



UNIVERSIDADE FEDERAL DE RORAIMA
PROFÁGUA – MESTRADO PROFISSIONAL EM REDE NACIONAL
DE GESTÃO E REGULAÇÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

PEDRO ANTÔNIO DORIA SANTIAGO DOS SANTOS

**CARACTERIZAÇÃO HIDRODINÂMICA E HIDROQUÍMICA DO AQUÍFERO
BOA VISTA NA BACIA DO RIO CAUAMÉ – RR**

BOA VISTA, RR

2020

PEDRO ANTÔNIO DORIA SANTIAGO DOS SANTOS

**CARACTERIZAÇÃO HIDRODINÂMICA E HIDROQUÍMICA DO AQUÍFERO
BOA VISTA NA BACIA DO RIO CAUAMÉ – RR**

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Profágua – Mestrado Profissional em Rede
Nacional de Gestão e Regulação de
Recursos Hídricos, Polo da Universidade
Federal de Roraima, para obtenção do
Título de Mestre, sob orientação do Prof.
Dr. Fábio Luiz Wankler e co-orientação do
Prof. Dr. Carlos Sander

BOA VISTA, RR

2020

Dados Internacionais de Catalogação na publicação (CIP)
Biblioteca Central da Universidade Federal de Roraima

S237c Santos, Pedro Antônio Doria Santiago dos.
Caracterização hidrodinâmica e hidroquímica do aquífero Boa Vista na
bacia do Rio Cauamé – RR / Pedro Antônio Doria Santiago dos Santos. –
Boa Vista, 2020.
123 f. : il.

Inclui mapa.

Orientação: Prof. Dr. Fábio Luiz Wankler.

Co-orientação: Prof. Dr. Carlos Sander.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Roraima, Programa de
Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos.

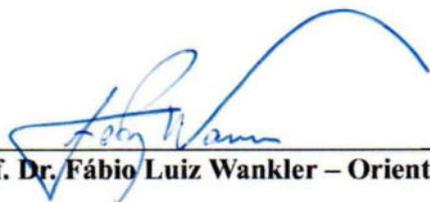
1 – Recursos hídricos. 2 – Hidrologia. 3 – Bacia do Rio Cauamé. 4 –
Águas subterrâneas. I – Título. II – Wankler, Fábio Luiz (orientador). III –
Sander, Carlos (coorientador).

CDU – 556.32(811.4)

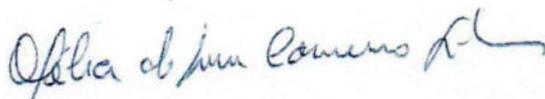
PEDRO ANTÔNIO DORIA SANTIAGO DOS SANTOS

CARACTERIZAÇÃO HIDRODINÂMICA E HIDROQUÍMICA DO AQUIFERO BOA VISTA NA BACIA DO RIO CAUAMÉ - RR

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, da Universidade Federal de Roraima, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos. Área de concentração: Instrumentos da Política de Recursos Hídricos. Defendida em 11 de dezembro de 2020 e avaliada pela seguinte banca:



Prof. Dr. Fábio Luiz Wankler – Orientador (UFRR)



Profa. Dra. Ofélia de Lira Carneiro Silva (UFRR)



Prof. Dr. Bruno Cesar Mortatti (UFRR)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para que eu conseguisse chegar até aqui, mas não posso deixar de citar, primeiramente a minha mãe Vanda Doria que sempre esteve ao meu lado em todos os momentos da minha vida, me apoiando e acreditando na minha capacidade, até nos momentos em que eu mesmo duvidava dela.

O apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Agradeço também ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - Prof.Água, projeto CAPES/ANA AUXPE N°. 2717/2015, pelo apoio técnico científico aportado.

Minhas irmãs, Cássia Doria e Patrícia Doria, também merecem lugar de destaque, da mesma forma que minha companheira Chislea Castro, aos meus amigos que sempre estiveram ao meu lado tanto nos momentos de glória quanto nos de derrota.

Faço uma ressalva especial aos meus avos Wanderlino Passos Doria e Calypça Torres Doria que por motivo de força maior não estão mais entre nós, mas que em nenhum momento deixaram de me incluir em suas preces, pedindo para que meus sonhos fossem realizados.

Enfim, agradeço a todos, aos funcionários do Prof-água, ao meu orientador Prof. Dr. Fabio Wankler, ao meu co-orientador Prof. Dr. Carlos Sander, ao Prof. Dr. Bruno Mortatti pelo apoio dado nas etapas de preparação do campo, ao futuro geólogo Gustavo Zaranza por realizar as análises granulométricas no NUPENERG, a Universidade Federal de Roraima por ser um curso gratuito e de acesso a todos e aos meus colegas de pós-graduação pelo apoio nesses últimos dois anos.

RESUMO

A escolha da bacia do Cauamé deve-se a necessidade de implementar políticas de gestão de recursos hídricos em Roraima, nas quais o Mestrado Profissional Prof-água tem papel relevante na medida em que instrumentaliza profissionais e seus mestrandos constroem o aprofundamento do conhecimento dos recursos hídricos. Esta região apresenta a maior concentração de empreendimentos e também maior densidade populacional do estado. A escassez de informações sobre o conhecimento hidrogeológico, ocasiona desconhecimento acerca de elementos importantes no controle do fluxo de água subterrânea, em especial nos processos de recarga e descarga, bem como das condições naturais de armazenamento destas águas, levando a implicações nos processos de gestão, regulação e outorga do uso deste recurso hídrico. Assim, o escopo deste trabalho é caracterizar hidrogeologicamente o Sistema Aquífero Boa Vista (SABV) na bacia hidrográfica do rio Cauamé que localiza-se no setor centro-nordeste do Estado de Roraima. Para tanto, foram utilizados os dados de cadastramento de poços disponíveis na base de dados da CPRM (SIAGAS). Além dos dados históricos, foram realizadas campanhas de sondagens e coleta de água no qual foram feitas medidas físico-químicas através de fotometria e, ainda, testes de bombeamento, afim de obter-se uma caracterização atual da área de pesquisa, a partir dos quais foram constatados os parâmetros hidrodinâmicos. Os resultados sugerem que o Aquífero Boa Vista é um reservatório subterrâneo, formado principalmente por areias de granulometria predominantemente média a grossa nas bordas da bacia e fina a média nas regiões centrais, ocupando a área de 1.803,00 km², que equivale a 57% da total extensão da Bacia do Cauamé, cuja condutividade hidráulica medida varia de 1.2×10^{-2} cm/s a 3.2×10^0 cm/s, sendo que esses valores sugerem uma heterogeneidade vertical ao longo do empilhamento estratigráfico, com direção geral do fluxo subterrâneo de noroeste (NW) para sudeste (SE) com descarga na calha do Rio Branco. As características hidroquímicas refletem a composição mineralógica das rochas que as contêm e que existe uma correlação entre a composição química das águas subterrâneas, as condições de circulação e a litologia, sendo que as águas subterrâneas foram separadas em dois grupos distintos: cloro-sulfatadas e sulfatadas. O estudo permitiu ainda concluir que os níveis de nitrito e nitrato encontrados sugerem que o reservatório está livre de poluição doméstica nas regiões estudadas e que os valores de amônia na região do bairro Monte Cristo podem estar associados ao uso de fertilizantes.

Palavras-chave: Hidrogeologia. Aquífero. Vazão de referência.

ABSTRACT

The choice of the Cauamé basin for this study is due to the need to implement water resources management policies in Roraima, in which the Professional Master's Degree Program Prof-água plays an important role as it instrumentalizes professionals and master's students build the deepening of the knowledge of water resources. This region has the highest concentration of enterprises and also the highest population density in the state. The scarcity of information on hydrogeological knowledge leads to ignorance about important elements in the control of groundwater flow, especially in the processes of recharge and discharge, as well as the natural conditions of storage waters, leading to implications in processes of management, regulation and granting of the use of water resource. The scope of this work is to characterize hydrogeologically the Boa Vista Aquifer System (SABV) in Cauamé river basin, which is located in the central-northeast sector of Roraima State. For this purpose, the CPRM (SIAGAS) database was used to register wells. Besides the historical data, water sampling and drilling campaigns were carried out in which, at the time of collection, physical-chemical measurements were made, as well as pumping tests, in order to obtain a current characterization of the research area, from which the hydrodynamic parameters were verified. The results suggest that Boa Vista Aquifer is an underground reservoir, formed mainly by sands predominantly medium to coarse granulometry in the edges of the basin and fine to medium in the central regions, occupying the area of 1. 803.00 km², which is equivalent to 57% of the total extension of Cauamé Basin, whose measured hydraulic conductivity varies from 1.2 x10⁻² cm/s to 3.2x10⁰ cm/s, and these values suggest a vertical heterogeneity along the stratigraphic stacking, with predominant direction of the underground flow from northwest (NW) to southeast (SE) with discharge in the Rio Branco trough. The hydrochemical characteristics reflect the mineralogical composition of the rocks that contain and there is a correlation between the chemical composition of the underground waters, the circulation conditions and the lithology, the underground waters have been separated into two distinct groups: chloro-sulphated and sulphated. The study also concluded that the levels of nitrite and nitrate found suggest that reservoir is free of domestic pollution in the regions studied and the ammonia values in Monte Cristo region may be associated with the use of fertilizers.

Keywords: Hydrogeology. Aquifer. Reference flow.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-------------|--|----|
| Figura 1 - | Classe de clima segundo Koppen para a Bacia do rio Branco | 14 |
| Figura 2 - | Representação da geomorfologia regional | 15 |
| Figura 3 - | Províncias geocronológicas do Cráton Amazônico, de acordo com as propostas de (A) Tassinari e Macambira (2004), cujas idades das províncias geocronológicas foram atualizadas de acordo com Cordani et al. (2009) e (B) Santos et al. (2006) | 20 |
| Figura 4 - | Domínios litoestruturais do estado de Roraima adjacentes | 21 |
| Figura 5 - | Mapa hidrogeológico adaptado | 26 |
| Figura 6 - | Sistema de aquíferos de meios isotrópicos | 29 |
| Figura 7 - | Tipos de testes de bombeamento. (a) teste de aquífero (b) teste de produção .. | 35 |
| Figura 8 - | Escoador de orifício circular | 36 |
| Figura 9 - | Escoadouro de orifício circular mostrando detalhes construtivos (DRISCOLL, 1986) | 37 |
| Figura 10 - | Gráfico para avaliação da constante Ke em função da razão diâmetro do orifício diâmetro do tubo (adaptado de DRISCOLL, 1986) | 37 |
| Figura 11 - | Fluxograma das etapas desenvolvidas no projeto | 45 |
| Figura 12 - | Etapas do geoprocessamento utilizando o banco de dados | 45 |
| Figura 13 - | Mapa de localização dos poços estudados | 46 |
| Figura 14 - | Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Rio Cauamé | 48 |
| Figura 15 - | Desenho esquemático de uma estrutura montada para uma sondagem rotativa. | 49 |
| Figura 16 - | Fluxograma das etapas das sondagens | 50 |
| Figura 17 - | Teste escalonado seguido de teste contínuo | 52 |
| Figura 18 - | Teste escalonado | 52 |
| Figura 19 - | Teste sucessivo com recuperação do nível, seguido de teste contínuo | 53 |
| Figura 20 - | Teste sucessivo com recuperação do nível | 54 |
| Figura 21 - | Teste contínuo com uma única vazão constante | 54 |
| Figura 22 - | Equipamentos utilizados durante o teste de bombeamento. Escoador de orifício, tubo de pitot e nível eletrônico | 55 |
| Figura 23 - | Escoador de orifício com tubo de pitot durante a realização do teste de bombeamento | 56 |
| Figura 24 - | Medidor Multiparâmetro The eXact® Micro 20 | 59 |
| Figura 25 - | Mapa de localização dos poços tubulares na Bacia do Rio Cauamé | 62 |

| | | |
|-------------|---|----|
| Figura 26 - | Mapa de localização dos poços tubulares com dados de vazão na Bacia do Rio Cauamé | 63 |
| Figura 27 - | Mapa potenciométrico da Bacia do Rio Cauamé | 64 |
| Figura 28 - | Mapa de declividade gerado a partir do SRTM no ArcGis | 65 |
| Figura 29 - | Mapa da amplitude do sinal analítico (ASA), contendo os falhamentos estruturais regionais | 66 |
| Figura 30 - | Mapa com possíveis Grabens | 67 |
| Figura 31 - | Direções de fluxo subterrâneo obtidas a partir do software Golden Surfer | 68 |
| Figura 32 - | Perfil Lito-estratigráfico do poço tubular 01 | 70 |
| Figura 33 - | Perfil Lito-estratigráfico do poço tubular 02 | 71 |
| Figura 34 - | Perfil Lito-estratigráfico do poço tubular 04 | 72 |
| Figura 35 - | Perfil Lito-estratigráfico do poço tubular 05 | 73 |
| Figura 36 - | Perfil Lito-estratigráfico do poço tubular 06 | 75 |
| Figura 37 - | Perfil Lito-estratigráfico do poço tubular 08 | 76 |
| Figura 38 - | Perfil topográfico da área de estudo (Seção W-E) perfis litológicos | 77 |
| Figura 39 - | Mapa de vazões gerado a partir dos dados do SIAGAS (2020) | 87 |
| Figura 40 - | Teste de bombeamento escalonado - Rebaixamento x Tempo | 88 |
| Figura 41 - | Escoador de orifício com o tubo de pitot durante a realização do teste de bombeamento | 88 |
| Figura 42 - | Teste de bombeamento escalonado – Rebaixamento x Tempo | 89 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|-------------|---|----|
| Tabela 1 - | Distribuição das unidades cenozoicas no tempo geológico | 24 |
| Tabela 2 - | Caracterização hidráulica das unidades hidrostatigráficas | 26 |
| Tabela 3 - | Lista de parâmetros para substâncias inorgânicas, com maior probabilidade de ocorrência em águas subterrâneas, seus respectivos Valores Máximos Permitidos (VMP) para cada um dos usos considerados como preponderantes e os limites de quantificação praticáveis (LQP) | 43 |
| Tabela 4 - | Localização dos poços tubulares estudados e testes realizados | 47 |
| Tabela 5 - | Programação das etapas (Escalões) (Poço 07) | 57 |
| Tabela 6 - | Programação das etapas (Escalões) (Poço 09) | 57 |
| Tabela 7 - | Faixa de medição dos elementos químicos analisados | 60 |
| Tabela 8 - | Condutividade hidráulica, Sondagem 01 | 78 |
| Tabela 9 - | Condutividade hidráulica, Sondagem 02 | 78 |
| Tabela 10 - | Condutividade hidráulica, Sondagem 05 | 79 |
| Tabela 11 - | Condutividade hidráulica, Sondagem 06 | 79 |
| Tabela 12 - | Tabela comparativa entre as condutividades obtidas em laboratório e as da CPRM (2006) | 80 |
| Tabela 13 - | Tabela de análise química. Teste in situ poço tubular 02 | 83 |
| Tabela 14 - | Tabela de análise química. Teste in situ poço tubular 03 | 84 |
| Tabela 15 - | Tabela de análise química. Teste in situ poço tubular 07 | 85 |
| Tabela 16 - | Valores obtidos da medição direta no poço tubular | 86 |
| Tabela 17 - | Valores hidrodinâmicos obtidos a partir do teste de bombeamento | 89 |

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|---|-----------|
| 1 | APRESENTAÇÃO | 12 |
| 2 | OBJETIVO GERAL | 13 |
| 2.1 | OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 13 |
| 3 | ASPECTOS FISIAGRÁFICOS | 14 |
| 3.1 | CLIMA | 14 |
| 3.2 | VEGETAÇÃO | 14 |
| 3.3 | GEOMORFOLOGIA | 15 |
| 3.3.1 | Planalto Sedimentar Roraima | 16 |
| 3.3.2 | Planalto do Interflúvio Amazonas-Orenoco | 16 |
| 3.3.3 | Planalto Dissecado Norte da Amazônia | 16 |
| 3.3.4 | Planaltos Residuais de Roraima | 17 |
| 3.3.5 | Pediplano Rio Branco - Rio Negro | 17 |
| 3.4 | CONTEXTO GEOLÓGICO | 18 |
| 3.4.1 | Litoestratigrafia do estado de Roraima | 21 |
| 3.4.2 | Geologia Local | 22 |
| 3.4.2.1 | Formação Boa Vista | 22 |
| 3.5 | ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS | 25 |
| 3.5.1 | Formação Boa Vista (Nbv) | 27 |
| 3.5.2 | Unidades Fraturadas | 27 |
| 4 | REFERENCIAL TEÓRICO | 28 |
| 4.1 | TIPOS DE AQUÍFEROS | 28 |
| 4.2 | CLASSIFICAÇÃO HIDROGEOLÓGICA | 28 |
| 4.3 | CLASSIFICAÇÃO HIDROQUÍMICA | 29 |
| 4.3.1 | Interações água-rocha | 30 |
| 4.3.2 | Características físicas | 30 |
| 4.3.3 | Características químicas | 30 |
| 4.4 | TESTE DE BOMBEAMENTO | 34 |
| 4.4.1 | Teste de aquífero | 35 |
| 4.4.2 | Teste de produção | 35 |
| 4.4.3 | Características hidrodinâmicas | 36 |
| 4.4.3.1 | Curva Característica do Poço | 38 |
| 4.4.3.2 | Transmissividade | 38 |
| 4.4.3.3 | Condutividade Hidráulica | 39 |

| | | |
|--------------|--|------------|
| 4.4.3.4 | Vazão Específica | 39 |
| 4.4.3.5 | Coeficiente de Armazenamento | 39 |
| 4.4.3.6 | Eficiência do Poço | 40 |
| 4.5 | EXPLORAÇÃO DE AQÜÍFEROS | 40 |
| 4.6 | LEGISLAÇÃO | 40 |
| 4.6.1 | Conama n. 396, de 2008 | 42 |
| 5 | METODOLOGIA | 44 |
| 5.1 | LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO | 48 |
| 5.2 | SONDAGEM ROTATIVA | 49 |
| 5.3 | ENSAIOS EM LABORATÓRIO | 51 |
| 5.4 | PLANEJAMENTO DO TESTE DE BOMBEAMENTO | 51 |
| 5.4.1 | Testes de Produção | 51 |
| 5.4.2 | Equipamentos do teste de bombeamento | 55 |
| 5.5 | TÉCNICAS DE COLETA DA ÁGUA NOS POÇOS TUBULARES | 57 |
| 5.6 | FOTÔMETRO | 58 |
| 5.6.1 | Especificações técnicas Fotômetro The eXact® Micro 20 | 59 |
| 5.6.2 | Instruções Fotômetro The eXact® Micro 20 | 60 |
| 6 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 62 |
| 6.1 | BANCO DE DADOS | 62 |
| 6.2 | SONDADENS | 69 |
| 6.2.1 | Considerações | 77 |
| 6.2.2 | Ensaio de permeabilidade | 78 |
| 6.3 | ANÁLISE HIDROQUÍMICA | 81 |
| 6.4 | RESULTADOS DOS TESTES DE BOMBEAMENTO | 86 |
| 6.5 | INTEGRAÇÃO DE DADOS | 90 |
| 7 | CONCLUSÕES | 92 |
| | REFERÊNCIAS | 93 |
| | ANEXOS | 101 |

1 APRESENTAÇÃO

Boa Vista, capital do Estado de Roraima, tem uma precipitação média anual superior a 1.700 milímetros, concentrados entre os meses de maio a agosto, sendo que durante o restante do ano ocorre um grande período de estiagem e geralmente nesse período, os rios, igarapés e açudes tem uma baixa considerável no volume de água, deixando em risco o abastecimento público.

Durante as duas últimas décadas Roraima tem experimentado um elevado ritmo de desenvolvimento, atribuído ao crescimento da população, especialmente de imigrantes (SCHAEFER, 1994; 1997).

Em áreas urbanizadas ocorre impermeabilização do solo, sendo as fugas das redes públicas de distribuição de água potável, da coletora de esgotos e das galerias pluviais são representantes de uma parcela das zonas de recarga no aquífero, enquanto que nas áreas rurais com o avanço da expansão da fronteira agrícola, o intenso bombeamento das águas superficiais e subterrâneas são responsáveis pela super-exploração causando excessiva descarga no aquífero (FOSTER et al., 2013). Assim, o uso descontrolado dos recursos hídricos pode acarretar a modificações nas condições naturais e conseqüentemente a mudanças nas condições de fluxo e armazenamento das águas subterrâneas.

A escolha da bacia do Cauamé trata-se da necessidade de o estado implementar políticas de gestão de recursos hídricos em Roraima, nas quais o Mestrado Profissional Prof-água tem papel relevante na medida em que instrumentaliza profissionais e seus mestrandos constroem o aprofundamento do conhecimento dos recursos hídricos. E também é extremamente importante pois apresenta a maior concentração de empreendimentos e maior densidade populacional do estado. Contudo a compreensão do impacto e gestão das atividades presentes carece de um comitê regulador.

Acredita-se que se chegou a um melhor entendimento da composição química dessas águas, do fluxo nos reservatórios, a capacidade de exploração do aquífero levando em consideração as possíveis alterações provocadas por atividades antrópicas.

Por fim, que os resultados desse estudo possam colaborar com o sistema de gestão dos recursos hídricos subterrâneos no Estado de Roraima. Contribuir de forma eficaz para a organização de um Comitê de Bacia Hidrográfica do rio Cauamé, algo extremamente necessário para o cumprimento das metas do programa de gestão da Agência Nacional de Águas.

2 OBJETIVO GERAL

Caracterizar hidrogeologicamente o Sistema Aquífero Boa Vista (SABV) na bacia hidrográfica do Rio Cauamé.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

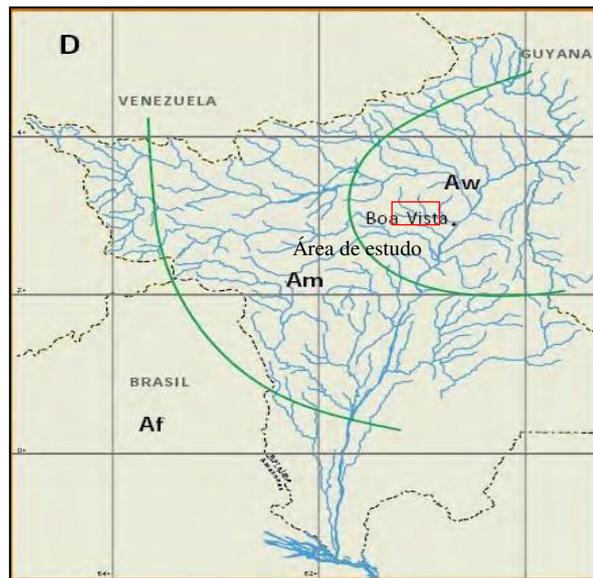
1. Levantar o banco de dados hidrogeológico através da interpretação e integração dos dados;
2. Criar e analisar mapas temáticos hidrogeológicos de potenciométrica e vazão das águas subterrâneas;
3. Coletar e analisar dados sedimentológicos e hidrológicos;
4. Coletar e identificar as características físico-químicas;
5. Realizar a interpretação integrada dos resultados.

3 ASPECTOS FISIAGRÁFICOS

3.1 CLIMA

Na classificação de Köppen, ocorrem no Estado os climas do tipo Af, Am e Aw (Figura 1). A área de estudo possui um clima do tipo Aw, tropical chuvoso, com predomínio de savanas, quente e úmido com uma estação seca definida, geralmente com 06 meses de estiagem.

Figura 1 - Classe de clima segundo a classificação de Köppen



Fonte: BARBOSA (1997).

A estação seca, conhecida regionalmente como verão, ocorre entre os meses de outubro a março, com elevada queda nos índices pluviométricos, tendo pelo menos um mês com quantidade de chuvas inferior a 60 mm, e uma estação chuvosa (inverno regional), entre os meses de abril a setembro, a temperatura oscila entre 22° C (mínima) a 35° (máxima) com uma variação térmica entre as médias do mês mais quente e do mês mais frio consideradas baixas.

3.2 VEGETAÇÃO

O local de estudo encontra-se inserido em domínio de savana, denominada regionalmente de “lavrados”, que em Roraima apresentam formas de mosaicos, com sistemas de baixa densidade arbórea, como também áreas florestais (ilhas de matas, mata de galeria).

As espécies arbóreas características deste ecossistema são a *Curatella americana* (caimbé), segmentadas por indivíduos de *Byrsonima spp* (mirixi ou murici) *Bowdichia*

virgilioides (paricarana) e a cobertura graminosa onde predominam as espécies *Aristida* e *Trachypogon* que ficam secas no período de estiagem.

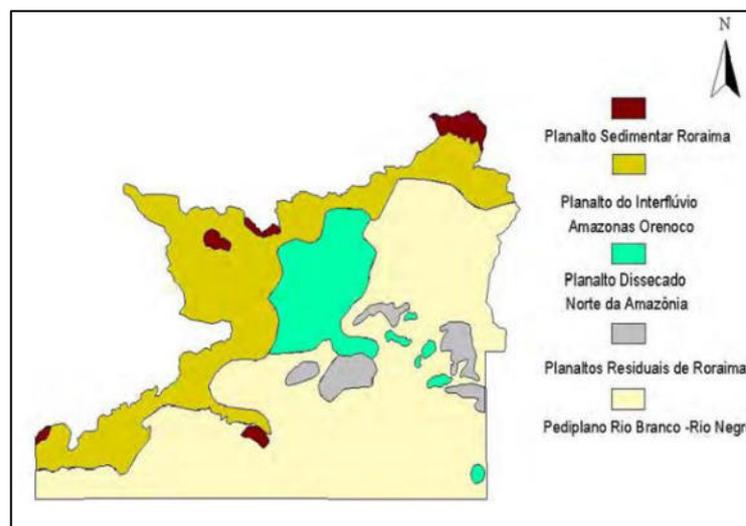
A cobertura vegetal encontra-se inserida em um relevo predominantemente aplainado, com a presença de “inselbergs”. A rede de drenagem constituída por igarapés, em suas maiorias intermitentes, marcadas por veredas de *Mauritia flexuosa* (buriti) encontra-se encaixada em uma topografia de ondulações pouco acentuadas, conhecidas regionalmente como “tesos”.

3.3 GEOMORFOLOGIA

De acordo com Schaefer e Vale Júnior (1997), os trabalhos geomorfológicos em Roraima revelam diferentes abordagens, cujos estudos pioneiros foram realizados por Oliveira (1929), Paiva (1939), Guerra (1956), que identificaram um extenso peneplano nivelando rochas pré-cambrianas do escudo; McConnel (1968) descreve pediplanos cíclicos; Éden (1971) se refere à região como superfície de etchplanação, resultante da erosão de um velho e profundo manto pré- intemperizado.

Brasil (1975), descreve para a região cinco unidades geomorfológicas (Figura 2), denominadas: Planalto Sedimentar Roraima, Planalto do Interflúvio Amazonas-Orenoco, Planalto Dissecado Norte da Amazônia, Planaltos Residuais de Roraima e Pediplano Rio Branco -Rio Negro.

Figura 2 - Representação da geomorfologia regional



Fonte: BRASIL (1975).

3.3.1 Planalto Sedimentar Roraima

Compreende os relevos tabulares residuais em rochas sedimentares do Grupo Roraima, com distribuição em formas de montes e serras isoladas, situados na parte norte, com altitude entre 1000 a 3000 m, representados pelo Pico da Neblina – 3000 m e Monte Roraima – 2875 m (BRASIL, 1975). Onde são observados extensos falhamentos que condicionam as formas de relevo e a rede de drenagem.

3.3.2 Planalto do Interflúvio Amazonas-Orenoco

Divisor de águas das bacias hidrográficas do rio Orenoco na Venezuela e Amazonas, no Brasil, compreende os relevos tabulares do Planalto Sedimentar Roraima e patamares dissecados, com altitudes entre 600 a mais de 2000 m.

É uma extensa área montanhosa com direção geral de sudoeste para nordeste, elaborada em rochas pré-cambrianas pertencentes ao Complexo Guianense, Grupo Cauarane, Formação Surumu, Granodiorito Serra do Mel, Grupo Roraima, Diabásio Pedra Preta e Granito Surucucu (MONTALVÃO et al., 1975).

As formas de relevo encontradas apresentam, em sua maior parte, vertentes de forte declividade, resultantes do encaixamento da rede de drenagem, sobretudo nas fraturas e falhas. Os patamares dissecados recebem as seguintes denominações de sudoeste para norte e nordeste: Serra Imeri, Serra Tapirapecó, Serra Gurupira, Serra Urucuzeiro, Serra Parima e Serra Pacaraima.

3.3.3 Planalto Dissecado Norte da Amazônia

Foi elaborado, sobretudo em rochas do Complexo Guianense, apresentando tipos de dissecação variados como colinas, colinas com encostas ravinadas e colinas com vales encaixados, as quais apresentam configurações descontínuas, sendo bem representadas pela Serra da Prata.

A área de maior expressão do Planalto Dissecado Norte da Amazônia localiza-se nos médios cursos dos rios Uraricoera e Mucajaí, que correm de oeste para leste, adaptados a falhas e fraturas com inúmeras cachoeiras e corredeiras, constituindo um nível dissecado formado predominantemente por colinas com vales encaixados, associados a pontões de cristas (BRASIL, 1975).

3.3.4 Planaltos Residuais de Roraima

Esses planaltos são constituídos por diversas serras isoladas, ou não, elaboradas em rochas do Grupo Surumu e em granito da Suíte Intrusiva Saracura. Na região do Campo de São Marcos, os inselbergs elaborados em rochas do embasamento gnáissico possuem expressão no relevo (BRASIL, 1975).

Costa (1999) descreve a evolução dessa feição morfoestrutural a partir de uma superfície de aplainamento onde as seguintes etapas são observadas:

- a) Apresentam descontinuidades pré-existentes (falhas e famílias de juntas), que, aliadas à percolação de água, controlam a instalação de uma nova frente de alteração, sob condições tropicais úmidas;
- b) Posteriormente, sob condições de clima semiárido, teria ocorrido a fase de remoção de grande parte do manto de intemperismo, devido à erosão pluvial;
- c) A coalescência desses pedimentos levou à elaboração de uma superfície pediplanada (Pediplano Rio Branco) e à exposição de relevos residuais (inselbergs). A elaboração dessa morfoestrutura e seu avanço de amplitude topográfica foram acompanhados por movimentos neotectônicos, principalmente falhas normais e transcorrentes, as quais facilitaram a instalação de lagos, escarpas de falhas e capturas de drenagens.

Os Planaltos Residuais estão representados pelas Serra da Mocidade, Serra do Apiaú, Serra Mucajaí, Serra da Balata, Serra da Lua e Serra Grande.

3.3.5 Pediplano Rio Branco - Rio Negro

Extensa superfície de aplainamento que apresenta áreas conservadas e dissecadas em rochas pré-cambrianas do Complexo Guianense, sedimentos inconsolidados de cobertura Terciária a Pleistocênica e Formação Boa Vista, correspondendo ao nível mais baixo da área, com altitudes variando de 80 a 160 m, recorta litologias pré-cambrianas e fanerozóicas, sendo interrompidas, localmente, pelos inselbergs que se elevam na região (BRASIL, 1975).

A drenagem predominante é do tipo dendrítica, de densidade média, e subdendrítica de baixa densidade, de pouco entalhe, conforme classificação de Lima (1995). A vegetação predominante é do tipo mata de galeria, geralmente constituída por palmeiras do tipo buriti.

Apresentam colinas constituídas por afloramentos de rochas do embasamento cristalino estruturado, topos convexos são por vezes sustentados pelos remanescentes de crosta ferruginosas de pequena elevação em relação à base. Nas proximidades das elevações o relevo torna-se suavemente ondulado, delineando colinas de topos planos e extensos.

Segundo Costa (1999), os depósitos de cobertura são predominantemente arenosos, semiconsolidados a inconsolidados, recobrendo litologias pré-cambrianas, mesozóicas e cenozóicas. Nesses interflúvios são frequentes ocorrências de áreas abatidas, nas quais estão presentes inúmeros lagos, que, em algumas situações, coalescem para formarem igarapés.

3.4 CONTEXTO GEOLÓGICO

De acordo com CPRM (2003), a plataforma Sul-Americana corresponde a maior e mais antiga fração continental da placa sul-americana que permaneceu estável e funcionou como antepaís durante a evolução das faixas móveis do Caribe (Norte) e Andina (Oeste), ao mesmo tempo em que se processavam a abertura e o desenvolvimento do Atlântico sul, no Mesozoico.

A origem da plataforma Sul-Americana está relacionada a fragmentação do supercontinente Gondínia, no início do Neoproterozoico, aproximadamente a 900 ma. Como resultado da fragmentação da Gondínia os blocos situaram-se em cinturões móveis, formando a parte ocidental que viria a ser o Supercontinente Gondwana (BRITO; NEVES; ALMEIDA, 2003). As colisões geraram um sistema de falhas, faixas de dobramentos, arcos magmáticos, rifts e intrusões magmáticas, ocorrendo a separação de vários continentes e, conseqüentemente, a formação de grandes oceanos. Os continentes formaram o cráton Amazônico, São Francisco e São Luís (HASUI, 2012).

Diversos modelos foram propostos para a evolução ocorrida no cráton, dentre eles dois se destacam: províncias geocronológicas (TASSINARI; MACAMBIRA, 1999 e 2004; SANTOS et al., 2006; CORDANI, U.G. et al., 2009) e domínios tectonoestratigráficos (REIS; FRAGA, 1998, 2000 e REIS et al., 2003). Essas subdivisões divergem na quantidade de províncias, seus limites, a dinâmica evolutiva da crosta e principalmente em suas idades isotópicas. Porém, são os mais aceitos pela comunidade científica, pois apresentam novos e mais avançados métodos geocronológicos. Os modelos citados são também conhecidos como modelo fixista e modelo mobilista (CPRM, 2008).

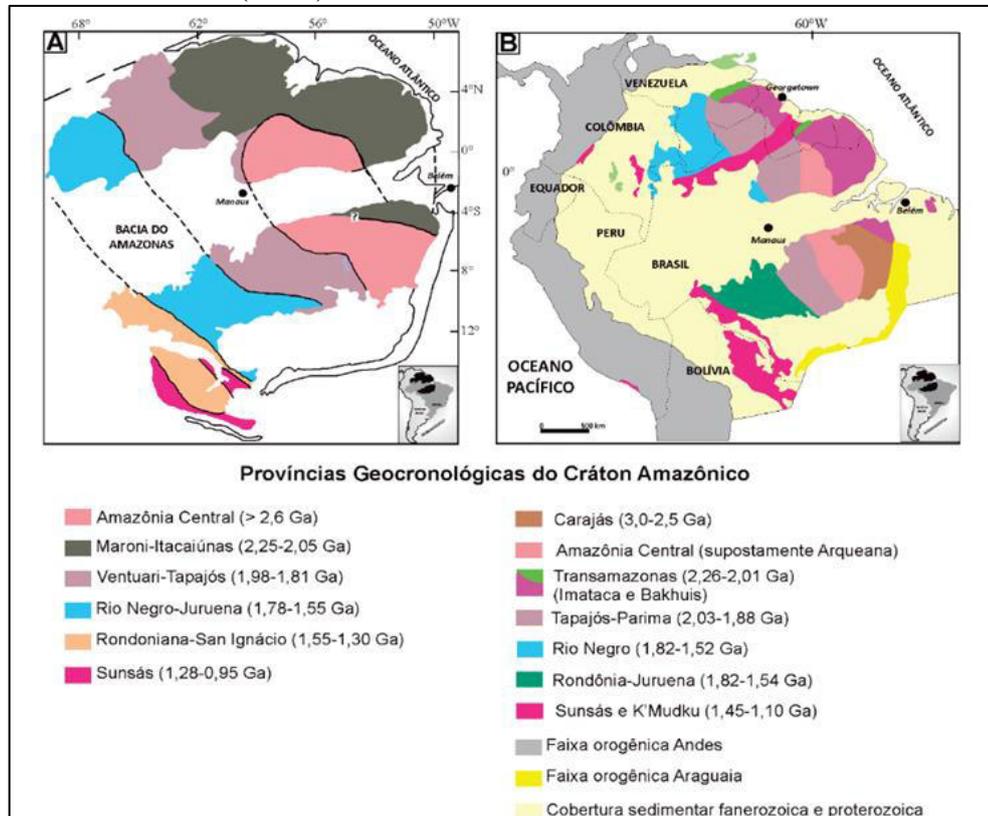
O modelo fixista analisa o Cráton como uma grande plataforma continental Arqueana, afetada por vários episódios de retrabalhamento crustal e rejuvenescimento termal Paleoproterozoico e Mesoproterozoico. Todavia, estudos geológicos realizados na área do Cráton Amazônico nos últimos anos não sustentam o modelo fixista, pois mostram que grande parte das rochas são de idade mais jovem que o Arqueano-Paleoproterozoico. O modelo mais aceito pelo meio científico é o mobilista que propõe o conceito de Províncias Geocronológicas como sendo grandes zonas dentro de áreas cratônicas onde predomina um determinado padrão

geocronológico obtido por diferentes métodos aplicados em diferentes materiais, exibindo valores coerentes entre si. Esse modelo evolutivo admite o cráton como resultado de diversos episódios de amalgamação e acresções crustais ocorridas durante o Paleoproterozoico e Mesoproterozóico, em volta de um núcleo mais antigo de idade Arqueano (TASSINARI; MACAMBIRA, 1999, 2004).

Baseando-se no modelo evolutivo de Cordani et al. (1979) e nas datações radiométricas obtidas pelo método Rb-Sr, K-Ar, Sm-Nd e U-Pb em zircões, Tassinari e Macambira (1999), subdividiram o Cráton Amazônico em seis províncias geocronológicas (Figura 3): Amazônia Central (>2,5 Ga), Maroni-Itacaiúnas (2,2-1,95 Ga), Ventuari-Tapajós (1,95-1,8 Ga), Rio Negro-Juruena (1,8-1,55 Ga), Rondoniano San Ignacio (1,5-1,3 Ga) e Sunsás (1,25-1,0 Ga).

No estado de Roraima podem ser encontradas três das seis províncias geocronológicas, sendo elas: Amazônia Central, na porção norte e sudeste, Maroni-Itacaiúnas, na porção leste, e a Ventuari-Tapajós, no setor sudoeste. De acordo com o modelo mobilista ocorreram orogenias Paleoproterozoicas nas bordas da zona estável Província Amazônia Central representadas a norte e leste pela Província Maroni-Itacaiúnas e a oeste pela Província Ventuari-Tapajós. Determinações isotópicas sugerem que as províncias Ventuari-Tapajós e Rio Negro-Juruena se desenvolveram a partir de arcos magmáticos durante o período de 1,95-1,55 Ga, resultando da colisão do proto-cráton amazônico e outro bloco de idade Paleoproterozóica. Por fim a província Sunsás datando entre 1,3 a 1,0 Ga está associada com a inversão do cinturão marginal durante uma colisão continente-continente (TASSINARI et al., 2000; TASSINARI e MACAMBIRA, 1999, 2004).

Figura 3 - Províncias geocronológicas do Cráton Amazônico, de acordo com as propostas de (A) Tassinari e Macambira (2004), cujas idades das províncias geocronológicas foram atualizadas de acordo com Cordani et al. (2009) e (B) Santos et al. (2006)



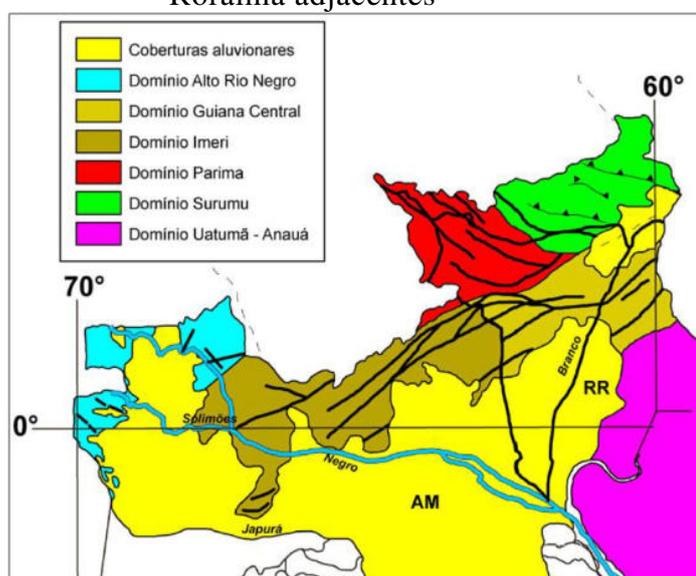
Fonte: CPRM (2006).

De acordo com os dados geocronológicos obtidos por Santos et al. (2000, 2006) existem sete províncias geocronológicas com idades entre 3,0 a 1,1 Ga (Figura 3B), neles o núcleo arqueano seria composto pela Província Carajás (3,0-2,5 Ga) enquanto as províncias, Transamazonas (2,26-2,01 Ga), Tapajós-Parima (2,03-1,88 Ga) e Rondônia-Juruena (1,82-1,54 Ga), representam uma aglutinação de crosta juvenil a partir da evolução de arcos magmáticos. As províncias Sunsás/K'Mudku (1,45-1,10 Ga) e Rio Negro (1,82-1,52 Ga), seriam resultantes de um processo de colisão continental e a província Amazônia Central teria sido resultado do retrabalhamento da crosta formada no arqueano durante o underplating magmático (SANTOS, 2006).

3.4.1 Litoestratigrafia do estado de Roraima

O arcabouço geológico de Roraima é dividido em quatro domínios Litoestruturais (Figura 4): a) Urariquera (Reis et al., 2004) (WNW-ESE a E-W), terreno Vulcano-plutônico sedimentar em 1,98-1,78 Ga; b) Guiana Central (NE-SW), cinturão de alto grau em 1,94-1,93 Ga e Associação ao Anortosito-Mangerito-Granito Rapakivi (AMG) (1,5 Ga); c) Parima (NW-SE a E-W), terreno granito greenstone em 1,97-1,94 Ga e d) Anauá – Jatapu (Reis et al., 2004) (NW-SE, NE-SW e N-S), terreno granito-gnáissico em 2,03-1,81 Ga (REIS et al., 2003). Esses Domínios caracterizam-se por associações geológicas, idades e feições estruturais específicos.

Figura 4 - Domínios litoestruturais do estado de Roraima adjacentes



Fonte: CPRM (2006).

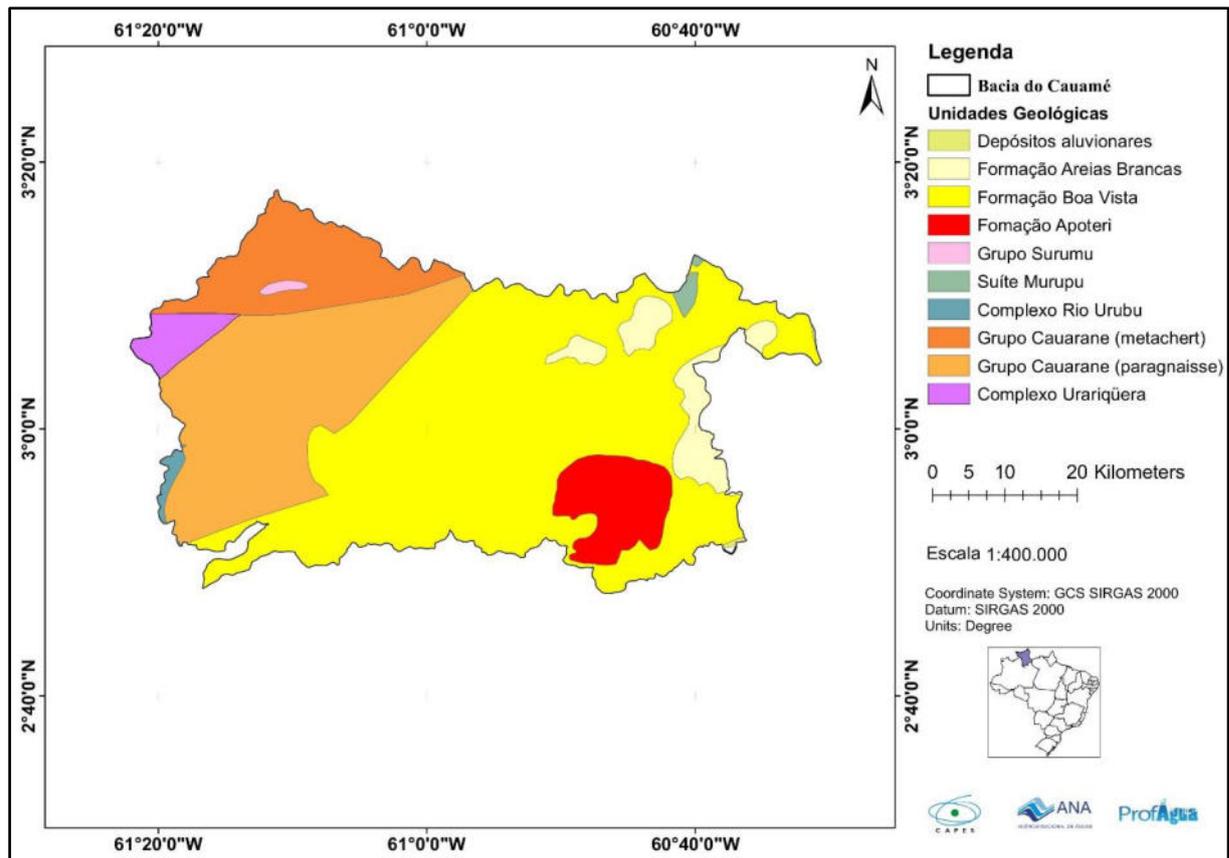
A área em apreço em que se desenvolveu o levantamento geofísico, localiza-se no Domínio Guiana Central (DGC), que está situado na porção centro-norte do estado de Roraima. Apresenta arranjos estruturais para NE-SW, caracterizado pela presença de um cinturão de alto grau metamórfico intrudido em uma associação de rochas Mesoproterozoicas (1,56 – 1,53 Ga), anortosito, gabro, mangerito e granito rapakivi (AMG) (REIS, 2003).

Este domínio corresponde ao Cinturão Guiana Central, uma importante feição tectônica do Escudo das Guianas com prolongamento através da Guiana e Suriname e dos estados de Roraima e Amazonas (REIS; FRAGA, 1996). Durante o mesozoico ocorreu uma reativação extensional em níveis crustais rasos no domínio, resultando na instalação do Hemigráben Tacutu (EIRAS; KINOSHITA, 1988).

3.4.2 Geologia Local

Na área de estudo afloram a Formação Boa Vista, Formação Apoteri e o Domínio Guiana Central, Figura 5.

Figura 5 - Mapa geológico adaptado



Fonte: CPRM (2006).

3.4.2.1 Formação Boa Vista

A unidade geológica “Formação Boa Vista” foi proposta por Barbosa, Andrade e Ramos (1959), para englobar “uma delgada sedimentação arenosa, de cores claras, cimento argiloso, intercalando camadas seixosas”. Os autores mencionam ainda a ocorrência de concreções lateríticas nessa unidade. Carneiro *et al.* (1968), assinalam nessa unidade a presença de argila cinza, areia, além de arenitos muito friáveis, seixosos, avermelhados, argilitos arenosos e concreções lateríticas.

REIS *et al.* (2001) atribuíram a esta unidade duas distintas sucessões sedimentares, presumidamente separadas através de uma discordância angular ao longo da estruturação da borda norte do hemigráben Tacutu. Ambas desenvolvem localmente perfis lateríticos imaturos

com desenvolvimento de solos podzólico e hidromórfico. Na percepção dos autores, a deposição da Formação Boa Vista foi efetivada em uma bacia rasa, provavelmente na ordem de uns 15 metros de espessura, mas que pode apresentar profundidade variável, em função da conformação de seu embasamento.

A sucessão sedimentar inferior da Formação Boa Vista aflora a sudoeste e nordeste da capital Boa Vista (RR) é fortemente controlada pela estruturação do hemigráben Tacutu Domínio Guiana Central (DGC), com limite sul balizado ao longo do baixo curso do rio Mucajaí (alto estrutural das montanhas Mucajaí) de acordo com Reis e Fraga (2000). Compõem arenitos arcoseanos a levemente conglomeráticos, róseos a esbranquiçados, ligeiramente friáveis, passíveis de distinção no grau de consolidação, arranjo e seleção daqueles da sucessão anteriormente descrita para o Domínio Uraricoera. Sua melhor exposição foi verificada na bacia do igarapé Bacabal (afluente esquerdo do rio Mucajaí), a sudoeste da fazenda Pau-Rainha. Neste local, expõe 4 metros de espessura de arenitos ligeiramente friáveis, granulação média a grossa, arcoseanos a conglomeráticos (REIS *et al.*, 2001).

A sucessão sedimentar superior fornece características de depósitos de leques aluviais com baixo gradiente de declive que formaram uma planície aluvial com incipiente desenvolvimento de canais fluviais arenosos. Sua área de sedimentação ao norte ocupa o Domínio Uraricoera, e é assinalada alguns quilômetros ao sul do front das montanhas Marari – Memória que perfaz uma faixa de direção NE-SW com largura variável. Nesta região, é reconhecida uma seção sedimentar com 7 metros de espessura, composta (da base para o topo) por arenito compacto, médio a grosso e geometria tabular, arenito conglomerático (seixos e calhaus de quartzo e rochas vulcânica e granítica), arenitos ferruginosos, arenitos sílticos e argilito mosqueado. Na proximidade da serra Guariba, rio Viruaquim, Maia (1980) descreveu, a partir de furos de sondagem, espessura de 14 metros de arenitos e arenitos sílticos ferrificados recobrando o embasamento. Parte desses sedimentos foram posterior e supostamente mencionados na literatura como pertencentes à Formação Viruaquim. (REIS *et al.*, 2001).

A idade da Formação Boa Vista ainda não é precisa em virtude ao baixo ou inexistente conteúdo fossilífero sendo assim, bastante discutida. Riker (1997) considerou a Formação Boa Vista de idade pliocênica, a qual está representada por leques aluviais proximais, caracterizados por paraconglomerados polimíticos constituídos por seixos angulosos de metachert e quartzo leitoso que se encontram lateritizados. Essa sedimentação evolui para ortoconglomerados até barras conglomeráticas nas áreas centrais do hemigráben. Também ocorrem níveis de arenito fino e friáveis. Segundo Riker (2002), a Formação Boa Vista é constituída de arenitos conglomeráticos, arcoseanos e arenitos grauváquicos intemperizados.

Segundo a CPRM (2000) os litotipos dessa unidade estão em conformação com aqueles descritos por Riker (1997), porém, a idade dessa formação ficou estabelecida no Terciário (Paleoceno/Eoceno). No trabalho de Riker (2005) a Formação Boa Vista está constituída de arenitos conglomeráticos e grauvacas, onde essas últimas encontram-se em avançado estágio de alteração intempérica, conforme atestado nos furos de sondagem. O ambiente de sedimentação dessa unidade corresponde a leque aluvial médio a distal e sua idade é considerada do Terciário (Neógeno).

A CPRM (2000) interpretou que a sedimentação da Formação Boa Vista se processou a partir do Terciário Inferior, após um período relativamente longo de erosão, com início decorrente da estabilização do hemigráben Tacutu no final do Mesozóico. Contudo Melo *et al.* (1978) têm feito referência a três tipos distintos de sedimentação Cenozoica, sendo que, a mais antiga e que extravasa os limites da Bacia Tacutu, é tida como representante da Formação Boa Vista (Tabela 1). Este aspecto é de real importância, pois exclui desta unidade os depósitos arenosos finos “Areias Brancas”, mencionados anteriormente por Braun (1973) como paleodunas e correlacionadas à *White Sands Formation* da Guiana Berrangé (1973). De modo similar, excluem-se as camadas detrito-lateríticas mencionadas por Carneiro *et al.* (1968), Bomfim *et al.* (1974), formadas em tempos neogênicos (Mioceno-Plioceno) e correlacionadas à Formação *Nappi Laterite* da Guiana (BERRANGÉ, 1973). As idades pliocênicas e pleistocênicas atribuídas por Daemon e Contreiras (1971), Montalvão *et al.* (1975) estabelecem melhor os períodos de lateritização e retrabalhamento da Formação Boa Vista, respectivamente na forma de concreções lateríticas (camadas detritico lateríticas) e dunas eólicas (Formação Areias Brancas).

Tabela 1 - Distribuição das unidades cenozoicas no tempo geológico

| EON | ERA | PERÍODO | ÉPOCA | UNIDADE | |
|-------------|-----------|-------------|-------------|-------------------|-----------------------------|
| FANEROZÓICO | CENOZÓICO | QUATERNÁRIO | HOLOCENO | ALUVIÕES MODERNAS | |
| | | | PLEISTOCENO | DUNAS EÓLICAS | |
| | | TERCIÁRIO | NEOGENO | PLIOCENO | CAMADAS DETRITO-LATERÍTICAS |
| | | | | MIOCENO | |
| | | | | OLIGOCENO | |
| | | | PALEOGENO | EOCENO | FORMAÇÃO BOA VISTA |
| | | | | PALEOCENO | |

Fonte: CPRM (2000).

Segundo Melo *et al.*, (1978) existiram três importantes mudanças climáticas regionais atuantes ao longo do período Mioceno-Holoceno: clima quente e úmido (responsável pela lateritização); quente e seco (semi-árido, formação de dunas eólicas) e, novamente quente e húmido (aluviões modernos). O processo de lateritização encontra importância em toda a região Amazônica, principalmente no Terciário Inferior (Oligoceno), pós-datando unidade do Cretáceo Superior. A sedimentação eólica é comparada àquela do Pantanal Setentrional (região compreendida entre os rios Branco e Negro; Santos e Nelson (1995), caracterizando-se, no entanto, por remanescentes de dunas com pouca altitude e menos perceptíveis, estando supostamente relacionadas a um maior soerguimento da sua bacia receptora.

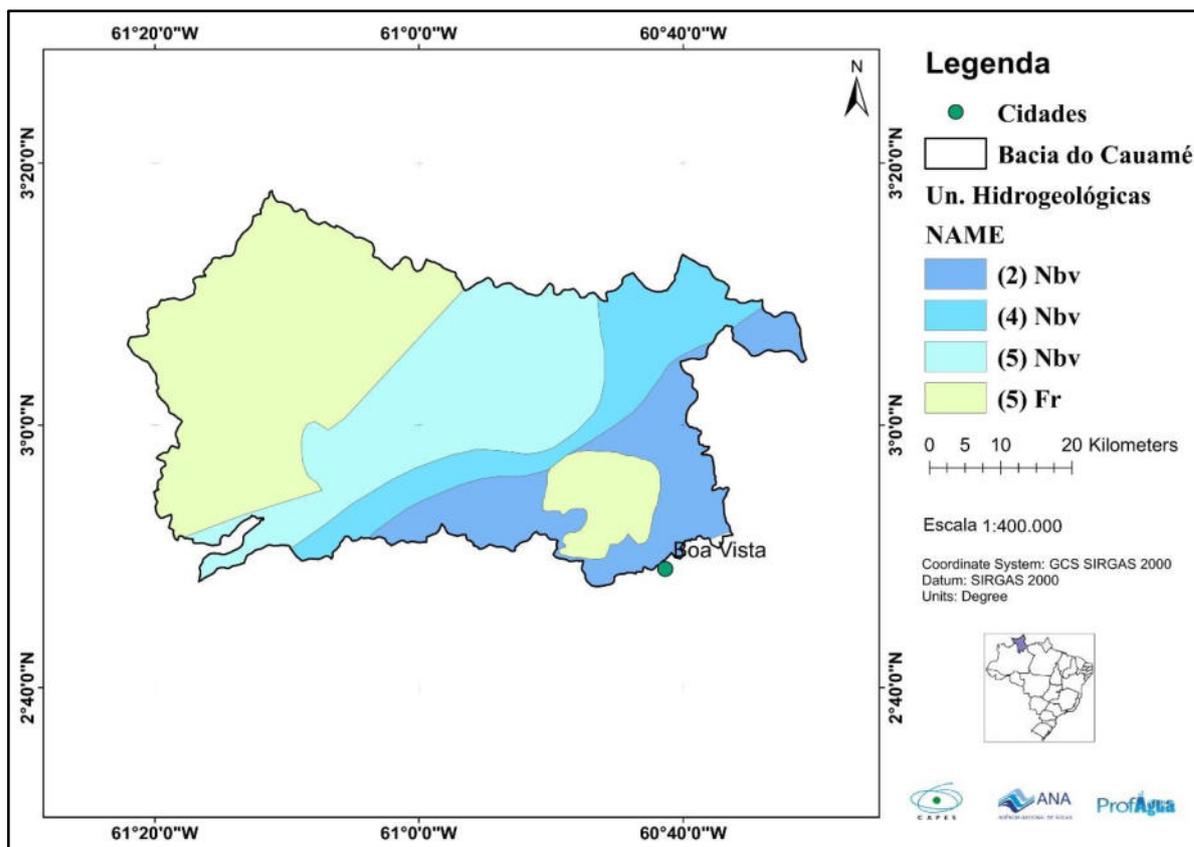
O período Eoceno-Plioceno caracterizou-se através de variações de temperatura na Terra, com início de regressões marinhas e isolamento de bacias (com sedimentação marinha ou de águas frescas).

O Paleogeno (Paleoceno-Oligoceno) assinala também mais uma fase de paroxismo dos Andes (em aproximadamente 60 Ma), podendo refletir na instalação da bacia que acolheu a sedimentação Boa Vista. Sua extensão em território guianense é aferida pela Formação *North Savanna* (BERRANGÉ, 1973).

3.5 ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS

Localmente é constituído por depósitos sedimentares inconsolidados do Terciário e Quaternário da depressão de Boa Vista. E também por depósitos fraturados representados pelo embasamento cristalino composto pelo Domínio Guiana Central, Figura 5. Abaixo segue a descrição das unidades que compõem esse sistema de aquífero assim como a potencialidade (Tabela 2).

Figura 5 - Mapa hidrogeológico adaptado



Fonte: CPRM (2006).

Tabela 2 - Caracterização hidráulica das unidades hidro-estratigráficas

| Classe | Q/s (m ³ /h/m) | T (m ² /s) | K (m/s) | Q (m ² /h) | Produtividade |
|--------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------|---|
| Nbv 2 | $2,0 \leq Q/s < 4,0$ | $10^{-3} \leq T < 10^{-2}$ | $10^{-5} \leq T < 10^{-4}$ | $50 \leq Q < 100$ | Alta - Características semelhantes à classe anterior, contudo situando-se dentro da média nacional de bons aquíferos. |
| Nbv 4 | $0,4 \leq Q/s < 1,0$ | $10^{-5} \leq T < 10^{-4}$ | $10^{-7} \leq T < 10^{-6}$ | $10 \leq Q < 25$ | Geralmente baixa, porém localmente moderada. Fornecimento de água para suprir abastecimentos locais ou consumo privado. |
| Nbv 5 | $0,04 \leq Q/s < 0,4$ | $10^{-6} \leq T < 10^{-5}$ | $10^{-8} \leq T < 10^{-7}$ | $1 \leq Q < 10$ | Geralmente muito baixa, porém localmente baixa - Fornecimentos contínuos dificilmente são garantidos. |
| Fr 5 | $< 0,04$ | $< 10^{-6}$ | $< 10^{-8}$ | < 1 | Pouco produtiva ou não aquífera - Fornecimentos insignificantes de água. Abastecimento restrito ao uso de bombas manuais. |

* (Q/s) – Vazão específica – (T) Transmissividade hidráulica

* (K) – Condutividade hidráulica (Q) – Vazão

3.5.1 Formação Boa Vista (Nbv)

O Aquífero Boa Vista é poroso, contínuo, livre e de caráter regional. Apesar de ter espessura limitada é amplamente utilizado pela população do município de Boa Vista, nas proximidades do qual atinge espessuras de aproximadamente 40 m.

Assim, o Sistema Aquífero Boa Vista (SABV) é responsável por 70% do abastecimento urbano, principalmente por meio de uma rede abastecida por 102 poços tubulares sob o controle da Companhia de Águas e Esgotos de Roraima (CAER) (Secretaria de Planejamento de Roraima - SEPLAN, 2008).

Apresenta produtividades variando de alta, nas áreas de maior profundidade, a geralmente baixa, porém localmente moderada, nos locais onde tem menor profundidade. Quando superposta diretamente sobre o embasamento cristalino (Escudo das Guianas), mostrando apenas alguns poucos metros de profundidade é classificada como geralmente muito baixa, porém localmente baixa.

Em geral as águas presentes no Aquífero Boa Vista são pouco mineralizadas, sendo que a condutividade elétrica média encontrada para os poços existentes em sua área de ocorrência é 58,94 $\mu\text{S}/\text{c m}$. Já o pH médio é de 6,05. A pouca profundidade das águas do referido aquífero, é um facilitador para a contaminação do mesmo, sendo comuns indícios de contaminação microbiológica.

3.5.2 Unidades Fraturadas

O Embasamento Fraturado indiferenciado engloba rochas pertencentes ao Escudo das Guianas, configura um meio descontínuo, caracterizado pela ocorrência de reservatórios aleatórios que no conjunto formam uma unidade hidrogeológica. As informações hidrogeológicas são escassas nessa região e os aquíferos são fraturados, heterogêneos e anisotrópicos.

Apresenta predominantemente uma produtividade muito baixa, porém localmente baixa. As áreas mais elevadas do relevo são predominantemente áreas de recarga sendo que a produtividade é pouco produtiva ou não aquífera.

A qualidade das águas dos aquíferos fraturados é bastante variável e dependem das características das litologias presentes. O valor médio de condutividade elétrica encontrado para os poços correspondente a esses aquíferos é 103,85 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e o pH médio é 6,27.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 TIPOS DE AQUÍFEROS

Os tipos de aquíferos são definidos em função da pressão das águas nas suas superfícies limítrofes: superior chamada topo e inferior chamada base e em função da capacidade de transmissão de água das respectivas camadas limítrofes (GONÇALVES; GIAMPÁ, 2013) (Figura 6):

- Aquífero livre (não confinado): é aquele cujo limite superior é a superfície de saturação ou freático na qual todos os pontos se encontram à pressão atmosférica.
- Aquífero confinado: é aquele no qual a camada aquífera que está encerrada entre duas outras relativamente impermeáveis. Como o peso das camadas sobrejacentes é suportado pelo esqueleto sólido do aquífero confinado e pela água nele armazenada, a pressão reinante no aquífero confinado é superior à atmosférica. Em consequência, quando se atravessa a camada confinante, o nível da água sobe no furo realizado até o ponto em que se estabelece o equilíbrio com a pressão atmosférica da área considerada.
- Aquífero suspenso: é um caso especial de aquífero livre formado sobre uma camada impermeável ou semipermeável que não armazena e transmite água.
- Aquífero semiconfinado: é aquele que pelo menos uma das camadas limítrofes é semipermeável, permitindo a entrada ou saída de fluxos.

4.2 CLASSIFICAÇÃO HIDROGEOLÓGICA

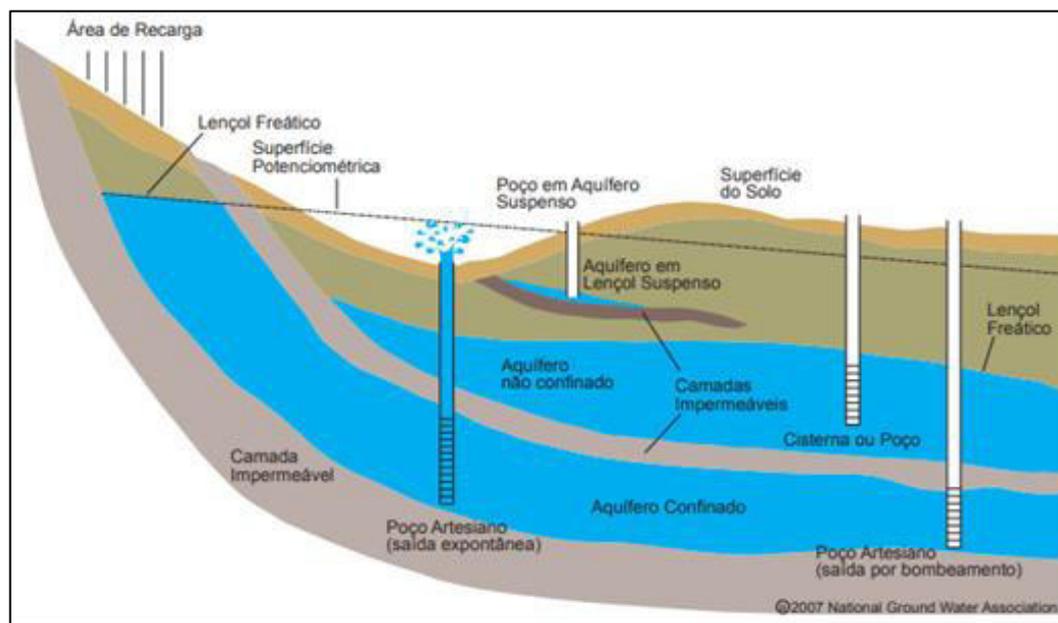
A classificação hidrogeológica dos sedimentos ou rochas porosas e fraturadas tendo por base as propriedades de estocagem (porosidade específica) e de fluxo ou transporte (permeabilidade ou condutividade hidráulica) – primária ou secundária – dos sedimentos ou rochas, podem ser qualificados em quatro tipos principais (GONÇALVES; GIAMPÁ, 2013) (Figura 6):

- Aquíferas: camadas de sedimentos ou corpos de rochas da região considerada que apresentam porosidade específica e permeabilidade relativamente altas, tais como sedimentos arenosos, rochas compactas muito fraturadas ou intemperizadas e sistemas cársticos bem desenvolvidos.
- Aquitardes: camadas ou corpos de rocha da área em questão que apresentam porosidade específica e permeabilidade relativamente baixa, tais como sedimentos argilosos,

misturas de areias, siltes e argilas em proporções variadas, rochas compactas pouco fraturadas ou intemperizadas e sistemas cársticos pouco desenvolvidos.

- Aquicludes: camadas ou corpos de rocha da área em questão que apresentam porosidade específica e permeabilidade praticamente nula, tais como camadas de sedimentos essencialmente argilosos, rochas compactas pouco fraturadas ou carstificadas.
- Aquifuges: camadas ou corpos de rocha muito compactas que apresentam porosidade e permeabilidade praticamente nulas, tais como rochas cristalinas – magmáticas e metamórficas – do embasamento geológico, blocos de quartzitos, basaltos, diabásios e assim por diante, não fraturados ou intemperizados.

Figura 6 - Sistema de aquíferos de meios isotrópicos



Fonte: COELHO (2015).

4.3 CLASSIFICAÇÃO HIDROQUÍMICA

A disponibilidade dos recursos hídricos subterrâneos para determinados tipos de uso depende, fundamentalmente, da qualidade físico-química, biológica e radiológica. O estudo hidrogeoquímico tem por finalidade identificar e quantificar as principais propriedades e constituintes das águas subterrâneas, procurando estabelecer uma relação com o meio físico (CPRM 2008).

Os processos e fatores que influem na evolução da qualidade das águas subterrâneas podem ser intrínsecos e extrínsecos ao aquífero. A princípio, a água subterrânea tende a

aumentar concentrações de substâncias dissolvidas à medida que se mover lentamente nos diferentes aquíferos. No entanto, muitos outros fatores interferem, tais como: clima, composição da água de recarga, tempo de contato água/meio físico, litologias atravessadas, além da contaminação causada pelo homem.

4.3.1 Interações água-rocha

O intemperismo é um conjunto de transformações que acontece nos minerais das rochas e sedimentos, influenciado por fatores físicos, químicos, geológicos e biológicos. O intemperismo químico envolve interações entre os minerais das rochas e solos e a água, por meio de processos e reações ácido-base, dissolução/precipitação, oxirredução. É um dos fenômenos geoquímicos mais importantes, que determina o tipo e a concentração dos constituintes nas águas subterrâneas e superficiais. Como o fluxo subterrâneo é mais lento, o tempo de resistência no contato água-rocha é maior e a composição da água, geralmente, é o reflexo da rocha pela qual circula. Os produtos gerados dependem dos minerais primários, formam-se produtos secundários, como minerais argilosos e argilominerais com propriedades eletrostáticas favoráveis às reações de troca iônica que contribuem para a evolução química natural da água.

4.3.2 Características físicas

A água é o único líquido inorgânico encontrado na natureza, sendo também o único composto químico que ocorre no meio ambiente nos três estados físicos, sólido, líquido e gasoso. É um ótimo solvente e uma substância quimicamente muito ativa, é capaz de incorporar grandes quantidades de substâncias ao entrar em contato com os minerais constituintes dos solos e rochas, nos quais circula. Enquadram-se nas características de propriedades físicas os seguintes aspectos: temperatura, cor, odor, sabor, turbidez, sólidos em suspensão, condutividade elétrica e salinidade.

4.3.3 Características químicas

Nas águas subterrâneas, a grande maioria das substâncias dissolvidas encontra-se no estado iônico (cátions e ânions). Alguns desses constituintes iônicos, os principais, estão presentes em quase todas as águas subterrâneas e a sua soma representa a quase totalidade de íons presentes. Uma breve descrição das principais características dos íons analisados neste trabalho segundo Custodio e Llamas (1983).

Ferro (Fe) – o ferro ocorre geralmente associado ao manganês e confere à água um sabor amargo adstringente e coloração amarelada e turva, decorrente de sua precipitação quando oxidado. O ferro pode estar presente com baixos teores ($< 0,3$ mg/L) em quase todas as águas, ocorrendo sob diversas formas químicas. Entretanto, a sua forma principal de ocorrência de Fe^{+3} (hidróxido férrico), podendo ocorrer também como Fe^{+2} (hidróxido ferroso). O ferro no estado ferroso é instável na presença do oxigênio do ar, mudando para o estado férrico. Os minerais ferromagnesianos, componentes dos diversos litotipos ou de solos lateríticos, tais como, piroxênios, olivinas e biotita, são os principais minerais portadores de ferro. Nos arenitos e nos folhelhos, os óxidos, os carbonatos e os hidróxidos de ferro constituem, muitas vezes, o material de cimentação. Alto teor de ferro na água subterrânea pode estar ligado à ocorrência de ferrobactérias ou mesmo à corrosão do revestimento ou filtro do poço.

Cloreto (Cl) – o cloreto, em geral, é muito solúvel, altamente deliquescente e muito estável em solução, logo, dificilmente precipita. Não oxida e nem se reduz em águas naturais. A alta solubilidade e o lento movimento das águas no aquífero vão provocando aumentos gradativos e constantes dos teores de cloretos nas águas subterrâneas na direção do fluxo. Apesar das rochas ígneas serem pobres em cloretos, estes são provenientes da lixiviação de minerais ferromagnesianos tanto nessas rochas como, principalmente, em rochas evaporíticas, tal como o sal gema. Os cloretos estão presentes em todas as águas naturais, com valores situados entre 10 a 250 mg/L. O cloreto é um bom indicador de poluição para aterros sanitários e lixões.

Nitrato (NO_3^-) – o nitrato é muito solúvel e dificilmente precipita. Em meios redutores, tem a tendência de ser estável, podendo passar a N_2 ou NH^+ e muito raramente para NO^- , em meio oxidante. É muito móvel e altamente deliquescente, podendo ser removido das camadas superiores do solo para a água (Bower, 1978). O nitrato ocorre em geral em pequenas concentrações, representando o estágio final da oxidação da matéria orgânica. Teores acima de 5 mg/L podem ser indicativos de contaminação da água subterrânea por atividades antrópicas, tais como esgotos, fossas sépticas, depósitos de lixo, cemitérios, adubos nitrogenados, resíduos de animais etc. Os resíduos de produtos proteicos provenientes de esgotos, fezes etc., são ricos em nitrogênio e se decompõem em nitratos na presença de oxigênio, de acordo com o ciclo do nitrogênio (nitrogênio orgânico, amônia, nitrito e nitrato). A oxidação do amoníaco (NH_3) para nitrito (NO_2^-) ocorre com a participação de bactérias especializadas do grupo nitrosomonas. A oxidação do nitrito para nitrato (NO^-) requer a participação de bactérias autótrofas do grupo nitrobactérias. A presença de nitrito (NO_2^-) na água subterrânea é um indicativo de poluição

recente. As águas subterrâneas apresentam, geralmente, teores de nitrato no intervalo de 0,1 a 10 mg/L, porém, em águas poluídas, os teores podem chegar a 1.000 mg/L. A água do mar possui em torno de 1 mg/L.

Sulfato (SO_4^{-2}) - são sais altamente deliquescentes e moderadamente solúveis a muito solúveis, exceto os sulfatos de estrôncio (SrSO_4) e os de bário (BaSO_4). Em água doce, o sulfato de cálcio (CaSO_4) satura a 1.500 mg/L e pode chegar até 7.200 mg/L em águas salinas. Em meio redutor, com abundante matéria orgânica, pode sofrer uma redução bacteriana a S ou S^{-2} , porém, em geral é estável. Origina-se da oxidação do enxofre presente nas rochas e da lixiviação de compostos sulfatados (gipsita e anidrita). As águas subterrâneas apresentam geralmente teores de sulfatos inferiores a 100 mg/L, principalmente na forma de SO_4^{-2} e HSO_4^- . Segundo Hem (1985), este último predomina nas águas muito ácidas ($\text{pH} < 2$), devido à dissociação incompleta do ácido sulfúrico. A água do Oceano Atlântico apresenta, em média 2.810 mg/L de sulfatos.

Manganês (Mn) - não ocorre livre, aparecendo principalmente na forma de MnO_2 (pirolusita), Mn_2O_3 (braunita), $\text{Mn}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (manganita), Mn_3O_4 (ausmanita), MnCO_3 (rodocresita) e silicato de manganês (rondonita). O manganês assemelha-se ao ferro, tanto quimicamente como em termos de ocorrência nas águas subterrâneas. É menos abundante que o ferro nas rochas, conseqüentemente, sua presença nas águas naturais é menos comum e a sua concentração, em geral, é muito menor que a do ferro. Ocorre principalmente sob a forma de Mn^{+2} podendo também ocorrer como Mn^{+3} . O manganês, no estado Mn^{+2} , é instável na presença do ar, mudando para o estado MnO quando a água que o contém é exposta ao ar, pois se oxida facilmente. O bicarbonato manganoso decompõe-se da mesma forma que o bicarbonato ferroso, deixando a água sob a forma de um depósito de cor negra e de aspecto fuliginoso, ao desprender-se o gás carbônico. O manganês e seus compostos são altamente persistentes na água, podendo levar mais de 200 dias para ser degradado. O manganês, freqüentemente, está presente com baixos teores ($< 0,2$ mg/L) em quase todas as águas naturais, sendo mais abundante nas águas ácidas. O manganês está na lista de substâncias perigosas da EPA (United States Environmental Protection Agency), podendo levar à morte animais, pássaros, peixes e vegetais.

Fluoreto (F⁻) - possui solubilidade limitada e pouco contribui para a alcalinidade da água, pois sofre hidrólise rapidamente. Os fluoretos, freqüentemente são encontrados em pequenas concentrações nas águas subterrâneas. A principal fonte de fluoretos em rochas ígneas é a

fluorita. Normalmente, ocorrem com concentrações entre 0,1 e 1,5 mg/L nas águas naturais, podendo chegar, às vezes, até 10 mg/L e, raramente, a 50 mg/L em águas muito sódicas com pouco cálcio. Nas águas dos oceanos, seus valores estão situados entre 0,6 a 0,7 mg/L. Em regiões áridas, os fluoretos podem aparecer com quantidades elevadas. A presença do cálcio limita a concentração do flúor. O flúor, em baixos teores, até 1,5 mg/L é benéfico à saúde, na prevenção de cáries dentárias de crianças em fase de crescimento. Acima deste teor já é prejudicial, causando manchas nos dentes (fluorose dental) e deformação dos ossos. Doses excessivas levam o homem à morte. É muito tóxico para os vegetais.

Fósforo (P) - a importância do fósforo decorre do papel que desempenha no metabolismo biológico (armazenamento de energia e estruturação celular). Ocorre em águas naturais sob a forma de fosfatos, sendo agrupados como fosfato orgânico dissolvido (ortofosfatos), fosfato particulado, fosfato total dissolvido e fosfato total. A principal forma de fosfato assimilada pelos vegetais é o ortofosfato. O fósforo é muito difundido na crosta terrestre (cerca de 12% de sua composição), sendo encontrado em mais de 250 minerais. O mineral de fósforo mais importante é a apatita. Segundo Mathess & Harvey (1982), devido à ação dos microrganismos, a concentração de fosfato, geralmente é baixa (0,01 a 1,0 mg/L) em águas naturais. Valores acima de 1,0 mg/L, geralmente são indicativos de águas poluídas. O fósforo por via antropogênica pode ser acrescido às águas subterrâneas por derivados de fertilizantes, detergentes, efluentes domésticos, inseticidas e pesticidas. A presença de Ca^{+2} limita a concentração do fosfato e a ocorrência do CO_2 dissolvido a favorece. O fosfato apresenta uma nítida tendência para formar compostos com vários íons e ligações fortes com os minerais de argila.

Alumínio (Al) - O alumínio pode ocorrer na água em diferentes formas e sua concentração depende de fatores físicos, químicos e geológicos. As concentrações do alumínio dissolvido em águas com pH próximo a neutro geralmente estão entre 0,001 e 0,05 mg/L, mas aumentam para 0,5–1 mg/L em águas mais ácidas ou ricas em matéria orgânica, podendo chegar a valores acima de 90 mg/L em águas extremamente acidificadas afetadas por drenagem ácida de mineração.

Nitrito (NO_2) - A presença de nitrito na água indica contaminação recente, que procede de matéria orgânica ou de decomposição biológica a partir da ação de microrganismos sobre o nitrogênio amoniacal, ou ainda, de ativos que inibem a corrosão em instalações industriais. Pela

forma como se produz no ambiente e pelo seu potencial contaminador e prejudicial à saúde, se faz importante a verificação da presença de nitrito na água de consumo humano.

A origem do nitrogênio pode ser natural, proveniente de proteínas e de outros compostos biológicos presentes na composição celular de microrganismos e de origem antrópica como dejetos domésticos e industriais, fezes de animais e fertilizantes.

Amônia quaternária (NH₃) - São surfactantes catiônicos altamente tóxicos contra microrganismos (fungos, bactérias e vírus) e por isso, são conhecidamente agentes com ação biocida. São bastante utilizados por diversos ramos da indústria (farmacêutica, alimentícia, etc.) como desinfetantes ou sanitizantes (Nguyen et al., 2017). Recentemente, alguns produtos à base de amônia quaternária têm sido testados na agricultura, como potencial ferramenta no controle de fitopatógenos causadores de doenças em plantas.

4.4 TESTE DE BOMBEAMENTO

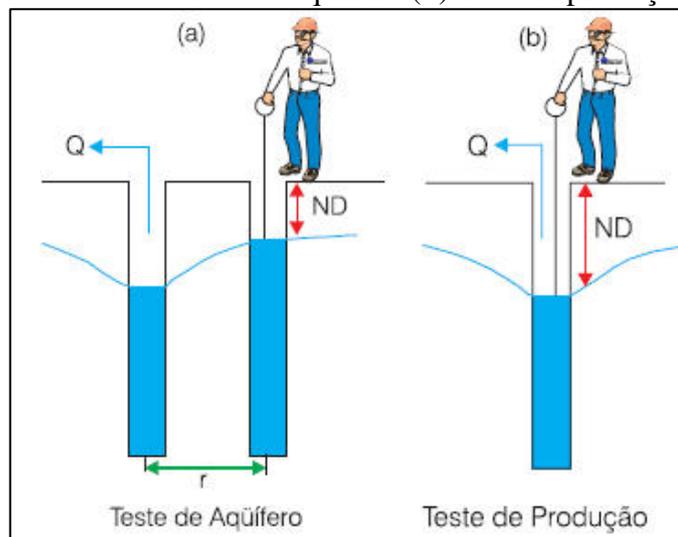
Conforme Feitosa et al. (2008), os testes de bombeamento representam, para obtenção dos parâmetros hidrodinâmicos, sem nenhuma dúvida, a forma de mais fácil aplicação e maior garantia em seus resultados. Esta técnica é usada tradicionalmente para obtenção dos parâmetros hidrodinâmicos para que fatores do desempenho do aquífero possam ser calculados (teste do aquífero) e o outro para obtenção de informações sobre o desempenho e eficiência do poço em teste (teste de produção).

O programa de teste deve juntar todas as informações hidrogeológicas disponíveis tais como: tipo de sistema aquífero; litologia das rochas atravessadas; espessura do aquífero e seus limites prováveis; níveis piezométricos e amplitude de variação; vazões e rebaixamento medidos durante a perfuração e no desenvolvimento.

4.4.1 Teste de aquífero

O teste de aquífero é um bombeamento que tem por finalidade a determinação dos parâmetros hidrodinâmicos do meio poroso: transmissividade (T), coeficiente de armazenamento (S) e condutividade hidráulica (K). A sua execução consiste no bombeamento de um poço, com vazão constante Q , e no acompanhamento da evolução dos rebaixamentos produzidos em um (ou mais de um) poço de observação situado a uma distância r qualquer do poço bombeado, Figura 7.

Figura 7 - Tipos de testes de bombeamento. (a) teste de aquífero (b) teste de produção



Fonte CPRM (2008).

4.4.2 Teste de produção

Nos testes de produção podemos obter as informações de vazão crítica, perdas de carga do aquífero, perdas de carga do poço e eficiência hidráulica (FREEZE; CHERRY, 1979).

Sua execução consiste na realização de um bombeamento e no registro da evolução dos rebaixamentos no próprio poço bombeado. Podem ser realizados em múltiplas etapas ou numa etapa única de bombeamento. Os mais indicados são os testes de produção em múltiplas etapas, onde, cada etapa, a vazão deve aumentar, de modo que $Q_1 < Q_2 < Q_3 < Q_k$ (sendo Q_i a vazão da etapa i de bombeamento, e $i=1,2,3\dots k$).

Entretanto, durante o período de tempo correspondente a cada etapa, a vazão deve ser mantida constante. O ideal é que a vazão aumente em progressão geométrica, devendo-se escalonar a vazão entre um mínimo e um máximo, em função do rendimento da bomba. É recomendável que a maior vazão (Q_k) seja da mesma ordem de grandeza (ou superior) daquela

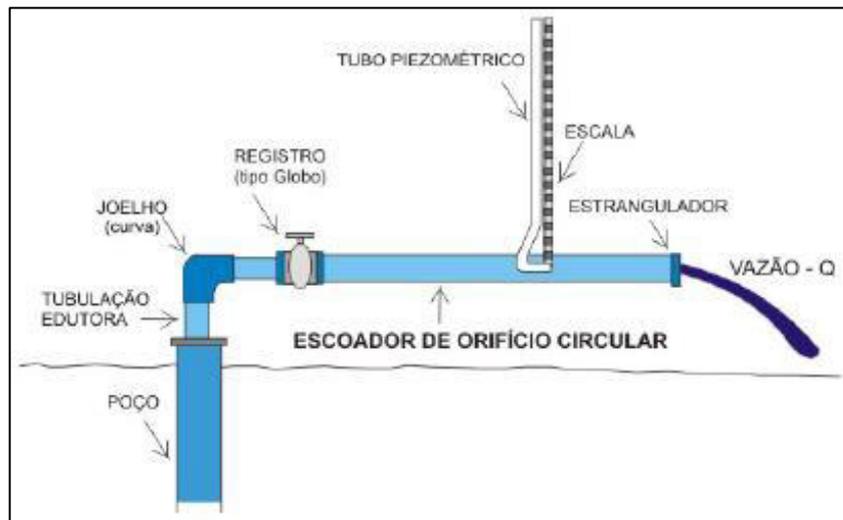
cogitada como vazão de exploração. Esta recomendação é calculada no fato de ser a curva obtida ($BQ + CQ^n$) rigorosamente válida para o intervalo compreendido entre as vazões externas (Q_1 e Q_k), sendo as extrapolações pouco confiáveis.

4.4.3 Características hidrodinâmicas

Segundo Custódio e Llamas (1983), as vazões de um teste de bombeamento devem obedecer a uma progressão geométrica positiva, onde a última delas deve ser próxima da vazão de exploração esperada, porém superior.

Para a realização dos testes de bombeamento, é utilizado o equipamento escoador de orifício circular para um preciso controle da vazão (erro de até 4%), Figura 08.

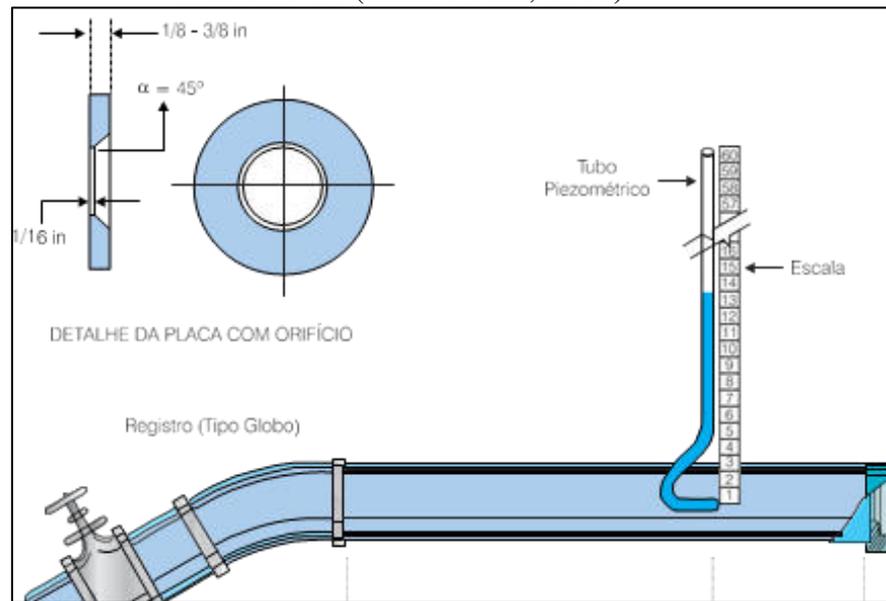
Figura 8 - Escoador de orifício circular



Fonte: CPRM (2008).

Este equipamento consiste de um tubo de descarga horizontal, que é conectado à saída da tubulação edutora, através de um joelho, existindo, entre ambos, um registro (válvula). Na saída desse tubo de descarga, existe uma placa em aço, circular perfurada no centro, estrangulando o fluxo de água. A um terço do final da tubulação, existe uma saída, no centro horizontal, para a tomada piezométrica Figura 9.

Figura 9 - Escadouro de orifício circular mostrando detalhes construtivos (DRISCOLL, 1986)



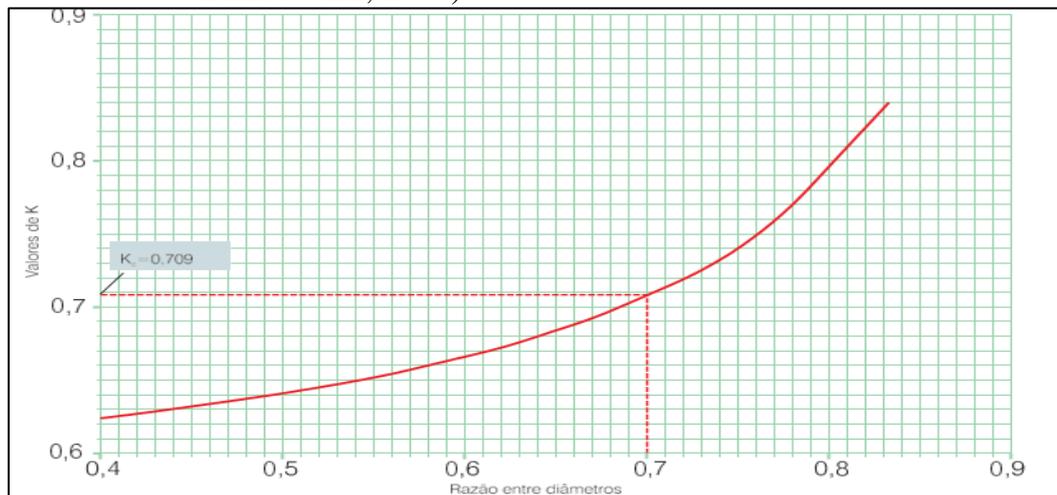
Fonte: CPRM (2008).

Variando-se as vazões mínimas, aplicando-se uma razão geométrica, é possível a determinação das alturas manométricas do piezômetro através de equação de Driscoll (1986);

$$Q = 4,43.K.A.h^{1/2}. \quad (1)$$

A variável K da fórmula é determinada graficamente, enquanto as variáveis A e h são, respectivamente, a área do orifício e a altura manométrica acima do centro do orifício (Pitot), Figura 10.

Figura 10 - Gráfico para avaliação da constante Ke em função da razão diâmetro do orifício diâmetro do tubo (adaptado de DRISCOLL, 1986)



Fonte: CPRM (2008).

4.4.3.1 Curva Característica do Poço

O rebaixamento total que ocorre em um poço em bombeamento é o somatório das perdas de cargas existentes (FREEZE; CHERRY, 1979, GONÇALVES; GIAMPÁ, 2013), as quais podem ser divididas em lineares e não lineares.

As perdas lineares, em presença de um bombeamento, são as que ocorrem no aquífero, em função do fluxo laminar de água para o poço. São representadas pelos rebaixamentos produzidos na superfície potenciométrica ou freática formando o cone de depressão.

As perdas não lineares são as que ocorrem no próprio poço bombeado e nas suas vizinhanças causadas por perdas por não validade da Lei de Darcy nas vizinhanças do poço, perdas na passagem da água pelo filtro e pré-filtro, perdas ascensionais no poço e perdas de entrada na bomba.

O cálculo do rebaixamento real no próprio poço bombeado é dado pela equação característica do poço;

$$S_p = BQ + CQ^n \quad (2)$$

Em que:

S_p = rebaixamento real no poço bombeado;

BQ = perdas lineares;

CQ^n = perdas não lineares

B = coeficiente de perdas de circulação no aquífero;

C = coeficiente de perdas no poço;

n = expoente de Q . Segundo a aproximação de Jacob em torno de 2.

Para esse sistema ter solução, é necessário que as seguintes condições sejam observadas:

1. Vazões devem ser crescentes: $Q_1 < Q_2 < Q_3 < \dots < Q_n$;
2. O aumento das vazões deve seguir uma progressão geométrica;
3. Os testes em aquíferos intergranulares deverão ser executados através de um bombeamento contínuo por um período de, no mínimo, 24 horas, ou até a completa estabilização dos níveis, que só ocorre com frequência em poços captando aquíferos rasos (dunas, aluviões, coberturas) próximos a massas de água superficial;
4. O rebaixamento específico (s/Q) deve ser decrescente.

4.4.3.2 Transmissividade

Segundo Fetter (1994), a transmissividade é um parâmetro hidráulico que corresponde à quantidade de água que pode ser transmitida horizontalmente por toda a espessura saturada do aquífero. Seria a taxa de escoamento da água através de uma faixa vertical do aquífero com

largura unitária submetida a um gradiente hidráulico unitário (FREEZE; CHERRY, 1979). O cálculo do valor de Transmissividade, é dado pela equação de Cooper-Jacob:

$$T = \frac{2,3 Q}{4\pi (h_1 - h_2)} \log_{10} \frac{(t_2)}{(t_1)} \quad (3)$$

4.4.3.3 Condutividade Hidráulica

Conceitualmente, torna-se necessário diferenciar os parâmetros de condutividade hidráulica (K) e permeabilidade, sendo que o primeiro representa a capacidade do solo em facilitar o escoamento de água, enquanto que o segundo se relaciona às características inerentes do meio (textura, porosidade, estrutura, dentre outros) (FEITOSA et al., 2008).

A avaliação da condutividade hidráulica é feita utilizando-se técnicas de campo e de laboratório, enquanto a permeabilidade pode ser definida por análises de textura (laboratório), estrutura (observação de campo), dentre outras.

Para o cálculo da condutividade hidráulica pode ser utilizado a equação de Dupuit-Thiem:

$$K = T / \Delta H. \quad (4)$$

Onde:

T – Transmissividade

ΔH – Espessura da camada filtrante

4.4.3.4 Vazão Específica

Vazão específica (Q/s) é a razão entre vazão de bombeamento (Q) e o rebaixamento (S) produzido no poço em função do bombeamento, para um determinado tempo. Vazão específica é calculada a partir da análise da média do período de bombeamento (FITTS, 2014).

4.4.3.5 Coeficiente de Armazenamento

O coeficiente de armazenamento (FITTS, 2014) também pode ser estimado com base em construção gráfica de s versus log t. Extrapolando-se a tendência linear para obter o tempo t_0 correspondente ao rebaixamento $s = 0$. Assim, para $s = 0$ (rebaixamento nulo), tem-se:

$$S = \frac{2,25 T t_0}{r^2} \quad (5)$$

Para o cálculo do coeficiente de armazenamento utiliza-se um poço de observação para monitoramento dos rebaixamentos.

4.4.3.6 Eficiência do Poço

Para cálculo da eficiência do poço utiliza-se a equação característica do poço (FEITOSA et al., 2008):

$$e = \frac{BQ}{BQ + CQ^2} \quad (6)$$

Onde:

e = eficiência do poço em %;

B = coeficiente de perdas lineares (laminares);

C = coeficiente de perdas não lineares (turbulentas);

Q = vazão em m³/h.

4.5 EXPLORAÇÃO DE AQUÍFEROS

A superexploração dos aquíferos leva a efeitos negativos até pouco tempo atrás desconhecidos pela sociedade. Os efeitos do bombeamento excessivo podem ser delineados através dos seguintes aspectos (BATISTA, 2015):

1. Hidráulico: relacionado à exaustão física do aquífero.
2. Qualidade da água: queda na qualidade da água a níveis inaceitáveis.
3. Econômico: caracterizado pelo aumento exacerbado nos custos de bombeamento.
4. Ecológico: relacionado à diminuição da vazão de rios e outros corpos d'água e extinção da flora e fauna dependentes do aquífero.
5. Geotécnico: identificando como a perda da estabilidade de terrenos devido à retirada de água no aquífero.
6. Ético e social: relacionado à distribuição desigual dos recursos hídricos.

4.6 LEGISLAÇÃO

A Lei n. 9.433, de 8 de janeiro de 1997, institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos – SINGREH. São apresentados como diretrizes que água é um bem econômico, de domínio público, o uso prioritário para consumo humano, o uso múltiplo, o gerenciamento por bacias hidrográficas e a gestão descentralizada e participativa. Dentre outros, estabelece os instrumentos de gestão e destaca que as águas subterrâneas estão sujeitas a outorga.

Segundo Hager (2007) apesar do conceito incluir os recursos hídricos subterrâneos, não deixa claro as questões subterrâneas e não há indicação do tratamento das províncias hidrogeológicas em relação as bacias hidrográficas.

A concepção, até a pouco tempo atrás, de que por serem de domínio estadual a normatização para as águas subterrâneas deveria se dar a partir do estado, fez com que por muito tempo não houvesse uma orientação nacional e geral para as questões sobre recursos hídricos subterrâneos.

A legislação federal mais antiga (com exceção do Código de Águas) correlacionada às águas subterrâneas está ligada às águas minerais (legislação mineral), a proteção do meio ambiente (legislação ambiental) e a qualidade da água para consumo humano (legislação sobre saúde pública).

Entre as principais legislações ambientais que devem ser aplicadas às águas subterrâneas estão:

1. Lei 6.938/1, de 31 de agosto de 1981;
Institui a Política Nacional de Meio Ambiente - PNMA, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação.
2. Decreto n. 4.297, de 10 de julho de 2002;
Regulamenta o inciso II do art. 9 desta Lei, estabelecendo critérios para o Zoneamento Ecológico-Econômico do Brasil – ZEE.
3. Lei n. 9.605, de 12 de fevereiro de 1998;
Trata das sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, regulamentada pelo Decreto n. 3.179, de 21 de setembro de 1999.
4. Lei 9.795, de 1999 – Lei de Educação Ambiental;
Dispõe sobre a educação ambiental, institui a Política Nacional de Educação Ambiental e dá outras providências.
5. Lei 9.985/00, de 18 de julho de 2000 -Lei do SNUC;
Regulamenta o art. 225 § 1, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal/88, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza.
6. Resoluções do Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA:
 - a) CONAMA n. ° 303, de 2002;
Dispõe sobre parâmetros, definições e limites de Áreas de Preservação Permanente, inclusive conceituando nascentes como exutório de águas subterrâneas.
 - b) CONAMA n. 335, de 2003;
Dispõe sobre o licenciamento ambiental de cemitérios.
 - c) CONAMA n° 357, de 2005;
Dispõe sobre a classificação dos corpos de água superficial e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de efluentes.

d) CONAMA n. 396, de 2008;

Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento de águas subterrâneas.

No âmbito da legislação estadual do Estado de Roraima podemos citar:

7. Lei Complementar n. 007, de 1994;

Institui o Código de Proteção ao Meio Ambiente para a Administração da Qualidade Ambiental, Proteção, Controle e Desenvolvimento do Meio Ambiente e uso adequado dos Recursos Naturais do Estado de Roraima.

4.6.1 Conama n. 396, de 2008

A Resolução CONAMA nº 396/2008, relaciona-se ao enquadramento da qualidade da água (classe) a ser alcançado ou mantido em um aquífero ou conjunto de aquíferos ou porção desses. As classes são definidas em função do conjunto de condições e padrões de qualidade (VRQ2 e VMP3) para atender aos usos preponderantes atuais e futuros. A condição representa a qualidade da água num dado momento frente aos requisitos de qualidade dos usos preponderantes previstos, que incluem consumo humano, dessedentação de animais, irrigação e recreação. Os respectivos VMP para cada uso constam no Anexo I da Resolução.

Foram estabelecidas as classes especial, 1, 2, 3, 4 e 5. A classe especial engloba águas subterrâneas destinadas à preservação de ecossistemas em unidades de conservação de proteção integral e as que contribuam para trechos de água superficial, enquadrados como classe especial. As classes de 1 a 4 são definidas conforme o impacto antrópico na qualidade natural, estabelecido pelo respectivo padrão de qualidade da água. A classe 5 agrupa águas com alteração em sua qualidade por atividades antrópicas destinadas a atividades sem requisitos para uso. A Tabela 3 reúne os principais critérios estabelecidos para substâncias inorgânicas para as classes de 1 a 4. É um esquema simplificado para o entendimento e aplicação do processo de classificação. A Tabela completa com todos os parâmetros está disponível no anexo I desta resolução.

Tabela 3 - Lista de parâmetros para substâncias inorgânicas, com maior probabilidade de ocorrência em águas subterrâneas, seus respectivos Valores Máximos Permitidos (VMP) para cada um dos usos considerados como preponderantes e os limites de quantificação praticáveis (LQP)

| Parâmetros | Usos Preponderantes da Água | | | | LQP Praticável |
|----------------------------|-----------------------------|--------------------------|-----------|-----------|-------------------|
| | Consumo Humano | Dessedentação de animais | Irrigação | Recreação | |
| Inorgânicos | µg.L-1 | | | | |
| Alumínio | 200 | 5.000 | 5.000 | 200 | 50 |
| Antimônio | 5 | | | | 5 |
| Arsênio | 10 | 200 | | 50 | 8 |
| Bário | 700 | | | 1.000 | 20 |
| Berílio | 4 | 100 | 100 | | 4 |
| Boro | 500 | 5.000 | 500 | 1.000 | 200 |
| Cádmio | 5 | 50 | 10 | 5 | 5 |
| Chumbo | 10 | 100 | 5.000 | 50 | 10 |
| Cianeto | 70 | | | 100 | 50 |
| Cloreto | 250.000 | | 100.000 | 400.000 | 2000 |
| Cobalto | | 1.000 | 50 | | 10 |
| Cobre | 2.000 | 500 | 200 | 1.000 | 50 |
| Crômio | 50 | 1.000 | 100 | 50 | 2000 |
| Ferro | 300 | | 5.000 | 300 | 10 |
| Fluoreto | 1.500 | 2.000 | 1.000 | | 500 |
| Lítio | | | 2.500 | | 100 |
| Manganês | 100 | 50 | 200 | 100 | 25 |
| Mercúrio | 1 | 10 | 2 | 1 | 1 |
| Molibdênio | 70 | 150 | 10 | | 10 |
| Níquel | 20 | 1.000 | 200 | 100 | 10 |
| Nitrato (expresso em N) | 10.000 | 90.000 | | 10.000 | 300 |

| Parâmetros | Usos Preponderantes da Água | | | | LQP Praticável |
|----------------------------------|-----------------------------|--------------------------|-----------|-----------|-------------------|
| | Consumo Humano | Dessedentação de animais | Irrigação | Recreação | |
| Nitrito (expresso em N) | 1.000 | 10.000 | 1.000 | 1.000 | 20 |
| Inorgânicos | µg.L-1 | | | | |
| Prata | 100 | | | 50 | 10 |
| Selênio | 10 | 50 | 20 | 10 | 10 |
| Sódio | 200.000 | | | 300.000 | 1000 |
| Sólidos Totais Dissolvidos (STD) | 1.000.000 | | | | 2000 |
| Sulfato | 250.000 | 1.000.000 | | 400.000 | 5000 |
| Urânio | 15 | 200 | 10 | | |
| Vanádio | 50 | 100 | 100 | | 20 |
| Zinco | 5.000 | 24.000 | 2.000 | 5.000 | 100 |

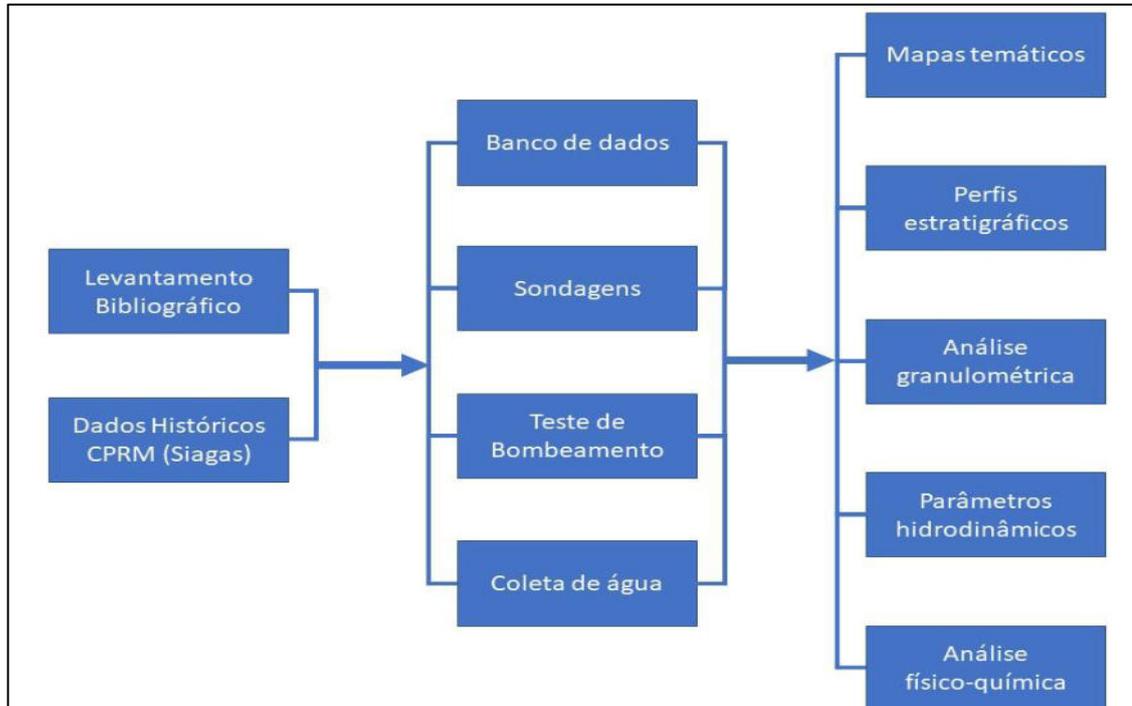
5 METODOLOGIA

Para a execução do trabalho proposto (Figura 11), inicialmente realizou-se o estudo minucioso sobre os artigos, teses e livros com a bibliografia referente ao tema proposto. Mapas existentes (geológicos, geoquímicos, geofísicos, hidrogeológicos) preferencialmente nas escalas de 1:50.000 e 1:100.000 que permitiram o melhor reconhecimento dos controles geológicos, geoquímicos e estruturais, facilitando, portanto, a seleção de áreas para o estudo. Ainda durante esta etapa foi criado um banco de dados contendo informações de poços dentro da mega região na Bacia hidrográfica do Rio Cauamé (anexo D), sendo que o cadastro do SIAGAS (CPRM, 2019), que é um cadastro geral de poços da CPRM, disponibilizando informações de níveis estáticos (NE), níveis dinâmicos (ND) e vazões (VZ), Figura 12.

Após a criação e integração do banco de dados, foram definidas as áreas de recarga e descarga do aquífero, possivelmente, sistemas alimentados pelo aquífero fissural e/ou pelo aquífero granular.

Para a criação do banco de dados foi utilizados um conjunto de softwares tais como Esri ArcGIS, Gesoft Oasis montaj, Golden Surfer e Blue Marble Geographics Global Mapper.

Figura 11 - Fluxograma das etapas desenvolvidas no projeto



Fonte: O Autor.

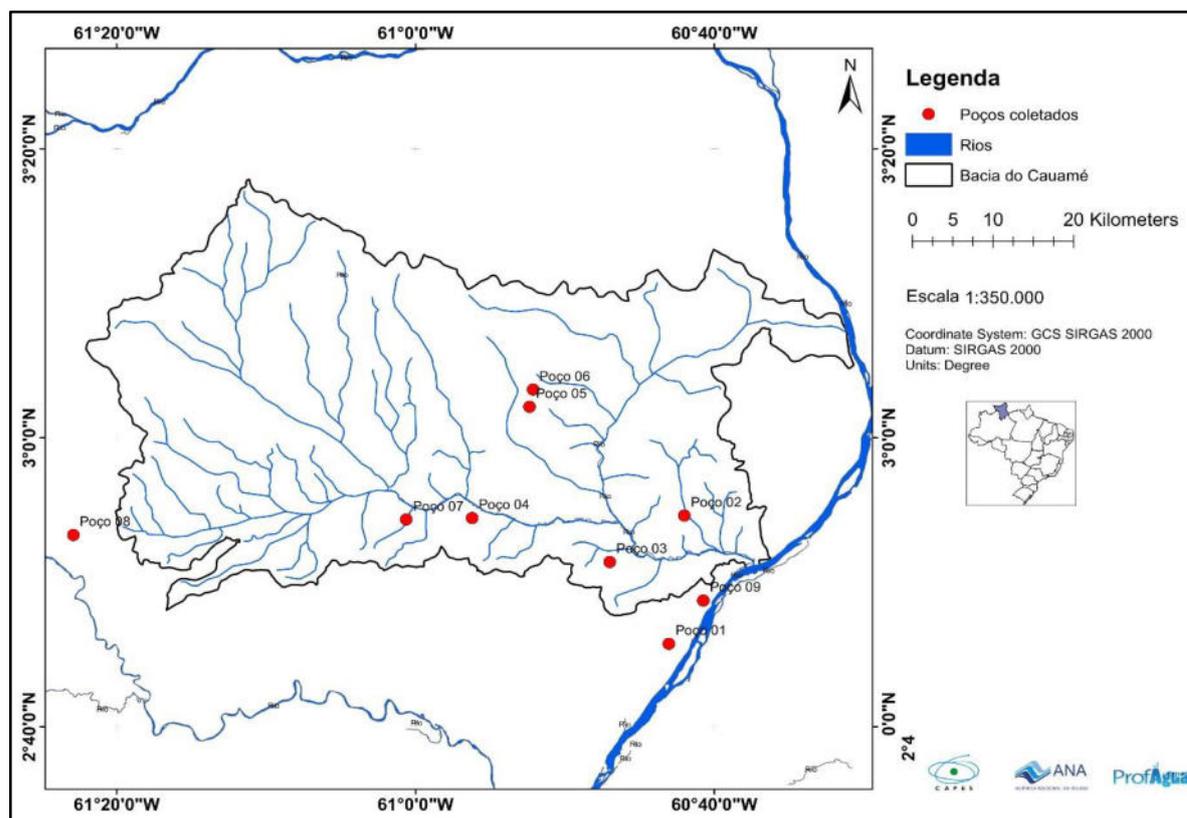
Figura 12 - Etapas do geoprocessamento utilizando o banco de dados



Fonte: O Autor.

Em seguida foram selecionados nove poços (Figura 13) que foram estudados minuciosamente, dentre eles foram analisados dados das amostras de sondagens para análise granulométrica, análise da água através de Fotômetro, medições diretas de Nível estático (NE), Vazão (VZ) e testes de bombeamento.

Figura 13 - Mapa de localização dos poços estudados



Fonte: O Autor.

Em seguida selecionou-se três poços para que fosse realizado um reconhecimento expedido, onde foram coletadas amostras de água nos poços tubulares para medição dos parâmetros físico-químicos in loco através de fotômetro, seguindo as técnicas de coletas descrita no manual da CPRM (2008). As amostras foram coletadas diretamente na boca dos poços. Dessa maneira, no campo, no instante da coleta, foram realizadas as medidas de pH, temperatura da água, condutividade elétrica, alcalinidade, ferro, cloreto, nitrato, sulfato, manganês, fluoreto, fósforo, alumínio, nitrito e amônia quaternária.

Ainda formam realizados dois testes de bombeamento em poços tubulares para definição das características hidrodinâmicas e capacidade de exploração do aquífero segundo Feitosa et al. (2008).

Segue abaixo uma tabela com as coordenadas e os estudos que foram realizados nos poços tubulares.

Tabela 4 - Localização dos poços tubulares estudados e testes realizados

| Nº do Poço | COORDENADAS POÇOS | TESTES |
|-------------------|---------------------------------|---|
| Poço 01 | 60°43'0,581"W 2°45'43,795"N | Sondagem Medição de NE e VZ |
| Poço 02 | 60°41'56,335"W 2°54'39,174"N | Sondagem, Análise química Medição de NE e VZ |
| Poço 03 | 60°46'58,289"W 2°51'20,013"N | Análise química Medição de NE e VZ |
| Poço 04 | 60°56'12,941"W 2°54'22,042"N | Sondagem Medição de NE e VZ |
| Poço 05 | 60°52'23,799"W 3°2'8,892"N | Sondagem Medição de NE e VZ |
| Poço 06 | 60°52'10,95"W 3°3'21,704"N | Sondagem Medição de NE e VZ |
| Poço 07 | 61°0'36,347"W 2°54'19,9"N | Teste de aquífero Teste de produção |
| Poço 08 | 61°22'53,295"W 2°53'17,154"N | Sondagem Medição de NE e VZ |
| Poço 09 | 60°40'47,211"W 2°48'23,084"N | Teste de produção |

Após a interpretação e integração será possível observar aspectos de interesse sobre os aquíferos investigados como:

1. Entendimento da relação rocha/água;
2. Compreensão da evolução da composição química natural das águas subterrâneas assim como o fluxo nos reservatórios;
3. Reconhecimento de anomalias hidrogeoquímicas;
4. Gerar mapas temáticos tais como, potenciométricos e vazões de referência.

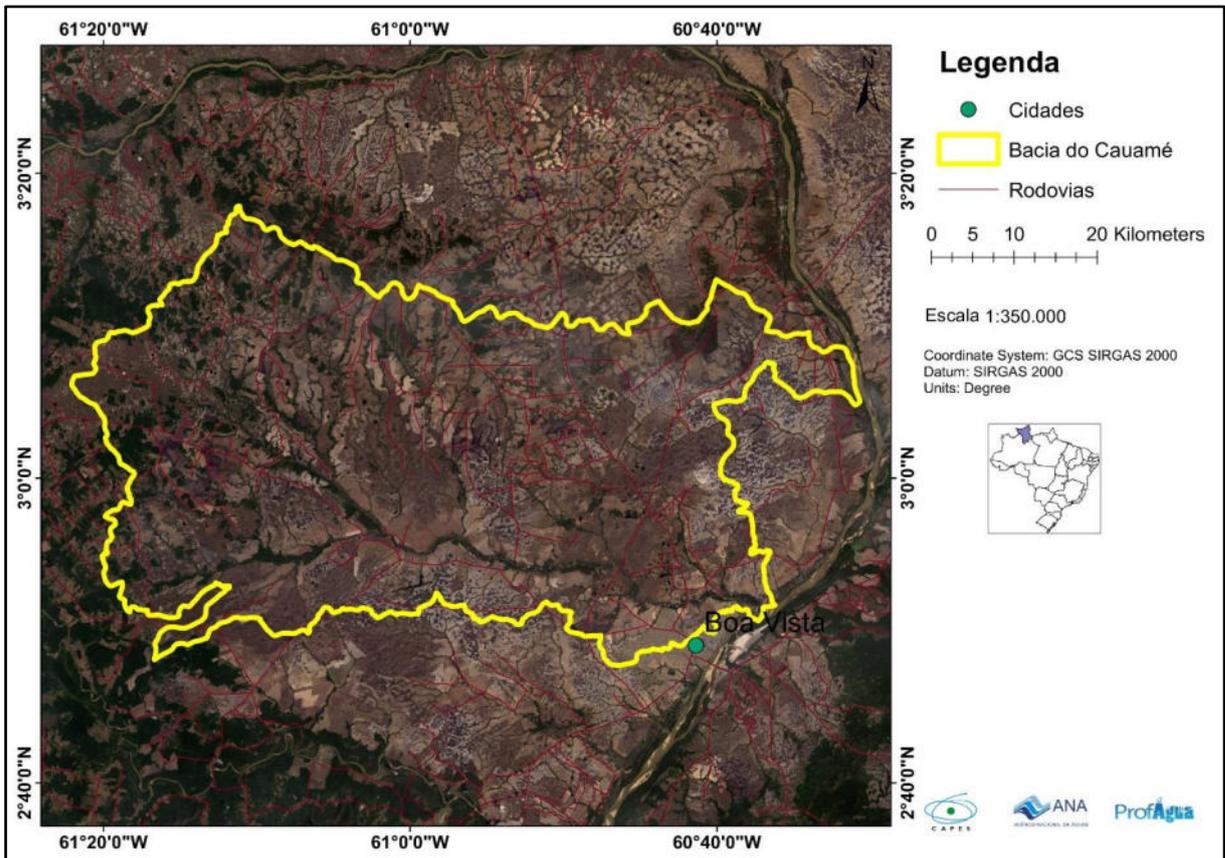
5.1 LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo localiza-se no setor centro-nordeste do Estado de Roraima, abrangendo os Municípios de Boa Vista e Alto Alegre, englobando a Folha NA-20-X-D (Boa Vista), Figura 14.

A Região de estudo limita-se ao norte com o município de Normandia, Amajari e Pacaraima, a leste com a município de Bonfim, a oeste com o município de Alto Alegre, ao sul com os municípios do Cantá e Mucajaí.

O foco central será a Bacia hidrográfica do Rio Cauamé, uma vez que a região é ocupada por diversos empreendimentos agrícolas e bordeja a área urbana da Cidade de Boa Vista.

Figura 14 - Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Rio Cauamé



Fonte: O Autor.

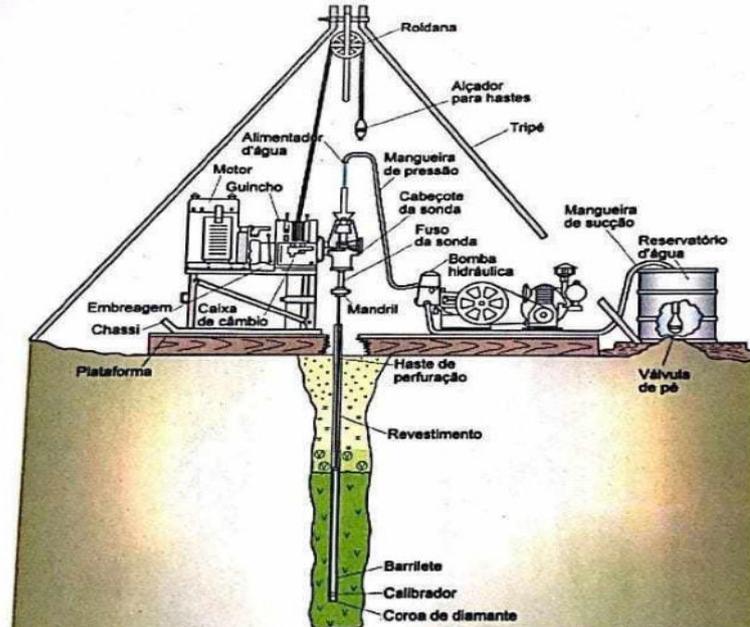
5.2 SONDAGEM ROTATIVA

O sistema rotativo de perfuração combina o efeito provocado por um peso sobre uma broca que gira, cortando e desagregando a rocha, com o movimento de um fluido em circulação contínua, que remove os detritos cortados, levando-os até a superfície, Figura 15.

O fluido de perfuração preparado num tanque de lama é injetado no poço através das hastes de perfuração, na sua parte interna da coluna de perfuração, saindo pelos orifícios localizados na parte inferior da broca. Pela ação da bomba de lama, o material cortado é trazido à superfície, onde é peneirado, e a parte fluida, isenta de sólidos em suspensão, retorna ao poço passando pelo tanque.

A perfuratriz rotativa consiste em uma torre e o apoio de um guincho que sustenta a coluna de perfuração. De um motor que transmite energia para a mesa rotatória, com o objetivo de girar e conferir torque à coluna de perfuração. A coluna de perfuração é sustentada por uma roldana presa à torre, tendo na sua extremidade um conjunto de peças denominadas de swivel e kelly, para manutenção da estrutura de perfuração, injeção de fluido de perfuração e obtenção do torque desejado à rotação do conjunto.

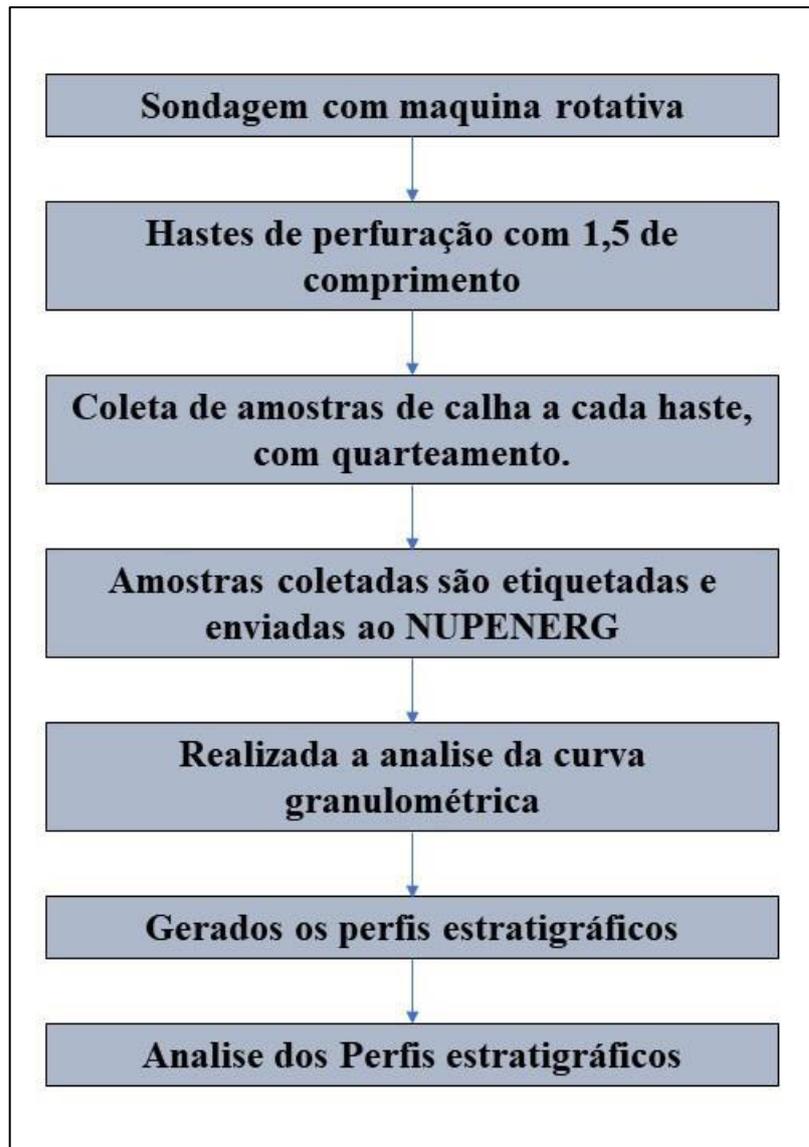
Figura 15 - Desenho esquemático de uma sonda rotativa



Fonte: Indústria e Comércio de Equipamentos para Mineração e Sondagem.

Durante o processo de perfuração e retorno do material triturado pela broca o mesmo é coletado na caixa de amostra. A cada 1,5 metro o material que sobe a superfície é concentrado e armazenado em sacos de 5 litros, etiquetados e armazenados para a posterior análise em laboratório, Figura 16.

Figura 16 - Fluxograma das etapas das sondagens



Fonte: O Autor.

5.3 ENSAIOS EM LABORATÓRIO

Para estimar a permeabilidade em laboratório, foram utilizados os métodos empíricos baseados nas curvas granulométricas de Hazen (FETTER, 1994), aplicável a areias que contenham o d_{10} com valores entre 0,1 a 3,0 mm. A fórmula que se aplica a este método é:

$$K = C(d_{10})^2 \quad (7)$$

Onde:

K = condutividade hidráulica [L / T]

d_{10} = diâmetro efetivo [L]

C = é um coeficiente baseado no intervalo granulométrico (FETTER, 1994).

Concomitantemente ao teste de ensaio de permeabilidade é realizado o quarteamento das amostras através da curva granulométrica, no qual é descrito o intervalo granulométrico que possui a maior concentração de grãos, representando, portanto, a maior população dentro daquele intervalo. Resultando na montagem dos perfis estratigráficos.

5.4 PLANEJAMENTO DO TESTE DE BOMBEAMENTO

5.4.1 Testes de Produção

Sugestão I – Realizar um teste escalonado sem estabilização de nível, com três ou quatro vazões e duração total de 3 a 7 horas (Etapa I) – recomendam-se quatro escalões. Após a recuperação satisfatória do nível estático, procede-se ao Teste Contínuo com Vazão Única e duração mínima de 24 (vinte e quatro) horas (Etapa II). Esta vazão poderá ser maior, igual ou até menor (raramente) que as vazões do Teste Escalonado, Figura 17.

Vantagens – Pode projetar com uma boa margem de segurança a vazão do Teste Contínuo com Vazão Única versus rebaixamento a ser alcançado. Permite avaliar a precisão da Equação Característica do Poço, comparando-se os rebaixamentos calculados com os rebaixamentos observados no Teste Contínuo com Vazão Única (2ª etapa).

Desvantagens – Entre a realização do Teste Escalonado (1ª etapa) e o Teste Contínuo com Vazão Única (2ª etapa), faz-se necessário que haja uma espera pela recuperação satisfatória do Nível Estático.

Para calcular os rebaixamentos a partir do segundo escalão, há necessidade de se fazer uma correção em função dos efeitos da superposição dos escoamentos produzidos pelas vazões anteriores – Princípio da Continuidade. Em função destas correções dos rebaixamentos serem calculadas por meio de projeções, esta metodologia torna-se menos precisa do que nos casos dos Testes Sucessivos.

Figura 17 - Teste escalonado seguido de teste contínuo



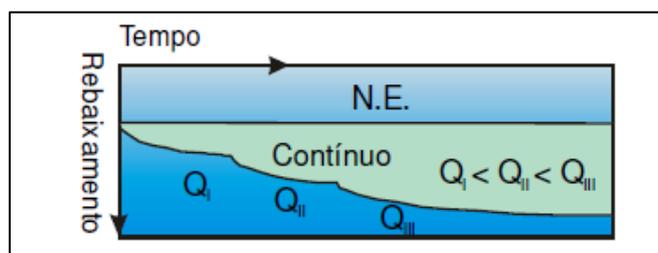
Fonte: LIMA E VIEIRA FILHO (2001).

Sugestão II – Realizar um Teste Escalonado, sem estabilização do nível, com no mínimo 3 (três) vazões (etapa única) – recomendam-se quatro escalões. Dependendo da situação, os escalões I e II podem ter duração, cada, de 1 (uma) hora e o escalão III ou IV, com duração complementar para 30 (trinta) horas, Figura 18.

Vantagem – Como não há espera entre etapas, já que o Teste Escalonado vem logo em seguida ao Teste Contínuo com Vazão Única, tem-se um menor tempo total comparado com todas as sugestões aqui apresentadas.

Desvantagens – Pode ocorrer não ser possível concluir-se o teste em função da(s) última(s) vazão(es) pré determinada(s). Isto por causa da capacidade da bomba ou limite de profundidade do crivo. Não permite avaliar a precisão da Equação Característica do Poço, comparando-se os rebaixamentos calculados com os rebaixamentos observados. É muito menos preciso que a sugestão I e Testes Sucessivos.

Figura 18 - Teste escalonado



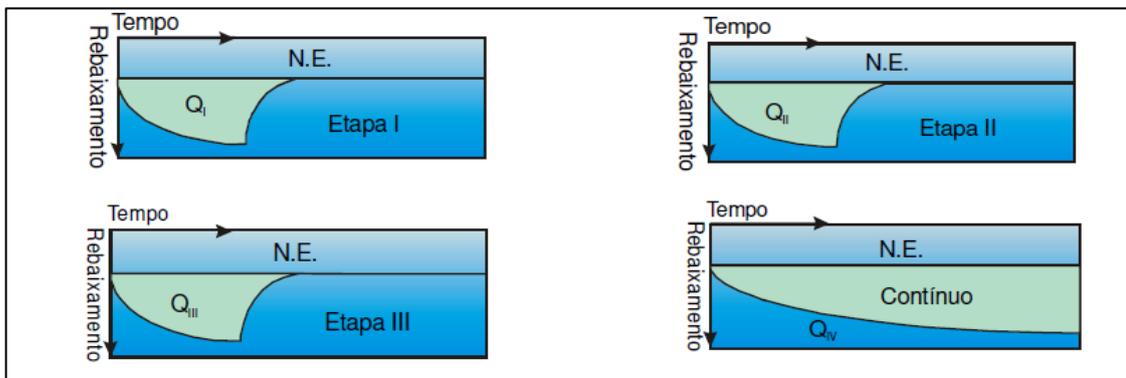
Fonte: LIMA E VIEIRA FILHO (2001).

Sugestão III – Realizar um Teste Sucessivo com recuperação satisfatória do Nível Estático, no mínimo com três etapas, com duração mínima de 1 hora cada (recomendam-se quatro etapas). A espera entre as etapas é função da recuperação total ou quase total do Nível Estático. Concluído o teste sucessivo e determinada a Equação Característica do poço, procede-se ao Teste Contínuo com Vazão Única, o qual poderá ter uma duração de até 27 (vinte e sete) horas, Figura 19.

Vantagens – Permite avaliar a precisão da Equação Característica do Poço, comparando-se os rebaixamentos calculados com os rebaixamentos observados no Teste Contínuo com Vazão Única. Pode projetar com bastante segurança o Teste Contínuo. Entre as sugestões aqui apontadas é a que apresenta a maior precisão com relação à determinação da Equação Característica do Poço.

Desvantagem – É o procedimento que exige o maior tempo: Além do tempo entre a realização do Teste Sucessivo e do Teste Contínuo com Vazão Única, há necessidade da espera entre as etapas do Teste Sucessivo.

Figura 19 - Teste sucessivo com recuperação do nível, seguido de teste contínuo



Fonte: LIMA E VIEIRA FILHO (2001).

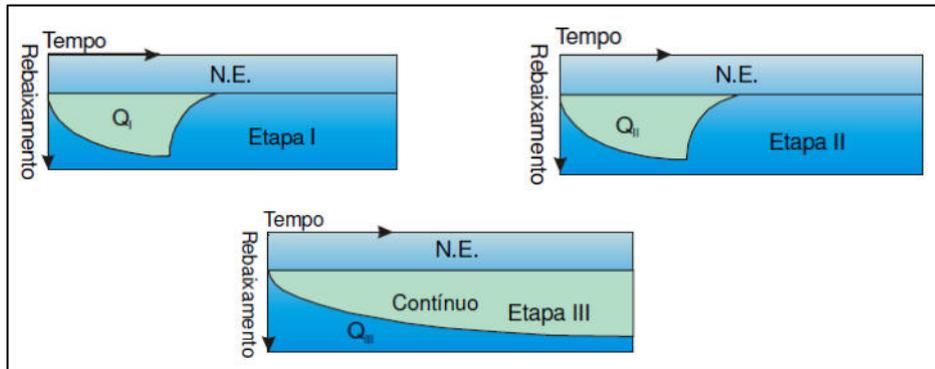
Sugestão IV – Teste Sucessivo com apenas 3 (três) etapas. As duas primeiras etapas podem ter duração, cada, de uma hora. A última etapa, Contínuo com Vazão Única, complementa as 30 (trinta) horas onde obrigatoriamente $Q_{III} > Q_{II}$, Figura 20.

Vantagens – É mais preciso do que os Testes Escalonados e necessita de menor tempo do que a sugestão III.

Desvantagens – Exige um tempo maior do que as sugestões I e II acima referidas. Pode ocorrer não ser possível concluir-se o teste em função da última vazão pré determinada. Isto por causa da capacidade da bomba ou limite de profundidade do crivo. Não permite avaliar a precisão da

Equação Característica do Poço, comparando-se os rebaixamentos calculados com os rebaixamentos observados.

Figura 20 - Teste sucessivo com recuperação do nível



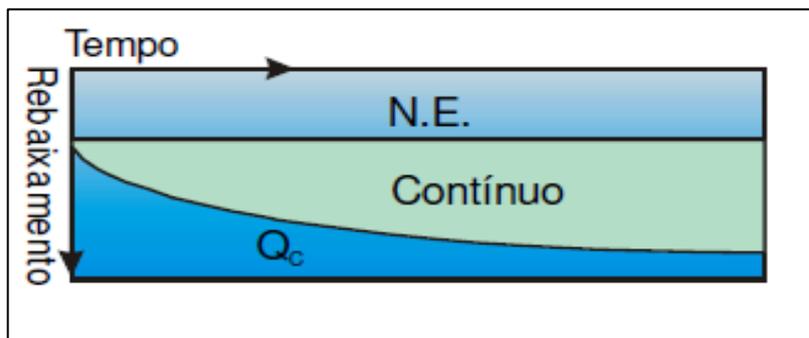
Fonte: LIMA E VIEIRA FILHO (2001).

Sugestão V – Realizar um teste contínuo com vazão única e duração de 30 (trinta) horas. Isto pode ocorrer em poços com pequena profundidade e baixa vazão (na faixa de 1 a 4 m³/h) ou quando a área apresenta significativa instabilidade hidrodinâmica (intensos bombeamentos) em poços vizinhos, Figura 21.

Vantagens – A duração (tempo) é semelhante à da sugestão II e inferior à das demais. Permite observar por mais tempo o comportamento do aquífero nas imediações do poço.

Desvantagem – Torna-se difícil avaliar com precisão a capacidade de produção do poço. Pode ocorrer não ser possível concluir-se o teste em função da vazão pré determinada. Isto por causa da capacidade da bomba ou limite de profundidade do crivo.

Figura 21 - Teste contínuo com uma única vazão constante



Fonte: LIMA E VIEIRA FILHO (2001).

Para a realização desses testes pode-se optar pelas sugestões I, III ou V, acima descritas. Recomenda-se, no entanto, que seja utilizada a sugestão III. O teste de aquífero será realizado na etapa “Contínuo com Vazão Única”.

5.4.2 Equipamentos do teste de bombeamento

Para a realização dos testes de bombeamento, foram utilizados os seguintes equipamentos (Figuras 22 e 23):

- Bomba submersa monofásica de 1 cv;
- Escoador de orifício circular para preciso controle da vazão (erro de até 4%), com as seguintes características:
 - Comprimento: 1,83 m
 - Escala vertical: 2,2 m graduados em milímetros
 - Diâmetro interno: 4" (102,7 mm)
 - Diâmetro do orifício: 1,65" (42 mm)
- Medidor de nível elétrico áudio-visual, aferido *in loco*, para determinações dos níveis dinâmicos durante os rebaixamentos dos níveis d'água;
- Cronometro digital, de precisão 1/100 segundos, para controle do tempo de bombeamento;
- Material de suporte; clinômetro, lanterna, prancheta com planilha de dados de campo, máquina fotográfica, canetas, fita veda-rosca, chaves inglesas, alicate, martelo chaves de fenda, etc.

Figura 22 - Equipamentos utilizados durante o teste de bombeamento. Escoador de orifício, tubo de pitot e nível eletrônico



Fonte: O Autor.

Figura 23 - Escoador de orifício com tubo de pitot durante a realização do teste de bombeamento



Fonte: O Autor.

Os testes de bombeamento realizados foram do tipo escalonado, com vazões constantes, crescentes a cada estágio. Foram adotados quatro estágios de bombeamento de 1 (uma) hora cada um, conforme preceitua as bibliografias técnicas específicas consagradas.

Para a determinação das vazões do teste de bombeamento escalonado, tomou-se por base, como vazão máxima, a capacidade de bombeamento das bombas submersas instaladas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5 - Programação das etapas (Escalões) do Teste de Bombeamento Escalonado (Poço 07)

| Etapas | Vazão (m³/h) | Duração (h) | Tipo de Teste |
|---------------|--------------------------------|--------------------|----------------------|
| Escalão I | 5.000 | 1 | Produção/Aqüífero |
| Escalão II | 6.500 | 1 | |
| Escalão III | 8.000 | 1 | |
| Escalão IV | 10.000 | 1 | |
| Recuperação | 0 | 1 | Recuperação |

Tabela 6 - Programação das etapas (Escalões) do Teste de Bombeamento Escalonado (Poço 09)

| Etapas | Vazão (m³/h) | Duração (h) | Tipo de Teste |
|---------------|--------------------------------|--------------------|----------------------|
| Escalão I | 4.84 | 1 | Produção |
| Escalão II | 6.68 | 1 | |
| Escalão III | 7.75 | 1 | |
| Escalão IV | 10.000 | 1 | |
| Recuperação | 0 | 1 | Recuperação |

5.5 TÉCNICAS DE COLETA DA ÁGUA NOS POÇOS TUBULARES

A etapa de coleta de amostras de água, seu correto acondicionamento, preservação, transporte, envio para análise e seu controle de qualidade, são procedimentos de elevada importância nas interpretações e resultados finais dos estudos hidroquímicos.

O objetivo é coletar uma porção representativa do universo estudado. Para tanto foi seguido os seguintes procedimentos indicados pela CPRM (2008);

- elaboração de um plano de amostragem, de acordo com a finalidade do estudo em questão, observando que quando o aquífero é homogêneo e isotrópico, uma amostra d'água tomada em qualquer ponto é representativa do mesmo;
- elaboração de um mapa ou croqui de localização dos pontos de coleta, observando que o número de amostras, a frequência da amostragem, o número de pontos de coleta e a escolha dos indicadores de qualidade dependem da finalidade do estudo;
- definição de parâmetros analíticos (Ph, condutividade elétrica e temperatura) a serem medidos no local da coleta (*in situ*);

- definição de procedimentos específicos de preservação e acondicionamento para os parâmetros de interesse (tipo de frasco, preservante, volume da amostra etc.);
- para a coleta de amostras d'água em poços, deve ser realizado um bombeamento por alguns minutos, para evitar amostras estagnadas e/ou contaminadas, não representativas do aquífero;
- para a coleta de amostras d'água em sistemas de distribuição, deve-se deixar escoar a água durante 3 a 5 minutos;
- verificação da limpeza dos recipientes e demais materiais a serem utilizados na coleta, evitando que a parte interna deles seja tocada. No caso de análises físico-químicas, mais freqüentes, lavá-los várias vezes com a própria água que vai ser coletada;
- cada amostra coletada e devidamente identificada deverá ser acompanhada de uma ficha contendo informações que a caracterize perfeitamente (data da coleta, condições climáticas, nome do coletor, nome do interessado e observações que possam auxiliar tanto a análise como a interpretação do resultado), bem como medidas efetuadas em campo (pH, temperatura da amostra e do ar, vazão de bombeamento, profundidade do nível d'água etc.), equipamentos utilizados (nome, tamanho e capacidade), a finalidade da análise (potabilidade, irrigação, consumo industrial, dessedentação animal e outros usos) e parâmetros a serem analisados no laboratório;
- cuidados especiais devem ser tomados com impurezas contidas nas mãos dos amostradores e para isso os mesmos devem manter as mãos limpas ou usar luvas, além de não fumar durante a coleta, pois fumaça e cinzas de cigarro podem contaminar fortemente as amostras com metais pesados e fosfatos, entre outras substâncias.

5.6 FOTÔMETRO

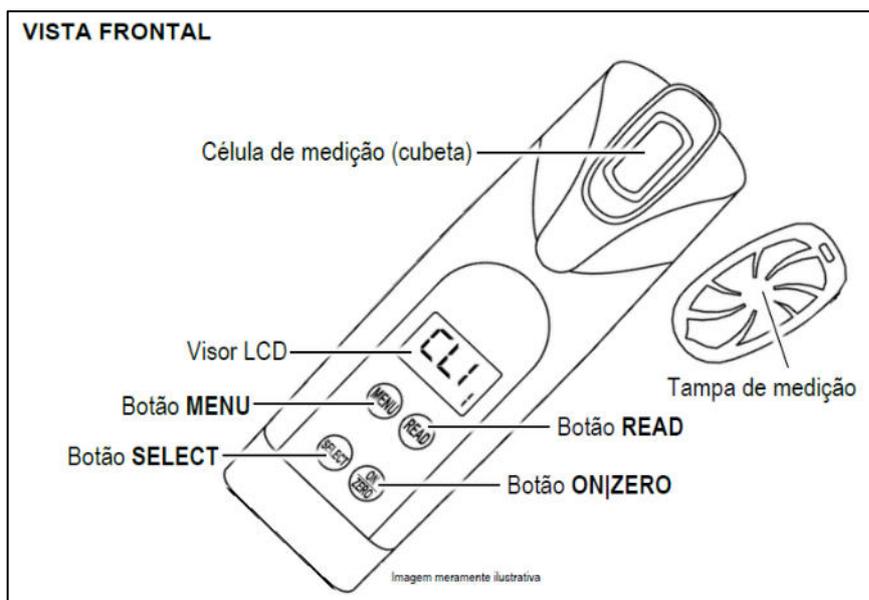
Os parâmetros físico-químicos avaliados foram: Temperatura, pH, Condutividade elétrica, Alcalinidade, Cloreto, Alumínio, Ferro total, Manganês, Nitrato, Nitrito, Fosfato, Amônia quaternária e Sulfato.

As amostras para a determinação dos constituintes foram coletadas em frascos de polipropileno de 200 ml e armazenados em recipiente tipo bolsa térmica como amostras replicadas.

No instante da coleta os ensaios já foram automaticamente realizados “*in situ*” no Medidor Multiparâmetro *The eXact® Micro 20*, Figura 24.

Para a medição de forma correta foi aplicada a metodologia indicada pelo fabricante do equipamento.

Figura 24 - Medidor Multiparâmetro The eXact® Micro 20



Fonte: Manual do fabricante (2020).

5.6.1 Especificações técnicas Fotômetro *The eXact® Micro 20*

- Temperatura da amostra: 15 a 35 °C;
- Volume de amostra: 4 mL;
- Fonte de luz: Diodo emissor de luz (com filtro de precisão);
- Comprimento de onda: Duplo – 525nm e 638nm;
- Detector de luz: Fotocélula de silício;
- Célula de medição: integrada ao gabinete;
- Memória: 20 últimas leituras (em cada parâmetro);
- Desligamento automático: após 5 minutos;
- Comunicação sem fio: Bluetooth® SMART – 4.0;
- Compatibilidade do programa de comunicação;
- Android 4.4 (ou superior) / Apple iOS 9 (ou superior);
- Índice de proteção: IP67;
- Temperatura de Operação: 0 a 50 °C;
- Umidade de operação: 0 a 100 %UR (sem condensação);
- Alimentação: 6Vdc (4 pilhas AAA alcalinas);
- Dimensões (LxAxP): 51 x 166 x 45 mm;
- Peso: 190g (com pilhas);
- Informações adicionais.

Em conformidade com US EPA para medições de amônia, dióxido de cloro, cloro combinado, cromo VI, fosfato (PO₄) e sulfeto (S₂⁻).

Em conformidade com US EPA, DIN e ISO para medições de cloro livre e total (4500-CL G, DIN Standard, ISO 7393/2).

Tabela 7 - Faixa de medição dos elementos químicos analisados

| DESCRIÇÃO | FAIXA DE MEDIÇÃO |
|------------------|-------------------------|
| AL TOTAL | 9 a 210 ppm |
| CLORETO | 3 a 270 ppm |
| PH | 6,4 a 8,4 ppm |
| FLUORETO | 0.04 a 1.50 ppm |
| ALUMÍNIO | 0.01 a 1.20 ppm |
| FERRO TOTAL | 0.03 a 6.0 ppm |
| MANGANÊS | 0.01 a 1.50 ppm |
| FOSFATO | 0.03 a 4.0 ppm |
| NITRATO | 0.00 a 60.0 ppm |
| NITRITO | 0.01 a 1.80 ppm |
| AMÔNIA QUANT. | 2 a 80 ppm |
| SULFATO | 2 a 210 ppm |

5.6.2 Instruções Fotômetro *The eXact® Micro 20*

Abaixo uma breve apresentação sobre os procedimentos executados para as medições no Fotômetro Multiparâmetro *The eXact® Micro 20*:

1. Defina o elemento químico a ser analisado;
2. Certifique-se que a temperatura da amostra de água que será analisada está abaixo de 35°C para garantir a melhor exatidão na medição;
3. Separe a fita do reagente correspondente à medição que será efetuada;
4. Lave a cubeta de 3 a 4 vezes utilizando a amostra de água que será analisada para ambientar o recipiente, evitando desvios de leitura;
5. Preencha totalmente a cubeta com a amostra (4mL);
6. Encaixe a tampa de medição na cubeta;
7. Pressione o botão ON|ZERO para efetuar o zeramento da medição. Aparecerá no visor 0.00 ppm;

8. Retire a tampa de medição da cubeta;
9. Mergulhe na amostra a fita do reagente e **IMEDIATAMENTE** pressione o botão **READ**.
O MICRO20 iniciará contagem regressiva;
10. Durante a contagem, movimente a fita do reagente suavemente dentro da cubeta de modo que todo o reagente se dissolva na amostra de água;
11. Ao final dos 20 segundos, rapidamente retire a fita do reagente da amostra e encaixe a tampa de medição sobre a cubeta. O instrumento efetuará a leitura da amostra;
12. Observe no visor o valor da medição;
13. Ao término da medição, descarte imediatamente a amostra analisada e lave cuidadosamente a cubeta com a escova de limpeza e água destilada.

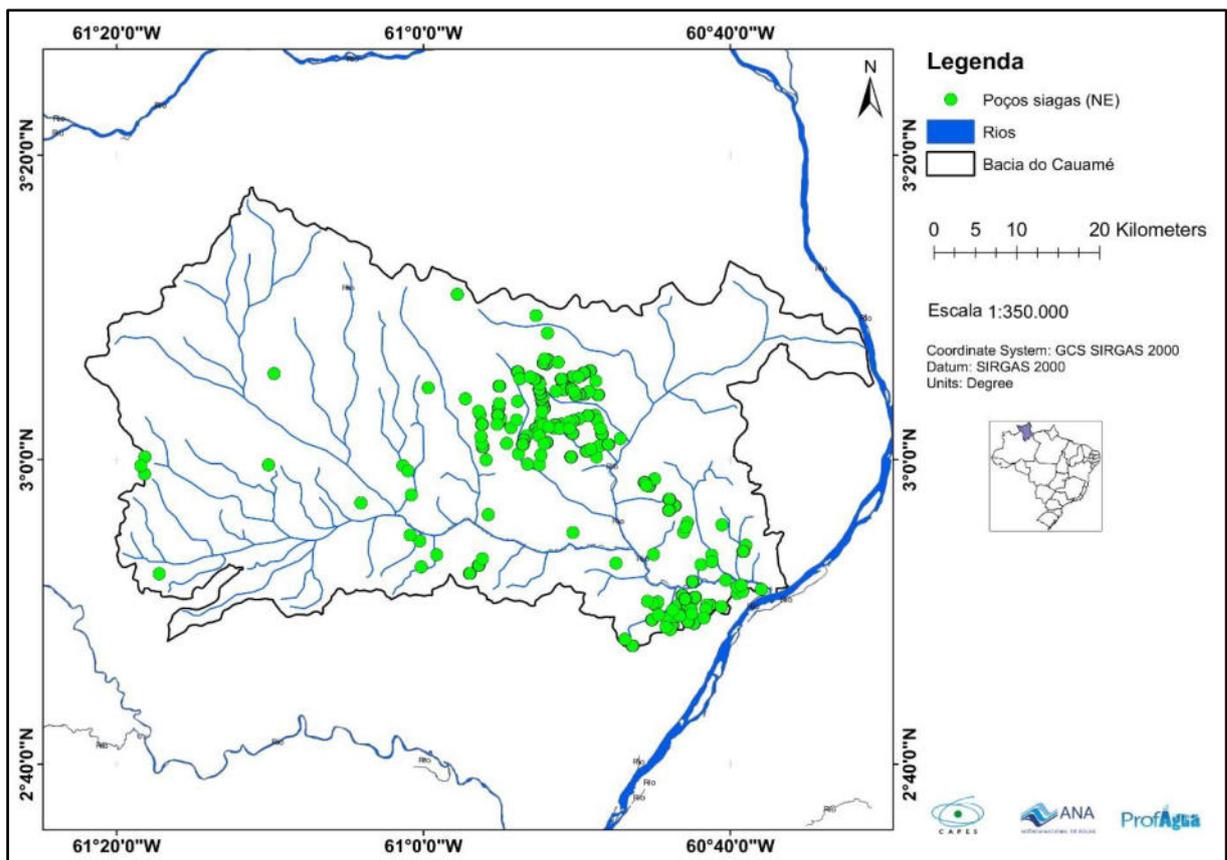
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 BANCO DE DADOS

O banco de dados foi gerado através da rede de dados disponível da CPRM (SIAGAS), observa-se uma maior concentração de poços tubulares no Município de Boa Vista, tanto na área urbana como na área rural. Foram analisados os dados de 322 poços onde foram extraídos informações de nível estático (NE) (Figura 25) e 117 poços onde foram extraídas informações de Vazão (VZ) (Figura 26).

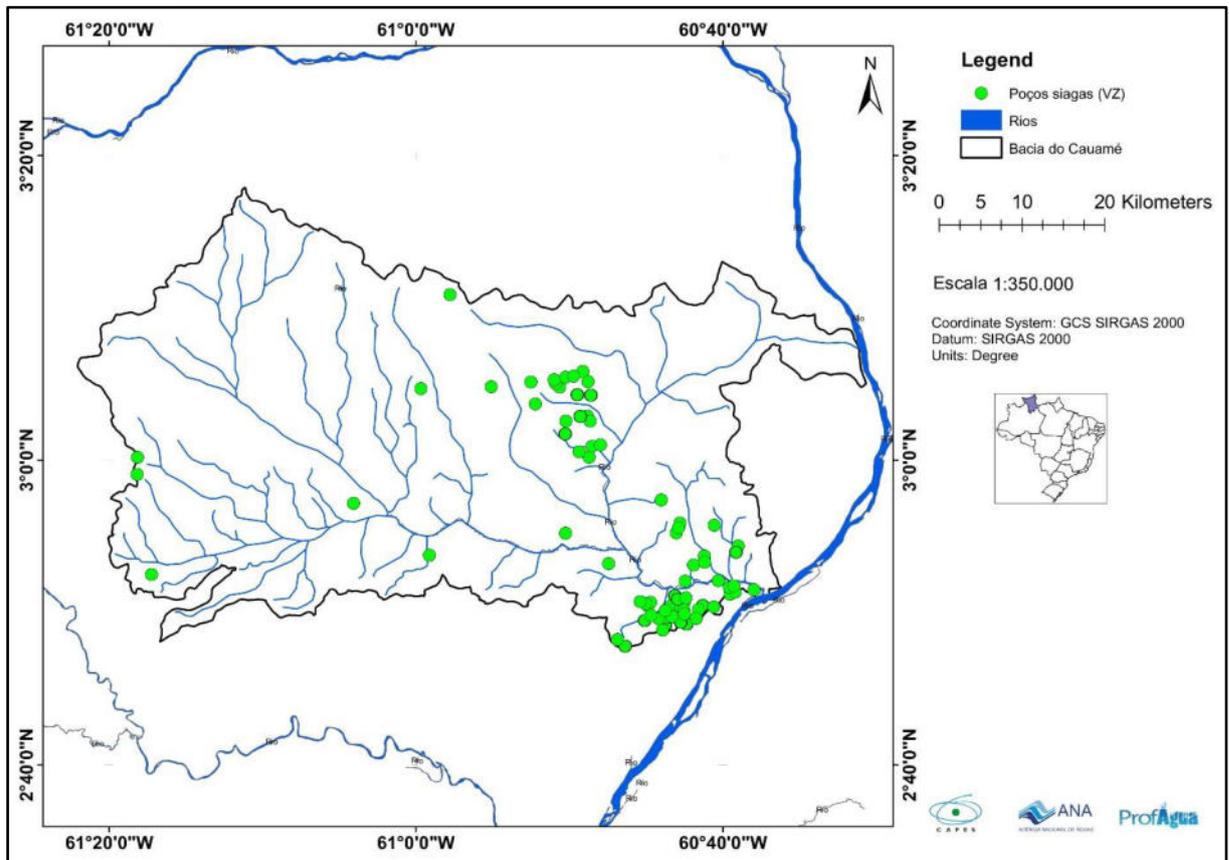
Através dos dados de níveis estáticos reduzidos da topografia foi gerado o mapa potenciométrico no software Oasis Montaj, que possibilitou observar as linhas equipotenciométricas e os padrões de fluxo do aquífero, Figura 27.

Figura 25 - Mapa de localização dos poços tubulares na Bacia do Rio Cauamé



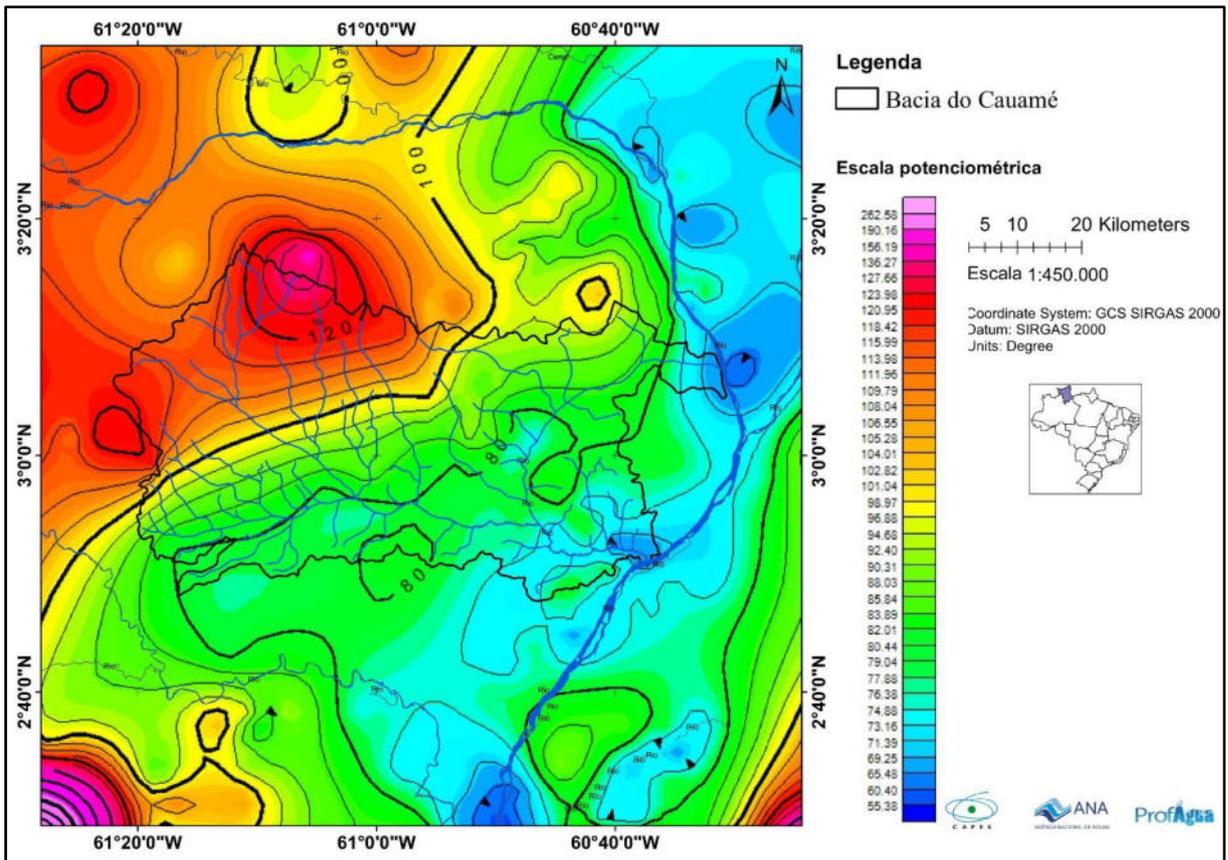
Fonte: O Autor.

Figura 26 - Mapa de localização dos poços tubulares com dados de vazão na Bacia do Rio Cauamé



Fonte: O Autor.

Figura 27 - Mapa potenciométrico da Bacia do Rio Cauamé.



Fonte: O Autor.

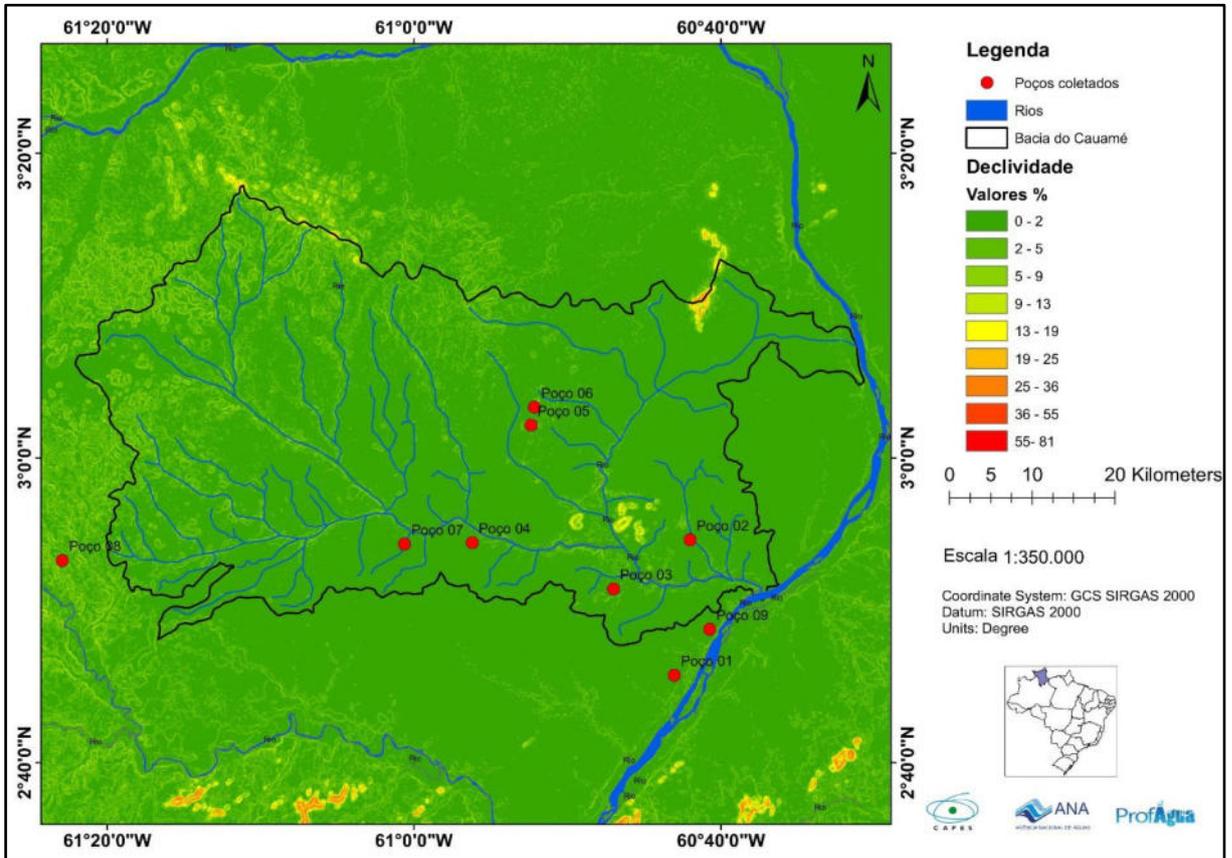
A região em estudo está instalada sobre o embasamento cristalino representado pela Domínio Guiana Central (DGC) que apresenta arranjos estruturais para NE-SW, perpendicular às direções das estruturas formando-se os erógenos representados por serras formadas no período proterozoico e por reativações extensionais em níveis crustais rasos associados a falhamentos e formação de pequenos horsts e grabens durante o mesozoico.

De uma forma geral integra-se o padrão de fluxo subterrâneo a uma interação entre o embasamento cristalino e a Formação Boa Vista, a qual ocupa os espaços deixados após esse intenso esforço tectônico. A direção de fluxo subterrâneo regional pode ser vista no sentido noroeste (NW) para sudeste (SE) acompanhando a topografia, corroborando também com os dados de declividade obtidos através do processamento dos dados de SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), Figura 28.

Ocorrem algumas anomalias potenciométricas com valores baixos, em forma de “ilhas” estando aprisionadas dentro de regiões com valores potenciométricos mais elevados, este fato é interpretado como possíveis falhamentos, relacionados a pequenos grabens. A calha do Rio

Branco representa a zona de descarga do aquífero, apresentando baixos valores de potenciometria.

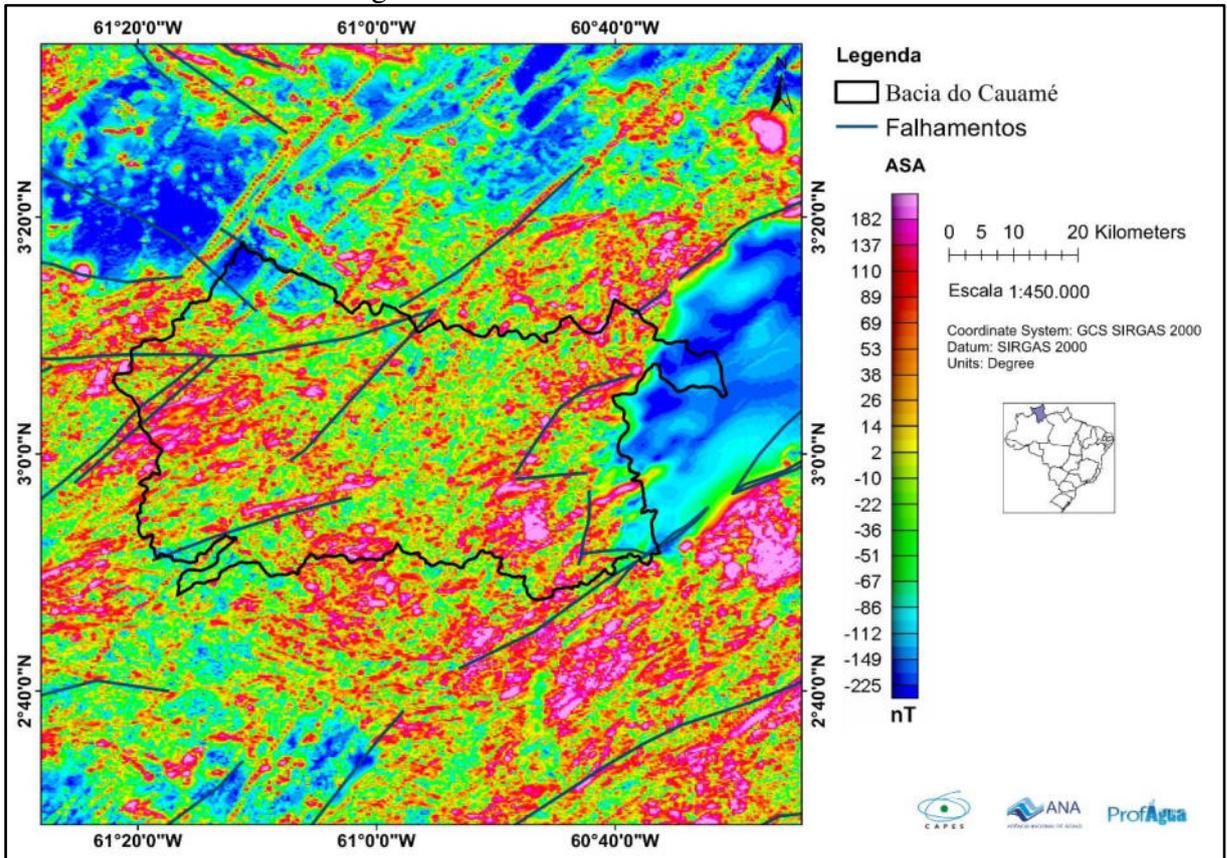
Figura 28 - Mapa de declividade gerado a partir do SRTM no ArcGis



Fonte: O Autor.

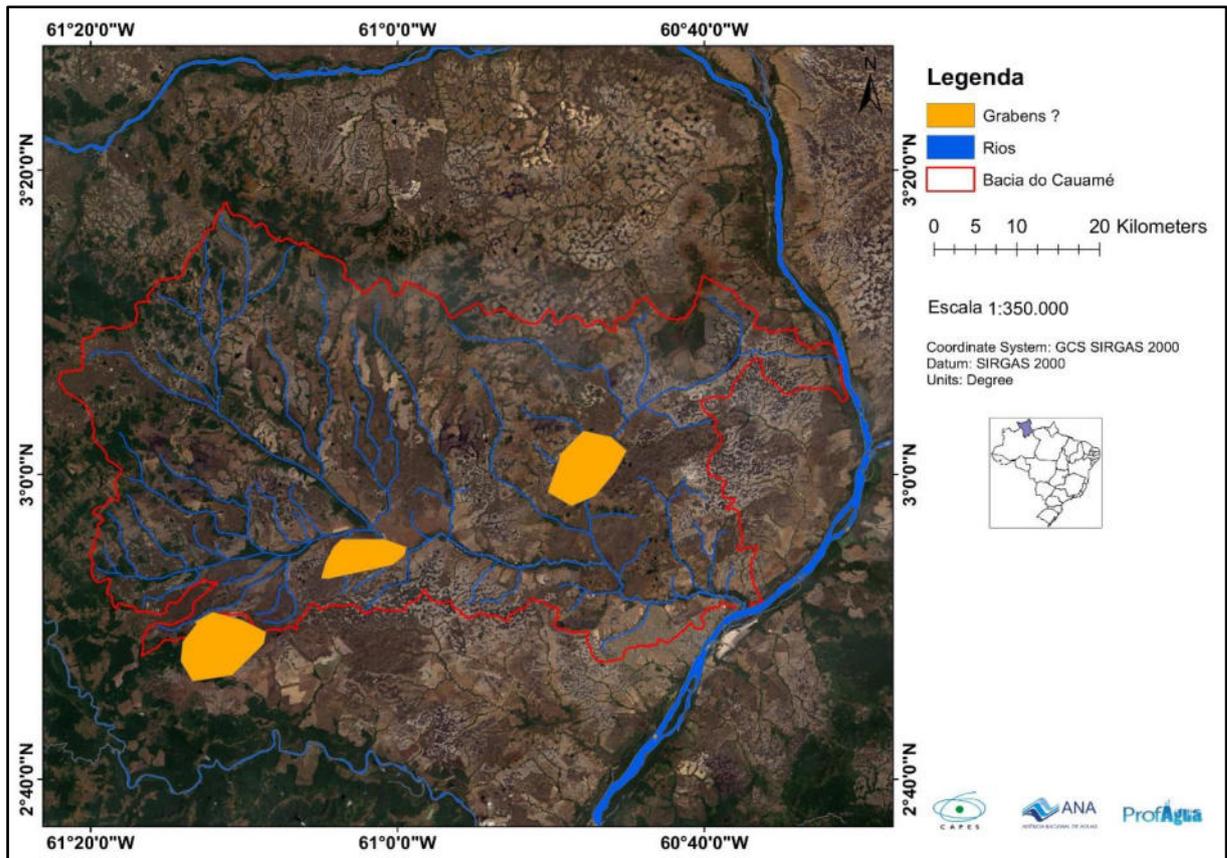
A Figura 29, utilizou-se o mapa de amplitude do sinal analítico (ASA) como modelo de comparação das estruturas regionais ao modelo potenciométrico, chegando-se a conclusão que ocorrem “mini bacias” (grabens) dentro da região abrangida pela Bacia do Cauamé. Tais “mini bacias” possuem eixo de maior alongamento no strike noroeste (NW) para sudeste (SE) e chegando ao desnível de até 15 metros de altura topográfica, Figura 30.

Figura 29 - Mapa da amplitude do sinal analítico (ASA), contendo os falhamentos estruturais regionais



Fonte: O Autor.

Figura 30 – Mapa com possíveis Grabens.

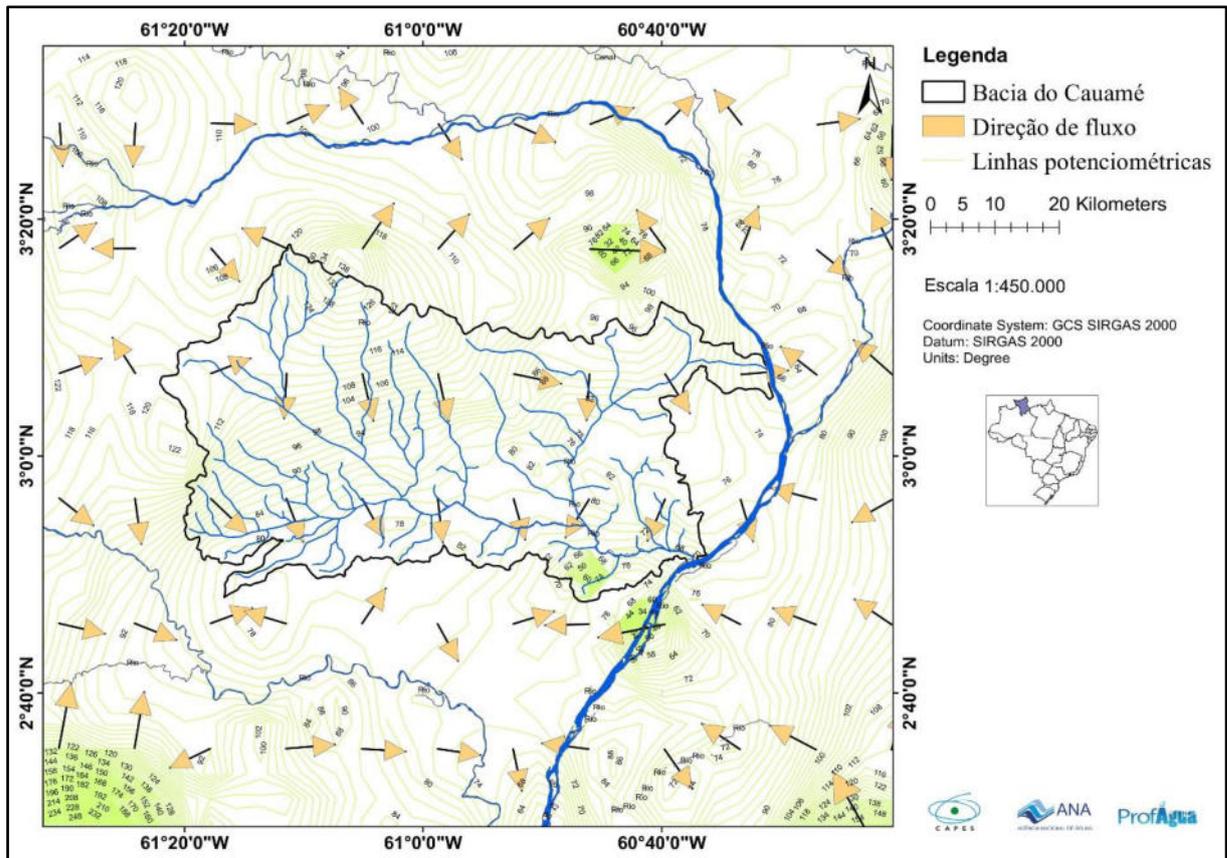


Fonte: O Autor.

Após o processamento e tratamento estatístico através de krigagem dos dados potenciométricos, no software Golden Surfer foi extraído um segundo mapa onde obteve-se as direções gerais de fluxo subterrâneo, Figura 31.

Observa-se que existem duas regiões de recarga do aquífero dentro do domínio da Bacia do Cauamé. Uma ligada ao alto Cauamé, nas proximidades do vilarejo do Taiano, que possui regiões com declividades da ordem de até 80% e altitudes topográficas de até 600 metros, e outra na região do Rio Murupu, ligado as Serras da Moça e do Murupu onde existem declividades da ordem de até 80% e altitudes topográficas de até 230 metros. Sendo possível considerar que os rios durante o período seca são rios efluentes recebendo carga hidráulica do aquífero Boa Vista.

Figura 31 - Direções de fluxo subterrâneo obtidas a partir do software Golden Surfer



Fonte: O Autor.

6.2 SONDADENS

Foram amostrados seis pontos diferentes através da sondagem rotativa. As amostras de calha coletadas foram ensacadas e enviadas para o laboratório do NUPENERG (UFRR), onde foi realizado o estudo granulométrico e definição da condutividade hidráulica.

Abaixo segue a descrição resumida dos perfis estratigráficos.

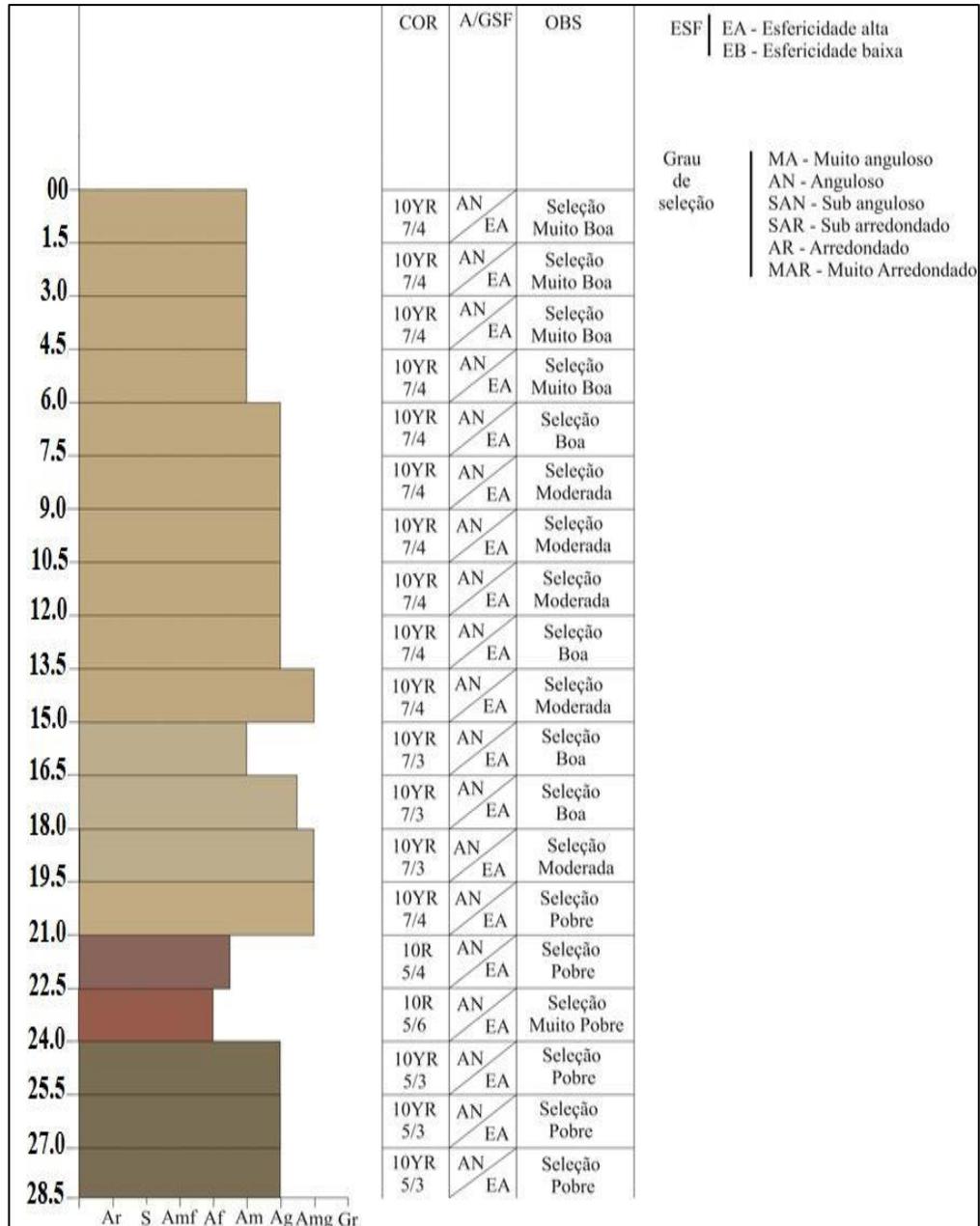
Sondagem 01 (poço tubular 01) – Encontrou-se grãos com seleção predominante muito boa a moderada até a profundidade de 24,0 metros. Sendo que ocorrem dois ciclos arenosos granocrescentes para o topo, sendo o primeiro entre os intervalos de 0 a 15,0 metros de profundidade e o segundo com intervalo entre 15,0 a 21,0 metros de profundidade. Entre o intervalo de 21,0 a 24,0 metros de profundidade ocorre mudança no material, que é predominantemente laterítico, com seleção granulométrica de pobre a muito pobre, com estratos granocrescentes para o topo. A partir da profundidade de 24,0 metros ocorre o aparecimento de rocha alterada sendo associada a rochas orto derivadas devido à alta concentração de quartzo. A granulometria geral do perfil varia entre areia média a areia grossa, Figura 32.

Sondagem 02 (poço tubular 02) – Encontrou-se grãos com seleção predominante muito boa a pobre até a profundidade de 24,0 metros. Sendo que ocorrem dois ciclos arenosos granocrescentes para o topo, sendo o primeiro entre os intervalos de 0 a 16,5 metros de profundidade e o segundo com intervalo entre 16,5 a 21,0 metros de profundidade. A partir da profundidade de 22,5 metros ocorre o aparecimento de rocha alterada sendo associada a rochas vulcânicas. Entre 22,5 a 33,0 metros de profundidade a seleção granulométrica é moderada, com estratos granocrescentes para o topo. A granulometria geral do perfil está entre areia média a areia muito grossa, Figura 33.

Sondagem 04 (poço tubular 04) – Encontrou-se grãos com seleção predominante de boa a moderada até a profundidade de 21,0 metros. Sendo que ocorrem três ciclos areno-siltosos de deposição, o primeiro granocrescente para o topo, entre os intervalos de 0 a 9,0 metros de profundidade, o segundo entre as profundidades de 9,0 a 13,5 metros, com um ciclo granocrescente para o topo e o terceiro entre as profundidades de 13,5 a 19,5 metros, com um ciclo granocrescente para o topo, Figura 34. Devido a granulometria predominantemente fina,

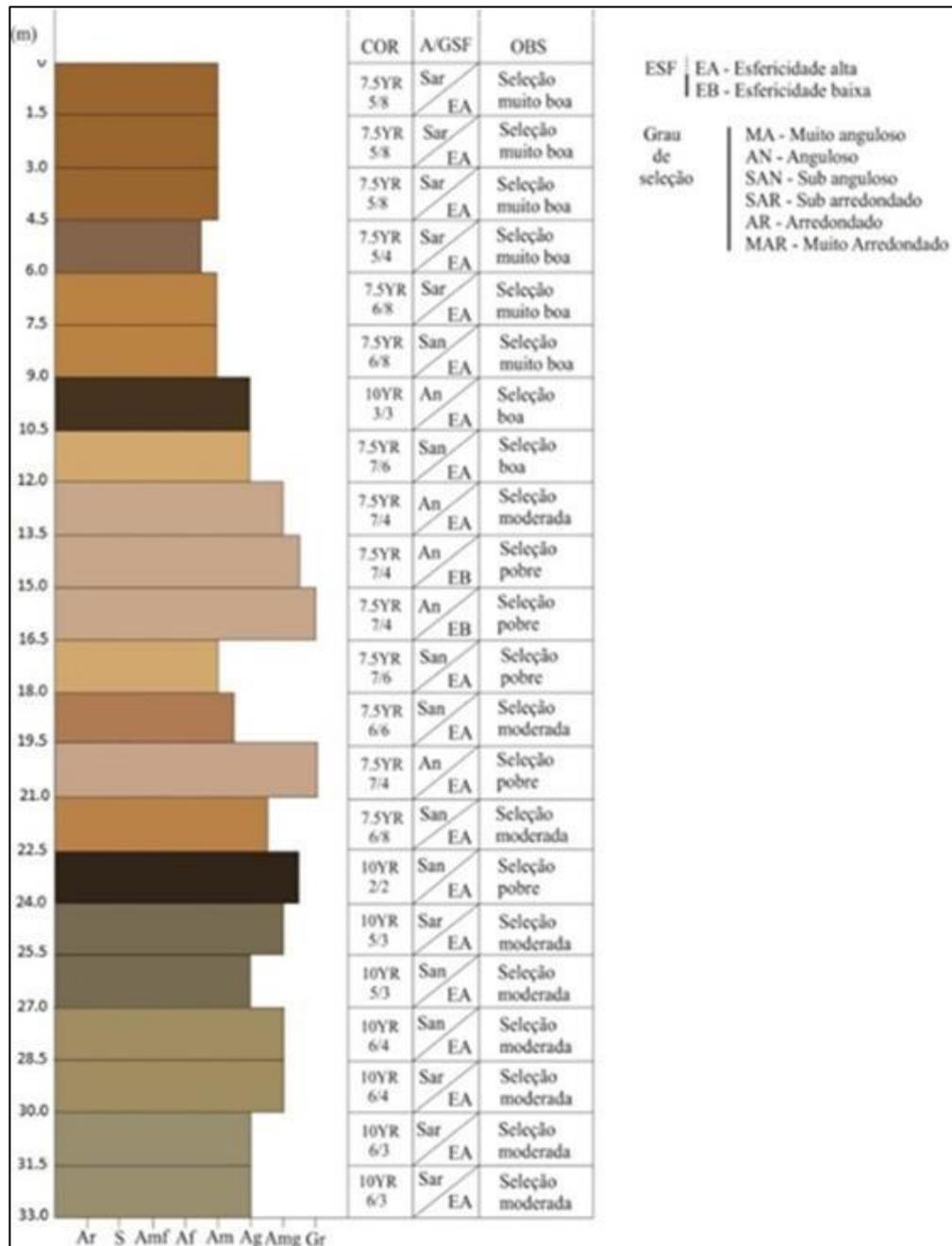
menor que 0,1 mm, tornou-se difícil a definição do grau de seleção dos grãos. Podendo ser correlacionado a um ambiente distal de deposição ou a um ambiente lacustre.

Figura 32 - Perfil Lito-estratigráfico do poço tubular 01



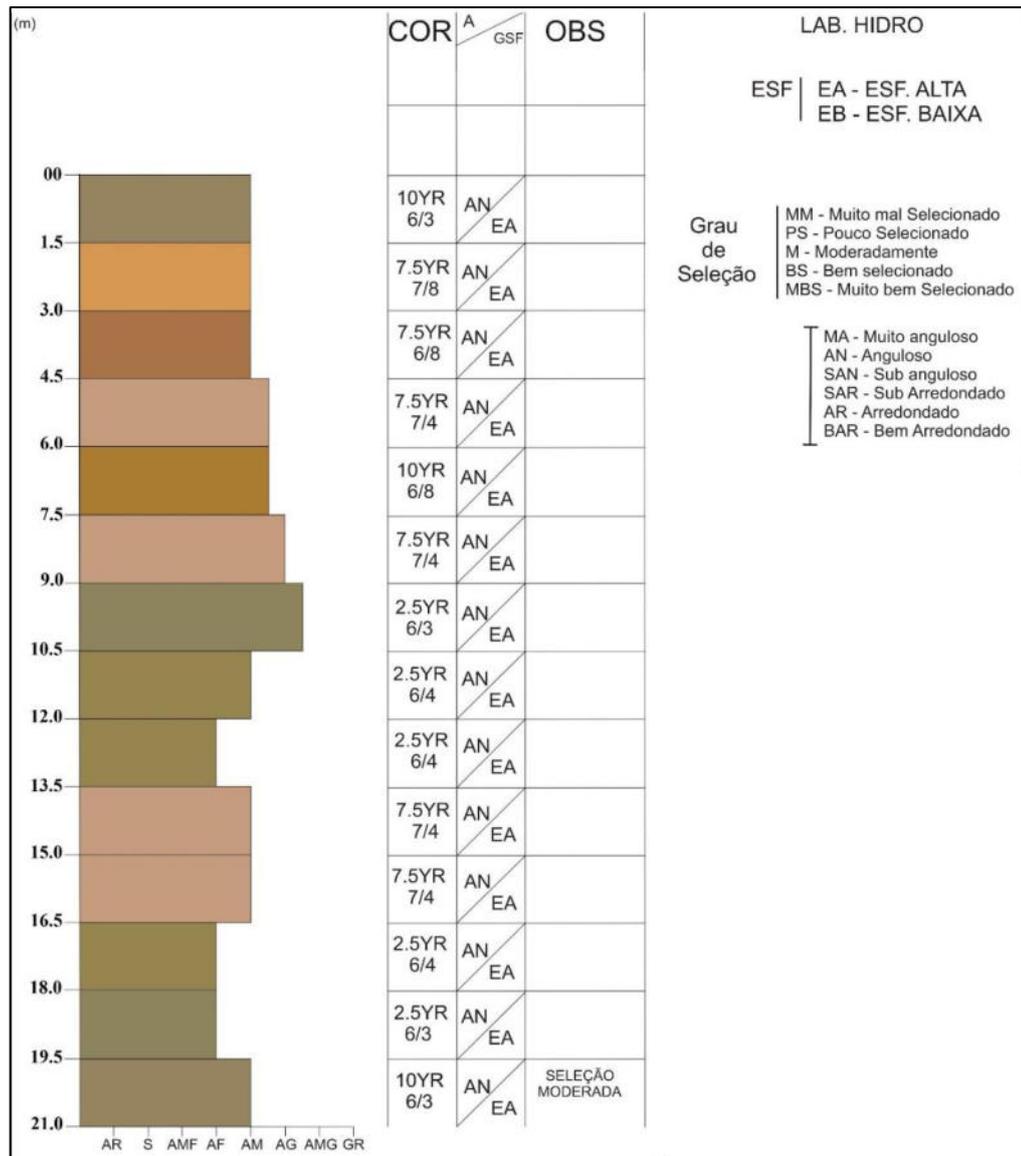
Fonte: Laboratório de Sedimentologia -NUPENERG/ UFRR (2020).

Figura 33 - Perfil Lito-estratigráfico do poço tubular 02



Fonte: Laboratório de Sedimentologia -NUPENERG/ UFRR (2020).

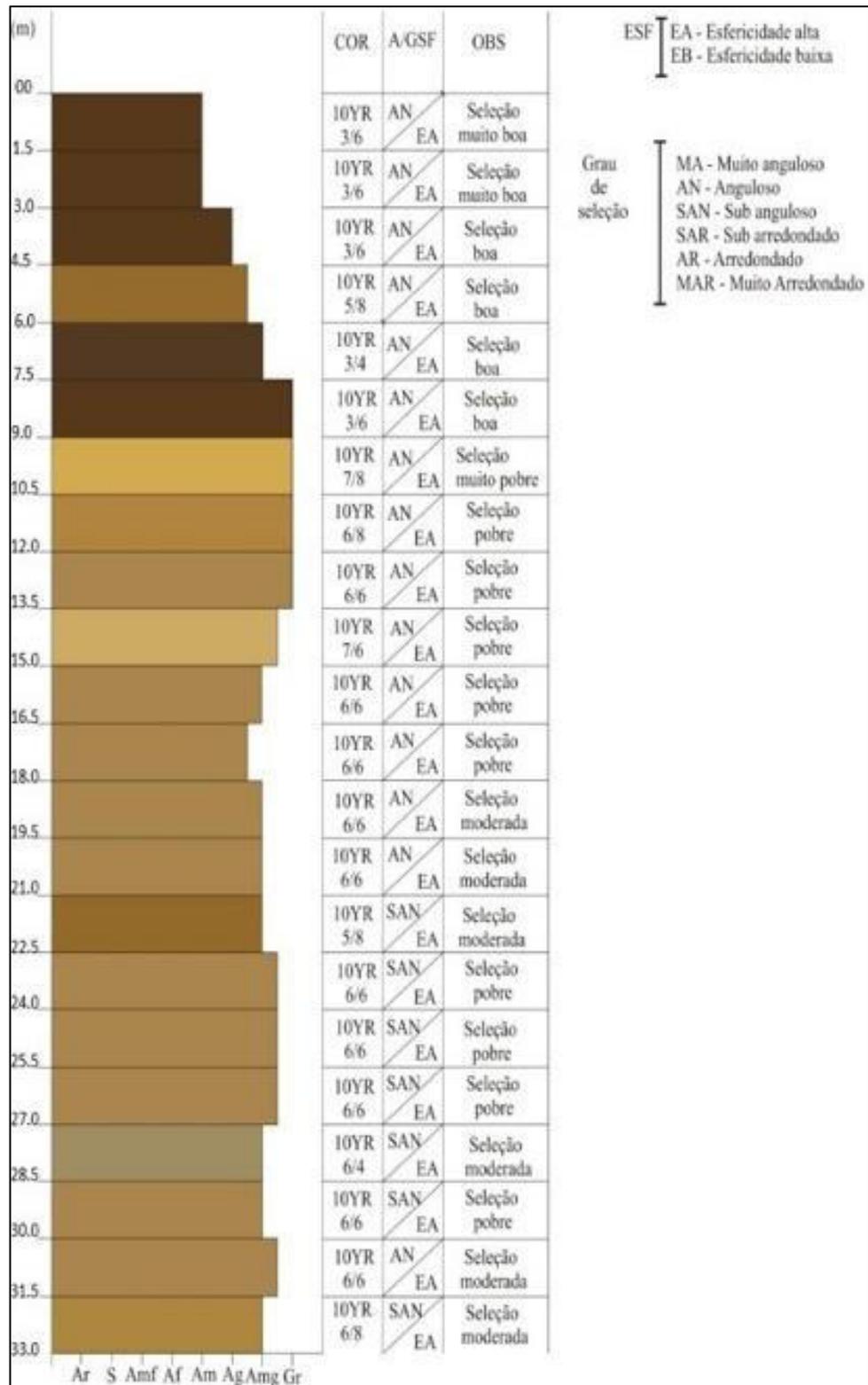
Figura 34 - Perfil Lito-estratigráfico do poço tubular 04



Fonte: Laboratório de Sedimentologia -NUPENERG/ UFRR (2020).

Sondagem 05 (poço tubular 05) – Encontrou-se grãos com seleção predominante muito boa no topo a pobre na base da sequência estratigráfica. Sendo que ocorrem dois ciclos arenosos granodecrescentes para o topo, sendo o primeiro entre os intervalos de 0 a 15,0 metros de profundidade e o segundo com intervalo entre 15,5 a 27,0 metros de profundidade. A partir da profundidade de 27,0 metros a granulometria permanece constante, podendo ser somente uma parte de outro ciclo estratigráfico. A granulometria do perfil estratigráfico é predominantemente entre areia grossa a areia muito grossa, podendo ser correlacionado a um ambiente proximal de deposição, Figura 35.

Figura 35 - Perfil Lito-estratigráfico do poço tubular 05

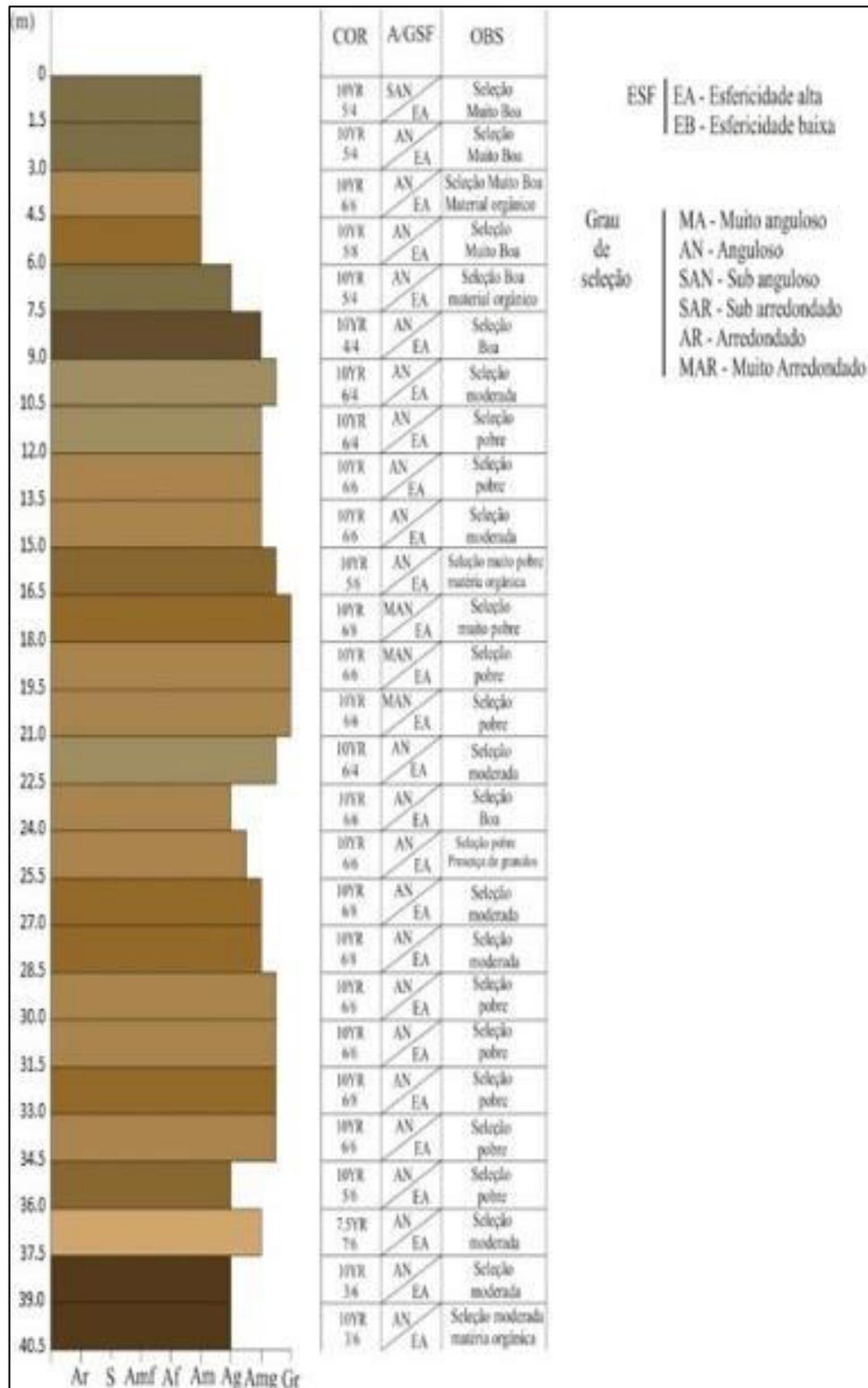


Fonte: Laboratório de Sedimentologia -NUPENERG/ UFRR (2020).

Sondagem 06 (poço tubular 06) – Encontrou-se grãos com seleção predominante muito boa no topo a pobre na base da sequência estratigráfica. Sendo que ocorrem três ciclos arenosos granodecrescentes para o topo, sendo o primeiro entre os intervalos de 0 a 10,5 metros de profundidade e o segundo com intervalo entre 10,5 a 21,0 metros de profundidade e o terceiro com intervalo entre 21,0 a 34,0 metros de profundidade. A partir da profundidade de 34,0 metros a granulometria permanece constante, podendo ser somente uma parte de outro ciclo estratigráfico. A granulometria do perfil estratigráfico é predominantemente entre areia grossa a areia muito grossa, podendo ser correlacionado a um ambiente proximal de deposição, Figura 36.

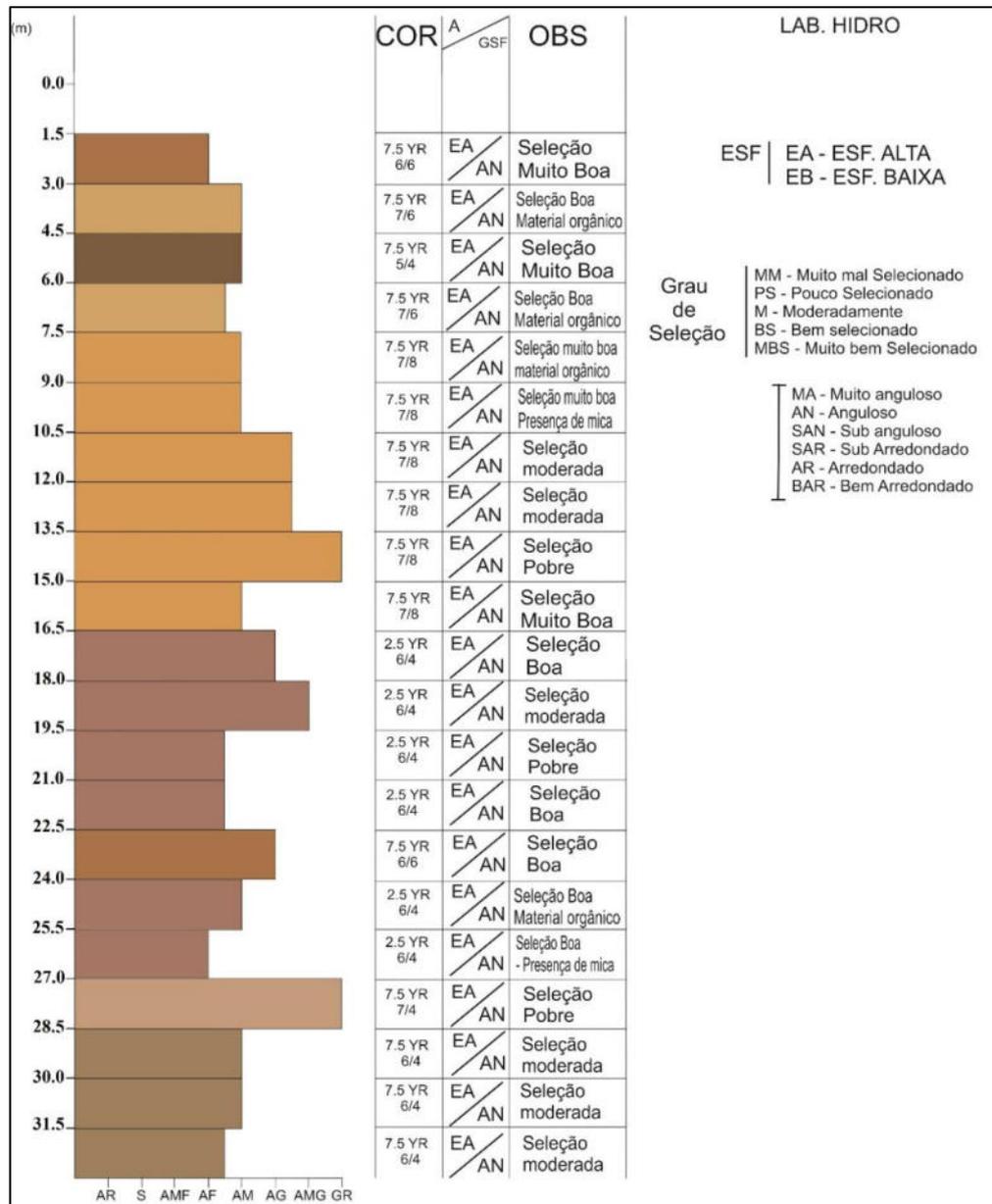
Sondagem 08 (poço tubular 08) – Encontrou-se grãos com seleção predominante muito boa no topo a moderada na base da sequência estratigráfica. Sendo que ocorrem 3 ciclos arenosos o primeiro granodecrescente para o topo, entre os intervalos de 0 a 15,0 metros de profundidade, o segundo granocrescente para o topo entre os intervalos de 16,5 a 27,0 metros de profundidade e o terceiro granocrescente para o topo entre os intervalos de 27,0 a 33,0 metros de profundidade. A granulometria do perfil estratigráfico pode ser dividida de areia grossa a muito grossa no primeiro ciclo a areia média a fina nos ciclos seguintes, Figura 37.

Figura 36 - Perfil Lito-estratigráfico do poço tubular 06



Fonte: Laboratório de Sedimentologia -NUPENERG/ UFRR (2020).

Figura 37 - Perfil Lito-estratigráfico do poço tubular 08

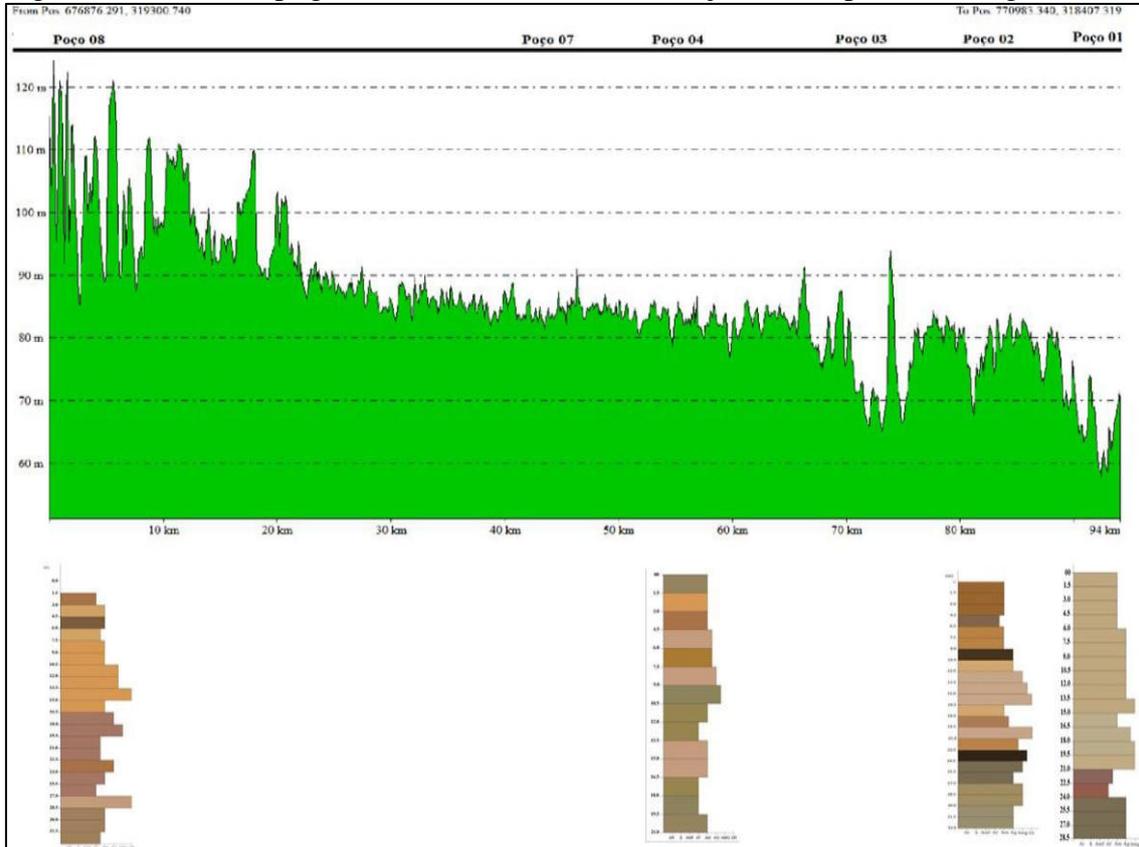


Fonte: Laboratório de Sedimentologia -NUPENERG/ UFRR (2020).

Os perfis analisados mostram uma variação de padrão de empilhamento como de frequência de grão em todos os perfis. Quando comparamos os perfis, especialmente, percebe-se que a heterogeneidade deposição é também demonstrada lateralmente. Na Figura 38, ao observarmos os perfis litológicos e a seção topográfica da bacia do Cauamé no sentido W-E, percebe-se que o reservatório apresenta uma heterogeneidade deposicional, com o reservatório apresentando uma frequência maior de camadas de grão mais grosso no Oeste e mais finos ao Leste. Esta variabilidade é mais perceptível na porção média superior de todos os poços, Figura 38. Por outro lado, na metade inferior dos perfis litológicos dos poços, percebe-se que tanto o

tamanho de grão das camadas como a frequência do padrão de empilhamento, arredondamento, esfericidade e grão de seleção aparentam ser bastante heterogênea.

Figura 38 - Perfil topográfico da área de estudo (Seção W-E) perfis litológicos



Fonte: O Autor.

6.2.1. Considerações

Aquíferos heterogêneos apresentam grande possibilidade de terem um profundo efeito no comportamento do fluxo subterrâneo segundo Freeze; Cherry, (1993). A modelagem computacional tem demonstrado este efeito da heterogeneidade espacial presente em reservatórios de água subterrânea no coeficiente de condutividade hidráulica (K). Hemi (2008) concluiu que a organização e distribuição de materiais no aquíferos causa um profundo efeito na distribuição das velocidades de percolação (fluxo) através dos mesmos. Assim, a análise sedimentológica mostrou que o Aquífero Boa Vista apresenta grande variabilidade vertical em termos sedimentológicos, este resultado sugere que o mesmo apresente grande variabilidade dos valores de condutividade em toda a área de estudo, que devem influenciar no comportamento dos valores de condutividade hidráulica do reservatório, podemos gerar condições locais anisotrópicas, com formação de aquícludes e aquíardos localizados.

6.2.2 Ensaio de permeabilidade

Os ensaios de permeabilidade aplicados aos perfis descritos anteriormente foram agrupados em classes definidas pelo valor de K (Condutividade Hidráulica) e os resultados são apresentados pelos poços 01 (Tabela 8) poço 02 (Tabela 9), Poço 05 (Tabela 10) e Poço 06 (Tabela 11). Os resultados mostraram que os valores de condutividade da área mostram conformidade com os resultados sedimentológicos e ainda sugerem que o reservatório, de modo geral, tem boa condutividade hidráulica.

Tabela 8 - Condutividade hidráulica, Sondagem 01

| Nº da amostra | Condutividade Hidráulica (cm/s) |
|-------------------------|---------------------------------|
| 15 | $1,2 \times 10^{-2}$ |
| 1- 2- 3-4- 11 | 5×10^{-2} |
| 5- 6- 7- 8- 9 -17-18-19 | 2×10^{-1} |
| 12 | $4,5 \times 10^{-1}$ |
| 10-13-14 | 8×10^{-1} |

Tabela 9 - Condutividade hidráulica, Sondagem 02

| Nº da amostra | Condutividade Hidráulica (cm/s) |
|---------------------------|---------------------------------|
| 4 | $1,2 \times 10^{-2}$ |
| 1 – 2 – 3 – 5 - 6 | 5×10^{-2} |
| 7 – 8 – 13 – 18 – 21 - 21 | 2×10^{-1} |
| 9- 17 – 19 – 20 | 8×10^{-1} |
| 10- 15 | $1,8 \times 10^0$ |
| 11- 14 | 3.2×10^0 |

Tabela 10 - Condutividade hidráulica, Sondagem 05

| Nº da amostra | Condutividade Hidráulica (cm/s) |
|-----------------------------------|---------------------------------|
| 1- 2 | 5×10^{-2} |
| 3 | 2×10^{-1} |
| 4 - 12 | $4,5 \times 10^{-1}$ |
| 5- 11 – 13 -14 -15 – 19 – 20 - 22 | 8×10^{-1} |
| 10 – 16 – 17 – 18 - 21 | $1,8 \times 10^0$ |
| 6 – 7 – 8 – 9 | 3.2×10^0 |

Tabela 11 - Condutividade hidráulica, Sondagem 06

| Nº da amostra | Condutividade Hidráulica (cm/s) |
|---------------------------|---------------------------------|
| 1 – 2 -3 - 4 | 5×10^{-2} |
| 5- 16 – 24- 26- 27 | 2×10^{-1} |
| 17 | $4,5 \times 10^{-1}$ |
| 6- 8-9-10- 18 -19- 25 | 8×10^{-1} |
| 7- 11- 15- 20- 21- 22- 23 | $1,8 \times 10^0$ |
| 12 – 13- 14 | 3.2×10^0 |

Nos poços onde obtivemos valores K mais baixos, nas tabelas 8, 9, 10 e 11 ($1,2 \times 10^{-2}$ cm/s), se registra que esses valores são associados as camadas superiores e os valores de condutividade hidráulica mais elevados, possuem frequência mais associado as camadas inferiores.

Na Tabela 12, ao confrontarmos os resultados alcançados com o modelamento realizado em laboratório com o obtido na literatura, eles demonstram que o reservatório tem valores condutividade hidráulica em uma variabilidade bem maior do que o se conhecia. Como foi

demonstrado no item 6.2., os resultados deste estudo devem-se a análise sedimentológica, que permitiu identificar sua variabilidade faciológica. Esta, por sua vez, é reflexo de uma sedimentação em ambiente fluvial da Formação Boa Vista a principal unidade litoestratigráfica que funciona com rocha reservatório na área de estudo. Esta interpretação é corroborada por estudos anteriores, que demonstraram que esta unidade tem variações faciológicas significativas tanto verticais como horizontais segundo Reis et al (2001). Soma-se a isso a identificação, neste estudo, da presença e a formação de pequenas bacias identificadas com a análise comparativa do mapa de amplitude do sinal analítico (ASA) como modelo de comparação das estruturas regionais ao modelo potenciométrico feitas neste estudo (ver item 6.1.).

Destaca-se que a formação de pequenas bacias na deposição da Formação Boa Vista foi sugerida recentemente em Menezes et al. (2020). Os valores calculados da Tabela 12, são reflexos desta heterogeneidade sedimentológica, sugerem que a variabilidade no reservatório do Aquífero Boa Vista de estudos anteriores subestimou a capacidade do reservatório. Tal aspecto é importante para definição de parâmetros de gestão e regulação dos Recursos Hídricos, pois afetam diretamente a parametrização das variáveis hidrológicas deste reservatório de água subterrânea.

Tabela 12 – Tabela comparativa entre as condutividades obtidas em laboratório e as da CPRM (2016)

| Nº Poço | Condutividade hidráulica K (cm/s) medida | Condutividade hidráulica k (cm/s) CPRM (2016) |
|----------------|---|---|
| Poço 01 | $1.2 \times 10^{-2} < K < 8 \times 10^{-1}$ | $1 \times 10^{-2} < K < 1 \times 10^{-1}$ |
| Poço 02 | $1.2 \times 10^{-2} < K < 3.2 \times 10^0$ | 1×10^{-5} |
| Poço 05 | $5 \times 10^{-2} < K < 3.2 \times 10^0$ | $1 \times 10^{-5} < K < 1 \times 10^{-4}$ |
| Poço 06 | $5 \times 10^{-2} < K < 3.2 \times 10^0$ | $1 \times 10^{-5} < K < 1 \times 10^{-4}$ |
| Poço 07 | $1,17 \times 10^{-2}$ | $1 \times 10^{-4} < K < 1 \times 10^{-3}$ |

Fonte: O Autor.

6.3 ANÁLISE HIDROQUÍMICA

O resultado da análise química dos poços (02, 03 e 07; Tabelas 13, 14 e 15) sugerem que as águas subterrâneas do Aquífero Boa Vista são águas levemente ácidas, com baixo teor de ferro $> 0,3$ mg/l, ocorrendo principalmente como hidróxido férrico ou hidróxido ferroso, cuja origem pode ser associada as lateritas, que durante a percolação das águas meteóricas por essas camadas ocorre a sua precipitação quando oxidado. Assim, sua origem está ligada principalmente a Formação Boa Vista. Encontrou-se cloreto, presente nas áreas poços 03 e 07, a alta solubilidade e o lento movimento das águas no aquífero vão provocando aumentos gradativos e constantes dos teores de cloretos nas águas subterrâneas na direção do fluxo. Apesar das rochas ígneas serem pobres em cloretos, estes são provenientes da lixiviação de minerais ferromagnesianos, sendo interpretado que a área de recarga exerce influência, onde ocorrem rochas orto e para derivadas.

A alcalinidade representa a capacidade da água em neutralizar um ácido. Representando a soma de bases neutralizáveis, presente como o bicarbonato, carbonato, hidroxila e outros compostos (boratos, fosfatos, silicatos). Portanto, como as análises apresentam baixos teores de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos, em alguns casos com teores abaixo do limite de detecção do Fotômetro, por analogia conclui-se que as águas meteóricas possuem baixo teor de gás carbônico e litologicamente o aquífero possui baixas taxas de sedimentos ricos em minerais com cálcio.

A análise do poço 02, observa-se que ocorrem teores de fluoreto, sendo registrado teores acima do limite de detecção do fotômetro ($> 1,5$ mg/L) e também de sulfato com a ocorrência de 31 mg/L. Como este poço localiza-se num alto estrutural onde ocorre a exposição da Formação Apoteri, pressupõe-se que ocorra a percolação de água do aquífero fissural composto por rochas de composição máfica como gabros, diabásios e basaltos. Tais rochas podem ser ricas em sulfetos, sulfatos e fluoretos decorrente da presença nos minerais constituintes. Ainda no poço 02 foi encontrada uma quantidade considerável de amônia quaternária (10,3 mg/L), sendo que a portaria do Ministério da saúde N° 2.914/2011, dispõe que o valor máximo permitido para consumo humano é de 1,5 mg/L.

Por ser uma região já consagrada durante décadas como uma área de atividade agrícola, associa-se que a origem da amônia pode estar associada ao uso de fertilizantes.

Importante ressaltar que os íons nitrito e nitrato foram encontrados abaixo do limite de detecção do Fotômetro em todos os pontos amostrados, portanto, acredita-se que as águas subterrâneas do Aquífero Boa Vista estão livres de poluição nas áreas pontualmente estudadas.

Essa é uma conclusão que ainda requer mais análises químicas de uma gama maior de elementos e compostos. Pode-se dizer, que de maneira geral, o SABV não apresenta níveis expressivos de Nitrito e Nitrato, entretanto outros elementos químicos que podem indicar interferência antrópica (COD, K, Na e outros) devem ser minuciosamente analisados em estudos futuros.

Tabela 13 - Tabela de análise química. Teste *in situ* poço tubular 02

| | | | |
|---------------------|--------------------------|-------------------------------|------------------|
| Local | Poço 02 | | |
| Nº Pto. | P2 (Poço 02) | OBS.: | Data: 13/09/2020 |
| Nº Am. | Q2 2 D | Extração após + de 5 min | Hora: 12:25 |
| Coord. | 60° 41' 56" / 2° 54' 39" | de a bomba estar ligada. | |
| Temperatura: 30,5°C | | Condutividade Elétrica: 4 ppm | |
| GRUPO | CODIGO | DESCRIÇÃO | MEDIDA |
| G1 | AL | AL TOTAL | L.O. |
| G1 | CH | CLORETO | L.O. |
| G1 | PH | PH | 5,5 |
| G1 | F- | FLUORETO | Hi |
| G2 | AL3(AL) | ALUMÍNIO | 0 |
| G2 | FERRO | FERRO TOTAL | 0,43 |
| G2 | MN | MANGANÊS | 0 |
| G4 | NO2 | NITRITO | 0 |
| G4 | PO4 | FOSFATO | 0,04 |
| G4 - G5 | NO3 | NITRATO | L.O. |
| G6 | QA | AMÔNIA QUAT. | 10,3 |
| G7 | SO4 | SULFATO | 31 |

Tabela 14 - Tabela de análise química. Teste *in situ* poço tubular 03

| | | | |
|---------------------|--------------------------|---|-----------------|
| Local | Poço 03 | | |
| Nº Pto. | P3 (Poço 03) | OBS.: | Data:13/09/2020 |
| Nº Am. | Q3 - Q3D | Extração após + de 5 min de a bomba estar ligada | Hora: 14:30 |
| Coord. | 60° 46' 58" / 2° 51' 20" | | |
| TEMPERATURA: 31,2°C | | Condutividade Elétrica: 4 ppm | |
| GRUPO | CODIGO | DESCRIÇÃO | MEDIDA |
| G1 | AL | AL TOTAL | L.O. |
| G1 | CH | CLORETO | 16 |
| G1 | PH | PH | 5,5 |
| G1 | F- | FLUORETO | 16 |
| G2 | AL3(AL) | ALUMÍNIO | 0 |
| G2 | FERRO | FERRO TOTAL | 0,34 |
| G2 | MN | MANGANÊS | 0 |
| G4 | NO2 | NITRITO | 0 |
| G4 | PO4 | FOSFATO | 0,23 |
| G4 | NO3 | NITRATO | L.O. |
| G6 | QA | AMÔNIA QUAT. | 0 |
| G7 | SO4 | SULFATO | 7 |

Tabela 15 - Tabela de análise química. Teste *in situ* poço tubular 07

| | | | |
|---------------------|--------------------------|---|-------------------|
| Local | Poço 07 | | |
| Nº Pto. | P1 (Poço 07) | OBS.: Extração após + de 5 min de a bomba estar ligada | Data 13/09/2020 |
| Nº Am. | Q1 - Q1D | | Hora: 10:59 |
| Coord. | 61° 00' 36" / 2° 54' 20" | | |
| Temperatura: 31,8°C | | Condutividade Elétrica: 4 ppm | |
| GRUPO | CODIGO | DESCRIÇÃO | MEDIDA |
| G1 | AL | AL TOTAL | L.O. |
| G1 | CH | CLORETO | 16 |
| G1 | PH | PH | 5,5 |
| G1 | F- | FLUORETO | 0,61 |
| G2 | AL3(AL) | ALUMÍNIO | 0,92 |
| G2 | FERRO | FERRO TOTAL | 0,21 |
| G2 | MN | MANGANÊS | 0 |
| G4 | NO2 | NITRITO | 0 |
| G4 | PO4 | FOSFATO | 0,23 |
| G4 | NO3 | NITRATO | L.O. |
| G6 | QA | AMÔNIA QUAT. | 0 |
| G7 | SO4 | SULFATO | 15 |

6.4 RESULTADOS DOS TESTES DE BOMBEAMENTO

A Tabela 16 apresenta o registro das medições diretas (dados brutos) de nível estático e vazão dos poços tubulares estudados. Tais medidas serviram de comparativo com o mapa de vazões gerado a partir do banco de dados do SIAGAS (CPRM).

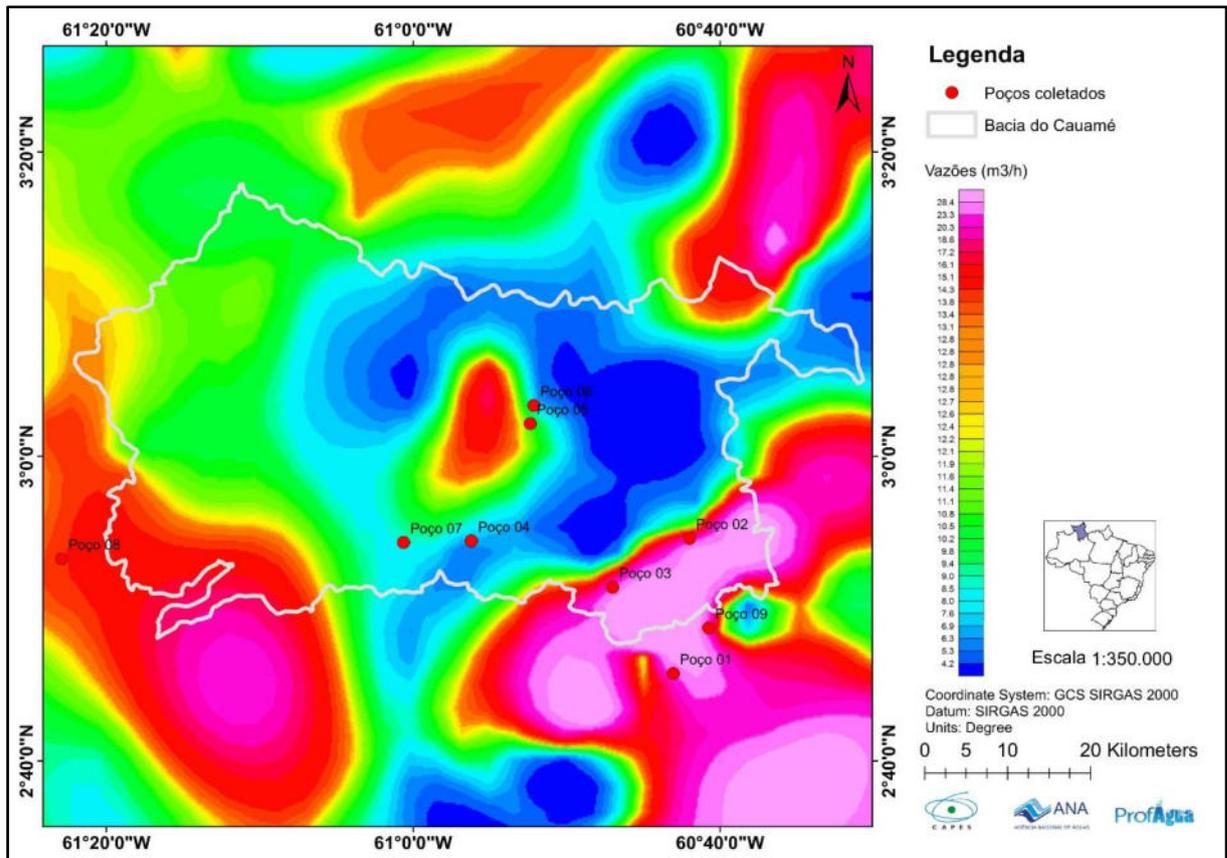
Tabela 16 - Valores obtidos da medição direta no poço tubular

| Poços analisados | | |
|-------------------------|-----------|------------------------|
| nº poço | NE | VZ |
| Poço 01 | - 4 mts | 8.0 m ³ /h |
| Poço 02 | - 7 mts | 8.0 m ³ /h |
| Poço 03 | - 5 mts | 8.0 m ³ /h |
| Poço 04 | - 3 mts | 8.0 m ³ /h |
| Poço 05 | - 14 mts | 4.0 m ³ /h |
| Poço 06 | - 8 mts | 2.0 m ³ /h |
| Poço 07 | - 4 mts | 10.0 m ³ /h |
| Poço 08 | - 14 mts | 2.0 m ³ /h |
| Poço 09 | - 3 mts | 8.15 m ³ /h |

Após a comparação dos valores medidos em campo e o mapa de vazões, chegou-se à conclusão que o banco de dados não dispõe de informação suficiente para representação espacial em escala detalhada das vazões de produção, uma vez que apenas existem disponibilizados informações de 117 poços tubulares dentro de uma região com 3.165 km², ou seja, o valor obtido é extrapolado a um diâmetro de 27 km. Os poços tubulares 05, 06 e 08, possuem dados de vazões medidas discordantes dos gerados no mapa de vazões.

Importante ressaltar que devido ao limite de capacidade de bombeamento das bombas submersas instaladas nos poços tubulares medidos é também um fator limitador para a medição da máxima vazão de exploração.

Figura 39 - Mapa de vazões gerado a partir dos dados do SIAGAS (2020)



Fonte: O Autor.

No poço tubular 07 foi realizado o teste de bombeamento do tipo produção e também o teste de aquífero simultaneamente. Ao instante em que se media o poço bombeado, foi medido também um poço tubular a uma distância de 20 metros. Observa-se que após a vazão máxima permitida pela bomba submersa de 10,0 m³/h ocorre a estabilização do rebaixamento do nível dinâmico a uma profundidade de 4,94 metros. Neste instante então encerra-se o teste e realiza-se a medição da recuperação do nível estático, Figura 40. As tabelas referentes ao teste de bombeamento encontram-se nos anexos.

A vazão máxima para produção calculada a partir da equação característica do poço (Poço 07) é de 21,45 m³/h, sendo o rebaixamento disponível o fator limitante, Tabela 17.

Figura 40 - Teste de bombeamento escalonado - Rebaixamento x Tempo



Fonte: O Autor.

No poço tubular 09 foi realizado o teste de bombeamento do tipo produção escalonado (Figura 41). A vazão máxima obtida foi de 8,15 m³/h, observou-se que após 4 horas de bombeamento ocorreu a estabilização completa do nível dinâmico em 8,18 metros encerrando-se o teste e realizando-se a recuperação, Figura 42.

As tabelas referentes ao teste de bombeamento encontram-se nos anexos.

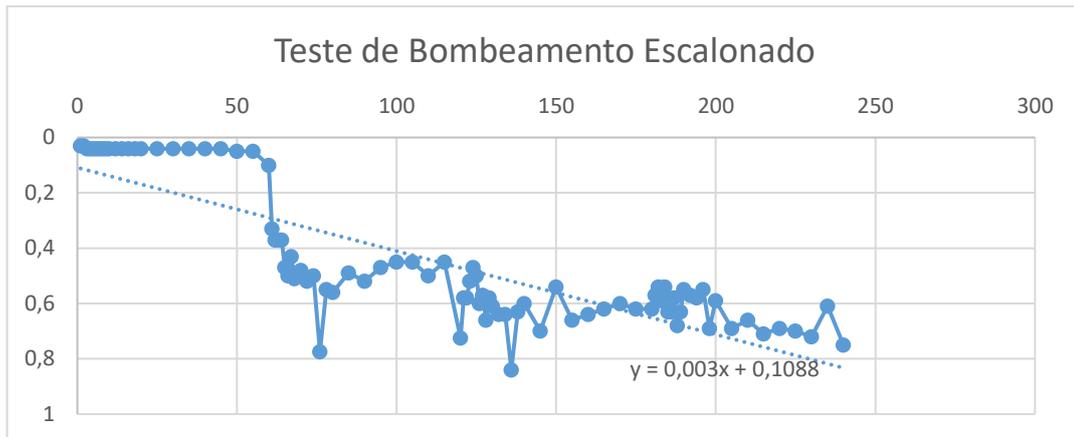
Figura 41 - Escoador de orifício com o tubo de pitot durante a realização do teste de bombeamento



Fonte: O Autor.

Consideração que a equação característica do poço obteve a vazão máxima de 34,43 m³/h, sendo o rebaixamento disponível o fator limitante.

Figura 42 - Teste de bombeamento escalonado – Rebaixamento x Tempo



Fonte: O Autor.

O valor de condutividade hidráulica obtido no poço tubular 09 através do teste de aquífero assemelha-se ao valor obtido em laboratório no poço tubular 01. Confirmando então que mesmo utilizando diferentes metodologias chegou-se a resultados semelhantes. Os valores de transmissividade e vazões de produção assemelhando-se aos citados por CPRM (2006).

Tabela 17 - Valores hidrodinâmicos obtidos a partir do teste de bombeamento

| Nº poço tubular | Q produção (m3/h) | Transmissividade (m2/s) | Condutividade hidráulica (cm/s) | Vazão específica (m3/h/m) | Coefficiente de armazenamento | Eficiência do poço (%) |
|-----------------|-------------------|-------------------------|---------------------------------|---------------------------|-------------------------------|------------------------|
| Poço 07 | 27,77 | 0,002 | 0,0117 | 5,291 | $2,7 \times 10^{-3}$ | 84% |
| Poço 09 | 34,43 | 0,009 | ----- | 10,724 | ----- | 97% |

6.5 INTEGRAÇÃO DE DADOS

O Sistema Aquífero Boa Vista é um importante reservatório de água para a região da bacia hidrográfica do rio Cauamé. A recarga por precipitação ocorre em toda a extensão da bacia, sendo que ainda ocorre refluxo das águas subterrâneas a partir das rochas do embasamento formadas pelo Domínio Guiana Central e pela Formação Apoteri, alimentando, portanto, o aquífero intergranular. Na zona de recarga a extremo oeste da área, ocorre um pacote sedimentar de 34 metros de espessura, sobre o embasamento cristalino, sendo importante futuros estudos para o entendimento da sua evolução estratigráfica.

A direção geral do fluxo subterrâneo é de noroeste (NW) para sudeste (SE) em direção a calha do Rio Branco, sendo que localmente existem pequenas variações causadas por reativações de falhas (Menezes et al., 2020).

O Aquífero Boa Vista é composto principalmente por areias de granulometria predominantemente média a grossa nas bordas da bacia e fina a média nas regiões centrais, isso se deve ao fato de as regiões proximais da área fonte da bacia serem preenchidas por sedimentos mais grossos e as regiões distais por sedimentos mais finos.

Existem pelo menos 2 ciclos de deposição marcantes na sequência estratigráfica da Formação Boa Vista separados por uma discordância, o primeiro nas camadas superiores com granulometria granodecrescente para o topo e o segundo nas camadas inferiores com granulometria granocrescente para o topo.

A condutividade hidráulica medida varia de 1.2×10^{-2} cm/s a 3.2×10^0 cm/s, sendo que ocorre heterogeneidade vertical ao longo do empilhamento estratigráfico. Na área do poço tubular 02, encontrou-se valores de condutividade hidráulica da ordem de $1.2 \times 10^{-2} < K < 3.2 \times 10^0$, corroborando com a sondagem 02, definido como um baixo estrutural preenchido por sedimentos dentro da mega região ocupada pela Formação Apoteri (Reis 1996).

As fácies hidroquímicas das águas subterrâneas indicam trocas iônica, tanto diretamente nos sedimentos, como também com circulação reversa, águas de recarga de rochas ortoderivadas e outros, simples dissolução ou mistura durante o fluxo das águas subterrâneas.

A hidroquímica é diversificada em toda área de estudo, ocorrendo a predominância dos íons Cl^- , SO_4 , F^- e Fe^{+2} , Fe^{+3} . As águas possuem um potencial hidrogeniônico levemente ácido de 5,5. O nitrato (NO^{+3}) e nitrito (NO^{+2}), possuem valores abaixo do limite de detecção do fotômetro, portanto, supõem-se que o aquífero Boa Vista é uma área que sofre pouca influência de atividades antrópicas. Pontualmente na região do poço tubular 02 encontrou-se amônia quaternária com valores de concentração acima do máximo permitido para o consumo humano

(MS nº 2914 de 2011), por ser uma região com intensa atividade de agricultura, sendo interpretado como fato gerador o uso de fertilizantes.

As vazões de bombeamento obtidas indicam que as regiões com valores de declividade altos, possuem baixo potencial para a exploração das águas subterrâneas, apesar dos altos valores de condutividade hidráulica, isso se deve ao fato de funcionarem como um corredor de passagem das águas subterrâneas. Em contrapartida as regiões com baixa declividade possuem alto potencial para a exploração das águas subterrâneas.

7 CONCLUSÕES

Dos estudos conclui-se que:

- O aquífero Boa Vista, na Bacia do Cauamé, é um importante reservatório subterrâneo, ocupando a área de 1.803,00 km², representando 57% da total extensão da Bacia;
- A condutividade hidráulica medida varia de 1.2×10^{-2} cm/s a 3.2×10^0 cm/s, sendo que ocorre heterogeneidade vertical ao longo do empilhamento estratigráfico;
- O mapa potenciométrico indica que a direção geral do fluxo subterrâneo é de noroeste (NW) para sudeste (SE) com descarga na calha do Rio Branco;
- O Aquífero Boa Vista é composto principalmente por areias de granulometria predominantemente média a grossa nas bordas da bacia e fina a média nas regiões centrais;
- Os estudos apontam que a região do bairro Monte Cristo, ocorrem vazões de 8 m³/h revelando possibilidades de haver um maior potencial para exploração das águas subterrâneas;
- As características hidroquímicas das águas subterrâneas refletem a composição mineralógica das rochas que as contêm, e em associação com fatores climáticos, que produzem a concentração de cloretos associados a rochas ortoderivadas;
- A recirculação de águas associadas a rochas máficas produzem a concentração de fluoretos;
- As águas subterrâneas foram separadas em dois grupos distintos: cloro-sulfatadas e sulfatadas, o estudo permitiu concluir que existe uma correlação entre a composição química das águas subterrâneas, as condições de circulação e a litologia;
- Nitrito e nitrato não apresenta níveis expressivos de concentrações, entretanto essa é uma conclusão que ainda requer mais análises químicas de uma gama maior de elementos e compostos.
- Ocorre concentrações de amônia na região do bairro Monte Cristo, sendo interpretado como causadas pelo uso de fertilizantes, entretanto são necessários estudos complementares futuros.

REFERÊNCIAS

BARBOSA, O.; ANDRADE RAMOS, J.R. DE. Território do Rio Branco: Aspectos principais da geomorfologia, da geologia e das possibilidades minerais de sua zona setentrional. BRASIL. **DNPM**. DGM. B., Rio de Janeiro, nº 196, 49p. 1959. il.

BARBOSA, R.I. Distribuição das chuvas em Roraima. In: BARBOSA, R. I.; FERREIRA, E. J. G.; CASTELLÓN, E. G. (Ed). **Homem, Ambiente e Ecologia no Estado de Roraima**. Manaus: INPA. p. 325-335, 1997.

BATISTA, J. C. **Superexploração de águas subterrâneas, o caso de Recife (PB)**. Tese de mestrado apresentada a Universidade de São Paulo – USP, 2015.

BERRANGÉ, J. P. **A synopsis of the geology of southern Guyana**. Inst. Geol. Sci., Overseas Div. Report 26: 'I-II, 1973.

BOMFIM, L.F.C.; LIBERATORE, G.; RAMGRAB, G.E.; VIEGAS FILHO, J. DE R.; MANDETTA, P. **Projeto Roraima**. Ministério das Minas e Energia. Relatório final. Manaus: DNPM/CPRM, v. IA-D e II. 1974.

BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**. Brasília-DF, 1981. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L6938.htm>. Acesso em: 20 agosto de 2019.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**. Brasília-DF, 1997. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm>. Acesso em: 20 agosto de 2019.

BRASIL. Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**. Brasília-DF, 1998. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19605.htm>. Acesso em: 20 agosto de 2019.

BRASIL. Lei nº 9.795, de 1999. Dispõe sobre a educação ambiental, institui a Política Nacional de Educação Ambiental e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**. Brasília-DF, 1999. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19795.htm>. Acesso em: 20 agosto de 2019.

BRASIL. Lei nº 9.985/00, de 18 de julho de 2000. Regulamenta o art. 225, § 1º, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**. Brasília-DF, 2000. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19985.htm>. Acesso em: 20 agosto de 2019.

BRASIL. Decreto-lei nº 7.841 de 8 de agosto de 1945. Código de Águas Minerais. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**. Brasília-DF, 1945. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto-lei/1937-1946/del7841.htm> Acesso em: 20 agosto de 2019.

BRASIL. Decreto nº 4.297, de 10 de julho de 2002. Regulamenta o art. 9º, inciso II, da Lei no 6.938, de 31 de agosto de 1981, estabelecendo critérios para o Zoneamento Ecológico-Econômico do Brasil - ZEE, e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**. Brasília-DF, 2002. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2002/D4297.htm>. Acesso em: 20 agosto de 2019.

BRASIL. RESOLUÇÃO Nº 303, DE 20 DE MARÇO DE 2002. Dispõe sobre parâmetros, definições e limites de Áreas de Preservação Permanente. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**. Brasília-DF, 2002. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res30302.html>>. Acesso em: 20 agosto de 2019.

BRASIL. PORTARIA Nº 2.914, DE 12 DE DEZEMBRO DE 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**. Brasília-DF, 2011. Disponível em: <https://bvsm.s.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html> Acesso em: 20 agosto de 2019.

BRASIL. CONAMA n. 335, de 2003. Dispõe sobre o licenciamento ambiental de cemitérios. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**. Brasília-DF, 2003. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/res/res03/res33503.xml>>. Acesso em: 20 agosto de 2019.

BRASIL. CONAMA n. 396, de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**. Brasília-DF, 2008. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=562>>. Acesso em: 20 agosto de 2019.

BRASIL. CONAMA n. 357, de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**. Brasília-DF, 2005. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>>. Acesso em: 20 agosto de 2019.

BRAUN, O. P. G. **Projeto Roraima, 2a Fase**; Levantamento geológico integrado: Relatório de mapeamento preliminar ao milionésimo, correspondente à “Fotointerpretação Preliminar”. Manaus: DNPM/CPRM, 1973. 218 p. il.

BRITO NEVES, B. B.; ALMEIDA, F. F. M. A evolução dos cratons Amazonico e São Francisco comparada com o dos seus homólogos do hemisfério norte-25 anos depois. **Anais..** s.l.: s.n., 2003.

CARNEIRO, R.G.; ANDRADE, F.G.; SILVA, G.O.P. Reconhecimento geológico no Território Federal de Roraima; **Gráben do Tacutu**. Belém: PETROBRÁS. Relatório interno nº 122, 1968.

COELHO, G.; PONTES, L. M.; BATISTA, M. L.; MELLO, R.; SILVA, A. M. **Relação entre o Escoamento de Base e os Diferentes Sistemas Hidrogeológicos do Estado de Minas Gerais**. Revista Águas Subterrâneas, v. 29, n. 3, p. 257-267, 2015.

COMPANIA DE ABASTECIMENTO E ESGOTOS DE RORAIMA (CAER). Disponível em: <<http://www.caer.com.br/empresa.jsp>> Acesso em: 20 de agosto de 2019.

COMPANHIA DE PESQUISAS DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. **Roraima Central**, Folhas NA.20-X-B e NA.20-X-D (integrais), NA.20-X-A, NA.20- X-C, NA.21-V-A e NA.21-V-C (parciais). Escala 1:500.000. Estado de Roraima. Superintendência Regional de Manaus, p. 166, 1999.

COMPANHIA DE PESQUISAS DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). **Zoneamento ecológico econômico da região central do estado de Roraima**. CPRM/Serviço Geológico do Brasil, Rio de Janeiro, 2002.

COMPANHIA DE PESQUISAS DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). **Mapa geológico do Estado de Roraima**. Sistema de Informações Geográficas - SIG. Mapa na escala de 1:1.1000.000. CD-ROM, 2004.

COMPANHIA DE PESQUISAS DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). **Geologia e Recursos Minerais do Estado do Amazonas** / Nelson Joaquim Reis. [et al.]. – Manaus: CPRM – Serviço Geológico do Brasil. p 7 - 16. 2006.

COMPANHIA DE PESQUISAS DE RECURSOS MINERAIS (CPRM) – **Carta hidrogeológica**. Folha NA.20. Boa Vista. Escala 1:1.000.000 – CPRM, 2016.

COMPANHIA DE PESQUISAS DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). **SIAGAS**. Disponível em:<<http://siagasweb.cprm.gov.br/layuot>>Acesso em: 20 de agosto de 2019.

COOPER, H. H.; JACOB, C. E.. **A generalized graphical method for evaluating formational constants and summarizing well field history**. American Geophysical Union Transactions, v. 27, p. 526-634, 1946.

CORDANI, U.G et al. Evolução tectônica da Amazônia com base nos dados geocronológicos. In: Congresso geológico chileno, 2, Arica. **Anais...** [s .n.], p.137- 138, 1979

CORDANI, U. G.; TEIXEIRA, W.; D'AGRELLA-FILHO, M. S.; TRINDADE, R. I. F. The position of the Amazonian Craton in supercontinents. **Gondwana Research**, Amsterdam, v. 15, n. 3-4, p. 396–407, 2009.

COSTA, J.A.V. **Tectônica da região nordeste do estado de Roraima**, Belém. Centro de Geociências. p. 315 (Tese de Doutorado), 1999.

COSTA M.L. **Aspectos geológicos dos lateritos da Amazônia**. Revistas Brasileiras de Geociências, São Paulo, v.21, n. 2, p.146-160, jun. 1991.

CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M. R. **Hidrologia subterrânea**. Editora Omega. Barcelona, 1983.

DAEMON, R. F. e CONTREIRAS, J. A. - Zoneamento palinológico da bacia do Amazonas. In, Congresso Brasileiro de Geologia, 25, Sao Paulo, 1969. **Anais**, S. Paulo, Sociedade Brasileira de Geologia, v, 3, p. 79-88, 1971.

DRISCOLL, F. G. **Groundwater and wells**. 2 ed. Minnesota: Johnson Division, 1986.

EDEN, M.J. Some aspects of weathering and landform in Guyana (British Guyana), **Zeitschrift fur Geomorphologie**, n.15, p. 181-198. 1971.

EIRAS, J. F.; KINOSHITA, E. M. **Evidências de movimentos transcorrentes na Bacia do Tacutu**. Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, v. 2, n. 2-4, p. 193-208, abr./dez. 1988.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.

ESTANQUEIRO, L. A; SALVI, L. **Análise do processo de escavação de túneis pela ótica do New Austrian Tunneling Method – NATM**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Vol. 12, p. 75-117.,2005.

FEITOSA, F. A. C.; FILHO, J. M.; FEITOSA, E. C.; DEMÉTRIO, J. G. **Hidrogeologia: Conceitos e aplicações**. 3 ed. Rio de Janeiro: CPRM/LABHID, 2008.

FETTER, C.W. **Applied Hydrogeology**. 3 ed. Edition, Macmillan College Publishing Company, New York, 1994.

FOSTER, S.S.D. & HIRATA, R.C.A. **Groundwater pollution risk evaluation: the methodology using available data**. Lima: CEPIS/PAHO/WHO, p. 78, 1988.

FOSTER, S.; HIRATA, R; ANDREO, B. **The aquifer pollution vulnerability concept: aid or impediment in promoting groundwater protection**. Hydrogeology Journal, p. 737-750, 2013.

FREEZE, R.A; CHERRY, J.A. **Groundwater**. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, 1979.

FITTS, C. R. **Águas Subterrâneas**. 2 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

GONÇALVES, V. G.; GIAMPÁ, C. E. **Águas subterrâneas e poços tubulares profundos**. 2 ed. São Paulo: Oficina dos textos, 2013.

GUERRA, A.T. Aspectos geográficos do Território do Rio Branco. **Revista Brasileira de Geografia**. Rio de Janeiro, v.16, n. 1, p. 117-128, jan. / mar. 1956.

HAGER, F. P. V. **Águas Subterrâneas no Direito Público**. Monografia Especialização em Direito Público. Faculdade Metropolitana de Belo Horizonte, 2007.

HASUI, Y. Sistema Orogênico Mantiqueira. In: HASUI, Y., CARNEIRO, C.D.R., ALMEIDA, F.F.M., BARTORELLI, A. (Org.). **Geologia do Brasil**. São Paulo, Editora Beca, p. 331-372, 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Panorama das cidades**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rr/panorama>> Acesso em: 20 agosto de 2019.

LIMA, M.I.C. **Introdução à interpretação radargeológica**. Rio de Janeiro: IBGE. P. 124, 1995.

LIMA, A.A. e VIEIRA FILHO, J.A. **Testes de Bombeamento em Poços Tubulares para Água Mineral e Água para Abastecimento**. Inéditos, 1994/2001.

MAIA, R.N. **Projeto Surumu**: relatório final. Manaus: DNPM; CPRM, v.1, 1980.

McCNONELL, R.B. Planation Surface in Guyana. **Geog. Jour**, v. 134, p. 506-520. 1968.

MELO, A.F.F. de; SANTOS, A.J.; CUNHA, M.T.P.; CAMPOS, M.J.; D'ANTONA, R. de J.G. **Projeto Molibdênio em Roraima**. Relatório Final. Manaus: DNPM/CPRM, v. 1 A-B, 1978.

MELLO, A. M.; WANKLER, F. L. **Caracterização físico-química do Aquífero Boa Vista, cidade de Boa Vista, RR** In: I Simpósio Internacional em Educação Ambiental no Estado de Roraima, 2015, Boa Vista. Anais... Boa Vista: EdUFRR. v.1. p.1 – 1, 2015.

MONTALVÃO, R.; MUNIZ, M.C.; ISSLER, R.S.; DALL'AGNOL, R.; LIMA, M.I.C.; FERNANDES, P.E.C. A.; SILVA, G.G. Geologia da Folha NA. 20. Boa Vista e parte das Folhas NA. 21 Tumucumaque, NB. 20 Roraima e NB. 21. In: BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Projeto RADAMBRASIL**. Folha NA.20. Boa Vista e parte das folhas NA. 21 Tumucumaque, NB. 20 Roraima e NB. 21; geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro. p. 137-180, 1975.

OLIVEIRA, A.I. Bacia do Rio Branco (Estado do Amazonas). **B. Serv. Geol Mineral** v. 37. Rio de Janeiro p.71, 1929.

PAIVA, G. Alto Rio Branco. **Boletim de Serviço Geológico Mineral** (Boletim 99). Rio de Janeiro. p. 44, 1939.

REIS, N. J. & FRAGA, L.M.B. Vulcanismo Surumu - Estado de Roraima: Caracterização de seu comportamento químico à luz de novos dados. CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 38, Salvador, 1996. **Anais...** Salvador, BA, SBG, vol. 2, p. 88-90, 1996.

REIS, N. J., FRAGA, L.M.B. **Geologia do Estado de Roraima**. Publicação Interna, Inédito, CPRM, Manaus, p. 24, 1998.

REIS N.J, FRAGA L.M.B. **Geological and Tectonic Framework of the Roraima State, Guiana Shield – An Overview**. International Geological Congress, Rio de Janeiro, 2000.

REIS, N. J.; FRAGA, L. M.; FARIA, M. S. G; ALMEIDA M. E.. **Geologia do estado de Roraima, Brasil**. In: F. ROSSI, L. JEAN-MICHEL & M. L. VASQUEZ (Ed.): Géologie de La France: v. 2-4: p. 121-134. ed. Brgm, Paris, 2003.

REIS, N.J.; FARIA, M.S.G. de; MAIA, M.A.M. **O Quadro Cenozóico da Porção Norte-Oriental do Estado de Roraima**. In: KLEIN, E.L.; VASQUEZ, M.L.; ROSA-COSTA, L.T. da. (eds.). Contribuição à Geologia da Amazônia, v. 3, Manaus: SBG/Núcleo Norte, 2001.

RIKER, S.R.L. **Projeto Insumos Minerais para Agricultura em Roraima – PIMA/RR**. Manaus: CPRM. P. 8, 1997.

RIKER, S.R.L. **Pesquisa de Argila para Cerâmica Vermelha em Boa Vista – RR**. Manaus: CPRM/Governo de Roraima. p. 12, 2002.

RIKER, S. R. L. **Argilas da região da Boa Vista-Roraima: mineralogia, geoquímica e aplicação tecnológica**. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Departamento de Geociências. Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2005.

RIKER S.R.L.; HORBE A.M.C.. Sedimentos holocênicos da região de Boa Vista, Roraima, para indústria de cerâmica vermelha. **Contribuições à Geologia da Amazônia**. SBGeo – NO. V. 5, p. 101, 2007.

RORAIMA. Lei Complementar n. 007, de 1994. Institui o Código de Proteção ao Meio Ambiente para a Administração da Qualidade Ambiental, Proteção, Controle e Desenvolvimento do Meio Ambiente e uso adequado dos Recursos Naturais do Estado de Roraima. **Diário Oficial do Estado de Roraima**. Boa Vista, 1994.

SANTOS J.O.S., HARTMANN L.A., FARIA M.S.G., RIKER S.R.L., SOUZA M.M., ALMEIDA M.E., MCNAUGHTON N.J. **A Compartimentação do Cráton Amazonas em Províncias: Avanços ocorridos no período 2000-2006**. In: SBG, 9º Simpósio de Geologia da Amazônia. Belém, Anais, CD-ROM, 2006.

SANTOS, J.O.S. & NELSON, B.W. 1995. **Os campos de dunas do Pantanal Setentrional**. Congresso Latino-americano, 8, Caracas. Temário 4 (dunas.doc). Caracas, Venezuela. p 9, 1995.

SCHAEFER, C. E. G. R.. Landscape Ecology and Land Use Patterns in Northeast Roraima. Brazil.London: Royal Holloway, University of London - **CEDAR Research Papers**: v.11, p.1-24,1994.

SCHAEFER, C. E. G. R.. Ecogeography and human scenario in Northeast Roraima, Brazil. **Journal of theBrazilian Association for the Advancement of Science**, London, v.49, n.4, p.241-252, 1997.

SCHAEFER, C.E.R.; VALE JÚNIOR, J. F. Mudanças Climáticas e evolução da paisagem em Roraima: uma Resenha do Cretáceo ao Recente. In: BARBOSA, R.I.; FERREIRA, E. J. G.; CASTELLÓN, E. G. (ed). **Homem, Ambiente e Ecologia no Estado de Roraima**. Manaus: INPA, p. 231-265, 1997

SCHOBENHAUS. C. E NEVES. B. **A geologia do Brasil no contexto da Plataforma Sul-Americana**. CPRM, 2003.

SILVA, E. L. S. **A vegetação de Roraima**. In: BARBOSA, R. I.; FERREIRA, E. J. G.; CASTELLÓN, E. G. **Homem, ambiente e ecologia no estado de Roraima**. Manaus: INPA, p.401-415, 1997

SOUZA, L. S. B.; CARVALHO, F. W. S. de. Contextualização geológica da porção sudoeste do Sistema Aquífero Boa Vista, a partir de sondagens elétricas verticais rasas. **Estado de Roraima, Brasil**. Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi. Cienc. Nat., Belém, v. 12, n. 1, p. 91-107, jan.-abr. 2017.

TASSINARI, C. G.; BETTENCOURT, J. S.; GERALDES, M. C.; MACAMBIRA, M. J. B.; LAFON, J. M. The Amazon craton. In: CORDANI, U.; MILANI, E. J.; THOMAZ FILHO, A.; CAMPOS, D. A. Tectonic evolution of South America. In: 31st INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS, 2000. Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, p. 41- 95, 2000.

TASSINARI C.C.G., MACAMBIRA M.J.B. **Geochronological provinces of the Amazonian Craton. Episodes**, 22(3): p. 174-182, 1999

TASSINARI C.C.G., MACAMBIRA M.J.B. A Evolução Tectônica do Cráton Amazônico. In: MANTESSO-NETO V., BARTORELLI A., CARNEIRO C.D.R., BRITO NEVES B.B. (ed.). **Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**, São Paulo, Beca, p. 471-485, 2004.

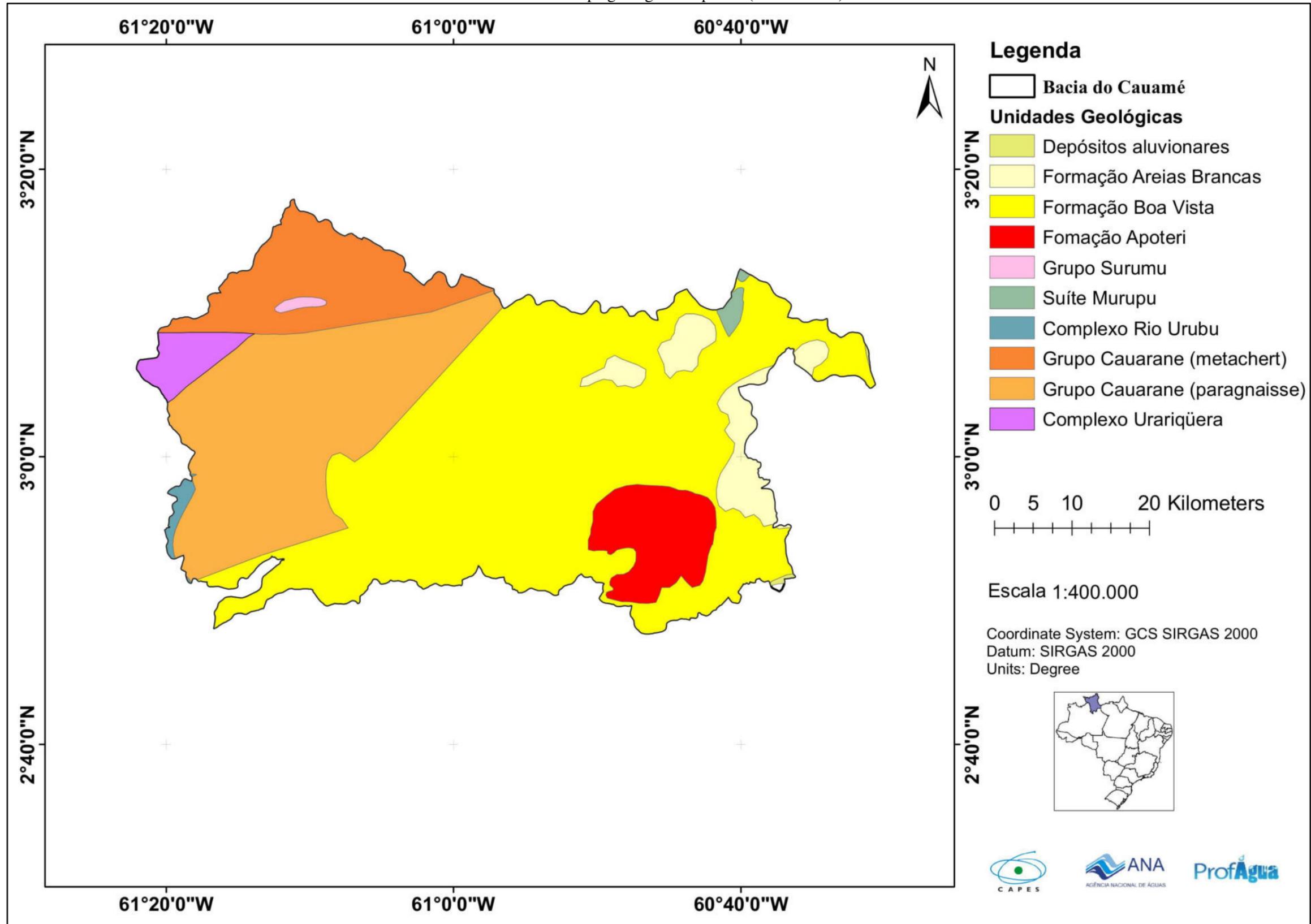
VAZ, P. T.; WANDERLEY FILHO J. R.; BUENO G. V. **Bacia do Tacutu**. Boletim de Geociências da PETROBRAS 15(2): p. 289-297, 2007.

WANKLER, F. L.; R. A. O. EVANGELISTA; C. SANDER. **Sistema Aquífero Boa Vista: “estado de arte” do conhecimento e perspectivas**. ACTA Geográfica 6(12): 21-39, 2012.

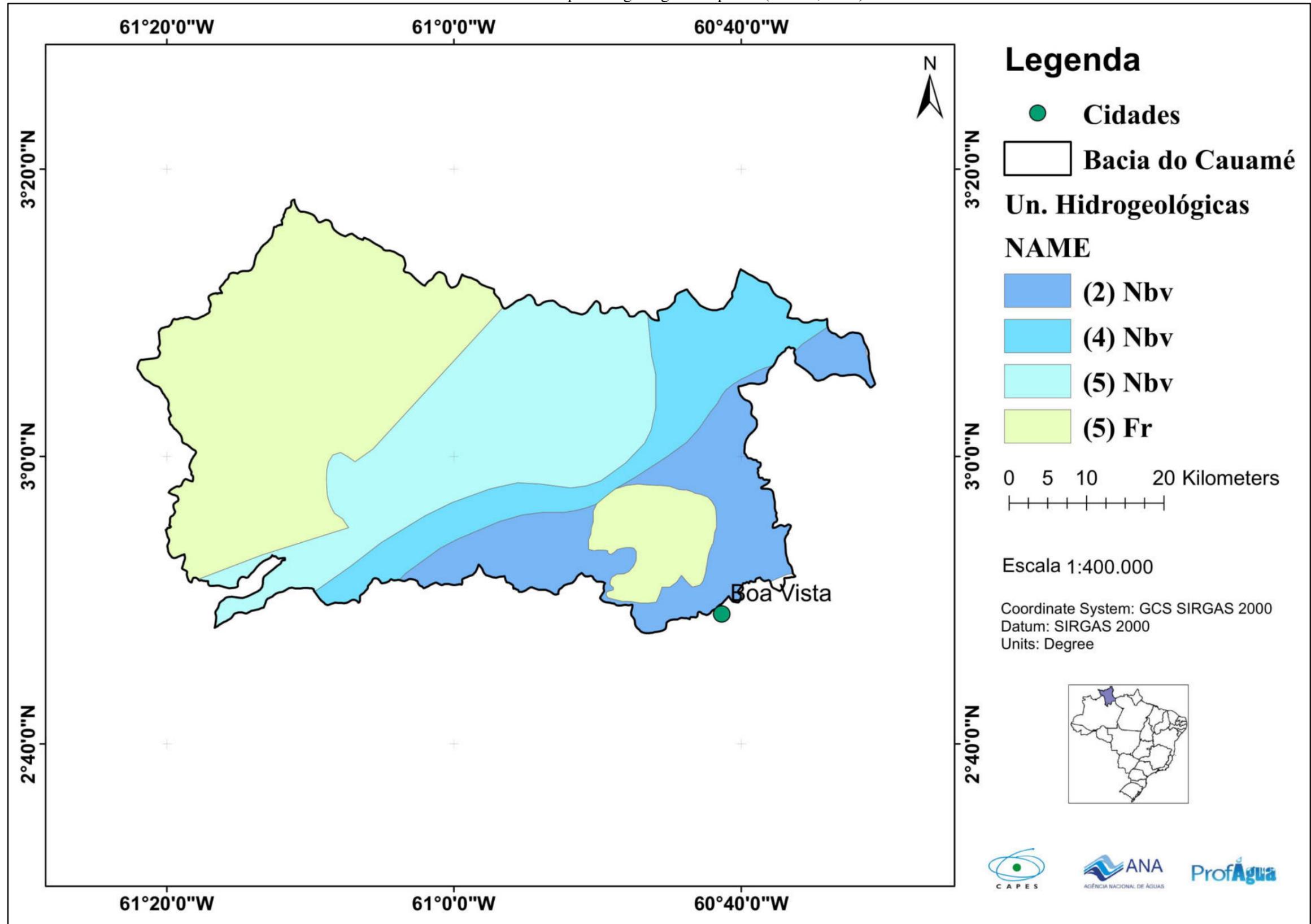
VALE JÚNIOR, J. F.; SOUSA, M. I. L. **Caracterização e distribuição dos solos das savanas de Roraima.** In: BARBOSA, R. I.; XAUD, H. A. M.; COSTA E SOUZA, J. M. Savanas de Roraima: Etnoecologia, Biodiversidade e Potencialidades Agrossilvipastoris. Boa Vista: FEMACT, 2005.

ANEXOS

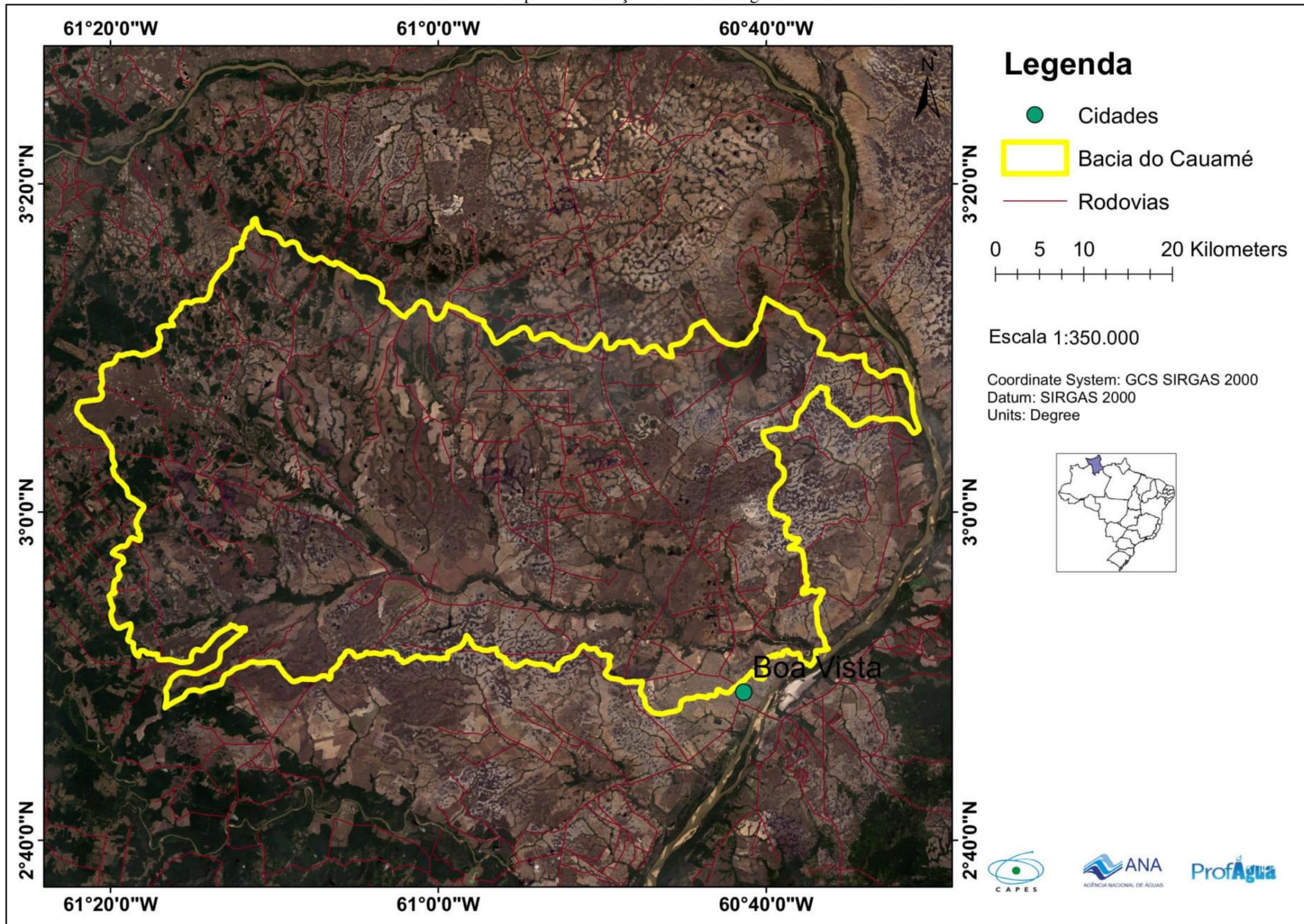
ANEXO A – Mapa geologico adaptado. (CPRM 2006)



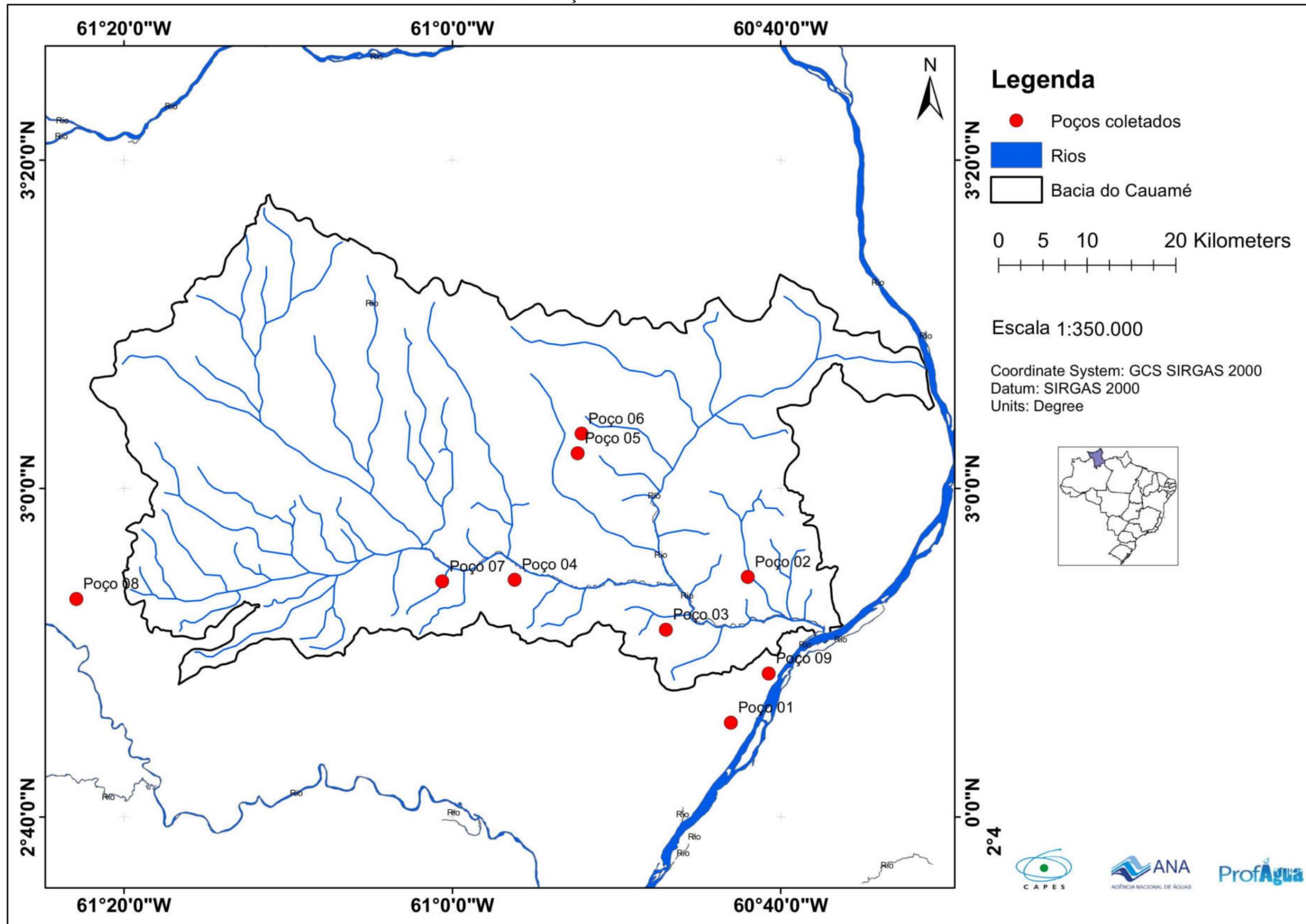
ANEXO B – Mapa hidrogeológico adaptado. (CPRM, 2006)



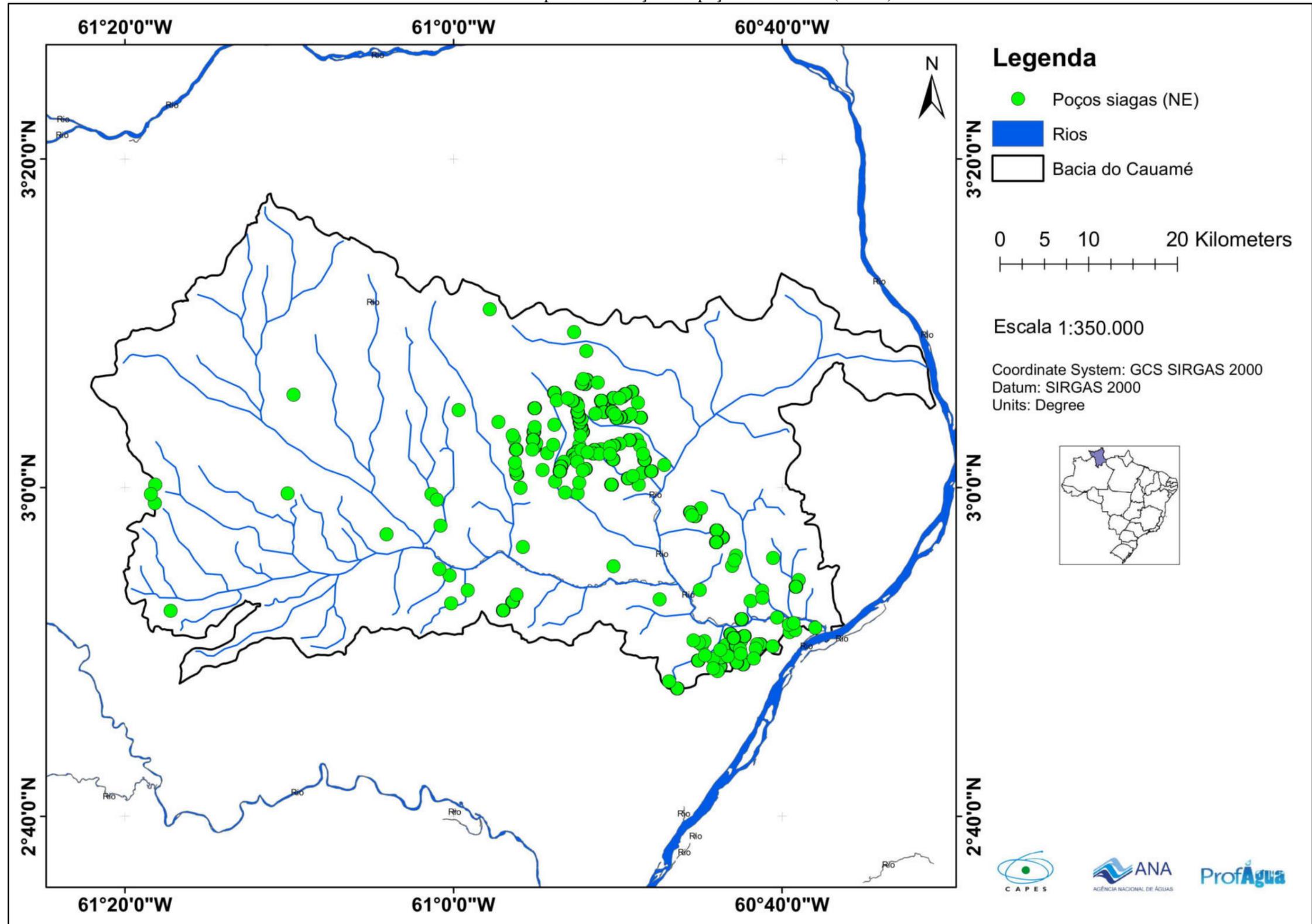
ANEXO C – Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Cauamé



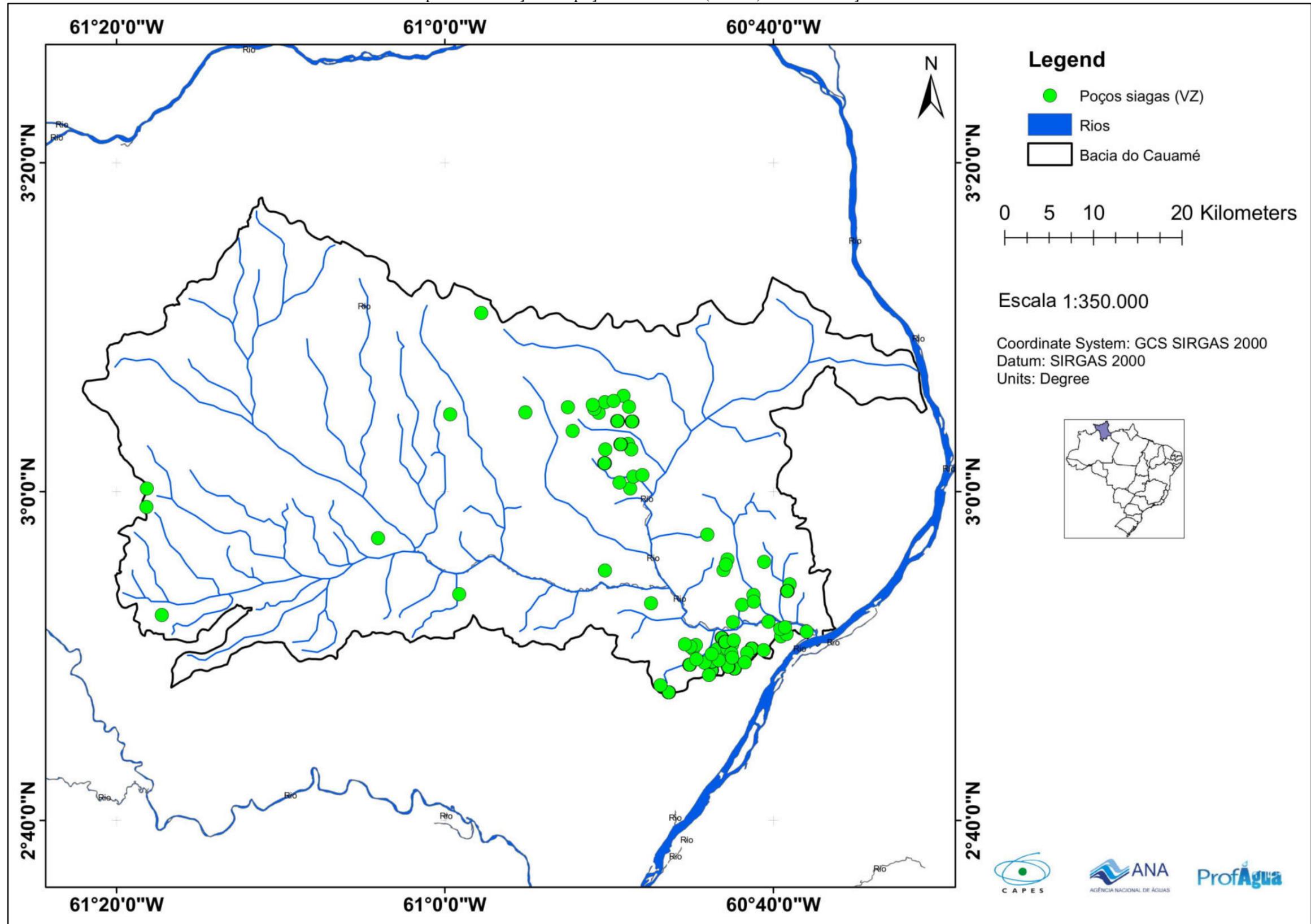
ANEXO D – Poços tubulares com coleta *in situ* de dados.



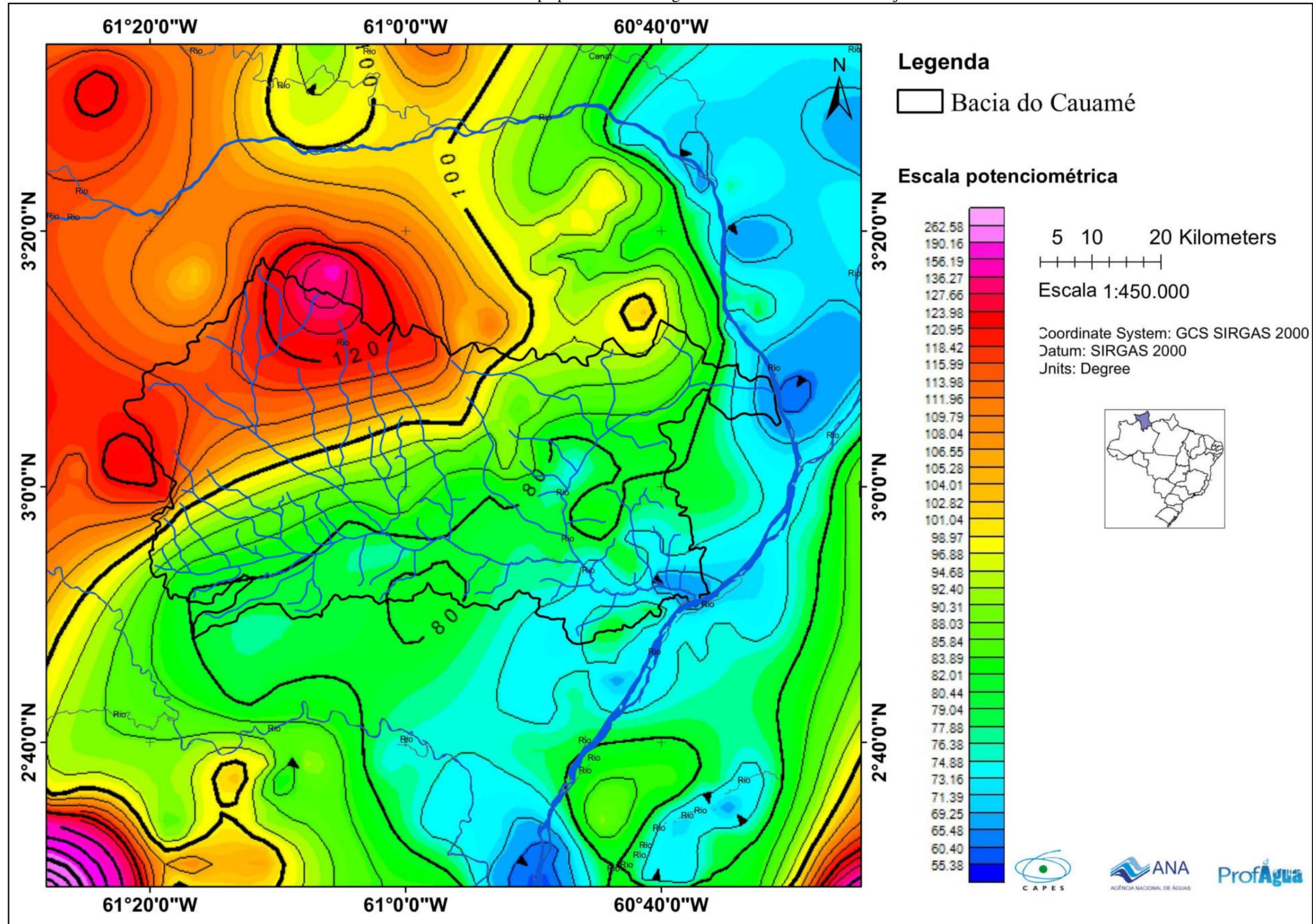
ANEXO E – Mapa de localização dos poços do SIAGAS (CPRM)



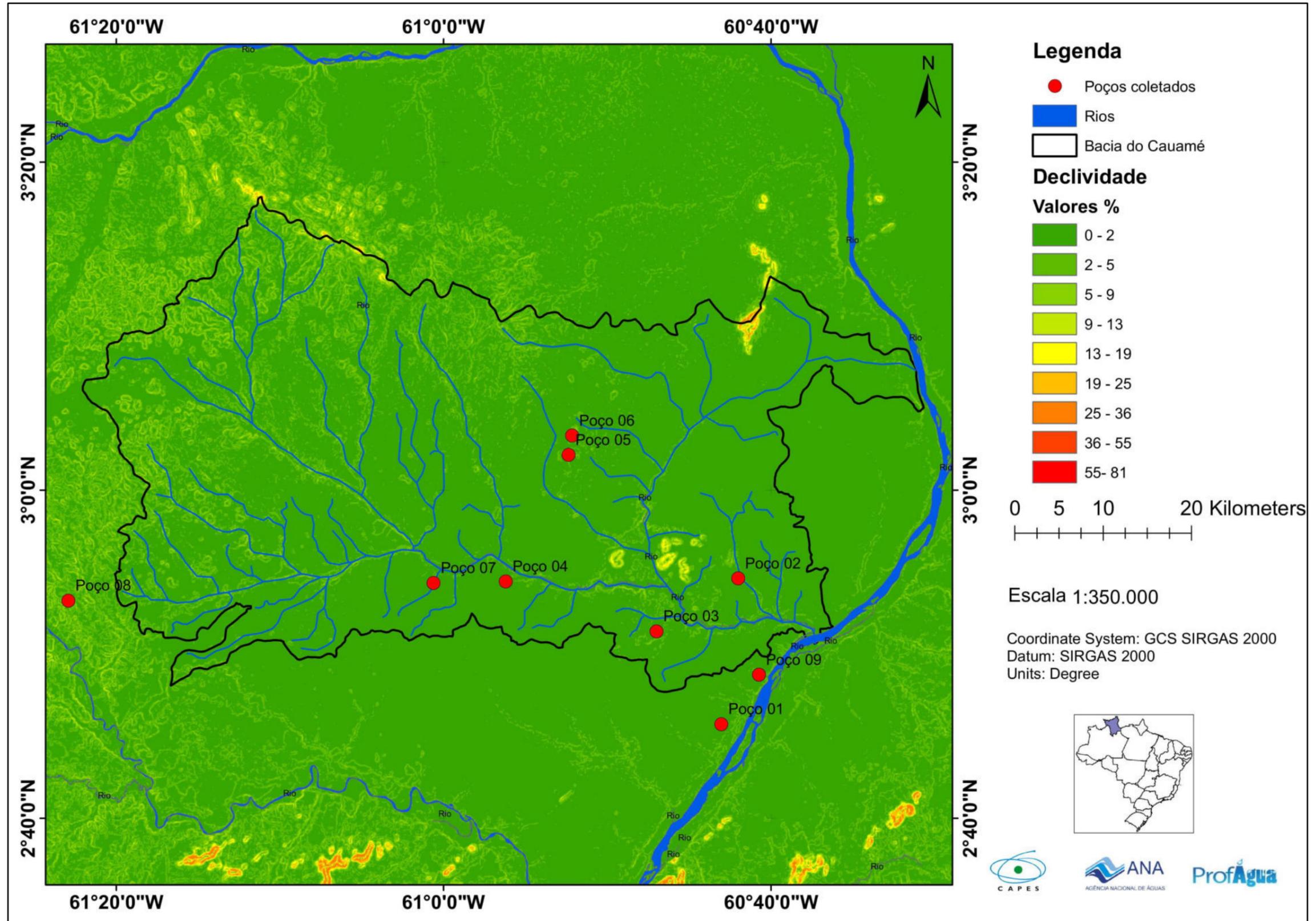
ANEXO F – Mapa de localização dos poços do SIAGAS (CPRM) com informação de dados de vazão



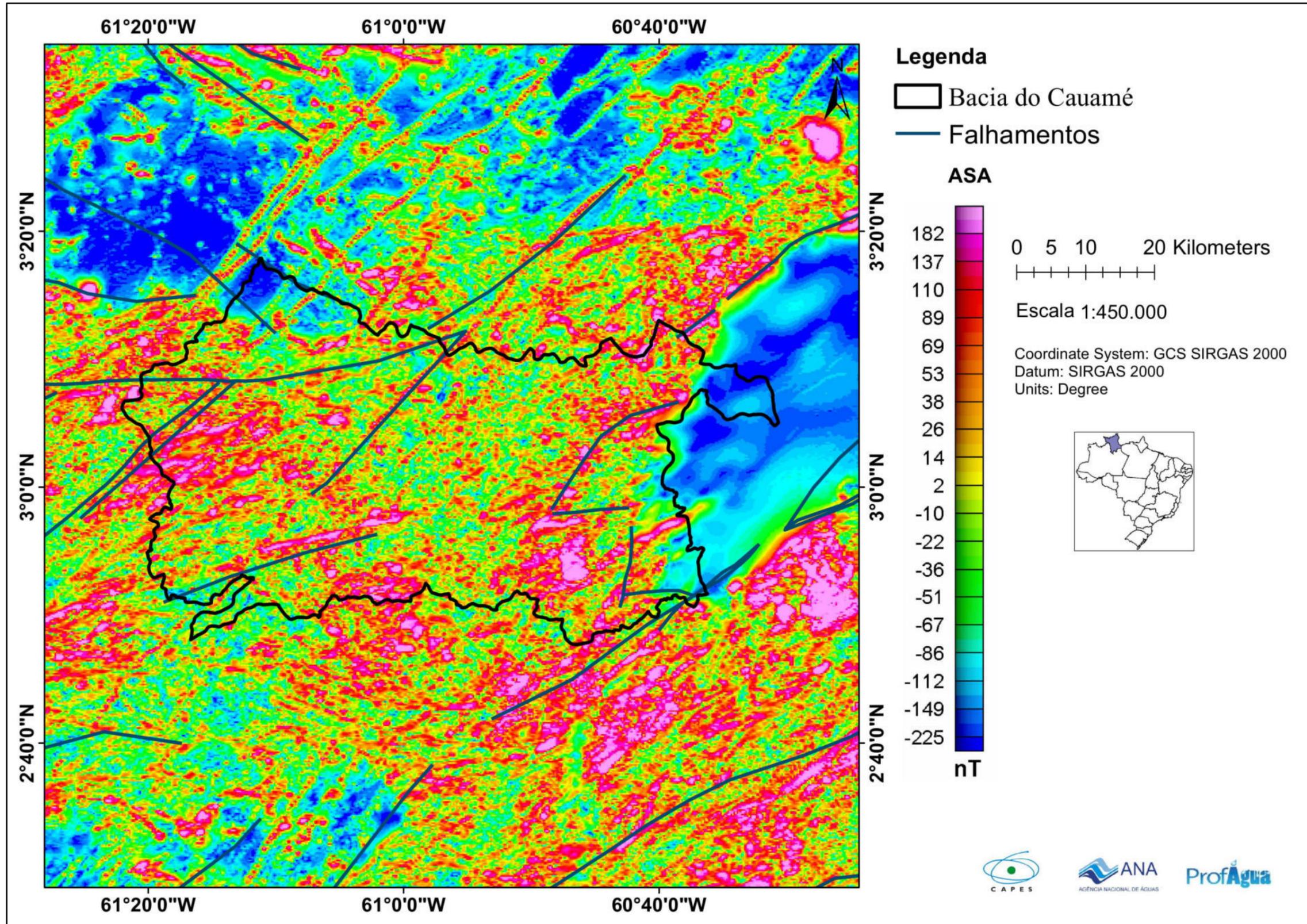
ANEXO G – Mapa potenciométrico gerado no Software Oasis Montaj



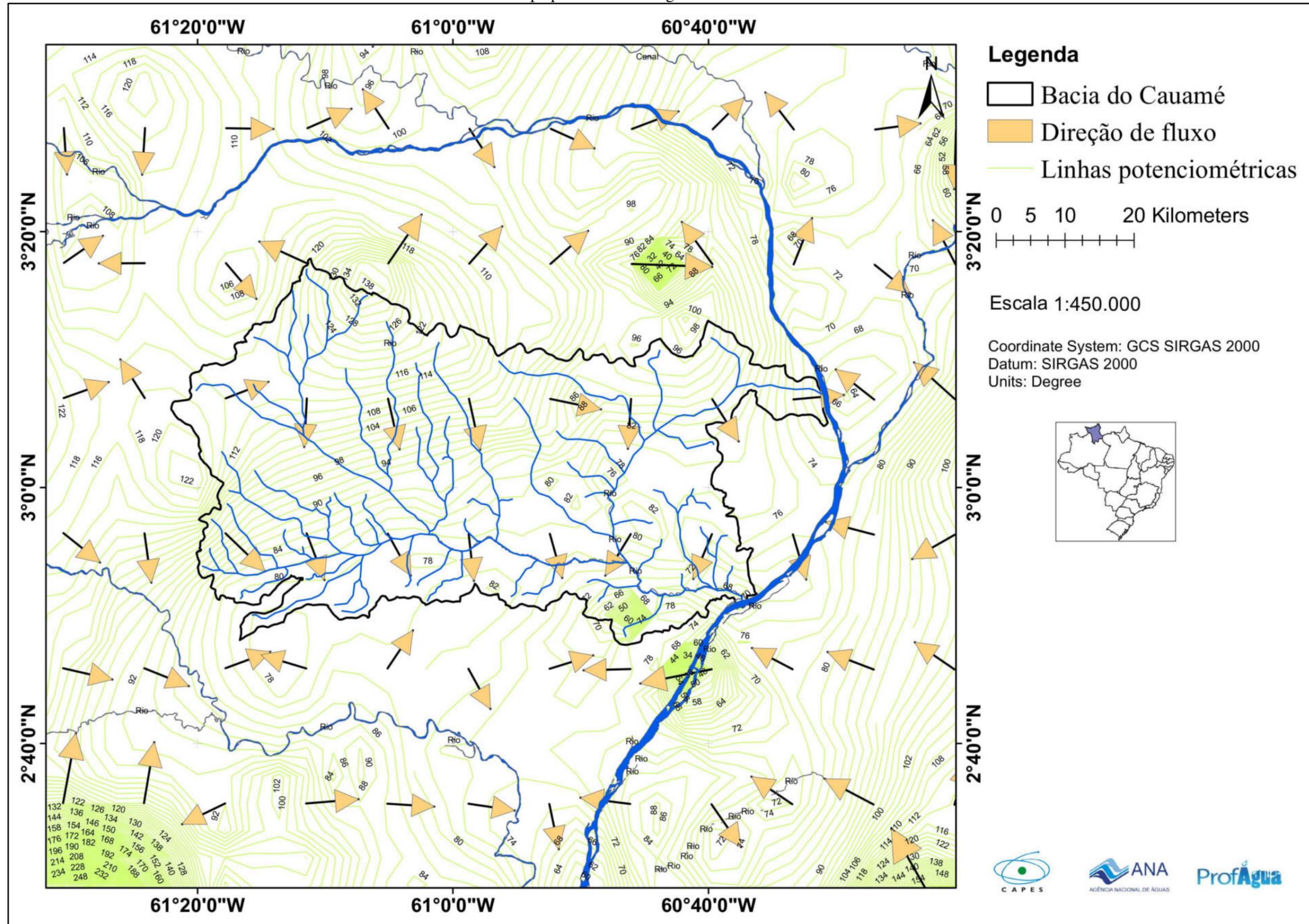
ANEXO H - Mapa de declividade gerado a partir do SRTM no ArcGis.



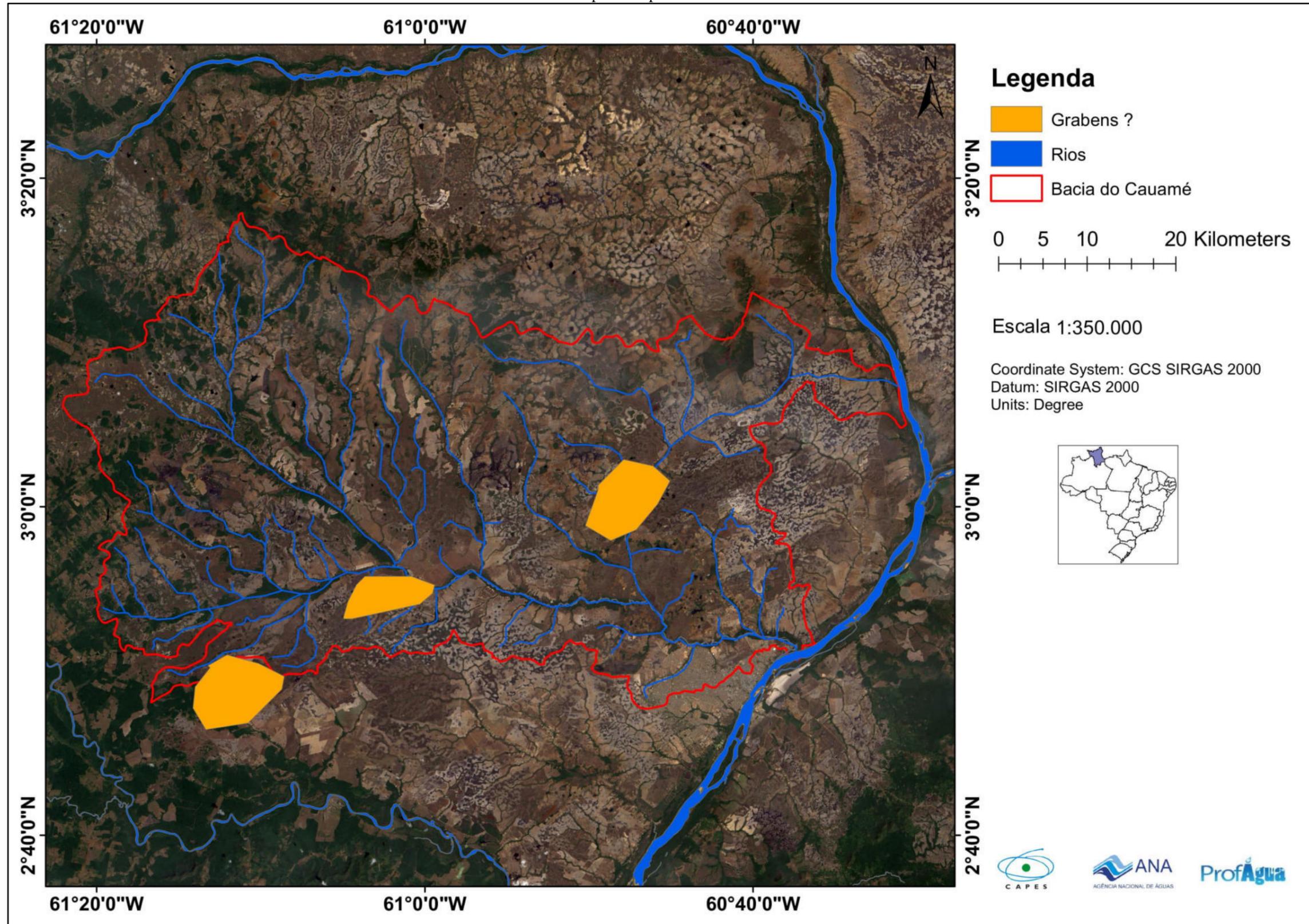
ANE0 I - Mapa da amplitude do sinal analítico (ASA), contendo os falhamentos estruturais regionais.



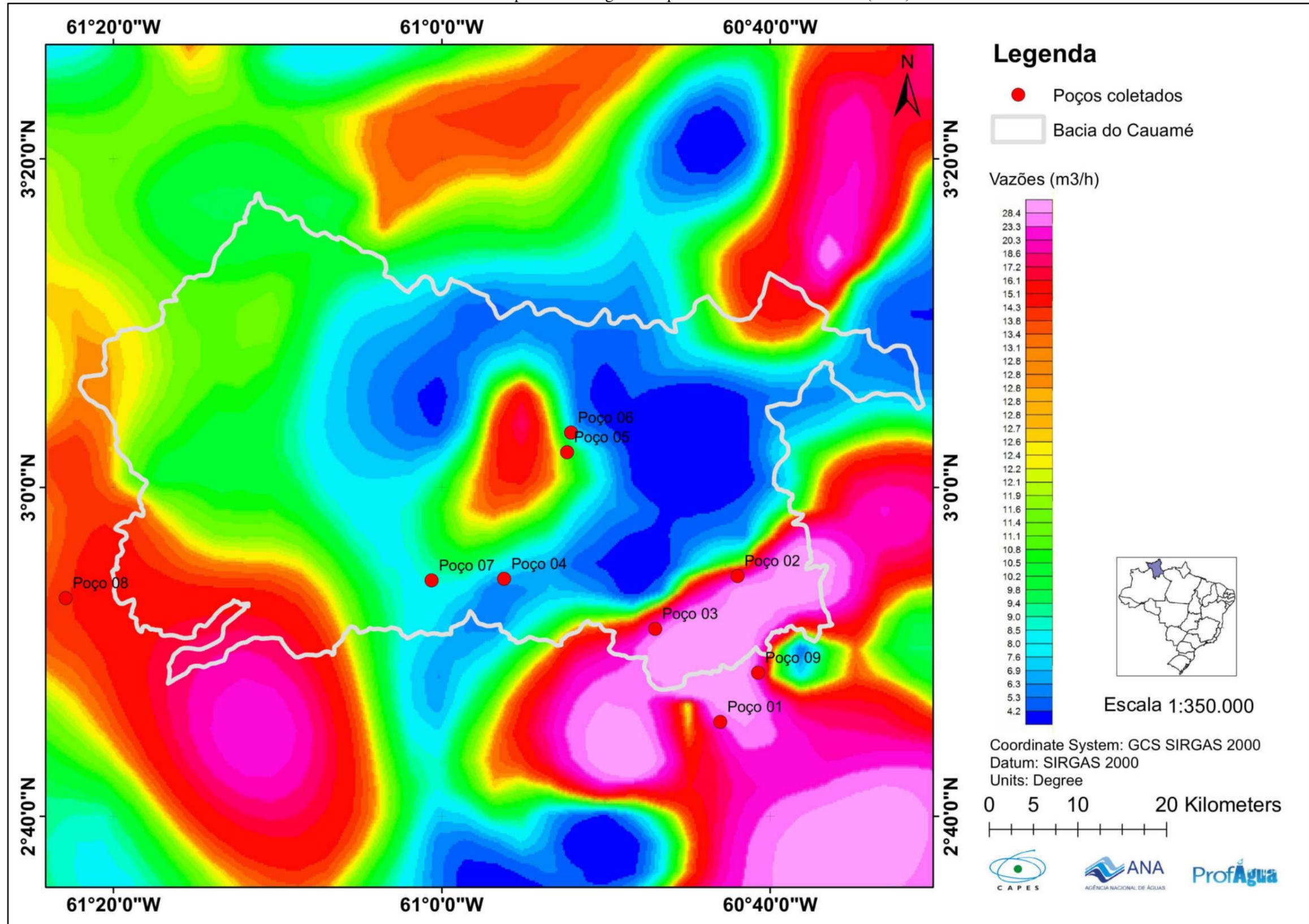
ANEXO J – Mapa potenciometrico gerado no Software Golden Surfer



ANEXO K - Mapa com possíveis Horsts e Grabens



ANEXO L - Mapa de vazões gerado a partir dos dados do SIAGAS (2020).



ANEXO M - Teste de Bombeamento Escalonado 1° escalão. Poço 09.

| TESTE DE BOMBEAMENTO | | | | | | |
|---|--|-------------------------------------|--------------------------|----------------------|-----------|-------------|
| Poço: Poço 09 | | | Município: Boa Vista, RR | | | |
| Tipo de teste: Teste de Produção - 1° Escalão | | | | | | |
| EQUIPAMENTO DE BOMBEAMENTO | | | | | | |
| Tipo: Submersa | | Marca: Schneider | | Potência (cv): 1,0 | | |
| Diam. Pol 3,5" | | Modelo: 10 S4E6 | | Prof. Crivo (m) 15 | | |
| Prof. N.E. (m): 7,43 | | s/q (m/m ³ /h): 0,004132 | | Boca do tubo: 0,50 m | | |
| Início | | | Término | | | |
| Data: 20/04/2020 | | Hora: 10:15 | | Data: 20/04/2020 | | |
| Hora | | t (mn) | N.D (m) | Q m ³ /h | S med (m) | Observações |
| 10:15:00 | | 1 | 7,44 | 4,84 | 0,01 | |
| | | 2 | 7,44 | 4,84 | 0,01 | |
| | | 3 | 7,44 | 4,84 | 0,01 | |
| | | 4 | 7,44 | 4,84 | 0,01 | |
| | | 5 | 7,45 | 4,84 | 0,02 | |
| | | 6 | 7,45 | 4,84 | 0,02 | |
| | | 7 | 7,45 | 5,84 | 0,02 | |
| | | 8 | 7,45 | 4,84 | 0,02 | |
| | | 9 | 7,45 | 4,84 | 0,02 | |
| | | 10 | 7,45 | 4,84 | 0,02 | |
| | | 12 | 7,45 | 4,84 | 0,02 | |
| | | 14 | 7,45 | 4,84 | 0,02 | |
| | | 16 | 7,45 | 4,84 | 0,02 | |
| | | 18 | 7,45 | 4,84 | 0,02 | |
| | | 20 | 7,45 | 4,84 | 0,02 | |
| | | 25 | 7,45 | 4,84 | 0,02 | |
| | | 30 | 7,45 | 4,84 | 0,02 | |
| | | 35 | 7,45 | 4,84 | 0,02 | |
| | | 40 | 7,45 | 4,84 | 0,02 | |
| | | 45 | 7,45 | 4,84 | 0,02 | |
| | | 50 | 7,45 | 4,84 | 0,02 | |
| | | 55 | 7,45 | 4,84 | 0,02 | |
| 11:15:00 | | 60 | 7,45 | 4,84 | 0,02 | |

ANEXO N - Teste de Bombeamento Escalonado 2° escalão. Poço 09.

| TESTE DE BOMBEAMENTO | | | | | |
|---|----|-----------------------|--------------------------|----------------------|--|
| Poço: Poço 01 | | | Município: Boa Vista, RR | | |
| Tipo de teste: Teste de Produção - 2° Escalão | | | | | |
| EQUIPAMENTO DE BOMBEAMENTO | | | | | |
| Tipo: Submersa | | Marca: Schneider | | Potência (cv): 1,0 | |
| Diam. Pol 3,5" | | Modelo: 10 S4E6 | | Prof. Crivo (m) 15 | |
| Prof. N.E. (m): 7,43 | | s/q (m/m3/h): 0,11364 | | Boca do tubo: 0,50 m | |
| Início | | | Término | | |
| Data: 20/04/2020 | | Hora: 10:15 | | Data: 20/04/2020 | |
| Hora | | t (mn) | | N.D (m) | |
| Q m3/h | | S med (m) | | Observações | |
| 11:15:00 | 1 | 7,76 | 6,38 | 0,33 | |
| | 2 | 7,8 | 6,38 | 0,37 | |
| | 3 | 7,8 | 6,38 | 0,37 | |
| | 4 | 7,8 | 6,38 | 0,37 | |
| | 5 | 7,9 | 6,38 | 0,47 | |
| | 6 | 7,93 | 6,38 | 0,5 | |
| | 7 | 7,86 | 6,38 | 0,43 | |
| | 8 | 7,94 | 6,38 | 0,51 | |
| | 9 | 7,92 | 6,38 | 0,49 | |
| | 10 | 7,91 | 6,38 | 0,48 | |
| | 12 | 7,95 | 6,38 | 0,52 | |
| | 14 | 7,93 | 6,38 | 0,5 | |
| | 16 | 8,92 | 6,38 | 0,775 | |
| | 18 | 7,98 | 6,38 | 0,55 | |
| | 20 | 7,99 | 6,38 | 0,56 | |
| | 25 | 7,92 | 6,38 | 0,49 | |
| | 30 | 7,95 | 6,38 | 0,52 | |
| | 35 | 7,9 | 6,38 | 0,47 | |
| | 40 | 7,88 | 6,38 | 0,45 | |
| | 45 | 7,88 | 6,38 | 0,45 | |
| | 50 | 7,93 | 6,38 | 0,5 | |
| | 55 | 7,88 | 6,38 | 0,45 | |
| 12:15:00 | 60 | 7,61 | 6,38 | 0,45 | |

ANEXO O - Teste de Bombeamento Escalonado 3° escalão. Poço 09.

| TESTE DE BOMBEAMENTO | | | | | |
|---|--------|---------------------------------|--------------------------|----------------------|-------------|
| Poço: Poço 09 | | | Município: Boa Vista, RR | | |
| Tipo de teste: Teste de Produção - 3° Escalão | | | | | |
| EQUIPAMENTO DE BOMBEAMENTO | | | | | |
| Tipo: Submersa | | Marca: Schneider | | Potência (cv): 1,0 | |
| Diam. Pol 3,5" | | Modelo: 10 S4E6 | | Prof. Crivo (m) 15 | |
| Prof. N.E. (m): 7,43 | | s/q (m/m ³ /h): 0,08 | | Boca do tubo: 0,50 m | |
| Início | | | Término | | |
| Data: 20/04/2020 | | Hora: 10:15 | | Data: 20/04/2020 | Hora: 15:15 |
| Hora | t (mn) | N.D (m) | Q m ³ /h | S med (m) | Observações |
| 12:15:00 | 1 | 8,01 | 7,75 | 0,58 | |
| | 2 | 8,01 | 7,75 | 0,58 | |
| | 3 | 7,95 | 7,75 | 0,58 | |
| | 4 | 7,9 | 7,75 | 0,58 | |
| | 5 | 7,93 | 7,75 | 0,58 | |
| | 6 | 8,03 | 7,75 | 0,6 | |
| | 7 | 8 | 7,75 | 0,57 | |
| | 8 | 8,09 | 7,75 | 0,66 | |
| | 9 | 8,01 | 7,75 | 0,58 | |
| | 10 | 8,04 | 7,75 | 0,61 | |
| | 12 | 8,07 | 7,75 | 0,64 | |
| | 14 | 8,07 | 7,75 | 0,64 | |
| | 16 | 8,27 | 7,75 | 0,84 | |
| | 18 | 8,06 | 7,75 | 0,63 | |
| | 20 | 8,03 | 7,75 | 0,6 | |
| | 25 | 8,13 | 7,75 | 0,6 | |
| | 30 | 7,97 | 7,75 | 0,64 | |
| | 35 | 8,09 | 7,75 | 0,66 | |
| | 40 | 8,07 | 7,75 | 0,64 | |
| | 45 | 8,05 | 7,75 | 0,62 | |
| | 50 | 8,03 | 7,75 | 0,6 | |
| | 55 | 8,05 | 7,75 | 0,62 | |
| 13:15:00 | 60 | 8,05 | 7,75 | 0,62 | |

ANEXO P - Teste de Bombeamento Escalonado 4º escalão. Poço 09.

| TESTE DE BOMBEAMENTO | | | | | | |
|---|----|-----------------------|--------------------------|----------------------|-----------|-------------|
| Poço: Poço 09 | | | Município: Boa Vista, RR | | | |
| Tipo de teste: Teste de Produção - 4º Escalão | | | | | | |
| EQUIPAMENTO DE BOMBEAMENTO | | | | | | |
| Tipo: Submersa | | Marca: Schneider | | Potência (cv): 1,0 | | |
| Diam. Pol 4" | | Modelo: 10 S4E6 | | Prof. Crivo (m) 15 | | |
| Prof. N.E. (m): 7,43 | | s/q (m/m3/h): 0,09202 | | Boca do tubo: 0,50 m | | |
| Início | | | Término | | | |
| Data: 20/04/2020 | | Hora: 10:15 | | Data: 20/04/2020 | | |
| Hora | | t (mn) | N.D (m) | Q m3/h | S med (m) | Observações |
| 13:15:00 | 1 | 8 | 8,15 | 0,57 | | |
| | 2 | 7,97 | 8,15 | 0,54 | | |
| | 3 | 8,02 | 8,15 | 0,59 | | |
| | 4 | 7,97 | 8,15 | 0,54 | | |
| | 5 | 8,06 | 8,15 | 0,63 | | |
| | 6 | 8,06 | 8,15 | 0,63 | | |
| | 7 | 8,01 | 8,15 | 0,58 | | |
| | 8 | 8,11 | 8,15 | 0,68 | | |
| | 9 | 8,06 | 8,15 | 0,63 | | |
| | 10 | 7,98 | 8,15 | 0,55 | | |
| | 12 | 8 | 8,15 | 0,57 | | |
| | 14 | 8,01 | 8,15 | 0,58 | | |
| | 16 | 7,98 | 8,15 | 0,55 | | |
| | 18 | 8,12 | 8,15 | 0,69 | | |
| | 20 | 8,02 | 8,15 | 0,59 | | |
| | 25 | 8,12 | 8,15 | 0,69 | | |
| | 30 | 8,09 | 8,15 | 0,66 | | |
| | 35 | 8,14 | 8,15 | 0,71 | | |
| | 40 | 8,12 | 8,15 | 0,69 | | |
| | 45 | 8,13 | 8,15 | 0,7 | | |
| | 50 | 8,15 | 8,15 | 0,72 | | |
| | 55 | 8,04 | 8,15 | 0,72 | | |
| 14:15:00 | 60 | 8,18 | 8,15 | 0,75 | | |

ANEXO Q - Teste de Bombeamento Escalonado – Recuperação. Poço 09.

| TESTE DE BOMBEAMENTO | | | | | |
|-----------------------------------|--------|------------------|--------------------------|----------------------|-------------|
| Poço: Poço 09 | | | Município: Boa Vista, RR | | |
| Tipo de teste: Recuperação | | | | | |
| EQUIPAMENTO DE BOMBEAMENTO | | | | | |
| Tipo: Submersa | | Marca: Schneider | | Potência (cv): 1,0 | |
| Diam. Pol 4" | | Modelo: 10 S4E6 | | Prof. Crivo (m) 15 | |
| Prof. N.E. (m): 7,43 | | | | Boca do tubo: 0,50 m | |
| Início | | | Término | | |
| Data: 20/04/2020 | | Hora: 10:15 | | Data: 20/04/2020 | Hora: 15:15 |
| Hora | t (mn) | N.D (m) | SW (m) | (TB+t)/t' | Observações |
| 14:15 | 1 | 8,15 | 0,3 | 241 | |
| | 2 | 7,75 | 0,23 | 121 | |
| | 3 | 7,73 | 0,2 | 81 | |
| | 4 | 7,66 | 0,2 | 61 | |
| | 5 | 7,63 | 0,16 | 49 | |
| | 6 | 7,63 | 0,16 | 41 | |
| | 8 | 7,59 | 0,15 | 31 | |
| | 10 | 7,58 | 0,82 | 25 | |
| | 12 | 7,58 | 0,12 | 21 | |
| | 16 | 7,57 | 0,82 | 16 | |
| | 20 | 7,55 | 0,72 | 13 | |
| | 25 | 7,55 | 0,62 | 10,6 | |
| | 30 | 7,55 | 0,52 | 9 | |
| | 40 | 7,49 | 0,22 | 7 | |
| | 50 | 7,46 | 0,22 | 5,8 | |
| 15:15 | 60 | 7,46 | 0,23 | 5 | |

ANEXO R – Teste de Bombeamento Escalonado – 1º escalão. Poço 07

| TESTE DE BOMBEAMENTO | | | | | |
|--|---------|-------------------------|--|-------------------------------|-------------|
| Poço: Poço 07 | | | Município: Alto Alegre - RR | | |
| Tipo de teste: 1a. ETAPA - ESCALONADO | | | | | |
| EQUIPAMENTO DE BOMBEAMENTO | | | | | |
| tipo: submersa | | marca: Schneider | | potência (cv): 1,5 | |
| diam. (pol.): 3,5" | | modelo: 10 S4E6 | | prof. crivo (m): 18,00 | |
| Prof. N.E.(m): 3,20 | | | referência de medidas: topo do tubo de 4" | | |
| Início | | | Término | | |
| data: 03/06/2018 | | hora: 15:30 | | data: 03/06/2018 | |
| | | | | hora: 16:30 | |
| hora | t (min) | N.D.(m) | Q (m ³ /h) | s med (m) | observações |
| 15:30 | 1 | 3,560 | 5,00 | 0,36 | |
| | 2 | 3,560 | 5,00 | 0,36 | |
| | 3 | 3,560 | 5,00 | 0,36 | |
| | 4 | 3,560 | 5,00 | 0,36 | |
| | 5 | 3,560 | 5,00 | 0,36 | |
| | 6 | 3,560 | 5,00 | 0,36 | |
| | 7 | 3,560 | 5,00 | 0,36 | |
| | 8 | 3,560 | 5,00 | 0,36 | |
| | 9 | 3,560 | 5,00 | 0,36 | |
| | 10 | 3,560 | 5,00 | 0,36 | |
| | 12 | 3,560 | 5,00 | 0,36 | |
| | 14 | 3,560 | 5,00 | 0,36 | |
| | 15 | 3,570 | 5,00 | 0,37 | |
| | 18 | 3,570 | 5,00 | 0,37 | |
| | 20 | 3,580 | 5,00 | 0,38 | |
| 25 | 3,580 | 5,00 | 0,38 | | |
| 30 | 3,590 | 5,00 | 0,39 | | |
| 40 | 3,590 | 5,00 | 0,39 | | |
| 50 | 3,600 | 5,00 | 0,40 | | |
| 16:30 | 60 | 3,600 | 5,00 | 0,40 | |

ANEXO S - Teste de Bombeamento Escalonado – 2º escalão. Poço 07

| TESTE DE BOMBEAMENTO | | | | | | |
|--|-----------------|---------|--|-------------------------|--------------------|--------------|
| Poço: Poço 07 | | | Município: Alto Alegre - RR | | | |
| Tipo de teste: 2a. ETAPA - ESCALONADO | | | | | | |
| EQUIPAMENTO DE BOMBEAMENTO | | | | | | |
| tipo: | submersa | | marca: | Schneider | potência (cv): | 1,5 |
| diam.(pol.): | 3,5" | | modelo: | 10 S4E6 | prof.crivo (m): | 18,00 |
| Prof. N.E.(m): 3,20 | | | referência de medidas: topo do tubo de 4" | | | |
| Início | | | Término | | | |
| data: 03/06/2018 | | hora: | 16:30 | data: 03/06/2018 | hora: 17:30 | |
| hora | t (min) | N.D.(m) | Q (m ³ /h) | s med (m) | observações | |
| 16:30 | 1 | 3,810 | 6,50 | 0,61 | | |
| | 2 | 3,810 | 6,50 | 0,61 | | |
| | 3 | 3,820 | 6,50 | 0,62 | | |
| | 4 | 3,820 | 6,50 | 0,62 | | |
| | 5 | 3,820 | 6,50 | 0,62 | | |
| | 6 | 3,820 | 6,50 | 0,62 | | |
| | 7 | 3,820 | 6,50 | 0,62 | | |
| | 8 | 3,820 | 6,50 | 0,62 | | |
| | 9 | 3,820 | 6,50 | 0,62 | | |
| | 10 | 3,830 | 6,50 | 0,63 | | |
| | 12 | 3,830 | 6,50 | 0,63 | | |
| | 14 | 3,830 | 6,50 | 0,63 | | |
| | 15 | 3,830 | 6,50 | 0,63 | | |
| | 18 | 3,830 | 6,50 | 0,63 | | |
| | 20 | 3,830 | 6,50 | 0,63 | | |
| | 25 | 3,830 | 6,50 | 0,63 | | |
| | 30 | 3,830 | 6,50 | 0,63 | | |
| | 40 | 3,840 | 6,50 | 0,64 | | |
| | 50 | 3,840 | 6,50 | 0,64 | | |
| 17:30 | 60 | 3,840 | 6,50 | 0,64 | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |

ANEXO T - Teste de Bombeamento Escalonado – 3º escalão. Poço 07.

| TESTE DE BOMBEAMENTO | | | | | | | |
|---|-------------------|----------------|---|---|------------------------|--------------|--------------|
| <i>Poço:</i> | Poço 07 | | | <i>Município:</i> Alto Alegre - RR | | | |
| <i>Tipo de teste:</i> 3a. ETAPA - ESCALONADO | | | | | | | |
| EQUIPAMENTO DE BOMBEAMENTO | | | | | | | |
| <i>tipo:</i> | submersa | | <i>marca:</i> | Schneider | <i>potência (cv):</i> | 1,5 | |
| <i>diam.(pol.):</i> | 3,5" | | <i>modelo:</i> | 10 S4E6 | <i>prof.crivo (m):</i> | 18,00 | |
| <i>Prof. N.E.(m):</i> | 3,20 | | <i>referência de medidas:</i> topo do tubo de 4" | | | | |
| <i>Início</i> | | | <i>Término</i> | | | | |
| <i>data:</i> | 03/06/2018 | <i>hora:</i> | 17:30 | <i>data:</i> | 03/06/2018 | <i>hora:</i> | 18:30 |
| <i>hora</i> | <i>t (min)</i> | <i>N.D.(m)</i> | <i>Q (m³/h)</i> | <i>s med (m)</i> | <i>observações</i> | | |
| 17:30 | 1 | 4,910 | 8,00 | 1,71 | | | |
| | 2 | 4,910 | 8,00 | 1,71 | | | |
| | 3 | 4,910 | 8,00 | 1,71 | | | |
| | 4 | 4,910 | 8,00 | 1,71 | | | |
| | 5 | 4,910 | 8,00 | 1,71 | | | |
| | 6 | 4,920 | 8,00 | 1,72 | | | |
| | 7 | 4,920 | 8,00 | 1,72 | | | |
| | 8 | 4,920 | 8,00 | 1,72 | | | |
| | 9 | 4,920 | 8,00 | 1,72 | | | |
| | 10 | 4,920 | 8,00 | 1,72 | | | |
| | 12 | 4,920 | 8,00 | 1,72 | | | |
| | 14 | 4,930 | 8,00 | 1,73 | | | |
| | 15 | 4,930 | 8,00 | 1,73 | | | |
| | 18 | 4,930 | 8,00 | 1,73 | | | |
| | 20 | 4,930 | 8,00 | 1,73 | | | |
| | 25 | 4,930 | 8,00 | 1,73 | | | |
| | 30 | 4,940 | 8,00 | 1,74 | | | |
| | 40 | 4,940 | 8,00 | 1,74 | | | |
| | 50 | 4,940 | 8,00 | 1,74 | | | |
| 18:30 | 60 | 4,940 | 8,00 | 1,74 | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

ANEXO U - Teste de Bombeamento Escalonado – 4º escalão. Poço 07.

| TESTE DE BOMBEAMENTO | | | | | | | |
|---|-------------------|----------------|---|---|------------------------|--------------|--------------|
| <i>Poço:</i> | Poço 07 | | | <i>Município:</i> Alto Alegre - RR | | | |
| <i>Tipo de teste:</i> 4a. ETAPA - ESCALONADO | | | | | | | |
| EQUIPAMENTO DE BOMBEAMENTO | | | | | | | |
| <i>tipo:</i> | submersa | | <i>marca:</i> | Schneider | <i>potência (cv):</i> | 1,5 | |
| <i>diam.(pol.):</i> | 3,5" | | <i>modelo:</i> | 10 S4E6 | <i>prof.crivo (m):</i> | 18,00 | |
| <i>Prof. N.E.(m):</i> | 3,20 | | <i>referência de medidas:</i> topo do tubo de 4" | | | | |
| <i>Início</i> | | | <i>Término</i> | | | | |
| <i>data:</i> | 03/06/2018 | <i>hora:</i> | 18:30 | <i>data:</i> | 03/06/2018 | <i>hora:</i> | 19:30 |
| <i>hora</i> | <i>t (min)</i> | <i>N.D.(m)</i> | <i>Q (m³/h)</i> | <i>s med (m)</i> | <i>observações</i> | | |
| 18:30 | 1 | 4,940 | 10,00 | 1,74 | | | |
| | 2 | 4,940 | 10,00 | 1,74 | | | |
| | 3 | 4,940 | 10,00 | 1,74 | | | |
| | 4 | 4,940 | 10,00 | 1,74 | | | |
| | 5 | 4,940 | 10,00 | 1,74 | | | |
| | 6 | 4,940 | 10,00 | 1,74 | | | |
| | 7 | 4,940 | 10,00 | 1,74 | | | |
| | 8 | 4,940 | 10,00 | 1,74 | | | |
| | 9 | 4,940 | 10,00 | 1,74 | | | |
| | 10 | 4,940 | 10,00 | 1,74 | | | |
| | 12 | 4,940 | 10,00 | 1,74 | | | |
| | 14 | 4,940 | 10,00 | 1,74 | | | |
| | 15 | 4,940 | 10,00 | 1,74 | | | |
| | 18 | 4,940 | 10,00 | 1,74 | | | |
| | 20 | 4,940 | 10,00 | 1,74 | | | |
| | 25 | 4,940 | 10,00 | 1,74 | | | |
| | 30 | 4,940 | 10,00 | 1,74 | | | |
| | 40 | 4,940 | 10,00 | 1,74 | | | |
| | 50 | 4,940 | 10,00 | 1,74 | | | |
| 19:30 | 60 | 4,940 | 10,00 | 1,74 | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

ANEXO V -Teste de Bombeamento Escalonado – Recuperação. Poço 07.

| TESTE DE BOMBEAMENTO | | | | | |
|--|-----------------|---|------------------|--------------------------------|--------------------|
| <i>Poço:</i> Poço 01 | | <i>Município:</i> Alto Alegre - RR | | | |
| <i>Tipo de teste:</i> Recuperação | | | | | |
| EQUIPAMENTO DE BOMBEAMENTO | | | | | |
| <i>tipo:</i> | submersa | <i>marca:</i> | Schneider | <i>potência (cv):</i> | 1,5 |
| <i>diam.(pol.):</i> | 3,5" | <i>modelo:</i> | 10 S4E6 | <i>prof.crivo (m):</i> | 18,00 |
| <i>Prof. N.E.(m):</i> | 3,20 | <i>referência de medidas:</i> topo do tubo de 4" | | | |
| <i>Início</i> | | | <i>Término</i> | | |
| <i>data:</i> 03/06/2018 | | <i>hora:</i> 19:30 | | <i>data:</i> 03/06/2018 | |
| | | | | <i>hora:</i> 20:30 | |
| <i>hora</i> | <i>t (min)</i> | <i>N.D.(m)</i> | <i>SW (m)</i> | <i>(TB+t)/t'</i> | <i>observações</i> |
| 19:30 | 1 | 4,730 | 1,53 | 241,00 | |
| | 2 | 3,620 | 0,42 | 121,00 | |
| | 3 | 3,580 | 0,38 | 81,00 | |
| | 4 | 3,580 | 0,38 | 61,00 | |
| | 5 | 3,580 | 0,38 | 49,00 | |
| | 6 | 3,580 | 0,38 | 41,00 | |
| | 7 | 3,580 | 0,38 | 35,29 | |
| | 8 | 3,570 | 0,37 | 31,00 | |
| | 9 | 3,570 | 0,37 | 27,67 | |
| | 10 | 3,570 | 0,37 | 25,00 | |
| | 12 | 3,560 | 0,36 | 21,00 | |
| | 14 | 3,560 | 0,36 | 18,14 | |
| | 15 | 3,550 | 0,35 | 17,00 | |
| | 18 | 3,550 | 0,35 | 14,33 | |
| | 20 | 3,550 | 0,35 | 13,00 | |
| | 25 | 3,540 | 0,34 | 10,60 | |
| | 30 | 3,540 | 0,34 | 9,00 | |
| | 40 | 3,530 | 0,33 | 7,00 | |
| | 50 | 3,530 | 0,33 | 5,80 | |
| 20:30 | 60 | 3,530 | 0,33 | 5,00 | |
| | | | | | |
| | | | | | |