

Estudos Hidrogeológicos na Região de Jurubatuba, no Município de
São Paulo – Relatório Final (RF).

CLIENTE

Fundação Agência Bacia Hidrográfica do Alto Tietê – FABHAT

FINANCIAMENTO

Fundo Estadual de Recursos Hídricos - FEHIDRO

UNIDADE RESPONSÁVEL

Cidades, Infraestrutura e Meio Ambiente - CIMA

Seção de Planejamento Territorial, Recursos Hídricos, Saneamento e
Florestas – SPRSF

RESPONSÁVEL ADMINISTRATIVO FINANCEIRO

Fundação de Apoio ao IPT – FIPT

RESUMO

O presente documento compreende o Relatório Final (RF) do empreendimento priorizado pelo Comitê da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (CBH-AT), registrado sob o número 2021-AT_COB-136 e intitulado “Estudos Hidrogeológicos na Região de Jurubatuba, no município de São Paulo”. Financiado pelo Fundo Estadual de Recursos Hídricos (FEHIDRO), este empreendimento foi desenvolvido no âmbito do Termo de Cooperação Técnico-Científica entre o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e sua fundação de apoio (FIPT), por meio do Contrato n° 003/2023 (Processo FABHAT n° 013/2021 – Prov. 2) firmado com a Fundação Agência da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (FABHAT) – tomadora dos recursos financeiros junto ao fundo estadual. Dessa forma, o presente relatório corresponde ao produto previsto no Plano de Trabalho apresentado à FABHAT em 08/02/2024 (Relatório Parcial 1 – RP1) e atende aos termos readequados de conteúdo e prazo estabelecidos no cronograma de atividades constante da Carta CIMA/SPRSF–021/24 (17/07/2024) e da Carta CIMA/SPRSF–019/25 (03/04/2025). Este relatório apresenta os resultados complementares das Perfilagens Geofísicas e das Amostragens Estratificadas, além de aprofundar a consolidação dos resultados e a elaboração dos produtos temáticos principais, especialmente no que se refere à atualização do modelo conceitual dos fluxos subterrâneos e à caracterização da qualidade das águas subterrâneas. Inclui-se, ainda, um item suplementar que oferece uma síntese do conteúdo dos seis relatórios parciais emitidos ao longo da execução do empreendimento de modo a demonstrar sua trajetória de desenvolvimento — RP1 (Plano de Trabalho), RP2.1 (Levantamento de Dados e Revisão Bibliográfica), RP2.2 (Sistematização, integração e análise de dados existentes), RP3.1 (Trabalho de Campo – Parte I), RP3.2 (Trabalho de Campo – Parte II) e RP4 (Consolidação dos resultados e produtos temáticos principais). Por fim, apresenta-se uma proposta de novo Modelo de Gestão para a ARC-Jurubatuba, fundamentada em diretrizes e recomendações derivadas das pesquisas hidrogeológicas integradas a estudo jurídico especializado, com vistas à adequação normativa, ao fortalecimento da segurança jurídica e ao alinhamento institucional às atuais diretrizes de governança ambiental. Essa proposta inclui a revisão das deliberações 01/2011 e 139/2021 do CBH-AT, a Proposta de Programa de Monitoramento, instrumentos de comunicação e divulgação (como cartilha sobre o estudo, entre outros) e indicadores de acompanhamento.

Palavras-chave – UGRHI 06; Bacia do Alto Tietê; Área de Restrição e Controle de Jurubatuba; estudos hidrogeológicos; áreas contaminadas; Sistema Aquífero Cristalino; Sistema Aquífero Sedimentar; compostos organoclorados; Programa de Monitoramento; Modelo de Gestão da ARC-Jurubatuba.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Evidências de impactos à saúde humana dos compostos organoclorados.	5
Quadro 2 - Base de dados de Poços obtidas para a ARC – Jurubatuba e entorno...	8
Quadro 3 - Situação geral dos poços cadastrados.	9
Quadro 4 - Áreas priorizadas para detalhamento das investigações.	11
Quadro 5 - Captação total dos poços conforme a finalidade de uso.	13
Quadro 6 - Distribuição dos poços conforme aquífero captado.	14
Quadro 7 - Poços com ocorrência de pelo menos uma substância em concentração superior aos limites de quantificação conforme os valores de referência.	29
Quadro 8 - Resultados das amostras estratificadas para Ferro, Manganês, Sulfato, Cálcio e COD em (µg/L).	41
Quadro 9 - Resultados (µg/L) das amostras estratificadas para VOC, etano e eteno.	46
Quadro 10 - Resultados observados para Metais Poluentes Prioritários (MPP) em µg/L das amostras estratificadas.	51
Quadro 11 - Resultados de análises isotópicas de O e H para as amostras estratificadas.	55
Quadro 12 - Resultados para análises isotópicas de $\delta^{18}\text{O}$ e de $\delta^{34}\text{S}$ das amostras estratificadas.	57
Quadro 13 - Resultados de análises isotópicas de carbono e cloro.	62
Quadro 14 - Análise estatística do número de poços com compostos organoclorados detectados.	71
Quadro 15 - Contexto estrutural e favorabilidade de fluxos subterrâneos do Complexo Embu.	95
Quadro 16 - Dados de coeficiente de transmissividade em unidades aquíferas na ARC-Jurubatuba.	97
Quadro 17 - Dados de condutividade hidráulica em unidades aquíferas na ARC-Jurubatuba.	97
Quadro 18 - Dados de vazão em unidades aquíferas na ARC-Jurubatuba.	98

Quadro 19 - Dados de vazão específica em unidades aquíferas na ARC-Jurubatuba.	99
Quadro 20 - Compartimentação do poço 691 em intervalos com características estruturais distintas.	102
Quadro 21 - Compartimentação dos perfis dos poços estudados em intervalos com características estruturais distintas.	103
Quadro 22 - Grupos de estruturas identificadas e fraturas hidráulicamente ativas em poços estudados nas redondezas do Canal Jurubatuba.	105
Quadro 23 - Zonas de fraturamento expressivas e famílias de fraturas na ARC-Jurubatuba.	109
Quadro 24 - Informações acerca dos poços perfilados.	112
Quadro 25 - Amostragem estratificada de águas subterrâneas e indicação de ocorrência de organoclorados.	118
Quadro 26 - Proposta de medidas de restrição e controle para os poços de produção.	140
Quadro 27 - Sugestão de Indicadores para acompanhamento do modelo de gestão da ARC-Jurubatuba.	148
Quadro 28 - Poços selecionados para composição de rede de monitoramento da ARC-Jurubatuba e entorno.	152
Quadro 29 - Orçamento estimativo para custo da realização de monitoramento na rede proposta para a ARC-Jurubatuba.	160

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Limites da área de estudo - ARC Jurubatuba e entorno.	2
Figura 2 - Classes de vazão dos poços outorgados.	15
Figura 3 - Gráfico com os dados de PH para as 79 amostras de águas subterrâneas coletadas.	18
Figura 4 - Distribuição espacial dos valores de pH associados aos resultados analíticos.	20
Figura 5 - Gráfico com a distribuição de frequência dos dados de ORP para as amostras de águas subterrâneas coletadas.	21
Figura 6 - Distribuição espacial dos valores de ORP associados aos resultados analíticos	22
Figura 7 - Gráfico com os valores de OD para as amostras de águas subterrâneas coletadas.	23
Figura 8 - Distribuição espacial dos valores de OD associados aos resultados analíticos.	24
Figura 9 - Gráfico com os dados de CE para as amostras de águas subterrâneas coletadas.	25
Figura 10 - Distribuição espacial dos valores de CE associados aos resultados analíticos.	26
Figura 11 - Gráfico com os dados de temperatura para as amostras de águas subterrâneas coletadas.	27
Figura 12 - Gráfico com os dados de turbidez para as amostras de águas subterrâneas coletadas.	28
Figura 13 - Síntese dos resultados obtidos nas análises laboratoriais de amostras dos poços da rede de monitoramento da ARC-Jurubatuba.	30
Figura 14 - Resultados analíticos acerca de organoclorados obtidos no presente estudo nos poços da rede amostragem da ARC-Jurubatuba e entorno.	33
Figura 15 - Valores de concentração de compostos organoclorados obtidos nos poços da rede amostragem na ARC-Jurubatuba e entorno.	34
Figura 16 - Profundidade das Amostras Coletadas nos poços selecionados para Amostragem estratificada.	36
Figura 17 - Gráfico com os dados de OD (mg/L) para as amostras estratificadas. ...	38

Figura 18 - Gráfico com os dados de CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$) para as amostras estratificadas.	38
Figura 19 - Gráfico com os dados de ORP (mV) para as amostras estratificadas. ...	39
Figura 20 - Gráfico com os dados de PH para as amostras estratificadas.	40
Figura 21 - Gráfico com os dados de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) para as amostras estratificadas.	40
Figura 22 - Correlação de Fe versus Mn versus SO_4^{2-} para as amostras estratificadas.	43
Figura 23 - Correlação de Ca x SO_4^{2-} para as amostras estratificadas.	44
Figura 24 - Cadeia de degradação de etenos clorados.	47
Figura 25 - Distribuição percentual dos compostos etenos clorados.	48
Figura 26 - Resultados obtidos para $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ para as amostras estratificadas. ...	56
Figura 27 - Correlação entre os isótopos de $\delta^{18}\text{O}$ e de $\delta^{34}\text{S}$ e a concentração de sulfato no poço ID IPT 84A.	58
Figura 28 - Correlação entre os isótopos de $\delta^{18}\text{O}$ e de $\delta^{34}\text{S}$ e a concentração de sulfato no poço ID IPT 84C.	58
Figura 29 - Correlação entre os isótopos de $\delta^{18}\text{O}$ e de $\delta^{34}\text{S}$ e a concentração de sulfato no poço ID IPT 85.	59
Figura 30 - Concentrações de etenos clorados variando entre valores acima e abaixo do VOI.	65
Figura 31 - Número de poços conforme os tipos de usos da água captada.	68
Figura 32 - Distribuição dos poços na ARC-Jurubatuba e entorno com informação acerca do uso da água captada.	69
Figura 33 - Frequência de poços quanto à detecção ou não de organoclorados em relação ao Valor Orientador de Intervenção (VOI).	71
Figura 34 - Situação dos poços avaliados em relação a ocorrência de organoclorados nas águas subterrâneas.	74
Figura 35 - Mapa hidrogeológico da ARC-Jurubatuba e entorno.	77
Figura 36 - Seções hidrogeológicas elaboradas na ARC-Jurubatuba em estudo anterior.	81
Figura 37 - Mapa de poços que possuem descrição detalhada do perfil litológico e localização das seções hidrogeológicas.	82
Figura 38 - Seção hidrogeológica L-L' na porção central da ARC-Jurubatuba.	85

Figura 39 - Seção hidrogeológica M-M' na porção nordeste da ARC-Jurubatuba....	86
Figura 40 - Seção geológica P-P' na porção noroeste da ARC-Jurubatuba.....	87
Figura 41 - Lineamentos fotointerpretados em parte da ARC-Jurubatuba.	92
Figura 42 - Bloco Diagrama dos principais sistemas de fraturas e favorabilidade de fluxos subterrâneos em pedreiras na região sul do Município de São Paulo.	93
Figura 43 - Mapa de estruturas observadas em poços nas vizinhanças do Canal Jurubatuba.....	106
Figura 44 - Lineamentos interpretados em poços perfilados na ARC-Jurubatuba.	116
Figura 45 - Direções de maior favorabilidade de fluxo de águas subterrâneas nos poços perfilados.	117
Figura 46 - Modelo hidrogeológico conceitual de fluxos subterrâneos no entorno do Canal Jurubatuba	122
Figura 47 - Modelo hidrogeológico conceitual de fluxos subterrâneos na seção N-N' na porção sudeste da ARC-Jurubatuba.	125
Figura 48 - Modelo hidrogeológico conceitual de fluxos subterrâneos na seção O-O' na porção central da ARC-Jurubatuba.	126
Figura 49 - Modelo hidrogeológico conceitual de fluxos subterrâneos em bloco diagrama da ARC-Jurubatuba.	128
Figura 50 - Modelo conceitual de delimitação da área de restrição no entorno de células.	134
Figura 51 - Distribuição de Densidade de AEPC na ARC-Jurubatuba.	135
Figura 52 - Elementos para a definição das áreas de restrição.....	135
Figura 53 - Elementos de interesse e Áreas de Restrição e Controle de Uso de Água Subterrânea.....	137
Figura 54 - Proposta de nova Área de Restrição e Controle de Uso das águas subterrâneas.....	138
Figura 55 - Fluxograma dos requerimentos de solicitação de outorgas para as águas subterrâneas da ARC-Jurubatuba.	144
Figura 56 - Exemplo de integração entre órgãos gestores na gestão da contaminação regional das águas subterrâneas.	146
Figura 57 - Poços selecionados para composição de rede de monitoramento da ARC-Jurubatuba.....	155

ANEXOS

ANEXO 1 - Registros Fotográficos das Atividades de Campo de Amostragem	180
ANEXO 2 - Certificado de Acreditação do Laboratório Centro de Biologia Experimental Oceanus	190
ANEXO 3 - Relatório de Ensaio 273056/2024 - A – 1.0 do Laboratório Centro de Biologia Experimental Oceanus.....	192
ANEXO 4 - Relatório de Ensaio 169466/2025 - A – 1.0 do Laboratório Centro de Biologia Experimental Oceanus.....	685
ANEXO 5 - Classificação do tipo de uso da água captada em poços da ARC-Jurubatuba.....	1017
ANEXO 6 - Relatório de Execução das perfilagens geofísicas e coleta de amostras da Acqua Terra Geologia Ambiental.....	1023
ANEXO 7 - Relatório Final Análise Jurídica da Linquevis Assessoria e Advocacia Ambiental.....	1162

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	CONTEXTUALIZAÇÃO DO ESTUDO	1
3.	OBJETIVOS	6
4.	SÍNTESE DOS RELATÓRIOS PARCIAIS APRESENTADOS.....	7
4.1	Base de Dados de Poços.....	8
4.2	Cadastro de Poços Tubulares.....	9
4.3	Caracterização do Uso e Ocupação do Solo	10
4.4	Situação das Áreas Declaradas Contaminadas ou Reabilitadas	11
4.5	Caracterização das Fontes Potenciais de Contaminação na ARC-Jurubatuba	12
4.6	Balanço Hídrico.....	12
5.	CARACTERIZAÇÃO DA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.....	16
5.1	Resultados Analíticos em Amostragem de Águas Subterrâneas em Poços	16
5.2	Resultados Analíticos da Amostragem Estratificada.....	35
5.2.1	Parâmetros físico-químicos.....	37
5.2.2	Cátions e ânions, Metano, Cálcio e COD.....	41
5.2.3	Resultados analíticos em amostragem em poços para varredura de VOC, etanos e eteno clorados	45
5.2.4	Metais poluentes prioritários	49
5.2.5	Análises Isotópicas	52
5.3	Síntese Comparativa de Resultados Obtidos.....	63
5.4	Cenário de uso das Águas Subterrâneas na ARC - Jurubatuba	67
6.	MODELO CONCEITUAL DE FLUXOS SUBTERRÂNEOS.....	75
6.1	Seções hidrogeológicas na ARC-Jurubatuba	79
6.2	Síntese hidrogeológica da ARC-Jurubatuba	88
6.2.1	Sistema Aquífero Sedimentar	89

6.2.2 Sistema Aquífero Cristalino.....	90
6.2.3 Geologia Estrutural aplicada à Hidrogeologia	90
6.2.4 Síntese do conhecimento dos parâmetros hidráulicos subterrâneos na ARC-Jurubatuba.....	95
6.3 Perfilagens geofísicas	99
6.3.1 Perfilagens efetuadas em estudos anteriores	99
6.3.2 Perfilagens geofísicas efetuadas nesse trabalho	111
6.3.2.1 Caracterização de fluxos subterrâneos e amostragem estratificada.....	112
6.4 Modelo de circulação das águas subterrâneas	119
6.5 Atualização do modelo hidrogeológico conceitual de fluxos subterrâneos	123
7. REVISÃO DO PERÍMETRO E DO ZONEAMENTO DA ÁREA DE RESTRIÇÃO E CONTROLE DE JURUBATUBA	130
7.1 Premissas adotadas para a revisão do perímetro e do zoneamento da ARC-Jurubatuba.....	130
7.2 Conceitos e critérios adotados na revisão do perímetro e do zoneamento da ARC-Jurubatuba.....	132
7.3 Propostas de medidas de restrição e controle de uso de águas subterrâneas.....	139
8. PROPOSTA DE MODELO DE GESTÃO	141
8.1 Diretrizes e recomendações para aprimoramento do Modelo de Gestão da ARC-Jurubatuba.....	142
8.1.1. Uso da água para o abastecimento privado	143
8.1.2. Gerenciamento de Áreas Contaminadas (GAC)	144
8.2 Indicadores de acompanhamento e desempenho do modelo de gestão	147
9. DIRETRIZES PARA IMPLANTAÇÃO DO PROGRAMA DE MONITORAMENTO	149
9.1 Objetivo principal da Primeira Etapa.....	149
9.2 Método e atividades	150

9.2.1 Pesquisa, levantamento e organização de base de dados	151
9.2.2 Seleção final dos poços de monitoramento	151
9.2.3 Procedimentos e metodologia de amostragem	156
9.2.4 Sistematização e tratamento dos dados da amostragem efetuada.....	157
9.2.5 Análise dos dados.....	158
9.2.6 Estratégia de utilização e divulgação dos resultados do programa de monitoramento.....	158
9.3 Estimativa de custos	159
9.4 Benefícios esperados com a implantação do Programa de Monitoramento ...	161
10. CONSIDERAÇÕES FINAIS	162
EQUIPE TÉCNICA	165
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	168

1. INTRODUÇÃO

O presente documento técnico compreende o Relatório Final do Empreendimento FEHIDRO 2021-AT_COB-136, intitulado “Estudos Hidrogeológicos na Região de Jurubatuba, no município de São Paulo”. Sua elaboração foi conduzida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. (IPT), em parceria com a Fundação de Apoio ao IPT (FIPT), por meio da Seção de Planejamento Territorial, Recursos Hídricos, Saneamento e Florestas (SPRSF), integrante da unidade técnica Cidades, Infraestrutura e Meio Ambiente (CIMA).

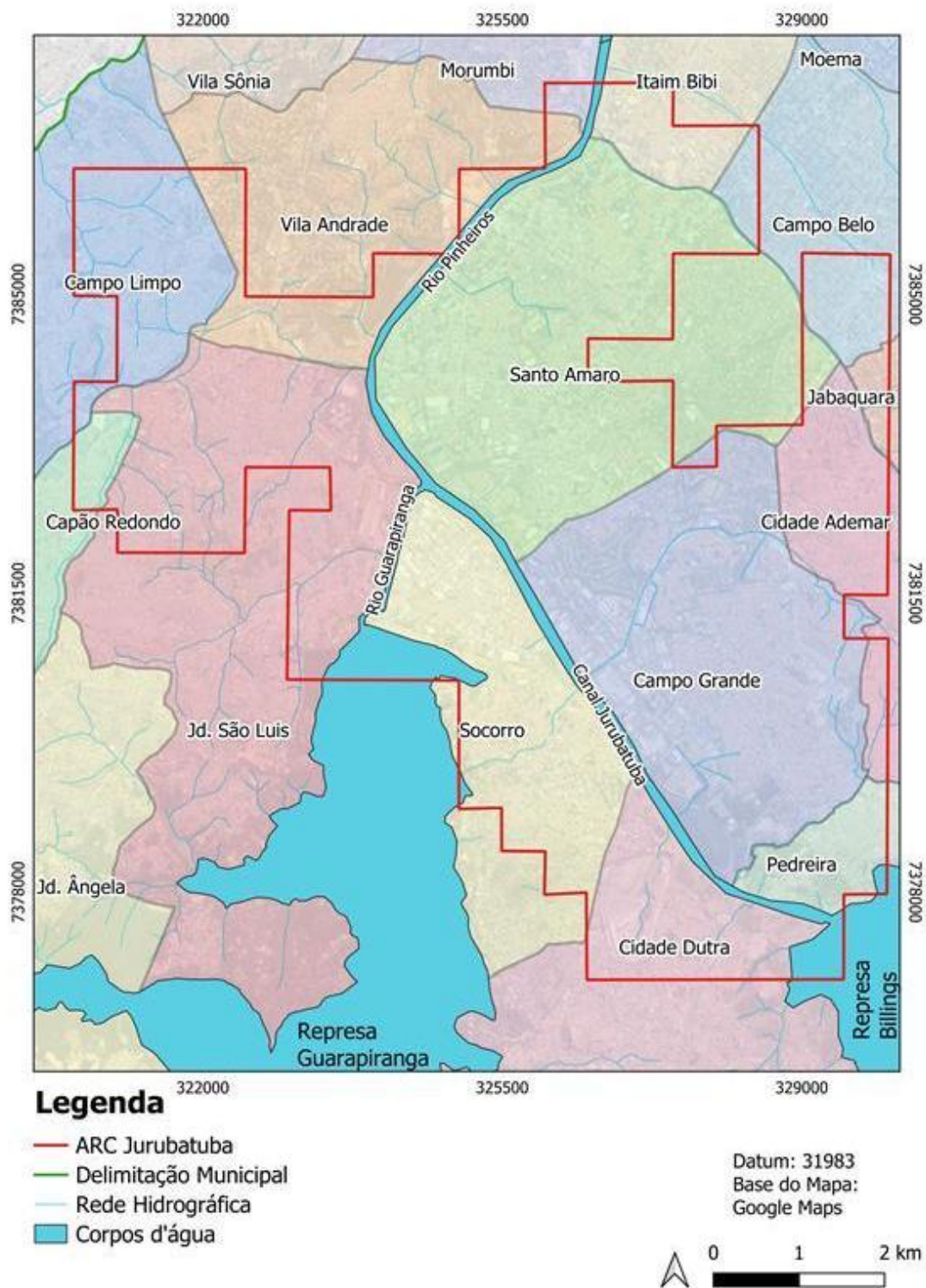
O referido empreendimento foi priorizado pelo Comitê da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (CBH-AT), por meio da Deliberação nº 130/2021, tendo como Tomadora dos recursos financeiros a Fundação Agência da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê – FABHAT. A Fundação firmou o Contrato nº 003/2023, em 21 de dezembro de 2023 (Processo FABHAT nº 013/2021 – Prov. 2), com o IPT/FIPT para execução dos trabalhos definidos no Termo de Referência do projeto, a partir da submissão do Orçamento nº 87.560/23, datado de 29 de setembro de 2023.

2. CONTEXTUALIZAÇÃO DO ESTUDO

O empreendimento compreende estudo na denominada “Área de Restrição e Controle para a Captação e Uso das Águas Subterrâneas no município de São Paulo (ARC – Jurubatuba)”, estabelecida pela Deliberação CBH-AT nº 01, de 16 de fevereiro de 2011 (CBH-AT, 2011) – rerratificada pela Deliberação CBHAT nº 139 de 15 de dezembro de 2021 (CBH-AT, 2021), e referendada pela Deliberação CRH nº 265, de 28 de abril de 2022 (CRH, 2022).

Quanto aos limites da área de interesse, pode-se definir o quadrilátero compreendido entre as coordenadas UTM 7376 km-Sul e 7388 km-Sul e 320 km-Leste e 330 km-Leste totalizando superfície de cerca de 120 km² e englobando a ARC-Jurubatuba (**Figura 1**), constituindo objeto deste estudo devido ao seu histórico de contaminação do solo e das águas subterrâneas, associada principalmente à atividades industriais e comerciais na região.

Figura 1 - Limites da área de estudo - ARC Jurubatuba e entorno.



Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto - FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

É importante ressaltar que na área de estudo compreendida pela ARC Jurubatuba estão incluídas 02 (duas) das 04 (quatro) regiões definidas como prioritárias para identificação de áreas contaminadas, conforme Resolução SMA nº11, de 08 de fevereiro de 2017, da Secretaria de Estado do Meio Ambiente (São Paulo, 2017b).

Isso significa que nas intervenções ali existentes, enquadradas como “*atividades potencialmente geradoras de áreas contaminadas*”, tal como preconizadas na Resolução SMA nº 10, de 08 de fevereiro de 2017 (São Paulo, 2017a), independentemente dos resultados do presente estudo, devem ser realizados diagnósticos de identificação de áreas contaminadas, bem como devem ser executadas as respectivas atividades de investigação e remediação, de acordo com a Lei Estadual nº 13.577, de 8 de julho de 2009 (São Paulo, 2009), que dispõe sobre diretrizes e procedimentos para a proteção da qualidade do solo e gerenciamento de áreas contaminadas.

Dentre as Substâncias Químicas de Interesse (SQI) indicadoras de contaminação ambiental, destacam-se os compostos orgânicos voláteis (VOCs). Os VOCs constituem um grupo de substâncias químicas com elevada pressão de vapor, o que favorece sua volatilização e mobilidade no ambiente. Mesmo após o encerramento das atividades que lhes deram origem, esses compostos podem permanecer por longos períodos na zona não saturada do solo e no ar, representando risco devido à sua toxicidade, persistência e potencial de exposição por inalação, contaminação de aquíferos e bioacumulação.

No contexto da área estudada, observou-se a presença predominante de compostos organoclorados, especialmente etenos e etanos clorados (EEC e EAC), amplamente utilizados como solventes industriais.

Esses compostos foram definidos como substâncias químicas de interesse devido à sua frequência e concentrações observadas em estudos anteriores (DAEE/Servmar, 2008), cuja distribuição espacial indica um cenário de contaminação regional.

Assim sendo, dentre os principais compostos organoclorados identificados na área de estudo destacam-se:

- Tetracloeteno (PCE);
- Tricloroeteno (TCE);
- Dicloroereto (DCE); e
- Cloreto de Vinila (CV).

Em razão da elevada volatilidade desses compostos e de sua mobilidade no subsolo e atmosfera, a inalação constitui a via principal de exposição humana, embora a ingestão de água contaminada e o contato dérmico também possam ocorrer. A presença desses contaminantes no ambiente subterrâneo da área estudada exige, portanto, atenção tanto à caracterização da fonte quanto à investigação das vias de migração e potenciais impactos à saúde de comunidades e trabalhadores.

A compreensão da contaminação observada na área requereu a análise integrada tanto da ocupação e uso do solo quanto das características geológicas e hidrogeológicas do meio subterrâneo, fundamentais para interpretar o comportamento e a mobilidade desses contaminantes.

O **Quadro 1** apresenta as evidências de impactos à saúde humana para cada um desses compostos, com ênfase nos principais efeitos relatados em estudos efetuados em outras regiões.

Quadro 1 - Evidências de impactos à saúde humana dos compostos organoclorados.

Composto	Possíveis Impactos à saúde
PCE	- A exposição crônica por inalação pode provocar efeitos no sistema nervoso central (como cefaleia, comprometimentos cognitivos, alterações na coordenação motora) e também efeitos no fígado, rins, sistema imunológico e hematológico. - Estudos sugerem associação com câncer de bexiga e linfoma não-Hodgkin, embora em seres humanos a evidência seja considerada limitada a moderada.
TCE	- Existe forte evidência de que o TCE é carcinogênico para seres humanos, envolvendo rins, sistema linfático (linfoma não-Hodgkin) e defeitos cardíacos em fetos expostos ambiental ou ocupacionalmente. - Também há evidência de efeitos tóxicos não-cancerígenos: sistema nervoso central (cefaleias, tonturas, alterações cognitivas), fígado, rins, sistema imunológico, sistema reprodutivo masculino e desenvolvimento embrio-fetal.
CV	- Foi constatado que a exposição ocupacional ao cloreto de vinila causa câncer de fígado (especialmente angiossarcoma hepático) em humanos, sendo classificado como carcinogênico reconhecido - Existem relatos de doenças como acro-osteólise, fenômeno de Raynaud e outros efeitos associados à exposição crônica a altas concentrações.
DCE	Para esses compostos, a evidência humana específica é mais limitada, mas como subdivisões/metabólitos de solventes clorados e intermediários químicos, há potencial de efeitos similares aos mencionados anteriormente (neurológicos, hepáticos, renais, reprodutivos). A base de dados CHE inclui essas substâncias no conjunto de contaminantes associados a diversas doenças.

Fonte: CHE (2025).

3. OBJETIVOS

Este empreendimento teve por objetivo geral o levantamento de dados e a realização de diversas atividades buscando à atualização e ampliação do conhecimento acerca dos passivos ambientais, da geologia e hidrogeologia na Área de Restrição e Controle para a Captação e Uso das Águas Subterrâneas, no município de São Paulo (ARC – Jurubatuba).

Por sua vez, este documento técnico compreende o Relatório Final do projeto e busca atender ao objetivo geral inicialmente estabelecido para o empreendimento, nos termos das *Especificações Técnicas* estabelecidas pela Fundação Agência da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (FABHAT) e conforme o Contrato nº 003/2023 (21/12/2023), bem como de acordo com as cartas emitidas pelo IPT enumeradas de CIMA/SPRSF – 021/24 (17/07/2024) e CIMA/SPRSF- 019/25 (03/04/2025) tendo cumprido os seguintes objetivos:

- Atualização dos aspectos históricos referentes ao uso e ocupação do solo, com foco nas atividades de elevado potencial de contaminação, e nos aspectos jurídico institucionais (autodenúncia, monitoramentos e intervenções nos passivos ambientais das indústrias e em poços de abastecimento privados);
- Caracterização do estado da arte, com foco na geologia da ARC Jurubatuba e organização de uma base de dados geoespaciais, escala 1:10.000, nos limites estabelecidos pela Deliberação CBH-AT nº 139/2021;
- Organização de ampla e consistente base de dados de poços tubulares cadastrais, complementadas na etapa de campo, quando foram realizadas inspeções técnicas e coleta de amostras de água para análises químicas;
- Aprofundamento do conhecimento hidrogeológico e do comportamento dos contaminantes nos aquíferos sedimentar e fraturado, considerando o modelo de infiltração e circulação das águas;
- Caracterização das condições atuais de uso e exploração e das águas subterrâneas;

- Consolidação dos dados e informações produzidas com a perspectiva de apresentar as ferramentas de gestão e o arranjo institucional mais adequado para as medidas de prevenção e proteção dos aquíferos; assim como para as ações de controle e fiscalização do uso das águas subterrâneas na região de Jurubatuba; e
- Proposta de diretrizes de implantação de rede de monitoramento qualitativa com a utilização de poços já existentes, ativos e inativos.

4. SÍNTESE DOS RELATÓRIOS PARCIAIS APRESENTADOS

Neste item apresenta-se a síntese dos resultados consubstanciados no transcorrer do desenvolvimento do projeto e que constituíram relatórios técnicos parciais, com o intuito de facilitar tanto a compreensão da evolução do conhecimento obtido na ARC-Jurubatuba como a contextualização do presente Relatório Final.

Assim sendo, foram entregues seis relatórios parciais, conforme listado a seguir:

- Relatório Parcial 1 (RP1) – Nº 171 268-205 (Plano de Trabalho): emitido em 08/02/2024 (IPT, 2024a);
- Relatório Parcial 2.1 (RP2.1) – Nº 172.380-205 (Levantamento de Dados e Revisão Bibliográfica): emitido em 08/05/2024 (IPT, 2024b);
- Relatório Parcial 2.2 (RP2.2) – Nº 172.592-205 (Sistematização, integração e análise de dados existentes): emitido em 19/07/2024 (IPT, 2024c);
- Relatório Parcial 3.1 (RP3.1) – Nº 173.234-205 (Trabalho de Campo – Parte I): emitido em 07/10/2024 (IPT, 2024d);
- Relatório Parcial 3.2 (RP3.2) – Nº 173.968-205 (Trabalho de Campo – Parte II): emitido em 12/12/2024 (IPT, 2024e); e
- Relatório Parcial 4 (RP4) – Nº 176.600-205 (Consolidação dos resultados e produtos temáticos principais): emitido em 03/09/2025 (IPT, 2025).

Cabe destacar que diversos temas tiveram desenvolvimento de forma gradativa ao longo do projeto, sendo aprimorados e expandidos até atingirem sua versão final. Dessa forma, determinados temas foram abordados em mais de um relatório parcial.

4.1 Base de Dados de Poços

A base de dados de poços utilizada no projeto foi composta por um total de 755 poços cadastrados. O processo de constituição dessa base teve início com o levantamento realizado no estudo da Servmar (2008), que reuniu 513 poços. Ao longo do desenvolvimento do projeto, foram incorporados também os dados fornecidos pela COVISA, pela FABHAT e pela SP-Águas .

Para a adequada compreensão do **Quadro 2**, é importante destacar que, à medida que os dados provenientes dessas diferentes instituições foram sendo disponibilizados, tornou-se necessária a consistência da base em formação, visto que alguns poços apareciam duplicados em mais de um conjunto de dados.

Por esse motivo, o Quadro 2 apresenta duas colunas: “pré-cadastro”, que corresponde ao total de registros inicialmente recebidos, e “cadastro consistido”, que representa o número de poços efetivamente validados após a eliminação de duplicidades e a organização final da base.

Quadro 2 - Base de dados de Poços obtidas para a ARC – Jurubatuba e entorno.

Fonte	Pré-Cadastro (nº de poços)	Cadastro Consistido (nº de poços)
SERVMAR	513	513
COVISA	345	113
FABHAT	260	98
SP-Águas	168	31
Total na base atual	1286	755

Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto - FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

A construção da base de dados enfrentou uma série de desafios como dificuldades de acesso a dados de órgãos públicos e privados, imprecisão nas coordenadas geográficas e informações inconsistentes sobre endereços e proprietários. Estratégias de comunicação interna e externa foram sugeridas como fundamentais para superar essas dificuldades.

Dessa forma a apresentação dos resultados da construção da base de dados de poços constituiu conteúdo dos relatórios parciais

4.2 Cadastro de Poços Tubulares

O cadastramento de poços tubulares na ARC-Jurubatuba e entorno foi uma atividade continuada desde o início do projeto, envolvendo levantamento e consistência de dados, obtenção de autorizações de proprietários e visitas de campo.

De acordo com as Especificações Técnicas, estava previsto o cadastro de 400 poços em campo. Ao final, dos 755 poços consistidos para este trabalho, 384 foram efetivamente visitados, conforme apresentado no **Quadro 3**.

Quadro 3 - Situação geral dos poços cadastrados.

Situação dos Poços	Nº de poços
Ativos	108
Desativados	52
Lacrados	10
Aterrados/soterrados	15
Tamponados	35
Inexistentes	75
Sem acesso	89
Total	384

Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto - FEHIDRO 2021-AT-COB-1

É importante ressaltar o significado dos diversos tipos de situações encontradas para os poços cadastrados, quais sejam:

- **Ativos:** compreendem aqueles que estão equipados e em operação;
- **Desativados:** se encontram sem operação de bombeamento e podem se encontrar tanto equipados como não equipados;
 - **Lacrados:** representam os poços inativos que possuem algum tipo de proibição de operação do poço e uso da água;
 - **Aterrados/soterrados:** são poços que foram desmobilizados e que, de alguma forma tiveram sua estrutura (revestimento) preenchida;
 - **Tamponados:** são os poços que, segundo informações obtidas no local ou documentação recebida do proprietário, foram desativados, desmobilizados e preenchidos com materiais inertes seguindo orientações técnicas;
 - **Inexistentes:** são aqueles casos que não foram observados poços no endereço do pré-cadastro ou, segundo informações obtidas durante a visita, não se confirmou a existência de poços no local; e

- **Sem acesso:** representam os locais onde não foi possível a vistoria da equipe, devido a não autorização ou a não existência de pessoas na área.

Como resultado, foi possível constituir uma rede de monitoramento com 79 poços, na qual foram realizadas coletas e análises físico-químicas de campo e laboratoriais de 100 amostras de águas subterrâneas (79 amostras diretamente na saída de água na boca do poço e 21 amostras estratificadas ou discretas com base nos resultados das perfilagens geofísicas em 05 poços).

4.3 Caracterização do Uso e Ocupação do Solo

O estudo realizado pelo DAEE/Servmar (2008), que abrangeu toda a área de interesse, caracterizou os principais aspectos de uso e ocupação do solo, destacando a forte presença de áreas industriais concentradas ao longo do Canal do Jurubatuba e do rio Pinheiros, onde indústrias se instalaram a partir da década de 1950 devido à oferta de áreas, infraestrutura e recursos hídricos. Também se constatou uma tendência de desindustrialização, com redução gradual de indústrias e expansão de áreas residenciais, especialmente condomínios de padrão médio-alto.

A análise realizada neste estudo, com base em imagens aéreas e de satélite históricas, bem como em mapas atualizados, confirma a tendência já identificada por DAEE/Servmar (2008), caracterizada pela redução de áreas industriais e pelo aumento de ocupações residenciais na região avaliada.

Nesse contexto, destacam-se as áreas visitadas definidas pela Resolução SMA nº 11/2017 (São Paulo, 2017) e denominadas neste projeto como "Área Priorizada 3 (Jurubatuba)" e "Área Priorizada 6 (Chácara Santo Antônio)", cujo detalhamento encontra-se apresentado no **Quadro 4**.

Quadro 4 - Áreas prioritizadas para detalhamento das investigações.

Áreas prioritizadas	Critérios adotados
Área 1 - Pedreira	Histórico de operação de um aterro irregular de resíduos e proximidade com a Represa Billings.
Área 2 - Socorro	Área com uso pretérito industrial significativo e proximidade de corpos d'água superficiais (Canal do Jurubatuba, Rio Guarapiranga e Represa Guarapiranga) e geologia regional. Atualmente, predominam áreas de uso residencial.
Área 3 – Jurubatuba	Corresponde à Região Prioritária 4, classificada pela CETESB conforme Resolução SMA nº 11, de 08 de fevereiro de 2017 (São Paulo, 2017b), que apresenta números expressivos de imóveis com mudança de uso industrial para residencial.
Área 4 - Guarapiranga	Área com o uso predominantemente industrial, proximidade de corpo d'água superficial (Rio Guarapiranga) e geologia regional.
Área 5 - Santo Amaro	Possui histórico de várias áreas com contaminação por organoclorados e situa-se em zona limítrofe de duas regiões prioritárias, definidas conforme Resolução SMA nº 11, de 08 de fevereiro de 2017 (São Paulo, 2017b).
Área 6 - Chácara Santo Antônio	Corresponde à Região Prioritária 3, classificada pela CETESB conforme Resolução SMA nº 11, de 08 de fevereiro de 2017 (São Paulo, 2017b), que apresenta números expressivos de imóveis com mudança de uso industrial para residencial. É importante ressaltar que em 2008 (Servmar Serviços Técnicos Ambientais, 2008) foram identificadas 05 áreas com histórico de contaminação por organoclorados e nos levantamentos efetuados no presente trabalho, foram observadas 11 áreas, demonstrando um aumento maior do que duas vezes nos registros da CETESB.
Área 7 - Vila Andrade	Área com o uso predominantemente de áreas residenciais, além de comércio e serviço e proximidade de corpo d'água superficial (Rio Pinheiros). Além disso, existe uma grande utilização de água subterrânea.
Área 8 - Itaim Bibi	Apresenta densidade elevada de ocorrência de poços e possui histórico de várias áreas com contaminação por organoclorados. É importante ressaltar que em 2008 (Servmar Serviços Técnicos Ambientais, 2008) foram identificadas 02 áreas com histórico de contaminação por organoclorados e nos levantamentos efetuados no presente trabalho, foram observadas 14 áreas, demonstrando aumento de sete vezes nos registros da CETESB.

Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto - FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

4.4 Situação das Áreas Declaradas Contaminadas ou Reabilitadas

A análise das áreas contaminadas foi realizada com base nos bancos de dados Datageo (2025), Geosampa (2025), Prefeitura do Município de São Paulo (2025) e CETESB (2025). Após a comparação entre as bases e a verificação de duplicidades, foram identificadas 104 áreas contaminadas ou reabilitadas por compostos organoclorados, substâncias químicas de interesse neste estudo.

Esse quantitativo representa um aumento de 90 áreas em relação ao levantamento realizado por DAEE/SERVMAR (2008), que havia identificado 14 áreas

envolvendo esse tipo de contaminação. De acordo com a atualização realizada neste estudo, essas 14 áreas encontram-se nas seguintes categorias:

- 5 Áreas Contaminadas em Processo de Remediação (ACRe);
- 3 Processos de Monitoramento para Encerramento (AME);
- 3 Áreas Reabilitadas para o Uso Declarado (AR); e
- 3 Áreas Contaminadas em Processo de Reutilização (ACRu).

4.5 Caracterização das Fontes Potenciais de Contaminação na ARC-Jurubatuba

O método POSH (*Pollutant Origin, Surcharge Hydraulically*), proposto por Foster *et al.* (2006), foi utilizado para avaliar a periculosidade das atividades com base nos seguintes aspectos:

- Origem dos poluentes;
- Tipo de atividade humana associada; e
- Carga hidráulica potencial decorrente do uso da água.

Com base no cadastro das 526 atividades com cargas potencialmente contaminantes, obtido no SIPO e disponibilizado pela CETESB ao projeto, realizou-se o enquadramento das fontes potenciais de contaminação e a consequente classificação segundo o método POSH. Os resultados foram os seguintes:

- Classe 1 – Potencial Reduzido: 43 atividades;
- Classe 2 – Potencial Moderado: 194 atividades;
- Classe 3 – Potencial Elevado: 155 atividades; e
- Não classificadas: 134 atividades (sem tipologia compatível com o POSH).

4.6 Balanço Hídrico

A determinação do balanço hídrico de uma bacia constitui um dos instrumentos fundamentais para implementação da gestão quantitativa das águas, especialmente no contexto das políticas públicas de recursos hídricos, tanto em âmbito estadual quanto federal.

No caso da ARC-Jurubatuba, o balanço hídrico foi calculado considerando-se as parcelas gerais dos usos consuntivos da água que incluem todos os tipos de demandas por recursos hídricos subterrâneos e superficiais outorgados, e as respectivas ofertas hídricas, provenientes de mananciais superficiais e subterrâneos.

A base de dados constituída no presente estudo apresenta 755 poços, porém, para quantificar a demanda total de água subterrânea extraída na área de estudo, foram considerados apenas os poços classificados como ativos, desativados e sem acesso, totalizando 577 poços (**Quadro 5**). Com base nessa abordagem, a demanda estimada de água subterrânea desses usos outorgados é de 3.384,6 m³/h.

A água subterrânea captada nos aquíferos da área de estudo é utilizada para diversas finalidades. O uso da água foi classificado de acordo com a Instrução Técnica DPO nº 10/2017 (DAEE, 2017), garantindo padronização e clareza.

Na área de estudo, a maior parte dos poços e da vazão de água subterrânea extraída é destinada ao uso doméstico, totalizando 172 poços (30%) e 951,7 m³/h (28%) do volume captado.

Quadro 5 - Captação total dos poços conforme a finalidade de uso.

Finalidade de uso	Nº Poços	Vazão total captada(m ³ /h)
Comércio e Serviços	5	33,2
Doméstico	172	951,7
Industrial	101	588,9
Outros usos	51	329,1
Recreação e Paisagismo	6	35,7
Urbano	104	610,3
Sem Informação	38	835,7
Total Geral	577	3384,6

Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto - FEHIDRO 2021-AT-COB-136

Em relação ao aquífero explotado na área de estudo, constata-se que 327 poços (57%) não possuem informação, sendo responsáveis por uma extração total de 1.979,1 m³/h (58%). Entre os poços que apresentam essa informação, a maioria capta do Sistema Aquífero Cristalino, com 183 poços (32%) e uma vazão total de 1.054,3 m³/h (31%) (**Quadro 6**).

Quadro 6 - Distribuição dos poços conforme aquífero captado.

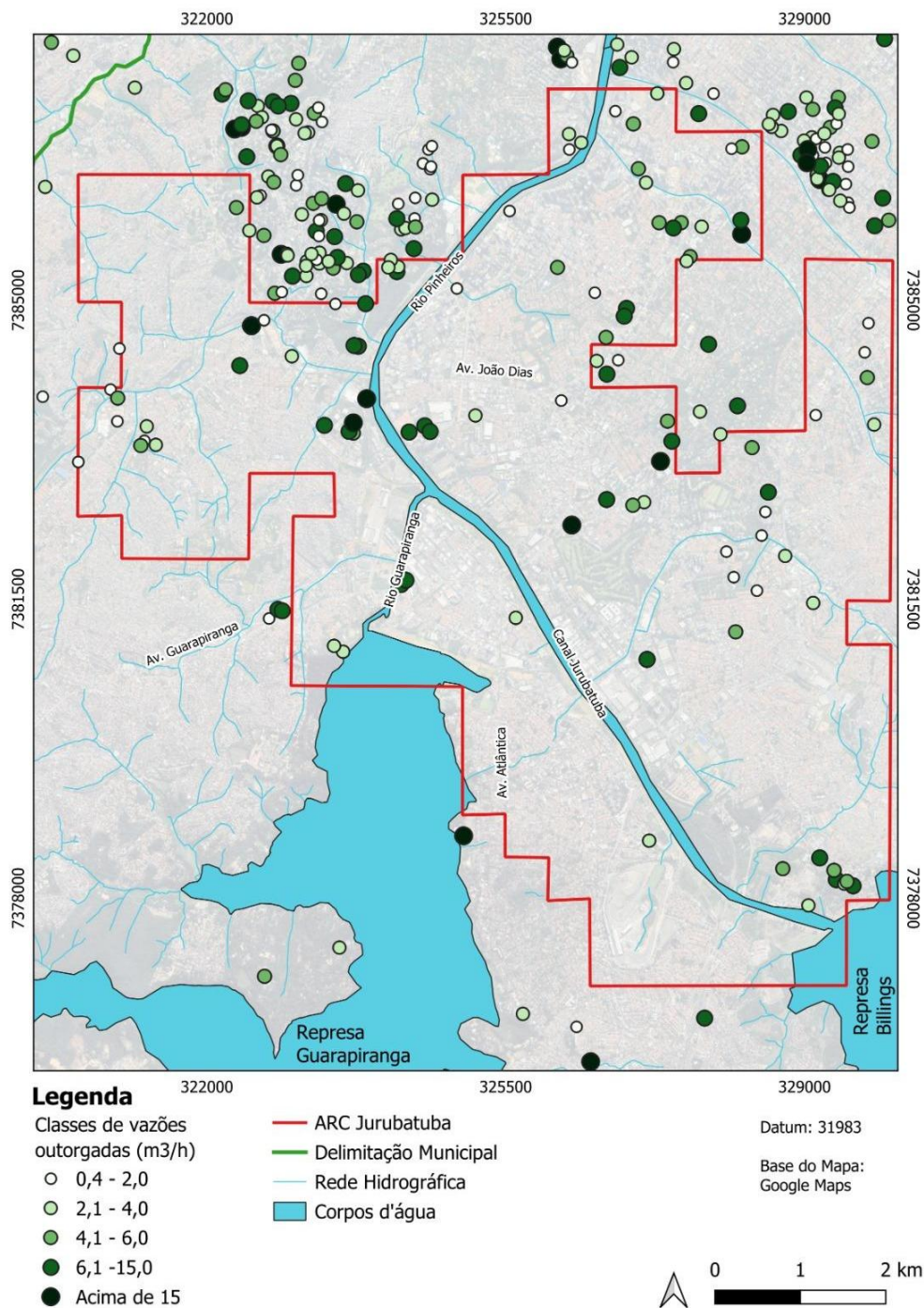
Sistema Aquífero	Nº Poços	Vazão total captada (m³/h)
Cristalino (1)	183	1054,3
Misto (2)	21	124,0
Sedimentar (3)	46	227,2
Sem Informação (4)	327	1979,1
Total Geral	577	3384,6

Observações: Quanto ao sistema aquífero, os poços foram classificados no cadastro efetuado no presente estudo da seguinte forma:

- (1) inclui poços no "aquífero cristalino" e "cristalino aquífero cristalino fraturado";
- (2) inclui poços no aquífero "misto 1", "misto 2" e "misto 3";
- (3) inclui poços no "aquífero São Paulo", "aquífero "Terciário Formação São Paulo" e no aquífero sedimentar"; e
- (4) inclui poços com informações não confiáveis ou sem informação e, também, em aquífero alterado e freático.

De acordo com a **Figura 2** as menores vazões outorgadas concentram-se principalmente na porção norte da área da ARC-Jurubatuba. Também aparecem de forma dispersa em toda a área de interesse. Por outro lado, as maiores vazões distribuem-se de maneira mais expressiva nas porções norte e sul da área. No setor norte, observa-se agrupamento consistente de poços de alta vazão e no setor sul, destacam-se pontos de maior produtividade próximos às represas Guarapiranga e Billings.

Figura 2 - Classes de vazão dos poços outorgados.



Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto - FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

5. CARACTERIZAÇÃO DA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

5.1 Resultados Analíticos em Amostragem de Águas Subterrâneas em Poços

Este item apresenta os procedimentos adotados nos trabalhos realizados entre 26 de novembro de 2024 e 23 de julho de 2025, em atividades de campo e de laboratório, compreendendo a coleta, análise e interpretação dos resultados obtidos com as amostras de água subterrânea de poços tubulares selecionados. O **Anexo 01** apresenta o registro fotográfico das atividades de campo.

O objetivo dos trabalhos diz respeito à avaliação da qualidade das águas coletadas em poços tubulares por meio da realização de análises físico-químicas *in situ* e em laboratório, da seguinte forma:

- Medição *in situ*: efetuada em amostras de água coletadas no local dos poços para parâmetros T (temperatura), pH (Potencial Hidrogeniônico), ORP (potencial de oxirredução), OD (Oxigênio Dissolvido), CE (Condutividade Elétrica) e turbidez da água; e
- Execução de análises laboratoriais de varredura de VOC (Compostos Orgânicos Voláteis).

A seleção do conjunto de poços para os estudos hidroquímicos foi efetuada com base nas seguintes premissas:

- Distribuição espacial dos poços na área, priorizando aqueles com informações históricas de análises químicas de etenoclorados e etanoclorados;
- Proximidade de corpos d'água superficiais, principalmente do canal do Jurubatuba, rio Guarapiranga e rio Pinheiros;
- Importância do poço no contexto histórico regional, levando em consideração a proximidade de áreas cadastradas como contaminadas por compostos organoclorados e de áreas com mudança de uso, principalmente de industrial para residencial;

- Possibilidade de acesso aos poços e autorização para amostragem de águas subterrâneas; e
- Existência de equipamentos instalados nos poços e com possibilidade de operação, para permitir a coleta.

No total, foram amostrados 79 poços, distribuídos conforme a forma de coleta da seguinte forma:

- Em 69 poços em operação: as amostras foram obtidas diretamente na torneira do poço, utilizando o sistema de bombeamento existente;
- Em 04 poços desativados (sem equipamento de bombeamento): foi instalado equipamento específico para a coleta, utilizando-se o método de baixa vazão (*low flow sampling*);
- Em 05 poços tubulares nos quais foram efetuadas perfilagens geofísicas: as amostras foram coletadas concomitantemente às atividades de perfilagem, utilizando-se uma bomba submersa; e
- Em 01 poço com Sistema Westbay instalado (Lima, 2018): coletada uma amostra que foi obtida adotando-se metodologia específica, qual seja, amostragem com sonda do Sistema Westbay que é uma tecnologia utilizada para monitoramento multiestratificado em poços de monitoramento, permitindo a coleta de amostras de água subterrânea em diferentes profundidades sem necessidade de instalação de poços multiníveis.

A coleta foi conduzida pela empresa AD Ambiental, seguindo às exigências da CETESB descritas na Decisão de Diretoria (DD) Nº 009/2016/E/C/I de 14/01/2016 (CETESB, 2016) a respeito de serviços de amostragens ambientais, onde se faz referência as Resoluções SMA Nº 94/2015 (São Paulo, 2015) e SMA Nº 100/2013 (São Paulo, 2013).

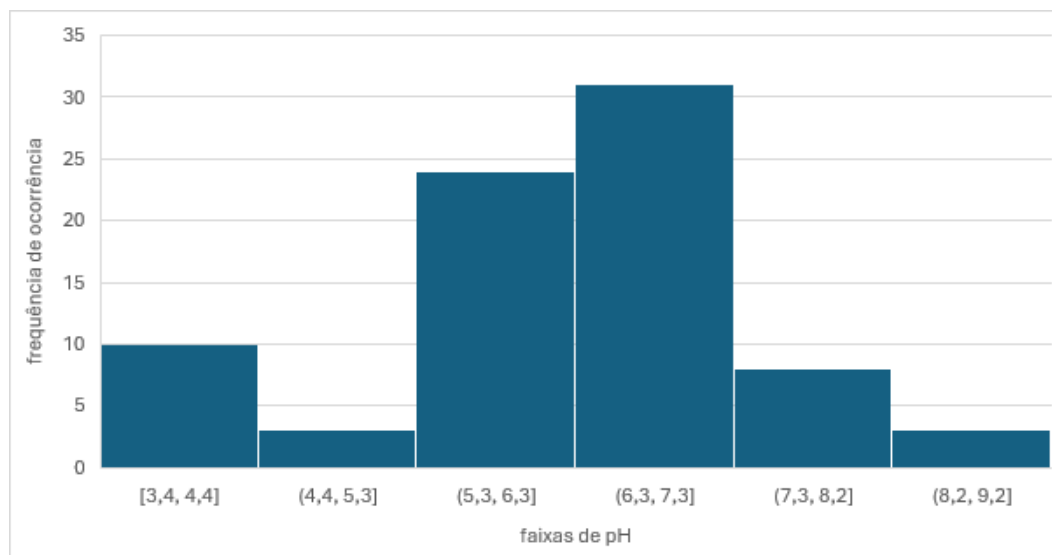
As amostras foram acondicionadas em frascos específicos, mantidas sob refrigeração (<5°C), registradas em cadeia de custódia e encaminhadas ao laboratório Centro de Biologia Experimental Oceanus, com certificado CRL (Cadastro da Rede de Laboratórios) nº 0306 (**Anexo 02**) junto ao Inmetro (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia) e acreditado pela CGCRE (Coordenação Geral de

Acreditação do Inmetro - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia), de acordo com os requisitos da norma da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnica) NBR ISO/IEC 17025:2005 (ABNT, 2005), para análise das SQI (Substâncias Químicas de Interesse). As cadeias de custódias e laudos são apresentadas no **Anexo 03**.

O tratamento e análise estatística dos dados relativos aos parâmetros físico-químicos obtidos *in situ* em poços amostrados (pH, ORP, OD, CE, Temperatura e Turbidez) são apresentados nos gráficos das **Figuras 3 a 8**.

A **Figura 3** apresenta a distribuição das leituras de pH, evidenciando que a maior parte das amostras se encontra dentro da faixa estabelecida. Foram identificados, entretanto, 25 registros com valores ácidos (pH inferior a 6,0) e 1 registro acima de 9,0. O pH, parâmetro que indica o grau de acidez ou alcalinidade da água, deve situar-se entre 6,0 e 9,5, conforme estabelece a GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021 (Ministério da Saúde, 2021).

Figura 3 - Gráfico com os dados de PH para as 79 amostras de águas subterrâneas coletadas.

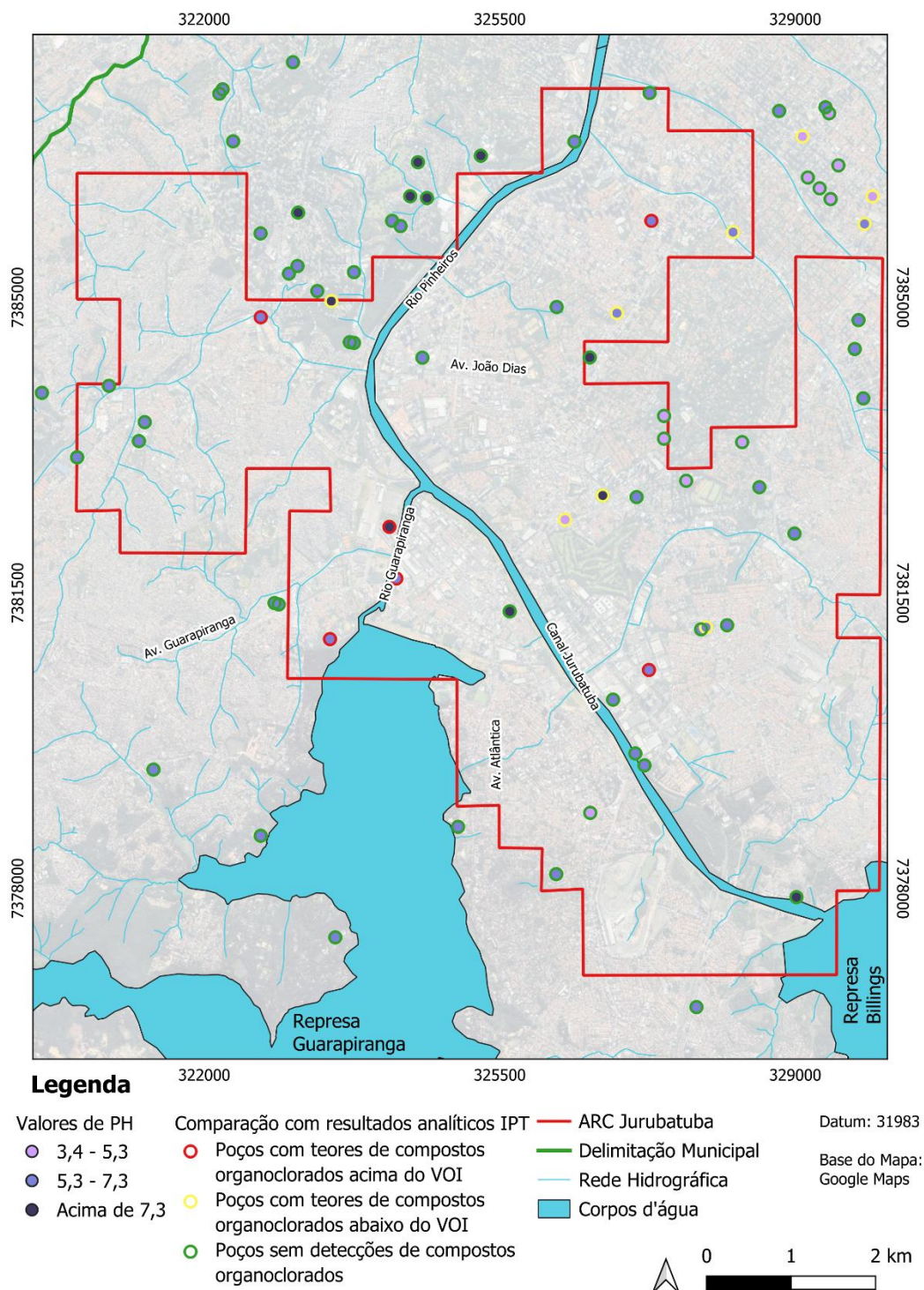


Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto - FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

A **Figura 4** apresenta a distribuição espacial dos valores de pH associados aos resultados analíticos de compostos organoclorados, com o objetivo de identificar padrões relevantes no comportamento hidrogeológico da ARC Jurubatuba.

A comparação indica que não há correlação direta entre a acidez da água subterrânea e a presença de compostos organoclorados. Poços com pH ácido ocorrem tanto em áreas sem detecção desses compostos quanto em locais próximos a poços com concentrações abaixo ou acima do VOI. Essa distribuição heterogênea sugere que a acidificação da água subterrânea não está necessariamente relacionada à presença de compostos organoclorados, podendo refletir outros processos geoquímicos ou fontes de contaminação distintas atuando na área.

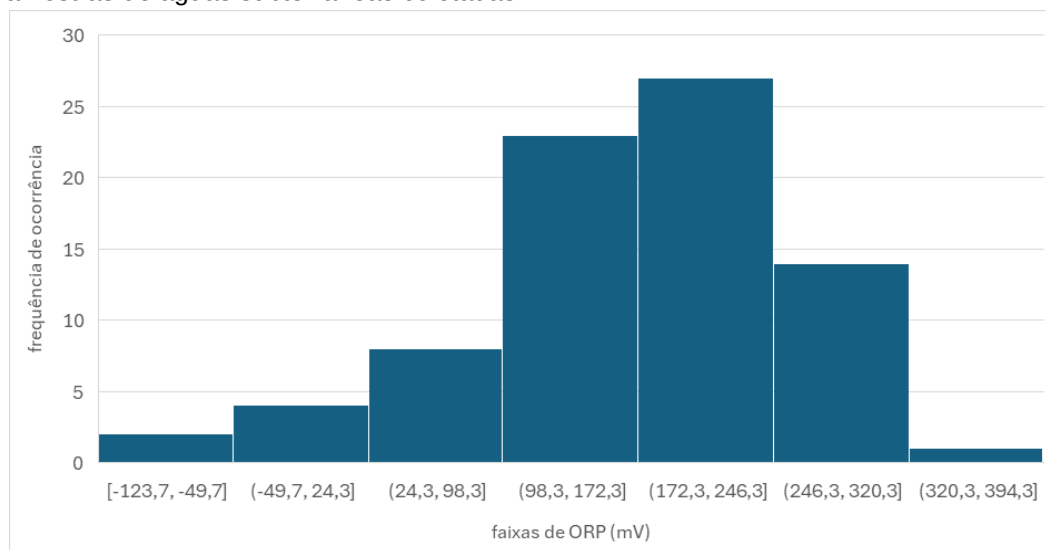
Figura 4 - Distribuição espacial dos valores de pH associados aos resultados analíticos.



Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto - FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

A **Figura 5** apresenta a distribuição das leituras de Potencial de Oxirredução (ORP), agrupadas em classes de valores. Nota-se que a maioria das amostras se concentra nas faixas de 172,3 mV a 246,3 mV e de 98,3 mV a 172,3 mV, com picos de cerca de 27 e 23 registros, respectivamente, indicando predominância de condições oxidantes. Faixas negativas (–123,7 mV a –49,7 mV) apresentam ocorrência reduzida, sugerindo que ambientes mais redutores são pouco frequentes.

Figura 5 - Gráfico com a distribuição de frequência dos dados de ORP para as amostras de águas subterrâneas coletadas.

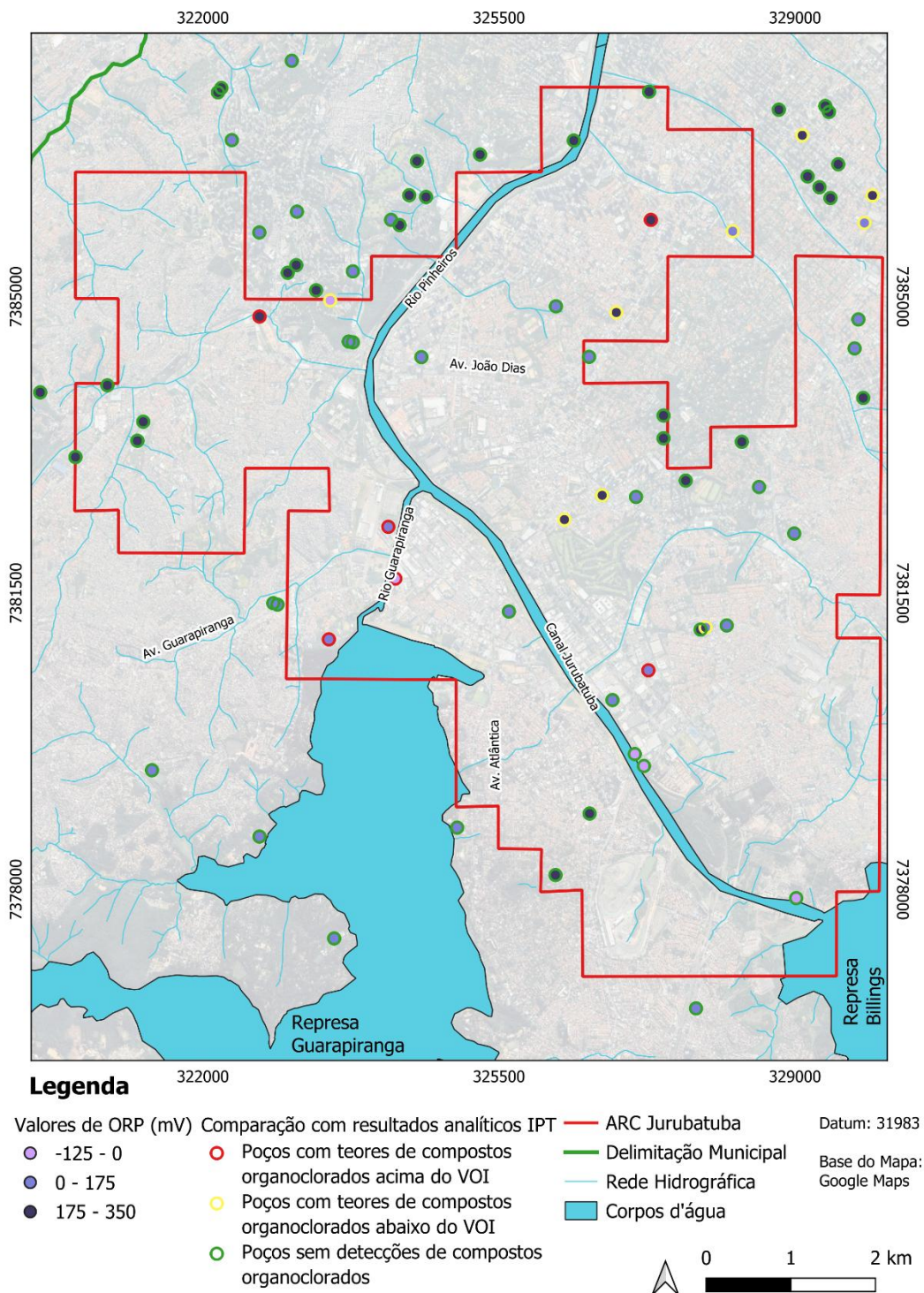


Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto - FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

A **Figura 6** apresenta a distribuição espacial dos valores de ORP associados aos resultados analíticos de compostos organoclorados nos poços monitorados. O ORP varia entre condições reduzidas (–125 mV a 0 mV) e oxidantes (acima de 175 mV), refletindo a diversidade de ambientes geoquímicos presentes na área.

De modo geral, a comparação entre os valores de ORP e a presença de compostos organoclorados não evidencia relação direta entre o estado redox da água subterrânea e a ocorrência desses compostos. Poços com valores de ORP reduzido ou mais oxidante aparecem associados a todas as categorias de detecção, indicando que a distribuição dos organoclorados não está condicionada às condições redox locais.

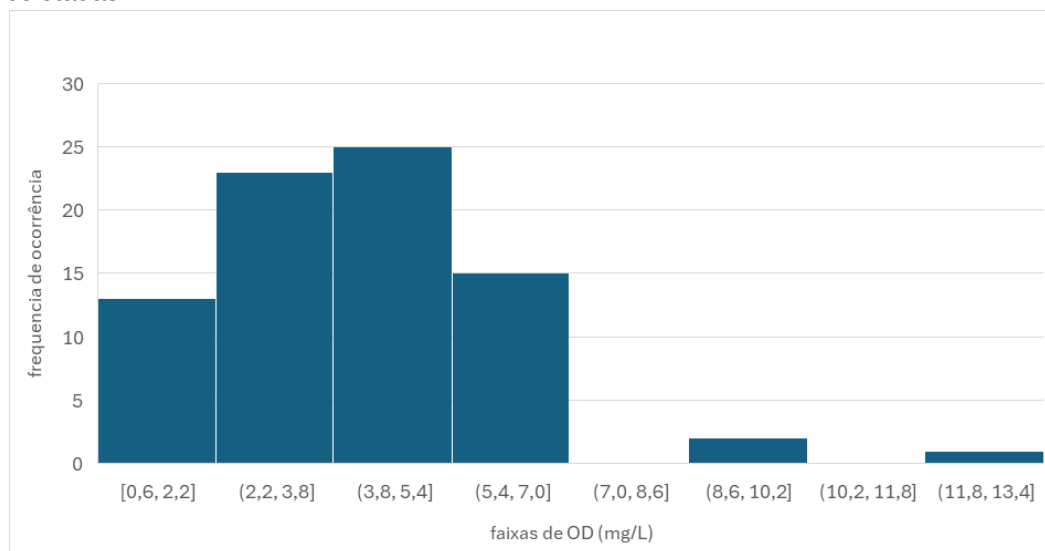
Figura 6 - Distribuição espacial dos valores de ORP associados aos resultados analíticos



Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto - FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

O histograma de Oxigênio Dissolvido (OD), apresentado na **Figura 7**, evidencia que a maior parte das amostras está concentrada nas faixas de 2,2 mg/L a 5,4 mg/L, com destaque para o intervalo de 3,8 mg/L a 5,4 mg/L, que apresentou a maior frequência de ocorrências. Observa-se também a presença de valores reduzidos de oxigênio dissolvido (0,6 mg/L a 2,2 mg/L) em número expressivo, condição típica de águas subterrâneas em função da limitada troca gasosa com a atmosfera. Em contrapartida, concentrações mais elevadas, acima de 7,0 mg/L, foram pouco frequentes, indicando que situações de maior oxigenação não são predominantes no conjunto analisado.

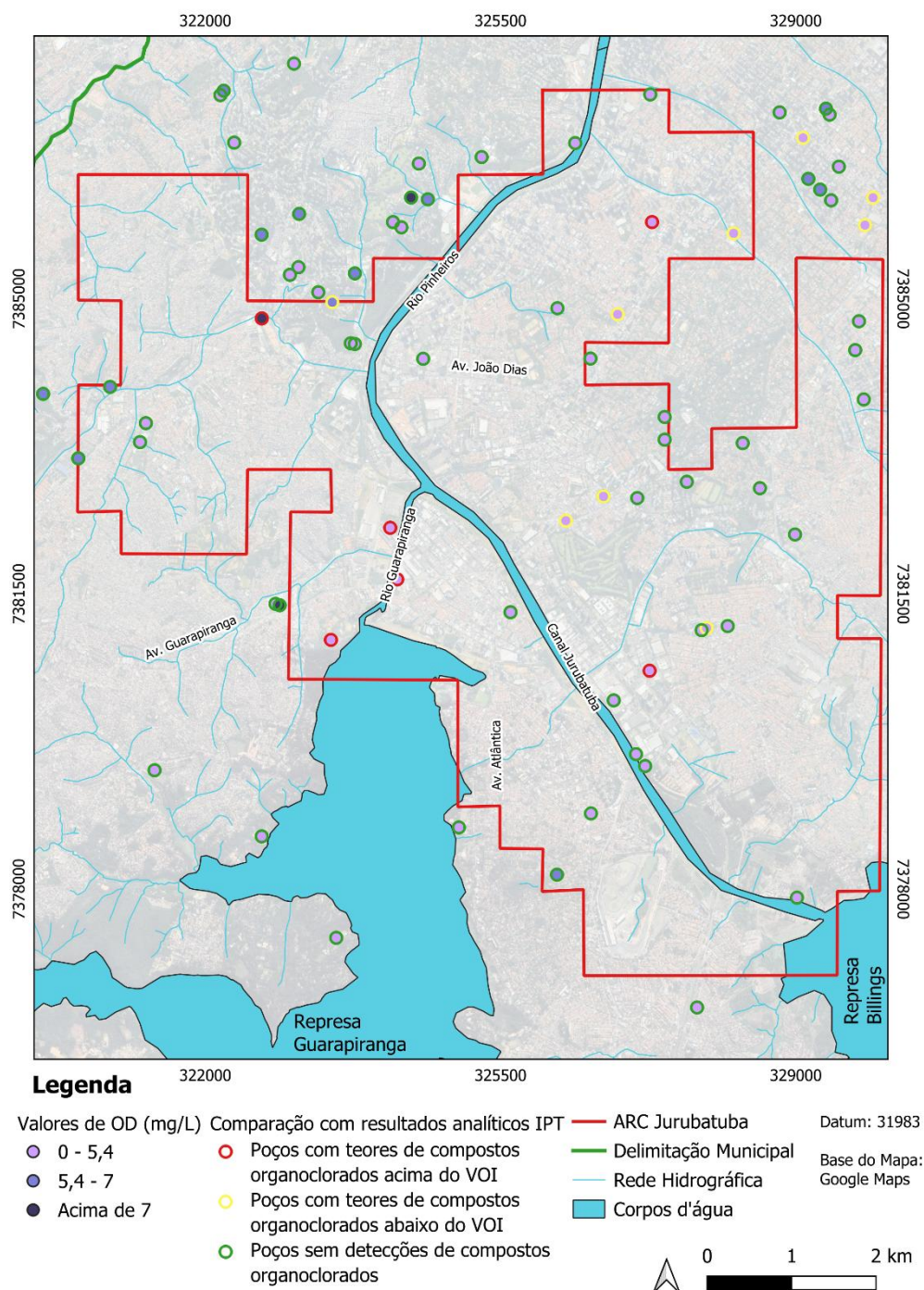
Figura 7 - Gráfico com os valores de OD para as amostras de águas subterrâneas coletadas.



Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto - FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

A **Figura 8** apresenta a distribuição espacial dos valores de OD associados aos resultados analíticos de compostos organoclorados na ARC Jurubatuba. A análise conjunta dos parâmetros demonstra que não há uma relação direta entre as concentrações de OD na água subterrânea e a detecção de compostos organoclorados.

Figura 8 - Distribuição espacial dos valores de OD associados aos resultados analíticos.

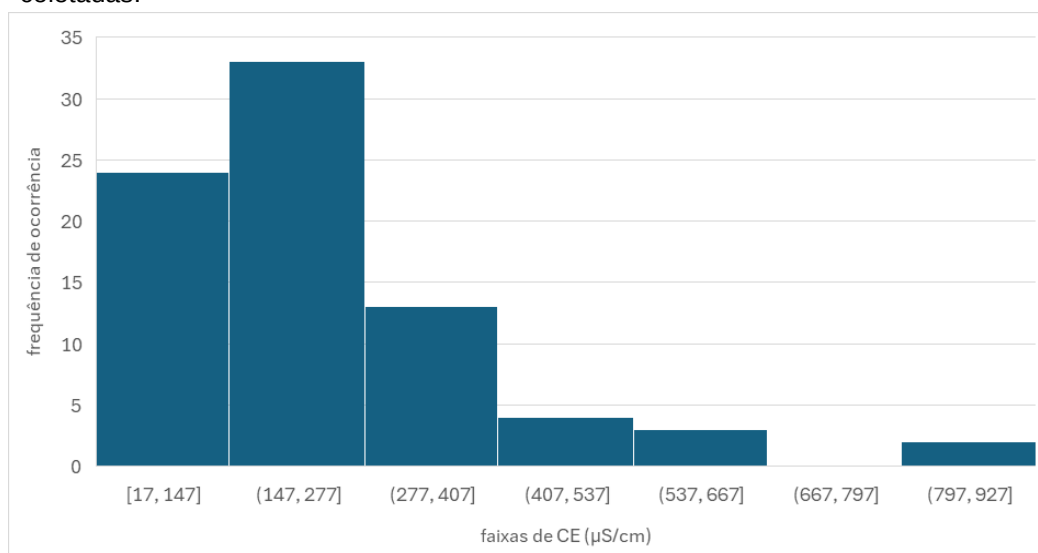


Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto - FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

A Condutividade Elétrica (CE) é a capacidade da água conduzir corrente elétrica, estando diretamente vinculada ao teor de sais dissolvidos sob a forma de íons e, dessa forma, quanto maior a concentração iônica, maior sua condutividade elétrica. A **Figura 9** apresenta a distribuição dos valores de CE.

Nota-se que a maioria das amostras se concentra nas faixas de 17 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 147 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e de 147 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 277 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com frequências de cerca de 25 e 33 registros, respectivamente, indicando predomínio de águas de baixa a moderada mineralização. À medida que os valores de CE aumentam, observa-se redução acentuada no número de ocorrências, com poucas amostras acima de 537 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

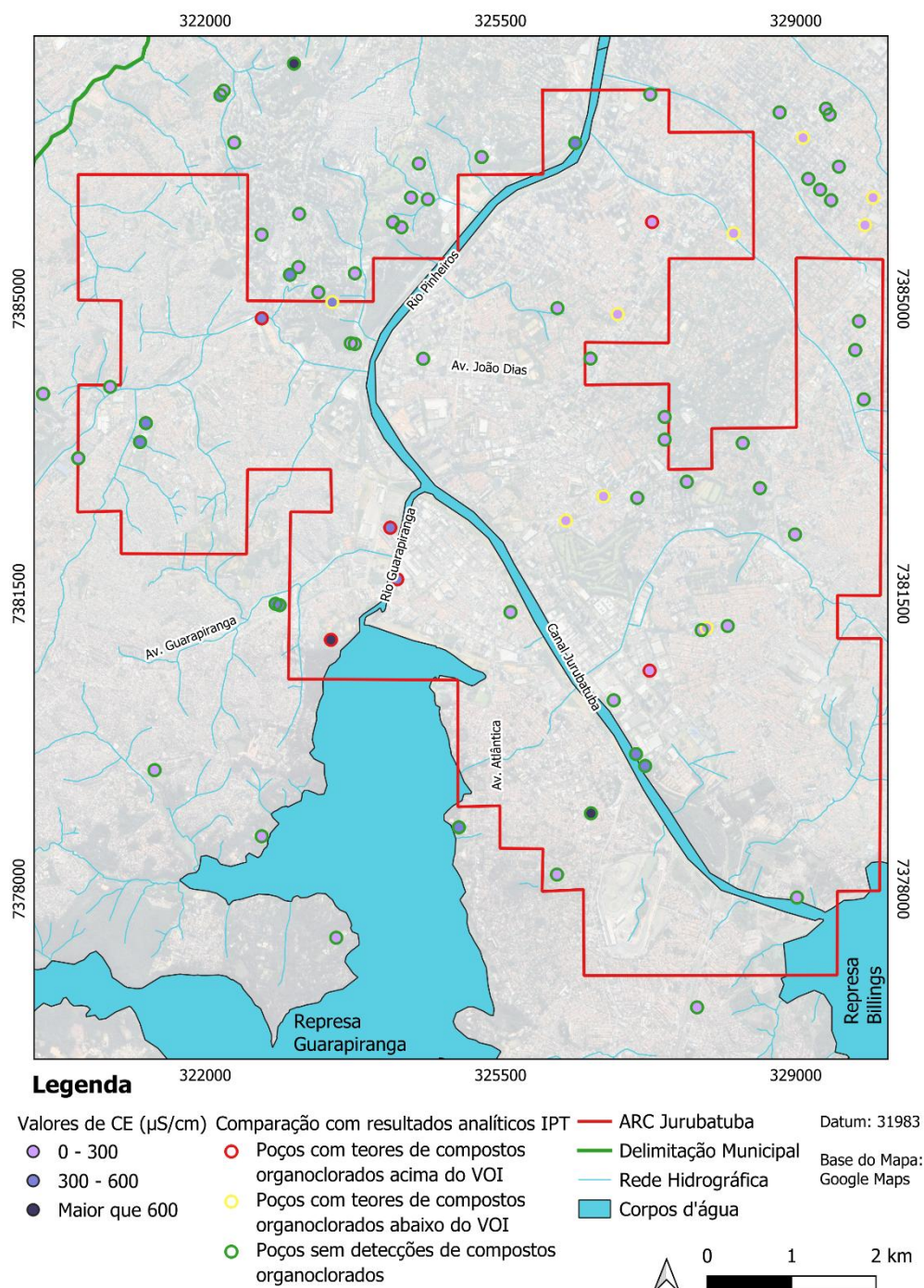
Figura 9 - Gráfico com os dados de CE para as amostras de águas subterrâneas coletadas.



Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto - FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

A **Figura 10** mostra que não há relação direta entre os valores de condutividade elétrica e a ocorrência de compostos organoclorados na área de estudo. A presença desses contaminantes está associada a fontes pontuais e à dinâmica de transporte específica dos organoclorados, não sendo significativamente influenciada pela carga iônica total da água.

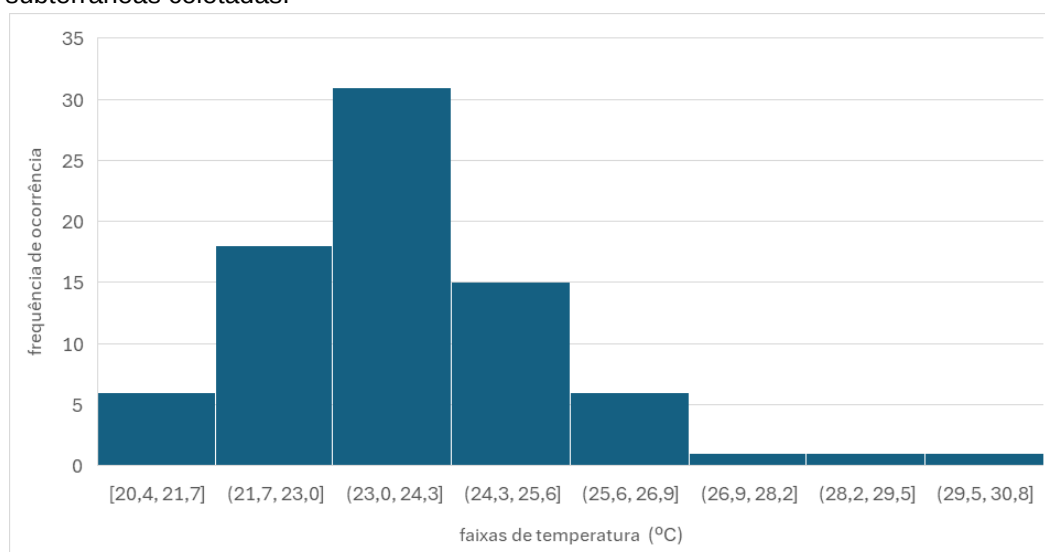
Figura 10 - Distribuição espacial dos valores de CE associados aos resultados analíticos.



Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto - FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

A **Figura 11** apresenta a distribuição das temperaturas registradas nas amostras de água subterrânea, variando de aproximadamente 20,4°C a 30,8°C. Observa-se que a maior parte das amostras concentra-se nas faixas 21,7°C a 23,0°C e 23,0°C a 24,3°C e, com frequências de cerca de 18 e 31 registros, respectivamente. Valores superiores a 26,9°C são pouco frequentes, representando apenas uma pequena parcela do conjunto de dados. Essa distribuição evidencia que as águas subterrâneas monitoradas apresentam, em sua maioria, temperaturas próximas à média anual do ar.

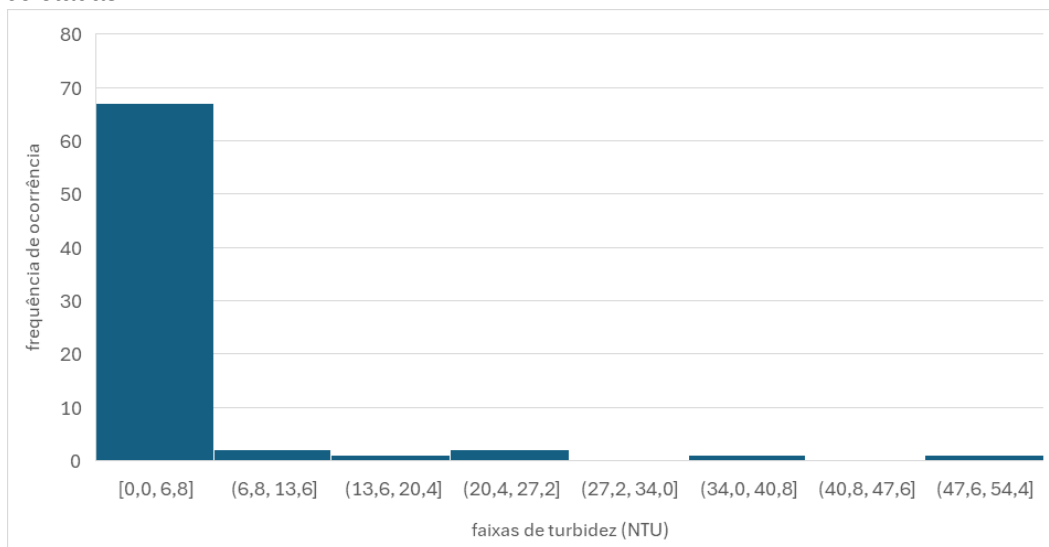
Figura 11 - Gráfico com os dados de temperatura para as amostras de águas subterrâneas coletadas.



Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto - FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

A turbidez, por sua vez, corresponde à redução da transparência da água provocada pela presença de partículas em suspensão que dificultam a passagem da luz. Nas medições *in situ*, os valores variaram de 0,04 NTU a 49,88 NTU. O histograma de turbidez apresentado na **Figura 12** mostra que a grande maioria das amostras apresenta valores muito baixos. A faixa 0,0 NTU a 6,8 NTU concentra cerca de 67 ocorrências, enquanto todas as demais faixas apresentam frequência mínima, com no máximo 2 ocorrências cada. Isso indica que a turbidez da água é predominantemente baixa, com poucos casos pontuais de valores mais elevados.

Figura 12 - Gráfico com os dados de turbidez para as amostras de águas subterrâneas coletadas.



Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto - FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

Em relação aos resultados analíticos de varredura de VOC, foram tratados os dados de etenos clorados e etanos clorados, sendo essas as substâncias químicas de interesse (SQI) para área de estudo. Os resultados das análises químicas que apresentaram pelo menos uma substância com concentração superior aos limites de quantificação (LQ) estão apresentados no **Quadro 7**.

Conforme apresentado no **Quadro 7**, 15 dos 79 poços amostrados apresentaram concentrações acima do LQ. O Poço 346 apresentou os maiores valores detectados, destacando-se que a concentração de Cloreto de Vinila nesse ponto é 2.148 vezes superior ao Valor Orientador de Intervenção (VOI) adotado.

Relatório Técnico Nº 177 723-205 -29/1284

Quadro 7 - Poços com ocorrência de pelo menos uma substância em concentração superior aos limites de quantificação conforme os valores de referência.

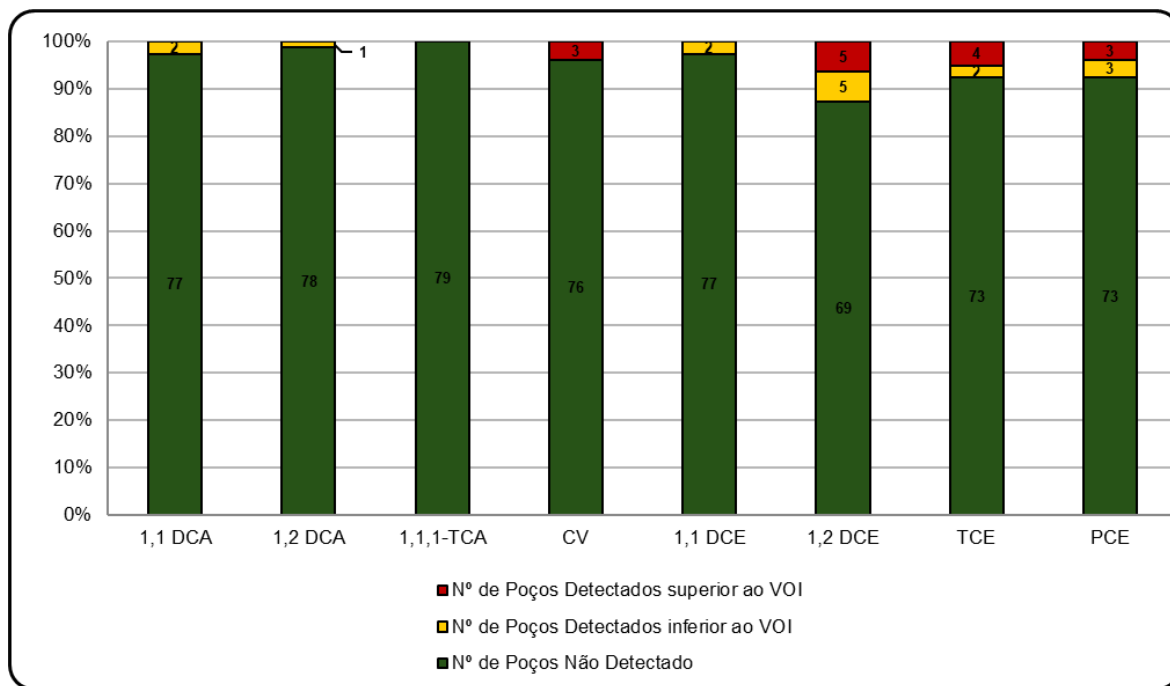
Substância	Id. IPT Nº CAS	14	49	74	163	208	236	248	251B	362	377	103	28	329	346	235	VOI (µg/L)
		26/11/24 11:14:00	04/12/24 15:00:00	04/12/24 11:45:00	28/11/24 14:35:00	28/11/24 10:38:00	27/11/24 14:05:00	27/11/24 10:33:00	29/11/24 10:26:00	04/12/24 14:15:00	02/12/24 10:16:00	13/01/25 08:29:00	14/01/25 11:04:00	16/01/25 10:08:00	06/02/25 12:30:00	20/02/25 09:35:00	
1,1-Dicloroetano	75-34-3	<LQ	<LQ	25,23	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	45,56	<LQ	53
1,2-Dicloroetano	107-06-2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	2,11	<LQ	5
1,1,1-Tricloroetano	71-55-6	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	2000
Cloreto de vinila	75-01-4	<LQ	10,3	175,3	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1074,4	<LQ	0,5
1,1-Dicloroeteno	75-35-4	<LQ	<LQ	20,71	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	29,02	<LQ	30
1,2-Dicloroeteno - cis + trans	156-59-2	<LQ	290,31	1752,86	1,70	<LQ	<LQ	1,71	5,27	57,13	58,73	<LQ	4,2	1,57	6222,70	<LQ	50
Tricloroeteno	79-01-6	<LQ	89,3	<LQ	<LQ	<LQ	1,4	9,7	<LQ	<LQ	30	<LQ	<LQ	<LQ	3555,6	1,9	4
Tetracloroeteno	127-18-4	3,9	150,2	<LQ	<LQ	7,6	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	62	9,5	<LQ	<LQ	5333,3	<LQ	40

Observações: Id: identificação; <LQ: concentração inferior ao limite de quantificação; VOI: Valor Orientador de Intervenção estabelecido pela Portaria GM/MS Nº 888 (Ministério da Saúde, 2021); CAS: compreende o registro emitido pela entidade norte americana *Chemical Abstracts Service Registry*; **Valores em vermelho:** concentração detectada superior ao VOI; :Valores em preto: concentração detectada inferior ao VOI; µg/L: micrograma por Litro.

Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto - FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

A **Figura 13** apresenta síntese consolidada dos dados obtidos. Nota-se uma predominância significativa de poços sem detecção para todos os compostos analisados, correspondendo a mais de 90% do total em cada categoria.

Figura 13 - Síntese dos resultados obtidos nas análises laboratoriais de amostras dos poços da rede de monitoramento da ARC-Jurubatuba.



Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto - FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

As amostras coletadas em saídas únicas de água ou, ainda, aquelas coletadas por meio de equipamentos dos volumes armazenados no interior dos poços de exploração, podem apresentar concentrações diluídas em função do elevado volume de água armazenado na coluna d'água da captação. Esse efeito ocorre porque a água coletada não corresponde apenas ao ponto específico do aquífero de interesse, mas resulta da mistura de diferentes zonas produtivas interceptadas pela perfuração, além do acúmulo do volume estagnado. Dessa forma, a representatividade das amostras pode ser limitada, diferindo das amostras estratificadas, as quais representam pontos ou trechos específicos do aquífero.

É importante destacar que em relação aos compostos 1,1-DCA, 1,2-DCA e 1,1,1-TCA não foram observadas ocorrência em praticamente nenhuma das análises efetuadas e, assim, a grande maioria dos poços se incluem na categoria "não detectado", indicando ausência desses compostos na área estudada.

Por outro lado, compostos como CV, 1,1-DCE, 1,2-DCE, TCE e PCE apresentam diferentes proporções ocorrência (detecção) nos poços monitorados, com concentrações variando entre valores inferiores e superiores ao VOI. O 1,2-DCE é o composto mais frequentemente detectado, indicando ocorrência de processos de degradação. A principal via de biodegradação dos solventes organoclorados é a dehalogenação redutiva, caracterizada pela substituição de átomos de cloro por hidrogênio (Bradley, 2000).

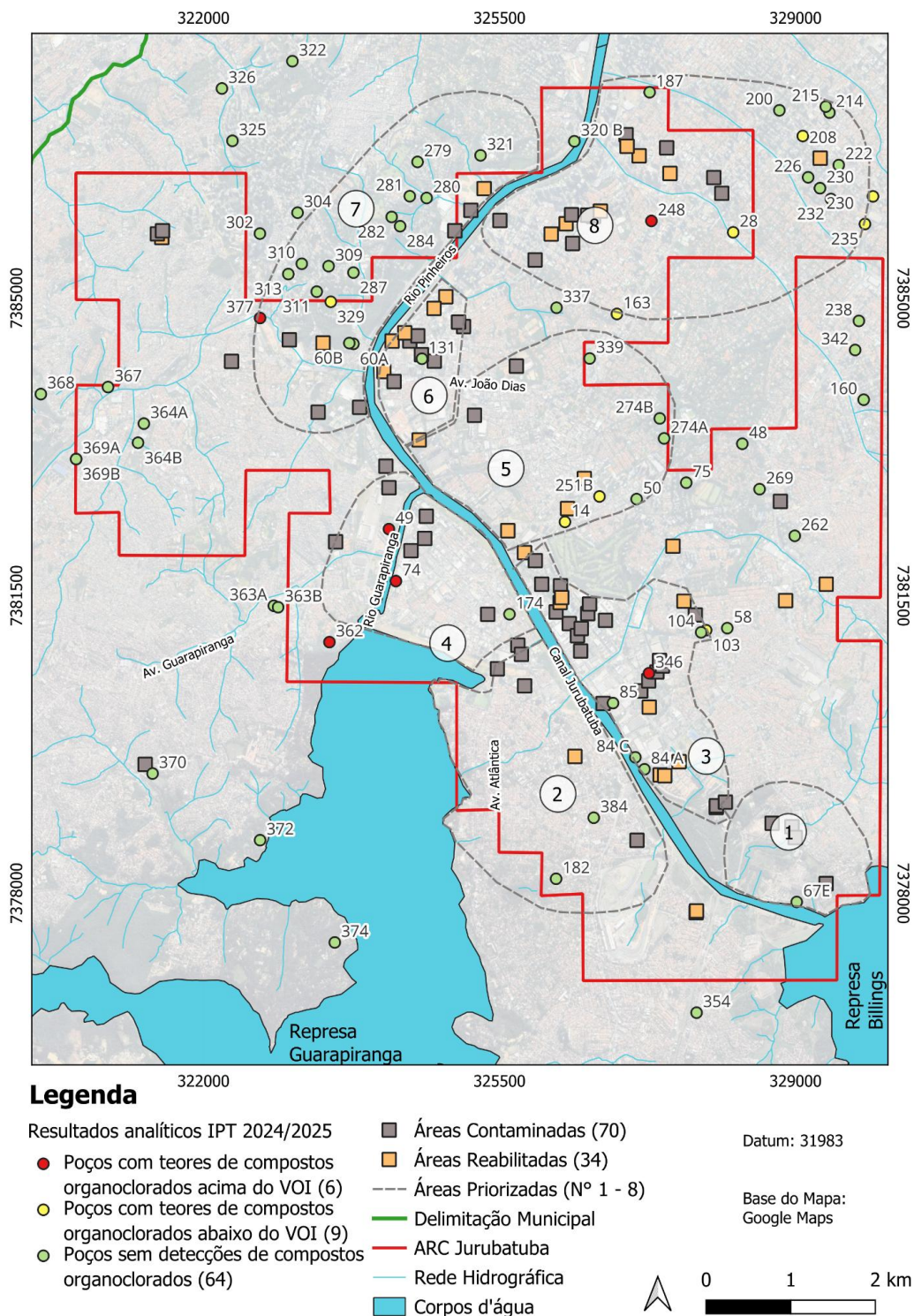
Em relação ao Poço 346, verificou-se que as concentrações são significativamente superiores às observadas nos demais poços. Trata-se de um poço multinível do tipo *Westbay*, cuja amostra representativa não sofreu diluição, refletindo a profundidade amostrada. Esse aspecto indica que outros poços, inclusive aqueles com detecção de compostos eteno clorados em baixas concentrações ou com resultados de "não detectado", podem apresentar valores mais elevados caso sejam realizadas coletas discretas. Ressalta-se ainda que, o Poço 346 está inserido em uma Área Contaminada com Risco Confirmado (ACRi), localizada na Área Priorizada 3 deste projeto, como pode ser observado na **Figura 14**.

A **Figura 14** apresenta os resultados de todos os poços analisados, agrupando-os em três categorias, quais sejam, sendo um grupo compreendido por aqueles poços que apresentaram teores de compostos organoclorados acima do VOI, o segundo grupo correspondendo aqueles que apresentaram concentrações abaixo do VOI e, por último, em uma grande maioria, as análises que não apresentaram detecções de compostos organoclorados. Ressalta-se que foi considerado o pior cenário observado do composto analisado.

A **Figura 15** apresenta o detalhamento dos valores observados para os compostos organoclorados nessa malha de poços. Para facilitar a compreensão dos resultados apresentados no mapa, estão destacados no mesmo, os teores encontrados para os compostos organoclorados, tanto para as concentrações acima dos Valores Orientadores de Intervenção (VOI) (em vermelho), como para teores abaixo dos VOI (em amarelo).

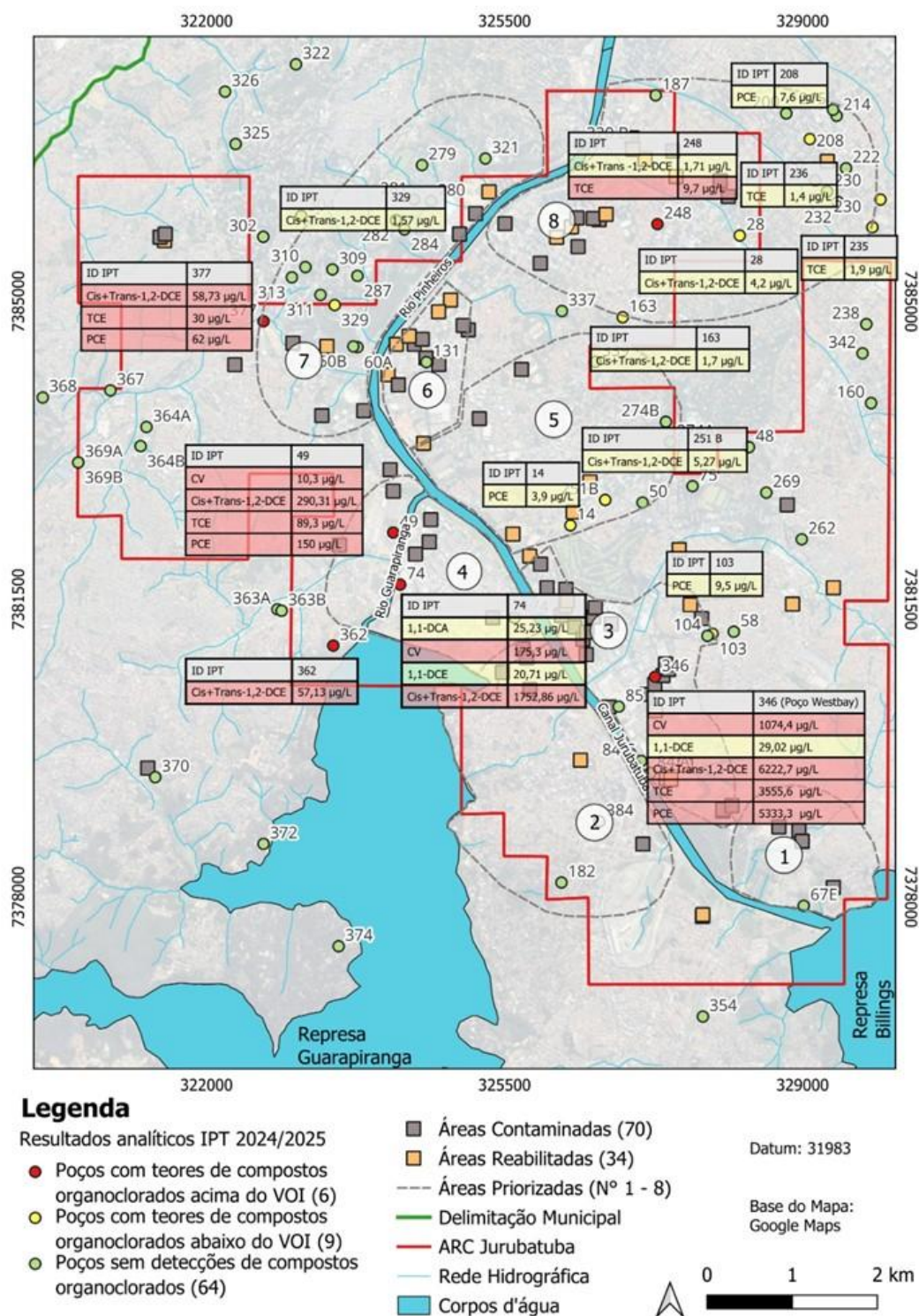
A predominância da categoria "não detectado" sugere que, para a maioria dos compostos e poços analisados, não foram identificadas concentrações detectáveis. No entanto, a presença localizada de ocorrências de organoclorados acima do VOI, principalmente para compostos eteno clorados, pode demandar atenção para a gestão ambiental e definição de ações corretivas.

Figura 14 - Resultados analíticos acerca de organoclorados obtidos no presente estudo nos poços da rede amostragem da ARC-Jurubatuba e entorno.



Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto - FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

Figura 15 - Valores de concentração de compostos organoclorados obtidos nos poços da rede amostragem na ARC-Jurubatuba e entorno.



Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto - FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

5.2 Resultados Analíticos da Amostragem Estratificada

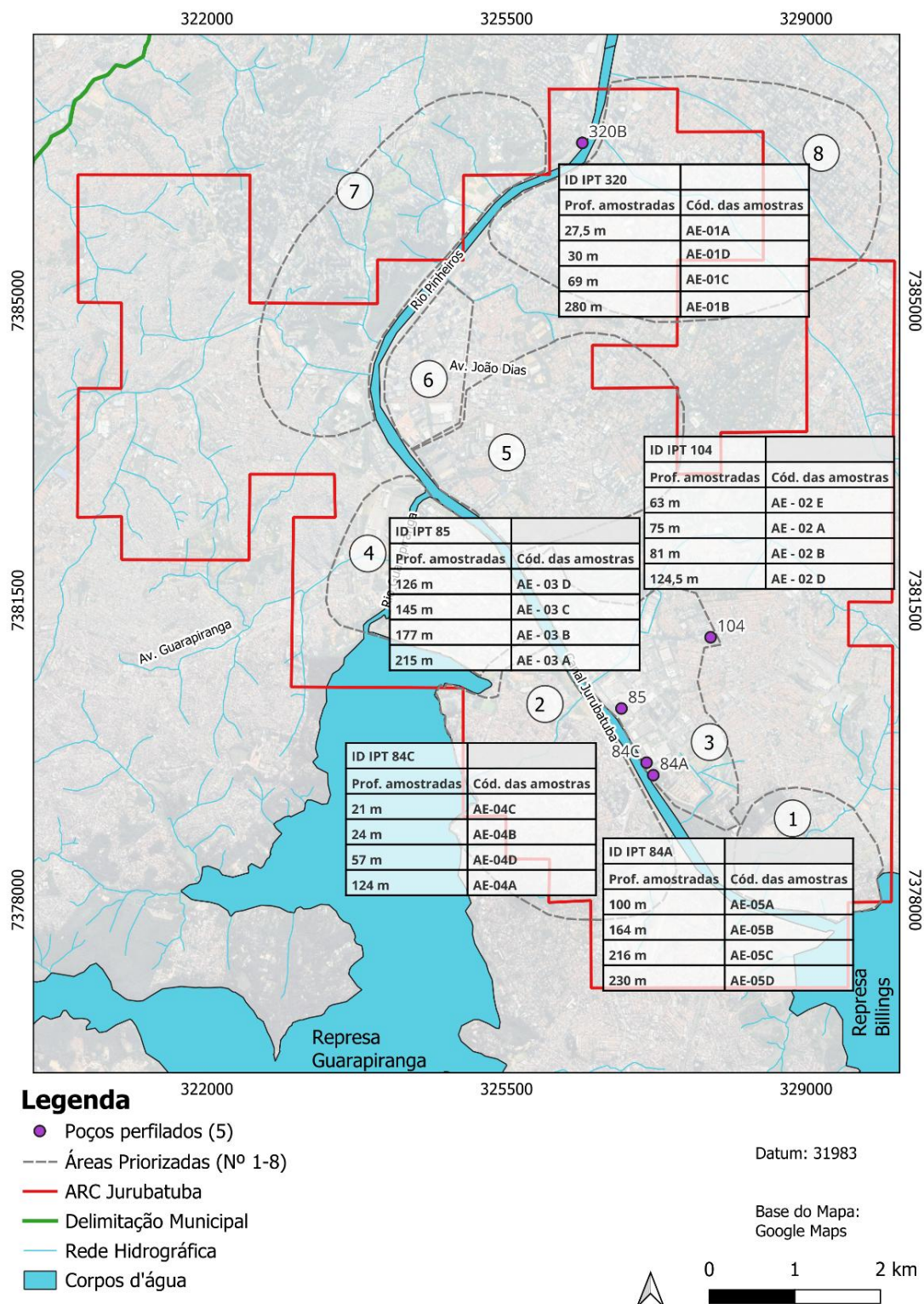
No âmbito deste estudo, com base nos resultados das perfilagens geofísicas, identificou-se a viabilidade de realizar coletas estratificadas em 21 pontos, nas quais foram então obtidas as respectivas amostras. O **Anexo 01** apresenta o registro fotográfico das atividades de campo.

A **Figura 16** apresenta a localização dos poços perfilados, bem como as respectivas profundidades de coleta das amostras estratificadas. Vale destacar que as discussões sobre a execução das perfilagens geofísicas, assim como seus resultados, estão detalhadas no item específico adiante.

A coleta de amostras estratificadas tem como objetivo assegurar a representatividade em relação às diferentes camadas ou compartimentos do meio investigado, permitindo a identificação de variações físico-químicas e/ou de contaminação ao longo do perfil avaliado. Essa abordagem possibilita a detecção de gradientes verticais ou horizontais, a comparação entre estratos e a definição mais precisa das condições ambientais locais, reduzindo vieses decorrentes de amostragens pontuais. Dessa forma, fornece subsídios técnicos para melhor caracterização do meio investigado. Para o caso da ARC-Jurubatuba, que compreende contexto de aquíferos fraturados, essa coleta estratificada tem como objetivo avaliar as fraturas identificadas durante as perfilagens geofísicas realizadas, para caracterizar a qualidade das águas nas entradas específicas nos poços de captação.

Para as amostras estratificadas foram analisados os parâmetros físico-químicos pH, ORP, OD, CE e T, bem como cátions e ânions (incluindo sulfeto), carbono orgânico dissolvido (COD), varredura de VOC, metano, etano, eteno, alcalinidade total, metais poluentes prioritários (MPP), isótopos de hidrogênio e oxigênio em água, isótopos de carbono e cloro em compostos organoclorados, isótopos de enxofre e oxigênio em sulfato (SO₄).

Figura 16 - Profundidade das Amostras Coletadas nos poços selecionados para Amostragem estratificada



Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto - FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

As amostras destinadas às análises de cátions e ânions (incluindo sulfeto), COD, VOC, metano, etano, eteno, alcalinidade total e MPP foram acondicionadas em frascos específicos e conservadas em refrigeração inferior à 5°C, registradas em cadeia de custódia e encaminhadas ao laboratório Centro de Biologia Experimental Oceanus, o qual possui acreditação segundo a NBR/ISO/IEC (Norma Brasileira/*International Organization for Standardization/International Electrotechnical Commission*) nos termos exigidos pela ABNT NBR ISO/IEC 17025:2005 (ABNT, 2005), para as SQI (Substâncias Químicas de Interesse) selecionadas, conforme certificado de acreditação CRL n° 0306. As respectivas cadeias de custódia e os laudos analíticos encontram-se apresentados no **Anexo 04**.

As amostras destinadas às análises isotópicas foram devidamente acondicionadas em frascos específicos, mantidas sob refrigeração adequada, registradas em cadeia de custódia e encaminhadas ao Laboratório de Estudo de Bacias (LEBAC) da Universidade Estadual Paulista (UNESP). Posteriormente, o LEBAC enviou as amostras aos laboratórios especializados Isotope Tracer Technologies, localizado no Canadá, para a análise de isótopos de carbono e cloro em compostos organoclorados, e Isotech Water, localizado nos Estados Unidos, para a análise de isótopos de enxofre e oxigênio em SO₄.

Ressalta-se que o envio das amostras para laboratórios em outros países foi necessário devido à inexistência de laboratórios no Brasil capacitados para realizar tais análises. As cadeias de custódia e os respectivos laudos analíticos encontram-se apresentados no **Anexo 04**.

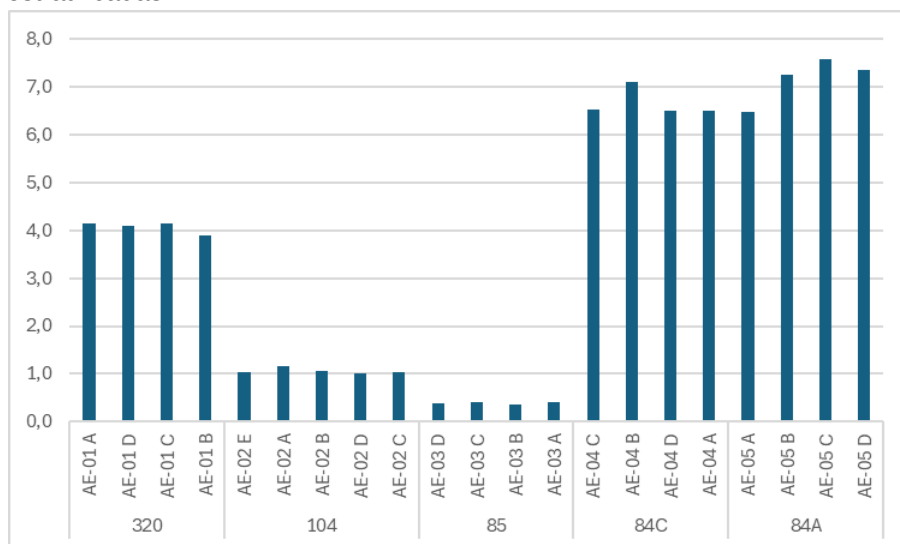
5.2.1 Parâmetros físico-químicos

Os gráficos nas **Figuras 17 a 21** apresentam os resultados físico-químicos das amostras coletadas de forma discreta, em pontos estratificados no interior dos poços.

O gráfico de OD (**Figura 17**) evidencia significativa variação entre os pontos amostrados. O Poço 320 apresenta valores próximos de 4 mg/L. Nos Poços 104 e 85 os valores obtidos para o OD são bastante reduzidos, em torno de 1 mg/L. Os Poços 84C e 84A apresentaram teores elevados de OD, variando entre 6 mg/L e 7,5 mg/L.

Salienta-se que os poços 84A, 84C e 85 encontram-se inseridos no mesmo contexto geológico; entretanto, apresentam características hidroquímicas notavelmente distintas.

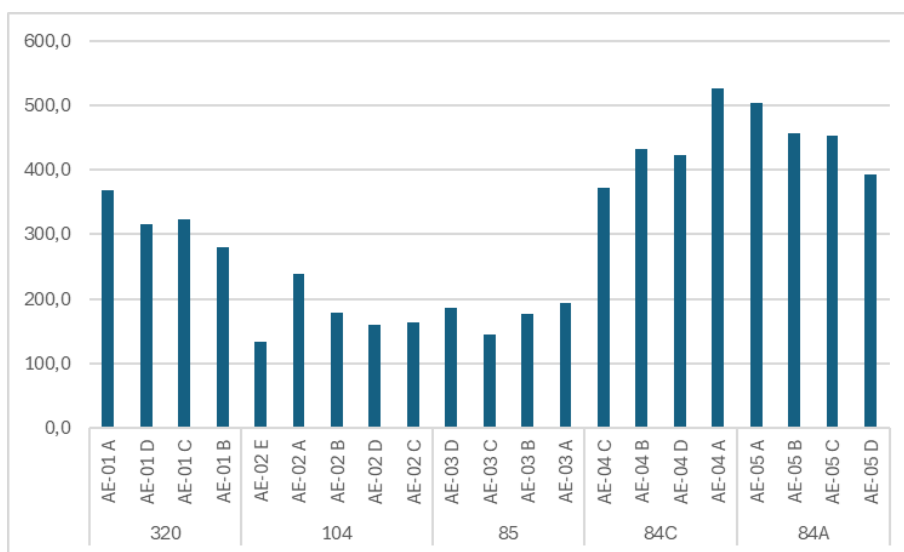
Figura 17 - Gráfico com os dados de OD (mg/L) para as amostras estratificadas.



Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto - FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

No gráfico de CE (**Figura 18**) não foram observadas variações significativas no mesmo poço em amostras de diferentes profundidades. Observa-se uma variação, com valores mais baixos no Poço 85 e valores mais altos nos Poços 84A e 84 C.

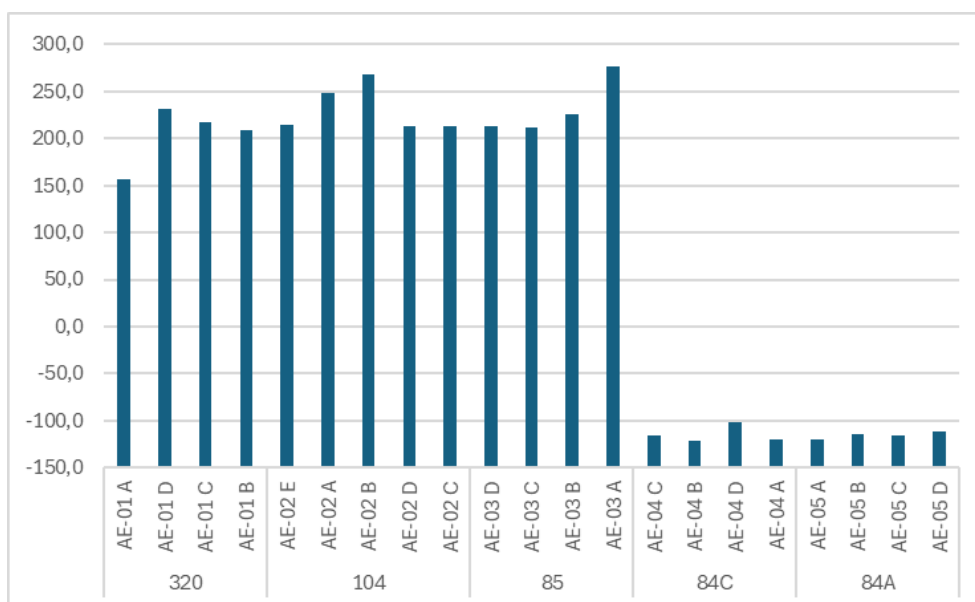
Figura 18 - Gráfico com os dados de CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$) para as amostras estratificadas.



Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto - FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

O gráfico de ORP (**Figura 19**) mostra diferenças marcantes entre os pontos de amostragem. Os Poços 320, 104 e 85 apresentam valores positivos elevados, variando de aproximadamente 150 mV a 270 mV, indicando condições predominantemente oxidantes. Em contrapartida, os pontos 84C e 84A apresentam valores negativos, entre -80 mV e -120 mV, caracterizando condições redutoras. De forma semelhante ao observado para o OD, embora os poços 84A, 84C e 85 estejam inseridos no mesmo contexto geológico, eles apresentam características hidroquímicas notavelmente distintas. Esses resultados reforçam a heterogeneidade hidrogeoquímica da área de estudo, com a coexistência de zonas oxidantes e redutoras, o que influencia diretamente a mobilidade e o comportamento químico dos contaminantes no aquífero.

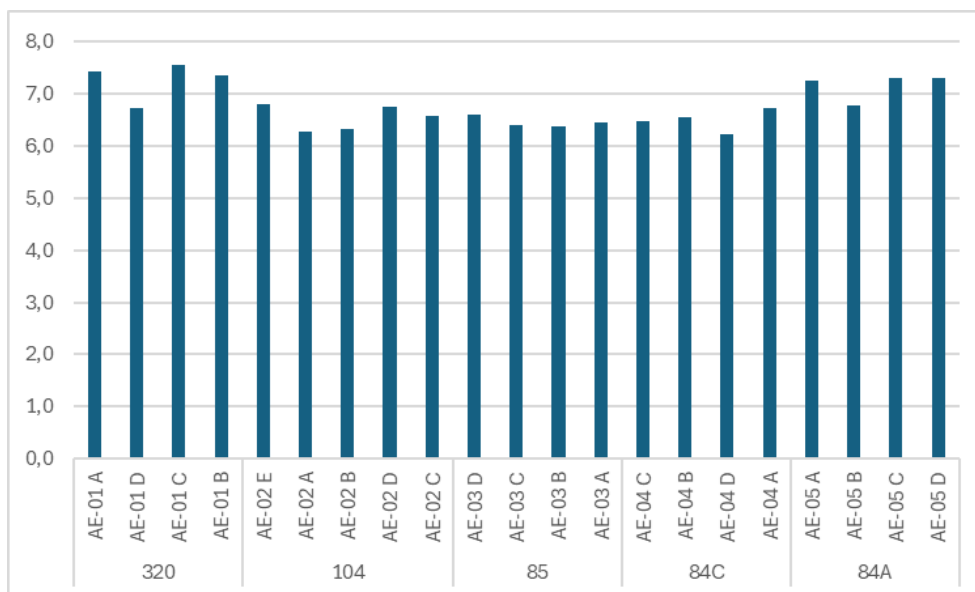
Figura 19 - Gráfico com os dados de ORP (mV) para as amostras estratificadas.



Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto - FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

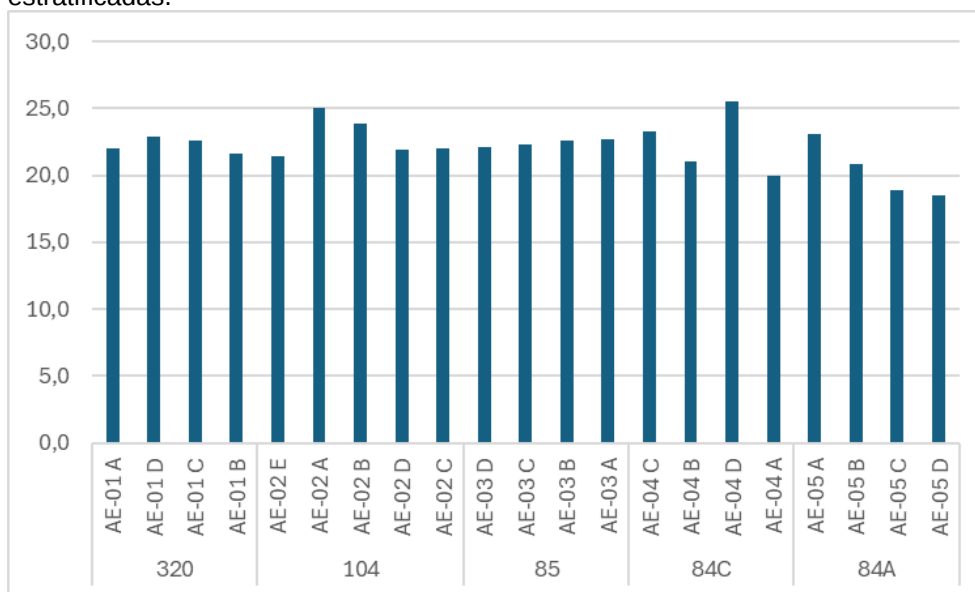
Os gráficos de pH e temperatura (**Figura 20** e **Figura 21**) indicam relativa estabilidade entre as amostras estratificadas, com variações que refletem características hidrogeoquímicas locais. Em relação ao pH, os valores variaram predominantemente entre 6,0 e 7,5, situando-se em faixa ligeiramente ácida a neutra, condizente aos valores esperados para as águas subterrâneas. Já os dados de temperatura apresentaram variações de aproximadamente 18°C a 25°C, ou seja, as leituras apontam valores dentro da normalidade.

Figura 20 - Gráfico com os dados de PH para as amostras estratificadas.



Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto - FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

Figura 21 - Gráfico com os dados de temperatura (°C) para as amostras estratificadas.



Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto - FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

5.2.2 Cátions e ânions, Metano, Cálcio e COD

Para identificar e caracterizar o ambiente geoquímico, foi realizada uma avaliação integrada dos resultados de ferro, manganês, sulfato, metano e carbono orgânico dissolvido (COD). O **Quadro 8** apresenta os resultados obtidos para cátions, ânions, metano e COD.

Quadro 8 - Resultados das amostras estratificadas para Ferro, Manganês, Sulfato, Cálcio e COD em (µg/L).

Número ID IPT	Profundidade de coleta	Amostra	Ferro	Manganês	Sulfato	Metano	Cálcio	COD
320	27,5	AE-01 A	< LQ	48	13957	3,83	12772	1900
	30	AE-01 D	< LQ	19	11178	< LQ	13542	3100
	69	AE-01 C	181	33	3808	2,95	13010	2400
	280	AE-01 B	407	269	3882	6,76	32441	1900
104	63	AE-02 E	< LQ	7	3842	< LQ	12324	1800
	75	AE-02 A	194	33	1324	< LQ	13264	3100
	81	AE-02 B	2322	23	5383	< LQ	13703	1900
	124,5	AE-02 D	< LQ	23	8761	< LQ	12414	2700
	160	AE-02 C	271	40	3982	< LQ	14154	3000
85	126	AE-03 D	37	184	38049	< LQ	13620	2200
	145	AE-03 C	206	230	36525	< LQ	14875	2300
	177	AE-03 B	1033	429	50345	< LQ	19158	2900
	215	AE-03 A	309	548	47020	< LQ	15021	2400
84C	21	AE-04 C	7417	2270	26874	15,70	24404	2800
	24	AE-04 B	10559	2660	23509	13,80	27691	3300
	57	AE-04 D	10000	2048	28712	19,70	24701	2600
	124	AE-04 A	16607	7010	58640	450,00	25777	9600
84A	100	AE-05 A	242	1496	31171	21,30	36654	2900
	164	AE-05 B	441	1062	36437	34,80	31411	2800
	216	AE-05 C	978	1076	26293	83,40	27932	2200
	230	AE-05 D	2467	1080	32645	58,70	32671	3300

Observações: ID: identificação; AE: amostra estratificada; LQ: Limite de Quantificação; COD: carbono orgânico dissolvido; µg/L: micrograma por litro.

Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto - FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

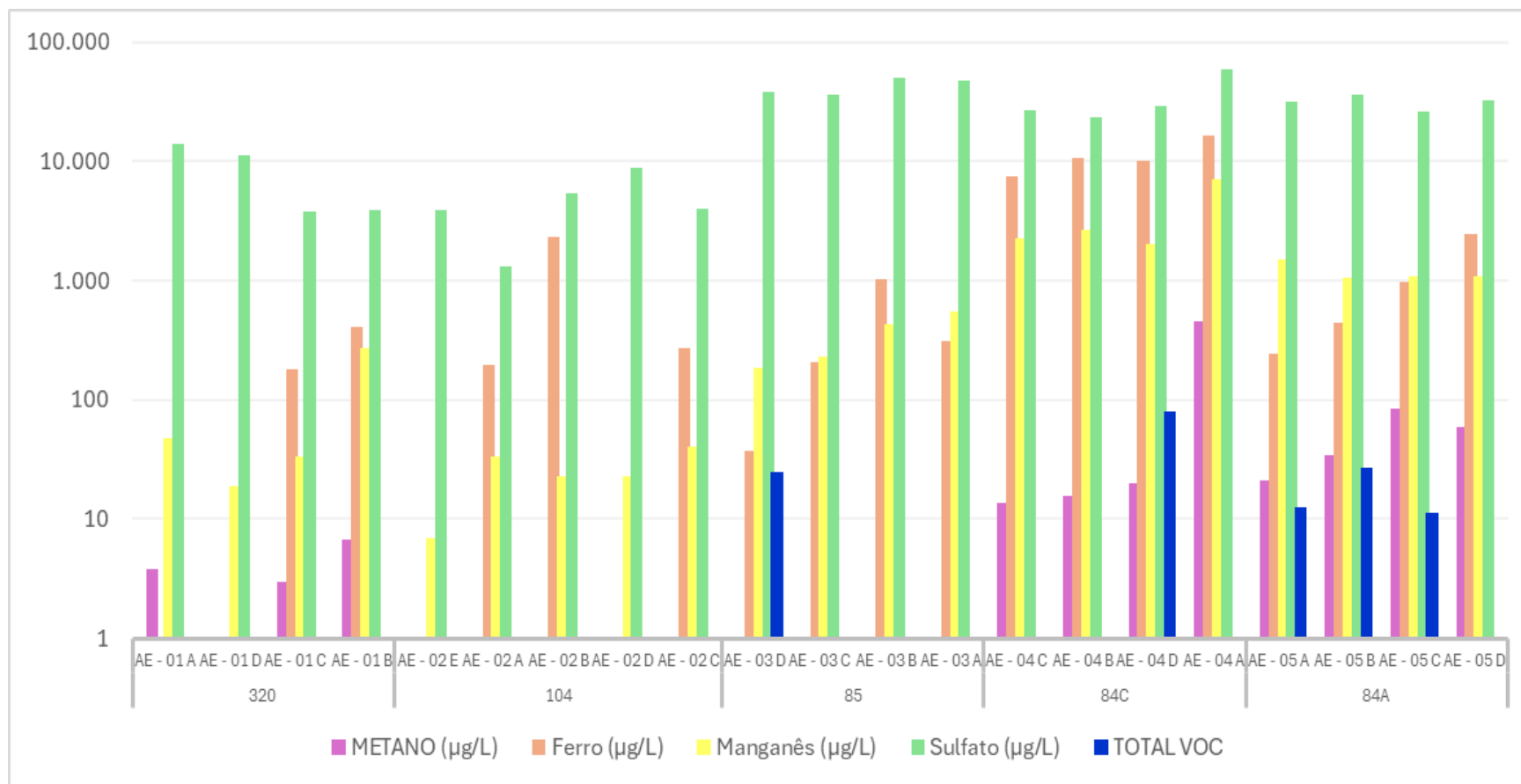
Os íons ferro e manganês estão diretamente associados às condições redox do meio subterrâneo, as quais controlam a dehalogenação redutiva, dos etenos clorados (PCE, TCE, DCE e CV).

Concentrações elevadas de ferro (Fe^{2+}) e manganês (Mn^{2+}) dissolvidos indicam um ambiente redutor, típico de condições favoráveis à descloração redutiva dos compostos clorados. Nesses ambientes, o ferro e o manganês em suas formas oxidadas (Fe^{3+} e Mn^{4+}) são reduzidos a suas formas solúveis (Fe^{2+} e Mn^{2+}), coincidindo com as etapas de redução sequencial dos etenos clorados.

Além desses parâmetros, foram analisados também os resultados de COD, que refletem a disponibilidade de matéria orgânica no aquífero, essencial como fonte de elétrons para os microrganismos responsáveis pela dehalogenação redutiva. Também foi considerado o metano, cuja presença está fortemente correlacionada à degradação redutiva dos compostos clorados.

O gráfico apresentado na **Figura 22** apresenta as correlações de ferro, manganês, sulfato e somatória de VOC. Observa-se variações significativas nas concentrações de ferro e manganês, com valores mais elevados nos poços 84A, 84C e 85, indicando condições redutoras no aquífero, propícias à descloração redutiva dos etenos clorados. Em contrapartida, as concentrações de sulfato permanecem elevadas em grande parte das amostras, sugerindo que processos de redução de sulfato ainda não são predominantes, coerentes com um estágio intermediário de redução.

Figura 22 - Correlação de Fe versus Mn versus SO_4^{2-} para as amostras estratificadas.



Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto - FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

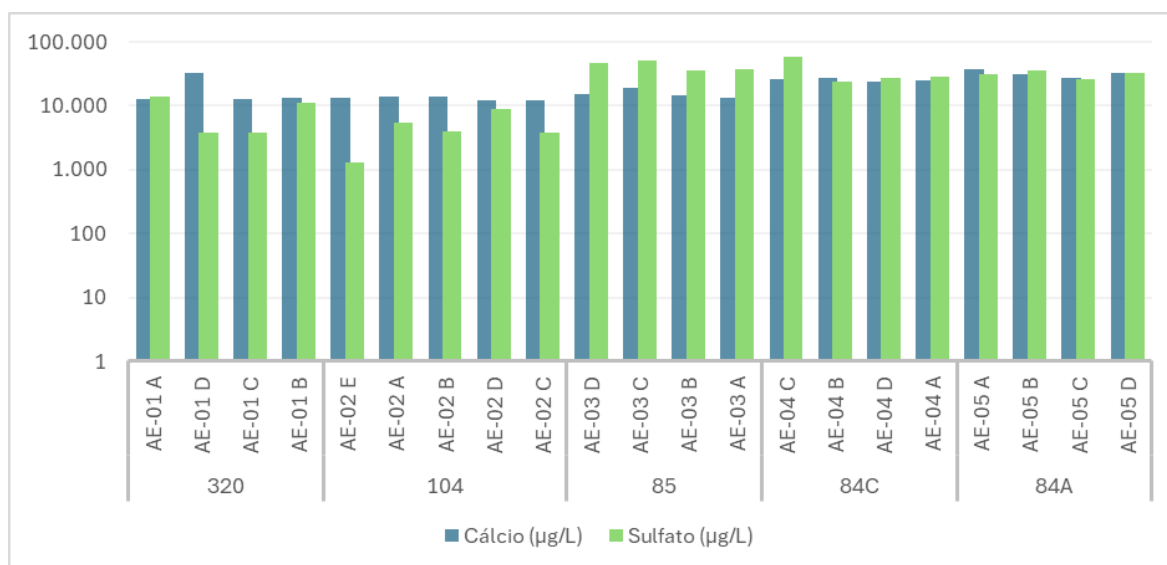
A correlação entre os maiores teores de ferro e manganês e o aumento do total de VOC em alguns poços sugere que os compostos clorados estão sendo biodegradados sob condições anóxicas, nas quais esses metais ocorrem em suas formas reduzidas (Fe^{2+} e Mn^{2+}).

De forma geral, o conjunto de dados indica heterogeneidade nas condições redox do aquífero, com zonas localmente redutoras favoráveis à atenuação natural dos eteno clorados, destacando-se as regiões correspondentes aos poços 84A (AE-05) e 84C (AE-04).

Em relação ao COD, todas as amostras apresentaram valores da mesma ordem de grandeza, não sendo possível estabelecer correlações diretas com os compostos eteno clorados. Já quanto ao metano, foram observadas ocorrências nos poços 320, 84A e 84C e 85, o que indica a presença de condições redutoras avançadas capazes de favorecer o processo de degradação dos etenos clorados nesses locais.

O gráfico na **Figura 23** apresenta a correlação de cálcio e sulfato, indicando que as concentrações desses parâmetros permanecem elevadas e relativamente estáveis entre os pontos amostrados.

Figura 23 - Correlação de $\text{Ca} \times \text{SO}_4^{2-}$ para as amostras estratificadas.



Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto - FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

5.2.3 Resultados analíticos em amostragem em poços para varredura de VOC, etanos e eteno clorados

Foram realizadas análises de varredura de VOC com foco nas substâncias químicas de interesse da área de estudo, quais sejam, etanos e etenos clorados. Em relação aos compostos etanos clorados não foram detectadas concentrações, já para os etenos clorados (PCE, TCE, DCE e CV) foram detectados nos poços 84A, 84C e 85 em amostras de diferentes profundidades, conforme apresentada no **Quadro 09**

Conforme citado anteriormente, a principal via de biodegradação dos solventes organoclorados é a dehalogenação redutiva. Nesse processo, microrganismos utilizam o composto clorado como aceptor de elétrons, substituindo átomos de cloro por hidrogênio, formando sucessivamente produtos menos clorados até alcançar o eteno, que é o produto final.

Quadro 9 - Resultados (µg/L) das amostras estratificadas para VOC, etano e eteno.

Número ID IPT	Profundidade de coleta	Amostra	PCE	TCE	DCE	CV	ETANO	ETENO
320	27,5	AE - 01 A	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
	30	AE - 01 D	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
	69	AE - 01 C	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
	280	AE - 01 B	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
104	63	AE - 02 E	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
	75	AE - 02 A	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
	81	AE - 02 B	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
	124,5	AE - 02 D	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
	160	AE - 02 C	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
85	126	AE - 03 D	< LQ	0,6	15,49	8,6	< LQ	< LQ
	145	AE - 03 C	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
	177	AE - 03 B	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
	215	AE - 03 A	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
84C	21	AE - 04 C	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
	24	AE - 04 B	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
	57	AE - 04 D	< LQ	0,6	77,9	1,5	< LQ	< LQ
	124	AE - 04 A	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
84ª	100	AE - 05 A	< LQ	0,9	8,27	3,5	< LQ	< LQ
	164	AE - 05 B	< LQ	< LQ	17,87	9,3	< LQ	< LQ
	216	AE - 05 C	< LQ	0,6	0	10,8	< LQ	< LQ
	230	AE - 05 D	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
VOI	-	-	40	4	30	0,5	-	-

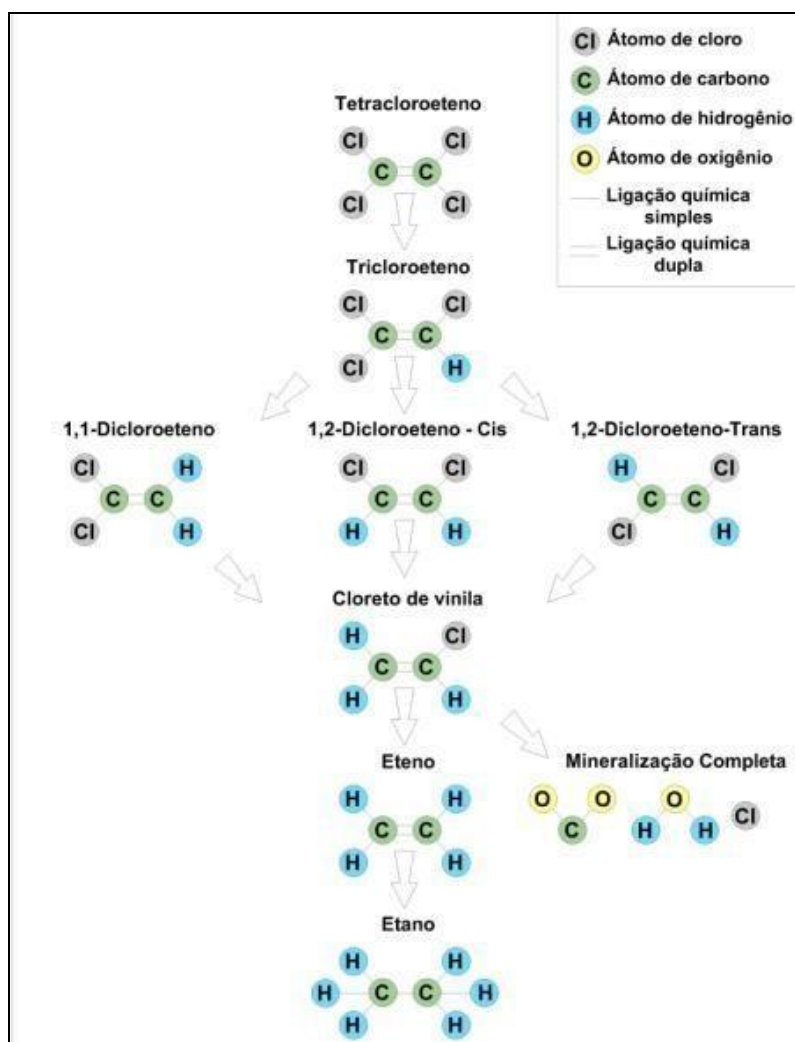
Observações: ID: identificação; AE: amostra estratificada; PCE: tetracloreto; TCE: tricloroeteno; DCE: dicloroeteno; CV: cloreto de vinila; <LQ: concentração inferior ao limite de quantificação; VOI: Valor Orientador de Intervenção estabelecido pela Portaria GM/MS Nº 888 (Ministério da Saúde, 2021); valores **em vermelho**: concentração detectada superior ao VOI; valores em preto: concentração detectada inferior ao VOI; µg/L: micrograma por litro; (-): não aplicável.

Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto - FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

Durante esse processo, a presença e as proporções de etano e de eteno são indicadores importantes, pois o eteno é o produto final desejado da biodegradação completa dos etenos clorados e o etano pode ser formado pela redução do eteno, ou também pela degradação abiótica de etenos clorados, indicando estágios finais do processo, conforme apresentado na **Figura 24**.

Não foram detectadas concentrações de eteno e etano, associada à presença de compostos etenos clorados, indicando assim, que a dehalogenação redutiva está incompleta.

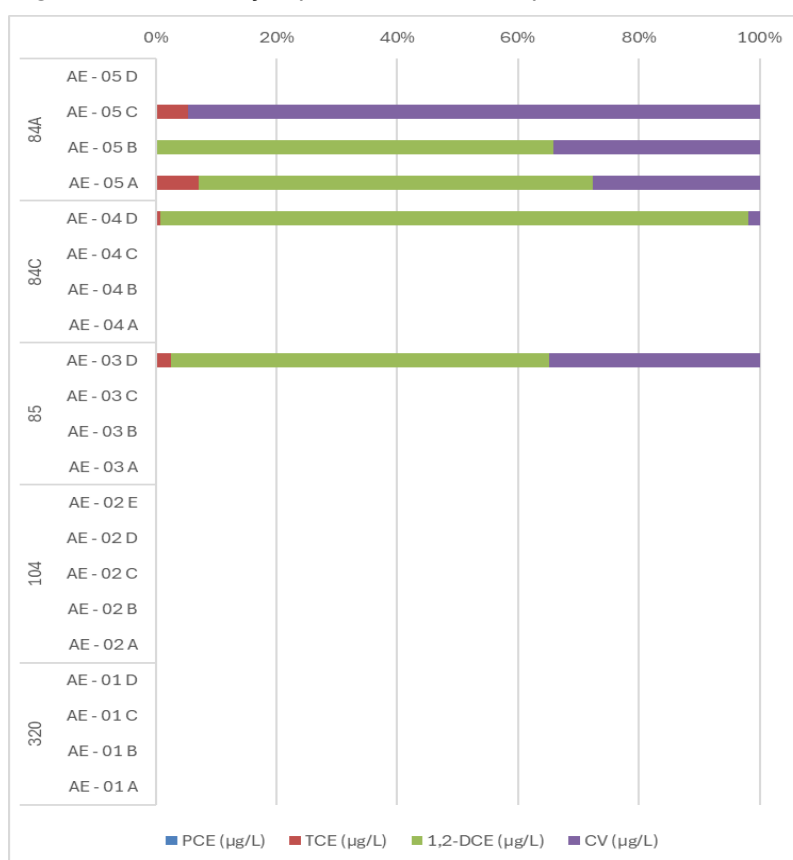
Figura 24 - Cadeia de degradação de etenos clorados.



Fonte: USEPA, 1998.

O gráfico na **Figura 25** apresenta a distribuição percentual dos compostos etenos clorados detectados nas amostras estratificadas, representando as proporções de PCE, TCE, 1,2-DCE e CV. Observa-se que a maior parte das amostras é representada por 1,2-DCE, especialmente nas amostras dos Poços 84A (AE-05B), 84C (AE-04D) e 85 (AE-03D), indicando que o processo de dehalogenação redutiva, dos solventes clorados está em andamento, com geração predominante de subproduto intermediário (DCE).

Figura 25 - Distribuição percentual dos compostos etenos clorados



Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto - FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

As amostras do Poço 84A (AE-05A, AE-05B e AE-05C) e Poço 85 (AE-3D) apresentam proporções significativas de cloreto de vinila, que é o último composto antes da formação de etano/eteno, sugerindo estágios mais avançados de biodegradação nessas áreas.

Os baixos valores na concentração de PCE e TCE em praticamente todas as amostras corrobora que os compostos mais clorados já estão sendo transformados em produtos menos clorados, indicando que as contaminações têm sua fonte originada pelas atividades pretéritas, não sendo atuais.

Cabe ressaltar que os Poços 84A, 84B e 85 que apresentaram concentração de compostos clorados nas amostras estratificadas não apresentaram concentrações nas amostras diluídas coletadas durante a perfilagem geofísica, indicando que ocorre uma diluição das amostras, fato que será discutido item adiante descrito.

5.2.4 Metais poluentes prioritários

O presente estudo não tem como objetivo avaliar a contaminação por metais, mas sim verificar se os metais poluentes prioritários (MPP) podem afetar diretamente a atividade microbiana responsável pela descloração reductiva dos etenos clorados.

Para esta avaliação, foram considerados os MPP utilizados pela CETESB e estabelecidos na Portaria CONAMA nº 357/2005 (CONAMA, 2005) e na Portaria nº 888 (GM/MS, 2021), que incluem como metais pesados prioritários para o monitoramento e o gerenciamento de áreas contaminadas os elementos cádmio, chumbo, cobre e mercúrio, em razão de sua elevada toxicidade e do potencial de contaminação ambiental. Além desses, foram avaliados outros metais, como níquel, cromo e zinco, devido à sua relevância nos processos de gerenciamento de áreas contaminadas.

Em concentrações elevadas, metais como Cádmio (Cd), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Níquel (Ni) e Zinco (Zn) são tóxicos aos microrganismos, inibindo a degradação biológica de PCE e TCE. A presença significativa desses metais pode, portanto, reduzir a eficiência da atenuação natural, resultando no acúmulo de intermediários como DCE e Cloreto de Vinila.

O **Quadro 10** apresenta os resultados obtidos para as análises de MPP. No Poço 320 foram verificadas concentrações de zinco em todas as profundidades coletadas, na amostra AE-01B (coletada a 280 m), correspondente à porção mais profunda desse poço, foi observada concentração acima do VOI, possivelmente associado à hidroquímica local. Nesse ponto, não foram detectadas concentrações de etenos clorados.

Já o Poço 84C (AE-04A) apresentou concentração de chumbo ligeiramente superior ao VOI e na mesma ordem de grandeza das demais profundidades amostradas, também sugerindo que se trata de uma característica associada à hidroquímica local.

De modo geral, os MPP foram detectados em baixas concentrações, não representando limitação significativa à atividade microbiana, o que indica que processos de biodegradação ativa dos etenos clorados podem estar ocorrendo na área de estudo.

Quadro 10 - Resultados observados para Metais Poluentes Prioritários (MPP) em µg/L das amostras estratificadas.

Id IPT	320				104					85				84C				84 ^a				VOI
MPP	AE - 01 A	AE - 01 D	AE - 01 C	AE - 01 B	AE - 02 E	AE - 02 A	AE - 02 B	AE - 02 D	AE - 02 C	AE - 03 D	AE - 03 C	AE - 03 B	AE - 03 A	AE - 04 C	AE - 04 B	AE - 04 D	AE - 04 A	AE - 05 A	AE - 05 B	AE - 05 C	AE - 05 D	
Prof. (m)	27,5	30,0	69,0	280,0	63,0	75,0	81,0	124,5	160,0	126,0	145,0	177,0	215,0	21,0	24,0	57,0	124,0	100,0	164,0	216,0	230,0	
Cádmio Dissolvido	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	3
Chumbo Dissolvido	< LQ	< LQ	0,4	4,7	0,6	0,3	0,5	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	0,3	< LQ	0,6	6,2	1,1	10,3	0,6	4,4	< LQ	0,4	10
Cobre Dissolvido	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	11	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	<5	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	8	<5	2000
Cromo Dissolvido	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	<0,5	3,7	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	2,4	< LQ	< LQ	7	1,2	15,4	0,6	0,6	<0,5	4,1	50
Mercúrio Dissolvido	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	1
Níquel Dissolvido	< LQ	< LQ	3	5	< LQ	1	4	< LQ	3	< LQ	< LQ	6	1	11	15	14	19	5	2	34	5	70
Zinco Dissolvido	890	541	1408	3139	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	254	87	124	216	91	148	270	73	503	135	148	61	92	1800

Observações: Id: identificação; AE: amostra estratificada; Prof.: profundidade de amostragem; < LQ: concentração inferior ao limite de quantificação; VOI: Valor Orientador de Intervenção estabelecido pela Portaria GM/MS Nº 888 (Ministério da Saúde, 2021); CAS: compreende o registro emitido pela entidade norte americana Chemical Abstracts Service Registry; Em vermelho: valor de concentração detectada superior ao VOI; Em preto: valor de concentração detectada inferior ao VOI; µg/L: concentração em micrograma por Litro.

Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto - FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

5.2.5 Análises Isotópicas

Neste estudo, foram analisados isótopos de hidrogênio e oxigênio em amostras de água, bem como isótopos de enxofre e oxigênio em sulfato e, também, isótopos de carbono e cloro em compostos organoclorados.

Os isótopos de hidrogênio, carbono, nitrogênio, oxigênio e enxofre são considerados os principais isótopos ambientais, em razão de sua abundância e por constituírem elementos-chave nos ciclos hidrológico, geológico e biológico (Clark & Fritz, 1997).

Segundo Viviani-Lima (2007) e Maldaner (2010), a composição isotópica da água ao longo do ciclo hidrológico é modificada por processos meteóricos, o que permite correlacioná-la a uma determinada fonte de recarga. Dessa forma, a assinatura isotópica da água pode ser utilizada como um traçador natural, permitindo identificar a origem das águas subterrâneas em um aquífero e estimar o tempo de permanência e trânsito das águas subterrâneas desde a recarga.

A caracterização isotópica das amostras teve como objetivo determinar as assinaturas isotópicas das águas subterrâneas da área de estudo, subsidiar o detalhamento e aprimoramento na construção do modelo conceitual hidrogeológico e contribuir com a identificação de correlações com as ocorrências de contaminação de organoclorados.

5.2.6 Análises isotópicas de Oxigênio (O) e Hidrogênio (H)

Entre os traçadores isotópicos empregados em estudos hidrogeológicos, os mais comumente utilizados são os de oxigênio e deutério, especialmente em estudos de recarga (Abbott *et al.*, 2000) e de mistura de águas (Bullen & Kendall, 1998; Banner, 2004; Petelet-Giraud *et al.*, 2007).

Devido à existência de três isótopos estáveis de oxigênio e dois de hidrogênio, as moléculas de água apresentam nove possíveis combinações isotópicas, cujas massas correspondem aproximadamente à soma dos números de massa dos átomos (Faure, 1986). O vapor d'água tende a ser enriquecido em ^{16}O e ^1H (isótopos mais

leves), enquanto o líquido remanescente se enriquece em ^{18}O e D (mais pesados). Isso ocorre porque os isótopos leves possuem menor energia de ativação, atingindo mais rapidamente a energia necessária para a mudança de estado e concentrando-se no vapor.

As razões isotópicas de hidrogênio (δD) e oxigênio ($\delta^{18}\text{O}$) são calculadas conforme as equações:

$$\delta^{18}\text{O} = \left(\frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{amostra}}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{padrão}}} - 1 \right) \times 1000$$

$$\delta\text{D} = \left(\frac{(\text{D}/\text{H})_{\text{amostra}}}{(\text{D}/\text{H})_{\text{padrão}}} - 1 \right) \times 1000$$

Em que VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water) é o padrão de referência adotado pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), definido a partir de uma mistura de águas destiladas de origem marinha. A água do mar foi escolhida por constituir a base do ciclo hidrológico global.

A utilização de padrões internacionais é necessária devido à magnitude muito pequena das diferenças nas razões isotópicas, da ordem de 10^{-4} . Valores positivos de $\delta^{18}\text{O}$ e δD indicam enriquecimento da amostra em ^{18}O e D em relação ao padrão, enquanto valores negativos indicam empobrecimento.

A relação média entre as razões isotópicas de hidrogênio e oxigênio em águas naturais da Terra é descrita pela Curva Meteorica Global (Global Meteoric Water Line – GMWL), proposta por Craig (1961) qual seja:

$$\delta\text{D} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$$

Essa equação foi obtida a partir de dados isotópicos de precipitações de diversas localidades do mundo e apresenta alto coeficiente de correlação ($r^2 > 0,95$), indicando uma forte relação entre os isótopos de oxigênio e hidrogênio.

A reta meteórica também pode ser determinada localmente, com base em dados isotópicos de precipitações regionais, sendo então denominada Curva Meteórica Local (Local Meteoric Water Line – LMWL). No presente estudo, foi adotada a LMWL determinada por Silva (2008).

Em alguns casos, a LMWL pode diferir da GMWL, pois as características isotópicas das precipitações locais são influenciadas pelos seguintes aspectos:

- variações na temperatura de condensação, e
- a razão entre o vapor já condensado e a quantidade inicial de vapor de água na massa de ar (USGS, 2004).

O **Quadro 11** apresenta os resultados das análises isotópicas de O e H. Considerando que as águas subterrâneas da área de estudo correspondem à mistura de diferentes fontes de recarga naturais e antrópicas (infiltração da precipitação e perdas da rede de águas pluviais), a interpretação dos resultados integrou e correlacionou os dados de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$, com o objetivo de avaliar as possíveis origens e contribuições dessas fontes de recarga para os aquíferos locais.

Os menores valores de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ (mais empobrecidos) foram observados nas amostras do Poço 85 (AE-03), sem que fosse possível estabelecer correlação entre o empobrecimento isotópico e a profundidade das amostras. Por outro lado, os maiores valores foram verificados no Poço 320 (AE-01), com variação entre $-4,87\text{‰}$ e $-5,11\text{‰}$ para $\delta^{18}\text{O}$ e entre $-28,5\text{‰}$ e $-29,1\text{‰}$ para $\delta^2\text{H}$, apresentando uma assinatura distinta dos demais poços, cujos valores variaram entre $-6,01\text{‰}$ e $-6,68\text{‰}$ ($\delta^{18}\text{O}$) e $-36,9\text{‰}$ e $-40,6\text{‰}$ ($\delta^2\text{H}$).

Quadro 11 - Resultados de análises isotópicas de O e H para as amostras estratificadas.

ID IPT	Amostra	Prof.	$\delta^2\text{H}$ (‰)	$\sigma^2 \text{H}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\sigma^{2 \text{ } 18}\text{O}$ (‰)
320	AE - 01 A	27,5	-28,5	0,3	-5,11	0,13
	AE - 01 D	30,0	-29	0,3	-4,87	0,08
	AE - 01 C	69,0	-29	0,5	-5,05	0,07
	AE - 01 B	280,0	-29,1	0,4	-4,88	0,1
104	AE - 02 E	63,0	-38,1	0,3	-6,41	0,17
	AE - 02 A	75,0	-38,9	0,6	-6,52	0,18
	AE - 02 B	81,0	-38,2	0,5	-6,63	0,15
	AE - 02 D	124,5	-38,5	0,7	-6,39	0,12
	AE - 02 C	160,0	-38,8	0,4	-6,49	0,04
85	AE - 03 D	126,0	-39,9	0,4	-6,68	0,2
	AE - 03 C	145,0	-40,3	0,3	-6,62	0,15
	AE - 03 B	177,0	-40,6	0,2	-6,61	0,18
	AE - 03 A	215,0	-40,6	0,9	-6,58	0,26
84C	AE - 04 C	21,0	-36,9	0,4	-6,26	0,1
	AE - 04 B	24,0	-37,5	0,7	-6,34	0,08
	AE - 04 D	57,0	-37,1	0,3	-6,31	0,03
	AE - 04 A	124,0	-37,7	0,5	-6,35	0,14
84 ^a	AE - 05 A	100,0	-37,7	0,7	-6,39	0,06
	AE - 05 B	164,0	-37,8	0,4	-6,28	0,09
	AE - 05 C	216,0	-37,3	0,2	-6,05	0,08
	AE - 05 D	230,0	-38,1	0,6	-6,4	0,11

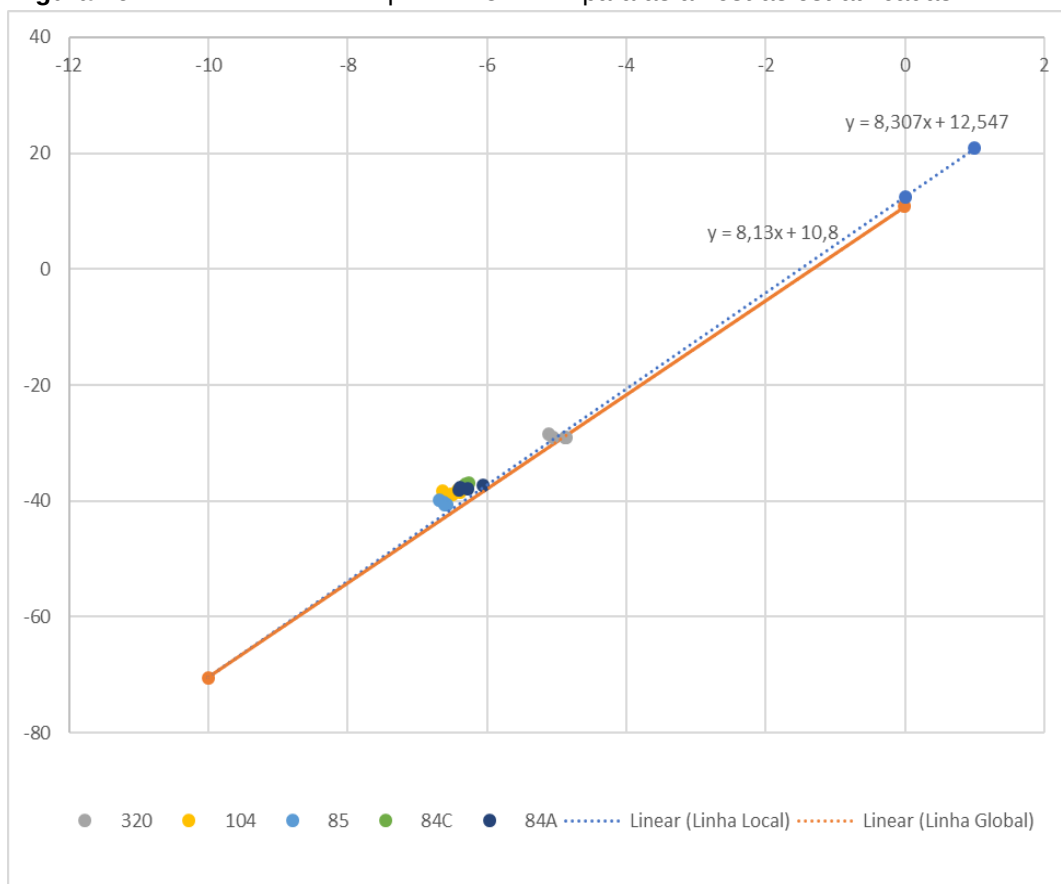
Observações: ID: identificação; Prof.: profundidade de amostragem; AE: amostra estratificada; $\delta^2\text{H}$ (‰): razão isotópica de hidrogênio 2 (deutério); $\delta^{18}\text{O}$ (‰): razão isotópica de oxigênio 18 (deutério) em relação ao padrão internacional VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water), expressa em partes por mil (‰).

Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto - FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

O gráfico na **Figura 26** ilustra os resultados obtidos para $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$. Não foram observados indícios de processos secundários, como evaporação, uma vez que os resultados se alinham às retas meteóricas, reforçando a origem meteórica das águas analisadas.

A assinatura isotópica do poço 320 apresenta uma anomalia em relação aos demais poços, caracterizada por um maior enriquecimento. Isso pode estar relacionado ao contexto geológico distinto em que o poço 320 está inserido, qual seja, em rochas granitoides, enquanto os outros poços se encontram em depósitos quaternários.

Figura 26 - Resultados obtidos para $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ para as amostras estratificadas.



Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto - FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

5.2.7 Análises isotópicas de enxofre e oxigênio em sulfato

Os isótopos de oxigênio ($\delta^{18}\text{O}$) e hidrogênio ($\delta^2\text{H}$) são amplamente utilizados como traçadores naturais em estudos ambientais e hidrogeológicos. Esses isótopos não sofrem alteração por reações químicas, mas fracionam-se fisicamente durante processos como evaporação, condensação, infiltração e mistura de massas de água. Por isso, funcionam como uma assinatura isotópica da água, permitindo identificar suas fontes e trajetórias.

A presença de sulfato nas águas pode ter múltiplas origens, o que torna sua identificação uma tarefa complexa. De modo geral, as fontes são agrupadas em naturais e antrópicas. As fontes naturais abrangem processos como a dissolução de minerais sulfatados, a oxidação de minerais sulfetados, a atividade vulcânica, o aporte de águas salinas e a decomposição de matéria orgânica. Por outro lado, as fontes antrópicas estão associadas a efluentes domésticos e industriais, ao uso de

fertilizantes e combustíveis fósseis, à aplicação de produtos químicos oxidantes, a detergentes sintéticos e à drenagem de áreas de mineração (Wang e Zhang, 2019).

Os valores de $\delta^{18}\text{O}$ e de $\delta^{34}\text{S}$ no sulfato dissolvido podem fornecer informações sobre as fontes de sulfato e os processos que afetam a sua concentração em águas subterrâneas (Aravena e Mayer, 2010). Na presença de processos de sulfato-redução, espera-se que os isótopos de enxofre e oxigênio no sulfato remanescentes nas águas subterrâneas sofram enriquecimento dos elementos mais pesados, simultaneamente à diminuição nas concentrações de sulfato dissolvido na água subterrânea. O **Quadro 12** apresenta os resultados de $\delta^{18}\text{O}$ e de $\delta^{34}\text{S}$ e, os gráficos nas **Figuras 27 a 29** por sua vez, mostram a correlação dos resultados com sulfato.

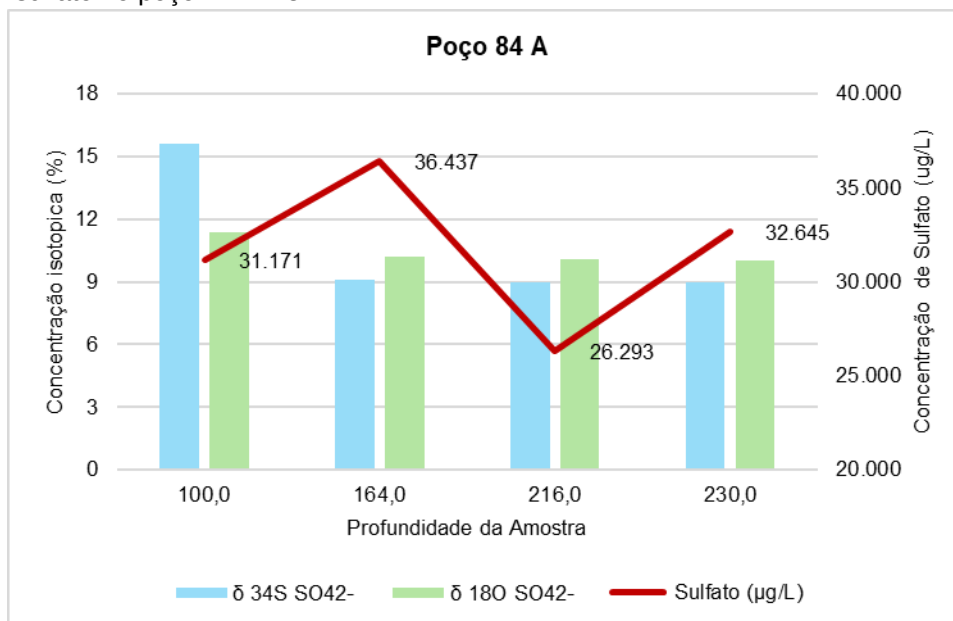
Quadro 12 - Resultados para análises isotópicas de $\delta^{18}\text{O}$ e de $\delta^{34}\text{S}$ das amostras estratificadas.

ID IPT	Amostra	Prof.	$\delta^{34}\text{S-SO}_4^{2-}$	$\delta^{18}\text{O-SO}_4^{2-}$
320	AE - 01 A	27,5	-	-
	AE - 01 D	30,0	-	-
	AE - 01 C	69,0	-	-
	AE - 01 B	280,0	-	-
104	AE - 02 E	63,0	-	-
	AE - 02 A	75,0	-	-
	AE - 02 B	81,0	-	-
	AE - 02 D	124,5	-6,8	-
	AE - 02 C	160,0	-	-
85	AE - 03 D	126,0	17,1	11,2
	AE - 03 C	145,0	17,1	11,1
	AE - 03 B	177,0	19,7	11,7
	AE - 03 A	215,0	19,0	12,2
84C	AE - 04 C	21,0	-1,0	7,2
	AE - 04 B	24,0	0,4	8,5
	AE - 04 D	57,0	-1,9	6,7
	AE - 04 A	124,0	0,5	7,1
84A	AE - 05 A	100,0	15,6	11,4
	AE - 05 B	164,0	9,1	10,2
	AE - 05 C	216,0	9,0	10,1
	AE - 05 D	230,0	9,0	10,0

Observações: ID: identificação; Prof.: profundidade de amostragem; AE: amostra estratificada; $\delta^{34}\text{S-SO}_4^{2-}$ (‰): razão isotópica de enxofre 34 no íon sulfato (SO_4^{2-}); $\delta^{18}\text{O-SO}_4^{2-}$: razão isotópica de oxigênio 18 no íon sulfato (SO_4^{2-}), expressa em partes por mil (‰); (-): Concentração insuficiente de sulfato para análise isotópica.

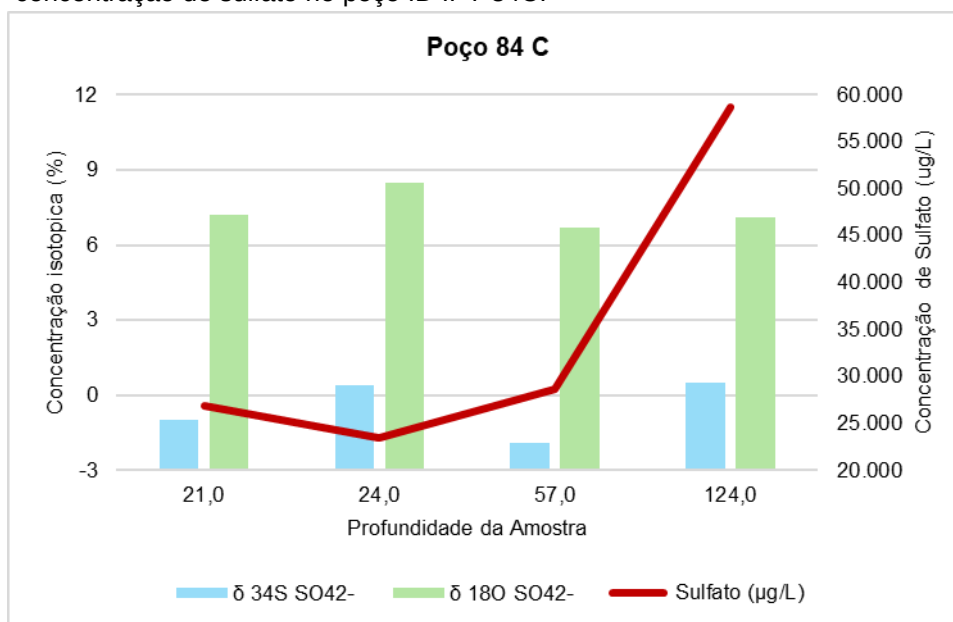
Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto - FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

Figura 27 - Correlação entre os isótopos de $\delta^{18}\text{O}$ e de $\delta^{34}\text{S}$ e a concentração de sulfato no poço ID IPT 84A.



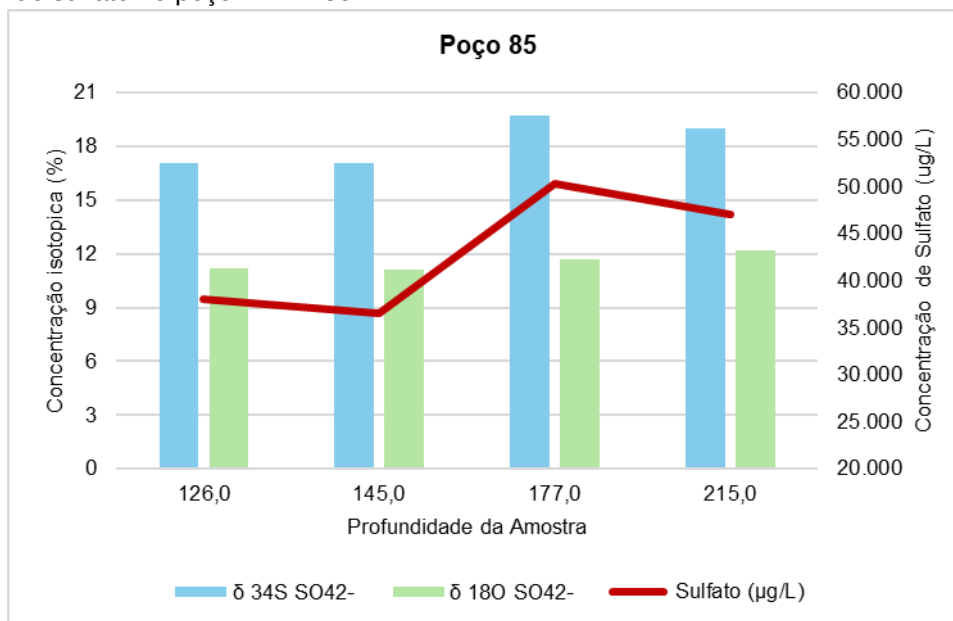
Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto - FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

Figura 28 - Correlação entre os isótopos de $\delta^{18}\text{O}$ e de $\delta^{34}\text{S}$ e a concentração de sulfato no poço ID IPT 84C.



Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto - FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

Figura 29 - Correlação entre os isótopos de $\delta^{18}\text{O}$ e de $\delta^{34}\text{S}$ e a concentração de sulfato no poço ID IPT 85.



Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto - FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

No Poço 84 A, os valores isotópicos elevados e relativamente estáveis de $\delta^{34}\text{S}$ e $\delta^{18}\text{O}$ indicam a ausência de fracionamento isotópico significativo, combinados com variações moderadas na concentração de sulfato, sugerem assinatura isotópica típica de origem mineral, sem evidências de influência antrópica ou biogênica.

No Poço 84 C, observou-se aumento da concentração de sulfato com a profundidade, sem variações expressivas nos valores isotópicos de $\delta^{34}\text{S}$ e $\delta^{18}\text{O}$. Essa relação sugere que o enriquecimento em sulfato está associado à dissolução de minerais sulfatados presentes nas camadas mais profundas, sem indícios de processos biogênicos (Wang e Zhang, 2019).

No Poço 85, os valores elevados e consistentes de $\delta^{34}\text{S}$ e $\delta^{18}\text{O}$, associados a concentrações expressivas de sulfato, reforçam a origem litogênica do sulfato, resultante da dissolução de minerais sulfurados e/ou minerais sulfatos presentes nas rochas do aquífero. O comportamento isotópico estável indica ausência de fracionamento isotópico significativo e, portanto, mínima influência de fontes antrópicas e de processos biogênicos.

5.2.8 Análises isotópicas de Carbono ($\delta^{13}\text{C}$) e Cloro ($\delta^{37}\text{Cl}$)

As coletas para análises isotópicas de Carbono ($\delta^{13}\text{C}$) e Cloro ($\delta^{37}\text{Cl}$), tal como para as demais análises isotópicas, foram realizadas exclusivamente nas 21 amostras estratificadas obtidas durante a etapa de perfilagem geofísica. Entretanto, esse conjunto apresenta uma particularidade, qual seja, as análises isotópicas para compostos organoclorados só puderam ser executadas quando foi observada concentração mínima de 8 $\mu\text{g/L}$ de eteno clorado, valor mínimo necessário para a viabilidade analítica do método.

Dessa forma, antes do envio das amostras ao laboratório executor, foram realizadas análises químicas de VOC em regime de *rushtime*, com o objetivo de selecionar as amostras que atenderiam ao critério de concentração mínima para a realização das análises isotópicas dos compostos organoclorados. A partir dessa triagem, foram selecionadas as seguintes amostras: Poço ID IPT 85 (AE-03 D) – DCE; Poço ID IPT 84C (AE-04 D) – DCE; Poço ID IPT 84A (AE-05 A) – DCE; Poço ID IPT 84A (AE-05 B) – DCE; e Poço ID IPT 84A (AE-05 C) – CV.

Os resultados obtidos encontram-se apresentados no **Quadro 13**. Em algumas amostras, há indicações de BDL (Below Detection Limit) e BQL (Below Quantification Limit), o que demonstra que, em alguns pontos, as concentrações estavam próximas ou abaixo do limite de detecção do método isotópico. Assim, apenas para composto DCE foi possível realizar interpretação.

Em relação aos isótopos de carbono ($\delta^{13}\text{C}$), foi constatado que os valores variam entre -16,37 ‰ (Poço 84C-57m, Amostra AE-04D) a -12,08 ‰ (Poço 84A-164m, Amostra AE-05B), sendo as diferenças de fracionamento isotópico, possivelmente associadas a etapas distintas da descloração redutiva da seguinte forma: TCE $\rightarrow$ DCE $\rightarrow$ CV. Observa-se que os $\delta^{13}\text{C}$ mais negativo (empobrecimento) nas amostras com maior concentração de DCE e mais positivo (enriquecimento) nas menores, indicam a hipótese de degradação biológica ativa.

Em relação aos isótopos de cloro ($\delta^{37}\text{Cl}$), os valores variam entre 2,92 ‰ (Poço 84A-104m, amostra AE-05A) a 3,58 ‰ (Poço 84A-164m, amostra AE-05B), variação coerente com fracionamento leve associado à dehalogenação redutiva.

O pequeno enriquecimento em ^{37}Cl nas amostras com menor concentração de DCE reforça o mesmo padrão isotópico do carbono, qual seja, conforme o composto é biodegradado, há preferência pela quebra de ligações contendo ^{35}Cl , enriquecendo o remanescente em ^{37}Cl .

O baixo número de amostras com concentrações adequadas para análise isotópica limita a avaliação espacial, mas o padrão isotópico é consistente com biodegradação natural em andamento por descloinação redutiva.

Quadro 13 - Resultados de análises isotópicas de carbono e cloro.

ID IPT	Amostra	Prof.	CV						DCE					
			$\delta^{13}\text{C}$			$(\mu\text{g/L})$			$\delta^{13}\text{C} (\text{‰})$			$\delta^{13}\text{C}$		
			CV		VPDB	DCE	$(\mu\text{g/L})$	$\delta^{13}\text{C} (\text{‰})$	$\delta^{37}\text{Cl}$	$(\mu\text{g/L})$	$\delta^{37}\text{Cl} (\text{‰})$	$\delta^{37}\text{Cl}$	$(\mu\text{g/L})$	$\delta^{37}\text{Cl} (\text{‰})$
								VPDB	CV		SMOC	DCE		SMOC
85	AE - 03 D	126,0	-	-	-	x	15,5	BQL	-	-	-	x	15,5	BDL
84C	AE - 04 D	57,0	-	-	-	x	75,9	-16,37	-	-	-	x	75,9	3,06
	AE - 04 D	57,0	-	-	-	x	75,9	-16,33	-	-	-	x	75,9	3,17
84A	AE - 05 A	100,0	-	-	-	x	8,3	BDL	-	-	-	x	8,3	2,94
	AE - 05 A	100,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	8,3	2,92
	AE - 05 B	164,0	-	-	-	x	17,9	-12,14	-	-	-	x	17,9	3,43
	AE - 05 B	164,0	-	-	-	x	17,9	-12,08	-	-	-	x	17,9	3,58
	AE - 05 C	216,0	x	10,8	BDL	-	-	-	x	10,8	BQL	-	-	-

Observações: ID: Identificação; Prof.: profundidade da amostragem; AE: amostra estratificada; $\delta^{13}\text{C}$: isótopos de carbono 13; $\delta^{37}\text{Cl}$: isótopos de cloro; BDL: below detection limit; BQL: below Quantification Limit; SMOC: standard mean ocean chloride; DCE: dicloroetano; CV: cloreto de vinila; <LQ: concentração inferior ao limite de quantificação; VPDB: The Vienna Pee Dee Belemnite (padrão de referência internacional); (X): composto analisado; (-): não analisado; $\mu\text{g/L}$: micrograma por litro.

Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto - FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

5.3 Síntese Comparativa de Resultados Obtidos

Como mencionado anteriormente, dentre os 79 poços amostrados, as coletas foram realizadas preferencialmente na primeira saída de água disponível em relação ao poço de interesse, geralmente por meio de torneiras já existentes ou, quando necessário, por meio de amostragem de baixa vazão. Desses poços, 15 apresentaram compostos eteno clorados, com concentrações variando entre valores acima e abaixo do Valor de Orientação para Investigação (VOI).

Nos 5 poços em que foram realizados ensaios de perfilagem geofísica, além da amostragem diluída, também foram coletadas amostras estratificadas em diferentes profundidades, definidas a partir dos resultados do ensaio com sonda *flowmeter* e utilizando garrafa amostradora.

As amostras diluídas obtidas em poços tubulares de exploração podem apresentar concentrações diluídas devido ao grande volume de água armazenado na coluna d'água do poço. Dessa forma, sua representatividade pode ser limitada em comparação às amostras estratificadas, que refletem condições mais específicas de determinadas profundidades do aquífero.

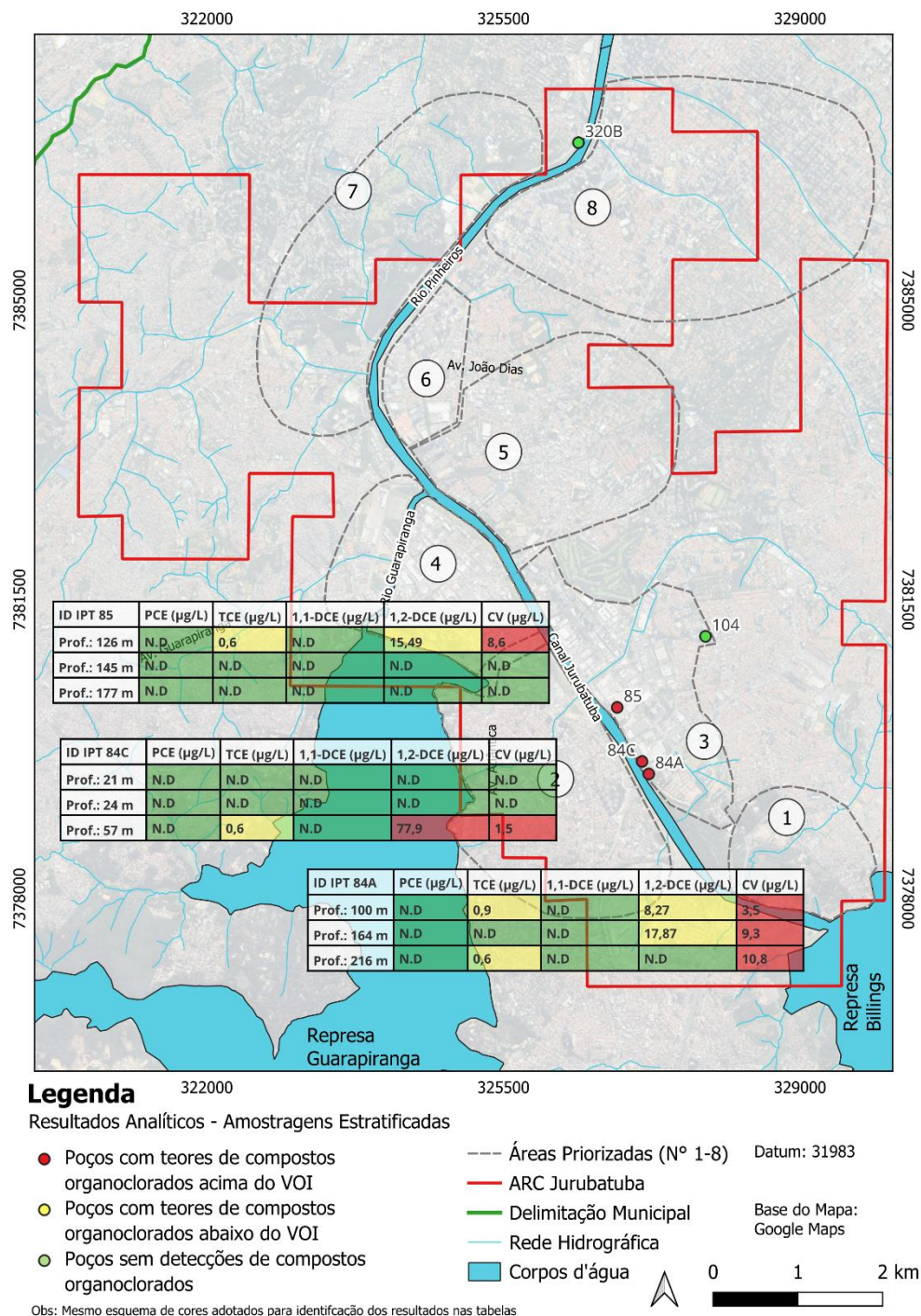
Assim sendo, este item tem como objetivo principal evidenciar as diferenças observadas nas concentrações de contaminantes entre os poços em que foram realizados ambos os tipos de amostragem (baixa vazão e amostragem estratificada), buscando compreender as variações detectadas e suas implicações no entendimento da contaminação local.

Neste contexto, destacam-se os poços ID IPT 84A, 84C e 85, todos localizados na Região Prioritária 3, conforme Resolução SMA nº 11, (São Paulo, 2017b), nas proximidades do Canal do Jurubatuba. Nesses poços, as amostras diluídas não indicaram a presença de compostos organoclorados. No entanto, nas coletas estratificadas, efetuadas com garrafa amostradora, foram detectadas essas substâncias em diferentes profundidades, com concentrações variando entre valores acima e abaixo do VOI, conforme ilustrado na **Figura 30**.

Destaca-se que nesse mapa, as caixas verdes indicam a não detecção de compostos organoclorados; as células amarelas correspondem a concentrações inferiores aos Valores Orientadores de Intervenção (VOI); e as células vermelhas as concentrações acima dos VOI.

Essa diferença entre os resultados obtidos pelos distintos métodos de amostragem evidencia aspectos importantes relacionados à diluição e à representatividade das técnicas empregadas.

Figura 30 - Concentrações de etenos clorados variando entre valores acima e abaixo do VOI.



Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto - FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

A identificação de organoclorados nas amostras estratificadas, mesmo em concentrações localmente baixas, confirma a presença de zonas específicas do aquífero com contaminação ativa.

Essa constatação é particularmente relevante porque demonstra que as amostras obtidas por meio do método de baixa vazão, ao integrarem diferentes zonas produtivas do poço, podem mascarar a presença de contaminantes devido ao efeito de mistura e diluição provocado pelo grande volume de água armazenado na coluna de água do poço.

Dessa forma, resultados aparentemente isentos de contaminação podem não refletir as reais condições do aquífero, especialmente em áreas com heterogeneidade hidrogeológica e presença de fraturas com condutividades hidráulicas distintas.

Essa constatação gera preocupação em relação aos poços que apresentaram apenas traços de organoclorados, pois, mesmo concentrações abaixo do VOI, devem ser analisadas com a mesma atenção e critério aplicados às amostras com valores acima do limite de investigação. Em ambientes com diluição significativa, pequenas concentrações podem indicar a presença efetiva de contaminantes em níveis mais expressivos nas zonas produtivas do aquífero.

De maneira semelhante, nos poços em que não houve detecção de organoclorados, os resultados devem ser interpretados com cautela. A ausência aparente de contaminantes pode não refletir a inexistência dessas substâncias, mas sim estar associada à diluição da água amostrada na coluna integral do poço (ou pelo efeito de ter sido coletada na torneira com o poço em bombeamento, provocando aeração da amostra), ou a limitações metodológicas, como a integração de diferentes zonas do poço ou a representatividade restrita de determinadas profundidades.

Diante disso, a proposta de programa de monitoramento para a região, apresentada também neste relatório, contempla as características técnicas necessárias para assegurar a obtenção de resultados compatíveis com as

condições de qualidade das águas da Área de Restrição e Controle de Jurubatuba (ARC-Jurubatuba).

A partir desses resultados, os órgãos gestores poderão utilizar as informações de forma estratégica, transformando o monitoramento em instrumento efetivo de gestão, e não apenas de diagnóstico, permitindo ajustes dinâmicos e transparentes nas ações de controle e recuperação ambiental.

5.4 Cenário de uso das Águas Subterrâneas na ARC - Jurubatuba

Os resultados obtidos no presente estudo possibilitaram ampliar o conhecimento acerca do cenário de contaminação das águas subterrâneas na região da ARC-Jurubatuba, particularmente quanto à situação da água em poços de produção.

Para isso, a avaliação do cenário da região de interesse foi conduzida com base nas finalidades de uso da água, considerando-se o contexto das áreas contaminadas ou reabilitadas por compostos organoclorados e com base na aplicação do método POSH (*Pollutant Origin, Surcharge Hydraulically*) proposto por FOSTER *et al.* (2006), que auxilia na identificação e classificação da carga potencial de fontes primárias e secundárias de contaminação.

A base de informações se refere à etapa de cadastramento de poços, oportunidade em que foram visitados 384 poços na área de estudo – conforme pontuado no capítulo 4.2 desse relatório.

Entretanto, considerando a necessidade de elaborar cenários de uso das águas subterrâneas, para a presente avaliação foram consideradas apenas aquelas captações em atividade e alguns poços desativados que integraram a rede de monitoramento deste projeto.

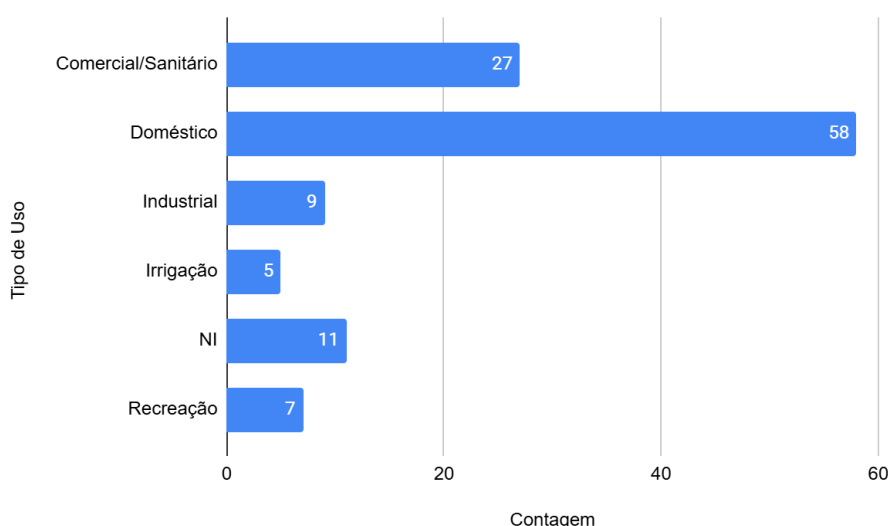
Dessa forma, foram avaliados 117 poços conforme o tipo de uso da água captada e, para a avaliação da qualidade da água, foram considerados os 104 poços que dispõem de histórico de resultados analíticos.

Vale ressaltar que a classificação dos tipos de uso da água foi realizada conforme a base de dados estabelecida para este projeto, a qual foi elaborada a partir de informações históricas disponíveis e dos dados levantados em campo.

A **Figura 31**, a seguir, apresenta os gráficos de frequência dos tipos de uso da água captada conforme os poços analisados, constatando-se que cerca de 50% deles destinam-se ao uso doméstico. Observa-se, ainda, a presença do uso classificado como “irrigação”, embora tal modalidade não seja compatível com as características de ocupação da área estudada. Assim, é provável que esse registro corresponda a uma inconsistência na classificação do uso no cadastro.

Esse resultado é expressivo e realça a importância desse grupo de poços para a compreensão da extensão e dos perigos associados à contaminação das águas subterrâneas, uma vez que envolve o abastecimento de residências e, portanto, demonstra a exposição da população à água eventualmente contaminada. A **Figura 32**, por sua vez, ilustra a distribuição geográfica dos poços com a respectiva informação acerca da classificação do tipo de uso da água captada.

Figura 31 - Número de poços conforme os tipos de usos da água captada.

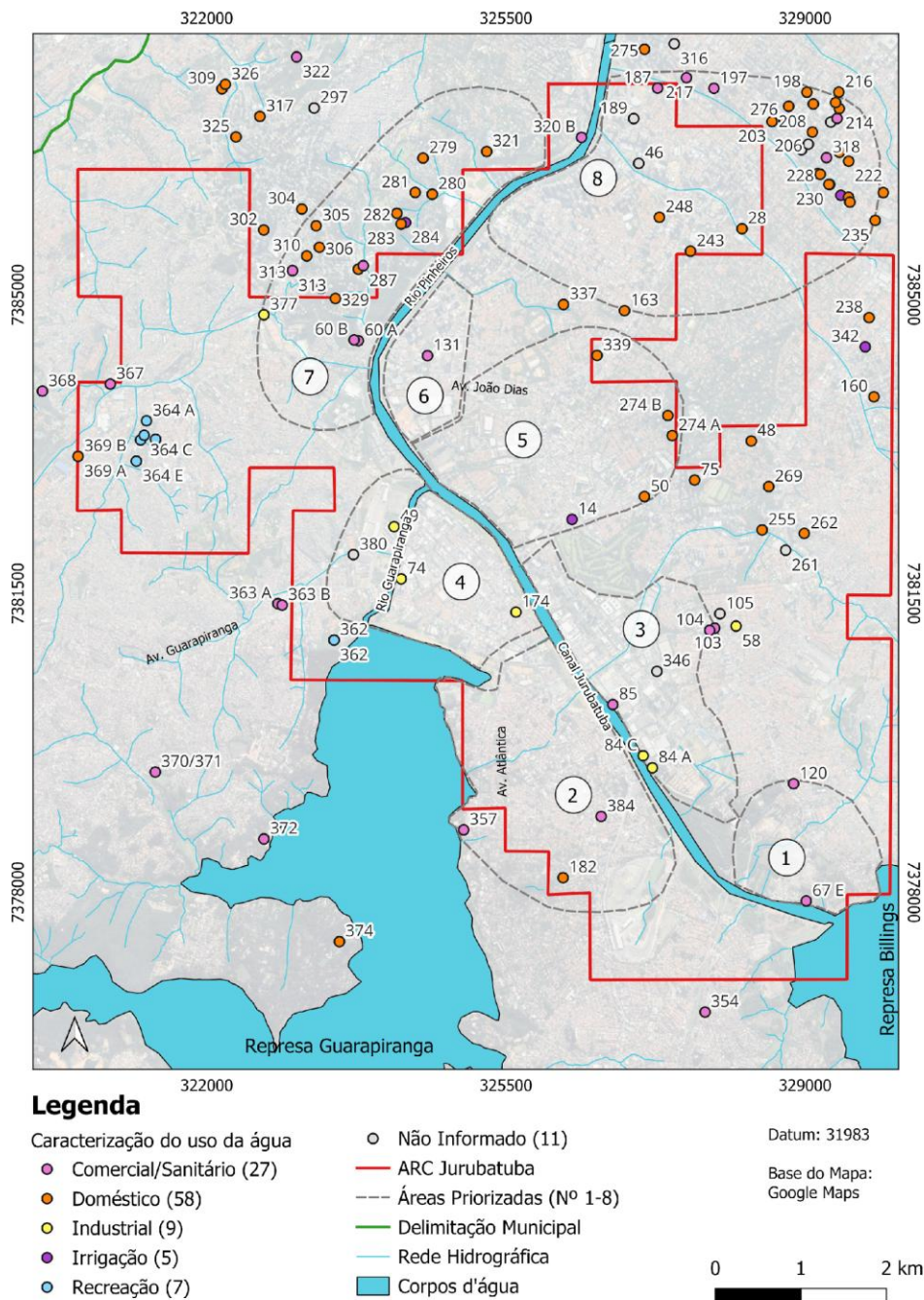


NI: Não Informado.

Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto - FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

As informações relativas aos poços considerados nessa avaliação estão apresentadas no **Anexo 05**.

Figura 32 - Distribuição dos poços na ARC-Jurubatuba e entorno com informação acerca do uso da água captada.



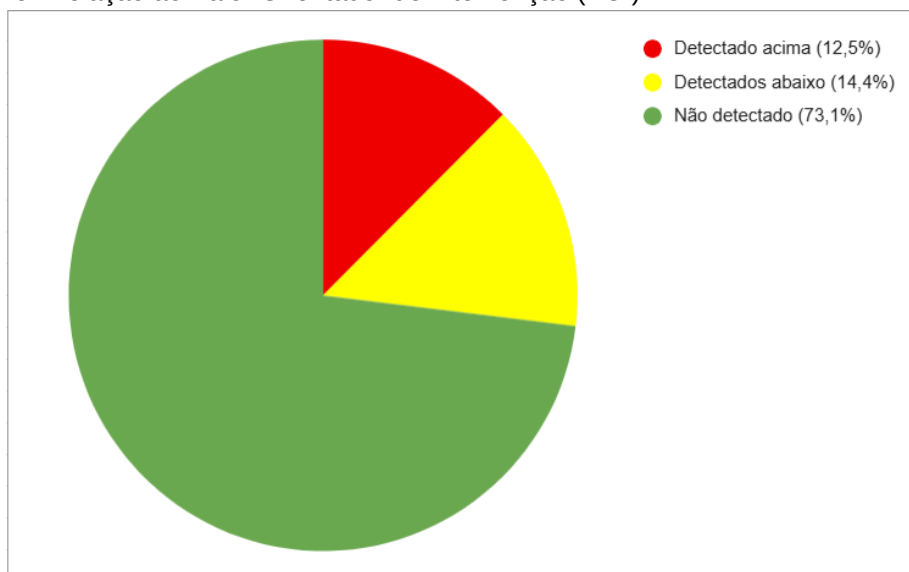
Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto - FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

Quanto à qualidade das águas subterrâneas na ARC-Jurubatuba e entorno, particularmente em relação à presença ou não de organoclorados, e considerando-se as informações do histórico analítico de 104 poços, constata-se que em 26,9% deles foram detectadas concentrações de compostos organoclorados com teores acima (12,5%) e abaixo (14,4%) do Valor de Intervenção (VI), conforme estabelecido na Decisão de Diretoria (DD) nº 125/2021/E da CETESB (2021) que *“Dispõe sobre a Aprovação da Atualização da Lista de Valores Orientadores para Solo e Água Subterrânea”*. De qualquer forma, é importante destacar que, na grande maioria dos poços (73,1%), não foram detectados compostos organoclorados na água captada.

A **Figura 33** ilustra a distribuição proporcional dos poços quanto à detecção ou não de organoclorados nas amostras de água coletadas nos mesmos, em relação ao Valor Orientador de Intervenção (VOI), enquanto o **Quadro 14** apresenta uma análise estatística do número de poços com teores de compostos organoclorados detectados acima e abaixo dos valores estabelecidos pela CETESB (2021).

A **Figura 34**, por sua vez, mostra a distribuição geográfica dos poços analisados na região da ARC-Jurubatuba e entorno, bem como os locais de ocorrência das áreas contaminadas e reabilitadas e, também, os locais com atividade classificada como elevada carga potencial de contaminação.

Figura 33 - Frequência de poços quanto à detecção ou não de organoclorados em relação ao Valor Orientador de Intervenção (VOI).



Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto - FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

Quadro 14 - Análise estatística do número de poços com compostos organoclorados detectados.

Tipo de uso da água captada	Teor de organoclorados em relação ao Valor Orientador de Intervenção (VOI)			
	Nº de poços com teor > VOI	Nº de poços com teor < VOI	Total	Proporção acima do VOI (%)
Industrial	5	1	6	83,3%
Doméstico	2	9	11	18,2%
Comercial/Sanitário	2	2	4	50,0%
Recreação	2	0	2	100,0%
Irrigação	1	1	2	50,0%
Uso não informado (NI)	2	2	4	50,0%
Totais	14	15	29	

Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto - FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

Dos 29 poços com detecção de compostos organoclorados, 11 deles (37,9%) correspondem ao uso doméstico e todos eles se encontram em operação (ativos), o que evidencia a relevância desse grupo na avaliação da contaminação. Entre eles, 2 poços (18,2%) apresentaram detecção acima dos limites estabelecidos, enquanto 9 deles (81,8%) apresentaram valores abaixo.

Embora a proporção de poços domésticos com concentração acima dos limites seja menor do que aquela observada para os usos industriais (83,3%) e recreacionais (100%), ressalta-se que a ocorrência é significativa, sobretudo pelo potencial risco à saúde pública (**Quadro 14**).

A **Figura 34** apresenta a situação dos poços avaliados em relação a ocorrência de organoclorados nas águas subterrâneas.

As ocorrências de compostos organoclorados concentram-se principalmente nas Áreas Priorizadas 7 e 8, tanto no interior da área quanto fora dos limites da ARC-Jurubatuba. Atualmente, essas regiões apresentam uso predominante residencial, entretanto, a Área 8 possui um histórico de uso industrial na porção inserida na área de restrição. Ressalta-se, ainda, que nessas áreas se observa um menor número de locais com potencial de contaminação, assim como de áreas contaminadas e reabilitadas, conforme **Anexo 05**.

Entre os poços com concentrações superiores ao VOI, observa-se que 2 deles destinam-se ao uso doméstico, sendo um localizado na Área Priorizada 8 e outro, em seu entorno.

Nessas mesmas áreas, foram identificados outros 4 poços com concentrações de compostos organoclorados acima do VOI, destinados a diferentes tipos de uso (irrigação, industrial, comercial/sanitário e não informado). Além disso, foram identificados 8 poços com concentração de compostos organoclorados inferior ao VOI, apresentando usos diversificados, embora predominantemente domésticos.

Por sua vez, a Área Priorizada 03, que apresenta características históricas de uso industrial, foram identificados 4 poços com concentrações de contaminantes acima dos valores de VOI, apresentando usos dos tipos industrial e comercial/sanitário.

No entorno desses poços, foi possível identificar áreas com elevada carga potencial de contaminação, classificadas conforme o método POSH (FOSTER *et al.*, 2006), além de áreas contaminadas e reabilitadas por compostos organoclorados.

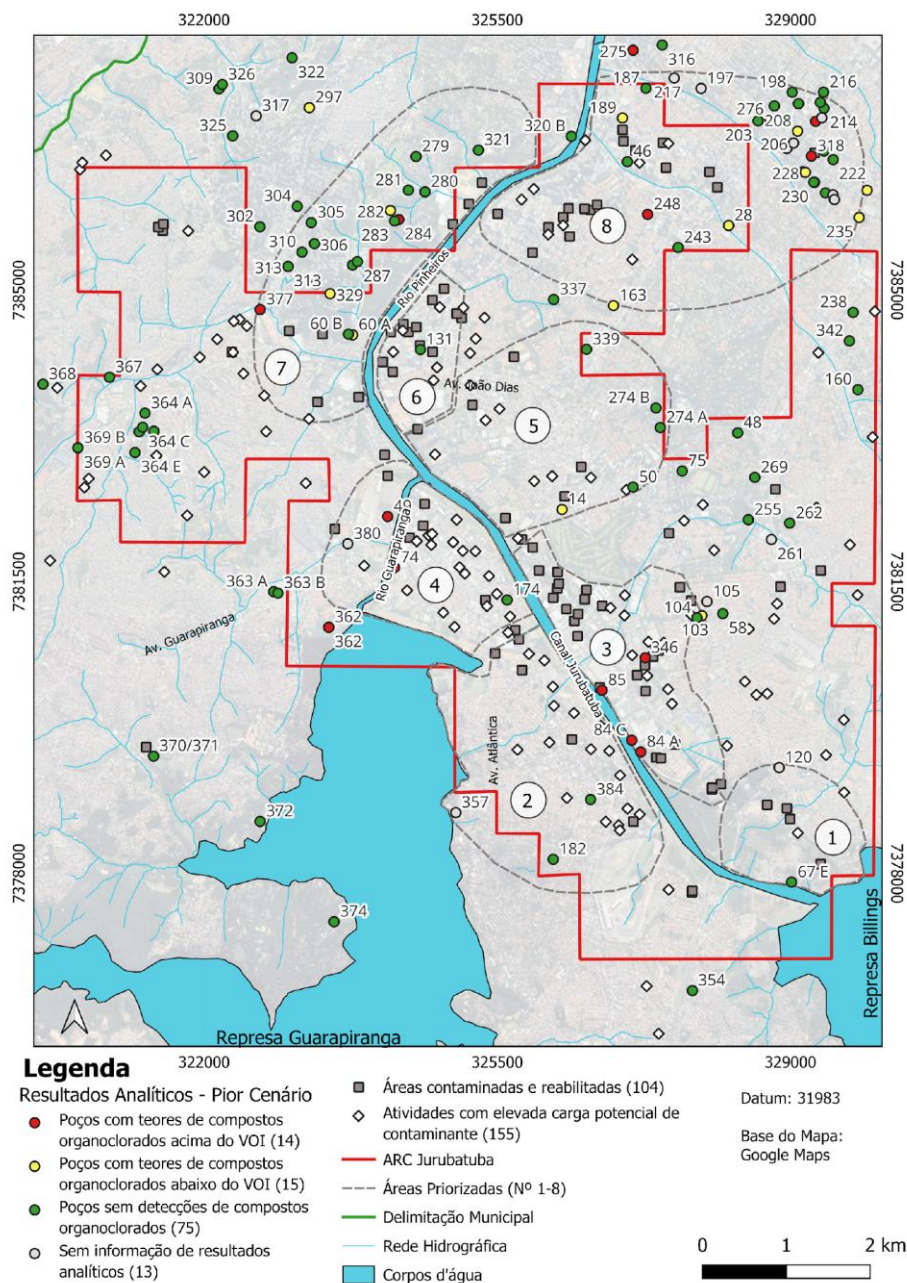
Na Área Priorizada 04, foram identificados 2 poços com concentração de compostos organoclorados acima dos valores estabelecidos para os VOI, ambos com uso industrial. Foram observadas, também, áreas potenciais e áreas contaminadas no entorno desses poços.

A presença de compostos organoclorados, ainda que em níveis abaixo dos limites de intervenção, indica a necessidade de execução de programa de monitoramento e revisão periódica das condições construtivas e de proteção dos poços, visando evitar a migração de contaminantes.

A análise dos poços de uso doméstico permitiu identificar que, apesar de a maioria apresentar concentração abaixo dos limites de intervenção, a presença recorrente de compostos organoclorados indica contaminação difusa e persistente, associada a fontes externas às áreas estritamente residenciais.

Esse cenário pode indicar a presença de fontes difusas de contaminação, cuja origem é complexa e de difícil rastreamento, diferindo das fontes pontuais tradicionalmente associadas a atividades industriais ou comerciais. A identificação e caracterização dessas fontes são essenciais para subsidiar estratégias de monitoramento e gestão, evitando riscos à saúde humana e garantindo a efetividade das ações de prevenção e remediação.

Figura 34 - Situação dos poços avaliados em relação a ocorrência de organoclorados nas águas subterrâneas.



Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto - FEHIDRO 2021-AT-COB-136

6. MODELO CONCEITUAL DE FLUXOS SUBTERRÂNEOS

Segundo Feitosa *et al.* (2008) pode-se definir um modelo conceitual de fluxos como sendo a representação de hipóteses que possibilitam delinear e arquitetar um sistema hidrogeológico, por meio da idealização e organização de suas características.

Particularmente referindo-se a um modelo conceitual de fluxos subterrâneos, pode-se definir, ainda depreendendo-se dos citados autores, como sendo uma representação simplificada e esquemática de um sistema hidrológico, na qual busca-se compreender como a água percola através do subsolo, baseada em hipóteses sobre as características do meio hidrogeológico real e interações com as diversas parcelas de águas superficiais ou aéreas, do local ou região de interesse.

Portanto, pode-se dizer que o modelo conceitual não busca reproduzir a realidade com total precisão, mas sim capturar os elementos essenciais do sistema de fluxos subterrâneos. Os referidos elementos podem ser caracterizados como: a geometria das unidades aquíferas (identificação das unidades, arranjos, arquitetura, extensões e formas); parâmetros hidrogeológicos (armazenamento, velocidade, direção e fluxos da água); e condições de contorno (feições de entrada e saída da água, limites hidrológicos e potenciais hidráulicos em pontos específicos).

Dessa forma, o modelo conceitual configura-se como uma ferramenta essencial para entender e modelar os fluxos de águas subterrâneas, permitindo a análise e previsão do comportamento dos aquíferos para diversas finalidades. A análise dos dados de campo (perfis de sondagem, medições de nível de água, testes de vazão) contribuem de forma expressiva para inferir as características dos fluxos subterrâneos.

Assim sendo, no presente trabalho buscou-se consubstanciar o modelo conceitual de fluxos subterrâneos por meio da caracterização hidrogeológica atualizada e detalhada na escala 1:10.000, com vistas à compreensão do comportamento em termos conceituais de infiltração, recarga e circulação das águas subterrâneas. Cabe ressaltar que o presente modelo conceitual

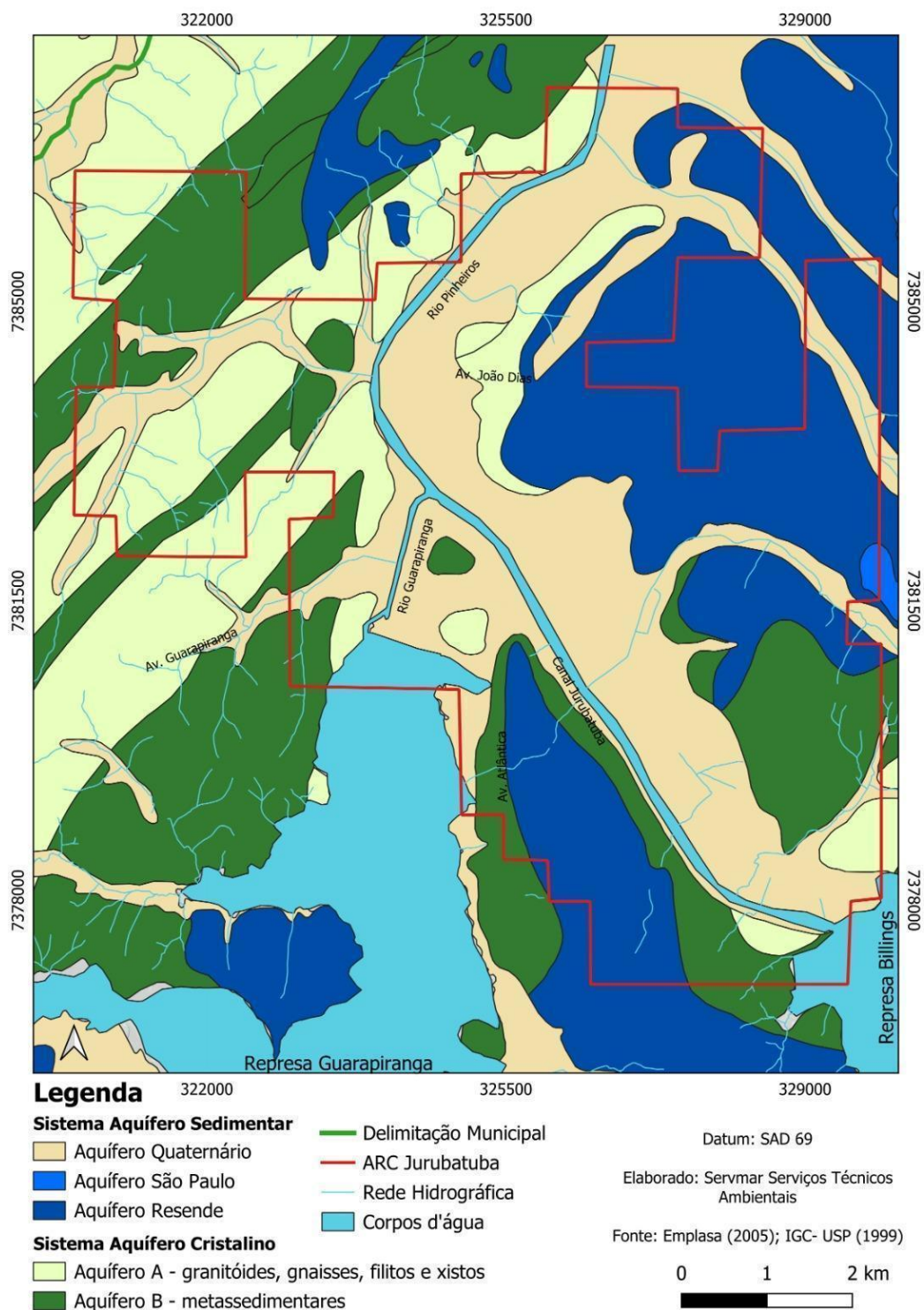
hidrogeológico compreende revisão e atualização do modelo conceitual elaborado por DAEE/SERVMAR (2008).

Para alcançar o objetivo almejado com a elaboração do modelo conceitual de fluxos subterrâneos da ARC-Jurubatuba, foi necessário reunir, sistematizar e interpretar os dados levantados ao longo do projeto, os quais possibilitaram abordar sobre aspectos como a infiltração e a recarga influenciam a circulação das águas subterrâneas.

Desse modo, quanto à infiltração e recarga, foram consideradas as seguintes informações: mapa de uso e ocupação do solo, geologia de subsuperfície, modelo de galerias pluviais e de efluentes, mapa de isópacas do Sistema Aquífero Sedimentar (SAS), perfis de poços selecionados conforme nível de detalhamento da descrição litológica e dados isotópicos. Em relação à circulação das águas subterrâneas, foram considerados o mapa hidrogeológico, os perfis dos poços selecionados e os estudos acadêmicos de detalhe preexistentes, buscando-se enfatizar os diferentes regimes de fluxo relacionados à camada sedimentar, ao manto de alteração e à rocha sã que compõe o Sistema Aquífero Cristalino (SAC).

A principal base utilizada foi o mapa hidrogeológico (DAEE/SERVMAR, 2008), apresentado na **Figura 35**. Como se observa no citado mapa, a região de estudo apresenta dois sistemas aquíferos distintos, sendo o primeiro relacionado ao Embasamento Cristalino, denominado Sistema Aquífero Cristalino (SAC), e o segundo relacionado aos terrenos sedimentares da Bacia de São Paulo, denominado Sistema Aquífero Sedimentar (SAS).

Figura 35 - Mapa hidrogeológico da ARC-Jurubatuba e entorno.



Fonte: Modificado de DAEE/SERVMAR (2008).

Os principais trabalhos publicados acerca do aquífero fraturado e da contaminação por compostos organoclorados – e que serviram de base de dados para a idealização e desenvolvimento do modelo conceitual de fluxos subterrâneos na ARC-Jurubatuba, estão apresentados a seguir, em ordem cronológica, e com uma breve descrição do seu conteúdo:

- i. L'APICCIRELLA (2009) aprofundou os estudos sobre a contaminação e áreas de restrição de uso de água subterrânea no entorno do Canal Jurubatuba a partir dos resultados obtidos por DAEE/SERVMAR (2008);
- ii. RIBEIRO (2012) realizou perfilagens em cinco poços próximos ao Canal do Jurubatuba, observando várias zonas de fraturas hidráulicamente conectadas;
- iii. FIUME (2013) realizou uma detalhada investigação da geologia estrutural da região, a fim de elaborar um modelo conceitual da rede de fraturas das rochas que compõem o Embasamento Cristalino;
- iv. BARBOSA (2015) desenvolveu uma técnica com um Sistema de Informações Geográficas (SIG) e a elaboração de um modelo conceitual para o gerenciamento da contaminação no local da antiga área denominada de ZUPI-131 (Zona de Uso Predominantemente Industrial) na ARC-Jurubatuba;
- v. FERNANDES *et al.* (2016) realizaram um mapeamento de fraturas em pedreiras ao sul de São Paulo detalhando a geologia estrutural do Sistema Aquífero Cristalino (SAC), apontando direções de fraturas de fluxo preferencial no Embasamento Cristalino, determinantes nas condições de fluxo de contaminantes na região da ARC-Jurubatuba;
- vi. SILVA (2018) estimou a recarga e realizou a caracterização hidroquímica e isotópica das águas subterrâneas na ARC-Jurubatuba;
- vii. LIMA (2018) pesquisou rochas cristalinas fraturadas baseando-se em um método chamado *Discrete Fracture Network* (DFN), obtendo um modelo

conceitual detalhado, revelando altas concentrações de contaminantes em horizontes de rocha alterada mole, e explorando, também, o conceito de difusão reversa;

- viii. PINO (2019) estudou aspectos estruturais e hidráulicos do aquífero fraturado em uma área próxima ao rio Pinheiros e ao Canal do Jurubatuba;
- ix. BARBOSA (2020) desenvolveu métodos de caracterização de aquíferos fraturados por meio de ensaios hidráulicos, amostragens com obturadores e técnicas geofísicas; e
- x. FREGONA (2023), constatou existirem heterogeneidades e interconexões nos aquíferos na área da ARC-Jurubatuba, que resultam na influência da dispersão de solventes organoclorados.

Outros trabalhos importantes a serem destacados quanto à metodologia de investigação de áreas contaminadas em aquíferos fraturados e, portanto, considerados na elaboração do modelo hidrogeológico conceitual são HART (2023) e NASCIMENTO (2023).

O trabalho de HART (2023) propõe um modelo conceitual temporal para gestão de locais de contaminação complexa com foco em um caso em São Paulo de remediação de plumas mistas de solventes clorados. A pesquisa de NASCIMENTO (2023) também propõe um modelo conceitual de um caso de contaminação de solventes clorados, mas no município de Diadema, região do ABC.

6.1 Seções hidrogeológicas na ARC-Jurubatuba

Inicialmente, foram verificadas as seções geológicas elaboradas na ARC-Jurubatuba por DAEE/SERVMAR (2008), que permitiram observar os aspectos necessários, segundo Feitosa *et al.* (2008), para desenvolvimento do modelo conceitual de fluxos subterrâneos e, também, observar características geológicas, hidrogeológicas ou outras feições estruturais de interesse.

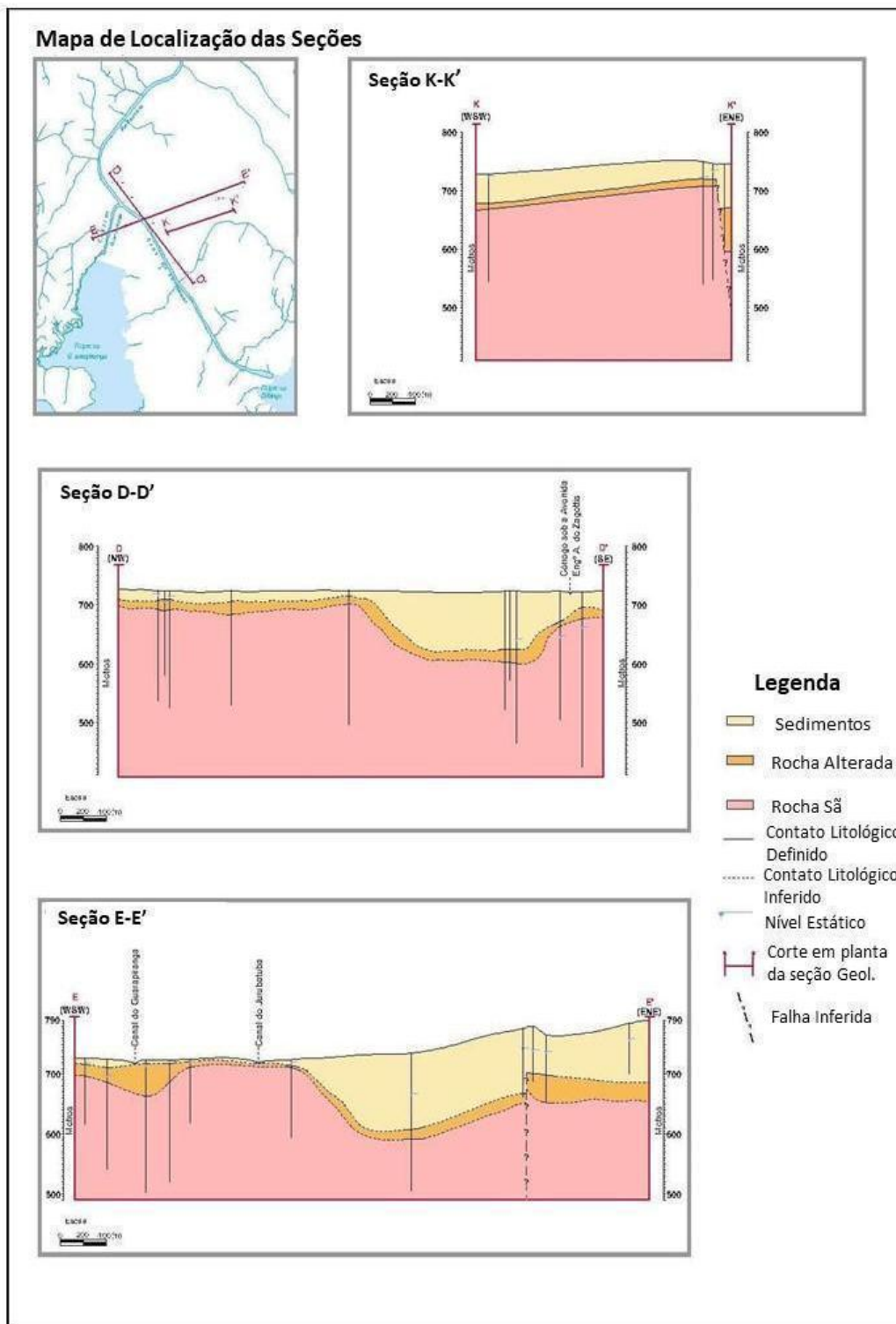
Conforme DAEE/SERVMAR (2008), aspectos estruturais observados em seções geológicas demonstram basculamentos avaliados como estruturas rúpteis, tipo falhas normais ou inversas (**Figura 36**). As seções E-E' e K-K' mostram feições possivelmente associadas aos basculamentos de blocos descritos em estudos sobre a geologia da área (Rocha *et al.*, 1989; Riccomini, 1989; Riccomini; Coimbra; Takiya, 1992; Juliani, 1992).

Pode-se observar espessuras de sedimentos variando de poucos metros até cerca de 100 m. As espessuras de rocha alterada (Embasamento Cristalino) variam de poucos metros até cerca de 50 m. Na seção D-D', optou-se por ilustrar uma interpretação de um topo do embasamento cristalino variando a cota como uma característica de paleo-relevo, entretanto, essas variações de topo também podem estar associadas a basculamentos.

Para a execução das atividades no presente projeto, primeiramente foram analisados e selecionados todos os perfis de poços obtidos na fase de cadastramento e efetuada criteriosa consistência de dados. Após essa etapa, foram plotados em mapa os poços que possuíam registros de perfis (**Figura 37**) sendo selecionados aqueles poços com maior nível de detalhamento da litologia para melhor representação e compreensão do Sistema Aquífero Sedimentar (SAS).

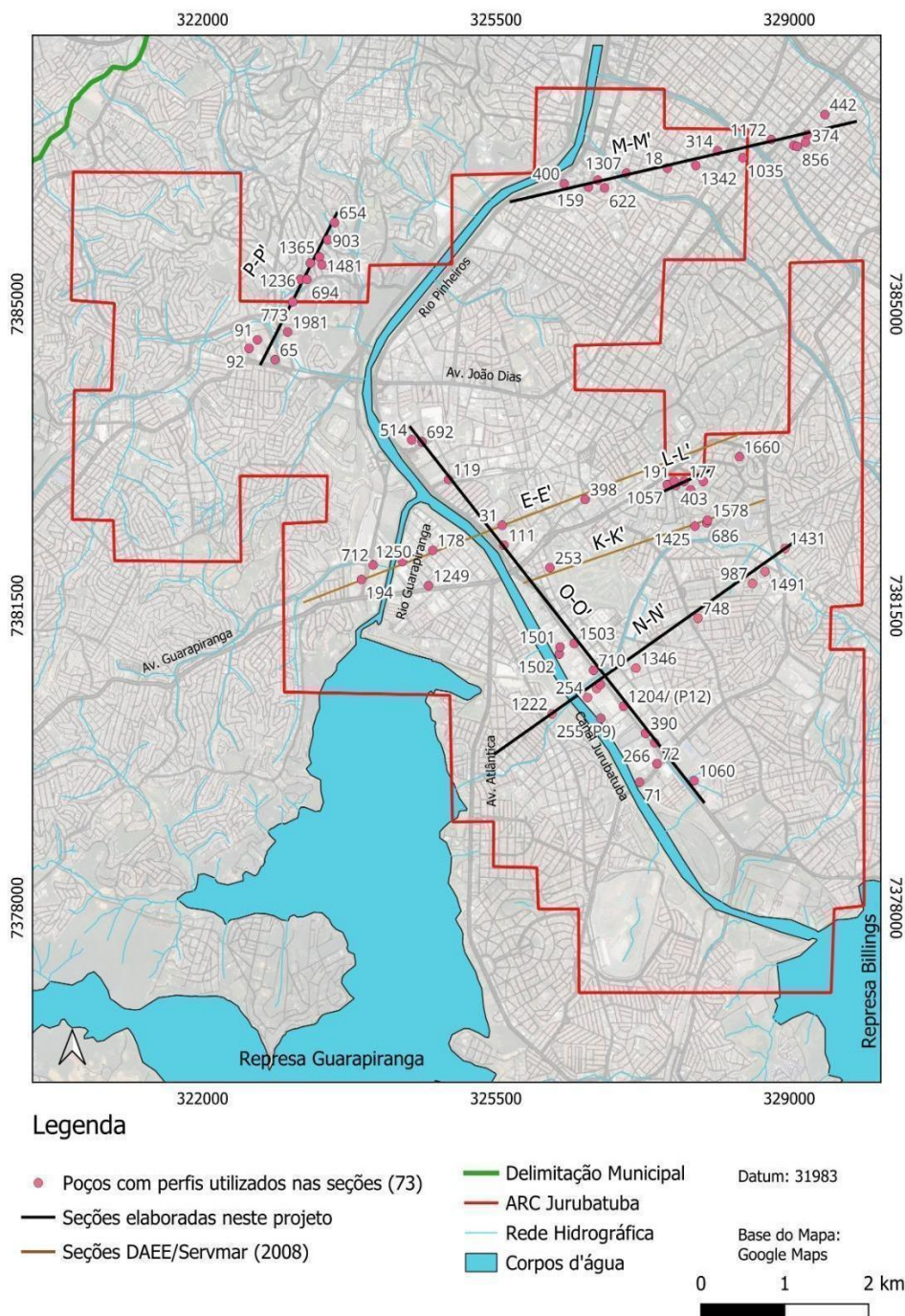
As seções elaboradas no presente trabalho foram nomeadas em sequência daquelas elaboradas por DAEE/SERVMAR (2008), iniciando, portanto, em L-L'.

Figura 36 - Seções hidrogeológicas elaboradas na ARC-Jurubatuba em estudo anterior.



Fonte: DAEE/SERVMAR (2008).

Figura 37 - Mapa de poços que possuem descrição detalhada do perfil litológico e localização das seções hidrogeológicas.



Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto – FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

Considerando esses perfis de melhor detalhamento da litologia, foi traçada a seção L-L' na porção central da ARC-Jurubatuba, aproximadamente equivalente a um pequeno trecho da seção J-J' de DAEE/SERVMAR (2008).

A seção L-L' (**Figura 38**), também na região central da ARC-Jurubatuba, evidencia a ocorrência de intercalações de camadas mais argilosas e camadas mais arenosas sendo que as camadas mais argilosas, menos permeáveis, tendem a bloquear a propagação dos contaminantes e, portanto, conter os contaminantes, inclusive em fase separada, podendo, então, funcionar como uma fonte secundária de contaminação de tempo mais prolongado, pelo efeito de retrodifusão.

Nota-se que a espessura dos sedimentos varia de 50 m (à ENE) até 100 m (à WSW). A ocorrência de cascalhos e conglomerados, mesmo que por vezes intercalado à argilas, torna-se caminho preferencial para contaminações. O horizonte de rocha alterada apresenta redução em direção às áreas de várzea, sendo o inverso da espessura de sedimentos. Na região do poço 402, observa-se um baixo topográfico do embasamento, podendo ser uma área de acúmulo de produtos oleosos mais densos do que a água, como por exemplo o DNAPL (*Dense Non-Aqueous Phase Liquid*), sendo que os eteno clorados são constituintes desse tipo de produto.

Na porção nordeste da ARC-Jurubatuba foi elaborada a seção M-M' (**Figura 39**), correspondente à seção B-B' apresentada por DAEE/SERVMAR (2008), porém com maior detalhamento litológico.

Essa nova representação evidencia a presença de intercalações de camadas mais argilosas, alternando com níveis de arenito de granulação fina a grossa e argilito, além da ocorrência de lentes de argilito.

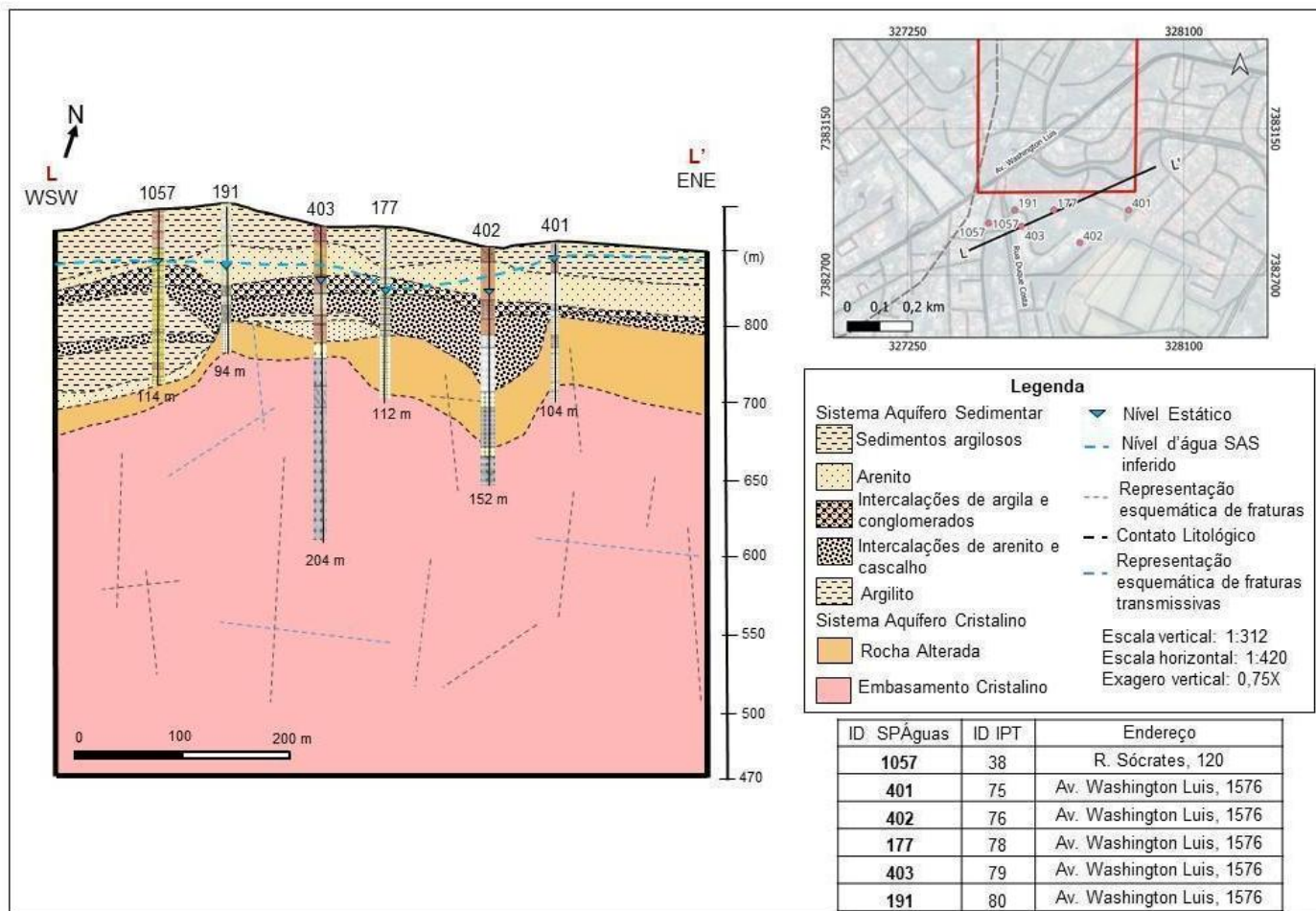
Do ponto de vista estrutural, é possível inferir a existência de uma falha associada a um modelo de basculamento vinculado à evolução tectônica regional. Destaca-se que essa porção corresponde, atualmente, à área de maior concentração de poços ativos e, portanto, de maior uso da água subterrânea e com a particularidade que se destina predominantemente para fins domésticos. Observa-

se, ainda, um aumento expressivo na espessura da sequência sedimentar no rumo ENE.

A seção P-P' (**Figura 40**) foi traçada na região da Vila Andrade, na porção noroeste da ARC-Jurubatuba, considerando, assim como seção M-M', sua importância devido à alta concentração de poços e uso de água predominantemente doméstico. A partir dos perfis geológicos obtidos somente foi possível caracterizar no SAS duas litologias distintas, sendo elas: solo orgânico e uma camada de argila arenosa. O solo orgânico ocorre em uma faixa mais restrita na porção sudoeste (SW), enquanto a camada de argila arenosa apresenta distribuição mais ampla ao longo da seção. A sequência sedimentar estende-se aproximadamente entre as cotas topográficas de 720 m e 780 m.

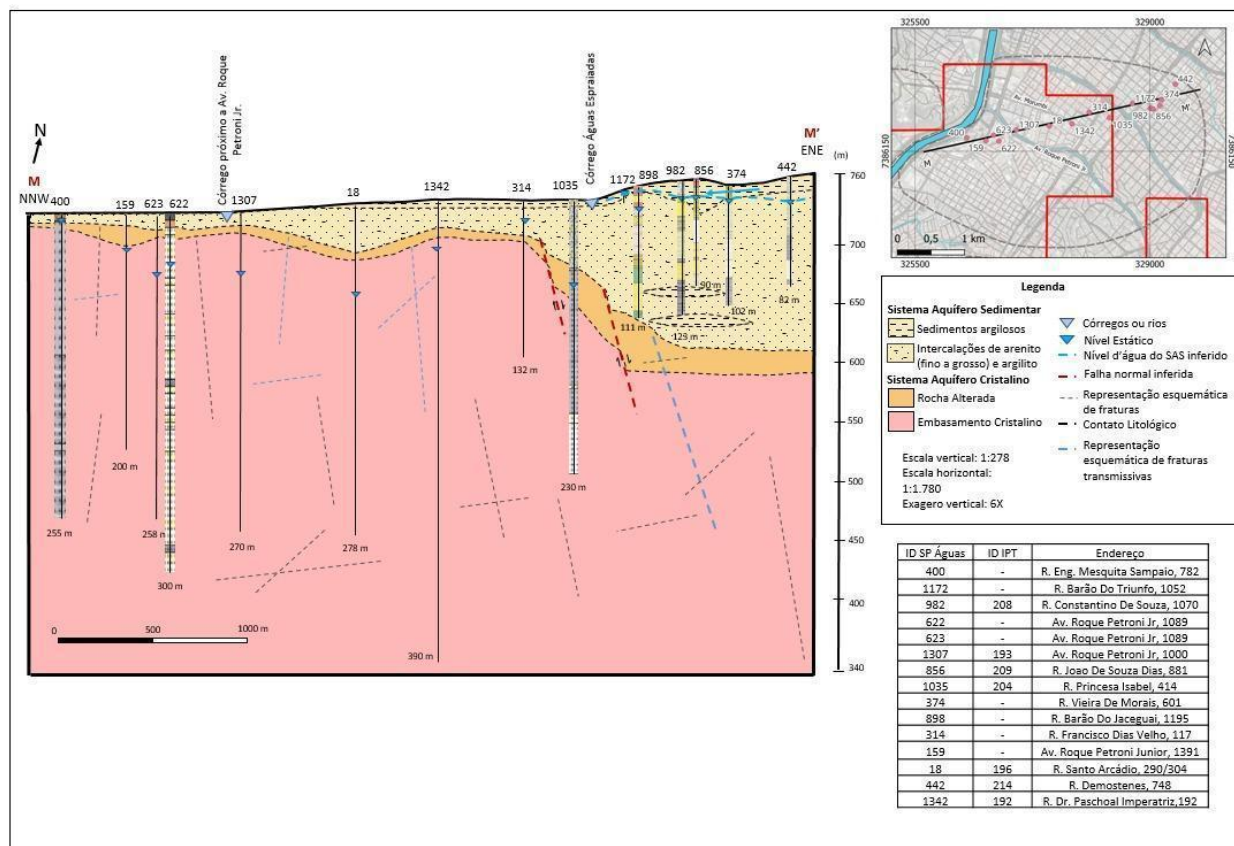
Adicionalmente, foram elaboradas as seções N-N' e O-O', que subsidiaram a revisão do modelo hidrogeológico conceitual de fluxos subterrâneos, a ser apresentada no Capítulo 6.5 deste relatório.

Figura 38 - Seção hidrogeológica L-L' na porção central da ARC-Jurubatuba.



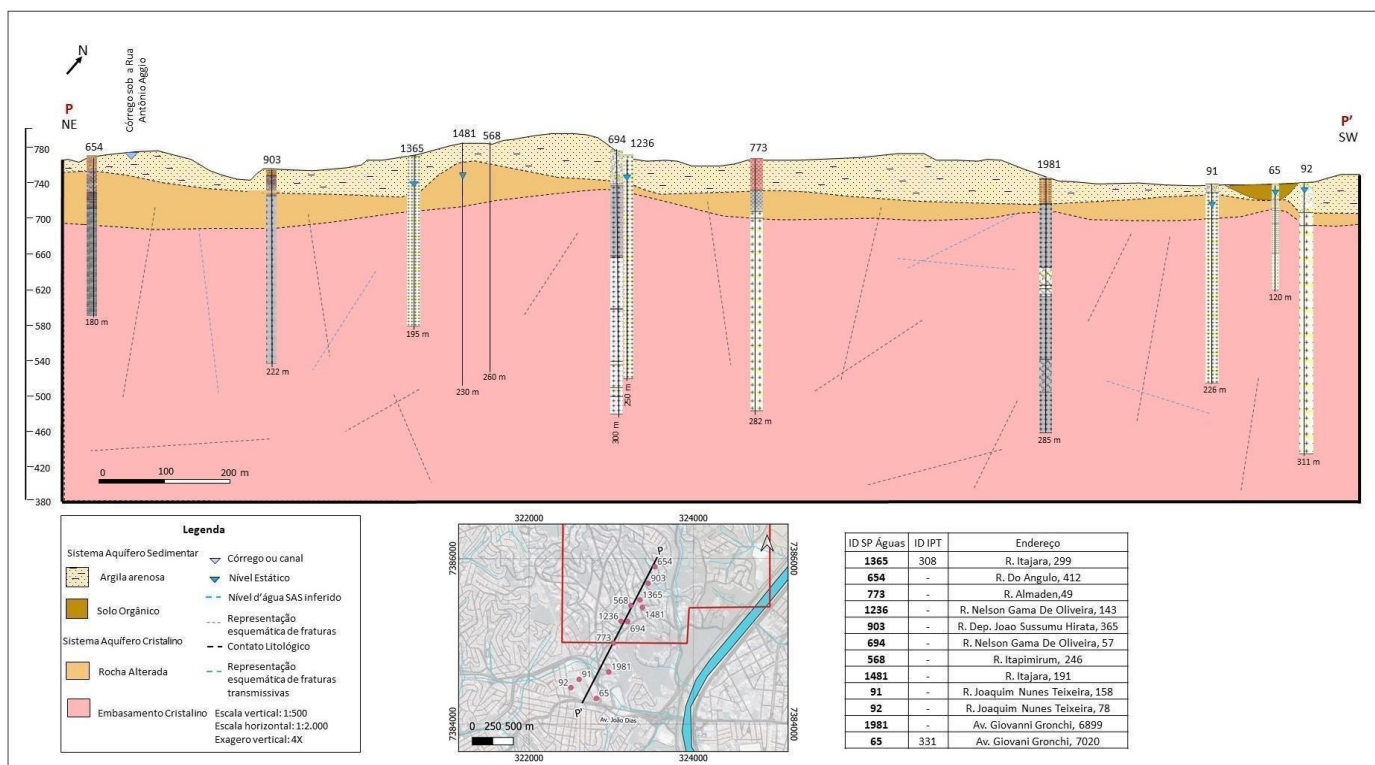
Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto – Empreendimento FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

Figura 39 - Seção hidrogeológica M-M' na porção nordeste da ARC-Jurubatuba.



Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto – Empreendimento FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

Figura 40 - Seção geológica P-P' na porção noroeste da ARC-Jurubatuba.



Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto – Empreendimento FEHIDRO 2021-AT-COB-13.

6.2 Síntese hidrogeológica da ARC-Jurubatuba

O principal aquífero na área de estudos é o Sistema Aquífero Cristalino (SAC), fraturado e, dessa forma, caracterizado por uma porosidade de fissuras. Porém, tanto a porção alterada das rochas cristalinas, quanto a cobertura de sedimentos terciários e quaternários, com porosidade intergranular, são determinantes no comportamento do fluxo da água subterrânea e, consequentemente, dos contaminantes.

O Sistema Aquífero Sedimentar (SAS), por sua vez, com suas camadas de areias intercaladas com argilas, gera aquíferos suspensos que retardam a recarga para os horizontes mais profundos do aquífero, bem como interferem no comportamento dos contaminantes, podendo acomodar e reter contaminantes em fase livre nas camadas mais impermeáveis, tornando-se uma fonte secundária de contaminação.

Conforme Bertolo (1996), com relação às características geológicas e topográficas na variação do comportamento do nível d'água nos poços, na Bacia Sedimentar de São Paulo há uma série de intercalações de camadas arenosas de diferentes espessuras e descontínuas, nas direções horizontal e vertical, o que caracteriza o aquífero como de natureza predominantemente semi-confinado, heterogêneo e anisotrópico, favorecendo a ocorrência de aquíferos locais com variados graus de conexão hidráulica entre si, onde a água subterrânea se encontra sob diferentes cargas hidráulicas.

A porção alterada do Sistema Aquífero Cristalino (SAC), além de sua porosidade granular, preserva, em maior ou menor grau, a estrutura da rocha, portanto, possui também uma porosidade fissural que a torna bastante permeável (DAEE/SERVMAR, 2008).

Observando-se que os poços mais profundos têm até pouco mais de 300 m de profundidade, presume-se que abaixo disso, as potencialidades do aquífero diminuem e, para efeitos de interpretações conceituais, foi assumido que a cerca de

400 m de profundidade, o Sistema Aquífero Cristalino (SAC) perde permeabilidade (L'APICCIRELLA, 2009).

6.2.1 Sistema Aquífero Sedimentar

O Sistema Aquífero Sedimentar (SAS) aflora principalmente a leste do Rio Pinheiros e do Canal do Jurubatuba, enquanto o Sistema Aquífero Cristalino (SAC) se destaca a oeste da ARC-Jurubatuba.

O pacote sedimentar é muito heterogêneo, apresentando lentes ou camadas descontínuas de areias grossas, médias e finas, intercaladas com corpos argilosos ou formando misturas em proporções variadas (Rocha, 1989).

Conforme apresentado por DAEE/SERVMAR (2008), a porção sedimentar pode atingir até 150 m de espessura a oeste da represa Guarapiranga. Por sua vez, nos locais situados entre as represas Guarapiranga e Billings, verificam-se menores espessuras de sedimentos que variam entre cerca de 30 m e 60 m.

Próximo a margem direita do Canal do Jurubatuba, observa-se, de forma brusca, valores expressivos de profundidade dos sedimentos, chegando a até 96 metros. Essa variação brusca de espessura provavelmente está relacionada ao condicionamento geológico estrutural determinado pelo Embasamento Cristalino.

No setor norte/nordeste da ARC-Jurubatuba verifica-se a ocorrência de padrões distintos de espessuras. Nas proximidades do rio Pinheiros, a espessura da camada sedimentar é menor, atingindo até valores próximos de 50 m. No entanto, em áreas adjacentes e mais próximas à borda leste/nordeste da área de estudo, ocorrem valores de espessura bem mais elevados, chegando até a 125 m. Estas características também devem ter correlação com o modelo geológico estrutural da região.

Ressalta-se que, na região central/leste da ARC-Jurubatuba, existe poço com espessura sedimentar de 250 m, revelando-se como sendo a maior espessura de sedimentos observada na região. Este poço está bem próximo à seção M-M',

representativa do modelo de basculamento relacionado a geologia estrutural regional.

6.2.2 Sistema Aquífero Cristalino

Conforme antigo DAEE (1975), o Sistema Aquífero Cristalino (SAC) é constituído por duas unidades hidrogeológicas características. A primeira, o aquífero do manto de intemperismo, de natureza livre, heterogêneo e anisotrópico, com porosidade intergranular. A segunda, o Sistema Aquífero Cristalino (SAC) propriamente dito, onde a água circula através dos lineamentos estruturais como falhamentos, juntas associadas e fraturas abertas da rocha sã, caracterizando o aquífero como livre a semiconfinado, heterogêneo e anisotrópico.

Rocha *et al.* (1989) observaram, em relação ao Sistema Aquífero Cristalino (SAC), um sistema aquífero mais extenso, correspondente ao manto de alteração das rochas cristalinas pré-cambrianas. As espessuras são bem desenvolvidas, podendo atingir uma centena de metros. A zona de transição da rocha sã, normalmente, apresenta permeabilidade mais elevada.

O Sistema Aquífero Cristalino (SAC) aflora, com maior predominância, na porção oeste da área, configurando uma topografia irregular, relacionada à maior resistência ao aplainamento, característica das rochas ígneas/magmáticas e à ocorrência de falhas, associadas à reativação de antigas zonas de cisalhamento do embasamento. Segundo Rocha *et al.* (1989), a topografia do substrato cristalino apresenta-se acidentada na forma de *horts* e *grabens*, originando sub-bacias, janelas e ramificações laterais. Na porção leste, o Sistema Aquífero Cristalino (SAC) apresenta-se sob os sedimentos da bacia e a camada alterada da rocha cristalina possui espessura variável de 10 m até 70 m.

6.2.3 Geologia Estrutural aplicada à Hidrogeologia

A natureza estrutural do terreno na área de estudos, que é constituída de um aquífero fraturado em parte recoberto por um aquífero sedimentar, configura-se como fator determinante para a compreensão e concepção de um modelo hidrogeológico conceitual de fluxos subterrâneos. As cotas topográficas na área de

estudo variam entre 743 m e 853 m, sendo que, no setor leste, o relevo se apresenta com feições mais planas, e no setor oeste, as feições são mais acidentadas. Essa diferença se relaciona justamente ao afloramento de rochas sedimentares e cristalinas na superfície, respectivamente.

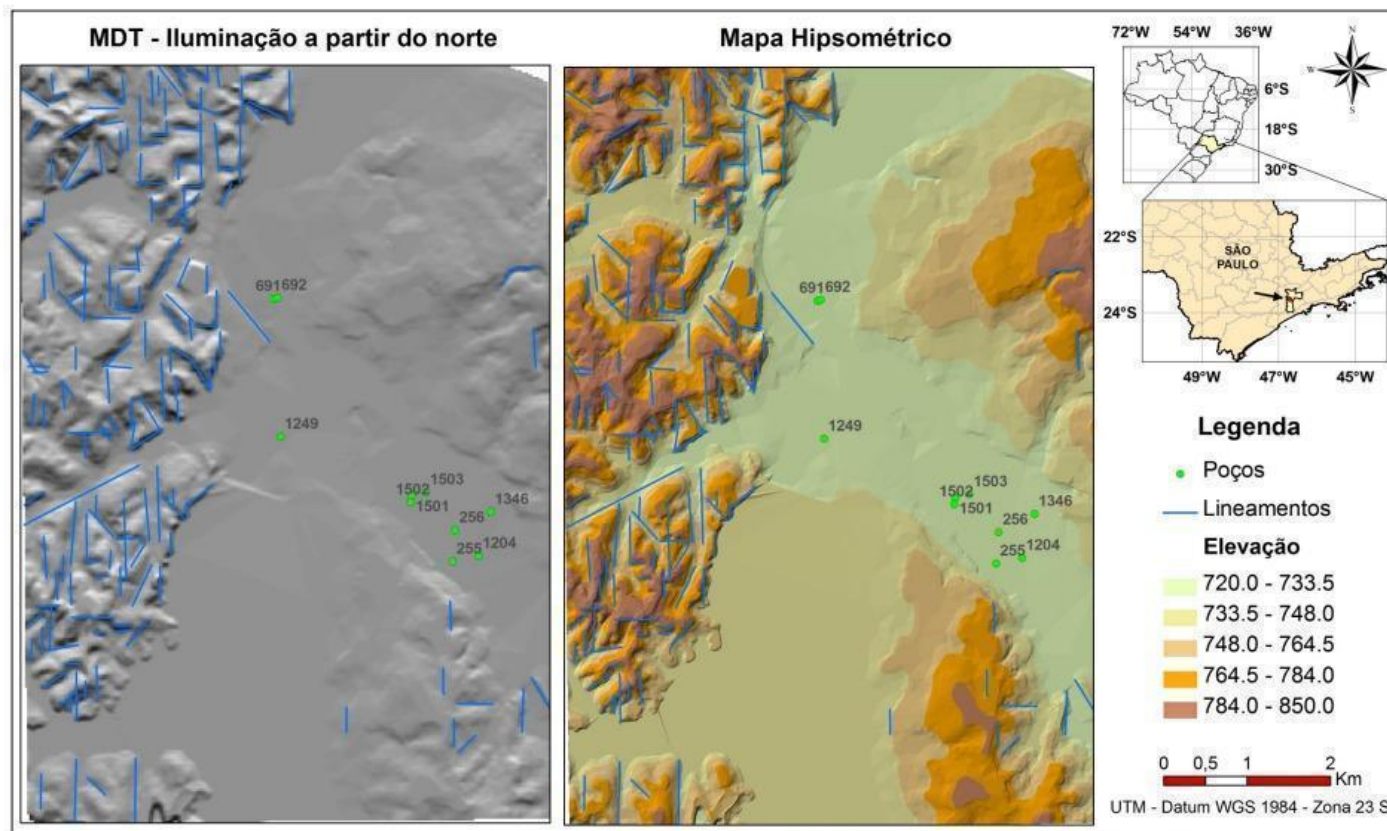
Dos vários estudos acerca da geologia estrutural correlacionáveis ao modelo hidrogeológico conceitual da área de estudos, cabe destacar principalmente FIUME (2013), FERNANDES *et al.* (2016), PINO (2019) e NASCIMENTO (2023).

FIUME (2013) realizou uma detalhada investigação da geologia estrutural da região, a fim de elaborar um modelo conceitual da rede de fraturas das rochas que compõem o Embasamento Cristalino. Analisou lineamentos em escala regional considerando a área de afloramento do Complexo Embu. Segundo esta autora, as direções principais são: N30-50W, N10W-N10E, N20-40E e N60-90E; sendo que as frequências de ocorrências dessas direções são bastante próximas, existindo um pequeno predomínio das direções NW e ENE. A partir dos lineamentos em escala regional apresentados por FIUME (2013), foi elaborada a **Figura 41**, focando os lineamentos especificamente para a área da ARC-Jurubatuba.

Observa-se na região mais a oeste/noroeste uma tendência de lineamentos com direções N20-40E e N10W. Já na porção mais a leste/nordeste, ocorrem os lineamentos com direções N20-40E e N30-50W. Verifica-se, ainda, um importante lineamento próximo ao Canal do Jurubatuba, com direção que se assemelha à direção do rio Pinheiros. Mais ao sul da ARC-Jurubatuba, no local situado entre as represas Billings e Guarapiranga, ocorrem lineamentos com direções W-E.

FERNANDES *et al.* (2016), a partir de um mapeamento de fraturas em pedreiras ao sul de São Paulo, efetuaram medições das atitudes dos principais sistemas de fraturas e detalharam a geologia estrutural do Sistema Aquífero Cristalino (SAC), de modo a identificar as atitudes de fraturas com maior favorabilidade de fluxos no Embasamento Cristalino, correlacionáveis às possíveis condições de fluxos de contaminantes na região da ARC-Jurubatuba.

Figura 41 - Lineamentos fotointerpretados em parte da ARC-Jurubatuba.

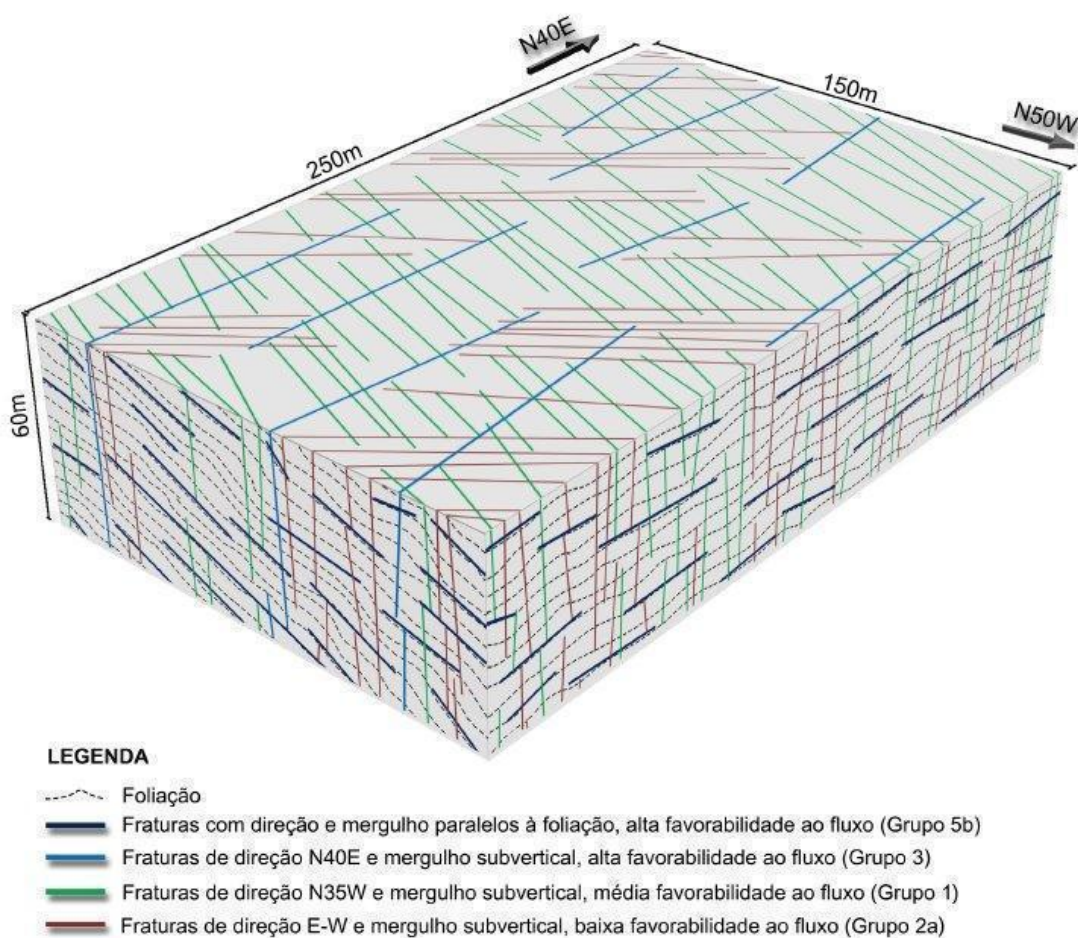


Fonte: Fiume (2013).

Conforme FERNANDES *et al.* (2016), as fraturas de direção N40E e mergulho subvertical, bem como as fraturas com direção e mergulho baixo, paralelos à foliação, são as fraturas de mais alta favorabilidade aos fluxos subterrâneos.

O bloco diagrama apresentado na **Figura 42** ilustra as condições de favorabilidade de fluxos subterrâneos para os principais sistemas de fraturas determinados por FERNANDES *et al.* (2016).

Figura 42 - Bloco Diagrama dos principais sistemas de fraturas e favorabilidade de fluxos subterrâneos em pedreiras na região sul do Município de São Paulo.



Fonte: FERNANDES *et al.* (2016)

PINO (2019) estudou aspectos estruturais e hidráulicos do aquífero fraturado, com manto inconsolidado sobreposto às rochas cristalinas sãs do Complexo Embu em local situado nas redondezas do rio Pinheiros e Canal do Jurubatuba.

Conforme PINO (2019), localmente os trechos com transmissividade mais elevada estão relacionados ao gnaiss fino com famílias de fraturas A sub-horizontais e famílias de fraturas B N64/27, mergulhando para SE, ou à intercalação de gnaiss fino, pegmatito e gnaiss bandado e combinação das famílias A e B, indicando que o fluxo não é necessariamente controlado por uma única orientação de estruturas, mas que seu potencial pode ser aumentado diante da associação de mais de uma família de fraturas. Algumas das famílias de fraturas identificadas foram ainda relacionadas a estruturas descritas em trabalhos regionais.

NASCIMENTO (2023) realizou um estudo de detalhe em área local (de aproximadamente 100.000 m²), no município de Diadema/SP. Contudo, a escala do referido estudo é de relevância para o presente estudo, uma vez que foi objeto de pesquisa o Sistema Aquífero Cristalino (SAC) representado pelas unidades geológicas do Complexo Embu, tendo sido realizada uma análise de lineamentos superposta ao modelo digital de elevação (MDE) e observado, em um contexto mais amplo, outros estudos realizados no Complexo Embu, tais como: Alves (2008); Fernandes *et al.* (2016); e Pino (2021). **Quadro 15**, obtido em NASCIMENTO (2023), compila as principais características de atitude e favorabilidade de fluxos subterrâneos determinados nesses estudos.

Com as informações do bloco diagrama (**Figura 42**) e do **Quadro 15**, é válido afirmar que a maior favorabilidade de fluxos no Sistema Aquífero Cristalino (SAC) ocorre nos sistemas de fraturas N-S e NE-SW, com mergulhos variáveis tanto em inclinação (alta, média e baixa) quanto em sentido (tanto para SE quanto para NW).

Cabe observar que essa variação de sentido dos planos de mergulhos, bem como das inclinações, favorecem a interconexão de fraturas e, consequentemente, os fluxos subterrâneos.

É importante também destacar que as fraturas de média favorabilidade de fluxos de direção NW-SE e mergulho subvertical identificadas por FERNANDES *et al.* (2016), as quais se mostram perpendiculares aos principais sistemas de fraturas, são condicionantes importantes para a interconexão de fraturas e, consequentemente, para os fluxos subterrâneos.

Quadro 15 - Contexto estrutural e favorabilidade de fluxos subterrâneos do Complexo Embu.

Grupo	Direção	Mergulho (Ângulo / Direção)	Importância para o fluxo
Alves, 2008			
1	sub-horizontal	<25 / -	Baixa
2A	N-S	36 / W	Alta
2B	N-S	75 / E	Alta
3A	NE-SW	66 / NW	Alta
3B	NE-SW	36 / SE	Alta
4	WNW-ESE	78 / NE	Baixa
Fernandes et al., 2016			
NNE to NE/baixo	NNE-SSW	10 to 40 / NNE to NE	Alta
E-W to ENE/médio	E-W	30 to 60 / E-W to WNW	Baixa
E-W to ENE/vertical*	E-W	>60 / E-W to ENE	Média
NW to NNW/vertical*	NW-SE	>60 / NW to NNW	Média
NE/vertical*	NE-SW	>60 / NE	Média
Pino, 2021			
A	sub-horizontal	- / -	Alta
B	NE-SW	37 / SE	Alta
C	NNE-SSW	37 to 49 / SE	Baixa
D	NW-SE	80 to 86 / NE to SW	Baixa
E	NE-SW	71 to 90 / SE	Baixa

*: Grupos identificados em afloramentos

Fonte: Nascimento (2023)

6.2.4 Síntese do conhecimento dos parâmetros hidráulicos subterrâneos na ARC-Jurubatuba

As informações de parâmetros hidráulicos apresentados em diferentes trabalhos, focando em dados de coeficiente de transmissividade, condutividade hidráulica, vazão e vazão específica, essenciais para a melhor compreensão da hidrodinâmica dos aquíferos de interesse, foram reunidos e são apresentados a seguir.

Hirata e Ferreira (2001) trazem dados de vazão e vazão específica conforme as unidades geológicas tanto para o Sistema Aquífero Sedimentar (SAS), quanto para o Sistema Aquífero Cristalino (SAC) para a Bacia Hidrográfica do Alto Tietê.

Os trabalhos de Hirata e Ferreira (2001) e DAEE/SERVMAR (2008), consideram valores de coeficiente de transmissividade para o Sistema Aquífero Sedimentar (SAS) e Sistema Aquífero Cristalino (SAC) conforme obtido por DAEE (1975). Por sua vez, DAEE/SERVMAR (2008) obtiveram, também, parâmetros por meio de testes de bombeamentos realizados no projeto.

O estudo de Pede (2004) fornece dados relevantes a partir da caracterização da condutividade hidráulica da porção alterada do Embasamento Cristalino na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP).

O estudo FABHAT/SERVMAR (2012) traz informações em relação à Bacia do Alto Tietê como um todo a partir de informações prévias, somadas a dados obtidos por meio de dados de poços do acervo do antigo DAEE disponibilizados para o projeto.

Barbosa (2015) levantou dados de condutividades hidráulicas obtidos por meio de *slug* e *bail tests* conduzidos por empresas de consultoria em trabalhos locais, enquanto Pino (2019), em estudo realizado com poços multiníveis na região do Jurubatuba, apresenta valores de coeficiente de transmissividade para diferentes profundidades.

O **Quadro 16** apresenta os valores de transmissividade para as diferentes unidades aquíferas. Em uma comparação entre o Sistema Aquífero Sedimentar (SAS) e o Sistema Aquífero Cristalino (SAC), verifica-se que o SAC apresenta valores mais significativos de coeficiente de transmissividade.

Observa-se de modo geral nos dados relativos a condutividade hidráulica (**Quadro 17**), valores mais elevados para a região de rocha alterada do SAC, destacando valores como $2,1 \times 10^{-2}$ cm/s e $9,62 \times 10^{-2}$ cm/s, apresentados em Pede (2004).

É importante observar que, embora exista expectativa corrente de que a faixa de rocha alterada seja mais permeável, tanto por acumular porosidade granular e fraturada, quanto por ser zona de contato entre tipo de rochas, nos ensaios realizados por Barbosa (2015) os resultados não corroboraram com esta

interpretação, observando-se uma condutividade hidráulica com média similar para rochas sedimentares e a zona de alteração.

Quadro 16 - Dados de coeficiente de transmissividade em unidades aquíferas na ARC-Jurubatuba.

Fonte de consulta	Sistema Aquífero Sedimentar (SAS) (m ² /s)	Zona de alteração (m ² /s)	Sistema Aquífero Cristalino (SAC) (m ² /s)
Hirata e Ferreira (2001)	Sem Informação	Sem Informação	Sem Informação
Pede (2004)	Sem Informação	Sem Informação	Sem Informação
DAEE/SERVMAR (2008)	1,70x10 ⁻⁶ a 7,40x10 ⁻⁴	Sem Informação	5,79x10 ⁻⁴
FABHAT/SERVMAR (2012)	Formação São Paulo: 1,16x10 ⁻⁵ Formação Resende: 5,79x10 ⁻⁵	Sem Informação	Rochas Granitóides: 2,78x10 ⁻⁴ Rochas Metassedimentares: 1,16x10 ⁻⁵
Barbosa (2015)	Sem Informação	Sem Informação	Sem Informação
Pino (2019)	1,45x10 ⁻⁵ a 5,11x10 ⁻⁵	8,9x10 ⁻⁶ a 7,01x10 ⁻⁷	4,36x10 ⁻⁴ a 1,2x10 ⁻⁶

Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto - FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

Quadro 17 - Dados de condutividade hidráulica em unidades aquíferas na ARC-Jurubatuba.

Fonte de consulta	Sistema Aquífero Sedimentar (SAS) (cm/s)	Zona de alteração (cm/s)	Sistema Aquífero Cristalino (SAC) (cm/s)
Hirata e Ferreira (2001)	Sem Informação	Sem Informação	Sem Informação
Pede (2004)	Sem Informação	Método de Hvorslev: 2,23x10 ⁻⁵ a 2,1x10 ⁻² Método de Bower & Rice: 4,85x10 ⁻⁴ a 9,62x10 ⁻²	Sem Informação
DAEE/SERVMAR (2008)	7,24x10 ⁻⁵	1,0x10 ⁻⁴ a 1,0x10 ⁻³	1,0x10 ⁻⁴
FABHAT/SERVMAR (2012)	Sem Informação	Sem Informação	Sem Informação
Barbosa (2015)	1,0x10 ⁻⁷ a 1,0.10 ⁻¹	1,0x10 ⁻⁶ a 1,0x10 ⁻²	1,0x10 ⁻⁷ a 1,0x10 ⁻⁴
Pino (2019)	Sem Informação	Sem Informação	Sem Informação

Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto - FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

Em relação aos dados de vazão e vazão específica (**Quadro 18 e Quadro 19**), verifica-se valores superiores de ambos para a Formação Resende (com maior área de afloramento na região de estudo) em comparação com a Formação São Paulo.

No que diz respeito ao Sistema Aquífero Cristalino (SAC), as rochas metassedimentares apresentam maiores valores tanto de vazão quanto de vazão específica em comparação aos granitóides.

Quadro 18 - Dados de vazão em unidades aquíferas na ARC-Jurubatuba.

Fonte de consulta	Sistema Aquífero Sedimentar (SAS) (m ³ /h)	Zona de alteração (m ³ /h)	Sistema Aquífero Cristalino (SAC) (m ³ /h)
Hirata e Ferreira (2001)	Formação São Paulo: 9,51 Formação Resende: 15,24	Sem Informação	Rochas Granitóides: 9,07 Rochas Metassedimentares: 17,48
Pede (2004)	Sem Informação	Sem Informação	Sem Informação
DAEE/SERVMAR (2008)	7,4	Sem Informação	9,5
FABHAT/SERVMAR (2012)	Formação São Paulo: 7,0 Formação Resende: 8,0	Sem Informação	Granitóides: 8,0 Metassedimentares: 10,0
Barbosa (2015)	Sem Informação	Sem Informação	Sem Informação
Pino (2019)	Sem Informação	Sem Informação	Sem Informação

Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto - FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

Quadro 19 - Dados de vazão específica em unidades aquíferas na ARC-Jurubatuba.

Fonte de consulta	Sistema Aquífero Sedimentar (SAS) (m³/h/m)	Zona de alteração (m³/h/m)	Sistema Aquífero Cristalino (SAC) (m³/h/m)
Hirata e Ferreira (2001)	Formação São Paulo: 0,48 Formação Resende: 0,91	Sem Informação	Rochas Granitóides: 0,2 Rochas Metassedimentares: 1,35
Pede (2004)	Sem Informação	Sem Informação	Sem Informação
DAEE/SERVMAR (2008)	0,704	Sem Informação	0,196
FABHAT/SERVMAR (2012)	Formação São Paulo: 0,254 Formação Resende: 0,5	Sem Informação	Rochas Granitóides: 0,494 Rochas Metassedimentares: 0,495
Barbosa (2015)	Sem Informação	Sem Informação	Sem Informação
Pino (2019)	Sem Informação	Sem Informação	Sem Informação

Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto - FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

6.3 Perfisagens geofísicas

Foram obtidas informações de perfisagens realizadas em poços no âmbito dos trabalhos DAEE/SERVMAR (2008) e em trabalhos acadêmicos relacionados ao grupo de pesquisa do CEPAS (Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas) da Universidade de São Paulo (USP). No presente trabalho, também foram realizadas perfisagens em 5 poços, conforme visto no Capítulo 5.2. Os itens seguintes detalham estes trabalhos.

6.3.1 Perfisagens efetuadas em estudos anteriores

Nos trabalhos desenvolvidos por DAEE/SERVMAR (2008) o imageamento acústico realizado em seis poços (691, 692, 1501, 1502, 1503 e 1249) permitiu verificar estruturas como xistosidade, bandamento e fraturas, ocasionalmente representativas das falhas que controlam os fluxos subterrâneos no Sistema Aquífero Cristalino (SAC).

A verificação dessas estruturas orientou o posicionamento de obturadores para a definição de sentidos de fluxo e amostragens de água em trechos isolados de poços.

Os compartimentos estruturais observados ao longo de perfis de poços foram investigados, principalmente, sob as seguintes ocorrências ou características: *trends* direcionais de fraturas, mergulhos de fraturas, paralelismo ou discordância das fraturas com relação à xistosidade ou bandamento e densidade do fraturamento.

As fraturas foram identificadas por feições associadas às alterações da rocha a partir da superfície de fraturas. Essas feições apresentaram espessuras de 1 mm até 10 cm que podem indicar relações de maior ou menor abertura, porém não permitindo definir tamanhos de abertura.

Associando-se o imageamento acústico a descrições de perfis litológicos, foi possível observar vários tipos de texturas: xistosa, foliada, maciça e bandada. A xistosidade, presente nos trechos de textura xistosa, caracteriza-se por grande variabilidade de direções, mas os mergulhos, em geral, são baixos, variando de 10° a 50°.

Nos trechos mais rasos de cada poço há um predomínio de fraturas paralelas à xistosidade e, conseqüentemente, de baixo ângulo. No trecho inferior de cada poço, os mergulhos das fraturas tendem a ser intermediários (45° a 65°) a elevados (60° a 90°), no entanto, também se observam fraturas de baixo ângulo. Esse predomínio de fraturas de baixo ângulo, na porção rasa e, de maior ângulo, na porção mais profunda, apresentou-se mais evidente no Poço 692.

Nos poços 691, 1502 e 1503, também ocorre um predomínio de fraturas de baixo ângulo na porção rasa e de maior ângulo na porção mais profunda; no poço 1249, foram observadas fraturas apenas nas porções mais rasas, também com baixos mergulhos; no poço 1501, foram obtidos dados apenas após os 80 m de profundidade e, foram observadas fraturas com mergulhos médios ao longo de todo o trecho perfilado.

Deve-se considerar que, próximo à superfície, o alívio de carga e o maior grau de alteração, tende a destacar ou formar fraturas de baixo ângulo, que tendem a ser desenvolvidas preferencialmente ao longo das estruturas mais antigas, ou seja, em planos de foliação, xistosidade ou bandamento.

De acordo com essas informações, em termos hidráulicos, isto pode implicar em que, nas porções mais rasas, o fluxo se dê preferencialmente ao longo dessas estruturas de ângulo baixo, implicando em uma anisotropia para o aquífero fraturado neste setor.

Assim sendo, os contaminantes tendem a ser transportados para distâncias mais longas na direção horizontal, tendendo a acompanhar o mergulho dessas estruturas mais antigas.

Por esse motivo, o conhecimento dos *trends* dessas estruturas e de sua variação também é importante, podendo influenciar na anisotropia de fluxos subterrâneos. Em contraponto a essa observação, tem-se os poços que servem de canalização vertical, interligando as zonas superiores às inferiores do aquífero.

Um aspecto estrutural importante, favorável a um incremento no fluxo de água, é a bimodalidade dos mergulhos e direções observadas nos poços 691 (entre 110 m e 125 m ocorrem mergulhos de 10° a 30° e de 50° a 75°) e 692 (entre 130 m e 180m ocorrem mergulhos de 10° a 30° e de 50° a 70°). Isso deve proporcionar melhores condições para a circulação da água, pois, provavelmente, possibilita uma maior quantidade de intersecções entre fraturas.

Os poços 691 e 692 apresentaram a compartimentação tectônica mais evidente dentre os quatro poços testados com obturadores, especialmente o poço 691. Em função disso, esses poços foram priorizados para a aplicação de testes com obturadores, detalhados no item subsequente deste relatório, buscando testar grandes compartimentações conforme descritas no **Quadro 20** e **Quadro 21**.

Um detalhamento de dados estruturais, com levantamentos de atitudes de fraturas, é de grande valia para o conhecimento do comportamento dos fluxos de água no Sistema Aquífero Cristalino (SAC). O comportamento de estruturas existentes pode ser compreendido em sua associação com eventos tectônicos antigos e recentes e este entendimento permite associar as fraturas de eventos recentes a uma maior representatividade para o fluxo de água.

Quadro 20 - Compartimentação do poço 691 em intervalos com características estruturais distintas

Poço	Profundidade	Direções das fraturas abrangidas
691	51,4 m	NE
	95,3	NE e NW
	110,5	NW

Fonte: DAEE/SERVMAR (2008).

Quadro 21 - Compartimentação dos perfis dos poços estudados em intervalos com características estruturais distintas.

Nº Poço	Profundidade	Fraturas abrangidas	Fraturas espessas
692	46,3 m - 110 m	Direção principal abrangida: NW	N26-44W/30SW; N14-22E/20SE; N7-18E/10NW; N36E/16NE
	110 m - 198 m	Direção principal abrangida: NW	N36W/28SW; N9E/42NW; N60-65W/31SW a 38SW; N30W/51NE; N37E/62SE.
1249	37,4 m - 60 m	Fraturas se relacionam sobretudo com a xistosidade	Não foi constatada nenhuma fratura espessa
	60 m -84,5 m	Ocorrem fraturas menos proeminentes	N8W/36SW; N85W/29SW
	84,5 m -120 m	Fraturas mais espessas são paralelas a foliação	N56E/43NW; N20E/36NW; N67E/40NW; N73E/47NW
	120 m -180,6 m	Menor densidade de fraturas nesse intervalo	N42W/52NE; N51W/51NE
1501	79 m - 108 m	Maior densidade de fraturas, porém com menores espessuras.	N25-65E/(25-60SE)
	108 m -146 m	Menor densidade de fraturas, porém com maiores espessuras.	N76/28SE; N69W/30SW; N18E/54SE; N35W/32NE.
1502	76 m - 90 m	N10-40W/20-50NE	Nenhuma fratura espessa
	90 m - 119 m	Poucas fraturas neste intervalo	N28W/15NE
	120 m - 178 m	Varia continuamente N30-80E (20-70º)	N25E/51NW
1503	120 m - 135 m	Grande presença de fraturas espessas	N15W/4SW; N26E/21NW; N34W/13NE; N33E/35SE
	135 m - 175 m	Baixa densidade de fraturas	Nenhuma fratura espessa
	175 m - 176 m	Textura de transição e xistosa.	N26W/45NE

Fonte: DAEE/Servmar (2008).

De modo geral, em análise conjunta de todas as fraturas de todos os poços, observa-se a direção entre N30E e N65E predominante, mas também ocorrem os trends N10W-N20E, N35-50W e N65-75W.

Dos resultados das perfilagens realizadas por DAEE-SERVIMAR (2008) é importante destacar que as direções de fraturas são coincidentes com as principais direções encontradas nos trabalhos de levantamentos de sistemas de fraturas regionais (ALVES, 2008 e FERNANDES *et al.*, 2016).

Quanto às pesquisas acadêmicas, podem ser citados os estudos de Ribeiro (2012), Fiume (2013), Pino (2019) e Barbosa (2020), descritos a seguir. Esses

trabalhos foram desenvolvidos por pesquisadores da Universidade de São Paulo (USP) e vinculados, também, ao Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas (CEPAS).

Como exemplo, Ribeiro (2012) realizou em seu estudo perfilações geofísicas em 5 poços tubulares (255, 256, 1204, 1346 e 1401) na região do Canal do Jurubatuba, com o intuito de caracterizar a atitude das fraturas e o sentido do fluxo da água subterrânea.

Nesse contexto, foram realizadas pesquisas utilizando-se métodos para determinar os seguintes parâmetros: temperatura (T), condutividade elétrica (CE), calibre de poço (cáliper), irradiação gama natural (gama), imageamento óptico (OTV), imageamento acústico (ATV) e velocidade de fluxo (*flowmeter*).

Foi observada uma boa correlação entre os perfis de irradiação gama e os dados litológicos dos poços disponíveis no banco de dados da SP-Águas.

Ribeiro (2012) destaca a presença de um contraste entre os dados obtidos nas regiões mais rasas (parte revestida do poço e composta por sedimentos e/ou rocha alterada) e a região mais profunda (composta por gnaisses, pegmatitos, granitos e xistos). Até mesmo na porção sedimentar, foi possível verificar pequenas diferenças na resposta gama em locais com camadas mais arenosas ou mais argilosas.

O **Quadro 22** apresenta as estruturas identificadas nos poços estudados (255, 256, 1204, 1346 e 1401) e as fraturas hidráulicamente ativas indicadas nos poços 255, 256, 1204, obtidas por meio dos perfis de vazão, condutividade elétrica e de temperatura.

Quadro 22 - Grupos de estruturas identificadas e fraturas hidráulicamente ativas em poços estudados nas redondezas do Canal Jurubatuba.

Estruturas Observadas (Poços 255, 256, 1204, 1346 e 1401)	Fraturas Hidráulicamente Ativas (Poços 255, 256, 1204)
NNE-SSW/ $\leq 30^\circ$ NW ou SE	Paralelas a foliação
NE30-50E/ $>30^\circ$ NW e SE	N40-60E/30-70 NW
N0-20W/mergulhos variados para NE e SW	N0-10W/30-70 NE
N80-90W/ $>70^\circ$ para NE e SW	N80-90/70 NE

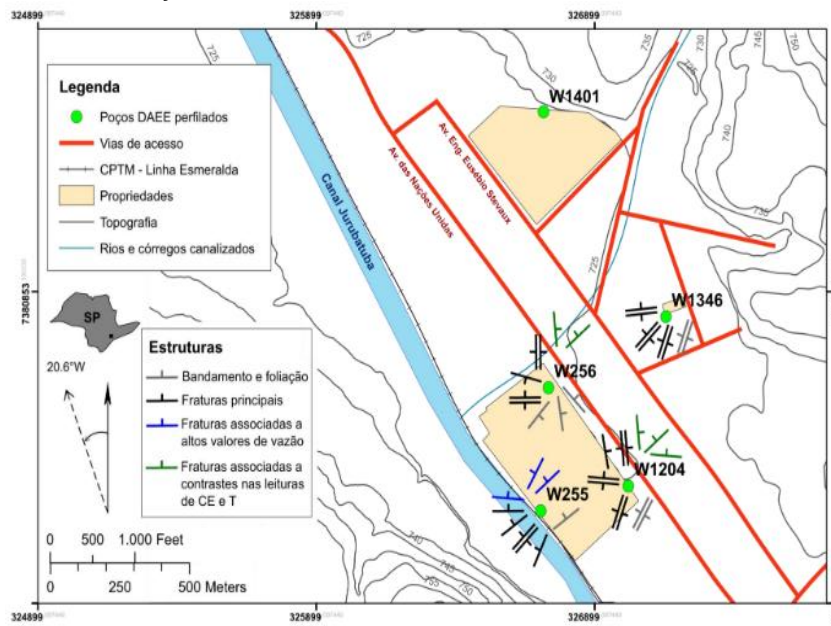
Fonte: Ribeiro (2012).

Ribeiro (2012) constatou a presença mais significativa de fraturas de alto ângulo ($>70^\circ$) nas porções mais profundas dos poços, concordante com o modelo conceitual proposto inicialmente em DAEE/SERVMAR (2008) e L'Apicciarella (2009).

A **Figura 13** resume as principais estruturas observadas nos poços estudados, destacando-se direções de bandamento e foliação, fraturas principais e fraturas associadas a altos valores de vazão.

É importante ressaltar que duas direções de fraturas, associadas a alta favorabilidade de fluxos subterrâneos, de direção NE (Ribeiro, 2012), corroboram com Fernandes et al (2016). Já a terceira fratura associada a alta favorabilidade de fluxo, de direção W, corrobora com os principais lineamentos indicados por Fiume (2013), na porção sul da área de estudos.

Figura 43 - Mapa de estruturas observadas em poços nas vizinhanças do Canal Jurubatuba.



Fonte: Ribeiro (2012).

Por sua vez, Fiume (2013) realizou posteriormente investigação estrutural detalhada da área e utilizou-se de métodos de perfilagem geofísica. Aplicou os seguintes métodos em quatro poços profundos (255, 256, 1204 e 1346): temperatura (T), condutividade elétrica (CE), calibre de poço (cáliper), irradiação gama natural (gama), imageamento óptico (OTV), imageamento acústico (ATV) e velocidade de fluxo (*flowmeter*). Além destes, os dados de perfilações acústicas realizadas no projeto DAEE/Servmar (2008) nos poços 691, 692, 1249, 1501, 1502 e 1503 também foram utilizados por Fiume (2013).

Fiume (2013) verificou que as fraturas paralelas à foliação constituem um padrão mais definido que o observado em dados do projeto DAEE/SERVMAR (2008). Constatou, também, um predomínio de direções para NNE e NE e, subordinadamente, as direções NW e NNW.

Os mergulhos variam desde subhorizontais até 70°, sendo os valores entre 10-40° os mais frequentes. A seguir estão descritos os grupos de fraturas, por ordem de importância:

- Grupo de direção E-W a ENE com mergulho superior a 60°: ocorre nos poços 255, 256, 1204, 1346 com mergulho para N e com mergulho para S no

poço 1503. Nos poços 255 e 256, a direção está próxima de N70-90E e, nos poços 1346 e 1503, a direção é de N60-80E. No poço 1204, por sua vez, a direção é WNW;

- Grupo de direção NE e mergulho superior a 60°: foram verificados nos poços 691 e 692, com direção de N30-60E. Também está presente com direção de N10-40E, mas em menor proporção nos poços 1204 e 1502.
- Grupo de direção E-W a WNW com mergulho médio: este grupo foi verificado nos poços 256 e 1204, apresentando mergulhos entre 30° e 65° com direções variando entre N60-90W e N75-90W, respectivamente;
- Grupo de direção N-S a NNW com mergulho superior a 60°: este grupo ocorre no poço 1204, apresentando direção de N0-15W, e também no 692 porém com menor expressão; e
- Grupo de direção NW com mergulho entre 50° e 80°: este grupo foi observado tanto no poço 691 quanto no 692. No poço 691 a direção é predominantemente de N40-65W, e no poço 692, a direção é de N20-40W.

Em relação a favorabilidade de fluxos subterrâneos, Fiume (2013) destaca que, a partir de dados observados em afloramentos geológicos e dos poços, pode ser considerado que os grupos NW a NNW, E-W e NE, de mergulho alto, podem ser importantes para os fluxos subterrâneos, entretanto, não foi possível estabelecer a hierarquia entre eles.

Outra constatação efetuada por Fiume (2013) foi a relação com os esforços atuais, de modo que as fraturas provavelmente mais transmissíveis de águas subterrâneas estão de acordo com um regime de esforços atual compressivo, correspondendo ao grupo de direção NNE-NE (associada à foliação). As fraturas com maiores vazões do poço 1204 são as de direção N-S a NNE, com mergulho menor que 15°, compatíveis com regime tectônico compressivo.

Já no poço 256, os maiores valores de vazão foram verificados em fraturas de direção N-S a NE com mergulho entre 50-60°, que podem ser reativadas por diversos campos de esforços.

Posteriormente, Pino (2019) apresenta novas perfilagens para poços anteriormente já estudados por DAEE/SERVMAR (2008), sendo eles: 1501, 1502 e 1503. As perfilagens realizadas foram de temperatura (T), condutividade elétrica (CE), calibre de poço (cáliper), irradiação gama natural (gama), imageamento óptico (OTV), imageamento acústico (ATV) e velocidade de fluxo (*flowmeter*).

Os dados de perfilagem geofísica na pesquisa de Pino (2019), confirmaram estruturas já identificadas pela autora em testemunhos de sondagem. Foram verificadas estruturas com mergulhos entre 0-40° predominantemente paralelos à foliação do gnaiss bandado e estruturas com mergulhos entre 40-65° principalmente na litologia de gnaiss fino. As perfilagens também foram essenciais na caracterização de zonas de fraturamento mais expressivas, conforme mostradas no **Quadro 23**.

Quanto à essas zonas Pino (2019), afirma que foi:

“[...] observada grande perda de água de circulação da perfuração, sugerindo presença de relevante fluxo de água subterrânea, posteriormente confirmada através de ensaios com obturadores, revelando altos valores de transmissividade...” (PINO, 2019, p 91).

Esse fato corrobora com o modelo conceitual proposto por DAEE/SERVMAR (2008) e L'Apicciarella (2009), nos quais se aponta que, em sistemas de fraturas nas zonas rasas do aquífero e de baixo mergulho, há boa favorabilidade de fluxo da água.

Resumidamente, a partir dos dados de perfilagem geofísica, somados a dados de testemunho e descrições de afloramentos, Pino (2019) caracterizou a presença de 5 famílias de fraturas no total (**Quadro 23**).

Quadro 23 - Zonas de fraturamento expressivas e famílias de fraturas na ARC-Jurubatuba.

Zonas de fraturamento expressivas	
39-40 m	S72W/82NW e S14E/25SW
45-46 m	N48E/16SE
49,3-50 m	N15E/17SE e S52E/15SW
53-53,3 m	N35W/40NE
Famílias de Fraturas	
A	sub-horizontal
B	N64E/37SE
C	N0-35/37-49 SE
D	N45-38W/80-86 NE ou SW

Fonte: Pino (2019).

A partir de ensaios com obturadores, Pino (2019) verificou que os trechos com maior relevância para os fluxos de águas subterrâneas envolvem associações das famílias de fratura A e B. Apesar de não ter sido possível a obtenção de informação a respeito das famílias D e E nos ensaios, estas podem se relacionar às estruturas NNW a NNE com alto ângulo de mergulho citadas por Fiume (2013) e que por sua vez possuem importância intermediária ao fluxo da água subterrânea regional. Pino (2019) também conclui que o fluxo não é necessariamente função de uma única família de fraturas, podendo a favorabilidade ser intensificada quando ocorre a associação de diferentes famílias.

Subsequentemente, Barbosa (2020) realizou as seguintes técnicas de perfilagem geofísica nos poços 255, 256 e 1204: câmera, calibre de poço (cáliper), irradiação gama natural (gama), imageamento óptico (OTV), imageamento acústico (ATV), velocidade de fluxo (*flowmeter*) e MUST (*Mobile Unit for Sampling and Testing*). Como os poços 255 e 256 apresentaram resultados parecidos, Barbosa (2020) detalhou somente os resultados do poço 255.

A partir da análise dos dados de perfilagem óptica e acústica, Barbosa (2020) identificou um total de 234 fraturas. O principal grupo observado apresenta mergulho baixo ($<30^\circ$) com direção para N330°. Também se verificou um grupo de fraturas com direção média de N350° com mergulho alto ($>60^\circ$).

Os dados de *flowmeter*, considerando tanto fluxo ambiente quanto fluxo induzido, permitiram a inferência de que a principal zona produtora de água neste poço ocorre entre as profundidades de 156 e 162 m.

Já em relação aos dados do poço 1204, Barbosa (2020) identificou 266 fraturas no total. Nesse poço, as fraturas são predominantemente sub-horizontais com mergulho baixo ($<30^\circ$), mergulhando majoritariamente de NNE a ESE. Os dados de *flowmeter* revelaram a existência de ao menos 3 zonas hidráulicamente ativas no poço 1204, sendo elas nas seguintes profundidades: 250 m, 205 m e em 124 m.

No geral, considerando todos os trabalhos de perfilagem realizados localmente, pelos pesquisadores do CEPAS, é possível reafirmar a situação proposta por FERNANDES *et al.* (2016), onde resumidamente se destacam maiores favorabilidades de fluxos subterrâneos nos sistemas de fraturas de direções NE com mergulhos sub-horizontais e sub-verticais e sistemas de fraturas relacionados às foliações.

Observa-se ainda uma concordância geral com o modelo conceitual proposto por DAEE/SERVMAR (2008) e L'Apicciarella (2009), nos quais se apontam que sistemas de fraturas nas zonas rasas do aquífero e de baixo mergulho têm boa favorabilidade de fluxo.

Por fim, cabe acrescentar que são constatados ainda sistemas de fraturas de direção aproximadamente N, observados anteriormente por FERNANDES *et al.* (2016); sistemas de fraturas de direção W, observados em lineamentos indicados por Fiume (2013); e sistemas de fraturas de direção NW, admitidos por FERNANDES *et al.* (2016) como de média favorabilidade, porém com destacada importância pela interconectividade que estes sistemas de fraturas, entrecruzados com os demais, favorece ao fluxo.

6.3.2 Perfisagens geofísicas efetuadas nesse trabalho

No presente trabalho foi realizada uma campanha de investigação por perfisagens geofísicas e coleta de amostras estratificadas (discretas) de águas subterrâneas. Os trabalhos foram desenvolvidos pela empresa Acqua Terra Geologia Ambiental Ltda e as atividades de campo tiveram início em 24 de maio de 2025 e foram concluídas em 24 de junho de 2025 (Acqua Terra, 2025a e 2025b).

Destaca-se que, previamente à execução dos ensaios mencionados, foi efetuada a retirada de equipamentos eventualmente instalados nos poços e a limpeza criteriosa dos poços. A limpeza de cada poço compreendeu inicialmente a remoção de tampa ou outro mecanismo qualquer de fechamento da boca do poço, para que fosse permitido o pleno acesso de ferramentas e equipamentos ao interior do mesmo. Em seguida foi efetuada a remoção de bombas e outros equipamentos instalados e, caso os mesmos não fossem reinstalados, foi efetuada a destinação adequada. Na sequência, foi efetuada a limpeza do poço com jateamento de água ou produtos químicos buscando remover incrustações e sedimentos, direcionando a água para local adequado e estendendo o processo até que a água retirada da captação fosse considerada adequadamente limpa e refletindo, da mesma forma, que o poço já se encontrava limpo.

A investigação foi realizada em cinco poços tubulares (números IPT 84A, 84C, 104, 85 e 320), tendo o objetivo principal de caracterizar as condições hidrogeológicas de cada poço, com foco na dinâmica de fluxo de água e na seleção de locais para a amostragem estratificada de águas das principais fraturas de cada poço (amostragem discreta), conforme apresentado no item 5.2. As atividades incluíram perfilagem geofísica (ótica, acústica e gama natural), mapeamento de fluxo com sonda HPF (*Heat Pulse Flowmeter*) e coleta de amostras de água com sonda BHFS (*Borehole Fluid Sampler*).

A metodologia empregada permitiu obter as características construtivas dos poços; o imageamento das paredes dos furos e as características das rochas atravessadas; o mapeamento das estruturas que interceptam os poços; e o

mapeamento das condições de fluxo entre os poços e o aquífero, revelando as suas características físicas e hidráulicas.

Os dados de perfilagem forneceram informações sobre a localização de estruturas geológicas (fraturas e foliações) para a interpretação do comportamento dos fluxos de águas subterrâneas. O **Quadro 24** apresenta os dados dos poços selecionados para perfilagem.

Quadro 24 - Informações acerca dos poços perfilados.

Número do poço	Profundidade (m)	Proprietário	Endereço
84A	242,0	Indústria AVON	Av. Interlagos, 4300
84C	127,0		
104	200,0	Condomínio Portolano	Av. Nossa Senhora do Sabará, 2058
85	286,0	Shopping SP Market	Av. das Nações Unidas, 22540
320	300,0	América Business Park	Av. Major Sílvio de Magalhães Padilha, 5200

Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto - FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

6.3.2.1 Caracterização de fluxos subterrâneos e amostragem estratificada

O mapeamento de fluxos com a sonda HPF constituiu subsídio básico importante para identificar as zonas transmissivas em cada poço (entradas e saídas de água), tanto em condições naturais (fluxo ambiente) quanto sob estresse hidráulico (fluxo induzido por bombeamento). Essa análise permitiu uma compreensão consistente de onde a água estava fluindo para o interior do poço ou, ao contrário, do poço rumo ao aquífero, bem como a relação de cargas hidráulicas e como o bombeamento altera essa dinâmica.

Em todos os poços, a comparação entre os resultados de fluxo ambiente e induzido foi consistente, demonstrando a coerência dos ensaios. De maneira geral, o ensaio com a extração de água ativou ou intensificou o fluxo em zonas já identificadas no ensaio com fluxo ambiente, confirmando a sua importância hidráulica.

Foram verificadas as seguintes particularidades em cada poço, conforme mostrado na **Figura 44**:

- Poço 84A: apresentou fluxo descendente em condição ambiente e ascendente durante o bombeamento, com uma zona de fluxo principal entre 228,0 m e 238,0 m;
- Poço 84C: as medições confirmaram as principais zonas de fluxo, destacando-se a zona mais transmissiva entre 61,0 m e 63,0 m;
- Poço 104: a principal zona de fluxo foi identificada entre 146,5 m e 163,5 m, mostrando afluxo e influxo de água dependendo das condições de ensaio;
- Poço 85: as principais entradas de água foram identificadas entre 177,0 m e 122,0 m em condições induzidas, não obstante a variação ocorrente no diâmetro do poço ter afetado a eficiência do mapeamento de fluxos; e
- Poço 320: o mapeamento confirmou um padrão hidráulico consistente, com uma entrada principal de água entre 75,0 m e 68,0 m e outras zonas menos transmissivas, mas importantes, entre 38,0 m e 24,0 m.

A amostragem estratificada de águas subterrâneas para a caracterização hidrogeoquímica foi realizada por meio de coletas nos intervalos de maior atividade hidráulica identificados pelo mapeamento de fluxo e sob regime de fluxo mais adequado (ambiente ou induzido), garantindo que as análises de qualidade da água fossem representativas das suas respectivas zonas de fluxo em diferentes profundidades.

A campanha de perfilagem geofísica permitiu a elaboração de um perfil integrado para cada poço, consolidando todos os dados (**Figura 44**). Os dados coletados fornecem um panorama das características físicas e hidráulicas de cada poço, servindo de base para análise e interpretação do modelo conceitual, subsidiando a tomada de decisões de gestão para o uso das águas subterrâneas. O detalhamento completo dos dados brutos e dos perfis interpretados está disponível em Acqua Terra (2025a e 2025b) apresentados no **Anexo 6**.

Os perfis integrados para cada poço foram elaborados destacando-se as fraturas predominantes relacionadas aos fluxos de águas subterrâneas e

demonstram concordância com a interpretação do modelo conceitual a partir de dados dos estudos anteriores, evidenciando que a principal favorabilidade de fluxos subterrâneos é determinada predominantemente pelos sistemas de fraturas orientadas em NE (Nordeste).

No Poço 84A, a zona de fluxo principal ocorre nos horizontes mais profundos, entre 228,0 m e 238,0 m, com fraturas orientadas em NE (Nordeste) com baixo ângulo de mergulho para SE (Sudeste), fraturas orientadas em NW (Noroeste) com baixo ângulo de mergulho para SW (Sudoeste) e fraturas orientadas em NW com alto ângulo de mergulho para SW, sendo importante destacar que esta interceptação de atitudes em direções perpendiculares e variações de mergulho favorecem a interconectividade dos sistemas de fraturas.

No Poço 84C, a zona de fluxo principal ocorre em horizonte mais raso entre 61,0 m e 63,0 m e tem com fraturas orientadas em NE (Nordeste) e mergulho entre 50° e 60°, para NW (Noroeste), ocorrendo também fratura orientada em N-S (Norte-Sul), com mergulho subvertical para W (Oeste).

No Poço 104, a zona de fluxo principal ocorre entre 146,5 m e 163,5 m, com uma fratura principal orientada em NE (Nordeste) e mergulho de aproximadamente 45° para SE (Sudeste). Essa fratura é concordante com as estruturas primárias identificadas (foliações).

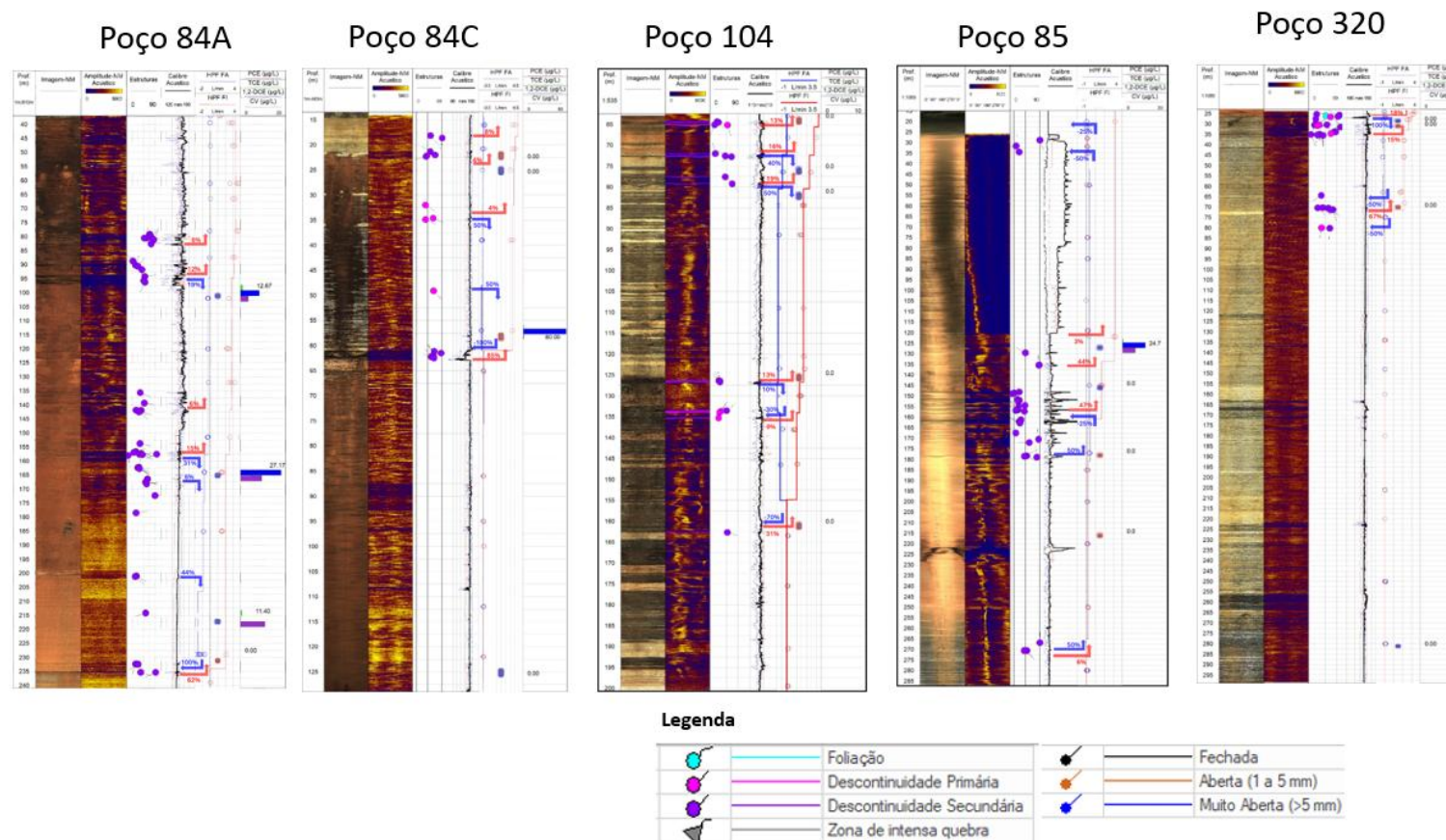
No Poço 85, as principais entradas de água foram identificadas entre 122,0 m e 177,0 m, havendo uma forte predominância de fraturas orientadas em NE (Nordeste) com baixo ângulo de mergulho para NW (Noroeste), principalmente entre as profundidades de 145,0 m e 170,0 m. Porém, cabe destacar que fraturas de orientação E-W (Este-Oeste), com mergulho subvertical para N (Norte) ocorrem nos horizontes de 135,0 m, 170,0 m e 180,0 m, bem como ocorre fratura de orientação N-S (Norte-Sul), com mergulho de aproximadamente 45° para W (Oeste).

No Poço 320B, a entrada principal de água ocorre entre 68,0 m e 75,0 m com pelo menos 5 (cinco) fraturas de mesma orientação, em NE (Nordeste), mergulhando para SE (Sudeste) com ângulos de 20° a até 70°. Outras zonas menos

transmissivas, porém importantes, ocorrem entre 24,0 m e 38,0 m tendo por característica sistemas de fraturas de orientações e mergulhos muito variados, entre os quais vale destacar: fraturas orientadas em NW (Noroeste) com mergulho, tanto de baixo ângulo quanto de alto, para NE (Nordeste); fraturas de orientação E-W, com mergulho sub-horizontal para S (Sul); e fraturas orientadas em NE (Nordeste) com alto ângulo de mergulho para NW (Noroeste).

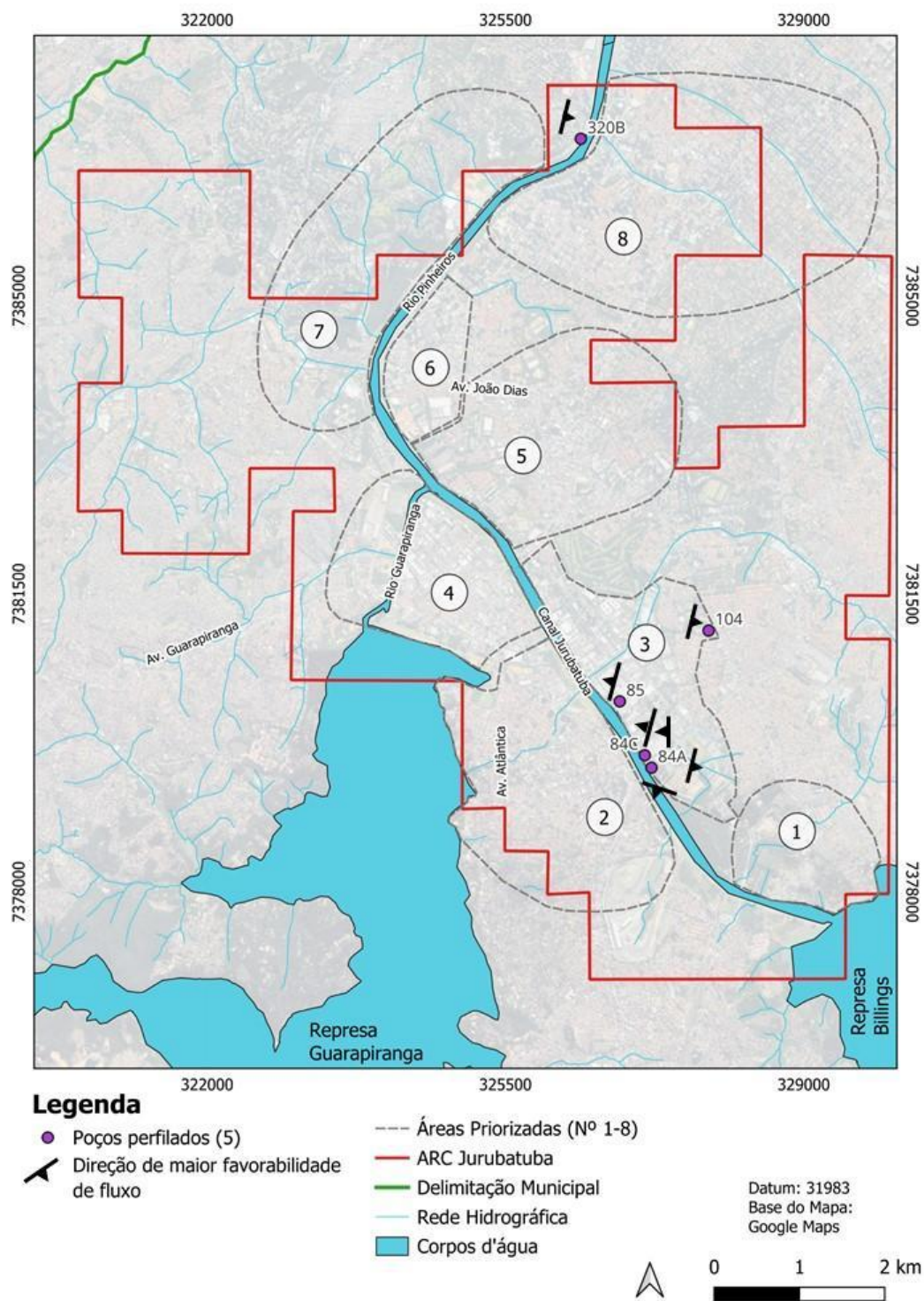
As direções de maior favorabilidade de fluxo para cada um dos poços perfilados neste estudo, estão apresentadas na **Figura 45**.

Figura 44 - Lineamentos interpretados em poços perfilados na ARC-Jurubatuba.



* Observação: Variação na escala vertical entre os diferentes poços.
Fonte: AcquaTerra (2025b).

Figura 45 - Direções de maior favorabilidade de fluxo de águas subterrâneas nos poços perfilados.



Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto - FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

Em relação à amostragem estratificada de águas subterrâneas, apresenta-se no **Quadro 25** as profundidades de coleta em cada poço, a qual foi efetuada utilizando-se o equipamento denominado de Sonda BHFS (*Borehole Fluid Sampler*). Neste quadro estão indicadas, também, as profundidades em que foram detectados contaminantes organoclorados.

Quadro 25 - Amostragem estratificada de águas subterrâneas e indicação de ocorrência de organoclorados.

Número IPT	Poço 84A	Poço 84C	Poço 104	Poço 85	Poço 320
Profundidade de amostragem(m)	100,0 (S)	21,0 (N)	63,0 (N)	126,0 (S)	27,5 (N)
	164,0 (S)	24,0 (N)	75,0 (N)	145,0 (N)	30,0 (N)
	216,0 (S)	57,0 (S)	81,0 (N)	177,0 (N)	69,0 (N)
	230,0 (N)	124,0 (N)	124,5 (N)	215,0 (N)	280,0 (N)
			160,0 (N)		

Observação: Análise laboratorial indicando ocorrência de organoclorados na amostragem estratificada/discreta: S – Sim e N – Não.

Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto - FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

No **Quadro 9** (apresentado anteriormente no item 5.2.3) verificam-se as concentrações detectadas de organoclorados de acordo com o poço amostrado, bem como as respectivas profundidades de ocorrência.

No Poço 84A, é importante observar que as detecções ocorrem em horizontes acima do horizonte de entrada principal de água (entre 228,0 m e 238,0 m), sendo que os ensaios realizados indicaram fluxo descendente em condição ambiente, porém ascendente durante o bombeamento. As maiores concentrações de CV ocorrem nos níveis mais profundos enquanto a maior concentração de DCE ocorre no horizonte intermediário.

No Poço 84C, as detecções ocorrem justamente no horizonte mais próximo da entrada principal de água (entre 61,0 m e 63,0 m), tendo sido detectada alta concentração de DCE.

No Poço 85, as detecções ocorrem dentro da faixa de entrada principal de água (entre 122,0 m e 177,0 m), tendo sido DCE a maior concentração detectada.

6.4 Modelo de circulação das águas subterrâneas

O modelo de circulação das águas subterrâneas para a área de estudo foi elaborado unindo o conhecimento da hidrogeologia local, informações litológicas e construtivas dos poços, interpretações da geologia estrutural, observação de níveis potenciométricos e observação quanto a parâmetros hidráulicos obtidos acerca das unidades aquíferas na ARC-Jurubatuba e entorno.

Com base nos estudos anteriores e nas descrições litológicas dos poços, existentes no cadastro de poços, são discretizados três meios com diferentes características hidráulicas: o meio sedimentar, referente ao Sistema Aquífero Sedimentar (SAS), na parte superior; a rocha alterada em posição intermediária; e, a rocha sã, na base, referentes ao Sistema Aquífero Cristalino (SAC).

De modo geral, a maior parte da área exhibe condições de recarga na porção superior do aquífero, por infiltração de águas pluviais e, também, por parcelas de água oriundas das perdas da rede pública e a descarga dos fluxos subterrâneos de água segue em direção às drenagens principais locais, quais sejam, rio Pinheiros e Canal do Jurubatuba.

Segundo Rocha (1989), apesar da urbanização e sua respectiva impermeabilização do afloramento da Bacia Sedimentar de São Paulo “[...] *há uma recarga garantida proveniente dos domínios aquíferos das rochas cristalinas alteradas*”. Segundo o mesmo autor, existe também a contribuição por parte das perdas da rede de distribuição de águas e de esgoto.

Em relação à potencimetria, conforme Lima *et al.* (2004), o fluxo principal na área dirige-se às principais drenagens superficiais, mas há fluxos em direção contrária em pontos locais, devido à grande heterogeneidade das condutividades hidráulicas, considerando-se a sucessão de pacotes argilosos, siltsos e arenosos e recargas antrópicas.

Giancursi e Lopes (1980) descreveram que a exploração de água subterrânea na Bacia de São Paulo se processa de forma bastante irregular, apresentando altas taxas de bombeamento em certas zonas de concentração

industrial e empresarial, ao contrário de outras zonas, mais residenciais, onde a exploração é mínima.

Essa exploração contínua e concentrada, aliada a problemas de recarga e das características lito faciológicas da bacia, permite a determinação de zonas de rebaixamento contínuo e acentuado do lençol freático, com a consequente diminuição da espessura saturada dos sedimentos, em função da redução da elasticidade destes.

Entretanto, cabe destacar que, a partir da criação da Área de Restrição e Control do uso da água subterrânea em Jurubatuba, o cenário apontado por Giancursi e Lopes (1980) foi bastante modificado tendo como consequência condições de uso bem específicas, tanto para o uso industrial e empresarial, quanto para o uso doméstico.

Ficou evidente a partir do cadastramento de poços realizado no presente trabalho que o número de poços utilizados na área de alta restrição ao uso de águas subterrâneas foi bruscamente reduzido. Por outro lado, observou-se fora dos limites da ARC - Jurubatuba, mais especificamente na porção nordeste da área, que houve um aumento expressivo no número de poços utilizados para o uso doméstico, conforme monitoramento realizado pela COVISA.

Conforme Bertolo (1996), a evolução da exploração do aquífero ao longo do tempo é um importante fator que interfere no nível d'água nos poços. Quanto mais próximos os poços e quanto maior o número de poços em operação no momento da leitura do nível d'água num poço, mais profundo será esse nível d'água dinâmico devido às interferências relacionadas aos cones de rebaixamento dos múltiplos poços em operação. Assim, numa área de exploração intensiva de água subterrânea, há variações significativas quanto a representatividade do nível d'água medido em poços em relação ao nível d'água real do aquífero.

Conforme SILVA (2018), as caracterizações hidroquímicas e isotópicas mostraram que os aquíferos avaliados apresentaram alteração na qualidade de suas águas, em maior ou menor grau, em diferentes níveis, em decorrência de

contribuição de fontes de recarga antrópica. O amônio se mostrou o indicador mais eficaz na determinação de contribuição antrópica na recarga por esgoto e a presença de nitrato reflete a potencial atuação de processos de nitrificação.

Ainda segundo SILVA (2018), os resultados dos métodos físicos utilizados para o cálculo de recarga indicaram valores muito próximos. A recarga potencial pelo método do balanço hídrico apresentou média anual de 18,84% e a estimativa de recarga média pelo método da variação do nível d'água de 16,27% do total de precipitação. Enquanto o método isotópico indicou média geral de 51,7% de contribuição antrópica na mistura das águas subterrâneas. A influência de fluxos ascendentes, identificada pelas cargas hidráulicas dos poços monitorados e pelas semelhanças hidroquímica e isotópica entre as águas dos poços profundos e rasos, está contribuindo para a mistura das águas subterrâneas dos aquíferos de porosidade intergranular.

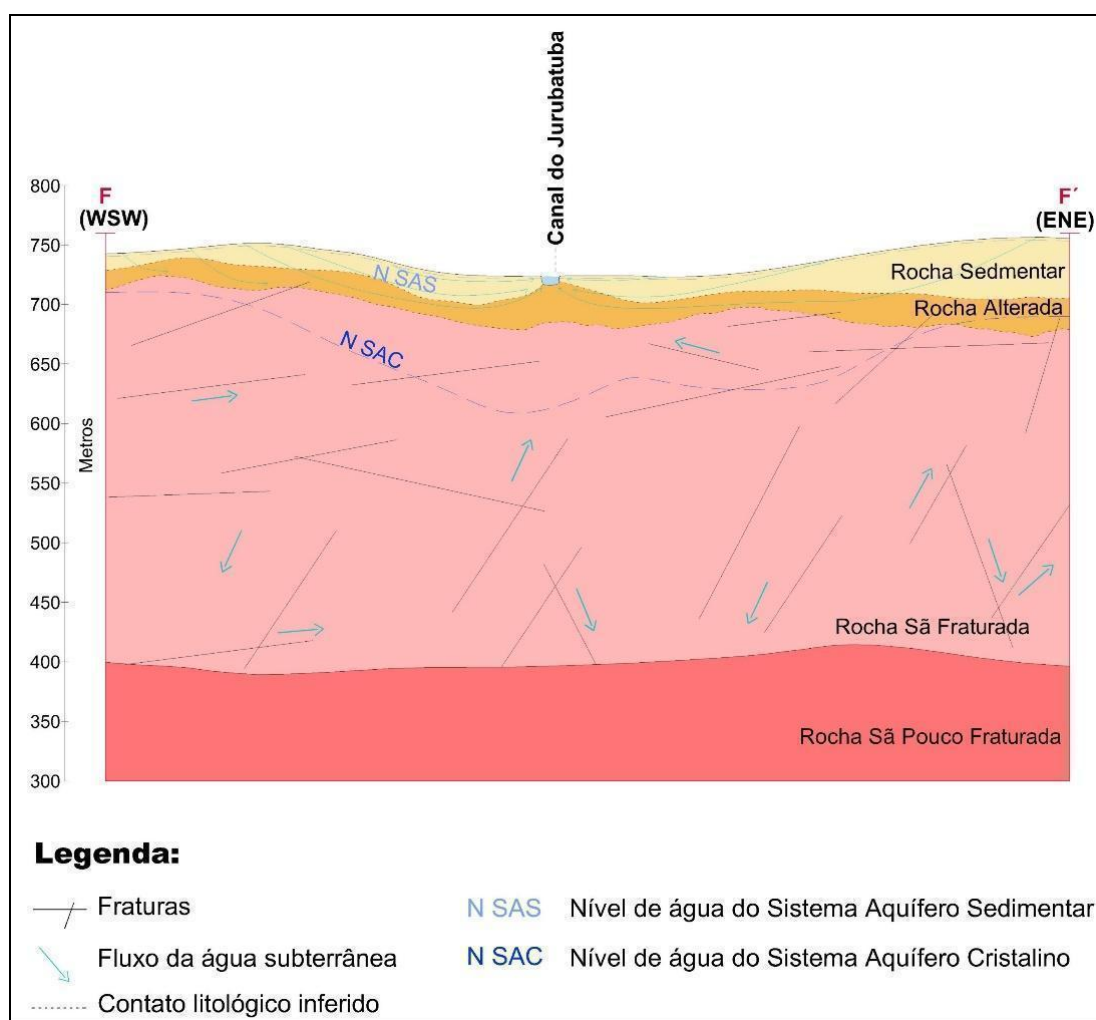
Conforme DAEE/SERVMAR (2008), o modelo de fluxos da água subterrânea mostra que no Sistema Aquífero Sedimentar (SAS) deve predominar um sistema de fluxos local e os fluxos de água no Sistema Aquífero Cristalino (SAC), dado por fraturas, está associado a um fluxo local vertical e a um sistema de fluxos horizontais, de caráter regional.

Nesse modelo, observa-se que os fluxos de água subterrânea no Sistema Aquífero Sedimentar (SAS) possuem uma relação direta com as fontes primárias e secundárias de contaminação. Já os fluxos de água no Sistema Aquífero Cristalino (SAC) têm a potencialidade de propagar a contaminação a distâncias mais longas do que o Sistema Aquífero Sedimentar (SAS), considerando a dinâmica de fluxos por caminhos preferenciais que o aquífero fraturado tem por característica.

A **Figura 46** Figura 46 apresenta o modelo hidrogeológico conceitual elaborado por DAEE/SERVMAR (2008), que indica a presença de dois níveis de água na região de estudo, sobretudo na porção central, próxima ao Canal do Jurubatuba. O primeiro nível, mais raso, associado ao Sistema Aquífero Sedimentar (SAS), encontra-se em concordância com as drenagens locais. O segundo nível, mais profundo, corresponde ao nível dinâmico resultante do intenso bombeamento no

Sistema Aquífero Cristalino (SAC), aparentemente deslocado ou apresentando um atraso significativo de resposta em relação ao SAS. Essa condição reflete um comportamento transitório, decorrente da forte anisotropia (vertical versus horizontal) dos sistemas aquíferos Cristalino e Sedimentar. Em contraposição ao cenário de elevada anisotropia apresentado no modelo, observa-se que a rede de poços de produção estabelece conexões hidráulicas entre as porções superiores e inferiores dos aquíferos.

Figura 46 - Modelo hidrogeológico conceitual de fluxos subterrâneos no entorno do Canal Jurubatuba



Fonte: DAEE/SERVMAR (2008).

Conforme L'APICCIRELLA (2009), a contaminação na ARC-Jurubatuba é provinda de múltiplas fontes compondo um conjunto de plumas que estende-se por uma área de cerca de 6 km no seu maior eixo e até 3,5 km de largura. Esse cenário

decorre de práticas inadequadas de manejo de solventes organoclorados, agravado pelas condições descritas no modelo conceitual hidrogeológico de fluxos subterrâneos, o qual demonstra que o contaminante pode atingir o aquífero fraturado, aprofundando-se e percorrendo longas distâncias por meio de caminhos preferenciais nas fraturas.

6.5 Atualização do modelo hidrogeológico conceitual de fluxos subterrâneos

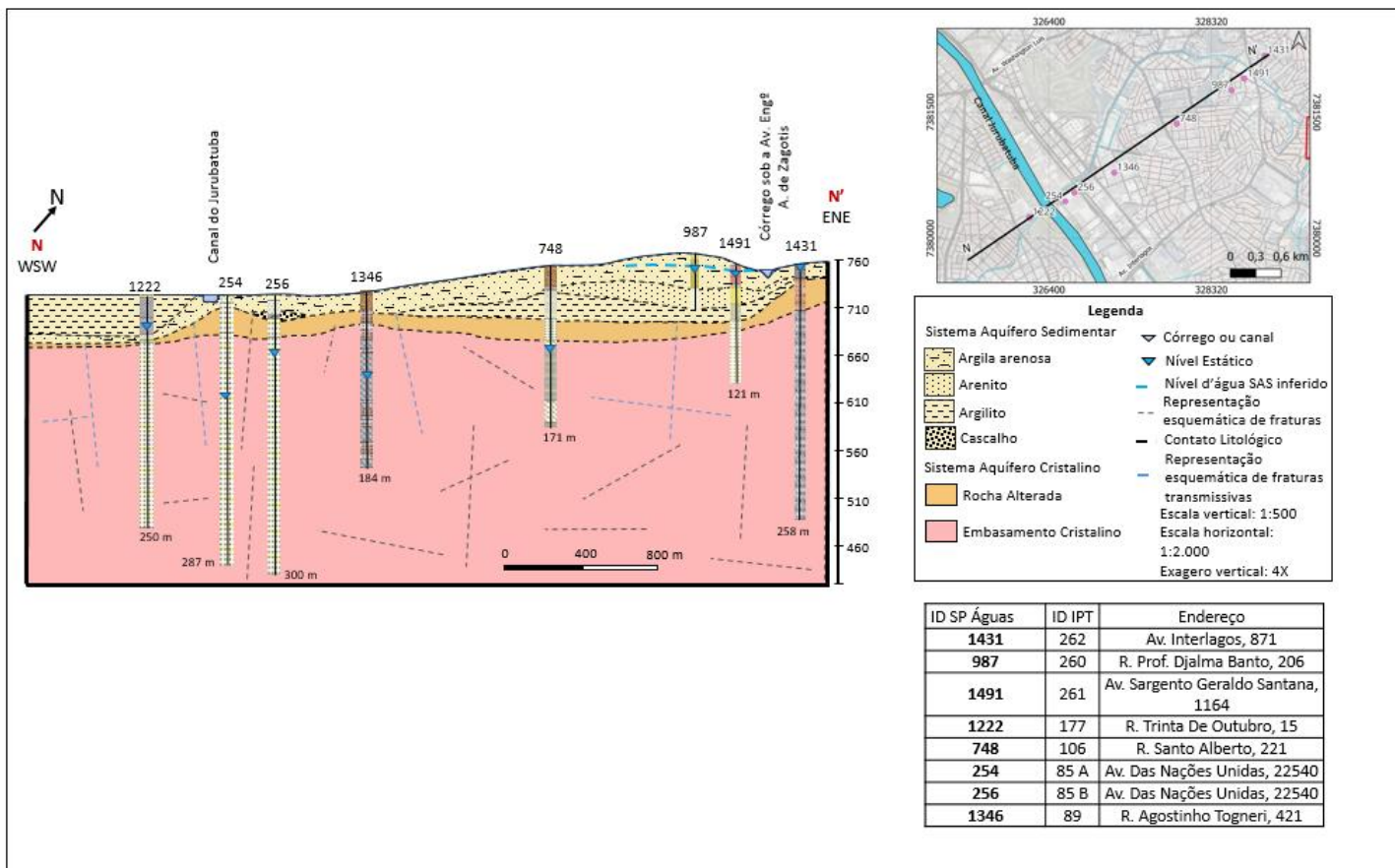
O modelo conceitual hidrogeológico de fluxos subterrâneos foi elaborado a partir de duas seções e um bloco diagrama. As duas seções escolhidas são as que melhor representam o SAS, considerando os perfis com maior detalhamento litológico, bem como representam o SAC, considerando as direções NE, paralela ao principal sistema de fraturas e NW, perpendicular ao principal sistema de fraturas. O bloco diagrama é representativo exclusivamente do SAC, uma vez que a superfície superior do bloco tem a função de demonstrar tridimensionalmente os principais sistemas de fraturas.

Em síntese, deve-se considerar a maior favorabilidade de fluxos subterrâneos no Sistema Aquífero Cristalino (SAC) associada aos sistemas de fraturas NE-SW (FERNANDES *et al.*, 2016), aos sistemas de fraturas relacionados às foliações (FERNANDES *et al.*, 2016) e aos sistemas de fraturas nas zonas rasas do aquífero e de baixo mergulho (DAEE/SERVMAR, 2008 e L'APICCIRELLA, 2009), bem como nas diversas perfilagens dos trabalhos desenvolvidos por pesquisadores acadêmicos do CEPAS (RIBEIRO, 2012; FIUME, 2013; PINO, 2019; e BARBOSA, 2020). A execução de cinco perfilagens geofísicas neste estudo confirmou as condições descritas na literatura, sobretudo quanto à maior favorabilidade das fraturas de direção NE, de posição sub-horizontal e baixo mergulho, e das fraturas NW, com mergulhos predominantemente subverticais.

A **Figura 47** apresenta o modelo conceitual hidrogeológico elaborado a partir da seção N-N' de direção NE, paralela ao principal sistema de fraturas (de direção NE) em termos de favorabilidade de fluxos subterrâneos.

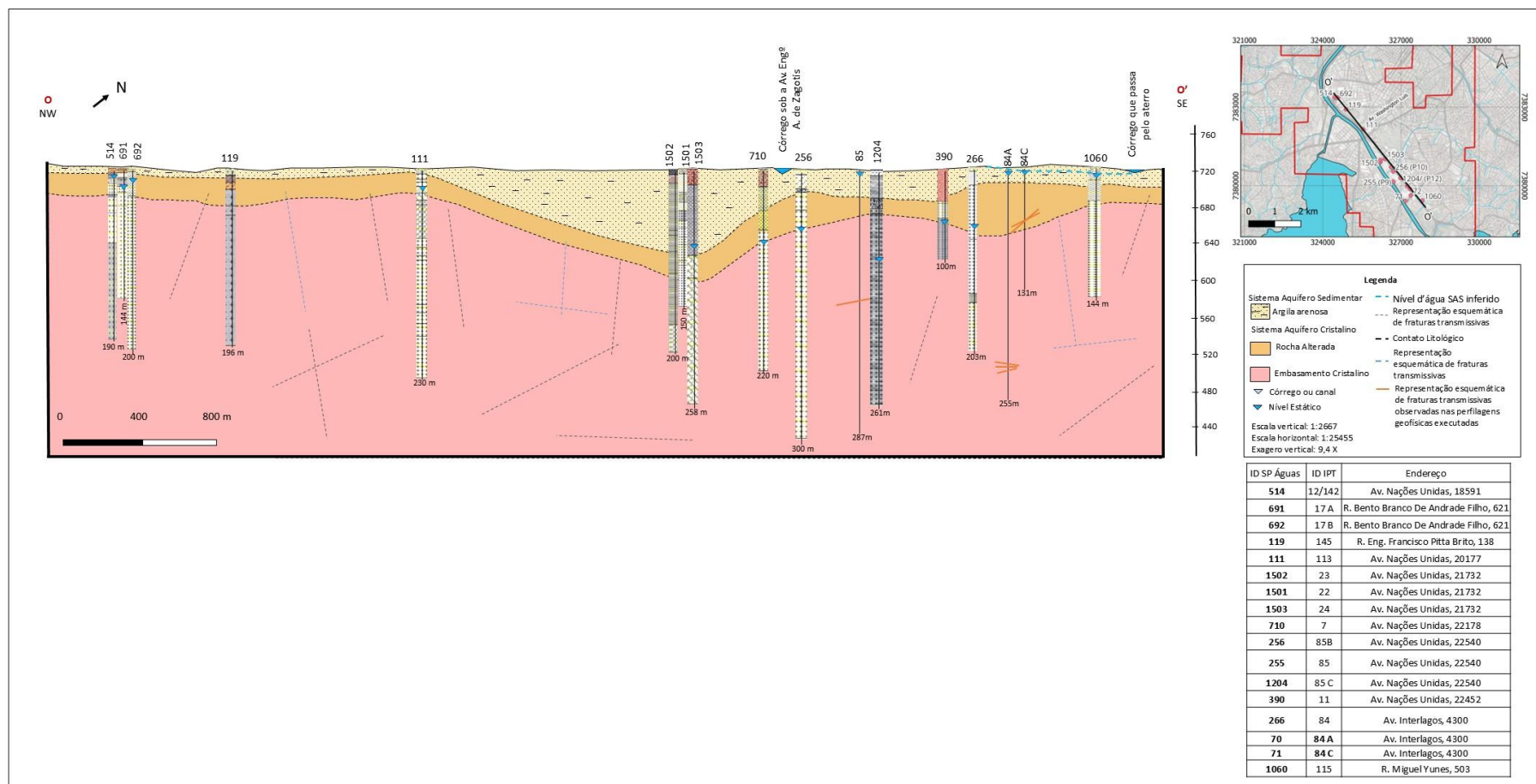
A **Figura 48** apresenta o modelo hidrogeológico conceitual de circulação das águas subterrâneas elaborado a partir da seção O-O' de direção NW, perpendicular ao principal sistema de fraturas (de direção NE) em termos de favorabilidade de fluxos subterrâneos. A seção O-O' é uma integração e aprimoramento das seções D-D' e D'-D'' de DAEE/SERVMAR (2008), paralelas ao rio Pinheiros, tendo sido detalhada a litologia do SAS. Ainda, nestas seções, estão inseridos pelo menos 3 poços onde foi realizada perfilagem e amostragem estratificada neste estudo.

Figura 47 - Modelo hidrogeológico conceitual de fluxos subterrâneos na seção N-N' na porção sudeste da ARC-Jurubatuba.



Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto –FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

Figura 48 - Modelo hidrogeológico conceitual de fluxos subterrâneos na seção O-O' na porção central da ARC-Jurubatuba.



Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto – FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

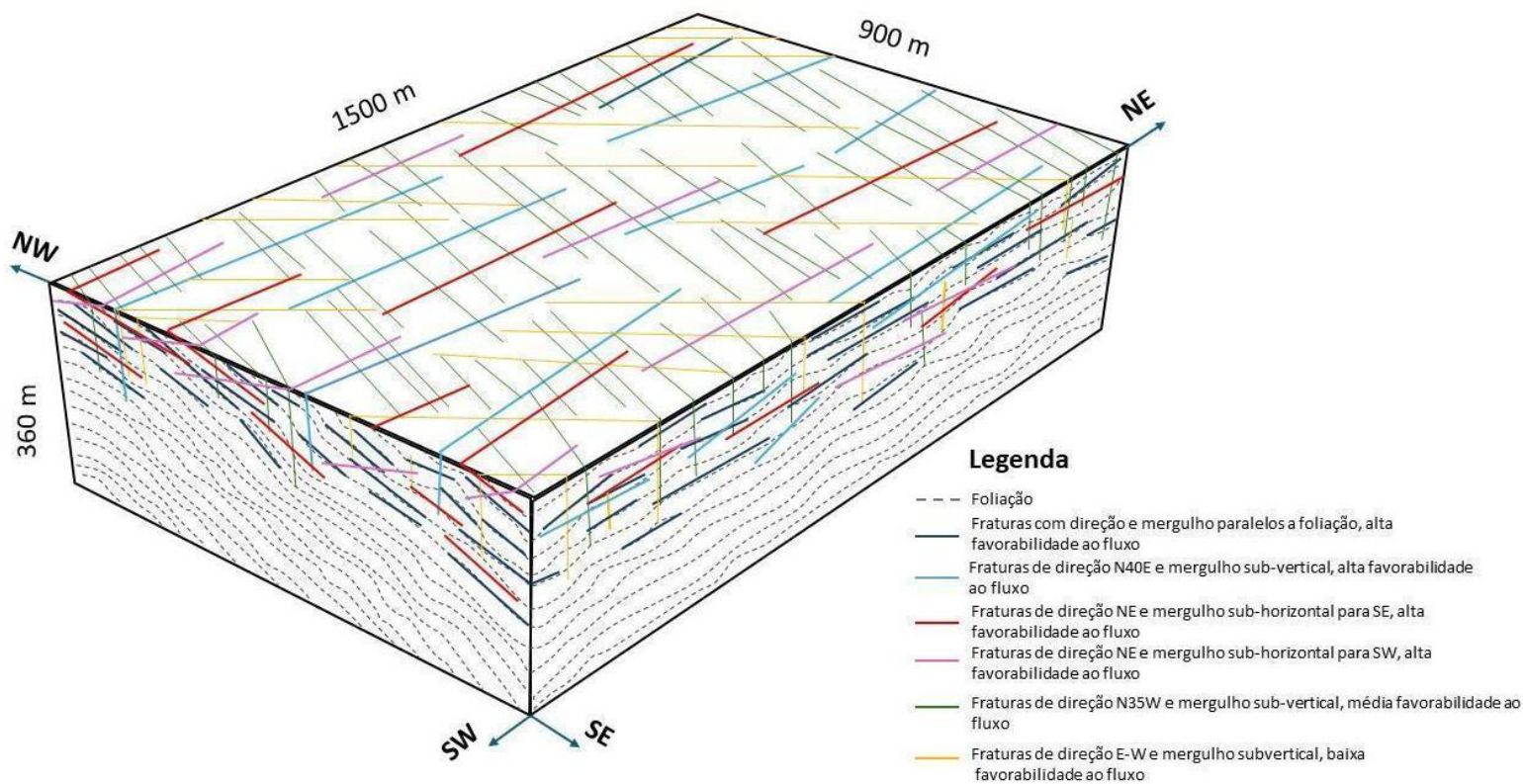
A principal contribuição ao modelo hidrogeológico conceitual de fluxos subterrâneos a partir das duas seções, em relação ao entendimento do SAS, é a demonstração das intercalações de camadas de argilito e arenito, que definem a formação de aquíferos suspensos e situações de semiconfinamento, bem como da possível retenção de contaminantes nas camadas menos permeáveis a impermeáveis.

Quanto às intercalações de camadas de argilito e arenito, é importante observar que as camadas representadas nas seções são compatíveis com as descrições de perfis litológicos e com a escala de trabalho adotada. Porém, deve-se destacar que, mesmo em cada camada representada, ocorrem variações com intercalações menores de argila e areia. Ou seja, em uma camada representada nas seções como arenito, há intercalações menores, e menos predominantes, de camadas de argila, e vice-versa, impossíveis de representar na escala deste trabalho.

A **Figura 49** apresenta o modelo hidrogeológico conceitual de fluxos subterrâneos em bloco diagrama elaborado a partir do bloco diagrama de FERNANDES et al. (2016), sendo complementado por informações dos trabalhos de pesquisadores do CEPAS (RIBEIRO, 2012; FIUME, 2013; PINO, 2019; BARBOSA, 2020) e das perfilagens realizadas durante este projeto. São destacados os principais sistemas de fraturas de alta favorabilidade de fluxos subterrâneos, bem como os sistemas de fraturas de média e baixa favorabilidade. No modelo hidrogeológico conceitual de fluxos subterrâneos, foram mantidas as representações de fraturas com direção e mergulho paralelos à foliação, bem como as fraturas de direção N40E e mergulho subvertical, ambas caracterizadas por alta favorabilidade aos fluxos subterrâneos, conforme definido por FERNANDES et al. (2016).

Além disso, foram incorporadas: (i) fraturas de direção NE e mergulho sub-horizontal para SE, de alta favorabilidade; (ii) fraturas de direção NE e mergulho sub-horizontal para SW, também de alta favorabilidade; (iii) fraturas de direção N35W e mergulho subvertical, de média favorabilidade; e (iv) fraturas de direção E-W e mergulho subvertical, de baixa favorabilidade.

Figura 49 - Modelo hidrogeológico conceitual de fluxos subterrâneos em bloco diagrama da ARC-Jurubatuba.



Fonte: Modificado de FERNANDES *et al.* (2016).

Para a elaboração do bloco diagrama mostrado na **Figura 49**, foi considerada a informação recorrente nas pesquisas acadêmicas do CEPAS/USP (RIBEIRO, 2012; FIUME, 2013; PINO, 2019; BARBOSA, 2020), qual seja, de uma densidade maior de fraturas, inclusive aquelas predominantemente de baixo ângulo, nas porções mais rasas do aquífero (até 100 m de profundidade).

As perfilagens geofísicas realizadas no presente trabalho mostraram resultados concordantes com os aspectos anteriormente considerados e apresentados no bloco diagrama, confirmando a predominância de sistemas de fraturas com alta favorabilidade de fluxo orientados na direção NE (Nordeste) com mergulhos de ângulos variados tanto para NW (Noroeste) quanto para SE (Sudeste).

Foram confirmadas, também, as ocorrências em menor destaque de sistemas de fraturas com orientações e mergulhos diversos, tais como as seguintes orientações (atitudes): N-S/subvertical, E-W/sub-horizontal e NW/sub-horizontal; que favorecem a interconectividade dos sistemas de fraturas.

De acordo, ainda, com a interpretação de L'APICCIARELLA (2009), notam-se poços mais profundos (até pouco mais de 300,0 m de profundidade), em que existe a tendência de diminuição das potencialidades do aquífero e, portanto, foi admitido que, a partir de 400 m de profundidade, o Sistema Aquífero Cristalino (SAC) perde permeabilidade.

Cabe destacar que existe elevado potencial de fluxos subterrâneos no Sistema Aquífero Cristalino (SAC) e, conseqüentemente, resulta na propensão para a dispersão de contaminantes. A interconectividade desses sistemas de fraturas, entrecruzados, favorece ainda mais as condições de fluxos subterrâneos da água e dos contaminantes.

7. REVISÃO DO PERÍMETRO E DO ZONEAMENTO DA ÁREA DE RESTRIÇÃO E CONTROLE DE JURUBATUBA

No estudo elaborado por DAEE/SERVMAR (2008), o perímetro e o zoneamento da região de Jurubatuba foram propostos com base na delimitação de zonas de alta, média e baixa restrição. Estabelecidas em razão da contaminação por compostos organoclorados, cada zona foi associada a diretrizes específicas para a utilização ou restrição de uso das águas subterrâneas. Passados mais de 15 anos, o presente estudo também possui como objetivo subsidiar uma proposta de revisão tanto do perímetro quanto do zoneamento dessas áreas de restrição e controle.

7.1 Premissas adotadas para a revisão do perímetro e do zoneamento da ARC-Jurubatuba

A revisão do perímetro e do zoneamento da ARC-Jurubatuba contou inicialmente com a atualização e revisão dos dados e informações acerca do cadastro de áreas contaminadas da CETESB, bem como a atualização do conhecimento em relação às Áreas de Elevado Potencial de Contaminação (AEPC).

Além disso, foi efetuado o levantamento de dados relativos ao controle sanitário de água para consumo humano junto aos órgãos públicos responsáveis por essa atividade.

Dessa forma, foram fornecidos pela Coordenadoria de Vigilância em Saúde – COVISA, da Secretaria Municipal de Saúde de São Paulo, uma série de dados de monitoramento de qualidade da água de poços utilizados para abastecimento doméstico, os quais foram analisados de forma integrada com os resultados físico-químicos de campo e laboratoriais obtidos no presente trabalho.

A evolução do conhecimento técnico da hidrogeologia da área de interesse contribuiu principalmente para o aprimoramento dos avanços na concretização do modelo hidrogeológico conceitual de fluxos subterrâneos da área estudada, que foi propiciado pela análise do estado da arte sobre o tema e subsidiado pelas investigações por meio de perfilagens geofísicas em poços tubulares realizadas no presente trabalho.

Além disso, a coleta de amostras em níveis estratificados das rochas atravessadas pelo poços (amostragem discreta) demonstrou que os monitoramentos dos poços que venham a ser considerados subsequentemente devem ocorrer considerando esse método de coleta, uma vez que foram detectadas concentrações de organoclorados em profundidades específicas assim amostrados nos mesmos poços em que análises químicas de coleta de modo convencional não apresentou detecção de organoclorados.

Para a revisão do perímetro e do zoneamento da ARC-Jurubatuba, foram consideradas as seguintes premissas a partir da proposta de DAEE/SERVMAR (2008):

i) Foi mantido o mapeamento das ocorrências históricas de alta densidade de AEPC, uma vez que o método desenvolvido por DAEE/SERVMAR (2008) teve confirmação ao longo dos anos, com o fato de que, justamente nessas áreas (AEPC), foram encontradas pela CETESB novas Áreas Declaradas Contaminadas por organoclorados;

ii) As ocorrências históricas de Áreas Declaradas Contaminadas por organoclorados pela CETESB, reabilitadas ou não, foram consideradas fontes de contaminação, uma vez que a reabilitação da área não é necessariamente realizada com base na remoção total de massa de contaminante, mas sim apenas com base no risco de exposição para o uso e ocupação pretendido sobre a propriedade/terreno. Não havendo, portanto, qualquer indicador sobre a remoção do contaminante pelo qual a área foi declarada contaminada; e

iii) Todo poço em que, em algum momento histórico, foi detectado organoclorado, foi considerado como caminho potencial do contaminante, levando-se em conta a complexidade de interconexão/transmissividade entre os sistemas de fraturas, as possíveis variações de fluxo provocadas por regimes de bombeamento entre poços, bem como pelo fato de que as amostras discretas (estratificadas) coletadas nas perfilagens permitiram entender que uma detecção em poço sob amostragem convencional não descarta a possibilidade de uma entrada de contaminante em concentração muito maior, caso seja realizada amostragem discreta.

7.2 Conceitos e critérios adotados na revisão do perímetro e do zoneamento da ARC-Jurubatuba

Os conceitos e critérios considerados para a elaboração da proposta de restrição e controle de uso das águas subterrâneas envolvem os aspectos técnicos tratados nos estudos hidrogeológicos, a compilação de resultados históricos de análises químicas, a identificação histórica de Áreas de Elevado Potencial de Contaminação (AEPC) e a identificação histórica das áreas contaminadas com organoclorados declaradas pela CETESB.

Para a definição de áreas de restrição e controle foram aplicados os conceitos desenvolvidos no âmbito do projeto DAEE/SERVMAR (2008) utilizando a metodologia pela qual a área é discretizada em pequenas subáreas onde são apontados os elementos de interesse ao problema existente e, com isso, pode-se visualizar zonas mais críticas para as quais podem ser priorizadas ações mais consistentes e efetivas de restrição e controle.

De acordo com essa metodologia, a área total foi inicialmente dividida em células de 500 m × 500 m, o que permite agrupar, em uma área reduzida, os elementos de interesse necessários para orientar as decisões. Esse procedimento também possibilita o pré-estabelecimento de contornos a partir de uma célula-guia.

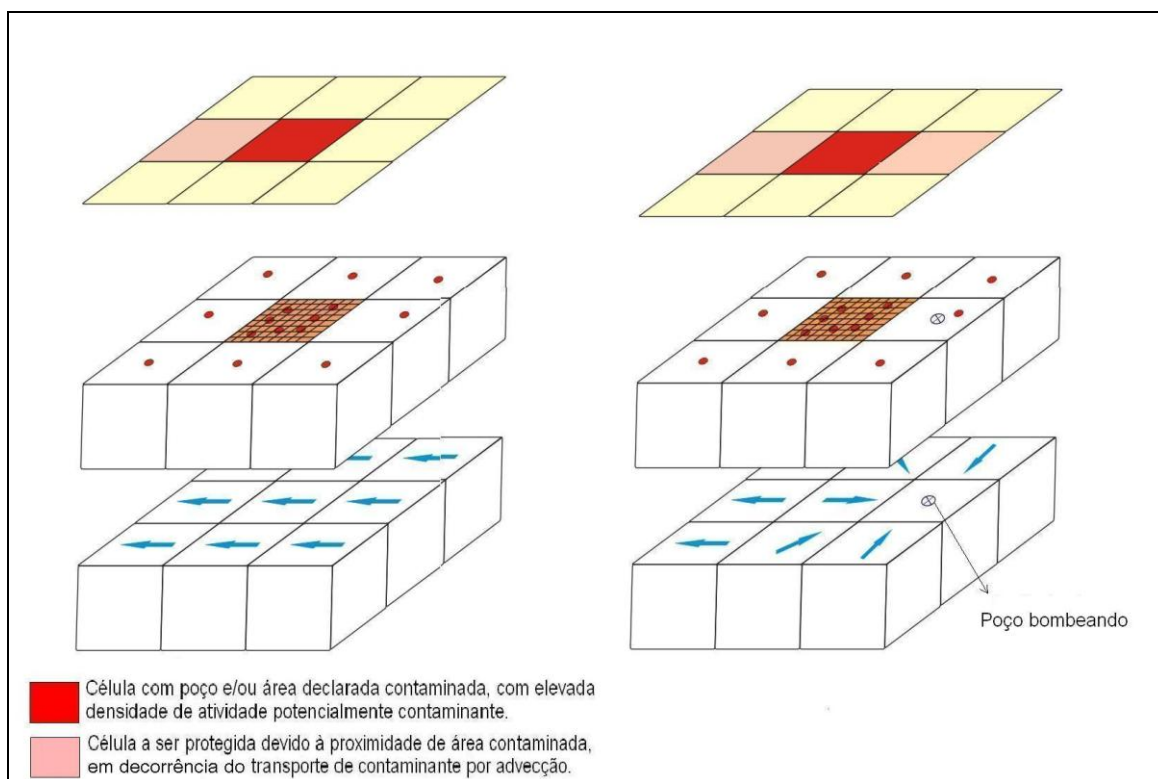
A divisão das células nessa escala espacial é aproximadamente compatível com o deslocamento advectivo das águas subterrâneas ao longo de um tempo de trânsito de 10 anos, estimado pela aplicação da Lei de Darcy. Essa abordagem também está alinhada com a Resolução Conjunta SMA/SERHS/SES nº 03/2006, Art. 3º (São Paulo, 2006), que orienta considerar a presença de áreas contaminadas em um raio de até 500 m ao redor de poços de produção.

Cabe destacar que, em estudos hidrogeológicos de contaminação realizados em regiões semelhantes, também foi adotada essa escala de quadrículas de 500 m × 500 m, como observado em MÖDINGER & KOBUS (2006), RIVETT *et al.* (2012) e FABHAT/SERVMAR (2012).

Também foi aplicado o conceito de proteção da célula vizinha à célula-guia, conforme a metodologia desenvolvida por DAEE/SERVMAR (2008) L'APICCIRELLA (2009). A partir das células-guia e da direção do fluxo de água subterrânea, definiu-se a proteção da célula localizada a jusante, considerando inicialmente um cenário sem bombeamento, no qual a célula vizinha poderia ser impactada pela contaminação transportada pelo fluxo natural das águas subterrâneas.

Em seguida, ao ponderar-se que o bombeamento provoca inversões de fluxo de água subterrânea, estendeu-se o conceito de proteção de células vizinhas a todas as células do entorno de uma célula-guia. Ou seja, o bombeamento da célula vizinha a montante fará acontecer a inversão do sentido do fluxo. Assim, assumiu-se que os poços situados em células vizinhas às células-guia encontram-se sob maiores riscos de produzir água contaminada (**Figura 50**).

Figura 50 - Modelo conceitual de delimitação da área de restrição no entorno de células.



Fonte: DAEE/SERVMAR (2008).

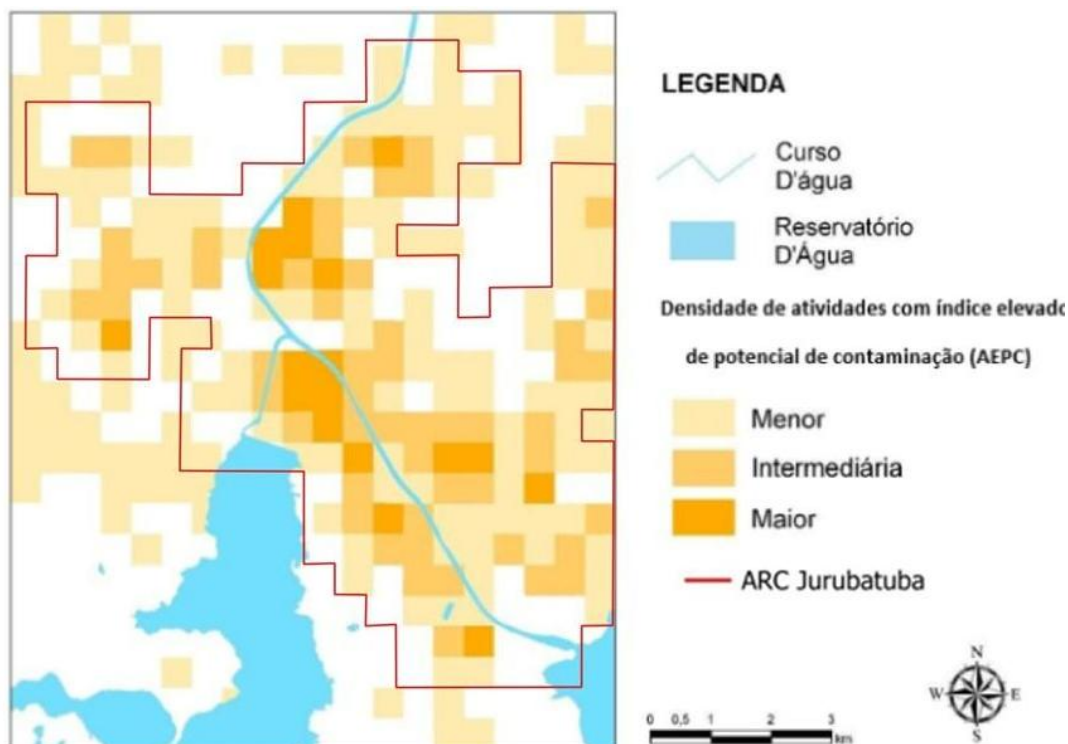
Para a definição das células-guia foi estabelecido o critério de ocorrência de ao menos um dos seguintes elementos de interesse:

- i. Poço com ocorrência histórica de organoclorados, acima ou abaixo dos valores orientadores de intervenção;
- ii. Áreas contaminadas por organoclorados declaradas ou reabilitadas pela CETESB; e
- iii. Alta densidade de Áreas de Elevado Potencial de Contaminação (AEPC), segundo o método POSH.

As áreas de alta densidade de ocorrência de AEPC foram as que apresentaram historicamente mais do que 15 AEPC numa célula de 500 x 500 m.

A **Figura 51** mostra a distribuição de densidade de AEPC.

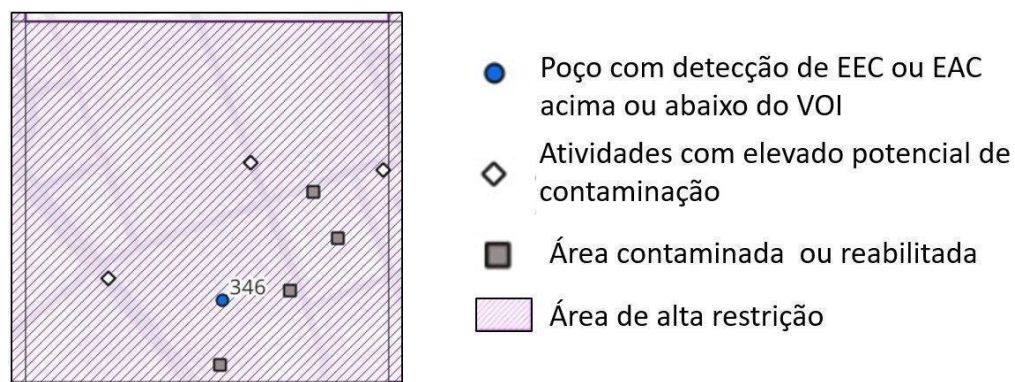
Figura 51 - Distribuição de Densidade de AEPC na ARC-Jurubatuba.



Fonte: DAEE/SERVMAR (2008).

As Células-Guia, definidas com o critério de apresentarem ao menos um entre os principais elementos de interesse para a definição de áreas de restrição são apresentadas na **Figura 52**.

Figura 52 - Elementos para a definição das áreas de restrição.



Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto – FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

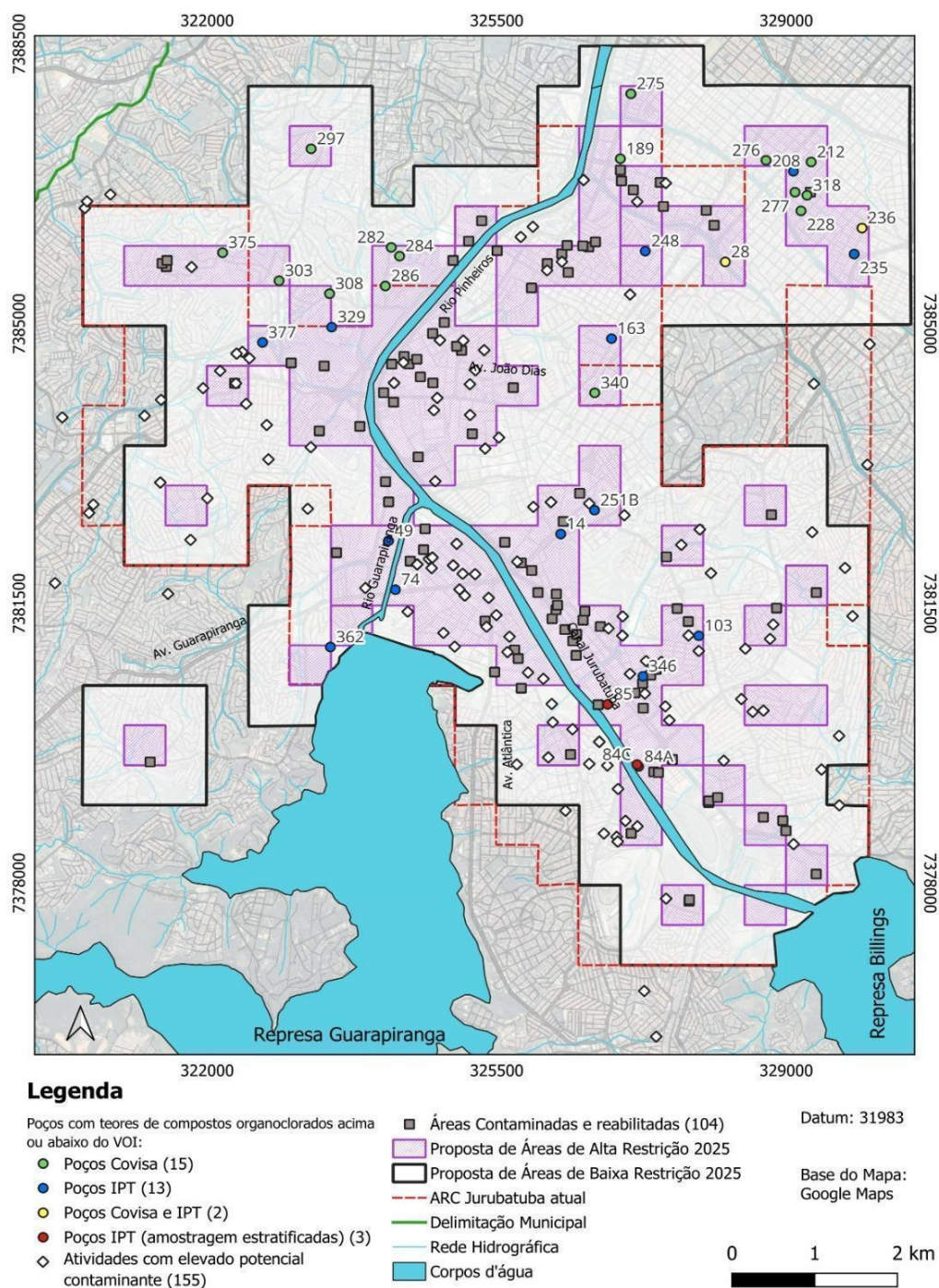
O estudo do DAEE/SERVMAR (2008) definiu três níveis de restrição em seu zoneamento — Alta, Média e Baixa. No presente projeto, optou-se por adotar apenas dois níveis de restrição, com o intuito de ampliar a aplicabilidade prática na delimitação das áreas e orientar de forma mais objetiva a atuação dos órgãos gestores, conforme detalhado a seguir:

- i. A Área de Alta Restrição: composta pelas próprias células-guia e pelas quadrículas cujo entorno estivesse integralmente inserido em Área de Alta Restrição, caracterizando o núcleo mais crítico de restrição; e
- ii. A Área de Baixa Restrição: formada pelas quadrículas localizadas no entorno imediato das Áreas de Alta Restrição, representando a zona de influência direta, porém com menor criticidade relativa.

A **Figura 53** apresenta a comparação entre a delimitação atualmente vigente da ARC-Jurubatuba— definida pela Deliberação CBH-AT nº 139/2021, e a proposta de revisão elaborada no presente estudo. Observa-se que a proposta amplia a área de restrição nas direções nordeste e sudoeste, enquanto reduz sua abrangência em uma porção mais a leste e na faixa localizada entre as represas Guarapiranga e Billings.

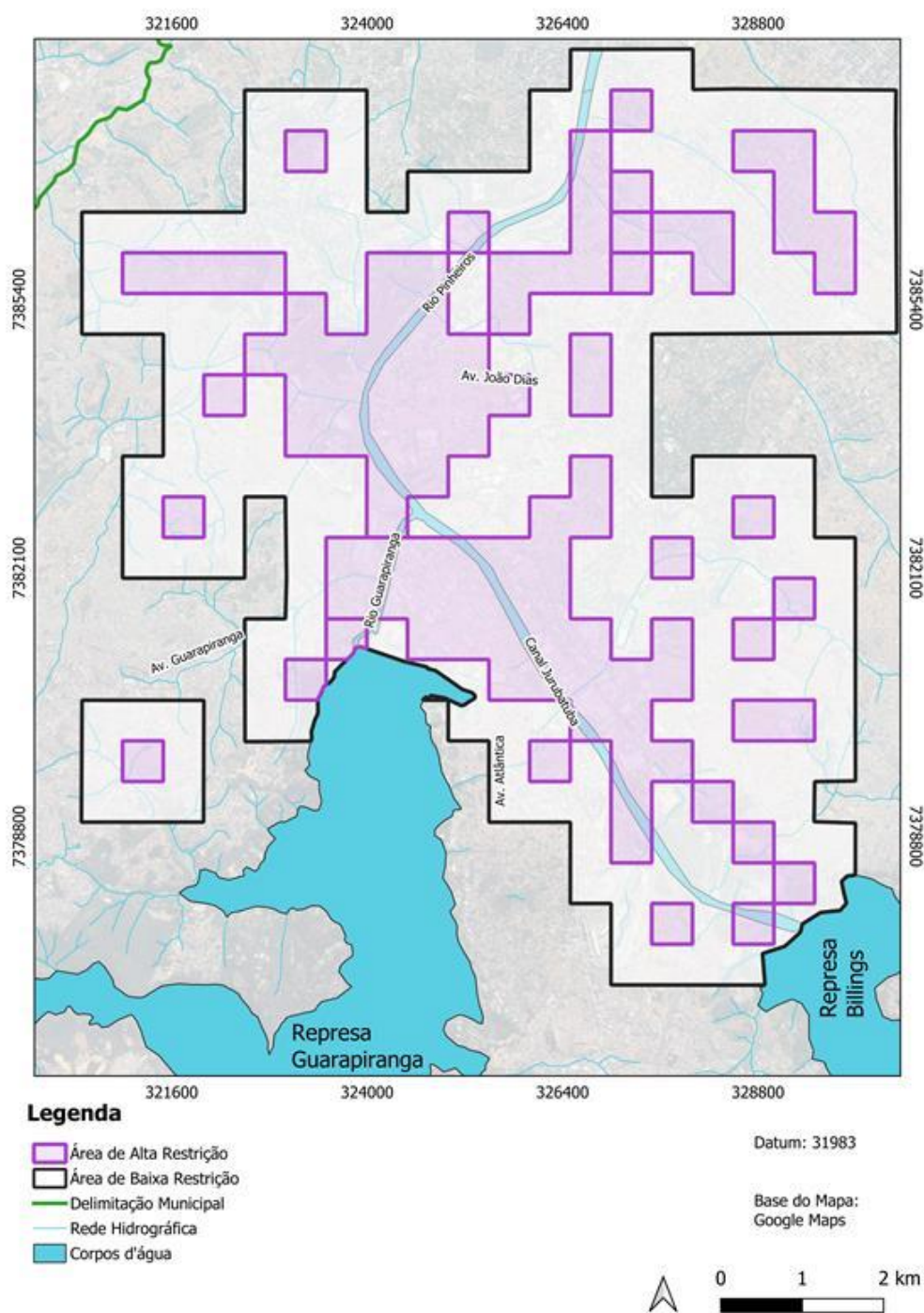
Já a **Figura 54**, por sua vez, ilustra o mapa final proposta para a ARC-Jurubatuba.

Figura 53 - Elementos de interesse e Áreas de Restrição e Controle de Uso de Água Subterrânea.



Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto – FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

Figura 54 - Proposta de nova Área de Restrição e Controle de Uso das águas subterrâneas.



Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto – FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

7.3 Propostas de medidas de restrição e controle de uso de águas subterrâneas

Para as duas áreas de restrição aqui definidas são propostas medidas de restrição e controle distintos, conforme o nível de restrição em que se enquadra.

O **Quadro 26** descreve, de maneira esquemática, as orientações de controle propostas para cada nível de restrição, considerando-se cada uma das condições previstas em que um poço possa se encontrar.

Cabe destacar que poços clandestinos devem ser regularizados, enquanto poços abandonados devem ser devidamente tamponados ou convertidos em poços oficiais de monitoramento.

O método utilizado nesse projeto permite definir medidas de controle para cada nível de restrição e possibilita a readequação dos limites das áreas, caso ocorram alterações no cenário — seja por novas detecções de organoclorados em monitoramentos futuros, seja pela declaração de novas áreas contaminadas pela CETESB.

Os monitoramentos periódicos são necessários devido ao rápido movimento da água que o bombeamento dos poços provoca, propagando a contaminação.

A proposta de medida de restringir a instalação de novos poços na área de alta restrição visa minimizar três consequências principais, quais sejam:

- i. evitar uma nova via de exposição de um receptor à contaminação;
- ii. evitar que bombeamentos movimentem a contaminação de maneira não controlada; e
- iii. evitar a transmissão de contaminação entre diferentes horizontes do aquífero.

A adoção do uso da água nas condições supracitadas representaria uma solução estratégica que, por um lado, atenderia de forma segura às necessidades dos usuários e, por outro, promoveria o desenvolvimento e a aplicação do conhecimento e das técnicas de hidrogeologia na região.

Quadro 26 - Proposta de medidas de restrição e controle para os poços de produção.

Poço de Produção	RESTRIÇÃO	
	ALTA	BAIXA
Poços atuais	Não permitido para Usos Preponderantes⁽¹⁾. Permitido para Uso Industrial sob Estudo Hidrogeológico com Perfilagem Específica⁽²⁾ seguido de Monitoramento Semestral por análises químicas de organoclorados, sob amostragem do tipo estratificada⁽³⁾. No caso de detecção de organoclorados (acima ou abaixo do VOI⁽⁴⁾), o uso deve ser imediatamente interrompido e poderá ser liberado mediante tratamento da água condicionado à aprovação pelos órgãos gestores.	Permitido tanto para Usos Preponderantes⁽¹⁾ quanto para Uso Industrial, desde que seja realizado Estudo Hidrogeológico com Perfilagem Específica⁽²⁾ seguido de Monitoramento Anual por análises químicas de organoclorados, e sob amostragem do tipo estratificada⁽³⁾. No caso de detecção de organoclorados (acima ou abaixo do VOI⁽⁴⁾), o uso deve ser imediatamente interrompido e poderá ser liberado mediante tratamento da água condicionado à aprovação pelos órgãos gestores.
Poços futuros	Não permitido	Não permitido para Usos Preponderantes⁽¹⁾. Permitido para Uso Industrial, desde que seja realizado Estudo Hidrogeológico com Perfilagem Específica⁽²⁾ seguido de Monitoramento Anual por análises químicas de organoclorados, sob amostragem do tipo estratificada⁽³⁾. No caso de detecção de organoclorados (acima ou abaixo do VOI⁽⁴⁾), o uso deve ser imediatamente interrompido e poderá ser liberado mediante tratamento da água condicionado à aprovação pelos órgãos gestores.

(1) Usos Preponderantes: consumo humano, dessedentação de animais, irrigação e recreação conforme a Lei Nº 9.433/97 (Brasil, 1997).

(2) Perfilagem específica: perfilagens ótica, acústica e gama natural; mapeamento de fluxo com sonda HPF (*Heat Pulse Flowmeter*) ou similares. O poço deve ser submetido à limpeza prévia.

(3) Amostragem estratificada (discreta) com sonda BHFS (*Borehole Fluid Sampler*) ou efetivamente similar.

(4) Valores Orientadores de Intervenção (VOI) para a água subterrânea (CETESB, 2021).

Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto – FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

8. PROPOSTA DE MODELO DE GESTÃO

O modelo de gestão vigente da ARC-Jurubatuba representou um avanço importante à época de sua instituição. Contudo, por se tratar de uma área contaminada em um contexto complexo e marcado por múltiplos interesses, tornou-se evidente para os órgãos e especialistas envolvidos que ainda existem lacunas de conhecimento e necessidade de aprimorar diversos aspectos e formas de implementação. Essas constatações motivaram uma análise crítica dos procedimentos estabelecidos, conforme previsto nas deliberações do Comitê da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê.

Entretanto, é fundamental destacar que a construção de um novo modelo de gestão deve se basear em uma estratégia que reúna reflexões, diretrizes, orientações e recomendações capazes de caracterizar o cenário atual e identificar as causas que impediram o pleno alcance dos resultados esperados ao longo dos 15 anos de vigência das deliberações. Esse novo modelo de gestão deverá orientar ações voltadas a reduzir ou minimizar as causas que motivaram a adoção das medidas restritivas na região.

Nesse contexto, além dos estudos hidrogeológicos apresentados, foram desenvolvidas, de forma concomitante, análises jurídicas e institucionais. Essa abordagem visou a integração dos aspectos normativos aos resultados técnicos, a fim de identificar elementos para o aprimoramento do modelo de gestão e assegurar adequação normativa, segurança jurídica e alinhamento institucional às diretrizes atuais de governança ambiental.

Como resultado, a consultoria jurídica realizada por Linquevis Assessoria e Advocacia Ambiental (Linkevis, 2025) apresentou propostas e diretrizes de revisão normativa destinadas a fortalecer a governança da ARC-Jurubatuba e para aumentar a efetividade das medidas de proteção ambiental a partir do cumprimento das exigências legais (**Anexo 7**).

8.1 Diretrizes e recomendações para aprimoramento do Modelo de Gestão da ARC-Jurubatuba

Com base nos pontos de revisão e adequação identificados durante as análises jurídicas e institucionais, bem como nos resultados dos estudos hidrogeológicos, o modelo de gestão da ARC-Jurubatuba deve ser orientado por três princípios:

- **Gestão Adaptativa:** o modelo a ser proposto deverá ser dinâmico com formulação prevendo processo continuado de revisão e evolução à medida que novos dados de monitoramento sejam gerados e o conhecimento sobre o aquífero, e camadas interconectadas, sejam aprimorados;
- **Governança Colaborativa:** o sucesso depende da cooperação e integração dos órgãos públicos (CETESB, SP-Águas, COVISA e Prefeitura de São Paulo) e da participação ativa da sociedade por meio de mecanismos formais e eficazes de colaboração; e
- **Comunicação e Transparência:** a comunicação deverá ser a mais fácil possível e, também, a complexidade técnica deve ser traduzida em orientações explícitas e acessíveis para os usuários de poços e para a sociedade em geral, transformando-os em parceiros da gestão.

As recomendações aqui apresentadas não têm o objetivo de desconsiderar o modelo atual, mas sim de aperfeiçoá-lo, reconhecendo o valor dos trabalhos já realizados e das deliberações do CBH-AT que orientam a gestão das águas na região, não obstante os conflitos existentes.

Essas recomendações, buscam superar lacunas identificadas e estão estruturadas em quatro eixos temáticos principais, sendo:

- I. Modelo de gestão por zonas de alta e baixa restrição:** a adoção de critérios diferenciados permite abordagens distintas para áreas com maior ou menor risco de contaminação. Além disso, é fundamental realizar acompanhamento periódico da dinâmica local, permitindo atualizar as classificações de restrição com base, por exemplo, nas análises químicas e na identificação de novas áreas contaminadas. Dessa forma, busca-se fornecer aos usuários evidências de que

o modelo de gestão é dinâmico, indicando a possibilidade de flexibilização (ou não) das regras à medida que o cenário apresente mudanças comprovadas;

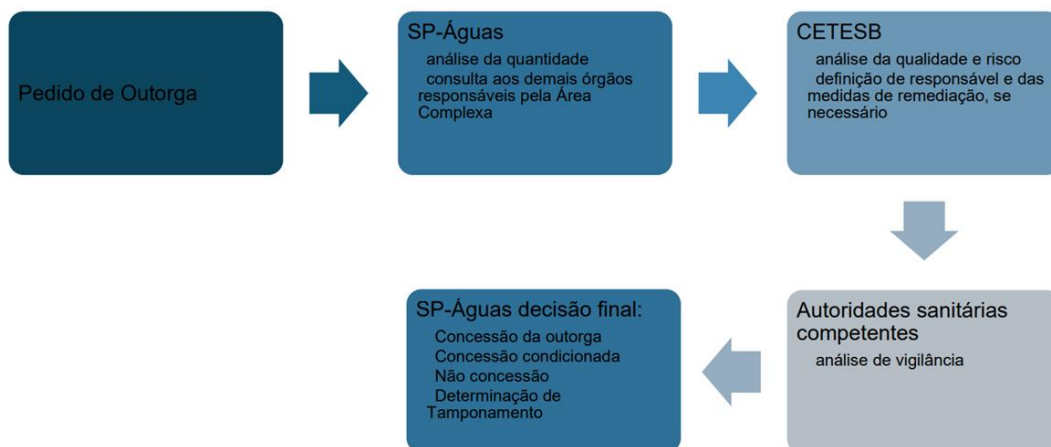
- II. **Articulação Interinstitucional e Governança:** a atuação conjunta entre os órgãos envolvidos é essencial para o sucesso do modelo de gestão em áreas complexas. Nesse sentido, a formalização de acordos de cooperação, a estruturação de um banco de dados regional e a harmonização e padronização dos procedimentos administrativos e técnicos constituem diretrizes estratégicas para o fortalecimento da governança;
- III. **Comunicação estratégica com a população:** o modelo de gestão deve tornar a informação acessível e compreensível, estimulando e promovendo o engajamento dos usuários. Para isso, pode-se estabelecer um sistema ou portal da ARC-Jurubatuba que permita acompanhar a situação da região e divulgar os principais indicadores de gestão. Alguns exemplos de aplicação incluem: repositório de deliberações e relatórios técnicos em versões públicas, mapa interativo para consulta da zona de restrição por endereço ou CPF/CNPJ e seção de perguntas e respostas frequentes; e
- IV. **Indicadores de avaliação de desempenho:** o modelo de gestão requer métricas claras para avaliar sua eficácia. Assim, devem ser estruturados indicadores de acompanhamento que considerem tanto aspectos técnicos (por exemplo, o monitoramento de poços), quanto os aspectos institucionais (atuação dos órgãos gestores e suas atribuições relacionadas com a ARC-Jurubatuba).

A partir desses eixos temáticos, dois cenários deverão ser considerados ao longo de gestão da ARC-Jurubatuba: o uso da água para o abastecimento privado e processo de Gerenciamento de Áreas Contaminadas (GAC).

8.1.1. Uso da água para o abastecimento privado

Considerando que a futura deliberação da ARC-Jurubatuba tratará essencialmente de medidas relativas ao uso das águas subterrâneas na região, o fluxo de tramitação para concessão da outorga de direito de uso pode ser sintetizado a partir da **Figura 55** e continuará condicionado à aprovação da CETESB ou da COVISA, conforme o tipo de uso solicitado.

Figura 55 - Fluxograma dos requerimentos de solicitação de outorgas para as águas subterrâneas da ARC-Jurubatuba.



Fonte: Adaptado de LINQUEVIS ASSESSORIA E ADVOCACIA AMBIENTAL (2025).

Além disso, é importante que os usuários de recursos hídricos da região consigam obter, de forma simples e direta, respostas para os questionamentos como os listados a seguir:

- "Estou em uma Área de Alta/Baixa Restrição. O que isso significa?";
- "Quero perfurar um novo poço. É possível?";
- "Já tenho um poço. O que preciso fazer para regularizá-lo?";
- "Quais análises de água preciso fazer e com que frequência?";
- "O que acontece se a análise do meu poço apresentar contaminação?".

As orientações e esclarecimentos acerca dessas perguntas, devem estar disponíveis nos sites oficiais dos órgãos gestores, conforme descrito no eixo "Comunicação estratégica com a população".

8.1.2. Gerenciamento de Áreas Contaminadas (GAC)

Os princípios de uma gestão adaptativa não são compatíveis com a adoção de medidas de restrição por tempo indeterminado. Por esse motivo, torna-se necessário estabelecer diretrizes e estratégias que assegurem o enfrentamento efetivo das causas do problema na região. Nesse sentido, além das orientações voltadas à restrição e ao controle do uso das águas subterrâneas, é fundamental que o gerenciamento e a remediação da contaminação existente sejam devidamente abordados.

Esse processo deve considerar todos os elementos previstos na Lei Estadual nº 13.577/2009 (São Paulo, 2009), em seu regulamento e nos demais normativos infralegais correlatos, uma vez que o gerenciamento de áreas contaminadas é definido como um conjunto integrado de medidas:

[...] que asseguram o conhecimento das características das áreas contaminadas e a definição das medidas de intervenção mais adequadas a serem exigidas, visando eliminar ou minimizar os danos e/ou riscos aos bens a proteger, gerados pelos contaminantes nelas contidas (SÃO PAULO, 2009)

Iniciativas como a publicação da Resolução SMA nº 10/2017 (São Paulo, 2017) que define as atividades potencialmente geradoras de áreas contaminadas, e da Resolução SMA nº 11/2017 (São Paulo, 2017) que estabelece as regiões prioritárias para identificação dessas áreas¹, fortalecem o processo de diagnóstico dos passivos ambientais.

O meio técnico especializado indica que muitas áreas contaminadas sequer foram identificadas, ampliando as incertezas e subdimensionando a real magnitude dos passivos ambientais abrangidos pela ARC-Jurubatuba. Somado a isso, sabe-se que nem todos os responsáveis legais da região, enquadrados na relação de atividades potencialmente geradoras de áreas contaminadas, realizaram suas respectivas Avaliações Preliminares e Investigações Confirmatórias.

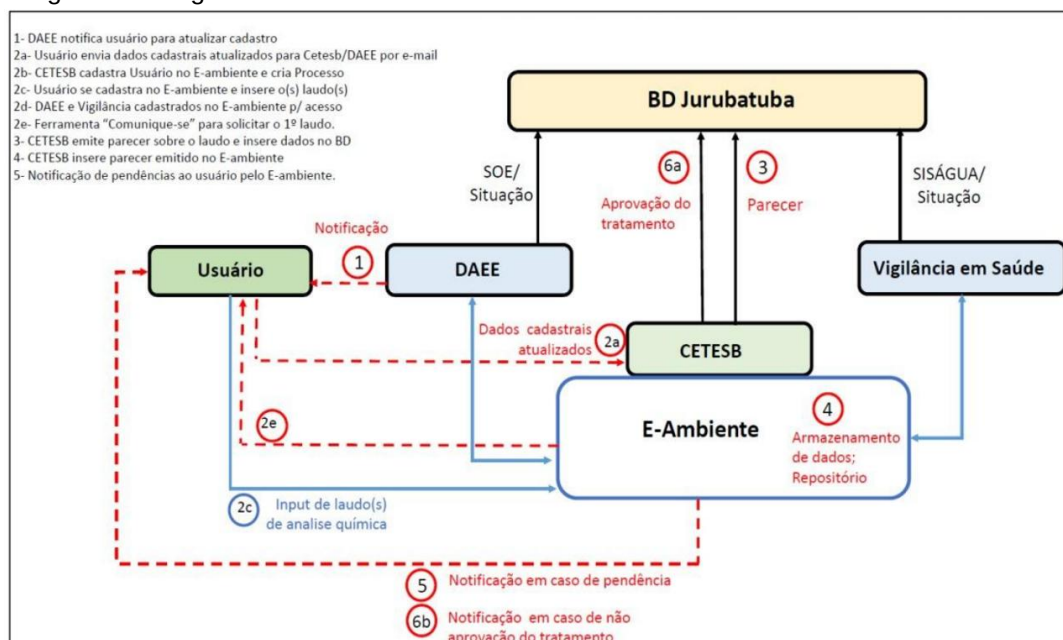
Outro aspecto relevante é que, mesmo entre as áreas já identificadas, aquelas classificadas como “Reabilitadas para Uso Declarado” (AR) podem continuar oferecendo riscos às águas subterrâneas da região. Isso porque a reabilitação não implica, necessariamente, na remoção integral da massa de contaminantes, mas apenas no atendimento aos critérios de exposição compatíveis com o uso e a ocupação previstos para o imóvel. Dessa forma, a condição de reabilitação não assegura a eliminação completa do contaminante que motivou a classificação original da área como contaminada.

¹ Conforme mencionado ao longo deste trabalho, a ARC-Jurubatuba abrange duas das quatro áreas definidas como prioritárias pela Resolução SMA nº 11/2017 (São Paulo, 2017b): a Região Prioritária 3 (Chácara Santo Antônio) e a Região Prioritária 4 (Jurubatuba).

Por esse motivo, a integração entre a Política Estadual de Recursos Hídricos (São Paulo, 1991) e o gerenciamento de áreas contaminadas deve ser melhor estabelecida entre os órgãos gestores, especialmente diante da relação de causa e efeito mencionada anteriormente. A unificação de bancos de dados, bem como o estabelecimento de normas técnicas e/ou acordos de cooperação, deve ser pactuada com vistas à eliminação efetiva da condição que justifica a criação de uma Área de Restrição e Controle do uso das águas subterrâneas: a contaminação regional existente.

A título de ilustração, a **Figura 56** apresenta uma proposta piloto desenvolvida por membros dos órgãos gestores para estruturar um fluxo de atividades voltado à análise de processos de outorga na ARC-Jurubatuba. Os fluxogramas e iniciativas como essa devem ser ampliados, de modo a incorporar as etapas e os resultados produzidos no Gerenciamento de Áreas Contaminadas e sua interface com a qualidade das águas subterrâneas. Nesse sentido, o Programa de Monitoramento Regional, proposto no **Capítulo 9**, busca oferecer subsídios técnicos essenciais para fortalecer essa integração.

Figura 56 - Exemplo de integração entre órgãos gestores na gestão da contaminação regional das águas subterrâneas.



Fonte: Elaborado no ano de 2022 pelo Grupo de Trabalho Banco de Dados Jurubatuba da CT-AS do CBH-AT.

8.2 Indicadores de acompanhamento e desempenho do modelo de gestão

O modelo de gestão da ARC-Jurubatuba deverá ser avaliado continuamente por meio de indicadores de desempenho que expressem a efetividade das ações implementadas. Esses indicadores devem contemplar, entre outros aspectos, a avaliação dos processos de gestão, o acompanhamento das áreas contaminadas ou reabilitadas e a análise da qualidade das águas amostradas em poços tubulares utilizados para abastecimento privado.

O **Quadro 27** apresenta algumas proposições de formas de acompanhamento possíveis, como sugestão de alguns indicadores, os quais poderão ser aprimorados e/ou complementados à medida que o modelo de gestão na região for efetivado pelos órgãos gestores.

Quadro 27 - Sugestão de Indicadores para acompanhamento do modelo de gestão da ARC-Jurubatuba.

Indicador	Métrica Específica	Tipo de indicador	Finalidade e Observações
Adesão ao Cadastro: Regularização	Percentual de poços existentes, conhecidos ou estimados, que possuem cadastro e situação regularizados no Sistema de Outorga Eletrônica.	Processo de gestão	Mede o nível de confiança dos usuários no novo modelo de gestão e a eficácia das campanhas de comunicação.
Relatórios ou boletins de situação	Publicação anual dos relatórios ou boletins de situação da ARC-Jurubatuba.	Processo de gestão	Assegurar a atuação integrada entre os órgãos gestores por meio da publicação de um relatório ou boletim conjunto, elaborado com as informações consolidadas ao longo do ano.
Conformidade do Monitoramento	% de usuários que entregam os laudos laboratoriais de análise de qualidade da água	Resultado	O fornecimento desses laudos é essencial para a gestão adaptativa.
Estabilização ou Melhora da Qualidade da Água	% de poços da rede de monitoramento que apresentam tendência estatística de estabilidade ou queda na concentração dos contaminantes-chave.	Resultado	Avalia os procedimentos de gerenciamento de áreas contaminadas de responsabilidade da CETESB.
Áreas em Remediação Ativa	Número de áreas contaminadas em processo de remediação.	Resultado	Avalia os procedimentos de gerenciamento de áreas contaminadas de responsabilidade da CETESB.
Áreas com Declaração de Reabilitação	Número de áreas reabilitadas para uso declarado.	Resultado	Avalia os procedimentos de gerenciamento de áreas contaminadas de responsabilidade da CETESB.
Conformidade ambiental nos Laudos de compostos VOC (Compostos Orgânicos Voláteis)	% da conformidade entre os resultados dos laudos de análises químicas de VOC	Qualidade	Avalia os procedimentos de gerenciamento de áreas contaminadas de responsabilidade da CETESB.

9. DIRETRIZES PARA IMPLANTAÇÃO DO PROGRAMA DE MONITORAMENTO

Este item apresenta as diretrizes gerais, as especificações técnicas e as estimativas de custos para a implantação do Programa de Monitoramento para a ARC-Jurubatuba.

Vale destacar que o programa deverá ser futuramente consolidado a partir de discussões e definições conduzidas pelas Câmaras Técnicas de Águas Subterrâneas (CT-AS) e de Monitoramento Hidrológico (CT-MH) e ser concretizado por meio de deliberação do Comitê da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê, com participação dos órgãos gestores competentes.

Tendo em vista que os resultados do presente estudo demonstraram a complexidade do problema de contaminação em um arcabouço geológico também complexo, onde persistem dúvidas tais como: a existência de novos passivos ambientais, a interconexão dos sistemas de fraturas, as variações de fluxo provocadas por bombeamento entre poços e que as amostragens convencionais não são suficientes para caracterizar as reais concentrações dos contaminantes; propõe-se estruturar o programa de monitoramento em duas etapas, sendo que a primeira deverá focar nos aspectos relativos à alteração da qualidade natural das águas subterrâneas e, na segunda, expandir a todos os poços cadastrados com monitoramento da quantidade e da qualidade.

9.1 Objetivo principal da Primeira Etapa

A primeira etapa do programa tem como finalidade estabelecer uma rede básica de monitoramento das águas subterrâneas eficiente e representativa.

Os dados coletados de forma sistemática, em conjunto com outras informações julgadas necessárias para serem levantadas, além das já disponíveis, devem ser capazes de investigar a mobilidade dos compostos, proporcionar o mapeamento e o acompanhamento da evolução da contaminação por organoclorados e suas degradações presentes nas águas subterrâneas na ARC-Jurubatuba.

Ressalta-se que é necessário pesquisar e avaliar se os compostos são originários de passivos ambientais, conhecidos ou não, de forma a fornecer informações consistentes dirigidas ao processo de identificação e de reabilitação de áreas contaminadas e demais ações de gestão dos recursos hídricos.

Para atender ao objetivo principal pretendido, será necessário atingir os seguintes objetivos específicos:

- Identificação dos principais vetores de fluxo de águas subterrâneas, rumo ao interior dos poços, através de zonas preferenciais eventualmente contaminadas, tais como as fraturas do Sistema Aquífero Cristalino (SAC) e a caracterização hidrogeoquímica a partir da obtenção de amostras estratificadas;
- Análise das tendências espaciais e temporais do comportamento dos parâmetros físico-químicos levantados no campo e dos dados analíticos laboratoriais; e
- Construção de bases técnicas para ampliar o conhecimento hidrogeológico e hidrogeoquímico com vistas a fortalecer os fundamentos do processo de gestão adaptativa e participativa, integrando usuários, gestores e demais atores da região.

A rede de monitoramento proposta tem foco prioritário na qualidade da água, por ser o principal problema a ser enfrentado. A rede originalmente concebida para monitorar simultaneamente quantidade e qualidade poderá ser viabilizada de forma concomitante, a critério do órgão gestor SP-ÁGUAS, por meio dos procedimentos de outorga e fiscalização previstos na normativa do Sistema de Declaração de Usos (SiDec).

9.2 Método e atividades

As especificações devem contemplar métodos de trabalho e as atividades que permitam atingir os objetivos propostos conforme descritos à seguir.

9.2.1 Pesquisa, levantamento e organização de base de dados

Compreende todas as informações bibliográficas necessárias, os dados das áreas declaradas contaminadas e outras informações existentes em órgãos públicos que possam ampliar o conhecimento prévio adquirido no presente estudo.

Os dados das áreas declaradas contaminadas deverão ser obtidos através de consultas aos processos de Gerenciamento de Áreas Contaminadas (GAC) e compreenderão todas as informações relativas aos meios hidrogeológicos envolvidos, camadas adjacentes, técnicas de remediação empregadas e quaisquer outros levantamentos necessários para o dimensionamento da situação da contaminação na região.

Na base de dados atualizada serão avaliados novos poços em condições de serem somados aos poços inicialmente selecionados no presente estudo.

9.2.2 Seleção final dos poços de monitoramento

O presente trabalho selecionou poços ativos (em operação) e inativos que, a partir do levantamento de campo, foram considerados em condições construtivas adequadas aos objetivos do programa de monitoramento.

A seleção foi baseada em critérios técnicos, considerando:

- Localização geográfica e representatividade hidrogeológica do poço;
- Integridade física e disponibilidade de informações construtivas da captação considerada; e
- Acessibilidade ao local da captação, bem como em relação à investigações/medições no interior do poço.

O **Quadro 28** apresenta as informações referentes aos poços selecionados, enquanto a **Figura 57** ilustra a localização dos mesmos.

Relatório Técnico Nº 177 723-205 - 152/1284

Quadro 28 - Poços selecionados para composição de rede de monitoramento da ARC-Jurubatuba e entorno.

Identificação do Poço (IPT)	Nº de Cadastro (DAEE/SP-ÁGUAS)	Coordenadas UTM		Justificativa da seleção do poço	Situação do Poço	Uso da água
		Km-N	Km-E			
14	Não	7382323	326229	Presença compostos organoclorado em amostragem IPT	Ativo	Sem Informação
28	Sem Informação	7385729	328218	Presença compostos organoclorado em amostragem IPT	Ativo	Doméstico
49	Sem Informação	7382238	324147	Presença compostos organoclorado em amostragem IPT	Ativo	Industrial/Processo
74	Sem Informação	7381627	324230	Presença compostos organoclorado em amostragem IPT	Ativo	Industrial/Processo
163	Sem Informação	7384769	326843	Presença compostos organoclorado em amostragem IPT	Ativo	Doméstico
208	982	7386862	329041	Presença compostos organoclorado em amostragem IPT	Ativo	Doméstico
235	Sem Informação	7385827	329776	Presença compostos organoclorado em amostragem IPT	Ativo	Doméstico
248	Sem Informação	7385863	327251	Presença compostos organoclorado em amostragem IPT	Ativo	Doméstico
362	Sem Informação	7380909	323444	Presença compostos organoclorado em amostragem IPT	Ativo	Recreação, irrigação, comercial e sanitário
377	Sem Informação	7384721	322624	Presença compostos organoclorado em amostragem IPT	Ativo	Industrial

Relatório Técnico Nº 177 723-205 – 153/1284

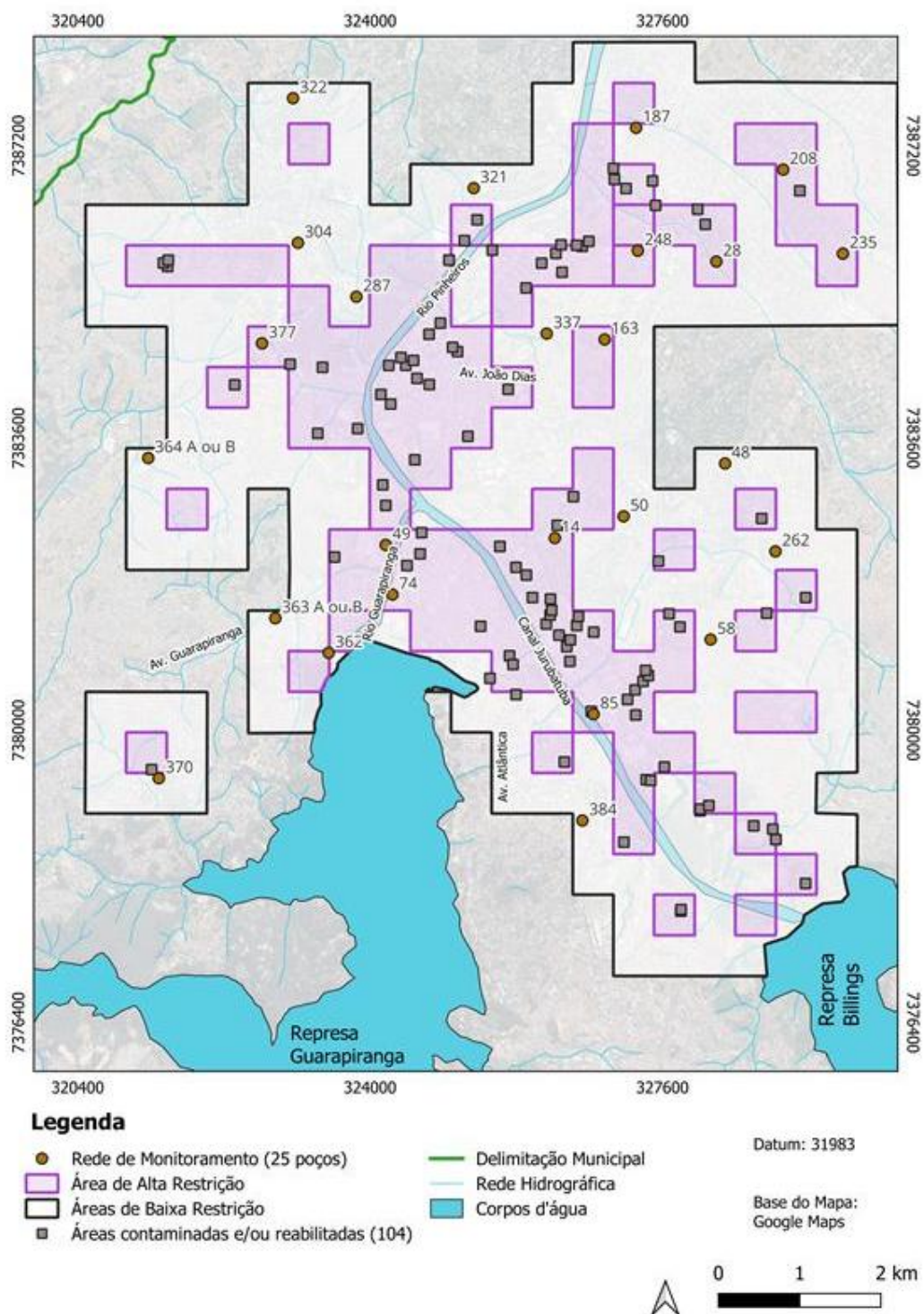
Identificação do Poço (IPT)	Nº de Cadastro (DAEE/SP-ÁGUAS)	Coordenadas UTM		Justificativa da seleção do poço	Situação do Poço	Uso da água
85	255	7380153	326706	Presença compostos organoclorado em amostragem IPT	Desativado/Não Equipado	Comercial/Sanitário
370	257	7379363	321353	Próximo da área de alta restrição e de uma área contaminada	Desativado/Equipado	Comercial/Sanitário
384	Sem Informação	7378843	326569	Localizado próximo da área de alta restrição e de áreas com elevado potencial de contaminação	Ativo	Comercial/Sanitário
322	Sem Informação	7387742	323006	Localizado próximo da área de alta restrição	Ativo	Comercial/Sanitário
48	1660	7383242	328326	Localizado próximo da área de alta restrição e de uma área contaminada	Ativo	Doméstico
287	355	7385296	323786	Localizado próximo da área de alta restrição	Ativo	Comercial/Sanitário
187	Sem Informação	7387377	327230	Localizado próximo da área de alta restrição e de áreas contaminadas	Ativo	Comercial/Sanitário
337	1682	7384842	326129	Localizado próximo da área de alta restrição e de áreas com elevado potencial de contaminação	Ativo	Doméstico
304	Sem Informação	7385960	323067	Localizado próximo da área de alta restrição	Ativo	Doméstico
364 A ou B	386	7383309	321223	Localizado próximo da área de alta restrição e de áreas com elevado potencial de contaminação	Ativo	Recreação/sanitário/irrigação
363 A ou B	Sem Informação	7381336	322787	Localizado próximo da área de alta restrição	Ativo	Comercial/Sanitário

Relatório Técnico Nº 177 723-205 – 154/1284

Identificação do Poço (IPT)	Nº de Cadastro (DAEE/SP-ÁGUAS)	Coordenadas UTM		Justificativa da seleção do poço	Situação do Poço	Uso da água
50	1573	7382591	327076	Localizado próximo da área de alta restrição e de áreas com elevado potencial de contaminação	Ativo	Doméstico
58	Sem Informação	7381073	328148	Localizado próximo da área de alta restrição e de áreas com elevado potencial de contaminação	Ativo	Indústria/Processo
262	1431	7382159	328946	Localizado próximo da área de alta restrição e de áreas com elevado potencial de contaminação	Ativo	Doméstico
321	Sem Informação	7386634	325231	Localizado próximo da área de alta restrição e de áreas contaminadas	Ativo	Comercial/Sanitário/Doméstico

Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto-FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

Figura 57 - Poços selecionados para composição de rede de monitoramento da ARC-Jurubatuba.



Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto-FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

Na etapa de planejamento das atividades de campo deverá ser avaliada a inclusão de poços a partir do cadastro, assim como no decorrer da implantação da rede poderá ser necessário incluir novos poços.

9.2.3 Procedimentos e metodologia de amostragem

No presente estudo, observou-se a presença de organoclorados em amostras coletadas de forma estratificada em poços perfilados com geofísica, as quais foram obtidas diretamente nas fraturas ou em outros pontos de entrada e saída de água no interior dos poços. Entretanto, nesses mesmos poços, para amostras coletadas de modo convencional, diretamente na primeira saída de água proveniente dos poços, não se constatou presença de organoclorados.

Esse fato denota que amostras coletadas do modo convencional se apresentam com concentrações diluídas, impossibilitando, por este tipo de amostragem, a investigação da mobilidade dos compostos organoclorados nos locais de interesse.

Dessa forma, visando garantir a representatividade e qualidade técnica dos dados, verificou-se a necessidade de adoção da metodologia de amostragem estratificada ou discreta.

Previamente à coleta das amostras estratificadas, é necessário realizar um diagnóstico do poço com perfilagens geofísicas completas executando a limpeza e as seguintes investigações: perfilagens do tipo ótica e acústica, gama natural; mapeamento de fluxo com sonda HPF (*Heat Pulse Flowmeter*) ou similar.

Esse diagnóstico permite identificar, entre outras características, a integridade física e características construtivas do poço, as interfaces entre os tipos litológicos e as estruturas tectônicas e as zonas de entrada de água no poço.

É importante ressaltar que a campanha de perfilagens geofísicas será executada uma única vez, consubstanciando-se assim a caracterização das condições hidrogeológicas ao longo da área de interesse e, por conseguinte, não sendo mais necessário repetir as citadas investigações.

Após a execução das perfilagens, deve-se proceder à coleta das amostras estratificadas com o uso de garrafa amostradora (sonda BHFS - *Borehole Fluid Sampler*, ou efetivamente similar), direcionando as coletas aos pontos de entrada de água identificados nos poços.

Estima-se que serão obtidas entre 03 e 05 amostras por poço, de acordo com as condições observadas em cada caso, determinadas pelo estudo hidrogeológico com apoio das perfilagens geofísicas.

9.2.4 Sistematização e tratamento dos dados da amostragem efetuada

Deverá ser realizada a etapa de recepção, processamento, análises de consistência e validação, sistematização e integração de dados e informações, com o objetivo de garantir a rastreabilidade, integridade e confiabilidade das informações geradas.

A campanha em toda rede de poços deverá acontecer no transcorrer de um mesmo bimestre, garantindo a comparação de dados e visualização da rede como um todo dentro de um mesmo período.

A partir da execução da primeira campanha de monitoramento, nos termos supracitados, recomenda-se, subsequentemente, a adoção dos seguintes procedimentos em relação a dados hidroquímicos da rede de monitoramento:

- **Coleta sistemática:** as campanhas de amostragem deverão ser executadas por laboratórios acreditados, com periodicidade anual, conforme estabelecido no cronograma do programa de monitoramento;
- **Validação:** durante a execução em campo, os dados deverão ser validados quanto à consistência e qualidade, por meio de verificações e conferências sistemáticas, a fim de eliminar eventuais inconsistências, erros de leitura ou falhas de registro, dentre outros;
- **Armazenamento:** o armazenamento e manipulação dos dados deverão seguir as normas de segurança da informação, assegurando a integridade, a confidencialidade e a preservação dos registros originais; e

9.2.5 Análise dos dados

Este item consiste em uma etapa fundamental do programa, cujas especificações dos serviços a serem contratados devem demonstrar como as informações pré-existent e os resultados do monitoramento serão tratados para atingir os objetivos estabelecidos.

Isso significa que as atividades não devem ficar restritas a apenas a reunir, analisar e divulgar as informações para mostrar se os compostos presentes nos poços estão ou não conformes em relação a um nível de risco aceitável.

Caso as águas subterrâneas extraídas dos poços apresentem não conformidades, é necessário ao menos tentar estabelecer relações de causa e efeito com as possíveis fontes de contaminação, formulando hipóteses investigativas conforme descrito nos objetivos e no método de trabalho.

A base técnica obtida por meio das atividades de investigação geofísica, hidrogeológica e hidroquímica – aliada a ações como análises in situ e laboratoriais realizadas por equipes especializadas em coleta e amostragem de água subterrânea em poços tubulares, é fundamental para caracterizar a qualidade das águas subterrâneas. Esse conjunto de atividades permite identificar possíveis problemas de contaminação decorrentes de passivos ambientais ainda desconhecidos, bem como acompanhar a evolução de áreas contaminadas já identificadas e em processo de remediação.

9.2.6 Estratégia de utilização e divulgação dos resultados do programa de monitoramento

- Particularmente em relação à divulgação e comunicação dos resultados do programa de monitoramento, recomenda-se adotar linguagem simples para explicar os resultados do programa de monitoramento e suas implicações para a saúde pública, conforme uma ou mais das seguintes opções:
- Relatórios técnicos detalhados que apresentem os resultados das análises laboratoriais de forma clara e concisa;

- Realização de reuniões públicas para apresentar os resultados e responder às perguntas e preocupações da população local, sobretudo sobre os cenários constatados e as perspectivas futuras;
- Divulgação com informações sempre atualizadas via *site* ou nas redes sociais dos órgãos competentes e colegiados gestores de recursos hídricos, particularmente do Comitê da Bacia do Alto Tietê (CBH-AT), dedicados a divulgar os resultados do programa de monitoramento e eventuais ações adotadas a partir dos seus resultados; e
- Difusão por meio de parcerias com a mídia local, utilizando notícias, comunicados e materiais educativos em linguagem direta e acessível (como folhetos, cartazes e vídeos) para apoiar a divulgação dos resultados do programa de monitoramento e das demais ações adotadas pelos órgãos gestores da ARC-Jurubatuba.

9.3 Estimativa de custos

Para consolidação dos custos financeiros da implantação e operação do programa de monitoramento, deverá ser elaborado um detalhamento das especificações. Essa orçamentação deverá considerar, no mínimo, as seguintes etapas e componentes:

- Levantamento bibliográfico e organização da base de dados;
- Limpeza de poços e remoção de bombas (se aplicável);
- Execução das perfilagens geofísicas;
- Equipamento e coleta de amostras estratificadas;
- Realização das análises físico-químicas e químicas;
- Tratamento, armazenamento e gestão dos dados; e
- Análise dos resultados

O apresenta **Quadro 29** uma estimativa inicial de custos, que deverá ser posteriormente melhor ajustada conforme ofertas de serviços existentes no mercado.

Relatório Técnico Nº 177 723-205 – 160/1284

Quadro 29 - Orçamento estimativo para custo da realização de monitoramento na rede proposta para a ARC-Jurubatuba.

Atividade	Unidade	Custo Unitário (R\$)	Estimativa por campanha	ESTIMATIVA DE CUSTO ANUAL (R\$)			Observações
				ANO 1 (R\$)	ANO 2 (R\$)	ANO 3 (R\$)	
Gestão e armazenamento de dados	Campanha	38000,00	1	57000,00	38000,00	38000,00	A primeira campanha demandará maior logística, em razão da etapa de perfilagem dos poços. Por esse motivo, os custos para esta fase serão mais elevados.
Limpeza do poço e remoção da bomba	Poço	5000,00	24	120000,00	120000,00	120000,00	Foi considerada limpeza de 24 poços porque o Poço 85, que integra a rede de monitoramento ora proposta, já foi limpo e perfilado no projeto ora concluído.
Execução de perfilações geofísicas na primeira campanha de monitoramento	Poço	35000,00	24	840000,00	0,00	0,00	Foram considerados 24 poços para perfilação porque o Poço 85, que integra a rede de monitoramento ora proposta, já foi perfilado no projeto ora concluído..
Amostras estratificadas utilização do equipamento (garrafa amostradora)	Poço	1100,00	125	137500,00	137500,00	137500,00	Estima-se a coleta de 4 a 5 amostras por poço, sendo que a estimativa de custo foi calculada considerando 5 amostras por ponto de monitoramento.
Amostras estratificada (realização da coleta)	Poço	175,00	125	21875,00	21875,00	21875,00	Estima-se a coleta de 4 a 5 amostras por poço, sendo que a estimativa de custo foi calculada considerando 5 amostras por ponto de monitoramento.
Amostras diluídas (realização de coleta via torneira ou outro método simples)	Poço	175,00	25	4375,00	4375,00	4375,00	Adicionalmente, prevê-se a obtenção de uma amostra diluída por poço.
Custos laboratoriais para análises de varedura de VOCs (Compostos Orgânicos Voláteis)	Amostra	150,00	150	22500,00	22500,00	22500,00	O quantitativo total de amostras considera tanto as amostras estratificadas quanto as amostras diluídas.
SUBTOTAL				1203250,00	344250,00	344250,00	-
IMPOSTO				180487,50	51637,50	51637,50	-
TOTAL				1383737,50	395887,50	395887,50	

Fonte: Ilustração elaborada no presente projeto-FEHIDRO 2021-AT-COB-136.

9.4 Benefícios esperados com a implantação do Programa de Monitoramento

A adoção das diretrizes apresentadas neste documento permitirá a estruturação de um programa de monitoramento participativo e tecnicamente consistente, com tendência expressiva de gerar informações estratégicas e confiáveis para contribuir nas medidas e ações de gestão dos recursos hídricos da região, especialmente as referentes às etapas do processo de identificação de áreas contaminadas, a fim de permitir aos usuários perceberem as possibilidades de reutilização de áreas que abrigam ou abrigaram atividades com potencial de contaminação.

Os benefícios do programa de monitoramento podem, inequivocamente, contribuir para o entendimento da adoção de medidas de proteção e controle da qualidade das águas subterrâneas utilizadas pela população e, por conseguinte, para a saúde pública. Portanto são indicadas as seguintes aplicações do Programa:

- Subsídios na tomada de decisão dos órgãos competentes responsáveis pela gestão da ARC-Jurubatuba, quanto à ampliação da liberação de uso do solo e águas subterrâneas, para os fins que se mostrarem necessários e adequados perante a legislação;
- Possibilidade de identificação de eventuais novas fontes de contaminação;
- Decisão acerca da necessidade de revisão de remediação ou de novas remediações;
- Avaliação da eficácia das medidas de controle estabelecidas e em curso;
- Projeção e adoção de intervenções que se mostrem necessárias a partir de criticidades constatadas no programa de monitoramento;
- Estabelecimento periódico de ajustes e atualizações no programa de monitoramento, sempre que se fizerem necessários, como decorrência de resultados observados, no sentido da melhoria das diferentes situações de contaminação ou como decorrência de inovações tecnológicas surgidas no tema; e

- Comunicação contínua, com técnicas assertivas, didáticas e de forma transparente, acerca dos resultados, à todas as partes interessadas, considerando sobretudo a comunidade local e a população em geral, de tal maneira que os resultados fiquem explícitos para todos e as medidas adotadas fiquem comprovadas no sentido da segura proteção da qualidade das águas subterrâneas utilizadas.

10. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados dos estudos hidrogeológicos e jurídicos apresentados neste relatório representam um esforço do Comitê da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê e da Fundação Agência da Bacia Hidrográfica do Alto Tiete para propor um modelo mais adequado de gestão dos recursos hídricos subterrâneos na ARC-Jurubatuba.

Esse modelo está integrado ao processo de gerenciamento de áreas contaminadas e visa possibilitar o engajamento de todos os atores envolvidos, sendo: o setor público, representado pelos órgãos gestores de quantidade e qualidade da água, além dos órgãos de vigilância em saúde e o setor privado, composto por usuários de recursos hídricos e responsáveis pela recuperação dos passivos ambientais.

Sem essa integração, não se vislumbram condições para promover a conscientização dos usuários, nem para prevenir ou mitigar, em médio ou longo prazo, os danos ambientais já causados.

As técnicas de investigação hidrogeológica, descritas nos itens 6.3 (Perfilagens Geofísicas) e 6.3.2.1 (Caracterização de fluxos subterrâneos e amostragem estratificada), trouxeram contribuições relevantes que, somadas aos demais elementos da pesquisa, possibilitaram a atualização do modelo conceitual de fluxos subterrâneos e a caracterização da qualidade dessas águas.

Uma das contribuições relevantes diz respeito à identificação de organoclorados nas amostras estratificadas, mesmo quando presentes em concentrações localmente baixas e restritas a zonas específicas do aquífero.

A amostragem realizada pelo método de baixa vazão pode não revelar a presença desses contaminantes devido à mistura e diluição da água no interior do poço, gerando a falsa percepção de ausência de contaminação, particularmente em

áreas com heterogeneidade litológica ou fraturas com diferentes condutividades hidráulicas.

Essa constatação corrobora uma preocupação adicional: poços que apresentam apenas traços de organoclorados, ainda que abaixo do Valor de Orientação para Intervenção (VOI), devem ser considerados com o mesmo rigor aplicado àqueles cujas concentrações superam esse limite. Da mesma forma, nos poços onde não houve detecção de organoclorados, os resultados devem ser interpretados com cautela.

Assim, a informação obtida constitui um subsídio importante para a Política Estadual de Recursos Hídricos (São Paulo, 1991) e para os procedimentos de gerenciamento de áreas contaminadas, conforme já mencionado.

Quanto ao Programa de Monitoramento a ser futuramente submetido ao CBH-AT, são apresentadas suas diretrizes gerais, especificações técnicas e estimativas orçamentárias iniciais, que deverão ser posteriormente validadas e consolidadas pela Câmara Técnica de Águas Subterrâneas (CT-AS) e Câmara Técnica de Monitoramento Hidrológico (CT-MH) do Comitê.

O Programa constitui uma base técnica de elevada importância estratégica, pois ampliará significativamente o entendimento sobre o transporte e o comportamento dos contaminantes, permitindo a avaliação contínua da presença ou ausência de substâncias nocivas ou restritivas aos diferentes tipos de uso.

Além disso, fortalecerá os mecanismos de comunicação e prestação de contas à população, aprimorando a transparência e os instrumentos de proteção à saúde pública e à qualidade das águas subterrâneas.

O Modelo de Gestão proposto resulta da análise jurídica, da experiência acumulada pelos *stakeholders* ao longo dos 15 anos de implantação da ARC-Jurubatuba e dos debates realizados durante a apresentação dos relatórios parciais nas reuniões do Grupo de Acompanhamento Técnico, constituído por representantes do CBH-AT e FABHAT com atuação na CT-AS e na CT-MH.

Nesse sentido, buscou-se o aperfeiçoamento desse modelo por meio da identificação das fragilidades existentes na aplicação das deliberações, na

coordenação institucional e na ausência de uma base técnica específica que sustentasse uma atuação integrada e acessível à população.

Com base nesses elementos, apresenta-se recomendações para a celebração de acordos de cooperação técnica entre os órgãos gestores e as instituições de saúde pública, com o objetivo de aprimorar os fluxogramas dos procedimentos de concessão de outorga, viabilizar a criação de bancos de dados integrados e promover a adoção de indicadores hidrogeológicos e de desempenho do próprio modelo de gestão.

Neste trabalho foi idealizada, também, uma cartilha destinada a promover uma comunicação direta tanto com a população da região quanto com o público externo, oferecendo informações claras e acessíveis acerca da ARC-Jurubatuba e sua gestão. Muito mais do que divulgar os resultados desse projeto, a cartilha tem como propósito reunir recomendações e proposições de programas e ações voltadas ao esclarecimento do público e à educação ambiental, proporcionando assim, o fortalecimento do modelo de gestão e o engajamento e apoio da sociedade.

Por fim, vale destacar que a iniciativa do Comitê da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê, ao fomentar o desenvolvimento de um estudo hidrogeológico regional com o apoio da FABHAT, demonstra alinhamento com suas atribuições legais e contribui para o fortalecimento do Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos – SIGRH (São Paulo, 1991). Essa atuação oferece subsídios técnicos qualificados aos órgãos gestores e fortalece a capacidade de planejamento e tomada de decisão a partir da utilização de recursos financeiros do Fundo Estadual de Recursos Hídricos (FEHIDRO).

EQUIPE TÉCNICA

CIDADES, INFRAESTRUTURA E MEIO AMBIENTE – CIMA

Seção de Planejamento Territorial, Recursos Hídricos, Saneamento e Florestas - SPRSF

Geólogo Dr. José Luiz Albuquerque Filho – Responsável Técnico do Projeto pelo IPT

Engenheira Ambiental Ma. Marcela Maciel de Araújo – IPT

Engenheira Ambiental Ana Cecília Hardt – FIPT

Geóloga Marcele Carla Nicolau – FIPT

Geóloga Thaiz Lima de Oliveira – FIPT

Engenheira Ambiental Dra. Priscila Ikematsu - IPT

Cientista Ambiental Hemily Julia Barros Bernardo – FIPT

Geógrafo Me. Luiz Gustavo Faccini – IPT

Geóloga Me. Nádia Franqueiro Correa – IPT

Geólogo Me. Pedro Rabello Crisma – IPT

Técnico Antônio José Catib Baladore – IPT

Técnico José da Silva – IPT

Tecnólogo Nivaldo Paulon – IPT

Técnico Airtton Marambaia Santa – IPT

Estagiária Geologia Laiz Oliveira Leite Silva – CIEE/IPT

Estagiária Tecnologia em Gestão Ambiental Tamires Gomes Fiel – CIEE/IPT

Estagiário Geologia João Caffagni

Seção de Investigações, Riscos e Gerenciamento Ambiental - SIRGA

Técnico Josué Rodrigues Fischer – IPT

Técnica Maria de Lourdes Monteiro Santos – IPT

Técnico Rogério Luiz Bastos – IPT

COORDENADORIA DE INTELIGÊNCIA DE MERCADO E NOVOS NEGÓCIOS - CIME

Biblioteconomista Edna Baptista dos Santos Gubitoso - IPT

Apoio Administrativo

Secretária Rosangela Aparecida Carelli – IPT

Supervisora Administrativa Susi Ferreira – IPT

Técnica Administrativa Maria Castro da Silva – IPT

Consultoria

Biotita Hidrogeologia e Meio Ambiente

Geólogo Me. Emanuel L'apicciarella

Geóloga Larissa Lima de Lucena

Geóloga Lívia de Almeida Freitas

Linkevis Advocacia Ambiental

Advogado Me. Flávio Linquevis

Advogada Ma. Gabriela Giacomolli

Acqua Terra Geologia Ambiental

Engenheiro Ambiental Dr. Marcos Barbosa

Geólogo Dr. Sasha Tom Hart

Acompanhamento e Colaboração

Engenheiro Amb. Valburg de Sousa Santos Jr. – Resp. Téc. Empreendimento FABHAT

Geólogo Dr. Marcio Costa Alberto – Consultor/FABHAT, Geoinovações

Engenheira Amb. Vitória de Almeida V. Hidalgo – Fundação Ezute/FABHAT

Arquiteto Me. Fabiano Fernandes Toffoli – CETESB

Geóloga Marina Quaresma Fernandes – CETESB

Geólogo José Eduardo Campos – SP-ÁGUAS

Tecnólogo em Segurança do Trabalho Edson Pereira da Silva – SP-ÁGUAS

Engenheiro Químico Cleuber Jose de Carvalho – COVISA

Farmacêutico Industrial José Eduardo Pincerno Pouza – COVISA

Engenheira Química Sueli Moroni da Silva Machado – FIESP

Geóloga Dra. Sibeles Ezaki – Instituto de Pesquisas Ambientais - IPA

Geólogo Dr. Reginaldo Bertolo – Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas - CEPAS/Instituto de Geociências/USP

Geólogo Renivaldo Guzzi – Associação Brasileira de Águas Subterrâneas - ABAS

João Octávio Marinho Tappis – Engenheiro Ambiental Geoinovações

Engenheiro Civil Paulo Alberto Teixeira Ugolini – Centro de Vigilância Sanitária - CVS

Química Dra. Larissa Ciccotti Freire – Universidade Federal do ABC - UFABC

Engenheira Civil Vanessa Meireles da Silva – Departamento de Estradas de Rodagem - DER

Engenheira Química Elisangela Erika M. – Secretaria do Verde e Meio Ambiente de São Paulo - SVMA

Geógrafo Me. Maykon Ivan Palma – Secretaria do Verde e Meio Ambiente de São Paulo - SVMA

Geólogo Milton Tadeu Motta – Secretaria do Verde e Meio Ambiente de São Paulo – SVMA

Engenheiro Químico Ricardo Saad – CIESP/SBC

Engenheira Ambiental Dra. Camila Arantes – Universidade Federal do ABC - UFABC

Entidades colaboradoras

Agência de Águas do Estado de São Paulo – SP-Águas

Centro de Vigilância Sanitária da Secretaria de Estado da Saúde de São Paulo – CVS-SP

Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB

Coordenadoria de Vigilância em Saúde (COVISA/SMS)

Fundação Agência da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê – FABHAT

Universidade de São Paulo – USP

São Paulo, 12 de dezembro de 2025.

CIDADES INFRAESTRUTURA E MEIO AMBIENTE
Seção de Planejamento, Recursos Hídricos,
Saneamento e Florestas

Assinado digitalmente

Geólº Dr. José Luiz Albuquerque Filho
Gerente do Projeto
CREA SP0600998502 – RE 6093

CIDADES, INFRAESTRUTURA E MEIO AMBIENTE
Seção de Planejamento Territorial, Recursos
Hídricos, Saneamento e Florestas

Assinado digitalmente

Engª. Amb. Dra. Priscila Ikematsu
Gerente Técnica
CREA SP Nº 5062802751 – RE 8644

CIDADES, INFRAESTRUTURA E MEIO AMBIENTE

Assinado Digitalmente

Geólº. Fabricio Araújo Mirandola
Diretor Técnico
CREASP 05062055808 – RE 8658

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBOTT, M. D.; LINI, A.; BIERMAN, P. R. 2000. $\delta^{18}\text{O}$, δD and 3H measurements constrain groundwater recharge patterns in an upland fractured bedrock aquifer, Vermont, USA. *Journal of Hydrology*, 228: 101–112.

ACQUA TERRA GEOLOGIA AMBIENTAL LTDA. 2025a. Relatório de Execução – Investigação por perfisagens geofísicas e coleta de amostras discretas de águas subterrâneas na região de Jurubatuba, município de São Paulo/SP. PC. FIPT 24115. Processo 24487.2024. São Paulo.

ACQUA TERRA GEOLOGIA AMBIENTAL LTDA. 2025b. Relatório Final – Investigação por perfisagens geofísicas e coleta de amostras discretas de águas subterrâneas na região de Jurubatuba, município de São Paulo/SP. PC. FIPT 24115. Processo 24487.2024. São Paulo.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. 2022. Governança das águas subterrâneas: desafios e caminhos. Organização: Pilar Carolina Villar. Brasília: ANA. 280 p. ISBN 978-65-88101-24-8. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/governanca-das-aguas-subterraneas>

ALVES, F. M. 2008. Tectônica rúptil aplicada ao estudo de aquífero em rochas cristalinas fraturadas na região de Cotia, SP. Tese (Mestrado). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

ANTUNES, P. B. 2018. Valoração ambiental: métodos e aplicações no direito brasileiro. Rio de Janeiro: Lumen Juris. 320 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2017. ABNT NBR ISO/IEC 17025:2017. Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração. São Paulo: ABNT. Disponível em:

https://www.exactusmetrologia.com.br/sites/default/files/3-nbr_iso_iec_17025-2017-versao_exclusiva_treinamento.pdf. Acesso em: 22 out. 2024.

BANNER, J. 2004. Radiogenic isotopes: systematics and applications to earth surface processes and chemical stratigraphy. *Earth-Science Reviews*, 65: 141–194.

BARBOSA, M. B. 2015. Sistema de informações geográficas aplicado ao gerenciamento da contaminação da antiga ZUPI 131, Jurubatuba, São Paulo. Dissertação (Mestrado).

BARBOSA, M. B. 2020. Aplicação e desenvolvimento dos métodos de caracterização de aquíferos fraturados utilizando poços tubulares. Tese (Doutorado).

BERTOLO, R. A. 1996. Relações entre rios e o aquífero sedimentar da Bacia de São Paulo em área de exploração intensiva de água subterrânea. Dissertação (Mestrado). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

BRADLEY, P. M. 2000. Microbial degradation of chloroethenes in groundwater systems. *Hydrogeology Journal*, 8: 104–111.

BRASIL. 2005. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução nº 357, de 17 de março 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. *Diário Oficial da União*, n. 053, p. 58–63, 18 mar. 2005. Alterada pelas Resoluções 410/2009 e 430/2011.

BRASIL. 1942. Lei de Introdução às Normas do Direito Brasileiro – Decreto-Lei nº 4.657, de 4 de setembro de 1942. Rio de Janeiro: Presidência da República. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto-lei/del4657compilado.html. Acesso em: 03 jan. 2025.

BRASIL. 1999. Lei nº 9.784, de 29 de janeiro de 1999. Regula o processo administrativo no âmbito da Administração Pública Federal. Brasília, DF: Presidência da República. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9784.htm. Acesso em: 03 jan. 2025.

BRASIL. 1997. Lei Federal 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 União: Brasília, DF, col. 1, p. 470, 08 jan. 1997.

BRASIL. MINISTÉRIO DA SAÚDE. 2021. Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Estabelece os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União, seção 1, Brasília, DF, n. 84, p. 127, 07 maio 2021.

BULLEN, T. D.; KENDALL, C. 1998. Tracing of weathering reactions and water flowpaths: A multi-isotope approach. In: KENDALL, C.; McDONNELL, J. J. (Eds.). Isotope tracers in catchment hydrology. Amsterdam: Elsevier Science B.V. 839 p.

CBH-AT – Comitê da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê. 2011. Deliberação CBH-AT nº 01, de 16 de fevereiro de 2011. Estabelece áreas de restrição e controle para a captação e uso das águas subterrâneas no município de São Paulo, na região de Jurubatuba.

CBH-AT – Comitê da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê. 2021. Deliberação CBH-AT nº 139, de 15 de dezembro de 2021. Rerratifica a Área de Restrição e Controle para a captação e uso das águas subterrâneas no município de São Paulo, na região de Jurubatuba.

CBH-AT – Comitê da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê. 2021. Deliberação nº 130, de 13 de agosto de 2021. Aprova a indicação de empreendimentos para financiamento com

recursos do FEHIDRO em 2021. Diário Oficial do Estado de São Paulo, São Paulo, 17 fev. 2021. Disponível em: <https://sigrh.sp.gov.br/public/uploads/deliberation//CBH-AT/19654/deliberacao-cbh-at-n-130-de-13-08-2021-aprova-a-indicacao-de-empresendimentos-para-financiamento-com-recursos-do-fehidro-em-2021.pdf>

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. 2016. Decisão de Diretoria nº 009/2016/E/C/I, de 14 de janeiro de 2016. Estabelece os critérios de que trata o artigo 1º da Resolução SMA nº 94, de 14 de dezembro de 2015, referentes à exigência de acreditação de atividades de amostragem de águas subterrâneas. Diário Oficial do Estado de São Paulo, São Paulo, 14 jan. 2016.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. 2021. Decisão de Diretoria nº 125/2021/E, de 09 de dezembro de 2021. Dispõe sobre a aprovação da atualização da Lista de Valores Orientadores para Solo e Água Subterrânea. Diário Oficial do Estado de São Paulo, 131(240), p. 60, 12 dez. 2021.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. 2025. Áreas Cadastradas no Estado de São Paulo. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/wp-content/uploads/sites/17/2021/03/Endereco.pdf>. Acesso em: jul. 2025.

CHE – Collaborative for Health and Environment. 2025. Toxicant & Disease Database. Disponível em: <https://www.healthandenvironment.org/resources/toxicant-and-disease-database/>. Acesso em: 18 nov. 2025.

CLARK, I.; FRITZ, P. 1997. Environmental isotopes in hydrogeology. Boca Raton: Lewis Publishers. 328 p.

CRH – Conselho Estadual de Recursos Hídricos. 2022. Deliberação CRH nº 265, de 28 de abril de 2022. Referenda a Deliberação CBH-AT nº 139, de 15 de dezembro de 2021, que rerratifica a Área de Restrição e Controle para a captação e uso das águas

subterrâneas no município de São Paulo, na região de Jurubatuba. Diário Oficial do Estado de São Paulo, São Paulo, 04 mai. 2022.

DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica. 1975. Estudo de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo. Região Administrativa 1.

DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica. 2017. Instrução Técnica DPO nº 10, de 30 de maio de 2017. Diário Oficial do Estado de São Paulo. Disponível em: <https://www.doe.sp.gov.br/executivo/secretaria-de-meio-ambiente-infraestrutura-e-logistica/instrucao-tecnica-dr-n-10-de-30-de-maio-de-2017-0240423113111209261169>. Acesso em: 02 jun. 2025.

DAEE / SERVIMAR. 2008. Delimitação de áreas de restrição e controle de captação e uso das águas subterrâneas no Município de São Paulo. Bloco B: Aquífero Cristalino – Relatório Final – Caracterização da quantidade e qualidade das águas subterrâneas e proposta de restrição e controle de uso. São Paulo. v. 1, 166 p.

DATAGEO – Infraestrutura de Dados Espaciais Ambientais do Estado de São Paulo. 2025. Metadados – Áreas Contaminadas e Reabilitadas (Shapefile). São Paulo. Disponível em: <https://datageo.ambiente.sp.gov.br/app/?ctx=DATAGEO>. Acesso em: 21 mai. 2025.

FABHAT / SERVIMAR Serviços Técnicos Ambientais. 2012. Mapeamento de áreas com potenciais riscos de contaminação das águas subterrâneas da UGRHI-06 e suas regiões de recarga (Relatório Síntese). São Paulo: SERVIMAR, set. 2012.

FAURE, G.; PAURE, G. 1986. Principles of Isotope Geology. 2. ed. New York: John Wiley & Sons.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMÉTRIO, J. G. A. 2008. Hidrogeologia: conceitos e aplicações. Brasília: CPRM.

FERNANDES, A. J.; FIUME, B.; BERTOLO, R. A.; HIRATA, R. 2016. Modelo geométrico de fraturas e análise da tectônica rúptil aplicados ao estudo do fluxo do aquífero cristalino, São Paulo (SP). *Geologia USP – Série Científica*, 16(3): 71–88.

FIUME, B. 2013. Geologia estrutural de detalhe para elaboração de modelo conceitual de circulação de água subterrânea: estudo de caso em Jurubatuba, SP. Dissertação (Mestrado).

FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. 2006. Proteção da qualidade da água subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais. Washington: Banco Mundial. 104 p.

FREGONA, L. G. G. 2023. Avaliação temporal da atenuação de compostos etenoclorados na água subterrânea de uma área industrial no bairro de Jurubatuba, São Paulo, Brasil. Dissertação (Mestrado).

GEOSAMPA – Mapa Digital da Cidade de São Paulo. 2025. Download de Camadas – Licenciamento Ambiental: Área Contaminada e Reabilitada (shapefile). São Paulo. Disponível em: <https://geosampa.prefeitura.sp.gov.br/PaginasPublicas/SBC.aspx>. Acesso em: 05 abr. 2025.

GIANCURSI, F. D.; LOPES, M. F. C. 1980. Aspectos hidrológicos da Região da Grande São Paulo. Mesa Redonda: Aspectos Geotécnicos da Bacia Sedimentar de São Paulo. Publ. Esp. SBG/ABGE, São Paulo, p. 117–128.

HART, S. T. 2023. Temporal conceptual models for contaminated complex site management, based on a remediation case of chlorinated solvent commingled plumes in weathered and fractured bedrock. Tese (Doutorado).

HIRATA, R. C. A.; FERREIRA, L. M. R. 2001. Os aquíferos da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê: disponibilidade hídrica e vulnerabilidade à poluição. *Revista Brasileira de Geociências*, 31(1): 43–50.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. 2024a. Estudos Hidrogeológicos na Região de Jurubatuba, no Município de São Paulo – Plano de Trabalho – Relatório Parcial 1 (RP1). São Paulo, 08 fev. 2024. (IPT, Relatório 171.268-205).

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. 2024b. Estudos Hidrogeológicos na Região de Jurubatuba, no Município de São Paulo – Relatório Parcial 2.1 (RP2.1). São Paulo, 08 maio 2024. (IPT, Relatório 172 380-205).

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. 2024c. Estudos Hidrogeológicos na Região de Jurubatuba, no Município de São Paulo – Relatório Parcial 2.2 (RP2.2). São Paulo, 19 jul. 2024. (IPT, Relatório 172 592-205).

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. 2024d. Estudos Hidrogeológicos na Região de Jurubatuba, no Município de São Paulo – Relatório Parcial 3.1 (RP3.1). São Paulo, 07 out. 2024. (IPT, Relatório 173.234-205).

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. 2024e. Estudos Hidrogeológicos na Região de Jurubatuba, no Município de São Paulo – Relatório Parcial 3.2 (RP3.2). São Paulo, 12 dez. 2024. (IPT, Relatório 173.968-205).

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. 2025. Estudos Hidrogeológicos na Região de Jurubatuba, no Município de São Paulo – Relatório Parcial 4 (RP4). São Paulo, 03 set. 2025. (IPT, Relatório 176.600-205).

JULIANI, C. 1992. O embasamento pré-cambriano da Bacia de São Paulo. Seminário: Problemas Geológicos e Geotécnicos na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). ABAS/ABGE/SBG/SP, p. 3–20.

LAPICCIRELLA, E. S. P. 2009. Contaminação e áreas de restrição de uso de água subterrânea no entorno do canal Jurubatuba em São Paulo. Dissertação (Mestrado).

LIMA, P. L.; HIRATA, R.; BERTOLO, R.; VIVIANI, J. 2004. A interferência antrópica nos padrões naturais de fluxo de água subterrânea: um estudo de caso na Bacia de São Paulo, Brasil. Boletín Geológico y Minero, Madrid, 115: 391–398.

LIMA, P. L. 2018. Caracterização de detalhe do perfil vertical de contaminação em um aquífero cristalino fraturado e intemperizado – Jurubatuba, São Paulo, SP. Tese (Doutorado).

LINQUEVIS – Assessoria e Advocacia Ambiental. 2025. Análise das Deliberações CBH-AT nº 01/2011 e 139/2021: indicação de pontos de revisão e adequação com base nas legislações pertinentes. Elaborado por: Dr. Flávio Linquevis; MSc. Gabriela Giacomolli. São Paulo: FIPT/IPT, nov. 2025.

MALDANER, C. H. 2010. Recarga de aquífero em área urbana: estudo de caso de Urânia (SP). 95 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

MÖDINGER, J.; KOBUS, H. 2006. Approach and methods for the assessment of sustainable groundwater management in the Rhine-Neckar Region, Germany. International Journal of Water Resources Development, Stuttgart, 15 ago. 2006. Disponível em: <http://www.tandfonline.com/loi/>

NASCIMENTO, V. A. D. 2023. Modelo conceitual hidrogeológico de um caso de contaminação do aquífero fraturado por solventes clorados na Região Metropolitana de São Paulo. Dissertação (Mestrado).

OLIVEIRA, A. P. 2007. Direito ambiental constitucional: uma análise principiológica da consolidação do Estado protetor do ambiente nas constituições brasileira e portuguesa. Revista da Faculdade de Direito da UFMG, Belo Horizonte, n. 51, p. 46–68, jul./dez. 2007. Disponível em: <https://revista.direito.ufmg.br/index.php/revista/article/view/57>. Acesso em: 03 jan. 2025.

PEDE, M. A. Z. 2004. Caracterização da condutividade hidráulica do embasamento cristalino alterado saturado na região metropolitana de São Paulo. Dissertação (Mestrado).

PETELET-GIRAUD, E.; NÉGREL, P.; GOURCY, L.; SCHMIDT, C.; SCHIRMER, M. 2007. Geochemical and isotopic constraints on groundwater–surface water interactions in a highly anthropized site: the Wolfen Bitterfeld megasite (Mulde subcatchment, Germany). *Environmental Pollution*, 148: 707–717.

PINO, D. S. 2019. Aplicação do método Discrete Fracture Network para definição do modelo conceitual hidrogeológico do aquífero fraturado da região de Jurubatuba, São Paulo. Tese (Doutorado).

RIBEIRO, L. A. F. S. 2012. Perfilagens geofísicas de poços tubulares profundos, região do Canal Jurubatuba, São Paulo (SP). Monografia de Trabalho de Formatura. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

RICCOMINI, C. 1989. O Rift Continental do Sudeste do Brasil. Tese (Doutorado). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 256 f.

RICCOMINI, C.; COIMBRA, A. M.; TAKIYA, H. 1992. Tectônica e sedimentação na Bacia de São Paulo. Seminário: Problemas Geológicos e Geotécnicos na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). ABAS/ABGE/SBG/SP, p. 21–45.

RIVETT, M. O. et al. 2012. The legacy of chlorinated solvents in the Birmingham aquifer: observations spanning three decades and the challenge of future urban groundwater development. *Journal of Contaminant Hydrology*, 140–141: 107–123.

ROCHA, G.; GONÇALVES, V. G.; REBOUÇAS, A. C.; BARRETO, L. M. B. 1989. Hidrogeologia da Bacia de São Paulo. Workshop de Geologia da Bacia de São Paulo. IG-USP, SBG/SP, São Paulo, p. 44–59.

SÃO PAULO (MUNICÍPIO). 2014. Lei nº 16.050, de 31 de julho de 2014. Aprova a Política Urbana e o Plano Diretor Estratégico do Município de São Paulo e revoga a Lei nº 13.430/2002. São Paulo: Prefeitura Municipal de São Paulo. Disponível em: https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/licenciamento/legislacao/plano_diretor/index.php

SÃO PAULO (MUNICÍPIO). 2023a. Lei nº 17.965, de 19 de junho de 2023. Aprova Plano de Intervenção Urbana para o perímetro do Arco Jurubatuba. Disponível em: <https://legislacao.prefeitura.sp.gov.br/leis/lei-17965-de-19-de-junho-de-2023>. Acesso em: 3 jun. 2025.

SÃO PAULO (MUNICÍPIO). 2023b. Lei nº 17.975, de 8 de julho de 2023. Dispõe sobre a revisão intermediária do Plano Diretor Estratégico do Município de São Paulo. Disponível em: <https://legislacao.prefeitura.sp.gov.br/leis/lei-17975-de-8-de-julho-de-2023>. Acesso em: 3 jun. 2025.

SÃO PAULO (MUNICÍPIO). Secretaria Municipal de Urbanismo e Licenciamento – SMUL. 2024. Projeto de Intervenção Urbana (PIU) Arco Jurubatuba. Prefeitura do Município de São Paulo/SMUL.

SÃO PAULO (MUNICÍPIO). 2025. Relatório de Áreas Contaminadas e Reabilitadas no Município de São Paulo. Coordenação de Licenciamento Ambiental. Grupo Técnico Permanente de Áreas Contaminadas. Disponível em: https://prefeitura.sp.gov.br/documents/d/meio_ambiente/59-gtac_jul_2025-pdf. Acesso em: 21 jul. 2025b.

SÃO PAULO (ESTADO). 1991. Decreto nº 32.955, de 7 de fevereiro de 1991. Regulamenta a Lei nº 6.134, de 02 de junho de 1988, que dispõe sobre a preservação dos depósitos naturais de águas subterrâneas do Estado de São Paulo.

SÃO PAULO (ESTADO). 2006. Secretaria do Meio Ambiente; Secretaria de Energia, Recursos Hídricos e Saneamento; Secretaria da Saúde. Resolução Conjunta SMA/SERHS/SES nº 3, de 21 de junho de 2006. Dispõe sobre procedimentos integrados para controle e vigilância de soluções alternativas coletivas de abastecimento de água para consumo humano provenientes de mananciais subterrâneos.

SÃO PAULO (ESTADO). 2009. Lei nº 13.577, de 08 de julho de 2009. Dispõe sobre diretrizes e procedimentos para a proteção da qualidade do solo e o gerenciamento de áreas contaminadas. Assembleia Legislativa do Estado de São Paulo, São Paulo.

SÃO PAULO (ESTADO). 2011. Conselho Estadual de Recursos Hídricos. Deliberação CRH nº 132, de 19 de abril de 2011. Homologa a Deliberação CBH-AT nº 01, de 16 de fevereiro de 2011, que estabelece área de restrição e controle para a captação e uso das águas subterrâneas no município de São Paulo, na região de Jurubatuba.

SÃO PAULO (ESTADO). 2013a. Decreto nº 59.263, de 5 de junho de 2013. Regulamenta a Lei nº 13.577, de 8 de julho de 2009, que dispõe sobre diretrizes e procedimentos para a proteção da qualidade do solo e gerenciamento de áreas contaminadas.

Disponível

em:

<https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/2013/decreto-59263-05.06.2013.html>

SÃO PAULO (ESTADO). Secretaria do Meio Ambiente – SMA. 2013b. Resolução nº 100, de 17 de outubro de 2013. Regulamenta as exigências para os resultados analíticos, incluindo-se a amostragem, objeto de apreciação pelos órgãos integrantes do SEAQUA. Diário Oficial do Estado de São Paulo, republicada em 22 out. 2013.

SÃO PAULO (ESTADO). Secretaria do Meio Ambiente – SMA. 2015. Resolução nº 94, de 14 de dezembro de 2015. Prorroga o prazo para exigência de acreditação de atividades de amostragem estabelecido no caput do art. 3º da Resolução SMA nº 100/2013. Diário Oficial do Estado de São Paulo, São Paulo.

SÃO PAULO (ESTADO). 2017a. Resolução SMA nº 10, de 8 de fevereiro de 2017. Dispõe sobre a definição das atividades potencialmente geradoras de áreas contaminadas. Diário Oficial do Estado de São Paulo, seção 1, São Paulo, p. 43, fev. 2017a. Disponível em: <http://arquivos.ambiente.sp.gov.br/legislacao/2017/02/resolucao-sma-010-2017-definicao-das-atividades-potencialmente-geradoras-de-areas-contaminadas.pdf>

SÃO PAULO (ESTADO). 2017b. Resolução SMA nº 11, de 8 de fevereiro de 2017. Dispõe sobre a definição das regiões prioritárias para a identificação de áreas contaminadas. Diário Oficial do Estado de São Paulo, seção 1, São Paulo, p. 5–10, fev. 2017b. Disponível em: <https://semil.sp.gov.br/legislacao/2022/07/resolucao-sma-011-7/>

SILVA, J. A. F. D. 2018. Estimativa de recarga e caracterização hidroquímica e isotópica das águas subterrâneas dos aquíferos da região do canal do Jurubatuba. Tese (Doutorado).

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. 1998. Technical Protocol for Evaluating Natural Attenuation of Chlorinated Solvents in Ground Water. Ada, Oklahoma. 248 p.

VIVIANI-LIMA, J. B. 2007. Estimativa de recarga em áreas urbanizadas: estudo de caso na Bacia do Alto Tietê. 219 p. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

WANG, H.; ZHANG, Q. 2019. Research advances in identifying sulfate contamination sources of water environment by using stable isotopes. International Journal of Environmental Research and Public Health, 16: 1914. doi: 10.3390/ijerph16111914.

ANEXO 1 - Registros Fotográficos das Atividades de Campo de Amostragem

**ANEXO 2 - Certificado de Acreditação do Laboratório Centro de Biologia Experimental
Oceanus**

ANEXO 3 - Relatório de Ensaio 273056/2024 - A – 1.0 do Laboratório Centro de
Biologia Experimental Oceanus

**ANEXO 4 - Relatório de Ensaio 169466/2025 - A – 1.0 do Laboratório Centro de
Biologia Experimental Oceanus**

ANEXO 5 - Classificação do tipo de uso da água captada em poços da ARC-Jurubatuba

**ANEXO 6 - Relatório de Execução das perfilagens geofísicas e coleta de amostras da Acqua
Terra Geologia Ambiental**

ANEXO 7 - Relatório Final Análise Jurídica da Linquevis Assessoria e Advocacia Ambiental