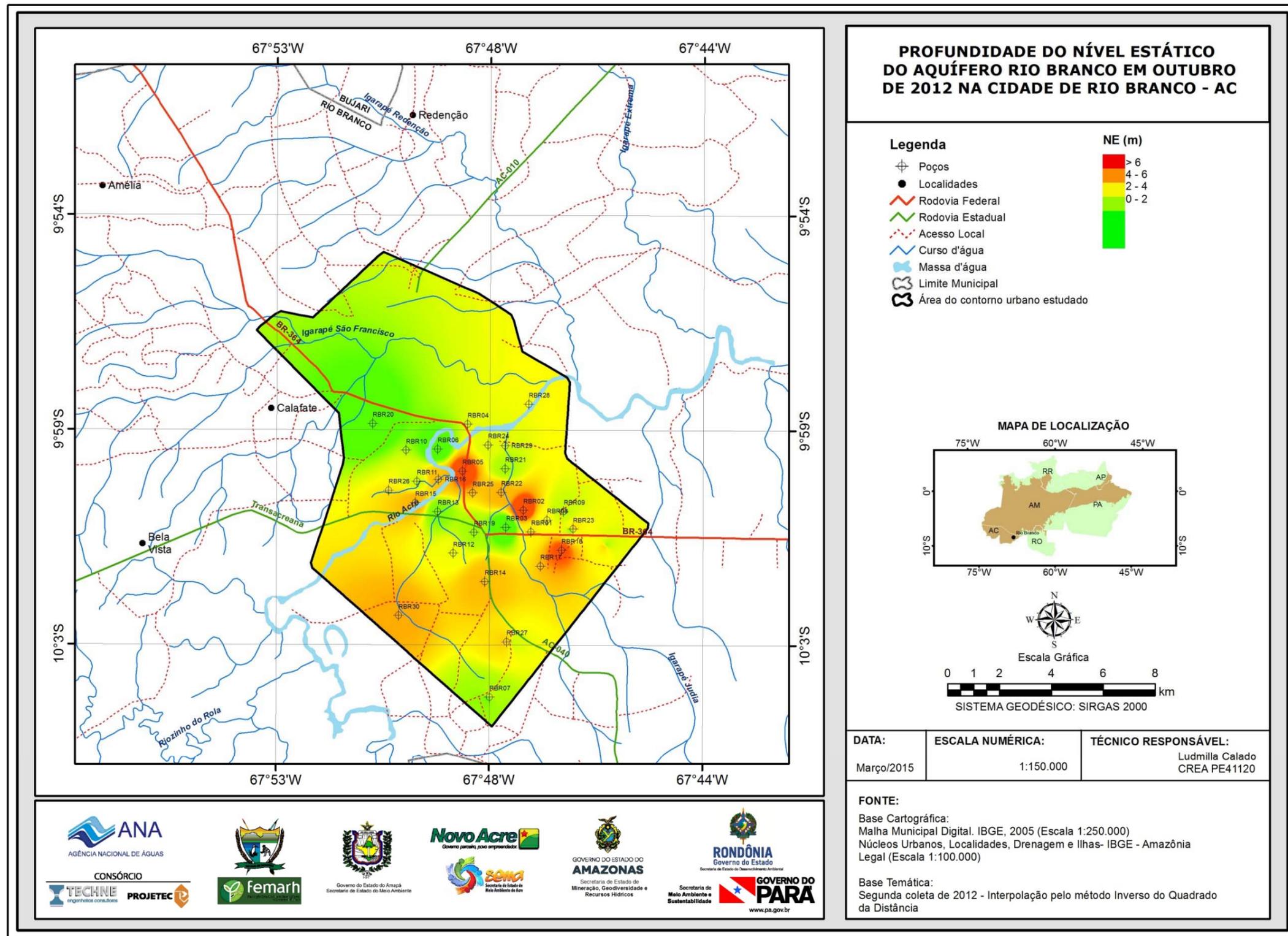


Figura 8.3b – Profundidade do nível estático das águas subterrâneas do aquífero Rio Branco em outubro de 2012 na cidade de Rio Branco – AC.

A **potenciometria** do aquífero Rio Branco, na cidade de Rio Branco, apresenta praticamente o mesmo comportamento no período chuvoso (**figura 8.4a**) e no período de estiagem (**figura 8.4b**). Em ambos os períodos, não se notam vestígios de fluxo natural e nem de fluxos entre o aquífero e o rio Acre. O que se vê, sobretudo, são escoamentos de água subterrânea para os poços existentes. Isto sugere que a recarga correspondente à variação sazonal de 1,42 m provavelmente não pode ser interpretada apenas como recarga potencial direta (RPD) ou recarga natural oriunda de chuvas, mas também como recarga potencial indireta (RPI) induzida da superfície, ou seja, do rio Acre, sobretudo, pelos bombeamentos.

Conclui-se que o fluxo natural não pode ser identificado através dos mapas potenciométricos, porque ele se realiza com gradientes hidráulicos muito fracos. Por esta razão, não há como separar, dentro da variação sazonal de 1,42 m, a fração devida às infiltrações oriundas das precipitações e a fração produzida por recarga induzida de águas superficiais pelos bombeamentos.

Para estimativa da **Recarga Potencial Direta (RPD)**, **Reserva Potencial Explotável (RPE)** e **Reserva Permanente (RP)**, apresentadas na **tabela 8.4**, utilizou-se a área de 78 km², delimitada para o balanço hidrogeológico na zona urbana de Rio Branco, correspondente à área de estudo, onde se verificou uma variação sazonal média da superfície freática entre as duas campanhas de medições de nível de 2,5 m. Adotou-se para o aquífero Rio Branco em Rio Branco, o coeficiente de sustentabilidade (CS) de 0,4; a espessura média saturada (b) de 10 m; e a porosidade efetiva (Sy) de 12%.

Para estimativa da reserva potencial explotável (RPE) do aquífero Rio Branco foi considerada a recarga REC = RPD+RPI, definida como recarga efetiva, para um rebaixamento médio de 25% da espessura saturada (10 m).

Tabela 8.4 - Reservas do aquífero Rio Branco na zona urbana de Rio Branco.

RESERVAS	Unidade	Valor
Reserva oriunda de recarga efetiva (REC)	m ³ /s	0,774
Reserva potencial explotável (RPE)	m ³ /s	0,176
Reserva permanente (RP)	m ³	94 x 10 ⁶

A pesquisa hidrogeológica desenvolvida na cidade de Rio Branco baseou-se em dados dos 506 poços constantes no SIG ANA PHA 2013, dos quais 406 catalogados no SIAGAS – Sistema de Informações de Águas Subterrâneas do Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2010) e 100 novos poços cadastrados pela ANA, no âmbito desse Projeto. Vale ressaltar que desses 406 poços, existem 4 (quatro) perfurados no Aquicludo Repouso-Solimões, com profundidades entre 150 e 240 m, e os 402 restantes no aquífero Rio Branco.

A profundidade desses poços varia de 4 a 32 m, contudo a maioria dos poços, o equivalente a 95%, possui profundidades de até 20 m.

Os níveis estáticos variam no mínimo de 3,5 ao máximo de 44,8 m, contudo a análise estatística indicou que a maioria dos poços (87,5%) cadastrados e catalogados estão entre 3,5 e 5,0 m de profundidade.

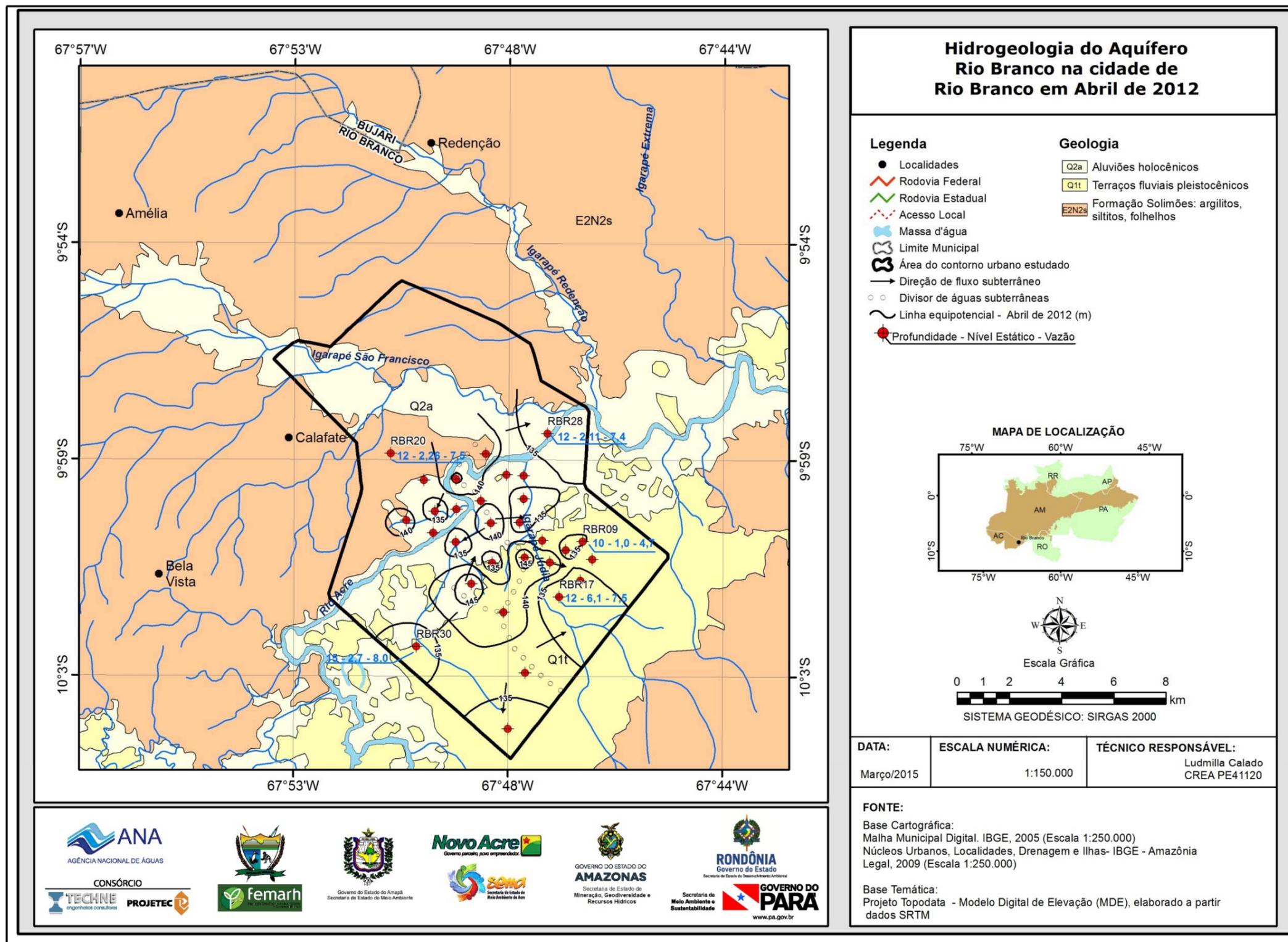


Figura 8.4a – Mapa hidrogeológico com potenciometria das águas subterrâneas do aquífero Rio Branco em abril de 2012, na cidade de Rio Branco – AC.

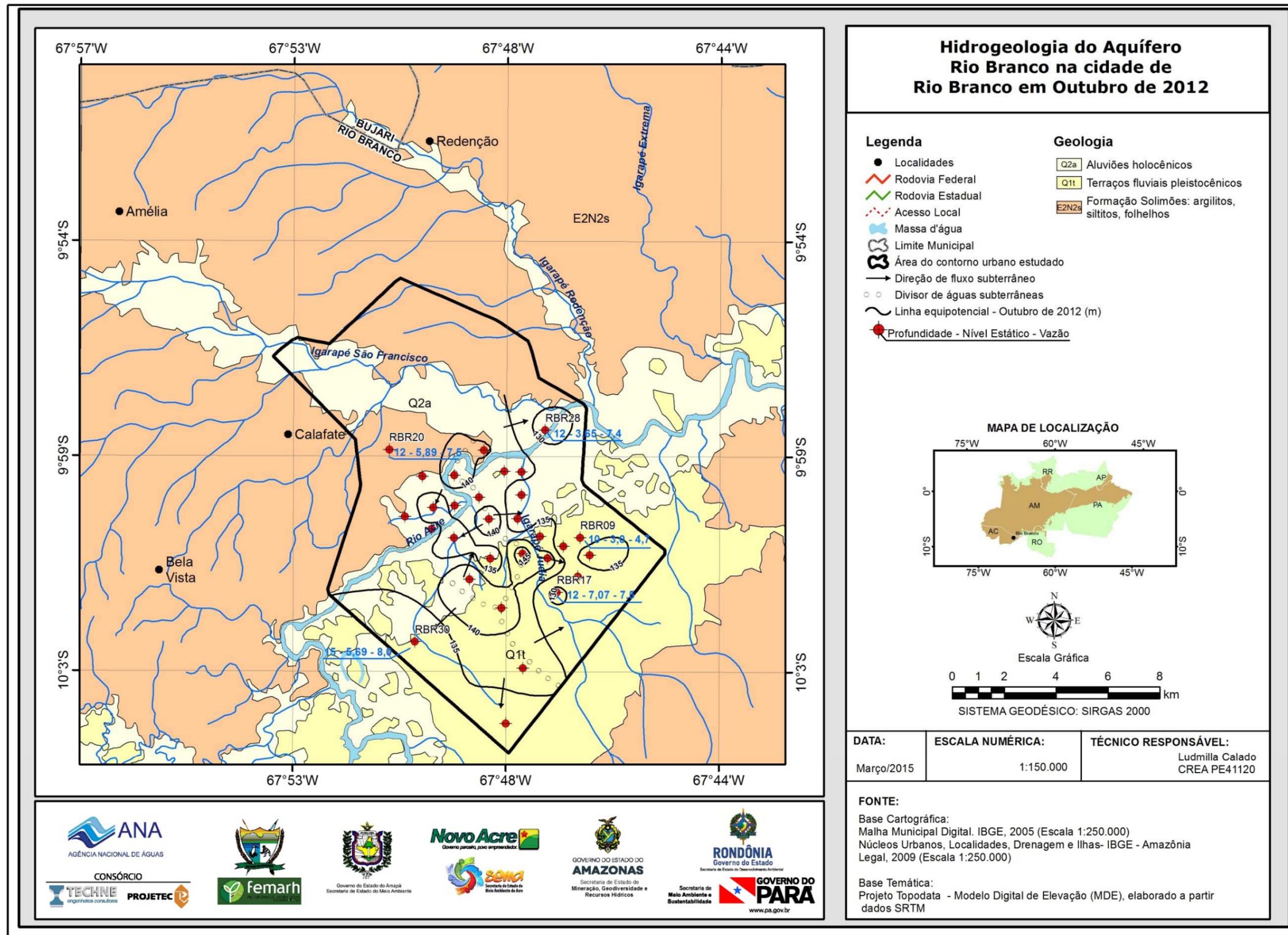


Figura 8.4b – Mapa hidrogeológico com potenciometria das águas subterrâneas do aquífero Rio Branco em outubro de 2012, na cidade de Rio Branco – AC.

A vazão oscila de 1,1 a 16,8 m³/h, porém ressalta-se que 88% das vazões são inferiores a 10 m³/h e ainda assim com nível dinâmico no crivo da bomba. As vazões são muito baixas porque a transmissividade do aquífero Rio Branco é de apenas 2,6 m²/dia e a espessura do aquífero não passa de 10 m.

A distribuição espacial da vazão mostra que em grande parte da área as produções estão entre 5 e 10 m³/h, e que em pequenas áreas isoladas estão os poços com vazão acima de 10 m³/h (**figura 8.5**).

Quanto ao uso da água subterrânea para os 506 poços em Rio Branco, verifica-se que 19% são destinados ao abastecimento, 1% ao uso comercial e 80% não informaram.

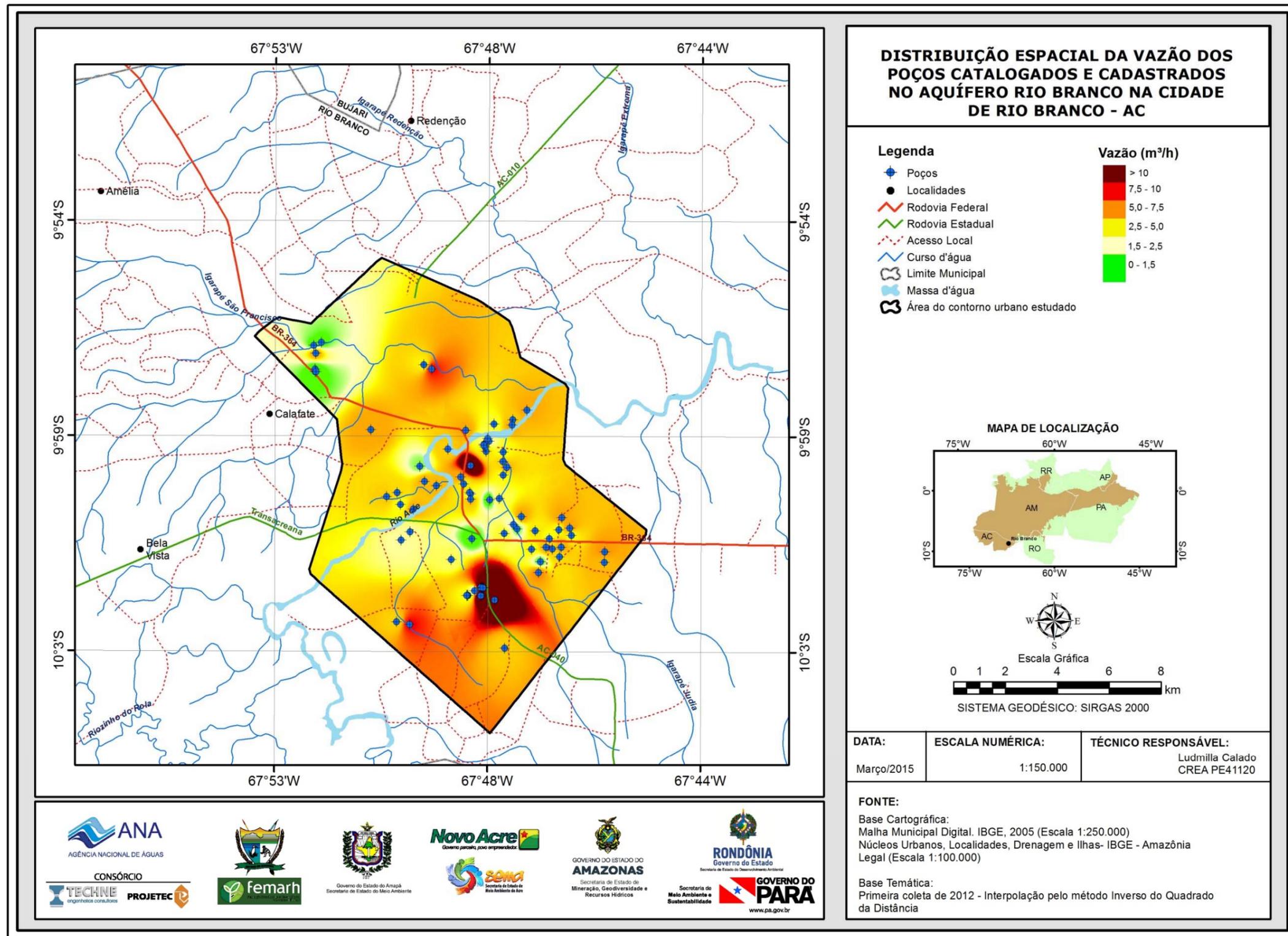


Figura 8.5 – Distribuição espacial da vazão dos poços cadastrados e catalogados na região de Rio Branco – AC.

8.4 - Hidrogeoquímica

Com o intuito de avaliar a qualidade das águas subterrâneas do aquífero Rio Branco, na cidade de Rio Branco, foram realizadas 30 (trinta) análises físico-químicas e bacteriológicas; 10 (dez) análises de metais pesados, BTEX e fenóis; 04 (quatro) análises de isótopos ambientais estáveis - deutério e oxigênio-18; e 07 (sete) análises do isótopo ambiental radioativo – trício.

As análises físico-químicas e bacteriológicas avaliaram os seguintes parâmetros: cor, turbidez, condutividade elétrica (CE), temperatura, sólidos totais dissolvidos (STD), pH *in situ*, potencial redox (Eh), sódio, potássio, cálcio, magnésio, dureza, cloreto, sulfato, bicarbonato, nitrito, nitrato, amônia, ferro, manganês, Coliformes Totais e Termotolerantes (*E. Coli*).

Foram realizadas duas campanhas de amostragem, com 6 (seis) meses de defasagem, sendo uma no período chuvoso (abril de 2012) e outra no período de estiagem (outubro de 2012). As análises de metais pesados, BTEX, fenóis e isótopos ambientais foram efetuadas apenas na segunda campanha de amostragem. A localização dos pontos de amostragem na área de estudo pode ser observada na **figura 8.6**.

O estudo hidrogeoquímico das águas do aquífero Rio Branco, na cidade de Rio Branco, indicou que, de forma geral, os teores analisados se encontram em baixíssimas concentrações devido ao clima chuvoso da Floresta Tropical Amazônica e que os valores extremos encontrados, inclusive acima do VMP estabelecido como de potabilidade pela Portaria MS 2914/2011, assim como os usos preponderantes da água subterrânea definidos pela Resolução CONAMA 396/2008 se devem exclusivamente a fatores antrópicos. A única exceção são os parâmetros ferro e manganês que são oriundos da condição geológica local.

Os parâmetros STD, Condutividade Elétrica (CE), turbidez, sódio, cloreto, sulfato e nitrato e pH *in situ* apresentaram altos teores no período chuvoso; enquanto que os parâmetros potencial redox (Eh), potássio, sódio, cálcio, magnésio, bicarbonato, dureza, ferro e manganês foram maiores no período de estiagem.

De acordo com os resultados obtidos nas duas campanhas de amostragem, verificou-se que 95% dos poços apresentaram resultados de cor abaixo do limite de detecção de 5 uH; e que apenas o poço RBR22 na segunda campanha obteve valor de cor igual a 20 uH, fora dos padrões de potabilidade para consumo humano de 15 uH, definido pela Portaria MS 2914/2011.

Com relação à turbidez, 30% dos poços na primeira campanha e 10% na segunda campanha apresentaram resultados acima do padrão de 5 uT, definido pela Portaria MS 2914/2011 para consumo humano. Os valores de turbidez mais elevados estão associados a águas ricas em ferro e ao elevado teor de sedimentos das águas superficiais que infiltram principalmente no período chuvoso.

Os valores de condutividade elétrica (CE) no período chuvoso variou de 20 a 688 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com média de 145,3 $\mu\text{S}/\text{cm}$, e no período seco a variação entre o mínimo e o máximo foi de 19 a 992 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com média de 153,8 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Os valores de condutividade elétrica (CE) obtidos sugerem que as águas do aquífero Rio Branco são potáveis, uma vez que se encontram no intervalo de 50 a 1.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

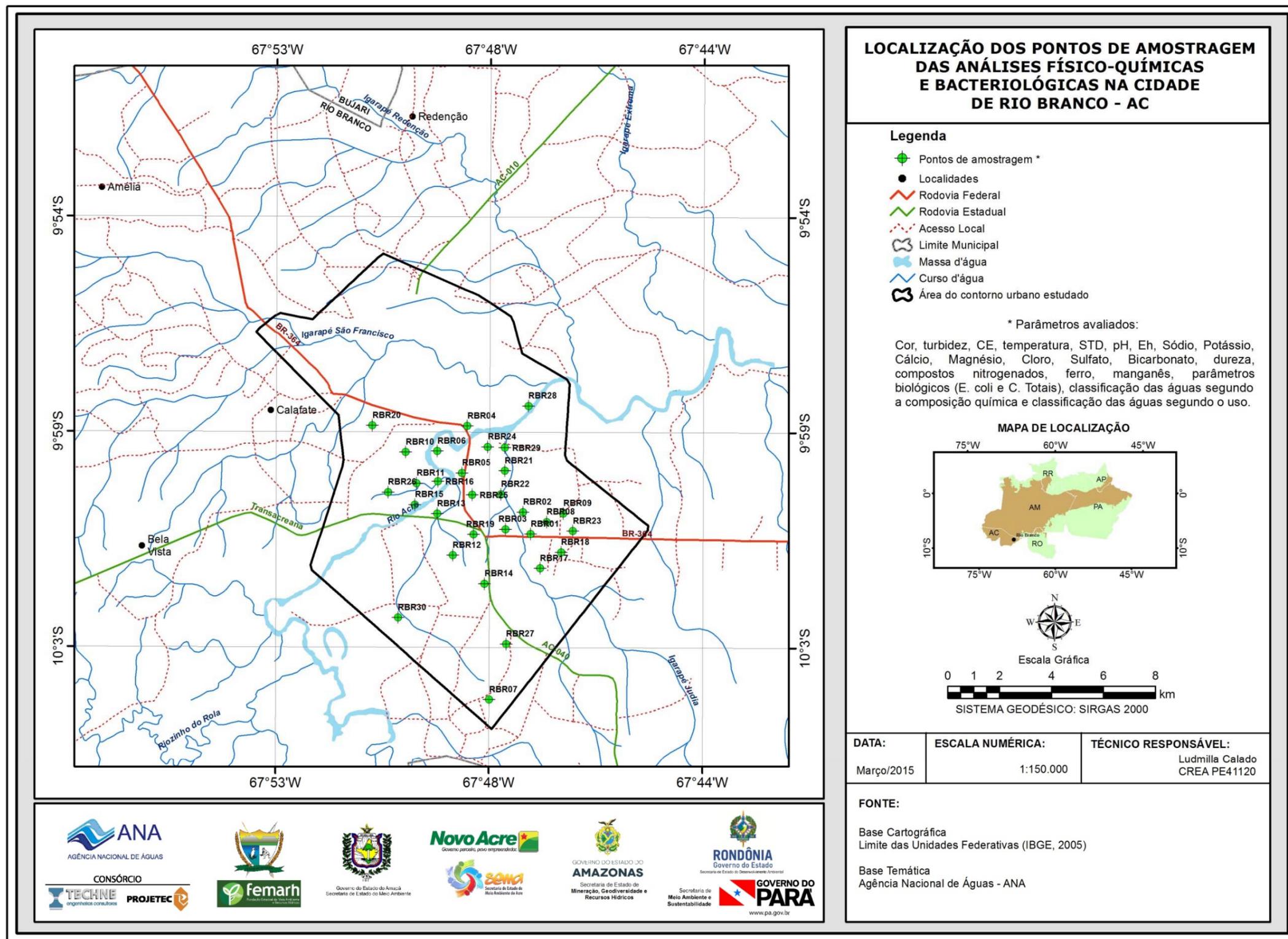


Figura 8.6 – Localização dos pontos de amostragem no aquífero Rio Branco na cidade de Rio Branco.

A temperatura das águas do aquífero Rio Branco varia no mínimo de 26,4°C ao máximo de 31,1 °C. Os valores máximos de temperatura encontrados nas duas campanhas possivelmente decorrem da influência da temperatura ambiente, uma vez que as águas do aquífero Rio Branco são pouco profundas e influenciadas pelas águas superficiais.

Os teores de STD no período chuvoso variaram de 13 a 521 mg/L, com média de 106,3 mg/L, e no período de estiagem o mínimo observado foi de 14 mg/L e o máximo de 815 mg/L, com média de 119,2 mg/L. De modo geral, os valores de STD obtidos nas águas do aquífero Rio Branco são baixos, o que pode ser justificado pela constante renovação das águas associada à elevada precipitação pluviométrica, da ordem de 2.000 mm/ano e do grande número de dias de chuvas. Os valores de STD obtidos nas duas campanhas estão abaixo do VMP de 1.000 mg/L da Portaria MS 2914/2011 e da Resolução CONAMA 396/2008, indicando que as águas podem ser usadas para consumo humano.

As águas do aquífero Rio Branco são essencialmente ácidas, com pH *in situ* no período chuvoso variando de 4,0 a 6,7, com média igual a 4,9; e no período seco oscilando entre mínimo de 3,0 e máximo de 5,6, com média de 4,7.

Os resultados de potencial redox (Eh) altos e positivos sugerem em termos médios que 95% dos poços possuem águas em condições oxidantes, ou seja, baixa atividade de elétrons.

De modo geral, os teores de sódio, potássio, cálcio e magnésio encontrados nas duas coletas de amostragem são baixos e se devem a presença de cátions nas águas oriundos dos solos mais ricos provenientes de rochas cristalinas.

Os teores de sódio nas águas do aquífero Rio Branco variaram entre 0,3 e 61,6 mg/L no período chuvoso, com média de 15,5 mg/L, e no período de estiagem os teores ficaram compreendidos entre 0,7 e 81,5 mg/L, com média igual a 15,7 mg/L. Em ambas as campanhas, todas as amostras apresentaram resultados de sódio abaixo do limite estabelecido pela Portaria MS 2914/2011 e Resolução CONAMA 396/2008, de 200 e 300 mg/L, indicando que as águas podem ser usadas para consumo humano e recreação, respectivamente.

As concentrações de potássio no período chuvoso oscilaram entre 0,1 e 8,5 mg/L, com média de 1,6 mg/L, e na estiagem a variação foi de 0,2 a 7,4 mg/L, com média de 1,7 mg/L.

Os valores medidos de cálcio no período chuvoso ficaram compreendidos entre 0,03 e 71,2 mg/L, com média de 4,2 mg/L; enquanto que na estiagem, as concentrações variaram de 0,1 a 84,7 mg/L, com média igual a 5,1 mg/L.

Os teores de magnésio no período chuvoso variaram de 0,1 a 23,2 mg/L, com média de 3,5 mg/L, enquanto que na estiagem os valores se revelaram bem próximos, oscilando entre 0,2 e 31,8 mg/L, com média de 3,1 mg/L.

Os valores de sulfato na primeira coleta variaram de 0,49 a 340,6 mg/L, apresentando média de 17,7 mg/L; enquanto que na segunda coleta, os teores variaram de 0,49 a 470,1 mg/L, com média de 28,3 mg/L.

Cerca de três poços (RBR14, RBR01 e RBR02) apresentaram valores anômalos de cálcio, magnésio e sulfato, e ao que tudo indica há uma influência antrópica com a prática agrícola, que possivelmente deve utilizar algum tipo de fertilizante. Sendo assim, com exceção desses 3 (três) poços supracitados,

todas as demais amostras apresentaram teores de sulfato inferiores aos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 396/2008 para consumo humano (250 mg/L), dessedentação animal (1.000 mg/L) e recreação (400 mg/L).

Os teores de cloreto no período chuvoso variaram de 0,9 a 54,5 mg/L, com média de 16,6 mg/L; enquanto que na estiagem, a variação entre o mínimo e o máximo foi de 0,49 a 53,0 mg/L, com média de 15,3 mg/L. Em ambas as coletas, todas as amostras apresentaram teores de cloreto inferiores aos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 396/2008, de 250 mg/L para consumo humano; 100 a 700 mg/L para irrigação; e de 400 mg/L para recreação, indicando que as águas do aquífero Rio Branco podem ser empregadas para tais usos.

As análises de bicarbonato revelaram que 40% e 53,3% das amostras, respectivamente na primeira e segunda campanha, obtiveram valores iguais à zero. As concentrações de bicarbonato oscilaram no período chuvoso entre 0 e 38 mg/L, com média de 7,52 mg/L; enquanto que no período de estiagem as concentrações ficaram compreendidas entre 0 e 39 mg/L, com média de 8,1 mg/L. Os teores de bicarbonato se apresentaram mais elevados no período chuvoso devido à presença de dióxido de carbono existente nas águas de chuvas, que reagem com a água do aquífero produzindo ácido carbônico que se dissocia em bicarbonato.

Com relação à dureza, no período chuvoso os valores oscilaram entre 0,4 e 273,1 mg/L, com média de 24,9 mg/L; enquanto que na estiagem, variou de 1,3 a 342,1 mg/L, com média de 25,6 mg/L. Tais resultados permitem classificar as águas do aquífero Rio Branco como do tipo mole, pois 91,5% das amostras apresentaram valores inferiores a 50 mg/L. Nas duas campanhas, nenhum dos poços amostrados ultrapassou o VMP recomendável pela Portaria MS 2914/2011, de 500 mg/L para consumo humano.

A presença de nitrato e de amônia nas águas do aquífero, nas duas campanhas, se deve provavelmente a proximidade dos poços com as fossas sanitárias.

As concentrações de nitrato no período chuvoso variaram de 0,09 a 10,2 mg/L, com média de 2,4 mg/L; enquanto que no período seco, os teores ficaram compreendidos entre 0,09 a 11,8 mg/L, com média de 2,2 mg/L. Apenas 7% dos poços no período chuvoso e 3% no período de estiagem apresentaram valores de nitrato que ultrapassaram o VMP de potabilidade recomendável pela Portaria MS 2914/2011, além de não serem indicadas para consumo humano e para recreação segundo a Resolução CONAMA 396/2008. Porém, todas as amostras analisadas nas duas campanhas poderiam ser utilizadas para a dessedentação animal, haja vista que não ultrapassaram os limites definidos pela Resolução citada.

De modo geral, a ocorrência de nitrito no aquífero é praticamente desprezível, haja vista que respectivamente na primeira e segunda campanha, 93% e 100% das amostras apresentaram teores abaixo do limite de detecção, e o máximo valor obtido foi de 0,133 mg/L, na primeira coleta. Todas as amostras analisadas nas duas coletas apresentaram teores de nitrito dentro do padrão de potabilidade estabelecido pela Portaria MS 2914/2011, de 1 mg/L, assim como poderiam ser usadas para o consumo humano, dessedentação de

animais, irrigação e recreação, de acordo com a Resolução CONAMA 396/2008.

As concentrações de amônia no período chuvoso variaram de 0,09 a 1,2 mg/L, com média de 0,14 mg/L; enquanto que no período seco, os teores ficaram compreendidos entre 0,09 a 0,6 mg/L, com média de 0,15 mg/L. Nenhuma das amostras analisadas nas duas campanhas apresentou valores de amônia que ultrapassassem o VMP recomendável pela Portaria MS 2914/2011 para consumo humano de 1,5 mg/L.

Os teores de ferro no período chuvoso ficaram compreendidos entre 0,02 e 10,17 mg/L, com média de 1,65 mg/L; enquanto que no período seco variaram de 0,04 mg/L a 24,63 mg/L, com média de 2,75 mg/L. Dentre o total de amostras analisadas, 53% dos poços no período chuvoso e 57% no período de estiagem, apresentaram valores que ultrapassaram o VMP de potabilidade recomendável pela Portaria MS 2914/2011, além de não serem indicadas para consumo humano e para recreação, segundo a Resolução CONAMA 396/2008. Além disso, 13% dos poços amostrados em ambas as coletas apresentaram teores de ferro que ultrapassaram os limites recomendados para irrigação, de acordo com a Resolução CONAMA 396/2008.

As concentrações de manganês no período chuvoso variaram de 0,002 a 3,41 mg/L, com média de 0,36 mg/L; enquanto que no período seco, oscilaram entre 0,002 mg/L e 3,99 mg/L, com média igual a 0,44 mg/L. Em ambas as campanhas, observou-se a ocorrência de 57% de valores acima do VMP de 0,1 mg/L estabelecido pela Portaria MS 2914/2011, bem como a não indicação dessas águas para consumo humano e para recreação segundo a Resolução CONAMA 396/2008. Além disso, 87% dos poços no período chuvoso e 80% no período de estiagem apresentaram teores de manganês que ultrapassaram os limites recomendados para dessedentação animal, de acordo com a Resolução CONAMA 396/2008. Com relação ao uso das águas para irrigação, verificou-se que 47% das amostras no período chuvoso e 43% no período seco ultrapassaram os limites de 0,2 mg/L definidos na resolução CONAMA 396/2008.

Os valores de ferro e de manganês mais elevados na estiagem, inclusive acima do VMP, são resultados da influência da zona de aeração, que especialmente no período chuvoso se encontra quase totalmente saturada por águas de infiltração, e volta a ter espaços vazios preenchidos por oxigênio, o que, conseqüentemente, eleva o valor de potencial redox, produzindo a oxidação do ferro e do manganês.

As amostras analisadas dos metais pesados arsênio, cádmio, cromo e mercúrio apresentaram teores abaixo do limite de detecção, ao passo que as de bário, chumbo, cobre e zinco obtiveram teores abaixo do VMP definido pela Portaria MS 2914/2011 e Resolução CONAMA 396/2008. O níquel foi o único metal pesado que ultrapassou o limite estabelecido pela Resolução CONAMA, no poço RBR19, onde suas águas não seriam recomendadas para consumo humano. Ao que tudo indica, esse resultado está associado ao descarte inapropriado de tintas usadas na sinalização de veículos na área de propriedade do Corpo de Bombeiros.

No que se refere às análises de BTEX, a maioria das amostras apresentaram resultados abaixo do limite de detecção, assim como não ultrapassaram os

limites de potabilidade definidos pela Portaria MS 2914/2011 e Resolução CONAMA 396/2008.

Com relação às análises de fenóis, apenas o poço RBR09 apresentou valor superior ao limite permitido para dessedentação animal e recreação, podendo ser utilizado apenas para o consumo humano, segundo os padrões da resolução CONAMA 396/2008. Esse resultado pode estar associado à contaminação por postos de combustível.

Os resultados de isótopos ambientais de oxigênio-18 e deutério mostraram que as águas são provenientes de recarga de chuvas diretas, com perda de 28% por evaporação.

Segundo as datações efetuadas com Trício, as águas do aquífero Rio Branco possuem mistura de água submoderna com recarga recente.

A avaliação dos parâmetros biológicos indicou a presença de Coliformes totais em 77% dos casos no período chuvoso e de 80% no período seco. No que se refere à contaminação por *E. coli*, verificou-se a presença em 37% das amostras no período chuvoso e de 33% no período seco. Essas amostras estão fora dos padrões biológicos recomendados pela Portaria MS 2914/2011, bem como nos limites definidos pela Resolução CONAMA 396/2008, indicando que as suas águas não podem ser utilizadas para consumo humano, dessedentação animal e recreação. Isto se deve a contaminação das águas subterrâneas por fossas sépticas devido à ausência de sistema de esgotamento sanitário na região e também pelo fato de que os poços tubulares, em sua maioria, serem pouco profundos e construídos com técnicas inapropriadas, que deixam os espaços anelares sem a devida proteção sanitária, o que pode acarretar doenças de veiculação hídrica.

Quanto à classificação das águas subterrâneas de acordo com a composição química é possível verificar que as águas do aquífero Rio Branco são Cloretadas Sódicas em sua maioria, segundo indicação dos diagramas de Piper e Stiff; e possuem águas de boa potabilidade exceto pelo parâmetro sulfato, com classificação passável, de acordo com os diagramas de Schoeller-Berkaloff.

No que concerne à avaliação das águas para irrigação, obtida por meio da Razão de Adsorção do Sódio (SAR), verifica-se que as águas do aquífero Rio Branco, em 97% dos casos, possuem risco de sódio baixo e salinidade que varia de fraquíssima a alta, indicando que as águas, com exceção do poço RBR01, podem ser usadas para o cultivo de boa parte dos vegetais.

De acordo com a Metodologia de Mckee & Wolf (1963), as águas do aquífero Rio Branco podem ser utilizadas para a dessedentação animal sem restrições, haja vista que os teores de STD encontrados em ambas as campanhas foram baixos.

8.5 - Vulnerabilidade Natural do Aquífero Rio Branco

A vulnerabilidade de um aquífero é a sensibilidade da qualidade da água subterrânea ante uma carga contaminante imposta, determinada pelas características intrínsecas do aquífero e do seu recobrimento. Por tal motivo é tão importante a sua avaliação, que pode ser usada por diferentes métodos.

Contudo, no âmbito desse projeto, optou-se pelos mais utilizados na literatura que são o **DRASTIC** (Aller *et al.*, 1985) e o **GOD** (Foster & Hirata, 1988).

A vulnerabilidade do aquífero Rio Branco pelo método **DRASTIC**, tanto no período chuvoso quanto na estiagem, varia de 128 a 143, configurando a vulnerabilidade do aquífero como **moderada (figuras 8.7a e 8.7b)**.

Mediante avaliação dos parâmetros utilizados pelo método **GOD**, foi possível estimar o Índice de Vulnerabilidade Natural do Aquífero Rio Branco na cidade de Rio Branco, respectivamente para os períodos de chuva (abril de 2012) e de estiagem (outubro de 2012). Nota-se que, em ambas as coletas, os índices encontrados, compreendidos entre 0,4 a 0,45, estão situados dentro do intervalo de (0,30 a 0,50), definido no método GOD como de **vulnerabilidade média (figuras 8.8a e 8.8b)**.

As classificações de vulnerabilidade obtidas pelo método DRASTIC e GOD no aquífero Rio Branco são justificáveis em face da presença abundante de silte e argila na parte superior. Por outro lado, acredita-se que o risco potencial de contaminação é alto, sobretudo por infiltrações através dos espaços anelares de poços tubulares rasos construídos sem a devida proteção sanitária. O fato é que a área de estudo está localizada em região bastante urbanizada, desprovida de esgotamento sanitário e ausente de planejamento quanto ao uso e ocupação do solo, fatores estes que contribuem para o aumento da carga contaminante local, o que requer medidas de gestão de modo a preservar esse manancial para as gerações futuras.

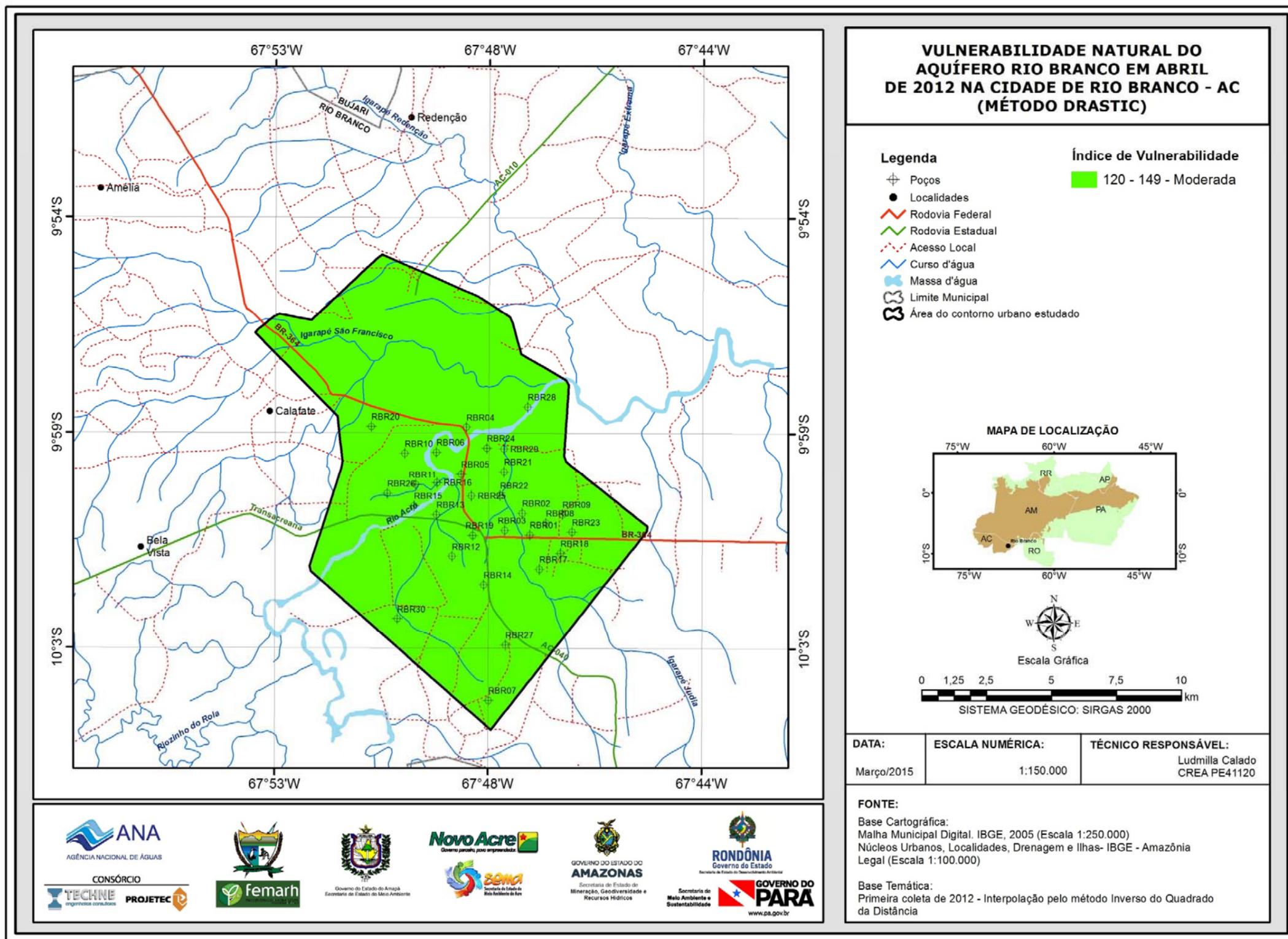


Figura 8.7a – Zoneamento da vulnerabilidade do aquífero Rio Branco na zona urbana de Rio Branco, na coleta de abril de 2012 – Método DRASTIC.

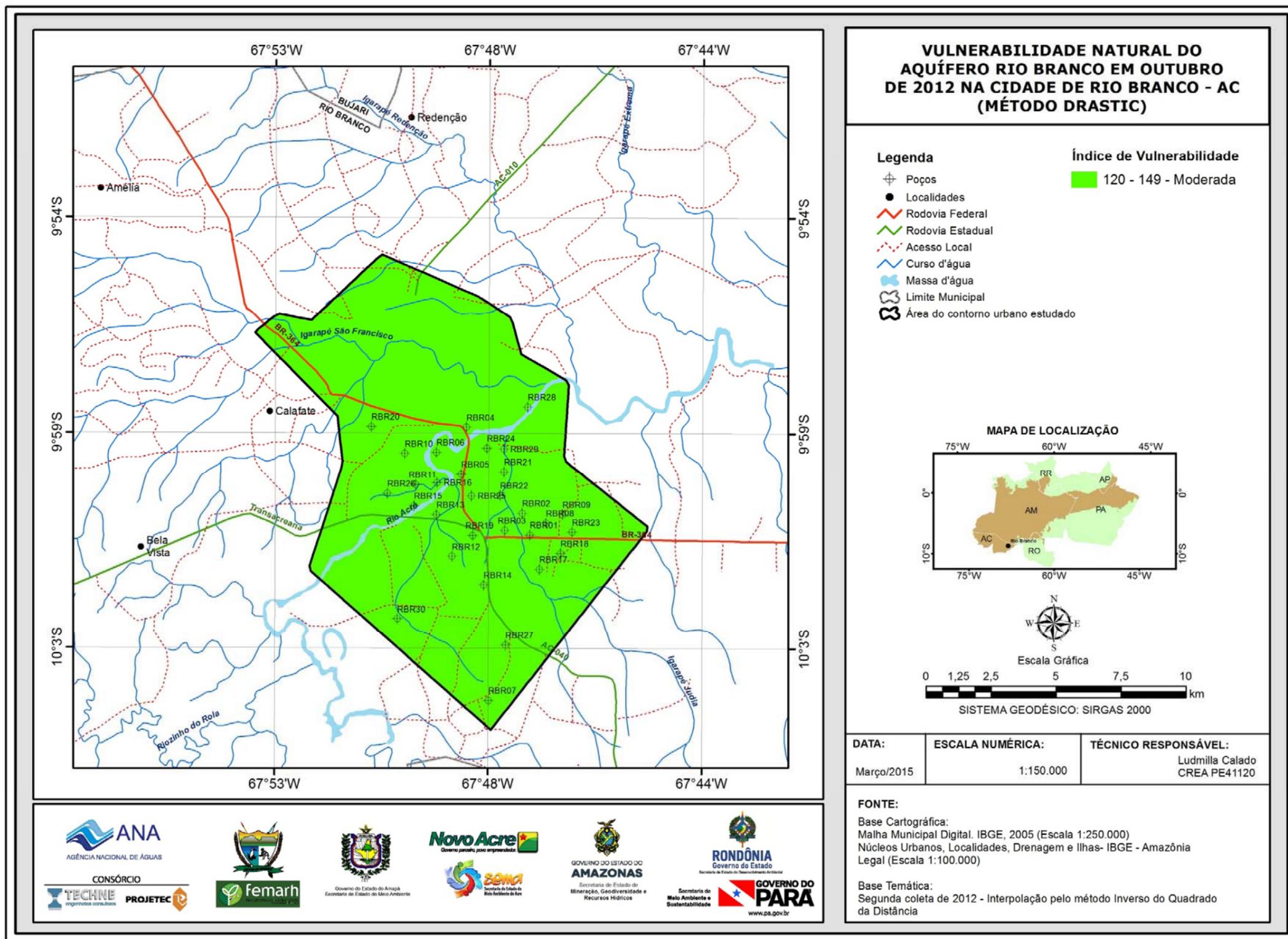


Figura 8.7b – Zoneamento da vulnerabilidade do aquífero Rio Branco na zona urbana de Rio Branco, na coleta de outubro de 2012 – Método DRASTIC.

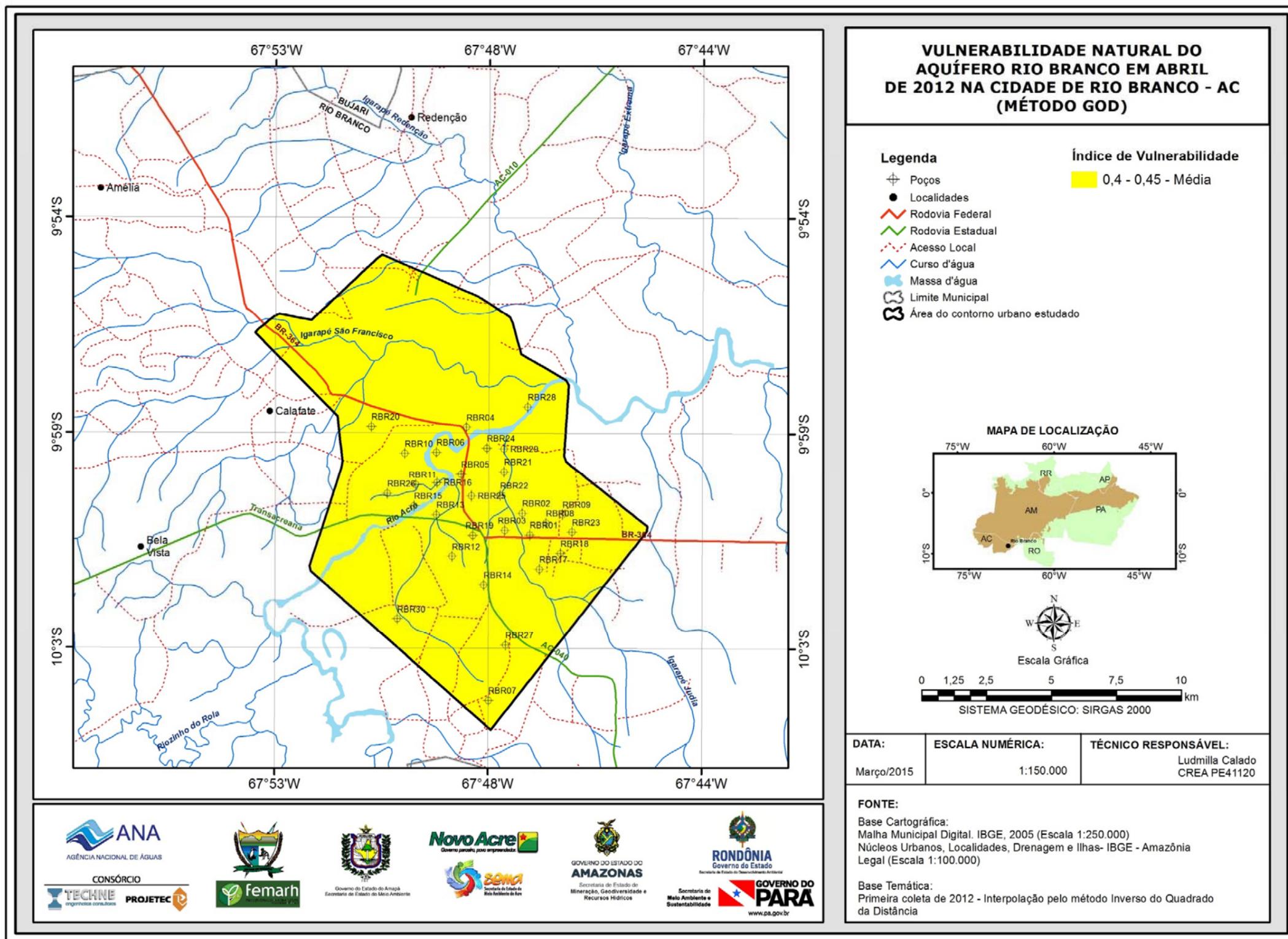


Figura 8.8a – Zoneamento da vulnerabilidade do aquífero Rio Branco na zona urbana de Rio Branco, na coleta de abril de 2012 - Método GOD.

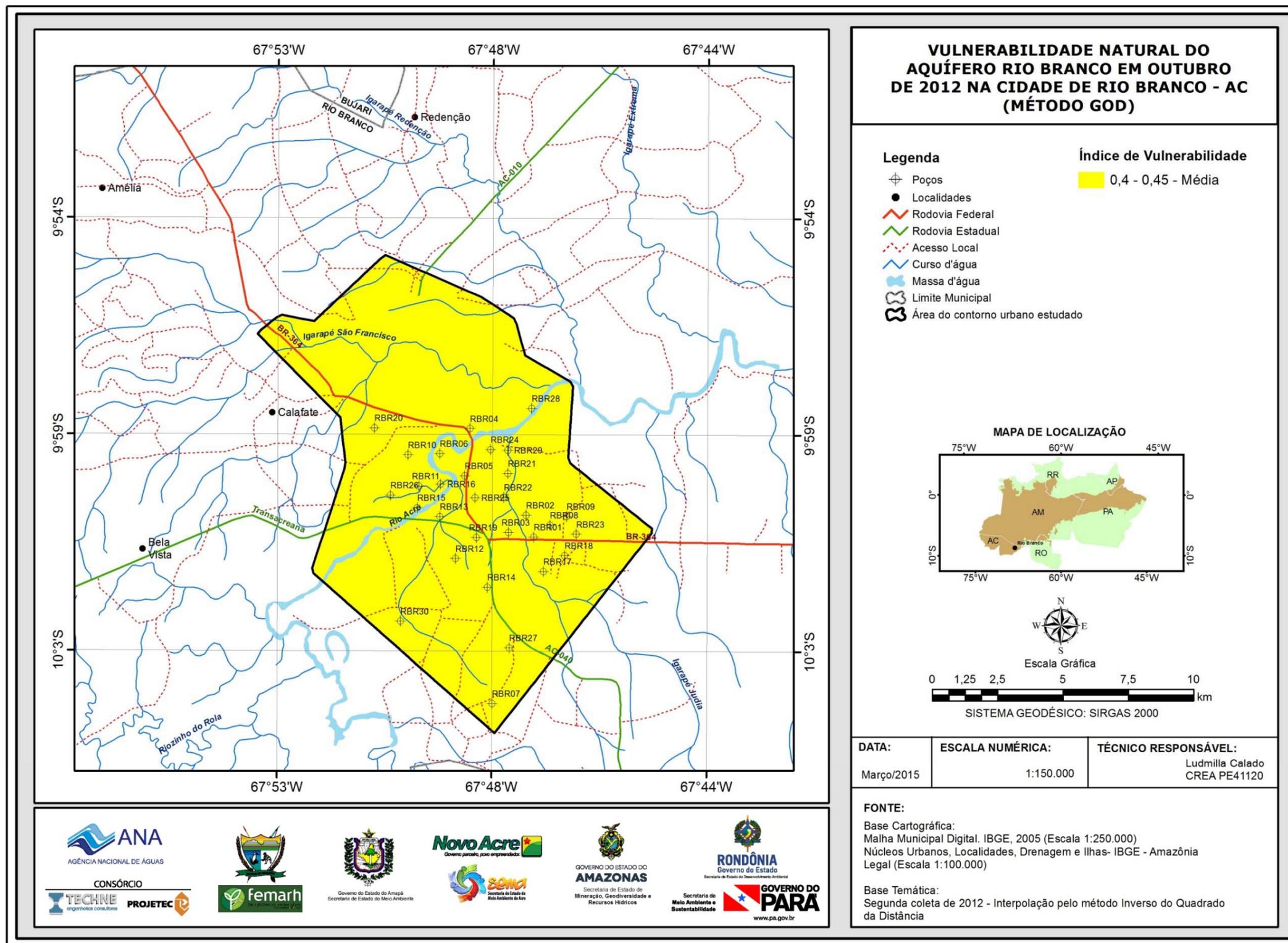


Figura 8.8b – Zoneamento da vulnerabilidade do aquífero Rio Branco na cidade de Rio Branco, na coleta de outubro de 2012 - Método GOD.

9 – Cidade Piloto: Santarém - PA

9.1 - Introdução

Este estudo visou realizar a caracterização dos aspectos fisiográficos, geológicos, hidrogeológicos, hidrogeoquímicos e a vulnerabilidade natural do aquífero Alter do Chão na cidade piloto de Santarém, principalmente no que diz respeito à qualidade de suas águas.

O município de Santarém localiza-se nas coordenadas geográficas de 02°24'52" S e 54°42'36" W, na margem direita da confluência dos rios Tapajós e Amazonas. Dista cerca de 807 km, em linha reta, da capital do Estado do Pará. O território de Santarém faz fronteira ao Norte com os municípios de Óbidos, Alenquer, Curuá e Monte Alegre; ao Sul com os municípios de Aveiro, Belterra e Placas; ao Leste com os municípios de Prainha e Uruará; e a Oeste com o município de Juruti (SEMMA-CIAM, 2013).

A área de estudo situa-se numa folha de 15 minutos compreendida entre as coordenadas 2°20'S a 2°40'S e 54°35'W a 55°00'W, da região de Santarém, cobrindo uma superfície de 756 km², enquanto que a área de estudo propriamente dita, na qual foi realizado o monitoramento dos poços nas duas campanhas de medições de níveis e de coleta de água, cobre uma área de 74 km² e sua localização pode ser visualizada na **figura 9.1**. O modelo digital do terreno revela que as cotas topográficas da área da folha de 15 minutos variam de 10 a 200 m.

O clima do município de Santarém é do tipo Am de Köppen, quente e úmido ou equatorial, com temperatura média mensal entre 25,4°C e 26,9°C, com uma média anual de 26,9°C. Caracteriza-se por umidade elevada durante todo o ano, com média compreendida entre 80% no mês mais seco (novembro) a 90% no mês mais chuvoso (maio).

A precipitação média em Santarém oscila entre 53,8 mm em outubro a 382,9 mm em março, com uma média anual de 2.118,9 mm/ano.

De acordo com o Zoneamento Ecológico-Econômico da Zona Oeste do Estado do Pará (EMBRAPA, 2010), a área de estudo é marcada por três unidades morfoestruturais: Planície Amazônica (12 km²) com cotas próximas de 10 m até 20 m; Planalto Rebaixado da Amazônia (58 km²) com cotas compreendidas entre 20 e 100 m; Planalto Tapajós-Xingu (4 km²) com cotas situadas entre 100 e 200 m.

Toda a porção Norte da folha de 15 minutos da região de Santarém, 362 km² (48% da área estudada), é ocupada pelas águas dos rios Tapajós, Amazonas e Saracura, os quais reunidos ocupam uma área de 235 km²; e pelas baixadas com várzeas aluviais e ilhas fluviais cuja área corresponde a 127 km². A confluência dos rios Tapajós e Amazonas se encontra na altura do setor oeste da cidade de Santarém.

A caracterização dos solos na área de estudo se baseou no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006), onde se verificou a ocorrência das seguintes classes de solos: Gleissolo Háplico Tb Eutrófico (GXbe) com 0,48 km², Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (PVA_d) com 74 km² e Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) com 0,05 km².

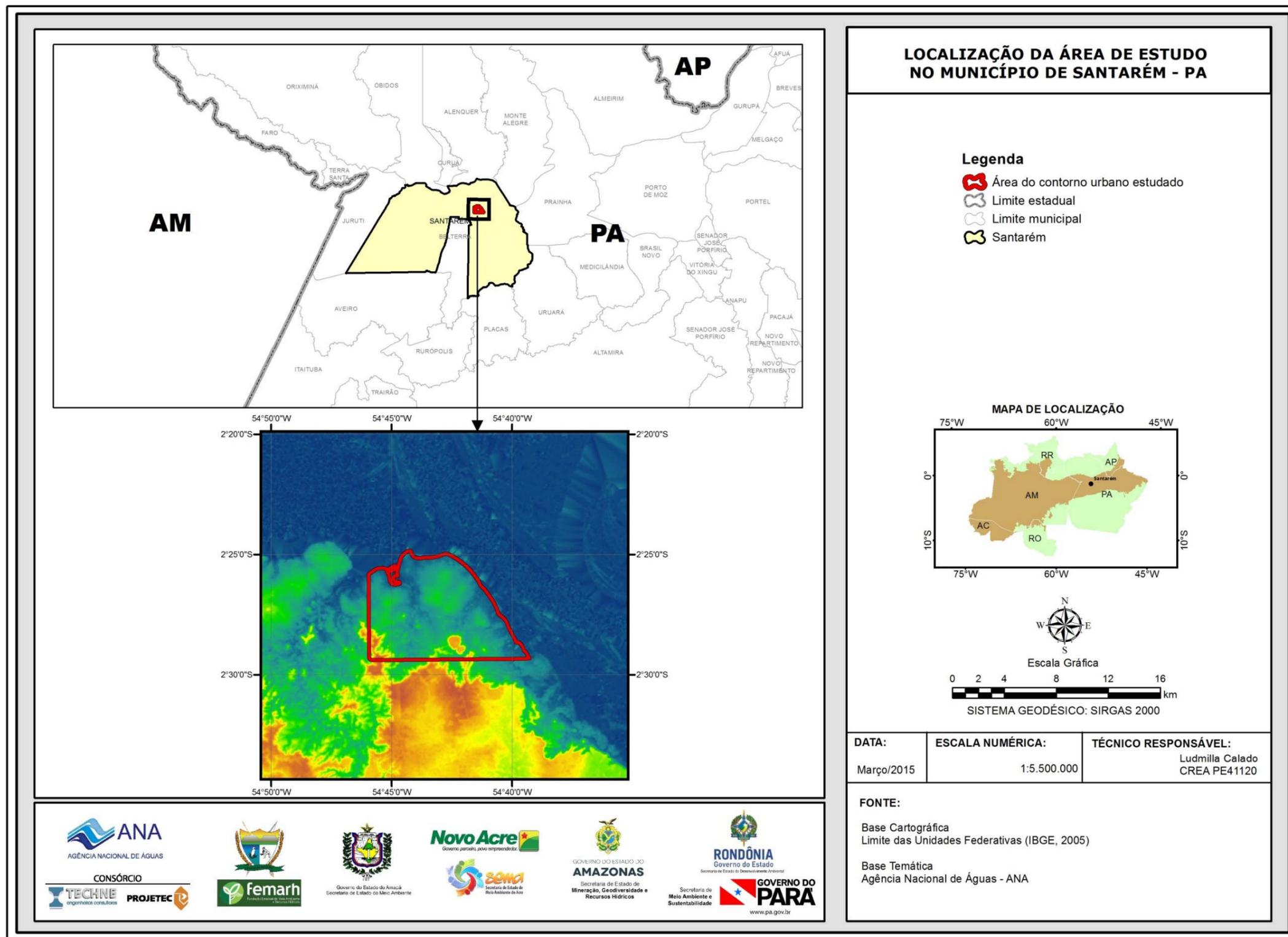


Figura 9.1 – Localização do município de Santarém e da área de estudo.

Na região de Santarém, segundo classificação descrita em IBGE (1996), a vegetação natural contempla as seguintes unidades: Floresta Ombrófila Densa Terras Baixas, que ocorre em 2 km² da área de estudo; Floresta Ombrófila Densa Terras Baixas Dossel Emergente, presente em 24 km² da folha, mas não representada na área de estudo e Formações Pioneiras com influência fluvial e/ou lacustre em 0,11 km² da área de estudo. Na área de estudo, 46 km² de seu território está ocupado por áreas urbanas e 26 km² por vegetação secundária sem palmeiras.

9.2 - Geologia

Na região de Santarém, a estrutura geológica se desenvolve sob a forma de blocos de direção NNE-SSW, dentre os quais se encontra o bloco denominado Tapajós, onde estão situadas a cidade de Santarém e a área de estudo.

O arcabouço estrutural do bloco Tapajós na região de Santarém é baseado em dados sísmicos de reflexão, segundo Travassos & Barbosa Filho (1990), e reflete uma tectônica extremamente complexa, conhecida como “Tectônica Terciária”.

A cidade de Santarém está situada na Bacia Sedimentar do Amazonas, nos domínios da Formação Alter do Chão, que aflora numa área de 397 km² equivalente a 53% da superfície da folha de 15 minutos da região de Santarém. Os 47% restantes da área da folha (359 km²) são ocupados pelas águas dos rios Tapajós e Amazonas (265 km²) e por aluviões holocênicos (94 km²), dos quais 49,1 km² em ilhas fluviais e 44,9 km² em faixas que não formam ilhas fluviais, como mostra a **figura 9.2**.

Recobrimo o pacote cenozoico da Formação Alter do Chão ocorrem os depósitos aluvionares/coluvionares do Quaternário, constituídos de areias, siltes e argilas, com cascalhos subordinados, distribuídos ao longo das planícies de inundação dos principais cursos d'água, com destaque para os sedimentos argilosos que caracterizam a várzea do rio Amazonas. Na escala da folha de 15 minutos (**figura 9.2**), os sedimentos que constituem os depósitos aluviais do holoceno na planície Amazônica da região de Santarém são constituídos predominantemente de argila, argila siltosa e argila siltico-arenosa, que são característicos das várzeas das ilhas fluviais existentes.

A Formação Jazida da Fazendinha ocorre apenas em subsuperfície e a sua seção de referência é constituída de duas sequências compostas, respectivamente, de arenitos, arenitos conglomeráticos e folhelhos cinza, na base, e de folhelhos cinza esverdeados e vermelhos e espessos pacotes de arenito branco, na sequência superior.

A Formação Andirá ocorre no intervalo de 535 a 1.073 m de profundidade, com 538 m de espessura no poço stratigráfico da Petrobras perfurado em Alter do Chão (1-AC-1-PA), sendo constituída de 238 m de arenitos (44%) distribuídos em 22 camadas com espessura média de 11 m. Os sedimentos argilosos intercalados são predominantes (54%) e se constituem de folhelhos (176 m), siltitos (114 m) e argilitos (10 m).

A Formação Arari se caracteriza por uma sedimentação cíclica, com clásticos continentais e presença de halita cristalobláscica com rede argilosa, indicando redeposição de sal em bacia fechada.

A Formação Nova Olinda ocorre na base da Formação Andirá, sendo constituída essencialmente de evaporitos, representados por halita e anidrita, além de folhelhos, siltitos e calcarenitos.

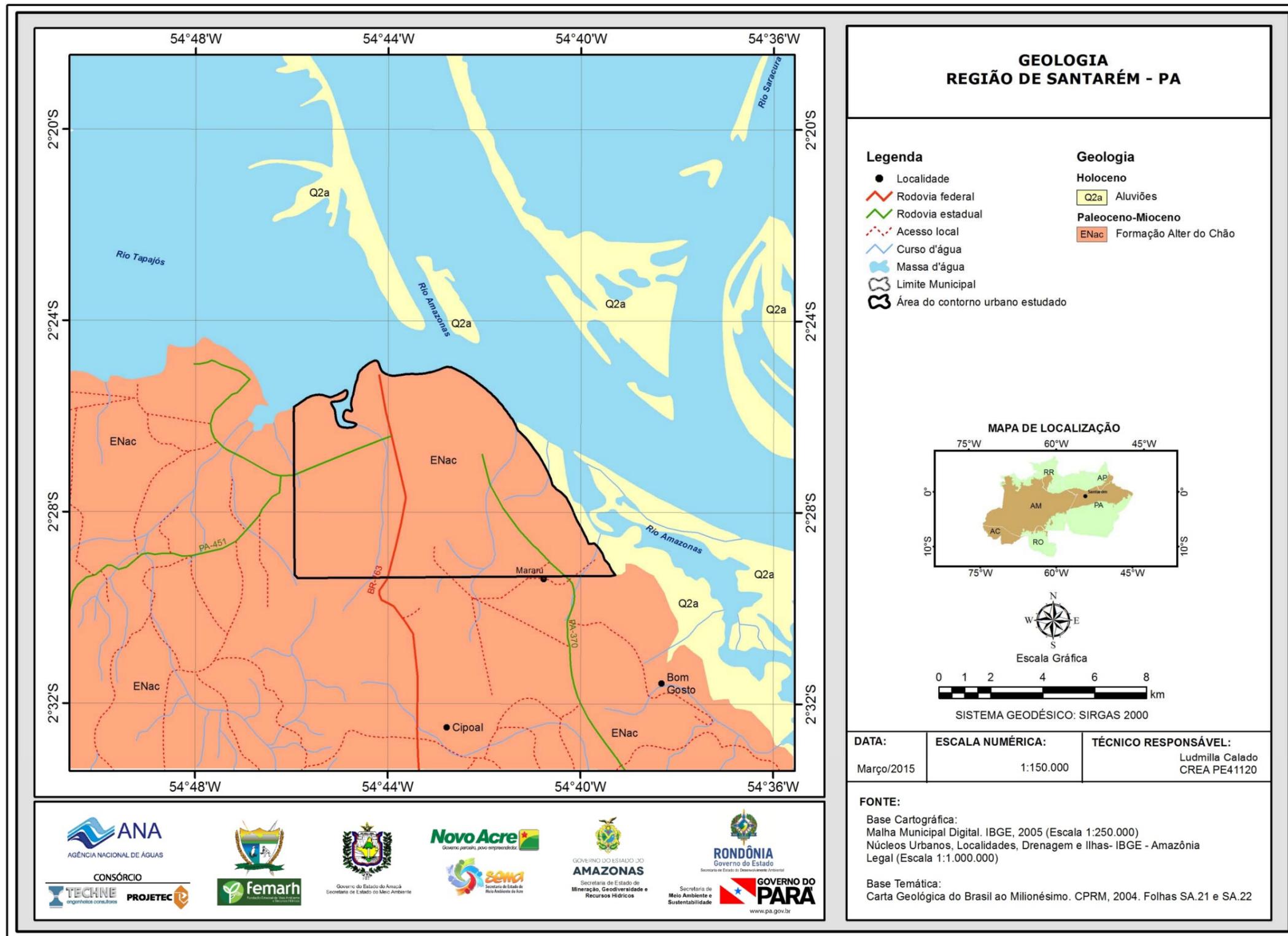


Figura 9.2 - Mapa geológico da folha de 15 minutos da região de Santarém – PA.

A Formação Itaituba apresenta espessura de 328 m, sendo constituída de anidrita, siltito, calcilutito, calcarenitos e arenitos.

A Formação Monte Alegre é predominante arenosa e portanto poderia ser considerada como uma formação aquífera. Porém é totalmente destituída de interesse hidrogeológico na região de Santarém em face da grande profundidade do seu topo, variando de 2.700 m a 3.009 m nos poços analisados.

A Formação Urucuricaia é composta de 100% de folhelho cinza escuro, o que a torna do ponto de vista de natureza litológica sem interesse hidrogeológico.

A Formação Faro ocorre na base da Formação Monte Alegre e no topo da Formação Oriximiná. Consiste essencialmente de arenitos, siltitos e folhelhos. A grande profundidade das camadas de arenito dessa formação (superior a 3.000 m) a torna sem interesse hidrogeológico.

A Formação Oriximiná é representada por um metarenito, com o topo localizado a 3.362 m de profundidade, a qual a deixa sem interesse hidrogeológico.

A Formação Curiri é constituída de diamictitos de origem glacial, com espessura de 80 m.

9.3 - Hidrogeologia e Hidrodinâmica

Embora não exista na cidade de Santarém nenhum poço estratigráfico, é possível caracterizar localmente o Sistema Aquífero Amazonas no Brasil (SAAB) de acordo com os perfis compostos dos poços da Petrobras perfurados em Alter do Chão (1-AC-1-PA) e Belterra (1-BR-1A – PA), com profundidades de 3.579 m e 3.375 m respectivamente, situados 30 km a sudoeste da cidade. Tal sistema é interpretado como regionalmente livre e engloba o conjunto de camadas arenosas livres e semiconfinadas intercaladas entre camadas argilosas (aquitardos) das Formações Alter do Chão e Jazida da Fazendinha.

De acordo com esses poços, a espessura média do pacote sedimentar representado pelas formações Alter do Chão e Jazida da Fazendinha é de 531 m em Alter do Chão e 596 m em Belterra.

As **propriedades hidráulicas** do **aquífero Alter do Chão** foram avaliadas através de 02 (dois) testes de bombeamento conduzidos no âmbito desse Projeto, na cidade de Santarém, sem utilização de poços de observação. Para tanto, usou-se o poço do condomínio Tapajós Royal Ville (ST082) e o poço da Associação de Moradores Jutai (ST047).

Nos testes, as medidas de nível dinâmico nos poços bombeados foram realizadas com sonda elétrica sonora, enquanto que a vazão bombeada foi medida através de método volumétrico.

Para a **interpretação dos testes de bombeamento** foram utilizados três métodos, o semilogarítmico de Cooper & Jacob (1946), previsto para aquífero confinado, homogêneo e isotrópico, cujos resultados podem ser vistos na **tabela 9.1**; curvas padrão de Walton (1962) baseados na função de Hantush & Jacob (1955), para aquífero semiconfinado drenante, cujos dados podem ser vistos na **tabela 9.2**; e o método de Neuman (1975) para aquífero livre e

drenante, cujos resultados podem ser observados na **tabela 9.3**. Isto porque, o aquífero Alter do Chão apresenta comportamento de aquífero livre.

Tabela 9.1 – Parâmetros hidráulicos avaliados para o aquífero Alter do Chão na cidade de Santarém - PA, pelo método de Cooper & Jacob (1946).

Poço	UF	UTM (E)	UTM (N)	Aquífero	T (m ² /dia)	b (m)	K (m/dia)
T.R.Ville	PA	740403	9320910	Alter do Chão	49	80	0,6
Ass.Moradores Jutaí	PA	756986	9727436	Alter do Chão	303	42	7,2
		Média			176	61	3,9

T = transmissividade; K = condutividade hidráulica; b = Espessura saturada.

Tabela 9.2 – Parâmetros hidráulicos do Aquífero Alter do Chão, avaliados pelo método de Walton (1962) baseado em Hantush & Jacob (1955).

Poço	T (m ² /dia)	K (m/dia)	S	b(m)	b' (m)	K' (m/dia)	rh = b'/K' (dias)
T.R. Ville (ST082)	60	0,67	3,33E-04	90	24	0,14	166,83
Média	60	0,67	3,33E-04	90	24	0,14	166,83

T = transmissividade do aquífero semiconfinado; K = condutividade hidráulica do aquífero semiconfinado; S = coeficiente de armazenamento do aquífero semiconfinado; b = espessura do aquífero semiconfinado; b' = espessura do aquífero confinado; K' = condutividade hidráulica do aquífero confinado; rh = b'/K' = resistência hidráulica do aquífero confinado.

Tabela 9.3 – Parâmetros hidráulicos do Aquífero Alter do Chão em Santarém – PA, obtidos pelo modelo de Neuman (1975).

Poço	UTM (E)	UTM (N)	T (m ² /dia)	Kh (m/dia)	Kv (m/dia)	KD (adm)	Sy
T.R. Ville	749461	9729909	37,24	0,27	0,20	0,74	0,16
A.M. Jutaí	756986	9727436	52,43	1,38	0,08	0,08	0,10
Média			45	0,83	0,14	0,41	0,13

T = transmissividade; Kh = condutividade hidráulica; horizontal; Kv = condutividade hidráulica vertical; S = coeficiente de armazenamento; Sy = Porosidade efetiva; KD = Grau de anisotropia.

Os resultados julgados mais representativos são aqueles obtidos para aquífero do tipo livre, homogêneo e anisotrópico (método de Neuman, 1975), pois no aquífero Alter do Chão a sequência de camadas arenosas e argilosas é lateralmente bastante descontínua.

A partir das medições de **profundidade do nível estático** dos poços localizados no município de Santarém, foram elaborados para o aquífero Alter do Chão os mapas de profundidade de nível e de potenciometria para cada período de medição (chuvoso e estiagem). A distribuição espacial da profundidade do nível das águas subterrâneas no período chuvoso (abril de 2012), ilustrada na **figura 9.3a**, mostra que os níveis estáticos do aquífero Alter do Chão variam de 1,3 a 32,08 m, enquanto que na estiagem (**figura 9.3b**), os níveis estáticos se acham mais profundos, variando de 2,46 até 32,03 m. Enquanto os níveis medidos no período de estiagem alcançaram uma média de 15,90 m, no período chuvoso a média foi de 13,55 m.

A **potenciometria** do aquífero Alter do Chão em abril de 2012 é apresentada na **figura 9.4a** e em outubro de 2012 na **figura 9.4b**. As cargas hidráulicas variam de 5 a 55 m e a sua distribuição espacial parece inteiramente governada pelos bombeamentos dos poços, dada a similaridade das duas superfícies potenciométricas nos dois períodos. De acordo com as linhas potenciométricas, em ambas as campanhas, as águas subterrâneas escoam em direção aos poços bombeados.

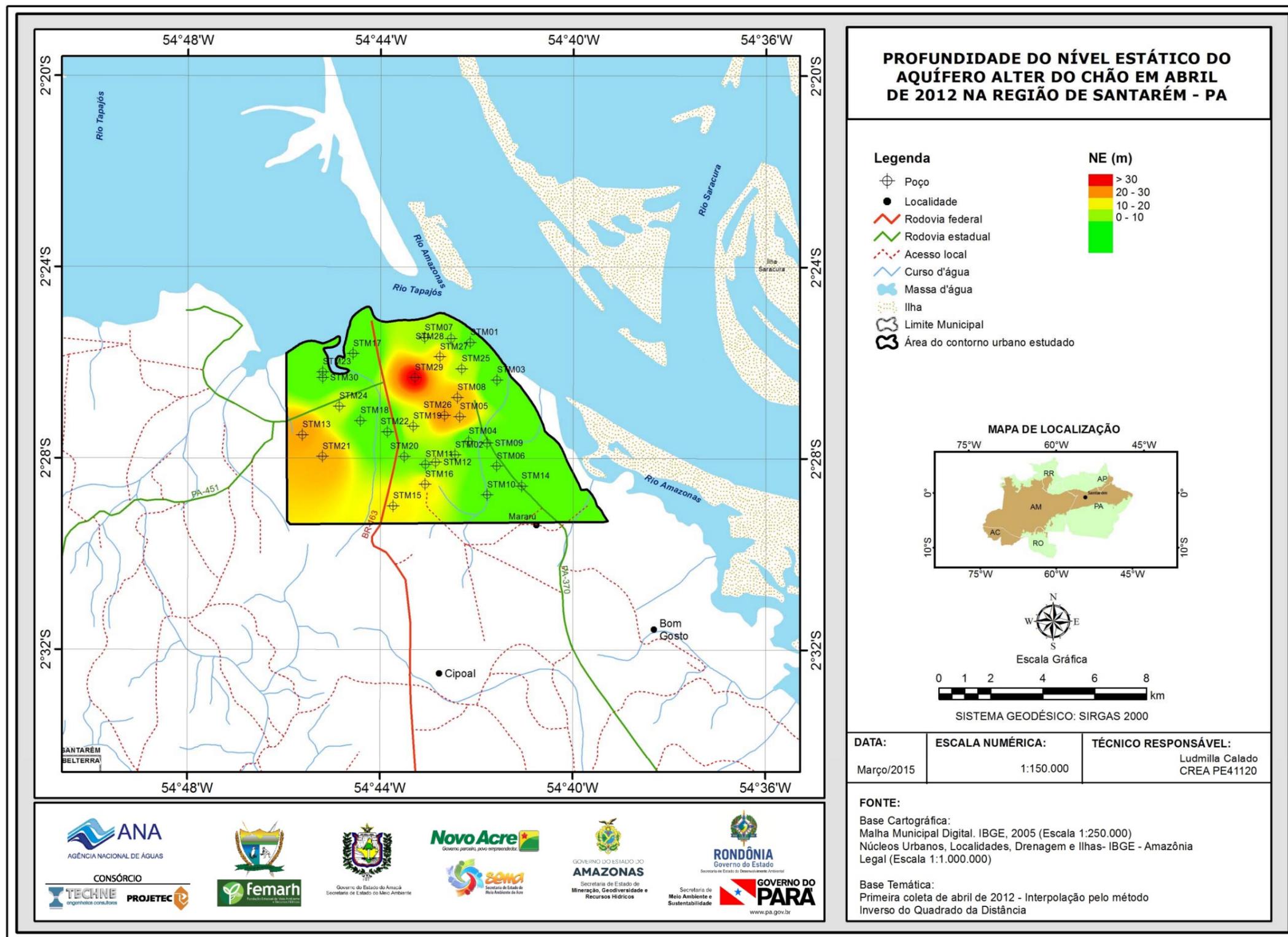


Figura 9.3a - Profundidade do nível estático das águas subterrâneas do aquífero Alter do Chão em abril de 2012 na cidade de Santarém - PA.

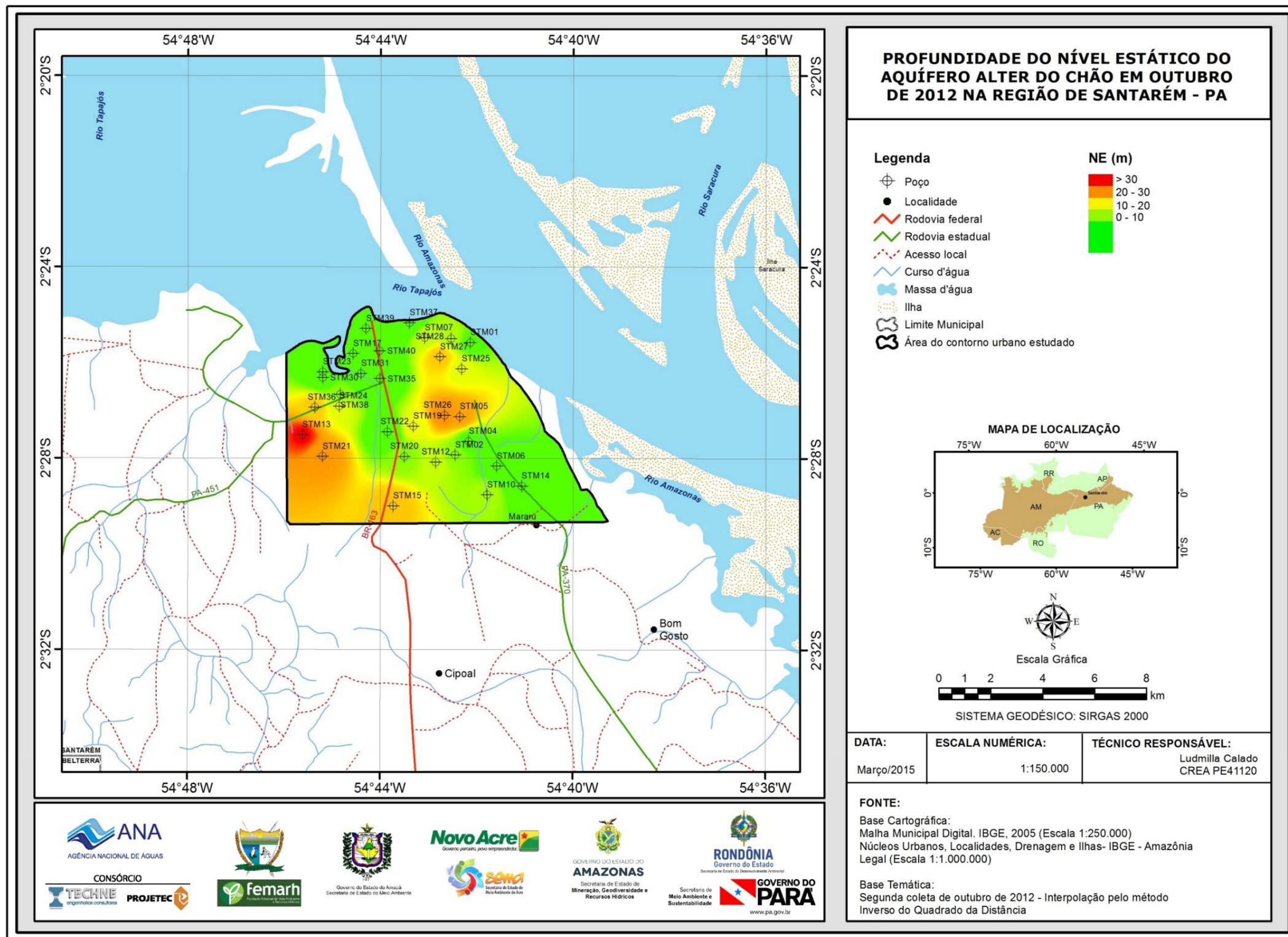


Figura 9.3b - Profundidade do nível estático das águas subterrâneas do aquífero Alter do Chão em outubro de 2012 na cidade de Santarém - PA.

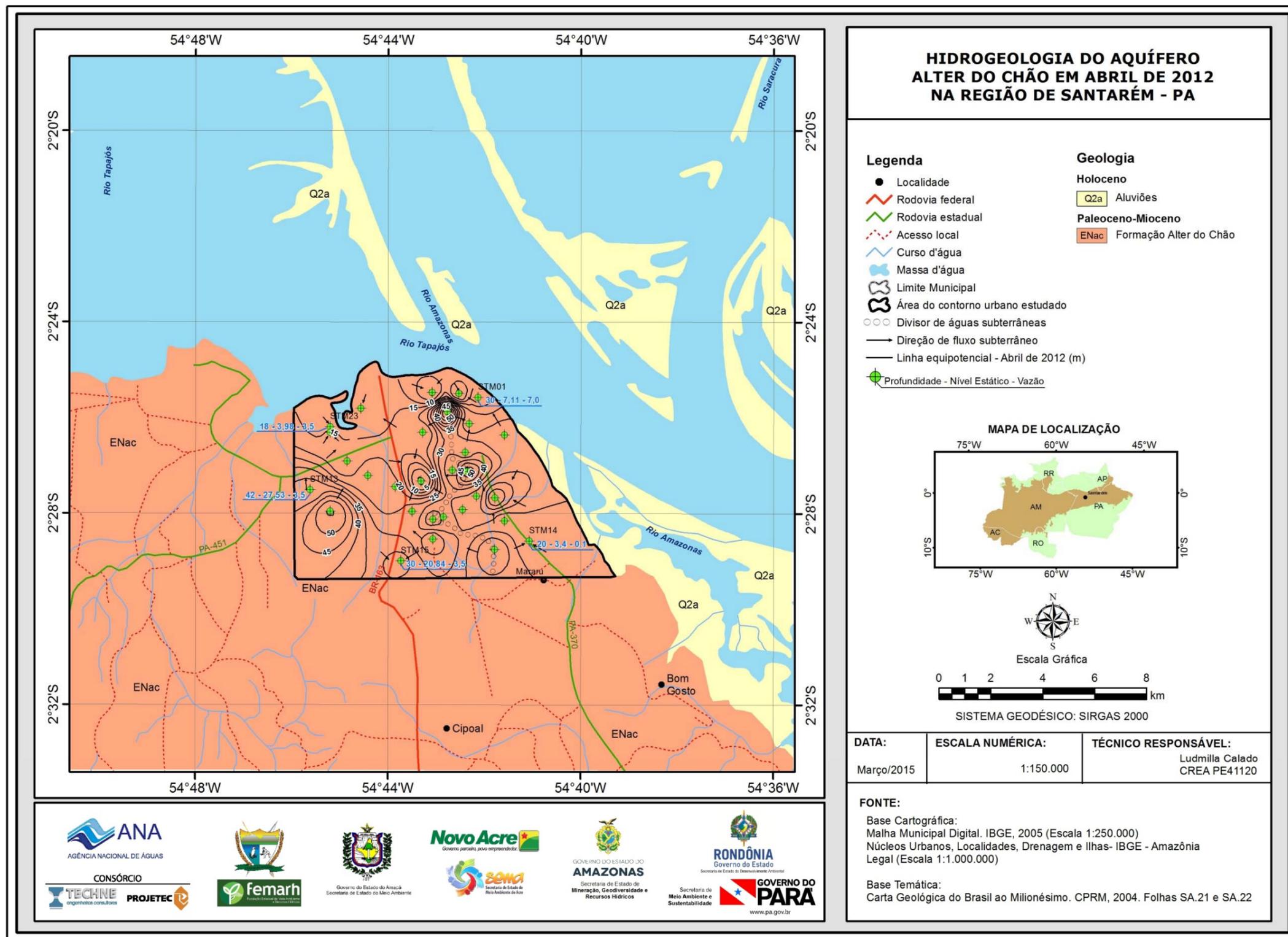


Figura 9.4a - Hidrogeologia e superfície potenciométrica das águas subterrâneas do aquífero Alter do Chão em abril de 2012 na cidade de Santarém - PA.

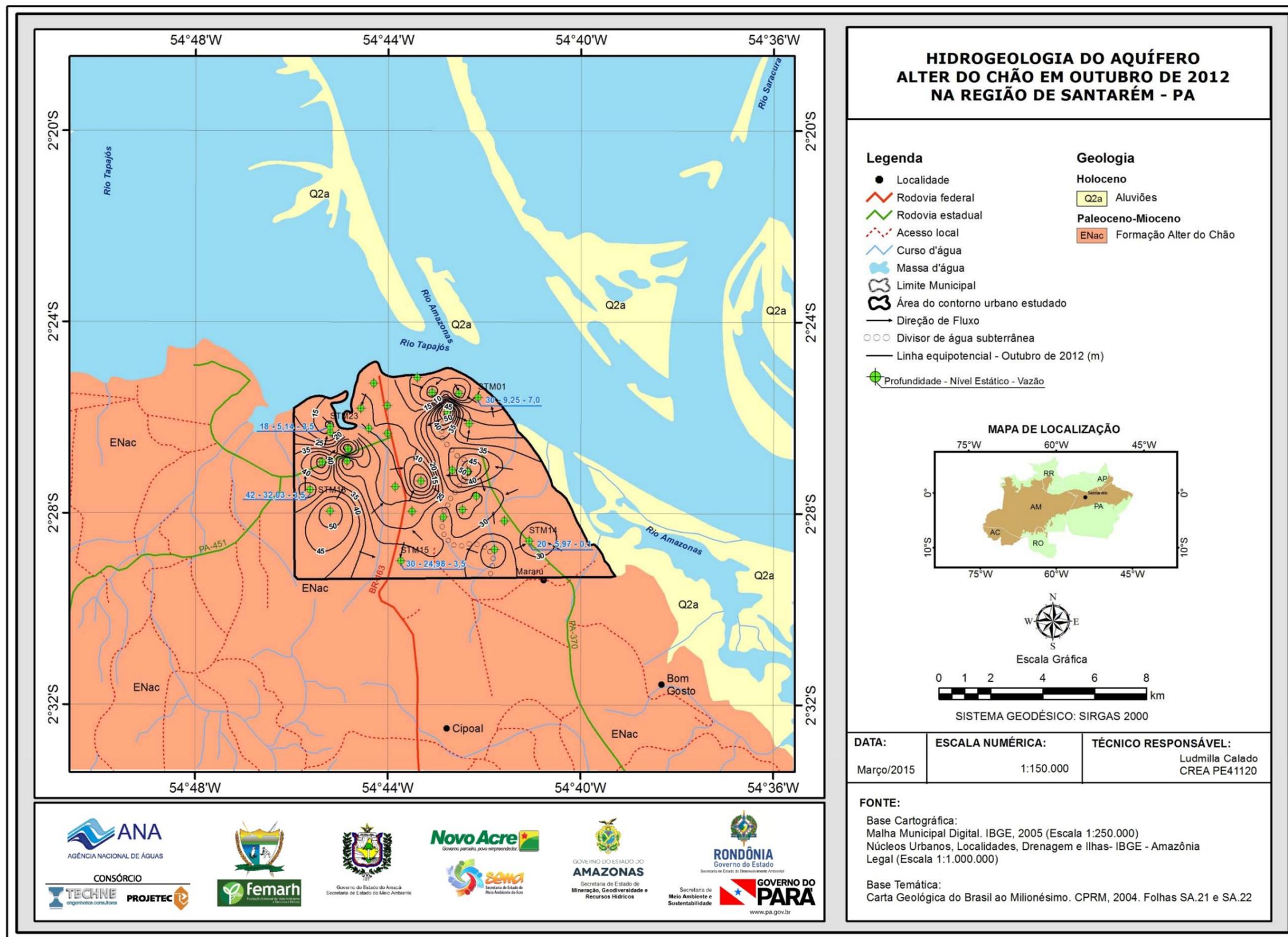


Figura 9.4b - Hidrogeologia e superfície potenciométrica das águas subterrâneas do aquífero Alter do Chão em outubro de 2012 na cidade de Santarém - PA.

Para estimativa da **Recarga Potencial Direta (RPD)**, **Reserva Potencial Explotável (RPE)** e **Reserva Permanente (RP)**, apresentadas na **tabela 9.4**, utilizou-se a área de estudo de 74 km², delimitada para o balanço hidrogeológico na zona urbana de Santarém, onde se verificou uma variação sazonal média da superfície freática entre as duas campanhas de medições de nível de 2,35 m. Adotou-se para o aquífero Alter do Chão em Santarém o coeficiente de sustentabilidade (CS) de 0,4; a espessura média saturada (b) de 500 m; e a porosidade efetiva (Sy) de 13%.

Tabela 9.4 - Reservas do aquífero Alter do Chão na zona urbana de Santarém na área de 74 km² do balanço hidrogeológico.

Reservas	Unidade	Valor
Reserva reguladora ou Recarga potencial direta (RPD)	m ³ /s	0,718
Reserva potencial explotável (RPE)	m ³ /s	0,287
Reserva permanente (RP)	m ³	4,81 x 10 ⁹

A pesquisa hidrogeológica desenvolvida na cidade de Santarém baseou-se em dados dos 464 poços constantes no SIG ANA PHA 2013, dos quais 364 catalogados no SIAGAS – Sistema de Informações de Águas Subterrâneas do Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2010) e 100 novos poços cadastrados pela ANA, no âmbito desse Projeto.

A profundidade desses poços varia de 3,9 a 271 m, contudo a maioria dos poços, cerca de 72%, possui profundidade total inferior a 50 m.

Os níveis estáticos ficam compreendidos entre 0,1 a 66 m, porém quase 62% dos poços possuem níveis estáticos de até 20 m.

Quanto ao uso da água subterrânea para os 464 poços em Santarém, verifica-se que 83,2% é destinada ao abastecimento, 1,7% ao uso múltiplo, 3,7% para indústria, 1,5% comércio, 0,2% hospitalar, 3% outros usos não citados anteriormente e os 6,7% restantes não informaram.

A vazão oscila de 0,1 a 340 m³/h, porém ressalta-se que 79% dos poços possuem vazões <10 m³/h (**figura 9.5**). A partir dos dados obtidos verificou-se que há uma correlação relativamente forte ($R^2 = 0,81$) entre a profundidade e a vazão dos poços na região de Santarém. Isso provavelmente se deve ao fato do aquífero Alter do Chão ser muito espesso o que contribui para que o aumento da vazão ocorra com a elevação da profundidade, o que favorece a existência de poços com vazões altas, da ordem, por exemplo, de 340 m³/h.

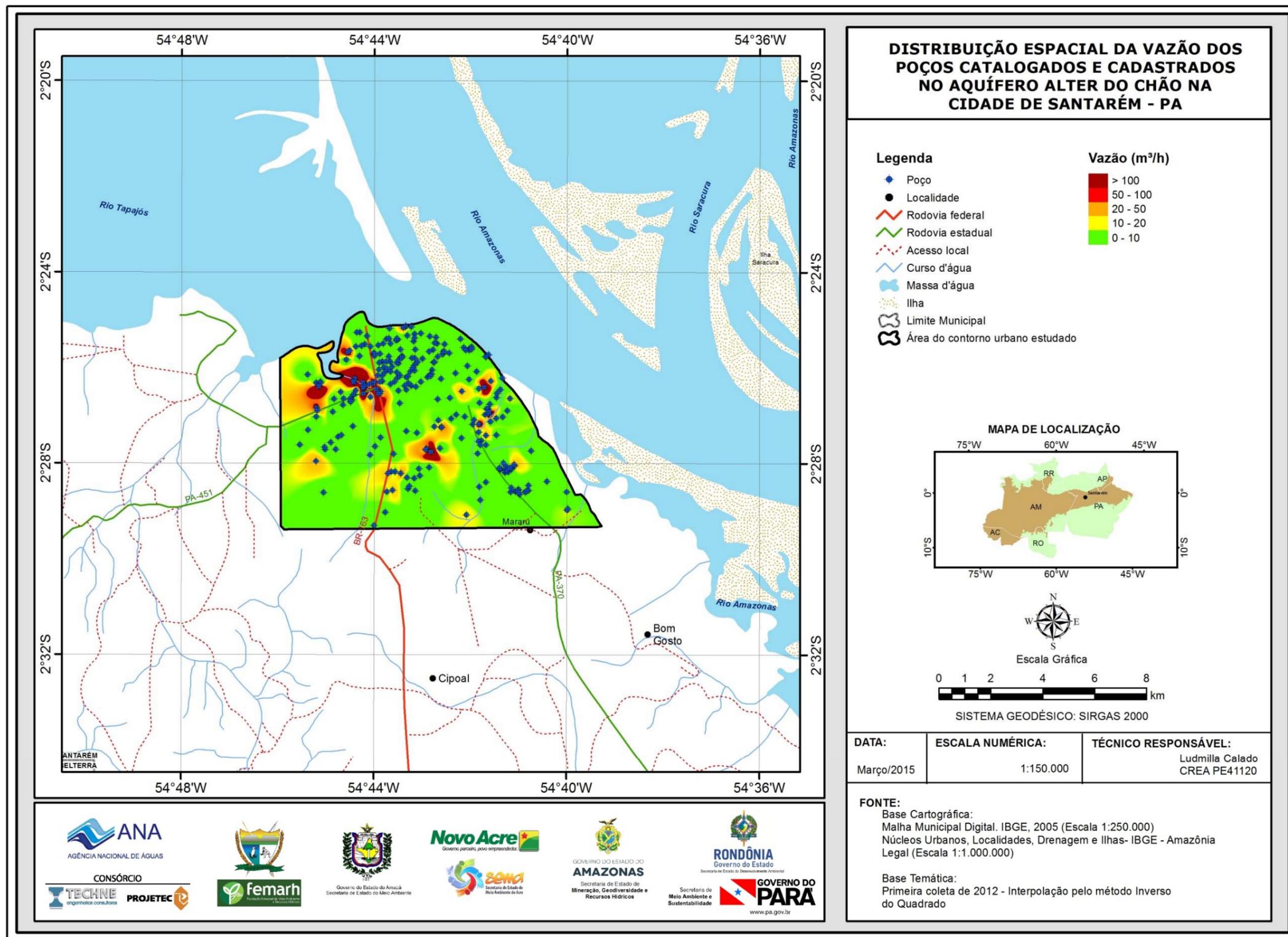


Figura 9.5 – Distribuição espacial da vazão dos poços cadastrados e catalogados na região de Santarém – PA.

9.4 - Hidrogeoquímica

Com o intuito de avaliar a qualidade das águas subterrâneas do aquífero Alter do Chão na cidade de Santarém, foram realizadas 30 (trinta) análises físico-químicas e bacteriológicas; 10 (dez) análises de metais pesados, BTEX e fenóis; 04 (quatro) análises de isótopos ambientais estáveis - deutério e oxigênio-18; 07 (sete) análises do isótopo ambiental radioativo – trício; e 04 (quatro) análises do isótopo ambiental - carbono 14.

As análises físico-químicas e bacteriológicas avaliaram os seguintes parâmetros: cor, turbidez, condutividade elétrica (CE), temperatura, sólidos totais dissolvidos (STD), pH *in situ*, potencial redox (Eh), sódio, potássio, cálcio, magnésio, dureza, cloreto, sulfato, bicarbonato, nitrito, nitrato, amônia, ferro, manganês, Coliformes Totais e Termotolerantes (*E. Coli*).

Foram realizadas duas campanhas de amostragem, com 6 (seis) meses de defasagem, sendo uma no período chuvoso (abril de 2012) e outra no período de estiagem (outubro de 2012). As análises de metais pesados, BTEX, fenóis e isótopos ambientais foram efetuadas apenas na segunda campanha de amostragem. A localização dos pontos de amostragem na área de estudo pode ser observada na **figura 9.6**.

O estudo hidrogeoquímico das águas do aquífero Alter do Chão na cidade piloto de Santarém indicou que, de forma geral, os teores analisados se encontram em baixíssimas concentrações devido ao clima chuvoso da Floresta Tropical Amazônica, e que alguns poucos valores extremos encontrados, inclusive acima do VMP estabelecido como de potabilidade pela Portaria MS 2914/2011, assim como os usos preponderantes da água subterrânea definidos pela Resolução CONAMA 396/2008, se devem exclusivamente em grande parte a fatores antrópicos.

A análise estatística dos parâmetros físico-químicos coletados em duas campanhas de amostragem, realizadas em abril e outubro de 2012 revelou efeito de sazonalidade sobre alguns parâmetros, tais como, turbidez, temperatura, CE, STD, cálcio e nitrato, cujos teores foram mais elevados no período chuvoso; enquanto que sulfato, magnésio, dureza e ferro foram maiores no período de estiagem.

Os resultados obtidos no aquífero Alter do Chão em Santarém mostraram que no período chuvoso e de estiagem, respectivamente, 37% e 90% das amostras coletadas apresentaram valores de cor inferior ao limite de detecção de 5 uH; apenas 23% dos poços na primeira campanha ultrapassaram o VMP de potabilidade de 15 uH da Portaria MS 2914/2011, sugerindo que estas águas não são próprias para consumo humano.

Na primeira e segunda campanha, respectivamente, 13% e 93% das amostras apresentaram valores de turbidez abaixo do limite de detecção de 0,1 uT. Na segunda campanha, 3% dos poços apresentaram valores acima do VMP de potabilidade da Portaria MS 2914/2011.

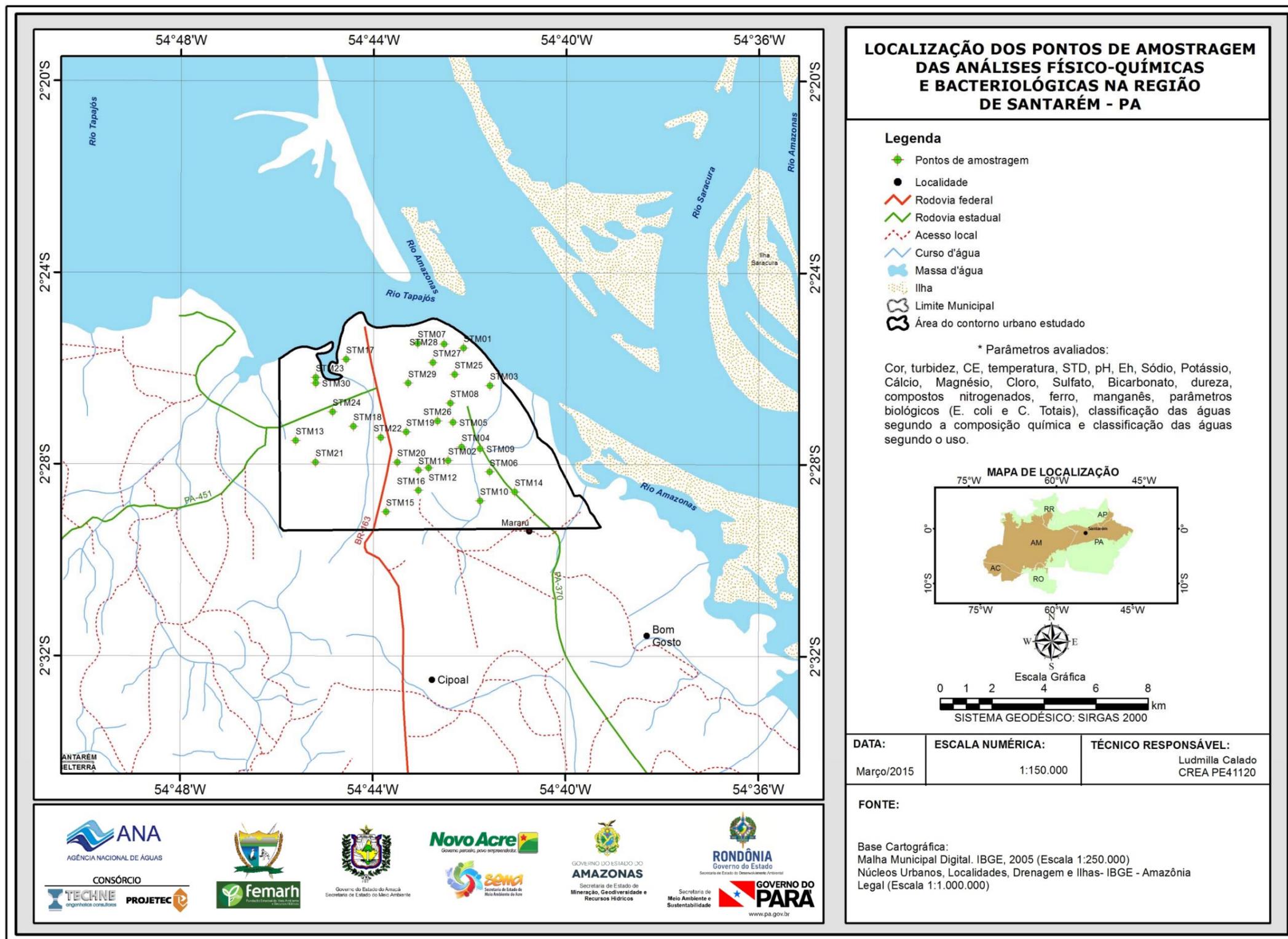


Figura 9.6 – Localização dos pontos de amostragem no aquífero Alter do Chão na cidade de Santarém - PA.

A condutividade elétrica (CE) das águas do aquífero Alter do Chão nesta cidade piloto variou no período chuvoso de 18 a 338 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com média de 141,4 $\mu\text{S}/\text{cm}$; enquanto que no período seco a variação foi de 13 a 321 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com média igual a 129,8 $\mu\text{S}/\text{cm}$. De modo geral, os valores de CE no aquífero são baixos, haja vista que em ambas as campanhas, 77% dos poços apresentaram valores abaixo de 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$, o que permite classificar as águas como potáveis. Tais resultados são reflexos dos altos índices de precipitação pluviométrica da Região Amazônica, associada à elevada frequência das chuvas, que assegura uma quase permanente renovação das águas dos aquíferos e dos rios ali presentes.

A temperatura das águas do aquífero Alter do Chão em Santarém varia no mínimo de 26,6°C a 31,4 °C no período chuvoso e oscila entre 26,1 a 33,5 °C no período seco.

Os teores de STD no aquífero Alter do Chão em Santarém variaram no período chuvoso de 11 a 241 mg/L, com média de 95,43 mg/L; e no período de estiagem oscilaram entre 7 e 228 mg/L, com média de 89,13 mg/L. Todos os valores de STD obtidos estão abaixo do VMP de 1.000 mg/L da Portaria MS 2914/2011 e da Resolução CONAMA 396/2008, indicando que as águas podem ser usadas para consumo humano.

As águas do aquífero Alter do Chão nesta cidade são essencialmente ácidas, com pH *in situ* variando no período chuvoso entre 3,36 e 6,13, com média de 4,25; e no período seco oscilando entre mínimo de 3,9 e máximo de 5,7, com média igual a 4,65.

Os resultados de potencial redox (Eh) altos e positivos em 100% e 97% das amostras, respectivamente na primeira e segunda campanha, sugerem que os poços possuem águas em condições oxidantes, ou seja, baixa atividade de elétrons.

De modo geral, os teores de sódio, potássio, cálcio e magnésio encontrados nas duas coletas de amostragem são baixos e podem ser justificados pelo intemperismo químico da região, bem como à constante renovação das águas subterrâneas devido à elevada precipitação da Região Amazônica.

Os teores de sódio variam entre 0,14 e 30,69 mg/L no período chuvoso, com média de 10,7 mg/L; e no período de estiagem oscilam entre 0,46 e 20,71 mg/L, com média de 7,94 mg/L. De acordo com a Portaria MS 2914/2011, todos os valores de sódio encontrados nas duas campanhas estão abaixo do VMP de 200 mg/L, padrão definido como de potabilidade para consumo humano, assim como dentro dos limites da Resolução CONAMA 396/2008, indicando que as águas podem ser usadas para consumo humano e recreação.

No período chuvoso, as concentrações de potássio oscilaram entre 0,016 e 14 mg/L, com média de 3,97 mg/L; enquanto que no período seco variou entre 0,042 mg/L e 6,87 mg/L, com média de 2,23 mg/L.

Os teores de cálcio no período chuvoso variaram entre 0,02 a 9,24 mg/L, com média de 2,63 mg/L; ao passo que no período de estiagem oscilaram entre 0,008 a 8,88 mg/L, com média de 2,60 mg/L.

As concentrações de magnésio no período chuvoso variam de 0,02 a 2,3 mg/L, com média de 0,56 mg/L; enquanto que no período seco, oscila entre 0,02 a 1,75 mg/L, com média de 0,64 mg/L.

Os valores de cloreto no período chuvoso variaram de 0,99 a 28,91 mg/L, com média de 11,29 mg/L; e no período de estiagem, a variação entre o mínimo e o máximo foi de 0,49 a 21,99 mg/L, com média de 9,84 mg/L. Todos os poços amostrados, em ambas as campanhas, apresentaram resultados de cloreto inferiores ao VMP estabelecido pela Portaria MS 2914/11, assim como dentro dos padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA 396/2008, indicando que as águas do aquífero Alter do Chão em Santarém podem ser empregadas para consumo humano, irrigação e recreação.

Os teores de sulfato nas águas subterrâneas do aquífero Alter do Chão nesta região, no período chuvoso, variam de 0,49 a 11,15 mg/L, com média de 1,27 mg/L; e no período seco oscilam entre 0,49 a 8,0 mg/L, com média de 1,18 mg/L. Nenhuma das amostras ultrapassou os limites recomendados da Portaria MS 2914/2011 e Resolução CONAMA 396/2008.

As análises de bicarbonato revelaram, de modo geral, resultados muito baixos, inclusive com teores iguais à zero em 97% das amostras na primeira campanha e 93% na segunda campanha.

Os teores de dureza nas águas do aquífero Alter do Chão em Santarém no período chuvoso oscilaram entre 0,16 e 32,53 mg/L, com média de 8,87 mg/L; e no período de estiagem variou de 0,21 a 27,46 mg/L, com média de 9,14 mg/L. Esses resultados permitem concluir que as águas do aquífero são do tipo mole, pois 100% das amostras apresentaram valores inferiores a 50 mg/L. Nas duas campanhas nenhum dos poços amostrados ultrapassou o VMP recomendável pela Portaria MS 2914/2011, de 500 mg/L para consumo humano.

Dentre o total de amostras, 33% dos poços no período chuvoso e 23% no período de estiagem apresentaram valores de nitrato que ultrapassaram o VMP de potabilidade recomendável pela Portaria MS 2914/2011, além de não serem indicadas para consumo humano e para recreação, segundo a Resolução CONAMA 396/2008. Todas as amostras analisadas nas duas campanhas poderiam ser utilizadas para a dessedentação animal, haja vista que não ultrapassaram os limites definidos pela Resolução citada. A presença de nitrato nas águas se deve a contaminação oriunda da ausência de saneamento básico na região.

Os teores de nitrito no aquífero Alter do Chão nesta cidade são desprezíveis, uma vez que 100% das amostras em ambas as campanhas apresentaram valores abaixo do limite de detecção. Todas as amostras analisadas nas duas coletas apresentaram teores de nitrito dentro dos padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria MS 2914/2011 de 1 mg/L, assim como poderiam ser usadas para o consumo humano, dessedentação de animais, irrigação e recreação, de acordo com a Resolução CONAMA 396/2008 em relação a esse parâmetro.

Dentre o total de amostras analisadas, apenas 7% dos poços na segunda campanha apresentaram valores de amônia que ultrapassaram o VMP recomendável pela Portaria MS 2914/2011 para consumo humano de 1,5 mg/L.

Esses resultados foram obtidos nos poços STM39 (1,6 mg/L) e STM17 (1,7 mg/L).

No período chuvoso e de estiagem, respectivamente, 7% e 3% dos poços apresentaram valores de ferro que ultrapassaram o VMP de potabilidade recomendável pela Portaria MS 2914/2011, além de não serem indicadas para consumo humano e para recreação, segundo a Resolução CONAMA 396/2008. Porém, todas as amostras analisadas nas duas campanhas poderiam ser utilizadas para a irrigação, haja vista que não ultrapassaram os limites definidos pela Resolução citada.

De modo geral, os teores de ferro no aquífero Alter do Chão em Santarém são baixos quando comparados aos demais aquíferos estudados no âmbito do Projeto PHA, como, por exemplo, o aquífero Rio Branco, onde os teores de ferro variam de 0,016 a 10,17 mg/L e 0,04 a 24,63 mg/L, respectivamente para os períodos chuvoso e seco.

De acordo com Tancredi (1996), o teor de ferro relativamente baixo reflete a elevada taxa de circulação (renovação) da água subterrânea no sistema hidrológico da Formação Alter do Chão em Santarém.

As concentrações de manganês no período chuvoso variam de 0,00009 a 0,05 mg/L, com média de 0,01 mg/L; e no período seco oscilam de 0,0009 mg/L a 0,09 mg/L, com média de 0,01 mg/L. Em ambas as campanhas, nenhuma das amostras apresentou teores de manganês acima do VMP estabelecido pela Portaria MS 2914/2011, podendo ser indicado o uso dessas águas para consumo humano, recreação e irrigação, segundo a Resolução CONAMA 396/2008. Apenas o poço STM05 apresentou teor de manganês de 0,085 mg/L que ultrapassa o limite recomendado de 0,05 mg/L para dessedentação animal, de acordo com a Resolução CONAMA 396/2008.

A avaliação dos parâmetros biológicos indicou a presença de Coliformes totais em 30% dos casos no período chuvoso e de 20% na estiagem. Além da presença de C. totais, também se verificou a ocorrência de *E. coli* em 17% e 7% dos poços respectivamente na primeira e segunda coleta. Esses resultados sugerem que as águas do aquífero Alter do Chão em Santarém estão fora dos padrões biológicos recomendados pela Portaria MS 2914/2011 e Resolução CONAMA 396/2008, indicando que as suas águas não podem ser utilizadas para consumo humano, dessedentação animal e recreação, haja vista que podem ocasionar doenças de veiculação hídrica. Isto se deve a contaminação das águas subterrâneas por fossas sépticas devido à ausência de sistema de esgotamento sanitário na região e também pelo fato de que os poços tubulares, em sua maioria, são pouco profundos e construídos com técnicas inapropriadas, que deixam os espaços anelares sem a devida proteção sanitária.

Todas as amostras analisadas para os metais pesados arsênio, cádmio, cromo e níquel apresentaram teores abaixo do limite de detecção, ao passo que bário, chumbo, cobre, mercúrio e zinco obtiveram teores abaixo do VMP definido pela Portaria MS 2914/2011 e Resolução CONAMA 396/2008.

No que se refere às análises de BTEX e fenóis, todas as amostras respeitaram os limites de potabilidade definidos pela Portaria MS 2914/2011 e Resolução CONAMA 396/2008.

Os resultados dos isótopos ambientais Oxigênio-18 e Deutério levaram a concluir que a recarga do aquífero Alter do Chão em Santarém provém de águas meteóricas, ou seja, águas de chuva com 81% de perda de por evaporação.

Segundo as datações efetuadas com Trício, as águas do aquífero Alter do Chão em Santarém têm água submoderna, com recarga anterior a 1952 e mistura de água submoderna com recarga recente (em descenso do Planalto Tapajós–Xingu).

Quanto à datação radiométrica de Carbono-14, as análises revelaram a presença de água moderna com menos de 200 anos BP e paleoáguas com idades compreendidas entre 2200 e 2700 BP, o que deve corresponder a amostras coletadas a maiores profundidades no sistema aquífero regional (parte superior do SAAB).

No que se refere à classificação das águas subterrâneas de acordo com a composição química, é possível verificar que as águas do aquífero Alter do Chão em Santarém na sua maioria são Cloretadas Sódicas e de boa potabilidade, segundo indicação dos diagramas de Piper, Stiff e Schoeller-Berkaloff.

No que concerne à avaliação das águas para irrigação de acordo com a razão de Adsorção de Sódio (SAR), verifica-se que as águas do aquífero Alter do Chão em Santarém possuem risco de sódio baixo e salinidade entre fraquíssima a média, indicando que as águas podem ser usadas para o cultivo de boa parte dos vegetais.

Conforme a metodologia de McKee & Wolf (1963), as águas do aquífero Alter do Chão em Santarém podem ser utilizadas para a dessedentação animal sem restrições, haja vista que os teores de STD encontrados em ambas as campanhas foram baixos.

9.5 - Vulnerabilidade Natural do Aquífero Alter do Chão

A vulnerabilidade de um aquífero é a sensibilidade da qualidade da água subterrânea ante uma carga contaminante imposta, determinada pelas características intrínsecas do aquífero e do seu recobrimento. Por tal motivo é tão importante a sua avaliação, que pode ser usada por diferentes métodos. Contudo, no âmbito desse projeto, optou-se pelos mais utilizados na literatura que são o **DRASTIC** (Aller *et al.*, 1985) e o **GOD** (Foster & Hirata, 1988).

A vulnerabilidade do aquífero Alter do Chão em Santarém pelo método **DRASTIC**, no período chuvoso, se apresentou como **baixa** em 20% (6/30) dos poços; **moderada** em 60% (18/30) dos poços e **alta** em 20% (6/30) dos poços, como pode ser observado na **figura 9.7a**. No período de estiagem (**figura 9.7b**) verificou-se a ocorrência de vulnerabilidade **baixa** em 23% (7/30) dos poços, **moderada** em 53% (16/30) dos casos e **alta** em 23% (7/30) dos casos.

Mediante avaliação dos parâmetros utilizados pelo método **GOD**, foi possível estimar o índice de vulnerabilidade natural do aquífero Alter do Chão na cidade de Santarém, o qual assumiu valores que variaram de 0,49 a 0,63, tanto no período chuvoso (**figura 9.8a**) como no período de estiagem (**figura 9.8b**), os quais correspondem respectivamente às classes de vulnerabilidade média e alta.

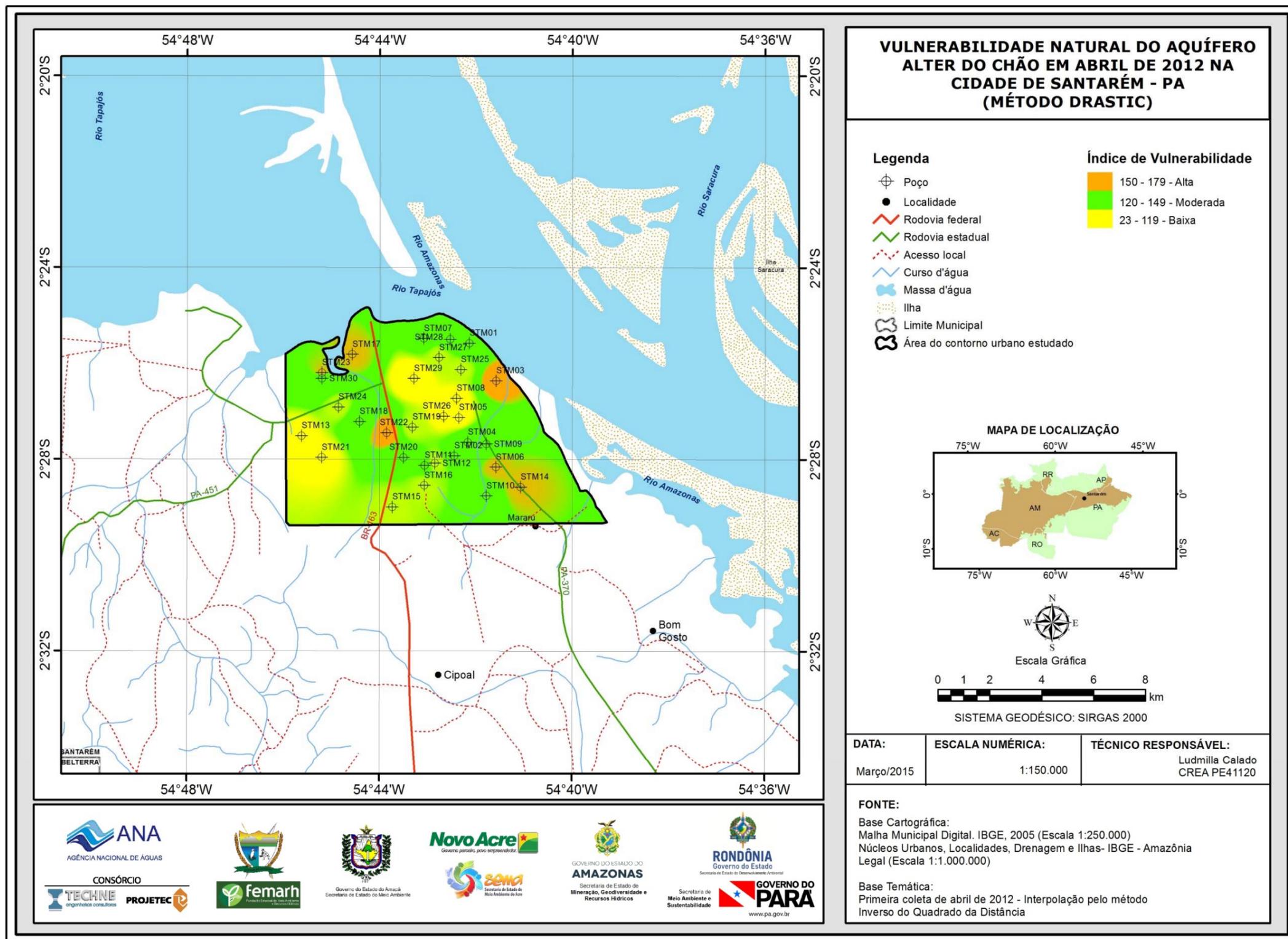


Figura 9.7a – Zoneamento da vulnerabilidade do aquífero Alter do Chão na zona urbana de Santarém na coleta de abril de 2012 – Método DRASTIC.

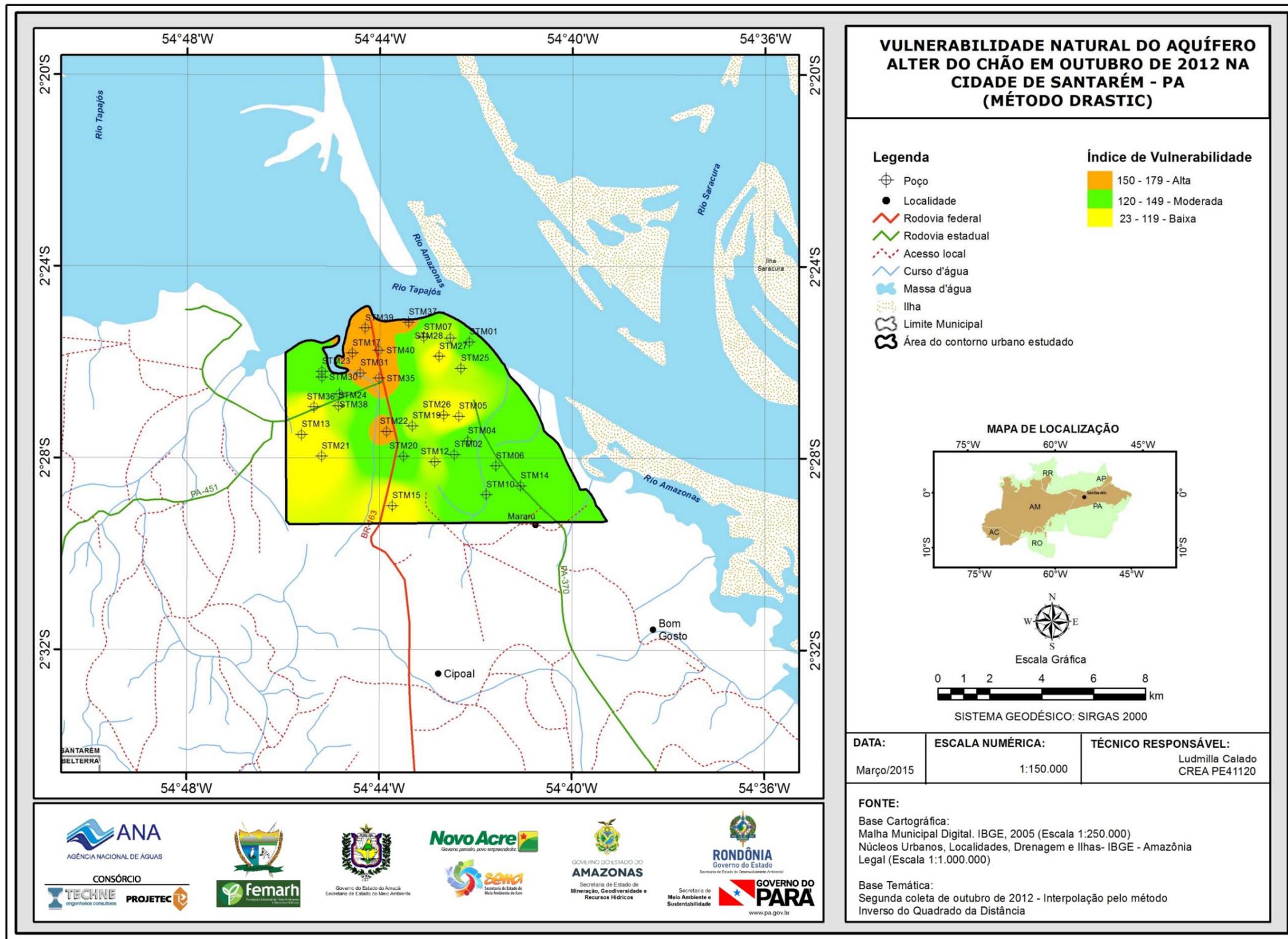


Figura 9.7b – Zoneamento da vulnerabilidade do aquífero Alter do Chão na zona urbana de Santarém coleta de outubro de 2012 – Método DRASTIC.

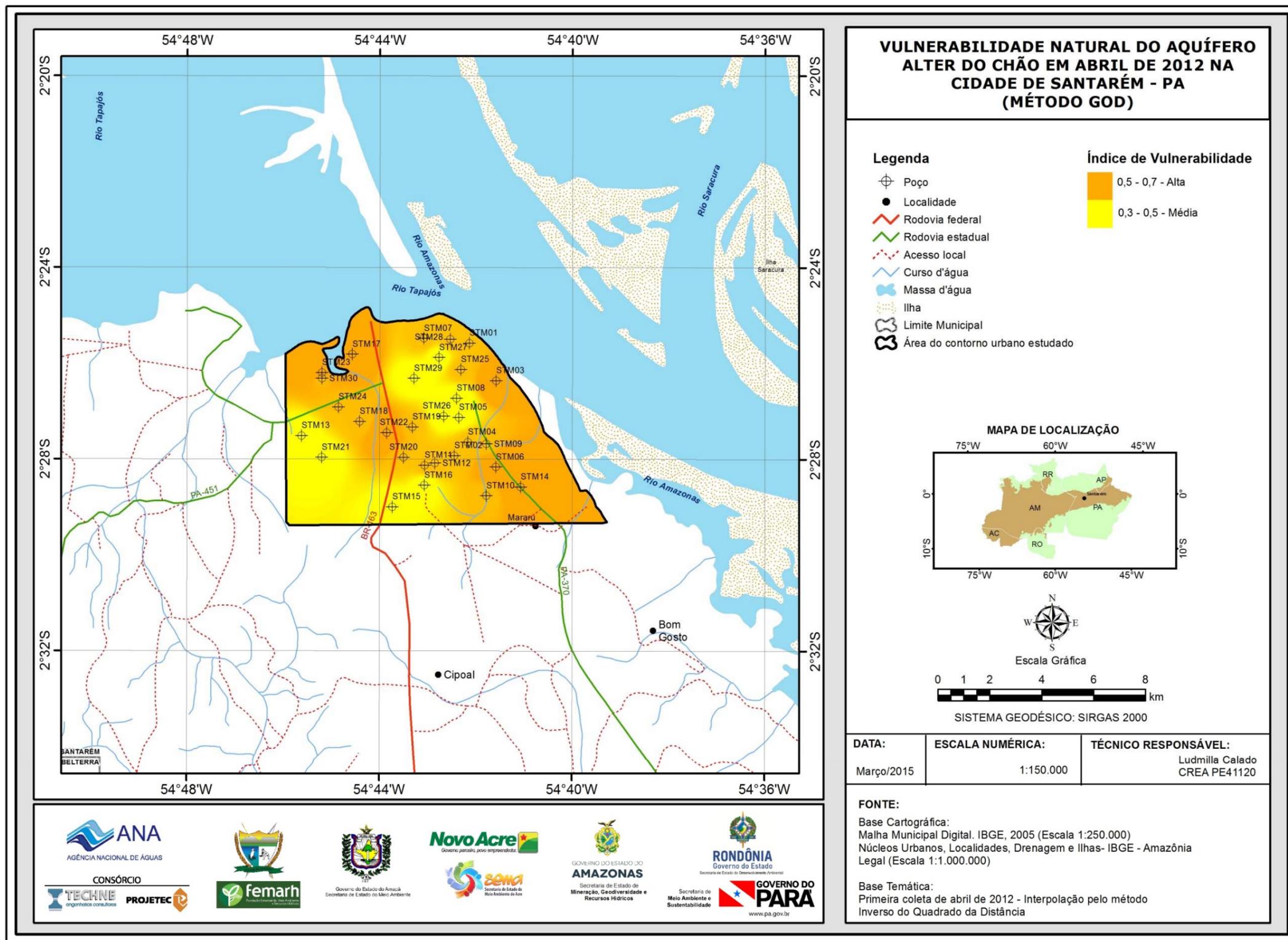


Figura 9.8a – Distribuição espacial da vulnerabilidade do Aquífero Alter do Chão no período chuvoso (abril de 2012) na cidade de Santarém – PA pelo método GOD.

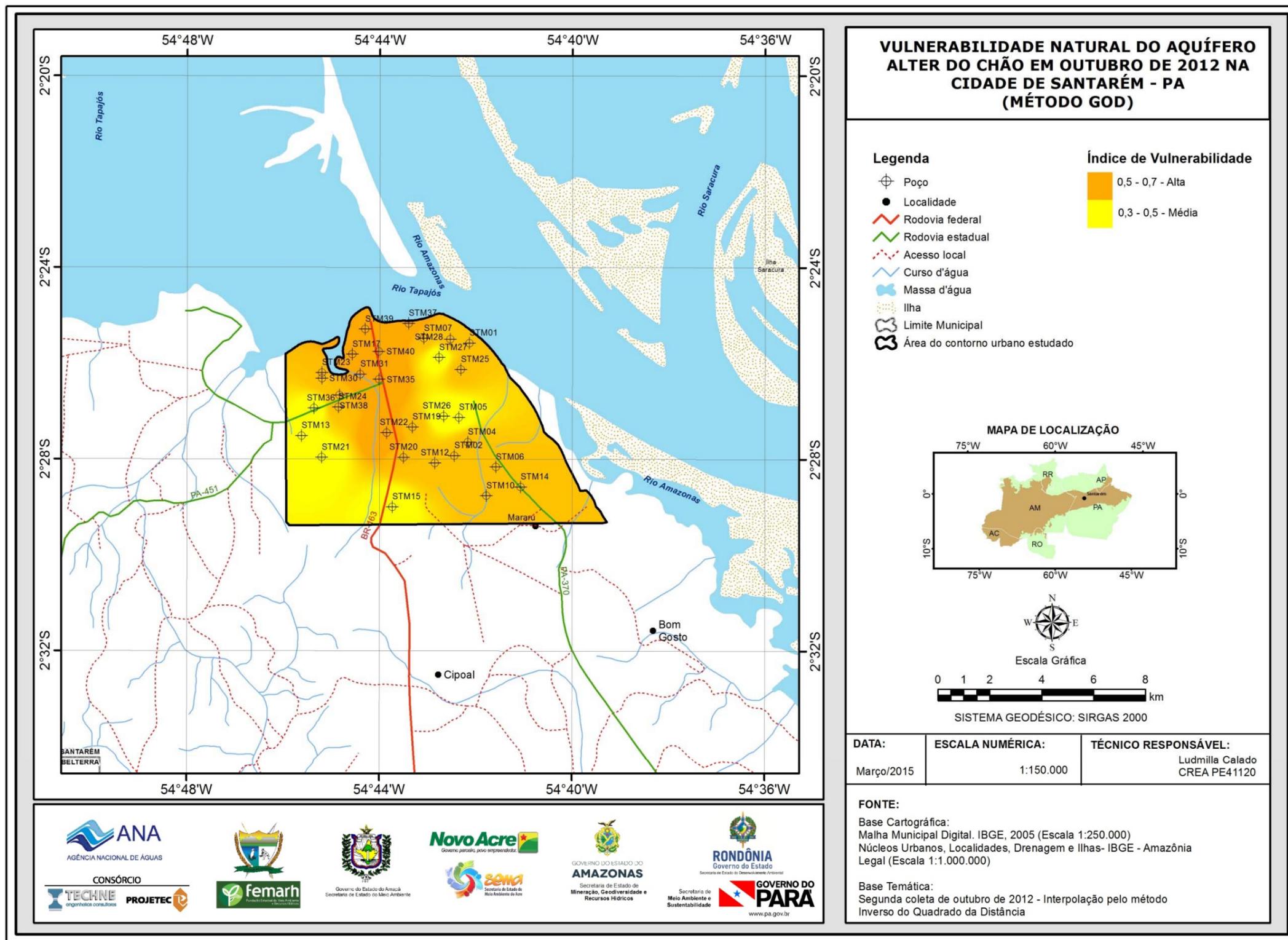


Figura 9.8b – Distribuição espacial da vulnerabilidade do Aquífero Alter do Chão no período seco (outubro de 2012) na cidade de Santarém – PA pelo método GOD.

10 – Cidade Piloto: Tabatinga - AM

10.1 - Introdução

Este estudo visou realizar a caracterização dos aspectos fisiográficos, geológicos, hidrogeológicos, hidrogeoquímicos e a vulnerabilidade natural do aquífero Aluvial na cidade piloto de Tabatinga, principalmente no que diz respeito à qualidade de suas águas.

A cidade de Tabatinga, localizada na Microrregião do Alto Solimões, está situada à margem esquerda do Rio Solimões, na tríplice fronteira Brasil-Colômbia-Peru e tem o seu marco zero que situa-se nas coordenadas 04°15'09" S e 69°56'17" W. Fica no extremo Oeste do estado do Amazonas e a sua distância de Manaus é de aproximadamente 1.600 km por via fluvial e 1.100 km por via aérea. O município de Tabatinga limita-se a Oeste com os países Peru e Colômbia; ao Sul, com o município de Benjamin Constant; a Leste com São Paulo de Olivença e ao Norte com Santo Antônio do Içá (SEPLAN, 2013).

A área da folha de 15 minutos da região de Tabatinga cobre uma superfície de 139,16 km², dos quais apenas 9,36 km² correspondem à área de estudo (**figura 10.1**) propriamente dita, na qual foi realizado o monitoramento dos poços nas duas campanhas de medições de níveis e de coleta de água.

O clima do município de Tabatinga de acordo com a classificação de Köppen é do tipo Af, tropical úmido, com temperatura média mensal entre 25,1°C e 25,9°C, com uma média anual de 25,5°C. Caracteriza-se por umidade elevada durante todo o ano, com média compreendida entre 80,5% no mês mais seco (setembro) a 83,4% no mês mais chuvoso do ano (maio).

A precipitação média mensal varia de 134,6 mm (junho) a 332,7 mm (janeiro), com uma média anual de 2.821,4 mm/ano.

De acordo com o modelo digital do terreno correspondente a folha de 15 minutos da região de Tabatinga (**figura 10.1**), o relevo é caracterizado pela ocorrência de duas unidades geomorfológicas: Planície Amazônica entre as cotas de 40 a 95 m; e Depressão do Solimões nas cotas compreendidas entre 95 e 110 m.

A área de estudo da cidade piloto de Tabatinga está localizada na margem esquerda do rio Solimões, onde o rio circula na direção Noroeste para Sudeste, na região da tríplice fronteira, Brasil-Colômbia-Peru. Na escala da folha de 15 minutos, a rede hidrográfica de tributários do Solimões, se restringe ao setor leste-nordeste, a qual é constituída de inúmeros igarapés, caracterizada por um padrão dendrítico de alta densidade de drenagem. O território de Tabatinga contém três sub-bacias hidrográficas: a do igarapé do Tacana, a do Igarapé do Engenho ou D. Pedro e a do igarapé de Santo Antônio.

De acordo com o estudo de Geodiversidade do estado do Amazonas (CPRM, 2010) há uma predominância na área de estudo de solos do tipo Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico (PVAa).

A área de estudo em Tabatinga está totalmente inserida no bioma da Floresta Amazônica, na fisionomia Floresta Ombrófila Aberta Aluvial com Palmeiras (5,84 km²) e na área urbanizada (3,5 km²), segundo classificação de Veloso *et al.* (1991).

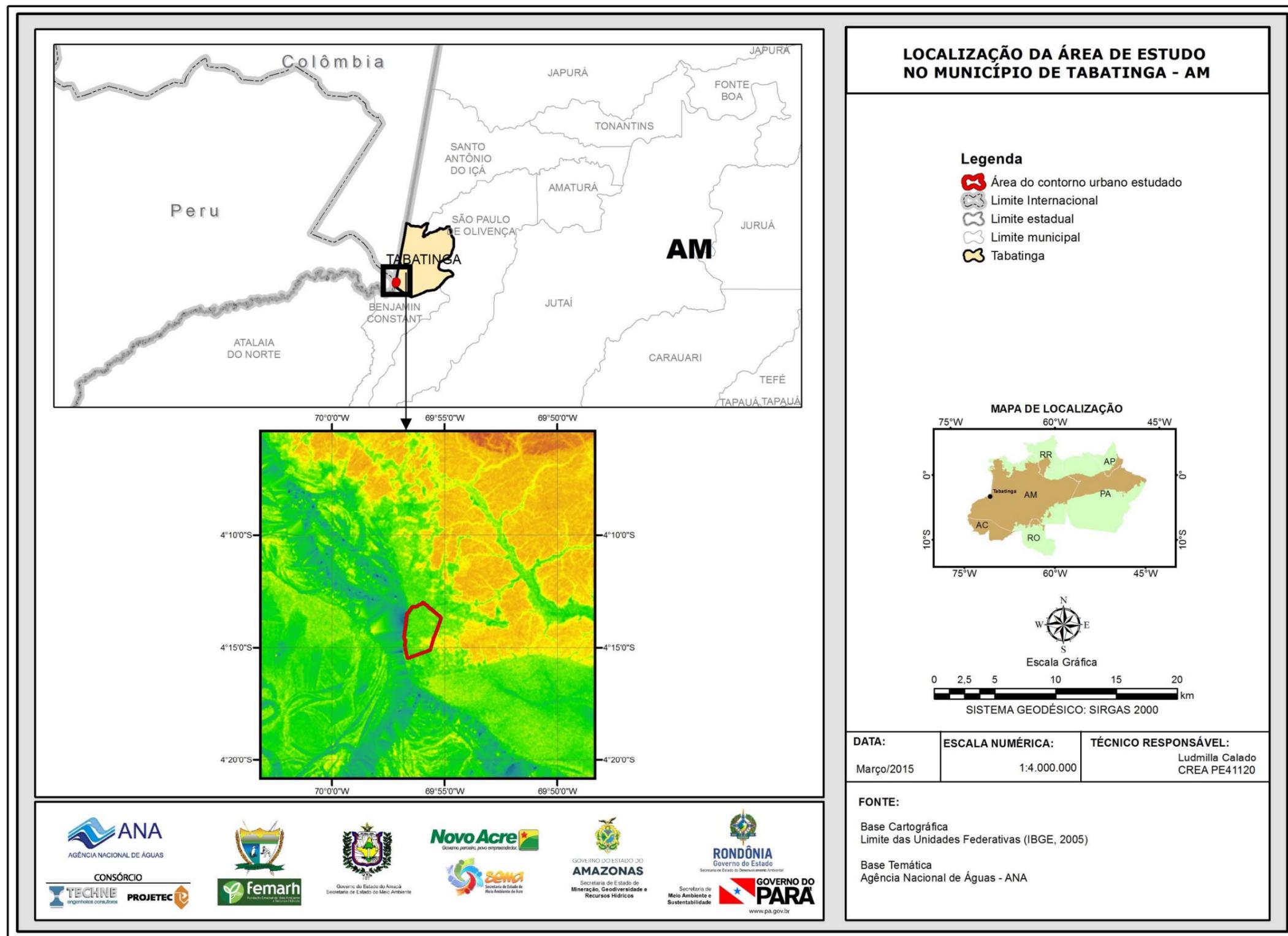


Figura 10.1 – Localização da área de estudo no município de Tabatinga – AM.

10.2 - Geologia

Regionalmente a tectônica da bacia do Solimões na região ao sul da cidade de Tabatinga, ao longo da margem direita dos rios Javari e Solimões, se desenvolve numa estrutura na qual são indicados os limites em subsuperfície, das sequências estratigráficas desde o Ordoviciano ao Mesozoico, o Alto de Caruari, a leste, o Alto de Iquitos, a oeste, bem como o Arco Jutaí, ao sul, e o Arco Envira, a oeste.

Na região de Tabatinga ocorrem as seguintes litoestratigrafias: Formação Benjamin Constant, Pacote Paleozoico Indiferenciado, Formação Javari, Pacote Repouso-Solimões e Formação Içá.

O aquífero Aluvial na área de estudo é litologicamente constituído de areia fina a média, com espessura média de 15 m. A sua condição hidráulica é do tipo livre, com o topo distribuído verticalmente no intervalo de 3 a 8 m e a base no intervalo de mais de 18 a 24 m, com espessura média saturada de 15 m em repouso sobre linhitos e argilitos pouco permeáveis.

Em escala local da folha de 15 minutos Tabatinga, há duas unidades litoestratigráficas que podem ser consideradas: Formação Solimões (E2N2s); Aluviões Holocênicos e Terraços Fluviais Pleistocênicos (Qat), conforme pode ser observado na **figura 10.2**.

Morfologicamente, o conjunto desses depósitos (Qat) se desenvolve, em escala local, sobre a Planície Amazônica, que constitui a superfície de inundação do rio Solimões pela margem esquerda, entre cotas de 70 a 95 m, numa faixa de terra compreendida entre o rio e o contato com a Formação Solimões, no domínio da Depressão homônima.

10.3 - Hidrogeologia e Hidrodinâmica

Do ponto de vista hidrogeológico, é possível caracterizar na região de Tabatinga 5 (cinco) unidades litoestratigráficas representadas pelos depósitos aluvionares e terraços aluviais, formações Içá, Repouso, Solimões e Javari, nas quais podem ser ou não encontradas unidades hidrogeológicas de fluxo (UHF).

Os depósitos aluvionares ocupam áreas expressivas ao longo das margens do rio Solimões e são constituídos, em Tabatinga, de camadas argilosas na parte superior com espessuras de 3 a 8 m, seguidas de areia fina a média e espessura variável de 12 a 17 m em repouso sobre linhito preto e argilito cinza azulado atribuídos à Formação Solimões. Essa camada arenosa constitui a UHF do pacote aluvionar, denominada nesse projeto de **Aquífero Aluvial**, no qual se incluem os terraços aluviais.

O **Aquífero Confinado Javari** tem espessura de 381 m em Benjamin Constant e de 500 m na fronteira com o Peru, apresentando-se, no topo, confinado pelos sedimentos pouco permeáveis do Aquitardo Repouso-Solimões e assentado, na base, sobre o embasamento cristalino. Esse aquífero é ainda desconhecido porque nenhum poço o alcançou na região.

Através do bloco 3D do pacote aluvial construído com base nos poços sobre a área de estudo (9,36 km²), estimou-se o volume em 1,85E08 m³, dos quais 72% correspondem ao volume da UHF, ou seja, da camada de areia (aquiífero

Aluvial) e 28% ao volume de argila, o que implica em uma espessura média total de 19,76 m, ou cerca de 20 m.

As **propriedades hidráulicas** do **aquífero Aluvial** em Tabatinga foram avaliadas através de 02 (dois) testes de bombeamento conduzidos no âmbito desse Projeto e ainda através de valores compilados disponíveis na literatura. Os testes de bombeamento foram efetuados nos poços TBT16 (S4165) e TBT17 (S4179), sem a utilização de poços de observação. Os poços usados possuem respectivamente profundidades de 22 e 18 m.

A escolha desses poços foi feita porque a equipe de campo contou com a boa vontade dos proprietários e ainda por estarem os poços devidamente equipados e em boas condições para teste. As medições de nível dinâmico foram executadas com uma sonda elétrica sonora e as medições de vazão através de método volumétrico.

Para a **interpretação dos testes de bombeamento** foram utilizados dois métodos, o semilogarítmico de Cooper & Jacob (1946), previsto para aquífero confinado, homogêneo e isotrópico, cujos resultados podem ser vistos na **tabela 10.1**; e o método de Neuman (1975) para aquífero livre, homogêneo e anisotrópico, cujos resultados podem ser observados na **tabela 10.2**.

Tabela 10.1 – Parâmetros hidráulicos avaliados pelo método semilogarítmico de Cooper & Jacob (1946) para o aquífero “confinado” aquífero Aluvial na cidade de Tabatinga – AM.

Código	UF	Local	UTM (E)	UTM (N)	Aquífero	T (m ² /dia)	K (m/dia)	S (adim)
TBT16	AM	Porto Fluvial de Tabatinga	395330	9351874	Aluvial	57,1	2,60	1,6E-03
TBT17	AM	Bairro Brilhante	395591	9351236	Aluvial	148,8	6,76	5,6E-03
Média						102,5	4,68	3,6E-03

T = transmissividade; K = Condutividade hidráulica; S = coeficiente de armazenamento.

Tabela 10.2 – Parâmetros hidráulicos avaliados pelo método de Neuman (1975) para o aquífero Aluvial na cidade de Tabatinga – AM.

Código	T (m ² /dia)	b (m)	K (m/dia)	β	r (m)	S	Sy	KD
TBT16	6,00	15	0,75	0,1	10	2,8E-05	0,05	0,225
TBT17	6,15	15	0,77	0,1	10	2,7E-05	0,20	0,225
Aquífero	6,1	15	0,76	0,1	10	2,75E-05	0,125	0,225

T= transmissividade do aquífero; b = espessura saturada do aquífero; K = condutividade hidráulica do aquífero; β = fator de drenagem retardada; r = distância simulada para estimativa do coeficiente de armazenamento (S) e da porosidade efetiva (Sy); KD = fator de anisotropia.

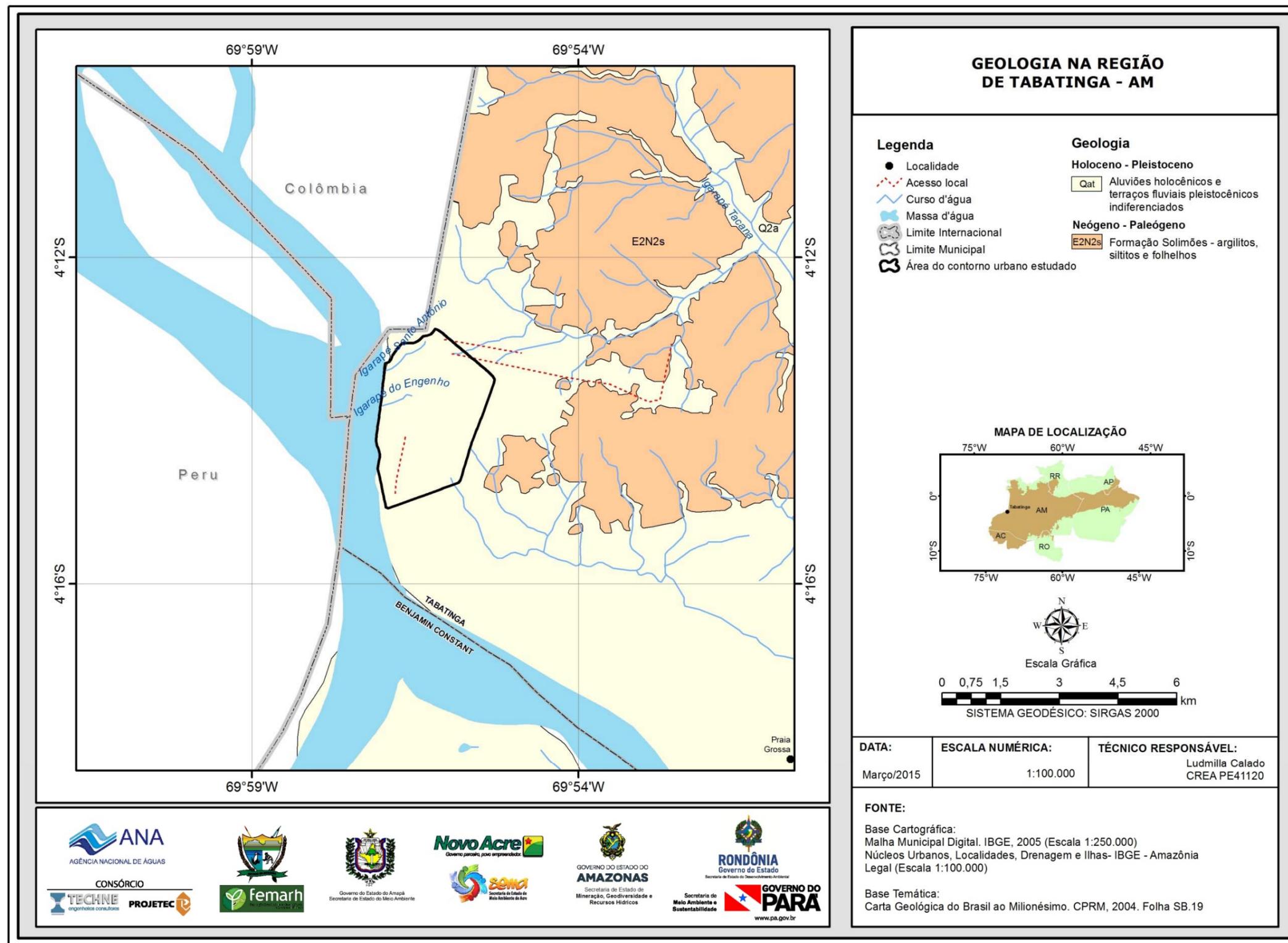


Figura 10.2 - Mapa geológico da folha de 15 minutos da região de Tabatinga – AM.

Os testes de bombeamento realizados em Tabatinga foram inicialmente interpretados pelo método de Cooper & Jacob (1946), supondo o aquífero **confinado**, como à primeira vista se poderia supor com base nos perfis litológicos dos poços estudados na região. Contudo, foi possível concluir a partir do gráfico semilogarítmico de rebaixamento *versus* tempo, que existe um efeito de drenagem gravitacional característico de aquífero livre. Isso revelou a necessidade de reavaliar os parâmetros hidráulicos pelo método de Neuman (1975), supondo o aquífero livre, homogêneo e anisotrópico.

Os valores dos parâmetros hidráulicos de transporte (T, K) avaliados nos dois poços testados são muito próximos e não apresentam diferenças significativas. O coeficiente de armazenamento também apresentou valores muito próximos em ambos os poços. Somente a porosidade efetiva apresentou uma diferença de 4 vezes entre os valores estimados nos dois testes (5% e 20%, respectivamente, com média de 12,5%). Todavia, tais valores estão dentro dos limites esperados para o tipo de aquífero.

A **profundidade do nível estático** do aquífero Aluvial na cidade de Tabatinga foi monitorada durante as campanhas de campo no período chuvoso (abril de 2012) e no período de estiagem (outubro de 2012) nos poços da rede de monitoramento implantada na área de estudo. Os resultados indicaram que no período chuvoso a profundidade das águas subterrâneas oscilou entre 1,69 e 6,90 m, enquanto que no período de estiagem a oscilação dos valores medidos foi de 3,65 a 12,21 m.

A distribuição espacial da profundidade do nível estático mostra que no período chuvoso (**figura 10.3a**) predominam valores nas faixas de até 4 m e de 4 a 6 m, enquanto que na estiagem (**figura 10.3b**) os níveis são mais profundos com uma presença significativa na área de estudo de valores superiores a 6 m.

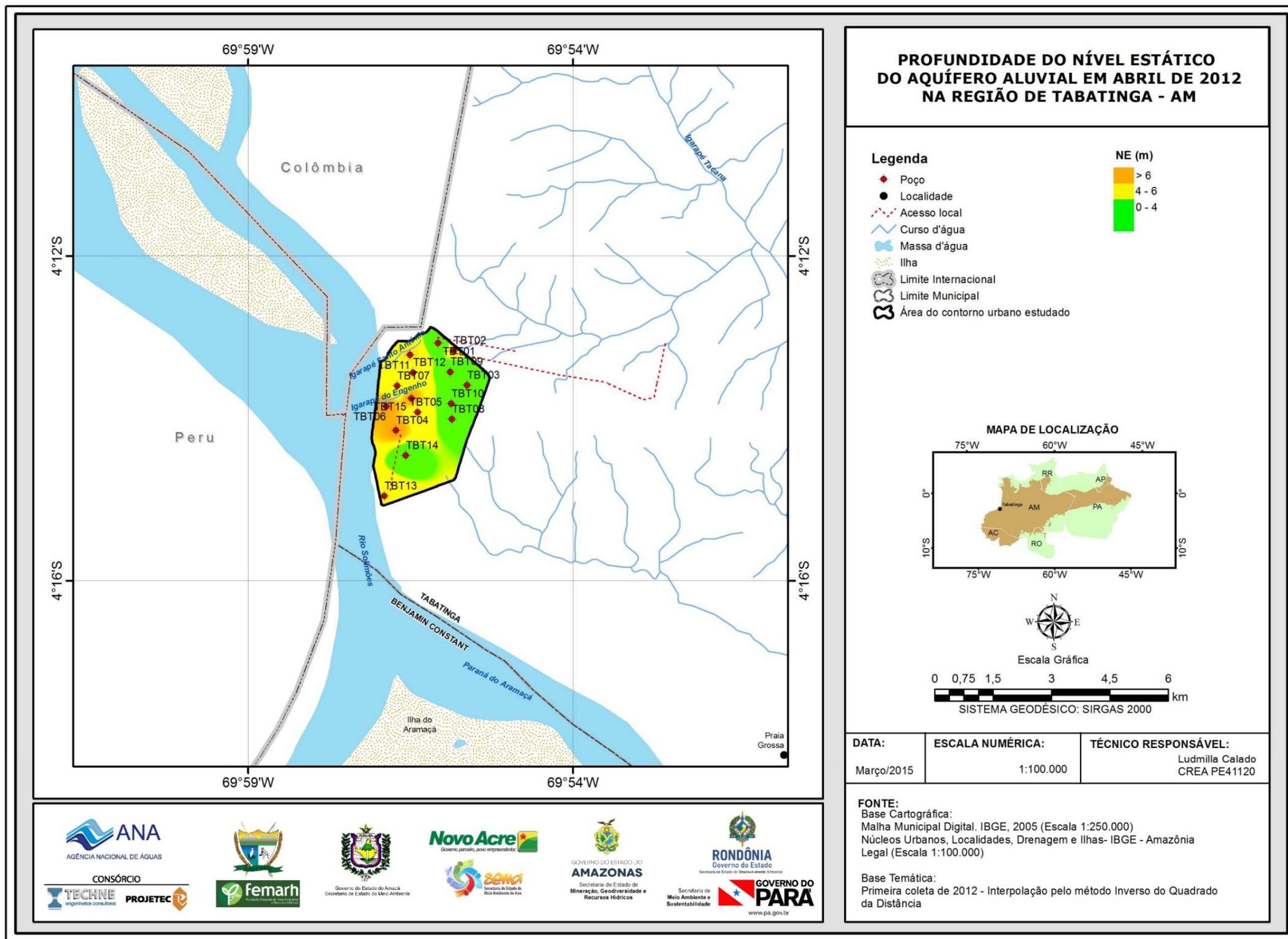


Figura 10.3a – Profundidade do nível estático das águas subterrâneas do aquífero Aluvial em abril de 2012 na cidade de Tabatinga - AM.

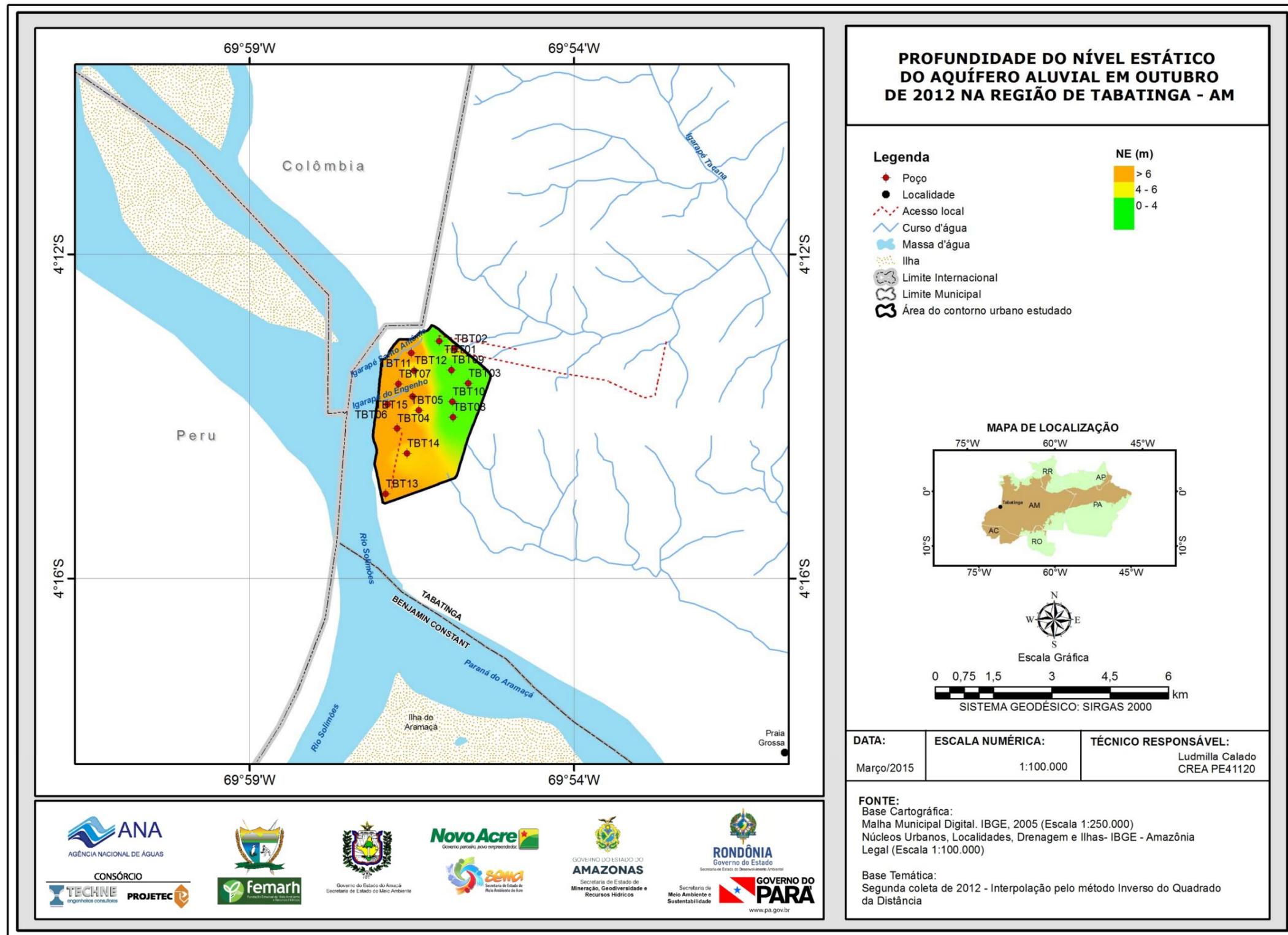


Figura 10.3b – Profundidade do nível estático das águas subterrâneas do aquífero Aluvial em outubro de 2012 na cidade de Tabatinga - AM.

A **potenciometria** do aquífero Aluvial em abril de 2012 é apresentada na **figura 10.4a** e em outubro de 2012 na **figura 10.4b**. A variação média sazonal entre abril de 2012 e outubro de 2012 foi de 1,61 m nas medições de níveis.

Nos mapas potenciométricos existem curvas fechadas, indicativas de fluxo para poços existentes em exploração, os quais, além do rio Solimões, se constituem exutórios do aquífero Aluvial e capturam significativa parte do escoamento natural.

Para estimativa da **Recarga Potencial Direta (RPD)**, **Reserva Potencial Explotável (RPE)** e **Reserva Permanente (RP)**, apresentadas na **tabela 10.3**, utilizou-se a área de estudo de 9,36 km², delimitada para a zona urbana de Tabatinga, onde se verificou uma variação sazonal média da superfície freática entre as duas campanhas de medições de nível de 1,61 m. Adotou-se para o aquífero Aluvial em Tabatinga, o coeficiente de sustentabilidade (CS) de 0,4; a espessura média saturada (b) de 15 m; e a porosidade efetiva (Sy) de 12,5%.

Tabela 10.3 - Reservas do aquífero Aluvial na cidade de Tabatinga – AM.

Reservas	Unidade	Valor
Reserva reguladora ou Recarga potencial direta (RPD)	m ³ /s	0,060
Reserva potencial explotável (RPE)	m ³ /s	0,024
Reserva permanente (RP)	m ³	17,6x10 ⁶

A pesquisa hidrogeológica desenvolvida na cidade de Tabatinga foi baseada nos dados dos 121 poços constantes no SIG ANA PHA 2013, dos quais 71 catalogados no SIAGAS – Sistema de Informações de Águas Subterrâneas do Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2010) e 50 novos poços cadastrados pela ANA, no âmbito desse Projeto.

A profundidade desses poços varia de 9 a 104 m, contudo a maioria dos poços cadastrados no município de Tabatinga, cerca de 93,3%, possui profundidades de até 35 m.

Os níveis estáticos não ultrapassam 15 m de profundidade em todos os poços cadastrados e catalogados.

A vazão oscila de 1 a 20 m³/h, porém ressalta-se que as vazões predominantes situam-se na faixa de 1,5 a 2,5 m³/h (**figura 10.5**).

Quanto ao uso da água subterrânea para os 121 poços em Tabatinga, verifica-se que 76,9% é destinada ao abastecimento, 18,2% ao uso múltiplo, 3,3% para indústria, 0,8% outros usos não citados anteriormente e os 0,8% restantes informaram que não utilizam a água do poço.

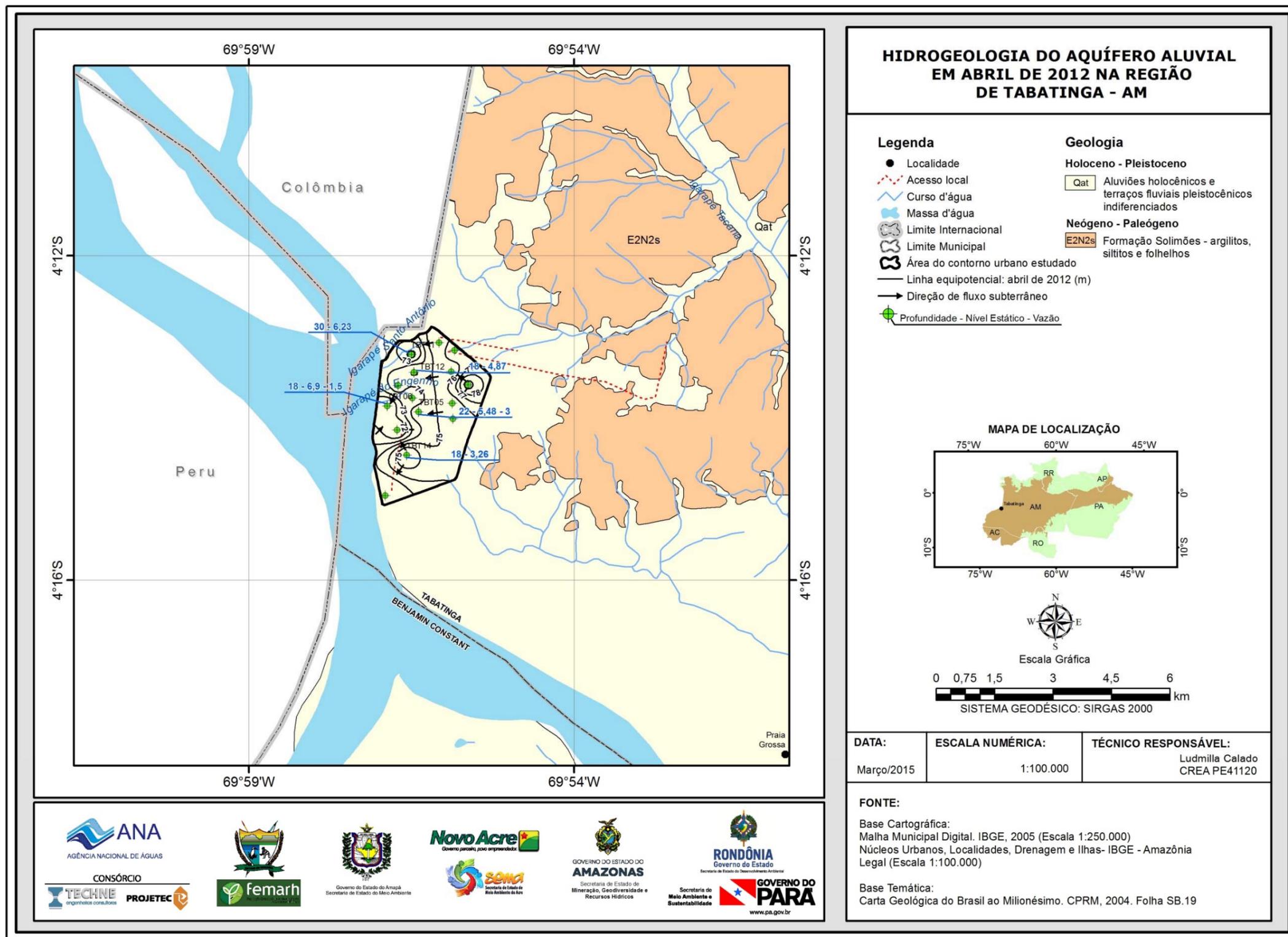


Figura 10.4a – Mapa hidrogeológico com a potenciometria das águas subterrâneas do aquífero Aluvial em abril de 2012 na cidade de Tabatinga - AM.

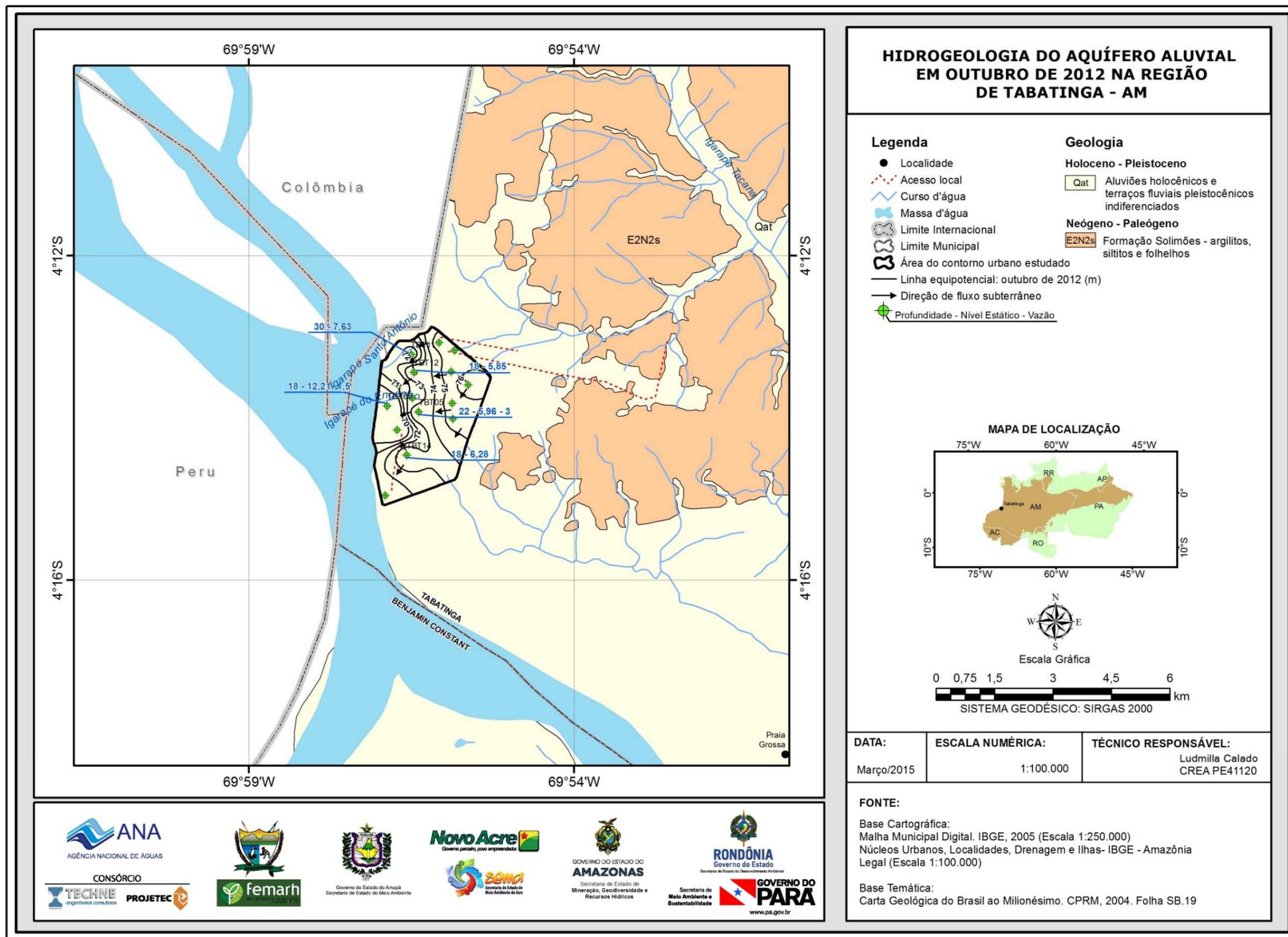


Figura 10.4b – Mapa hidrogeológico com a potenciometria das águas subterrâneas do aquífero Aluvial em outubro de 2012 na cidade de Tabatinga - AM.

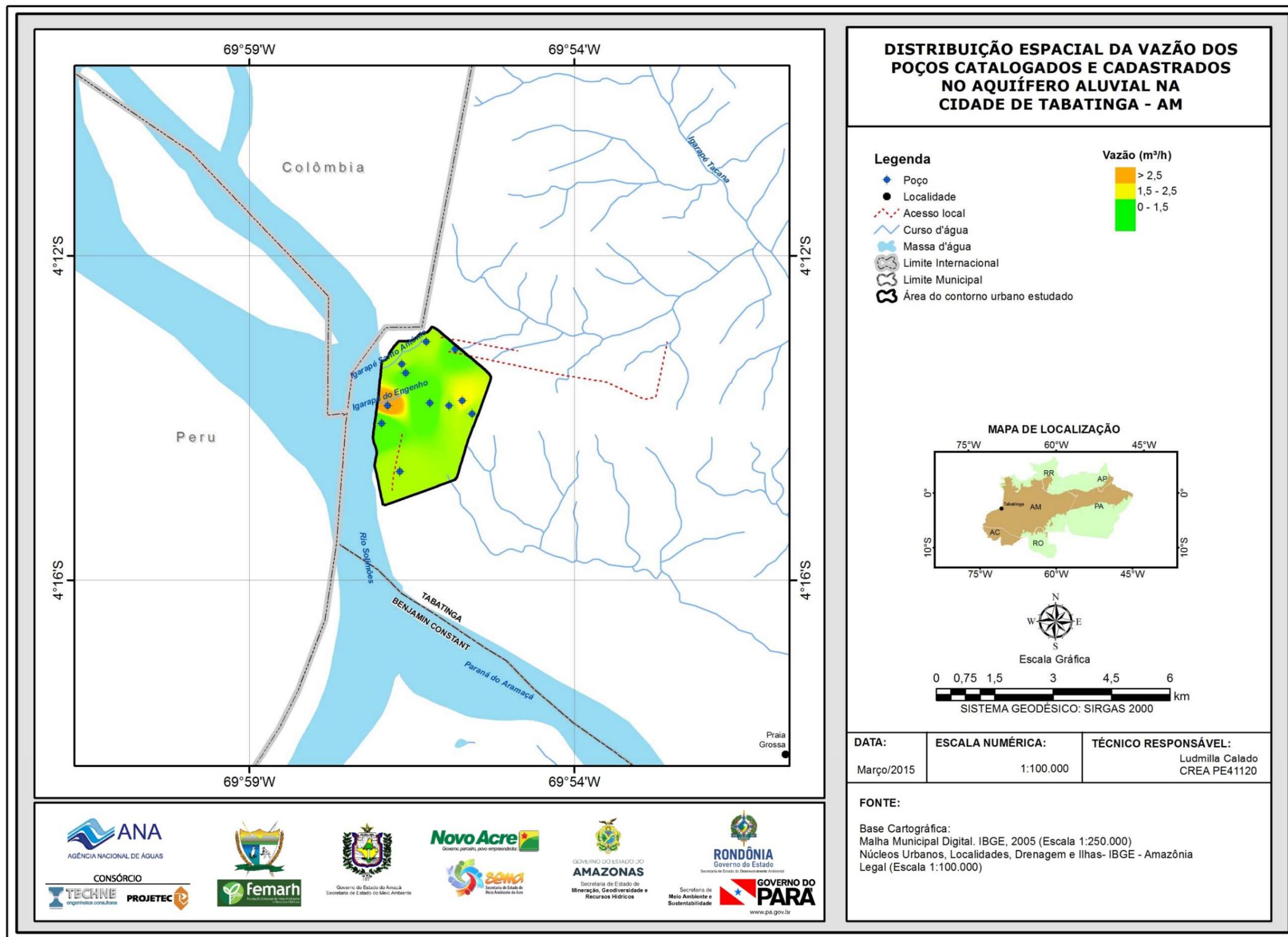


Figura 10.5 – Distribuição espacial da vazão dos poços cadastrados e catalogados na região de Tabatinga – AM.

10.4 - Hidrogeoquímica

Com o intuito de avaliar a qualidade das águas subterrâneas do aquífero Aluvial na cidade de Tabatinga, foram realizadas 15 (quinze) análises físico-químicas e bacteriológicas; 05 (cinco) análises de metais pesados, BTEX e fenóis; 03 (três) análises de isótopos ambientais estáveis - deutério e oxigênio-18; 06 (seis) análises do isótopo ambiental radioativo – trício; e 01 (uma) análise do isótopo ambiental - carbono 14.

As análises físico-químicas e bacteriológicas avaliaram os seguintes parâmetros: cor, turbidez, condutividade elétrica (CE), temperatura, sólidos totais dissolvidos (STD), pH *in situ*, potencial redox (Eh), sódio, potássio, cálcio, magnésio, dureza, cloreto, sulfato, bicarbonato, nitrito, nitrato, amônia, ferro, manganês, Coliformes Totais e Termotolerantes (*E. Coli*).

Foram realizadas duas campanhas de amostragem, com 6 (seis) meses de defasagem, sendo uma no período chuvoso (abril de 2012) e outra no período de estiagem (outubro de 2012). As análises de metais pesados, BTEX, fenóis e isótopos ambientais foram efetuadas apenas na segunda campanha de amostragem. A localização dos pontos de amostragem na área de estudo pode ser observada na **figura 10.6**.

O estudo hidrogeoquímico das águas do aquífero Aluvial na cidade de Tabatinga indicou que, de forma geral, os teores analisados se encontram em baixíssimas concentrações devido ao clima chuvoso da Floresta Tropical Amazônica e que os valores extremos encontrados, inclusive acima do VMP estabelecido como de potabilidade pela Portaria MS 2914/2011, assim como os usos preponderantes da água subterrânea definidos pela Resolução CONAMA 396/2008, se devem em grande parte a fatores antrópicos.

A análise estatística dos parâmetros físico-químicos coletados em duas campanhas de amostragem, realizadas em abril e outubro de 2012 revelou efeito de sazonalidade sobre alguns parâmetros, tais como, turbidez, Eh, cálcio, cloreto, sulfato, dureza, nitrato, ferro e manganês, cujos teores foram mais elevados no período chuvoso, ao passo que os parâmetros CE, temperatura, STD, pH *in situ*, sódio, magnésio, potássio e bicarbonato apresentaram teores mais elevados no período de estiagem.

De acordo com os resultados obtidos nas duas campanhas de amostragem, verificou-se que 93% e 100% dos poços, respectivamente no período chuvoso e de estiagem, apresentaram resultados de cor abaixo do limite de detecção de 5 uH. Na cidade de Tabatinga, em ambas as campanhas, nenhuma das amostras ultrapassou o VMP de potabilidade de cor da Portaria MS 2914/2011, indicando que as águas podem ser usadas para consumo humano.

Com relação à turbidez, respectivamente na primeira e segunda campanha, 20% e 33% dos poços apresentaram resultados abaixo do limite de detecção de 0,1 uT. Em ambas as campanhas nenhum dos poços apresentaram valores acima do VMP de potabilidade de turbidez da Portaria MS 2914/2011. Os valores de turbidez foram mais elevados no período chuvoso, pois na época de cheias, a água da chuva carrega consigo sedimentos que permanecem em suspensão na água tornando-a mais turva, a qual entra em contato com as águas subterrâneas por meio dos poços mal protegidos.

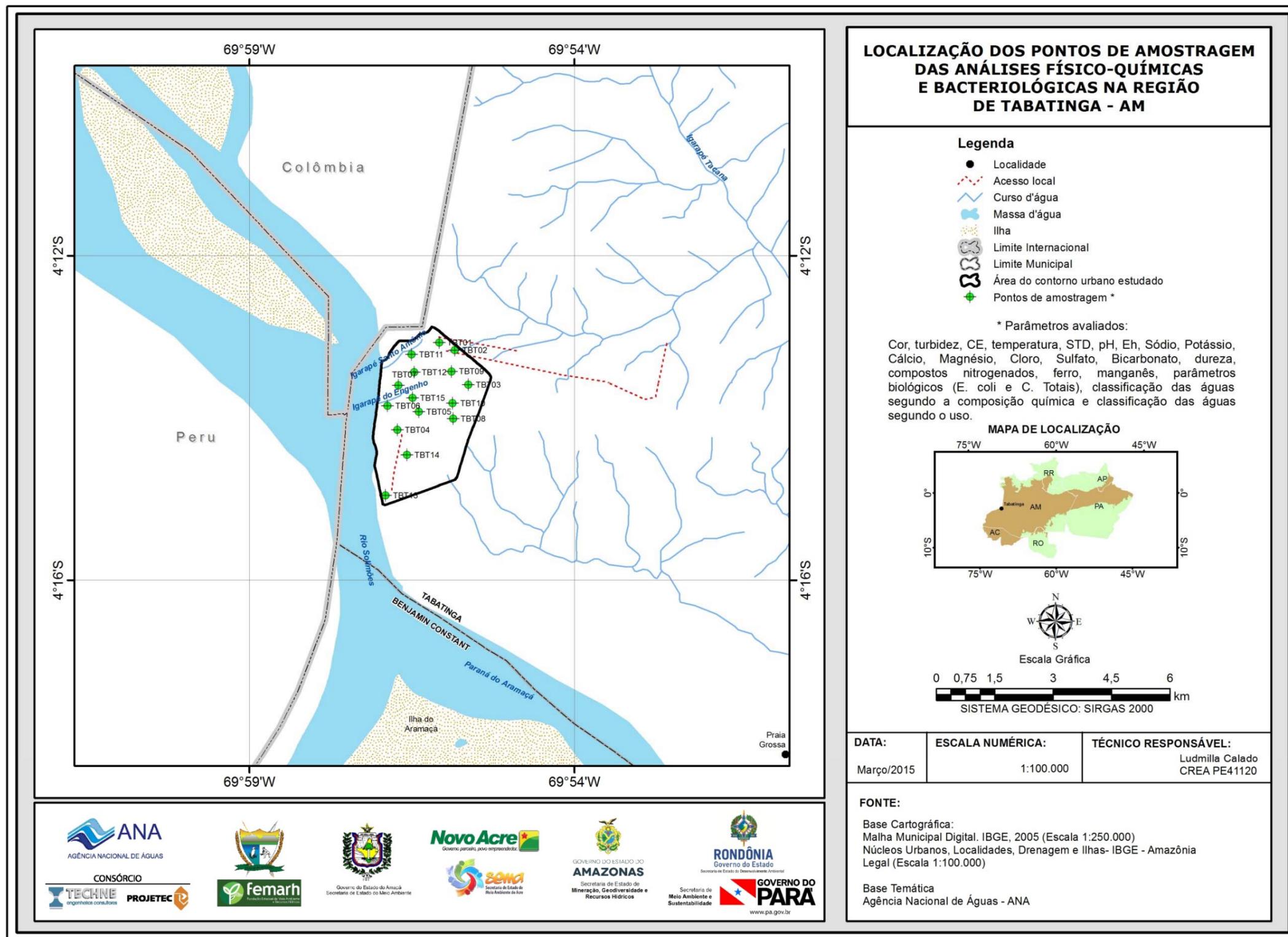


Figura 10.6 – Localização dos pontos de amostragem no aquífero Aluvial na cidade de Tabatinga - AM.

A condutividade elétrica (CE) das águas do aquífero Aluvial em Tabatinga variou de 20 a 172 $\mu\text{S}/\text{cm}$ no período chuvoso, com média de 65,33, e no período seco a variação entre o mínimo e o máximo foi de 19 a 167 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com média de 73,07 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Os valores de condutividade elétrica (CE) obtidos sugerem que as águas do aquífero Aluvial são potáveis, uma vez que se encontram no intervalo de 50 a 1.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

A temperatura das águas do aquífero Aluvial nesta cidade piloto varia no mínimo de 25,85°C ao máximo de 33,5 °C. Os valores máximos de temperatura encontrados nas duas campanhas possivelmente decorrem da influência da temperatura ambiente, uma vez que as águas do aquífero Aluvial são pouco profundas.

Os teores de Sólidos Totais Dissolvidos (STD) no aquífero Aluvial em Tabatinga variam no período chuvoso de 12 a 154 mg/L, com média de 55,13 mg/L; e no período de estiagem, o mínimo observado foi de 11 mg/L e o máximo de 120 mg/L, com média de 53,75 mg/L. Todos os valores encontrados estão abaixo do recomendado (1.000 mg/L) para consumo humano pela Portaria MS 2914/2011 e Resolução CONAMA 396/2008.

As águas do aquífero Aluvial nesta região são essencialmente ácidas, pois os valores de pH *in situ* encontrados no período chuvoso ficaram compreendidos entre 2,3 e 5,84, com média de 4,9; e no período seco, os valores oscilaram entre um mínimo de 3,9 e um máximo de 7,2, apresentando média de 5,0.

Os resultados de potencial redox (Eh) altos e positivos em 100% e 93% das amostras, respectivamente na primeira e segunda coleta, sugerem que os poços possuem águas em condições oxidantes, ou seja, baixa atividade de elétrons.

Os teores de sódio nas águas do aquífero Aluvial variaram entre 0,44 e 16,46 mg/L no período chuvoso, com média de 4,97 mg/L; e no período de estiagem, os teores ficaram compreendidos entre 0,38 e 14,58 mg/L, com média de 6,79 mg/L. Todos os valores de sódio encontrados estão abaixo do Valor Máximo Permitido (VMP) de 200 mg/L da Portaria MS 2914/2011 e Resolução CONAMA 396/2008, indicando que as águas podem ser usadas para consumo humano e recreação.

As concentrações de potássio no período chuvoso oscilaram de 0,19 a 3,42 mg/L, com média de 1,51 mg/L; enquanto que na estiagem, os teores variaram de 0,44 a 4,63 mg/L, com média de 1,95 mg/L.

Os resultados de cálcio no período chuvoso, variaram de 0,13 a 11 mg/L, com média de 1,52 mg/L; enquanto que no período seco oscilou entre 0,09 a 5,74 mg/L, com média de 1,15 mg/L.

Os teores de magnésio no período chuvoso variaram de 0,13 a 2,95 mg/L, com média de 0,98 mg/L; enquanto que na estiagem oscilaram entre 0,22 a 2,7 mg/L, com média de 1,01 mg/L.

De modo geral, os resultados de cálcio, potássio e magnésio encontrados em ambas as campanhas foram muito baixos. Isso se deve, sobretudo, ao clima chuvoso da região Amazônica associada às condições de intemperismo local, os quais favorecem a elevada frequência de renovação das águas superficiais

e subterrâneas, bem como, a quebra da estrutura química dos elementos presentes.

As concentrações de cloreto no período chuvoso variaram de 0,9 a 29,75 mg/L, com média de 7,93 mg/L; enquanto que na estiagem a oscilação foi de 0,49 a 25,8 mg/L, com média de 7,97 mg/L. Em ambas as coletas, todas as amostras apresentaram teores de cloreto inferiores ao VMP estabelecido pela Portaria MS 2914/11, assim como dentro dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 396/2008, indicando que as águas do aquífero Aluvial em Tabatinga podem ser usadas para consumo humano, irrigação e recreação.

Os teores de sulfato nas águas subterrâneas do aquífero Aluvial em Tabatinga, no período chuvoso variaram de 0,49 a 5,58 mg/L, apresentando média de 1,14 mg/L; e no período seco, os teores variaram de 0,49 a 5,66 mg/L, com média de 0,99 mg/L. Em ambas as campanhas, todos os poços apresentaram teores de sulfato inferiores aos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 396/2008 para consumo humano (250 mg/L), dessedentação animal (1.000 mg/L) e recreação (400 mg/L), bem como dentro dos padrões organolépticos de potabilidade definidos pela Portaria MS 2914/2011.

As análises de bicarbonato revelaram teores iguais a zero em 27% e 20% das amostras, respectivamente na primeira e segunda campanha. No período chuvoso, as concentrações de bicarbonato oscilaram entre 0 e 35 mg/L, com média de 11,73 mg/L; enquanto que no período de estiagem as concentrações ficaram compreendidas entre 0 e 25 mg/L, com média de 12,8 mg/L. Os teores de bicarbonato são mais elevados no período de estiagem devido a maior presença de gás carbônico no solo, gerado por meio da decomposição de matéria orgânica e respiração das raízes das plantas.

No tocante a dureza, as águas do aquífero Aluvial em Tabatinga no período chuvoso oscilaram entre 0,83 e 29,89 mg/L, com média de 7,8 mg/L; e no período de estiagem variou de 1,33 a 15,79 mg/L, com média de 7,03 mg/L. Tais resultados permitem classificar as águas como do tipo mole, pois 100% das amostras apresentaram valores inferiores a 50 mg/L. Nas duas campanhas nenhum dos poços amostrados ultrapassou o VMP recomendável pela Portaria MS 2914/2011, de 500 mg/L para consumo humano.

A presença de nitrato e de amônia nas águas do aquífero Aluvial nesta cidade piloto, em ambas as campanhas, se deve provavelmente a proximidade das fossas sanitárias com os poços, os quais em muitos casos não possuem a devida proteção sanitária, o que favorece a infiltração do esgoto *in natura* e conseqüentemente a contaminação das águas subterrâneas. Nenhuma das amostras analisadas ultrapassou o VMP de potabilidade de 10 mg/L de nitrato, contudo apenas o poço TBT12 apresentou o valor de 1,7 mg/L na segunda campanha, ultrapassando o VMP de 1,5 mg/L de amônia recomendável pela Portaria MS 2914/2011.

Os teores de nitrito nas águas do aquífero Aluvial em Tabatinga são desprezíveis, uma vez que obtiveram em ambas as campanhas de amostragem valores abaixo do limite de detecção. Todas as amostras respeitaram os padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria MS 2914/2011 e Resolução CONAMA 396/2008, indicando que suas águas podem ser usadas para o consumo humano, dessedentação de animais, irrigação e recreação.

Os teores de ferro nas águas do aquífero Aluvial na região no período chuvoso ficaram compreendidos entre 0,002 e 1,38 mg/L, com média de 0,34 mg/L; e no período seco, os valores oscilaram entre 0,0009 a 16,69 mg/L, com média de 1,35 mg/L. Dentre o total de amostras analisadas, 40% dos poços no período chuvoso e 20% no período de estiagem apresentaram valores que ultrapassaram o VMP de potabilidade recomendável pela Portaria MS 2914/2011, além de não serem indicadas para consumo humano e para recreação, segundo a Resolução CONAMA 396/2008. Além disso, 7% dos poços amostrados na segunda campanha apresentaram teores de ferro que ultrapassaram os limites recomendados para irrigação, de acordo com a Resolução CONAMA 396/2008.

As concentrações de manganês nas águas do aquífero Aluvial no período chuvoso em Tabatinga variam de 0,0059 a 0,378 mg/L, com média de 0,07 mg/L; e no período seco, os valores oscilam entre mínimo de 0,0075 mg/L e máximo de 0,64 mg/L, com média de 0,08 mg/L. Observou-se que 13% e 7% dos poços, respectivamente na primeira e segunda campanha, apresentaram teores de manganês acima do VMP de 0,1 mg/L estabelecido pela Portaria MS 2914/2011, bem como ultrapassaram os limites previstos na Resolução CONAMA 396/2008, no que se refere aos usos da água para consumo humano e recreação. Além disso, 33% dos poços amostrados em ambas as campanhas apresentaram teores de manganês que ultrapassaram os limites recomendados para dessedentação animal, de acordo com a Resolução CONAMA 396/2008. Com relação ao uso das águas do aquífero Aluvial para irrigação, verificou-se que o poço TBT12, nas duas coletas de amostragem, os valores ultrapassaram os limites de 0,2 mg/L definidos na Resolução CONAMA 396/2008.

As amostras analisadas dos metais pesados arsênio, cádmio, chumbo, cromo e mercúrio apresentaram teores abaixo do limite de detecção, ao passo que as de bário, cobre, níquel e zinco obtiveram teores abaixo do VMP definido pela Portaria MS 2914/2011 e Resolução CONAMA 396/2008.

No que se refere às análises de BTEX e Fenóis, todas as amostras obtiveram valores abaixo do limite de detecção, bem como respeitaram os limites de potabilidade definidos pela Portaria MS 2914/2011 e Resolução CONAMA 396/2008.

Os resultados dos isótopos ambientais revelaram que a recarga do aquífero Aluvial provém de águas meteóricas, de acordo com as análises de Oxigênio-18 e Deutério, ou seja, águas de chuva com 79% de perda de $\delta^{18}\text{O}$ por evaporação. Segundo as datações efetuadas com trício no aquífero Aluvial em Tabatinga há mistura de água submoderna com recarga recente.

Quanto às idades convencionais de radiocarbono, há presença de águas modernas (105,2 pMC) com menos de 200 anos BP, o que sugere águas rasas.

A avaliação dos parâmetros biológicos indicou a presença de Coliformes totais no período chuvoso em 27% dos casos e de 40% no período de estiagem. No que se refere à contaminação por *E. Coli*, a presença foi detectada em 13% dos casos apenas no período chuvoso. Esses resultados correspondem contaminação das águas subterrâneas por fossas sépticas devido à ausência de sistema de esgotamento sanitário na região e também pelo fato de que os

poços tubulares, em sua maioria, serem pouco profundos e construídos com técnicas inapropriadas, que deixam os espaços anelares sem a devida proteção sanitária. A ocorrência desses parâmetros biológicos é extremamente preocupante, pois pode ocasionar doenças de veiculação hídrica na população local, que utiliza dessas águas para os mais diversos usos, incluindo consumo humano.

No que se refere à classificação das águas subterrâneas de acordo com a composição química, é possível verificar que: segundo os diagramas de Piper, as águas do aquífero Aluvial são Cloretadas Sódicas; de acordo com os diagramas de Stiff, as águas são Cloretadas Sódicas e Bicarbonatadas Sódicas; e de boa potabilidade, conforme indicação dos diagramas de Schoeller-Berkaloff.

No que concerne à avaliação das águas para irrigação obtida por meio da Razão de Adsorção de Sódio (SAR), verifica-se que as águas do aquífero Aluvial em Tabatinga possuem risco de sódio baixo e salinidade que varia entre fraquíssima a fraca, indicando que as águas podem ser usadas para o cultivo de boa parte dos vegetais.

Conforme a metodologia de McKee & Wolf (1963), as águas do aquífero Aluvial na cidade podem ser utilizadas para a dessedentação animal sem restrições, haja vista que os teores de STD encontrados em ambas as campanhas foram baixos.

10.5 - Vulnerabilidade Natural do Aquífero Aluvial

A vulnerabilidade de um aquífero é a sensibilidade da qualidade da água subterrânea ante uma carga contaminante imposta, determinada pelas características intrínsecas do aquífero e do seu recobrimento. Por tal motivo é tão importante a sua avaliação, que pode ser usada por diferentes métodos. Contudo, no âmbito desse projeto, optou-se pelos mais utilizados na literatura que são o **DRASTIC** (Aller *et al.*, 1985) e o **GOD** (Foster & Hirata, 1988).

Os índices encontrados pelo método DRASTIC no período chuvoso (125 a 135) permitem classificar a vulnerabilidade do aquífero Aluvial em Tabatinga como **moderada**, e no período de estiagem (115 a 135) como **baixa a moderada**, como pode ser observado nas **figuras 10.7a e 10.7b**.

A vulnerabilidade natural pelo método GOD no aquífero Aluvial na cidade de Tabatinga pode ser visualizada nas **figuras 10.8a e 10.8b**, respectivamente para os períodos de chuva (abril de 2012) e de estiagem (outubro de 2012). De acordo com os resultados, tanto no período chuvoso como no de estiagem, verifica-se a ocorrência de índices de **vulnerabilidade média**, que variam de 0,4 a 0,45 na área de estudo.

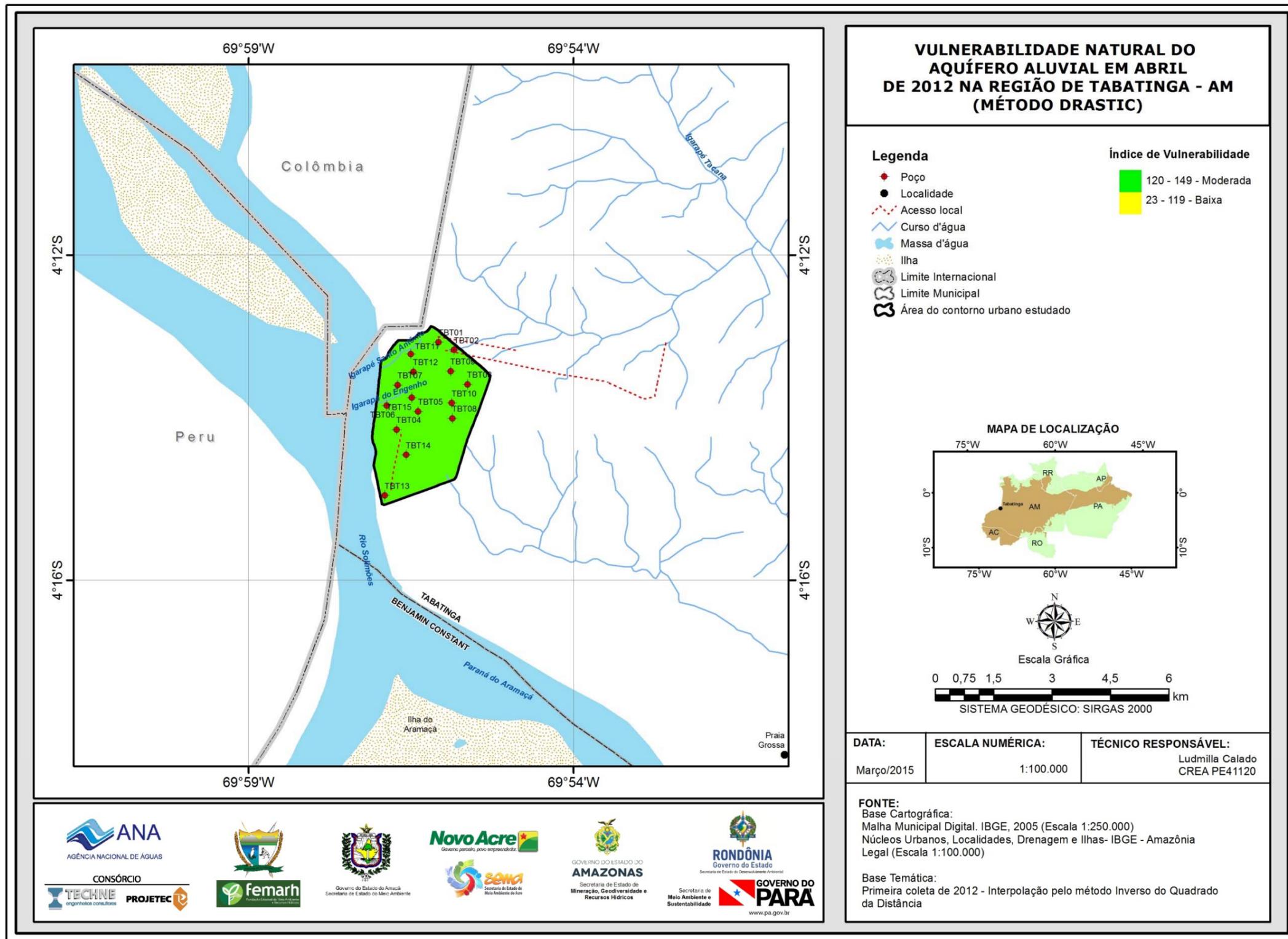


Figura 10.7a – Zoneamento da vulnerabilidade do aquífero Aluvial na zona urbana de Tabatinga na coleta de abril de 2012 – Método DRASTIC.

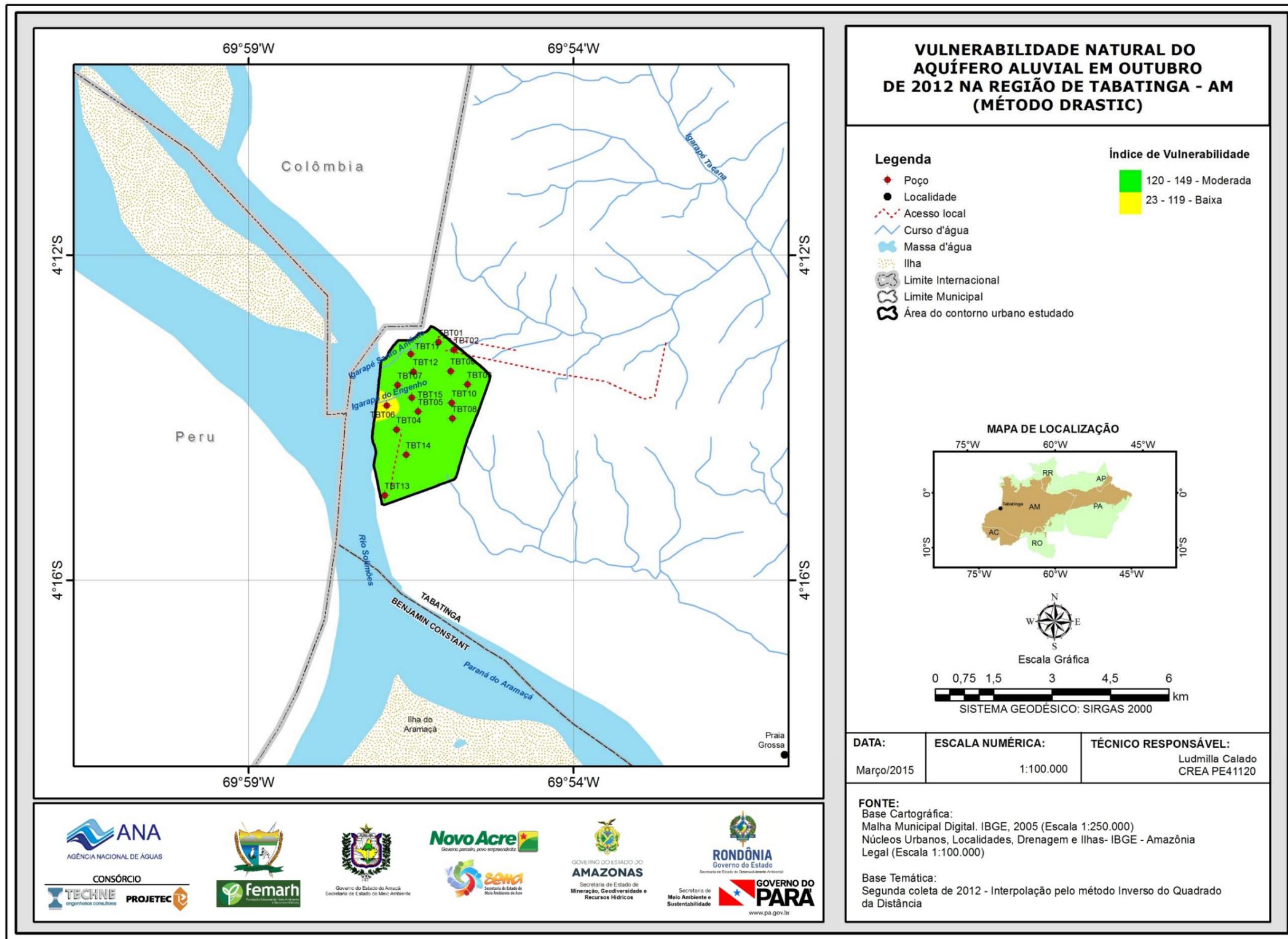


Figura 10.7b – Zoneamento da vulnerabilidade do aquífero Aluvial na zona urbana de Tabatinga coleta de outubro de 2012 – Método DRASTIC.

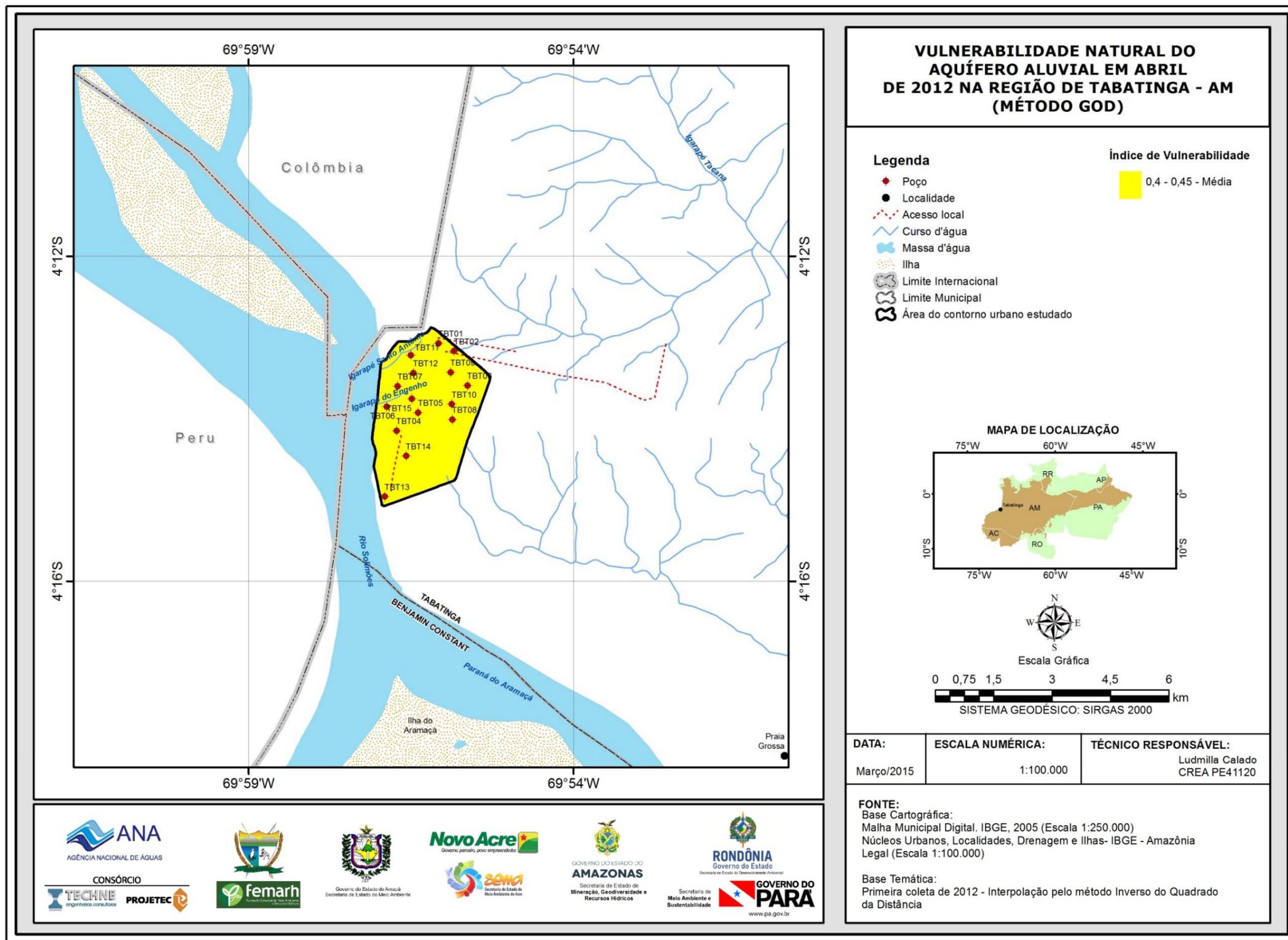


Figura 10.8a – Distribuição espacial da vulnerabilidade do Aquífero Aluvial no período chuvoso (abril de 2012) na cidade de Tabatinga – AM pelo método GOD.

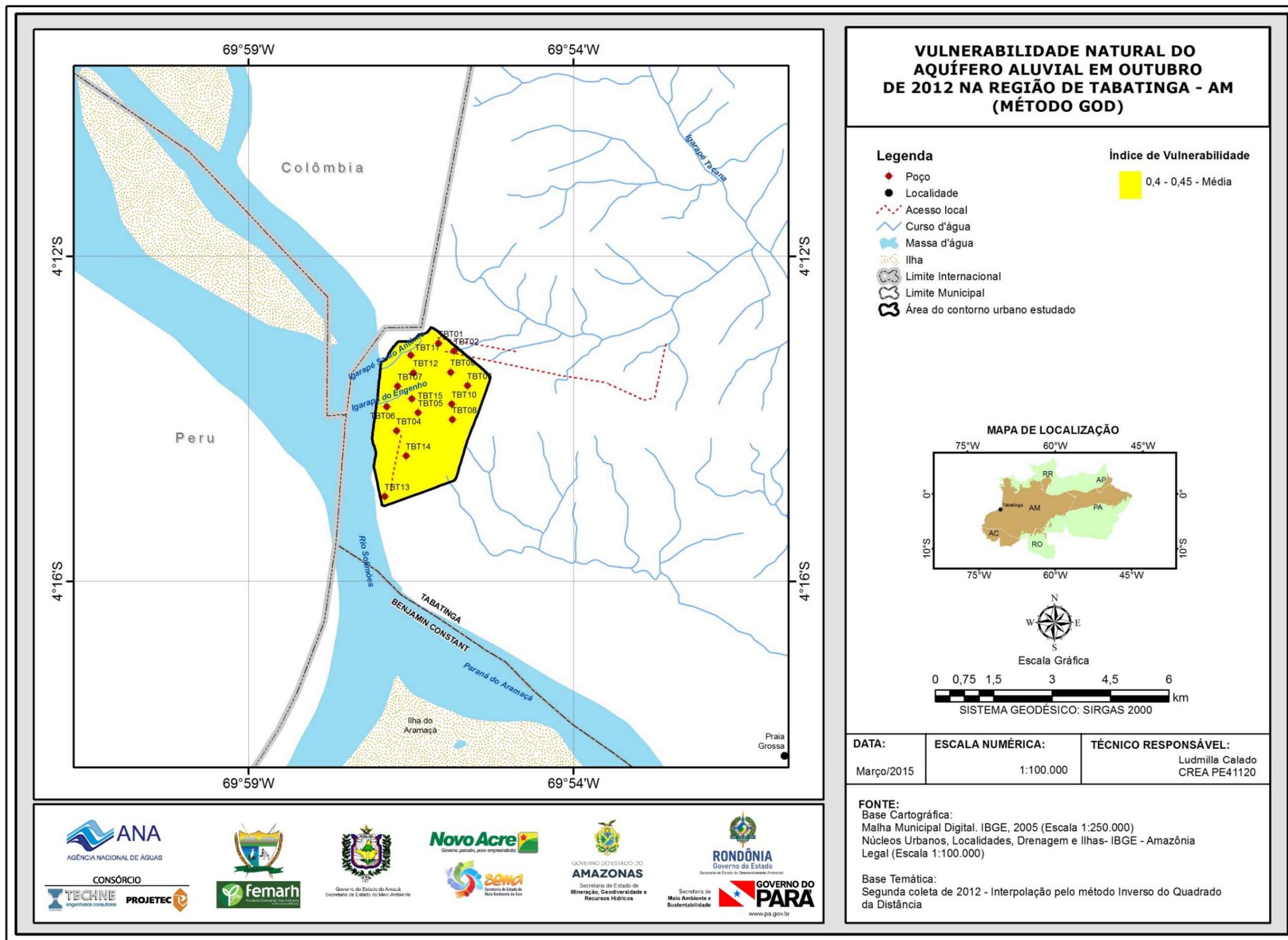


Figura 10.8b – Distribuição espacial da vulnerabilidade do Aquífero Aluvial no período seco (outubro de 2012) na cidade de Tabatinga – AM pelo método GOD.

11 – Referências Bibliográficas

ABREU, F. A. M.; CAVALCANTE, I. N.; MATTA, M. A. S. O sistema aquífero grande Amazônia – SAGA: um imenso potencial de água subterrânea no Brasil. In: III Congresso Internacional Meio Ambiente Subterrâneo, 2013, São Paulo - SP. **Anais**. São Paulo: ABAS, 2013.

ADAMY, A.; ROMANINI, S. J. (Org.). **Geologia da Região de Porto Velho - Abunã: Folhas Porto Velho (SC.20-V-B-V), Mutumparaná (SC.20-V-C-VI), Jaciparaná (SC.20-V-D-I) e Abunã (SC.20-V-C-V) - Estados de Rondônia e Amazonas**. Brasília: DNPM/CPRM, 1990. 273p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Avaliação dos Aquíferos das Bacias Sedimentares da Província Hidrogeológica Amazonas no Brasil (escala 1:1.000.000) e Cidades Pilotos (escala 1:50.000): Relatório Parcial 4**. Consórcio Projotec-Techne. Brasília: ANA, 2012. 370 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: Disponibilidade Hídrica**. Brasília: ANA, 2013. 65p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Panorama da Qualidade das Águas Subterrâneas no Brasil**. Brasília: ANA, 2005. 80 p.

AGUIAR, C. J. B.; MOURÃO, M. A. A. (Coord.). **Projeto Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas: relatório diagnóstico Aquífero Alter do Chão no Estado do Amazonas - Bacia Sedimentar do Amazonas**. Belo Horizonte: CPRM, 2012. Vol. 6. 30p.

ALLER, L.; BENNETT, T.; LEHR, J.H.; PETTY, R.J. Drastic: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. **United States Environmental Protection Agency (EPA)**, USA, 600/2-85/018, 1985.

BAHIA, V.; FENZL, N.; MORALES, G. P. Caracterização da qualidade das águas subterrâneas da bacia hidrográfica do Utinga/Belém (PA) - a partir de dados hidrogeoquímicos. In: XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2008, Natal - RN. **Anais**. Natal: ABAS, 2008. 20p.

BARROS, A. M.; ALVES, E. D. O.; ARAÚJO, J. F. V.; LIMA, M. I. C.; FERNANDES, C. A. C. **Geologia**. In: BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. Projeto RADAMBRASIL. Folha SB/SC.18 – Javari/Contamana - Levantamento de Recursos Naturais. Rio de Janeiro, 1977. p. 17-101.

BEZERRA, S. F.; JUSTINA, E. E. D.; SAMPAIO, S. F.; ARAUJO, M. S. Diagnóstico, avaliação e monitoramento das áreas de risco na bacia do Igarapé Grande - Porto Velho - RO. **Revista Geonorte**, Amazonas, vol. 1, n. 4, p. 599-611, 2012.

BITENCOURT, D. P.; QUADRO, M. F. L.; NURI, O. C. Análise de dois casos de ressaca no litoral da região Sul no verão de 2002. In: XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2002, Foz do Iguaçu - PR. **Anais**. Foz do Iguaçu: SBMET, 2002. p.3910-3917.

BOUMAN, Q. C. **Geology of the rio Uatumã, rio Abacate and surrounding areas**. Belém: PETROBRÁS; RENOR (Relatório Técnico Interno, 288A), 1959.

BRASIL. Ministério da Saúde - MS. **Portaria MS nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011**. Brasília, DF, Diário oficial da União nº 239, de 14 de dezembro de 2011, Seção 1, páginas 39-46.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente - MMA. **Resolução CONAMA nº 396, de 03 de abril de 2008**. Brasília, DF, Diário oficial da União nº 66, de 07 de abril de 2008, Seção 1, páginas 64-68.

CAMPOS, J. C. V. Avaliação Preliminar do Potencial Hidrogeológico da Cidade de Porto Velho - RO. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, X, 1998, São Paulo - SP. **Anais**. São Paulo: ABAS, 1998.

CAMPOS, J. C. V.; MORAIS, P. R. C. Morfologia dos Aquíferos da área urbana de Porto Velho - RO. In: 13º Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 1999, Belo Horizonte – MG. **Anais**. Belo Horizonte: ABRH, 1999. 13p.

CAMPOS, J. C. V.; SILVA FILHO, E. P.; OLIVEIRA, I. R. Contaminação do Aquífero Jaciparaná na cidade de Porto Velho (RO). In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, XIII, 2004, Cuiabá - MT. **Anais**. Cuiabá: ABAS, 2004.

CAPUTO, M. V. Origem do Alinhamento Estrutural do Juruá - Bacia do Solimões. In: 2º Simpósio de Geologia da Amazônia, 1985a, Belém - PA. **Anais**. Belém: SBG, vol.1, p.242-258, 1985.

CAPUTO, M. V. **Relatório preliminar de exploração da bacia do Acre**. Belém: PETROBRÁS; RENOR (Relatório Técnico Interno, 665 A), 1973. 24p.

CAPUTO, M. V. **Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology and paleogeography of northern basins of Brazil**. 1984. 586p. Tese (Doutorado) - University of California Santa Barbara.

CAPUTO, M. V. The Solimões Megashear - Intraplate Tectonics in Northwestern Brazil. **Geology**, vol. 19, p.246-249, 1991.

CAPUTO, M. V.; RODRIGUES, R.; VASCONCELOS, D. N. H. Nomenclatura Estratigráfica da Bacia do Amazonas: Histórico e Atualização. In: XXVI Congresso Brasileiro de Geologia, 1972, Belém – PA. **Anais**. Belém: SBG, 1972. Vol. 3, p.35-46.

CAVALCANTE, L. M. **Zoneamento geológico e geomorfológico entre Feijó e Mâncio Lima – Acre**. Rio Branco: EMBRAPA - Acre, 2005. 24p.

COOPER, H. H. Jr.; JACOB, C. E. A generalized graphycal method for evaluating formation constants and summarizing well field story. **EOS Transactions American Geophysical Union**, vol. 27, p.526-534, 1946.

CORTEZ, C. M. B.; TAGLIARINI, E. M.; TANCREDI, A. C. F. N. S. Utilização de águas minerais dos aquíferos do grupo Barreiras na região de Belém (PA). In: 1st Joint World Congress on Groundwater, 2000, Fortaleza - CE. **Anais**. Fortaleza: ABAS, 2000. 11p.

COSTA, J. B. S.; HASUI, Y.; BEMERGUY, R. I.; SOARES JUNIOR, A. V.; VILLEGAS, J. M. Tectonic and Paleogeography of the Marajó Region, Nothern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, vol. 74, p.519-531, 2002.

CUNHA, P. R. C. Bacias sedimentares Brasileiras - Bacia do Acre. **Fundação Paleontológica Phoenix**, ano 8, vol. 6, nº 86, 2006.

CUNHA, P. R. C.; MELO, J. H. G.; SILVA, O. B. Bacia do Amazonas. **Boletim de Geociências da PETROBRAS**, vol. 15, nº 2, p.227-251, 2007.

DINO, R.; SILVA O. B.; ABRAHÃO D. Palynostratigraphic characterization of the Cretaceous strata from the Alter do Chão Formation, Amazonas Basin. In: 31^o International Geological Congress, 2000, Rio de Janeiro – RJ. **Anais**. Rio de Janeiro: SBG, vol.31, p.557-565, 2000.

DINO, R.; SILVA, O. B.; ABRAHÃO, D. Caracterização palinológica e estratigráfica de estratos cretáceos da Formação Alter do Chão, Bacia do Amazonas. In: UNESP, **Boletim do 5^o do Simpósio sobre o Cretáceo do Brasil**, p.557-565, 1999.

DOHERTY, J. **PEST – Model-independent parameter estimation**. User manual 5th Edition. Watermark Numerical Computing. 2004.

DOS ANJOS, L. H. C.; SILVA, L. M.; WADT, P. G. S.; LUMBRERAS, J. F.; PEREIRA, M. G. **Guia de campo da IX Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos**. Brasília: EMBRAPA, 2013. 204p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, Amazônia Oriental. **Zoneamento ecológico-econômico da Zona Oeste do Estado do Pará**. Belém - PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2010. 386p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI, 2006. 306p.

FERREIRA, A. N. P.; LIMA, C. F.; CARDOSO, F. B. F.; OLIVEIRA JUNIOR, H. J.; KETTELHUT, J. T. S. **Panorama da gestão de aquíferos transfronteiriços – enfoque nas regiões centro-oeste e norte do Brasil**. VIII Congresso Latino americano de Hidrologia Subterrânea e Expo Água, 2006.

FERREIRA, A.; OLIVEIRA, M. **Unidade panorama: uma sedimentação fossilífera pós mioceno no rio Acre - AC**. CPRM: 2008. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/media/evento_1344.pdf>. Acesso em: 30 maio 2013.

FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R. **Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data**. Lima: Pan American center for sanitary engineering and environmental sciences (CEPIS), 1988. 88 p.

FRANÇA, H. P. M.; MANOEL Filho, J.; DUARTE, R. X.; ANDRÉ, H. O. **Estudos Hidrogeológicos da Cidade de Manaus**. Relatório Final, vol.3, Shaft Consultoria Ltda. / Águas do Amazonas S.A, Manaus, 2005.

GALVÃO, P. H. F. **Caracterização hidrogeológica dos aquíferos da Formação Solimões na base operacional geólogo Pedro de Moura, Província Petrolífera de Urucu/AM**. 2011. 148f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Recife, 2011.

GOVERNO DO ESTADO DO AMAZONAS. **Anuário estatístico do Amazonas: 2012**. Manaus: SEPLAN, 2013. 607p.

GREGÓRIO, A. M. S.; MENDES, A. C. Batimetria e sedimentologia da Baía de Guajará, Belém, Estado do Pará, Brasil. **Amazônia: Ciência & Desenvolvimento**, vol. 5, nº 9, p.53-72, 2009.

HANTUSH, M. S.; JACOB, C. E. Non-steady radial flow in an infinite leaky aquifer. **EOS Transactions American Geophysical Union**, vol. 36, nº 1, p.95-100, 1955.

HARBAUGH, A. W.; BANTA, E. R.; HILL, M. C.; MCDONALD, M. C. **MODFLOW - 2000: The USGS modular groundwater model: user guide to modularization concepts and the groundwater flow process**. USGS Open-File. Rep.00-99. 2000.

HOORN, C. Marine incursions and the influence of Andean tectonics on Miocene depositional history of northwestern Amazonia: results of a palynostratigraphic study. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, vol.105, p.267-309, 1993.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Anuário Estatístico do Brasil - 2011**. Rio de Janeiro: IBGE, 2012. 474p. Vol. 71.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Recursos naturais e meio ambiente: uma visão do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 1997. 208p.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT. **Estudo hidrogeológico para a definição da possibilidade de captação de água subterrânea na usina de alumínio da ALBRÁS em Barcarena/PA - Relatório nº 21**. São Paulo: IPT, 1984. 381p.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET. **Normais Climatológicas do Brasil: 1961-1990**. Brasília: INMET, 2009. 465p.

LEPRUN, J. C.; SANTOS, R. D.; CERRI, C. C. Composição das Águas de Percolação de Solos no Estado de Rondônia. **Geochimica Brasiliensis**, vol.3, nº 1, p.23-31, 1989.

LIMA, M. I. C.; BEZERRA, P. E. I.; ARAÚJO, C. C. G. Sistematização da Geologia do Estado do Amapá. In: 3º Simpósio de Geologia da Amazônia, 1991, Belém – PA. **Anais**. Belém: SBG, 1991, p.332-335.

LIMA, M. L. A.; CHAVES, C. A. P.; MELO JÚNIOR, H. R.; SIMÃO, F. B. Aplicação de métodos geoestatísticos para mapeamento de área de risco em saúde pública no município de Porto Velho - RO. **Vita et Sanitas**, vol.2, nº 2, p.130-149, 2008b.

LIMA, M. L. A.; MELO JÚNIOR, H. R.; CHAVES, C. A. P.; SIMÃO, F. B. Krigagem indicativa aplicada à pesquisa de nitrato nas águas subterrâneas da área urbana de Porto Velho – RO. In: XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2008, Natal - RN. **Anais**. Natal: ABAS, 2008.

LINSLEY, R. K.; KOELER, M. A.; PAULHUS, J. L. H. **Hydrograph analysis**. In: Hydrology for Engineers. New York: McGraw-Hill, 1958.

MAIA, M. A. M.; MARMOS, J. L. (Org.). **Geodiversidade do Estado do Amazonas: programa geologia do Brasil - levantamento da geodiversidade**. Manaus: CPRM, 2010. 275p.

MAIA, R. G.; GODOY, H. K.; IAMAGUTTI, H. S.; MOURA, P. A.; COSTA, F. S. F.; HOLANDA, M. A.; COSTA, J. A. **Projeto Carvão no Alto Solimões: Relatório Final**. CPRM: Amazonas, 1977, 137 p.

MATTA, M. A. S. **Fundamentos hidrogeológicos para a gestão integrada dos recursos hídricos da região de Belém/Ananindeua, Pará/Brasil**. 2002. 292 f. Tese (Doutorado em Geologia) - Universidade Federal do Pará - UFPA, Belém, 2002.

MCDONALD, M. G; HARBAUGH, A. W. **A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model**. USGS: Open file report, p.83-875, 1984.

MCKEE, J. E.; WOLF, H. W. Water Quality Criteria. **State Water Quality Control Board**, Sacramento, California, Pub. 3-A, 1963.

MELO JR, H. R.; MARMOS, J. L. **Avaliação Hidrogeológica do Município de Rio Branco - Acre: Relatório Final**. Porto Velho: Serviço Geológico do Brasil (CPRM) - Diretoria de Hidrologia e Gestão Territorial (DHT), 2006.

MELO JR, H. R.; ROSA FILHO, S. F.; KUNZLER, J. C. S. (Coord.). **Modelo de Gestão do Aquífero Rio Branco**. Porto Velho: Serviço Geológico do Brasil (CPRM), 2010. 118p.

MOLINIER, M.; GUYOY, J. L.; OLIVEIRA, E.; GUIMARÃES, W.; CHAVES, A. Hidrologia da Bacia do Rio Amazonas. **Ciência e Tecnologia**, p.31-36, 1995.

MOREIRA, E. **Belém e sua expressão geográfica**. Belém: Imprensa universitária, 1966. 212p.

NEUMAN, S. P. **Analysis of pumping test data from anisotropic unconfined aquifers considering delayed gravity response**. USA: Water Resources Research, vol. 11, nº 1, p.329-342, 1975.

OLIVEIRA W. **Relatório Final de Pesquisa - Fontes: Caimbé, Topazza e Água Clara**. Macapá: 2006. 52 p.

OLIVEIRA, J. R.; CONCEIÇÃO, A. L.; TANCREDI, A. F. N. S. Estudo das potencialidades hídricas subterrâneas da Região Metropolitana de Belém. In: X Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 1998, São Paulo - SP. **Anais**. São Paulo: ABAS, 1998. 8p.

OLIVEIRA, J. R.; MACIEL, R.; CENTENO JUNIOR, F.; PONTES, A.; BEZERRA, J. C. Poços tubulares profundos para aumentar o fornecimento de água potável do sistema de abastecimento da COSANPA no loteamento CDP. In: XVIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2014, São Paulo - SP. **Anais**. São Paulo: ABAS, 2014. 18p.

OLIVEIRA, J. R.; PASTANA, J. M. N. **Potencialidade hidrogeológica da vila de Alter-do-Chão, com proposta técnica para perfuração de poço tubular profundo**. Santarém: ABAS, 1999.

OLIVEIRA, J. R.; PASTANA, J. M. N.; NAVEGANTE, P. S. C.; SCHALKEN, C. G. P. S. Caracterização hidrogeológica da cidade de Santarém e das vilas de Mojuí dos Campos e Alter-do-Chão com proposta técnica para a perfuração de poços tubulares profundos. In: I Joint World Congress on Groundwater, 2000, Fortaleza - CE. **Anais**. Fortaleza: ABAS, 2000.

OLIVEIRA, M. J.; SOUTO, F. A. F.; ROSÁRIO, J. M. L.; SACASA, R. J. V.; MOURA, H. P. Vulnerabilidade natural e sazonalidade do aquífero livre no loteamento Marabaixo III, Macapá - AP. In: XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2004, São Paulo - SP. **Anais**. São Paulo: ABAS, 2004. 14p.

OLIVEIRA, M.; FERREIRA, A. Unidade Panorama: uma sedimentação fossilífera pós Mioceno no rio Acre - AC. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 2008, Curitiba - PR. **Anais**. Curitiba: SBG, 2008.

PEREIRA, L. A. C.; CAJAZEIRAS, C. C. A. Caracterização dos Principais Aquíferos da Região Sudoeste da Amazônia Ocidental. In: XVII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2012, Bonito - MS. **Anais**. Bonito: ABAS, 2012.

PESSOA, M. D.; MENTE, A.; LEAL, O. Províncias hidrogeológicas do Brasil. In: I Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 1980, Recife - PE. **Anais**. Recife: ABAS, 1980. p.461-474.

PICANÇO, F. E. L.; LOPES, E. C. S.; SOUZA, E. L. Fatores responsáveis pela ocorrência de ferro em águas subterrâneas da Região Metropolitana de Belém/PA. In: XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2002, São Paulo - SP. **Anais**. São Paulo: ABAS, 2002. 17p.

PREFEITURA MUNICIPAL DE BELÉM - PMB. **Dossiê de Candidatura - Belém/Pará/Brasil: Cidade Coordenadora e Sede do Secretariado Técnico do Grupo de Trabalho Gestão Participativa dos Rios Urbanos de Cidades da América Latina e Caribe**. Belém: SEGEP/PMB, 1999. 82 p.

RAMOS, J. 2004. **Poluição e contaminação da orla de Belém - PA**. In: UHLY, S.; SOUZA, E. L. (Eds). A questão da água na grande Belém. Belém: Casa de Estudos Germânicos - UFPA. p. 121-148.

RIBEIRO, K. T. S. **Água e saúde humana em Belém**. Belém: Cejup, 2004. 280p.

RIZZOTTO, G. J.; QUADROS, M. L. E. S.; BAHIA, R. B. C.; DALL'IGNA, L. G.; CORDEIRO, A. V. Folha SC.20-Porto Velho. In: SCHOBENHAUS, C.; GONÇALVES, J. H.; SANTOS, J. O. S.; ABRAM, M. B.; LEÃO NETO, R.; MATOS, G. M. M.; VIDOTTI, R. M.; RAMOS, M. A. B.; JESUS, J. D. A. (Eds.). **Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo: Sistema de Informações Geográficas**. Programa Geologia do Brasil. CPRM: Brasília, 2004. CD-ROM.

ROSÁRIO, F. F. **O sistema aquífero cretáceo multicamada Tikuna: subunidade do sistema aquífero amazonas**. 2011. 224f. Tese (Doutorado em Geologia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2011.

SANTOS, M. L. S.; HOLANDA, P.; PEREIRA, I.; RODRIGUES, S.; PEREIRA, J. A. R.; MESQUITA, K. Influência das Condições da Maré na Qualidade de Água do Rio Guamá e Baía do Guajará. **Boletim Técnico Científico do CEPNOR - Tropical Journal of Fisheries and Aquatic Sciences**, vol. 14, nº 1, p.17-25, 2014.

SANTOS, V. F.; COSTA, W. J. P.; SILVA, M. S.; SILVEIRA, O. F. M.; TORRES, A. M.; SILVA, A. Q.; MARTINS, M. H. A. **Projeto: Zoneamento Ecológico-Econômico do Setor Costeiro Estuarino do Estado do Amapá - ZEEC-AP. Tema I - Meio Natural: Capítulo 2 – Geologia**. Amapá: IEPA, 2004.

SARGES, R. R.; NOGUEIRA, A. C. R.; FROTA, C. A.; SILVA, C. L. Depósitos argilosos Cenozóicos do estado do Amazonas: utilização como agregados de argilas calcinadas para pavimentações na região Amazônica. **Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities research medium**, nº1, p.33-49, 2010.

SCHALLER, H.; VASCONCELOS, D. N.; CASTRO, J. C. Estratigrafia preliminar da Bacia Sedimentar da Foz do Amazonas. In: 25º Congresso Brasileiro de Geologia, 1971, São Paulo – SP. **Anais**. São Paulo: SBG, vol. 3, p.189-202, 1971.

SCOMAZZON, A. K. **Estudo de conodontes em carbonatos marinhos do grupo Tapajós, pensilvaniano inferior a médio da bacia do Amazonas com aplicação de isótopos de Sr e Nd neste intervalo**. 2004. 294f. Tese (Doutorado em Geociências) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre - RS, 2004.

Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Naturais do Estado do Acre – SEMA-AC. **Programa Estadual de Zoneamento Ecológico-Econômico do Estado do Acre: Fase II - Documento Síntese – Escala 1:250.000**. Rio Branco: SEMA-AC, 2006. 354p.

SECRETARIA MUNICIPAL DE MEIO AMBIENTE - SEMMA. **Informações municipais de Santarém**. Santarém: SEMMA-CIAM, 2013. 44p.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM. **Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo: Folha SC-19, Rio Branco**. 2004.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM. **Carta hidrogeológica do Brasil ao milionésimo - Folha Manaus (AS.20)**. 2010. Disponível em: <www.cprm.gov.br>. Acesso em 10 de março de 2014.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM. **Geodiversidade do estado do Amazonas: programa geologia do Brasil - levantamento da geodiversidade**. MAIA, M. A. M.; MARMOS, J. L. (Org.). CPRM: Manaus, 2010. 275p.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM. **Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: texto, mapas & SIG**. BIZZI, L. A.; SCHOBENHAUS, C.; VIDOTTI, R. M.; GONÇALVES, J. H. (Org.). CPRM: Brasília, 2003. 692p.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM. **Mapa geológico do Estado do Amazonas: 1:1.000.000**. Manaus: CPRM, 2005. CD-ROM.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM. **Mapa geológico do Estado do Pará: 1:1.000.000**. Belém: CPRM, 2006. CD-ROM.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM. **Mapa Geológico e de Recursos Minerais do Estado de Rondônia: 1:1.000.000**. Porto Velho: CPRM, 2007.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM. **Mapa hidrogeológico do Brasil na escala 1:1.000.000, no formato SIG.** Disponível em: < <http://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/Mapas-e-Publicacoes/Mapa-Hidrogeologico-do-Brasil-ao-Milionesimo-756.html> >. Acesso em 10 de março de 2014.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM. **Mapa Hidrogeológico do Estado de Rondônia: 1:1.000.000 - Programa Recursos Hídricos: texto explicativo.** Porto Velho: CPRM, 1998. 32p.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM. **Projeto estudos hidrogeológicos da Região Metropolitana de Belém e adjacências.** Belém: CPRM, 2002. 93p.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM. **Sistema de Informações de Águas Subterrâneas - SIAGAS.** Brasília: CPRM, 2010. Disponível em: < <http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/index.php> >. Acesso em: 30 out 2010.

SILVA FILHO, E. P.; Campos, A. J. C. V. **Diagnóstico da Captação de Água Subterrânea em Porto Velho.** UFRO, Ano I, nº 29, Porto Velho. 2001.

SIOLI, H. **Amazônia: fundamentos da ecologia da maior região de florestas tropicais.** Petrópolis - RJ: Editora Vozes, 1985. 72p.

STRUCKMEIER, W. F.; MARGAT, J. Hydrogeological Maps. A guide and a standard legend. **International Association Hydrogeology**, vol.17. 1995.

TAKIYAMA, L. R.; SILVA, Q. Q. **Diagnóstico das ressacas do estado do Amapá: Bacias do Igarapé da Fortaleza e Rio Curiaú.** Macapá: CPAQ/IEPA e DGEO/SEMA - AP, 2003.

TANCREDI, A. C. F. N. S. **Recursos Hídricos Subterrâneos de Santarém: fundamentos para uso e proteção.** 1996. 146f. Tese (Doutorado em Geociências) - Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém - PA, 1996.

TORRES, A. M.; OLIVEIRA, D. M. Caracterização Sedimentológica e Variáveis Ambientais das Áreas Úmidas Costeiras das Bacias Hidrográficas do Igarapé da Fortaleza e do Rio Curiaú, Municípios de Santana e Macapá. In: TAKIYAMA, L. R.; SILVA, A. Q. (Org.). **Diagnóstico das Ressacas do Estado do Amapá: Bacias do Igarapé da Fortaleza e Rio Curiaú.** Macapá: CPAQ/IEPA e DGEO/SEMA, 2003. p.155-166. cap. 9.

TRAVASSOS, W. A. S.; BARBOSA FILHO, C. M. **Tectonismo Terciário na Área do Rio Tapajós, Bacia do Amazonas.** Boletim de Geociências Petrobras, vol.4, nº 3, p.299-314, 1990.

VELOSO, H. P.; RANGEL FILHO, A. L. R.; LIMA, J. C. A. **Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal.** Rio de Janeiro: IBGE - Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 1991. 124p.

VILA NOVA, N. A.; SALATI, E.; MATSUI, E. Estimativa da evapotranspiração na Bacia Amazônica. **Revista Acta Amazônica**, vol.6, nº 2, p.215-228, 1976.

VILLEGAS, J. M. **Geologia estrutural da Bacia de Marajó**. 1994. 119f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém, 1994.

WALTON, W. C. **Selected analytical methods for well and aquifer evaluation**. Illinois State Water Survey, Bulletin nº 49, 1962. 81p.

WANDERLEY FILHO, J. E.; EIRAS, J. M.; CUNHA, P. R. C.; VAN DER VEN, P. H. The Paleozoic Solimões and Amazonas basins and the Acre foreland basin of Brasil. In: HOORN, C.; WESSELINGH, F. (Ed.). **Amazonia: Landscape and species evolution – A Look into the past**. Wiley – Blackwell, 2010. 447 p.

WANDERLEY FILHO, J. R.; EIRAS, J. F.; VAZ, P. T. Bacia do Solimões. **Boletim de Geociências da PETROBRAS**, vol.15, nº2, p.217-225, 2007.

WANDERLEY FILHO, J. R.; MELO, J. H. G.; FONSECA, V. M. F.; MACHADO, D. M. C. Bacias Sedimentares Brasileiras: Bacia do Amazonas. **Phoenix**, ano 7, nº 82, 2005. 6p.

WANDERLEY FILHO, J.; TRAVASSOS, W. A. S. O. Graben Invertido do Purus. TAPIAS, J. G. In: XIV Congreso Latinoamericano de Geologia, 2011, Medellín – Colômbia. **Memórias**. Medellín: CLG, p. 268-269, 2011.

ZALÁN, P. V.; MATSUDA, N. S. Bacia do Marajó. **Boletim de Geociências da PETROBRAS**, vol. 15, p.311-310, 2007.