



Mapeamento Geológico e Hidrogeológico do Município de Joinville-SC

Produto P4
Mapa Hidrogeoquímico

Março 2021



Prefeitura de
Joinville



SERVIÇO GEOLÓGICO
DO BRASIL - CPRM

Dados internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

M297 Mapeamento geológico e hidrogeológico do município de Joinville, SC: produto 4, mapeamento geológico e hidrogeológico do município de Joinville, SC / Organização Marcos Alexandre de Freitas, Marcelo Goffermann; Eliel Martins Senhorinho. Porto Alegre: CPRM, 2021.
125 p. : il.

ISBN 978-65-5664-149-2

1. Geologia Regional. 2. Hidrogeologia. 3. Santa Catarina I. Freitas, Marcos Alexandre de (org.). II. Goffermann, Marcelo (org.). III. Senhorinho, Eliel Martins (org.).

CDD 558.164

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Ana Lúcia Coelho CRB 10-840

MAPEAMENTO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO DO MUNICÍPIO DE JOINVILLE - SC

PRODUTO 4 | MAPA HIDROGEOQUÍMICO

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA

Ministro de Estado

Bento Albuquerque

Secretário de Geologia, Mineração e Transformação Mineral

Pedro Paulo Dias Mesquita

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL | CPRM DIRETORIA EXECUTIVA

Diretor Presidente

Esteves Pedro Colnago

Diretor de Geologia e Recursos Minerais

Márcio José Remédio

Diretor de Hidrologia e Gestão Territorial

Alice Silva de Castilho

Diretor de Infraestrutura Geocientífica

Paulo Romano

Diretor de Administração e Finanças

Cassiano de Souza Alves

SUPERINTENDÊNCIA REGIONAL DE PORTO ALEGRE

Superintendente

Lucy Takehara Chemale

Gerência de Geologia e Recursos Minerais

Carla Klein

Gerência de Infraestrutura Geocientífica

Ana Cristina Bomfim Peixoto

Gerência de Hidrologia e Gestão Territorial

Franco Buffon

Gerência de Administração e Finança

Alexandre Trevisan Chagas

EQUIPE EXECUTORA

Coordenador e Responsável Técnico

Geólogo DSc Marcos Alexandre de Freitas

Supervisores

Geólogo DSc Bruno Ludovico Dihl Horn

Geólogo DSc Jorge Henrique Laux

Geólogo MSc Marcelo Goffermann

Executores

Geólogo DSc Bruno Ludovico Dihl Horn

Geóloga DSc Carla Klein

Geólogo MSc Carlos Augusto Provenzano

Geólogo MSc Carlos Moacyr da Fontoura Iglesias

Geólogo Eliel Martins Senhorinho

Geóloga MSc Isadora Aumond Kuhn

Geólogo DSc Jorge Henrique Laux

Geólogo MSc Leandro Menezes Betiollo

Geólogo MSc Marcelo Goffermann

Geólogo DSc Marcos Alexandre de Freitas

Geóloga MSc Paloma Gabriela Rocha

Engenheira Hidróloga MSc Adriana Burin Weschenfelder

Engenheira Hidróloga MSc Camila Dalla Porta Mattiuzi

Engenheira Cartógrafa Giana Grupioni Rezende

Engenheira Hidróloga MSc Karine Pickbrenner

Engenheira Hidróloga MSc Marta Rubbo

Técnicos em Geociências

Bruno Francisco B. Schiehl

Clézio Ribeiro Santos

Luís Alberto da Costa e Silva

Pedro Cesar de Freitas

Ramon Darwin de Araújo

Estagiários

Andrey Martins de Lima

Henrique Pereira dos Santos

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA
SECRETARIA DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO
E TRANSFORMAÇÃO MINERAL
SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM
DIRETORIA DE GEOLOGIA E RECURSOS MINERAIS

| PROGRAMA DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL |

MAPEAMENTO GEOLÓGICO **E HIDROGEOLÓGICO DO** **MUNICÍPIO DE JOINVILLE - SC**

PRODUTO 4 | MAPA HIDROGEOQUÍMICO

ORGANIZADORES

Marcos Alexandre de Freitas
Eliel Martins Senhorinho
Marcelo Goffermann



Prefeitura de
Joinville



SERVIÇO GEOLÓGICO
DO BRASIL – CPRM

Porto Alegre
Março de 2021



Foto: Prefeitura Municipal de Joinville

SUMÁRIO

1. Considerações Iniciais.....	19
2. Conceituação Teórica.....	20
2.1 Introdução.....	20
2.2 Caracterização da qualidade das águas.....	20
2.2.1 Características Físicas.....	20
2.2.2 Características Químicas.....	22
2.2.3 Principais Íons das Águas Subterrâneas e suas Características Químicas.....	24
2.2.4 Íons Secundários e Traços.....	27
2.2.5 Compostos Orgânicos Sintéticos.....	30
3. Aspectos Metodológicos.....	32
3.1 Introdução.....	32
3.2 Seleção dos Pontos Amostrados.....	32
3.3 Coleta das Amostras.....	33
3.4 Análise Laboratorial.....	35
3.5 Tratamento dos Dados.....	36
4. Resultados.....	37
4.1 Introdução.....	37
4.2 Características Gerais da Hidroquímica das Águas Subterrâneas.....	40
4.3 Parâmetros Analisados.....	42
4.3.1 Turbidez.....	42
4.3.2 Condutividade Elétrica (Ce).....	44
4.3.3 Ph.....	45
4.3.4 Eh (Potencial De Oxirredução).....	46
4.3.5 Sólidos Totais Dissolvidos (Std).....	48
4.3.6 Alcalinidade Total.....	49
4.3.7 Dureza Total.....	50
4.3.8 Bicarbonatos (HCO_3^-).....	51
4.3.9 Cloretos (Cl^-).....	52
4.3.10 Sulfatos (SO_4^{-2}).....	53
4.3.11 Sódio (Na^+).....	54
4.3.12 Potássio (K^+).....	55
4.3.13 Cálcio (Ca^{+2}).....	56
4.3.14 Magnésio (Mg^{+2}).....	58

4.3.15 Nitratos (NO_3^-).....	59
4.3.16 Nitritos (NO_2^-).....	60
4.3.17 Nitrogênio Total (N).....	61
4.3.18 Ferro Total (Fe)	63
4.3.19 Manganês Total (Mn)	66
4.3.20 Fluoretos (F^-).....	68
4.3.21 Fosfatos (PO_4^{-3})	69
4.3.22 Alumínio Total (Al).....	70
4.3.23 Arsênio Total (As).....	71
4.3.24 Bário Total (Ba).....	71
4.3.25 Boro Total (B).....	72
4.3.26 Brometos (Br).....	73
4.3.27 Cádmio Total (Cd).....	73
4.3.28 Chumbo Total (Pb)	73
4.3.29 Cobalto Total (Co).....	74
4.3.30 Cobre Total (Cu).....	74
4.3.31 Cromo Total (Cr)	75
4.3.32 Estrôncio Total (Sr).....	76
4.3.33 Lítio Total (Li).....	76
4.3.34 Molibdênio Total (Mo)	76
4.3.35 Mercúrio Total (Hg).....	76
4.3.36 Níquel Total (Ni).....	76
4.3.37 Selênio Total (Se)	77
4.3.38 Vanádio Total (V)	77
4.3.39 Zinco Total (Zn).....	77
4.3.40 Prata Total (Ag)	78
4.3.41 Fenóis Totais.....	78
4.3.42 BTEX.....	78
4.3.43 HPA.....	78
4.3.44 TPH	78
4.3.45 Agrotóxicos	79
4.4 Tipos Hidroquímicos.....	79
4.4.1 Métodos Gráficos.....	79
4.4.2 Grupos Hidroquímicos.....	80
4.5 Evolução Geoquímica das Águas Subterrâneas	84

4.6 Adequabilidade das Águas Subterrâneas ao Uso	87
4.6.1 Potabilidade	87
4.6.2 Uso Industrial	94
4.6.3 Agricultura	95
5. Considerações Finais	98
6. Referências Bibliográficas	101
7. Responsáveis Técnicos	103
8. Apêndice A – Mapa Hidrogeoquímico do Município de Joinville	104
9. Anexo A – Quadro Resumido dos Resultados Analíticos	105
10. Anexo B – Laudos Físico-Químicos Originais	106

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Localização dos pontos amostrados para análise laboratorial.	32
Figura 3.2. Medição em campo dos parâmetros pH, Eh, CE e temperatura da água durante a coleta das amostras.	33
Figura 3.3. Filtração da amostra de água para análise de metais com seringa e membrana filtrante de 0,45 µm.	34
Figura 3.4. Acondicionamento das amostras em caixas de isopor contendo bolsas de gelo gel, para preservação das amostras durante o envio ao laboratório analítico.	35
Figura 4.1. Distribuição espacial dos valores de turbidez nas amostras de água subterrânea coletadas	44
Figura 4.2. Distribuição espacial dos valores de condutividade elétrica nas amostras de água subterrânea coletadas.	45
Figura 4.3. Distribuição espacial dos valores e pH das nas amostras de água subterrânea coletadas.	46
Figura 4.4. Distribuição espacial dos valores de Eh nas amostras de água subterrânea coletadas.	47
Figura 4.5. Distribuição espacial da concentração dos sólidos totais dissolvidos nas amostras de água subterrânea coletadas.	48
Figura 4.6. Distribuição espacial da alcalinidade total das nas amostras de água subterrânea coletadas.	49
Figura 4.7. Distribuição dos valores de dureza total nas amostras de água subterrânea coletadas. de Joinville – SC.	50
Figura 4.8. Distribuição das concentrações de bicarbonatos (HCO_3^-) nas amostras de água subterrânea coletadas.	51
Figura 4.9. Distribuição espacial das concentrações do ânion cloreto (Cl^-) nas amostras de água subterrânea coletadas.	52
Figura 4.10. Distribuição espacial das concentrações do ânion sulfato (SO_4^{-2}) nas amostras de água subterrânea coletadas.	53
Figura 4.11. Distribuição espacial das concentrações de sódio (Na^+) nas amostras de água subterrânea coletadas.	55
Figura 4.12. Distribuição espacial das concentrações de potássio (K^+) nas amostras de água subterrânea coletadas.	56
Figura 4.13. Distribuição espacial das concentrações do íon cálcio (Ca^{+2}) nas amostras de água subterrânea coletadas.	57
Figura 4.14. Distribuição espacial dos valores de magnésio (Mg^{+2}) nas amostras de água subterrânea coletadas.	58
Figura 4.15. Concentrações de nitratos (NO_3^-) nas amostras de água subterrânea coletadas, expressas em mg/L de NO_3^-	60

Figura 4.16. Distribuição espacial do nitrito (NO_2^-) nas amostras de água subterrânea coletadas.....	61
Figura 4.17. Distribuição espacial das concentrações de nitrogênio total (N) nas amostras de água subterrânea coletadas.	62
Figura 4.18 Distribuição espacial das concentrações de ferro total (Fe) nas amostras de água subterrânea coletadas.	63
Figura 4.19. Auréola de alteração em gnaiss granulítico liberando o óxido de ferro de minerais máficos (amostra coletada na localidade Rio Bonito (latitude 26° 08' 52" S; longitude 48° 54' 53,6" O).	64
Figura 4.20. Presença de óxidos de ferro no manto de alteração de rocha gnáissica em corte de estrada na Serra da Dona Francisca (latitude 26° 12' 47,5" S; longitude 49° 03' 07" O).	65
Figura 4.21. Ferro sob a forma coloidal em águas freáticas no solo localizado junto a SC-418 (latitude 26° 12' 17,2" S; longitude 49° 07' 50" O).	65
Figura 4.22. Ferro coloidal impregnando ao revestimento do poço JAP051 da antiga Cervejaria Antártica.	66
Figura 4.23. Ocorrência de mineralização de óxido de manganês (pirolusita) na pedreira no Morro do Timbé (latitude 26° 13' 03,2" S; longitude: 48° 49' 26,9" O).	67
Figura 4.24. Distribuição espacial das concentrações do manganês total (Mn) nas amostras de água subterrânea coletadas.	68
Figura 4.25. Distribuição dos valores de fluoretos (F) nas amostras de água subterrânea coletadas.	69
Figura 4.26. Distribuição espacial do fosfato (PO_4^{3-}) nas amostras de água subterrânea coletadas.	70
Figura 4.27. Distribuição espacial das concentrações de alumínio total (Al) nas amostras de água subterrânea coletadas.	71
Figura 4.28. Distribuição espacial das concentrações de bário total (Ba) nas amostras de água subterrânea coletadas.	72
Figura 4.29. Distribuição espacial das concentrações de boro total (B) nas amostras de água subterrânea coletadas.	72
Figura 4.30. Distribuição espacial das concentrações de brometos (Br) nas amostras de água subterrânea coletadas.	73
Figura 4.31. Distribuição espacial das concentrações de chumbo total (Pb) nas amostras de água subterrânea coletadas.	74
Figura 4.32. Distribuição espacial das concentrações de cobre total (Cu) nas amostras de água subterrânea coletadas.	75
Figura 4.33. Distribuição espacial das concentrações de cromo total (Cr) nas amostras de água subterrânea coletadas.	75
Figura 4.34. Distribuição espacial das concentrações de estrôncio total (Sr) nas amostras de água subterrânea coletadas.	76
Figura 4.35. Distribuição espacial das concentrações de níquel (Ni) nas amostras de água subterrânea coletadas.	77

Figura 4.36. Distribuição espacial das concentrações de zinco (Zn) nas amostras de água subterrânea coletadas.	78
Figura 4.37. Diagrama de Stiff do poço JAP031 exibindo uma típica água bicarbonatada cálcica.....	79
Figura 4.38. Diagrama de Stiff do poço JAP020 exibindo uma água cloretada sódica com alta concentração de sais dissolvidos.	79
Figura 4.39. Diagrama de Piper para todas as amostras de águas analisadas.....	80
Figura 4.40. Distribuição espacial dos tipos hidroquímicos das águas nas amostras de água subterrânea coletadas.	81
Figura 4.41. Diagrama de Piper para os poços que captam exclusivamente o aquífero fraturado.	82
Figura 4.42. Diagrama de Piper para os pontos de captação que captam o aquífero granular.....	83
Figura 4.43. Diagrama de Piper para os pontos de captação onde o aquífero não é definido.....	83
Figura 4.44. Mapa da razão $r K^+ / r Na^+$	85
Figura 4.45. Mapa da razão $r Cl^- / r HCO_3^-$	85
Figura 4.46. Mapa da razão $r Mg^{+2}/r Ca^{+2}$	86
Figura 4.47. Zoneamento hidroquímico das águas subterrâneas em Joinville.	86
Figura 4.48. Mapa representando os poços que possuem VMP acima padrão de potabilidade para ferro (Fe) e manganês (Mn).....	89
Figura 4.49. Localização dos poços com concentração de níquel acima do VMP.	92
Figura 4.50. Localização dos pontos com concentração de alumínio acima do VMP.	93
Figura 4.51. Localização dos poços com excessos de sódio e cloretos.....	94

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1. Boxplot do parâmetro turbidez.	43
Gráfico 4.2. Diagrama de dispersão entre ferro total (Fe) e turbidez nos poços que captam o aquífero granular.....	43
Gráfico 4.3. Boxplot da CE. À direita, para melhor visualização, observa-se o mesmo diagrama sem os valores extremos e outliers.	44
Gráfico 4.4. Boxplot do parâmetro pH, evidenciando que as águas relacionadas aos aquíferos fraturados têm maior tempo de residência.	46
Gráfico 4.5. Boxplot dos valores de Eh nas amostras de água subterrânea coletadas.	47
Gráfico 4.6. Boxplot do parâmetro sólidos totais dissolvidos.....	48
Gráfico 4.7. Boxplot da alcalinidade total das nas amostras de água subterrânea coletadas.	49
Gráfico 4.8. Boxplot da dureza total das nas amostras de água subterrânea coletadas. À direita, para melhor visualização, observa-se o mesmo diagrama sem os valores extremos e outliers.	50
Gráfico 4.9. Boxplot de bicarbonatos (HCO_3^-) nas amostras de água subterrânea coletadas.	51
Gráfico 4.10. Boxplot do ânion cloreto (Cl^-) nas amostras de água subterrânea coletadas. À direita, para melhor visualização, observa-se o mesmo diagrama sem os valores extremos e outliers.....	52
Gráfico 4.11. Boxplot do parâmetro sulfato (SO_4^{2-}) nas amostras de água subterrânea coletadas.....	53
Gráfico 4.12. Boxplot do parâmetro sódio (Na^+) nas amostras de água subterrânea coletadas. À direita, para melhor visualização, observa-se o mesmo diagrama sem os valores extremos e outliers.	54
Gráfico 4.13. Forte correlação ($R^2 = 0,996$) entre cloretos e sódio, indicando que os poços que apresentam alta salinidade tem interferência de águas de origem marinha.	55
Gráfico 4.14. Boxplot do parâmetro potássio (K^+) nas amostras de água subterrânea coletadas.....	56
Gráfico 4.15. Boxplot de cálcio (Ca^{+2}) nas amostras de água subterrânea coletadas.	57
Gráfico 4.16. Boxplot do magnésio (Mg^{+2}) nas amostras de água subterrânea coletadas.	58
Gráfico 4.17. Boxplot de nitratos (NO_3^-) nas amostras de água subterrânea coletadas.....	59
Gráfico 4.18. Boxplot das concentrações de nitrogênio total (N) nas amostras de água subterrânea coletadas.	62
Gráfico 4.19. Boxplot das concentrações de ferro total (Fe) nas amostras de água subterrânea coletadas.	64
Gráfico 4.20. Boxplot do manganês total (Mn) nas amostras de água subterrânea coletadas.....	67
Gráfico 4.21. Boxplot das concentrações de fluoretos (F^-) nas amostras de água subterrânea coletadas.	68
Gráfico 4.22. Histograma dos tipos hidroquímicos das águas subterrâneas em Joinville – SC.	81
Gráfico 4.23. Classificação das captações amostradas conforme o índice SAR. Os poços que apresentam risco à salinização do solo e às plantas encontram-se destacados.....	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1. Características construtivas dos pontos de captação amostrados e com análises compiladas (*).	37
Tabela 4.2. Resumo estatístico dos principais parâmetros físico-químicos analisados nos poços que captam o aquífero fraturado.....	40
Tabela 4.3. Resumo estatístico dos principais parâmetros físico-químicos analisados nos pontos relacionados ao aquífero granular.....	41
Tabela 4.4. Resumo estatístico dos principais parâmetros físico-químicos analisados nos poços tubulares sem perfis litológico e ou construtivo.	42
Tabela 4.5. Pontos com turbidez acima do valor máximo permitido para potabilidade (5 NTU).	88
Tabela 4.6. Relação dos poços com a cor acima dos padrões de potabilidade (VMP= 5 UC).	88
Tabela 4.7. Poços com concentração de manganês acima dos valores máximos permitidos (VMP=0,1 mg/L).	90
Tabela 4.8. Poços com concentração de ferro acima dos valores máximos permitidos (0,3 mg/L).	90
Tabela 4.9. Poços com concentração de níquel acima dos valores máximos permitidos (0,07 mg/L).	92
Tabela 4.10. Pontos com concentração de alumínio acima dos valores máximos permitidos (0,07 mg/L).	93
Tabela 4.11. Valores de referência de alguns parâmetros das águas para os diferentes usos industriais. Modificada de Mathess (1982), Sziksay (1993) e Driscoll (1986) apud Feitosa <i>et al.</i> (2008).	94
Tabela 4.12. Percentuais de risco a salinização, conforme classes do SAR.....	96

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1. Principais sais e gases que dão sabor à água subterrânea (adaptado de Custodio e Llamas, 1983).....	21
Quadro 2.2. Tipos de alcalinidade conforme os valores de pH. Modificado de Feitosa <i>et al.</i> , (2008)...	23
Quadro 2.3. Classificação das águas conforme a dureza (adaptada de Custodio e Llamas, 1983).....	24
Quadro 3.1. Relação das alíquotas e preservantes de acordo com cada parâmetro analisado.....	34

LISTA DE SIGLAS

ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária

APHA – *American Public Health Association*

AWWA – *American Water Works Association*

BTXE e BTEX – Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xileno

CE – Condutividade Elétrica

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

CREA – Conselho Regional de Engenharia e Agronomia

DRH-SDE – Departamento de Recursos Hídricos da Secretaria de Desenvolvimento Econômico Sustentável do Estado de Santa Catarina

EPA – *United States Environmental Protection Agency*

FTU – *Formazin Turbidity Unit*

LD – Limite de Detecção

NTU – Unidade Nefelométrica de Turbidez

ORP – *Oxidation Reduction Potential* (= Eh)

PDF – *Portable Document Format*

ppm – Partes por milhão

PRT MS/GM – Portaria do Ministério da Saúde/Gabinete do Ministro

Pt-Co – *Platinum-Cobalt Color Scale*

RAS – Razão de Adsorção de Sódio

RDC – Resolução da Diretoria Colegiada

SAR – *Sodium Adsorption Ratio* (Razão de Adsorção de Sódio)

SDE – Secretaria de Desenvolvimento Econômico Sustentável do Estado de Santa Catarina

SGB-CPRM – Serviço Geológico do Brasil - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

SIAGAS – Sistema de Informações de Águas Subterrâneas

SIG – Sistema de Informações Geográficas

SMWW – *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*

STD – Sólidos Totais Dissolvidos

UC – Unidade Colorimétrica

UGRHI – Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos

USSL – *United States Salinity Laboratory*

USSLS – *United States Salinity Laboratory Staff*

VMP – Valor Máximo Permitido

VOC – *Volatile Organic Compound* (Compostos Orgânicos Voláteis)

VRQ – Valor de Referência de Qualidade

WEF – *Water Environment Federation*



Foto: Leandro Betiollo



BILHETERIA

Foto: Prefeitura Municipal de Joinville

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este relatório técnico apresenta os resultados do estudo hidrogeoquímico realizado no âmbito do Projeto Mapa Geológico e Hidrogeológico de Joinville - SC. O estudo hidrogeoquímico tem por finalidade identificar e quantificar as principais propriedades e constituintes das águas subterrâneas, procurando estabelecer uma relação com o meio físico.

Em um primeiro momento são tecidas considerações teóricas a respeito da hidroquímica da água e seus principais elementos. Posteriormente são apresentados os resultados encontrados, os diversos tipos físico-químicos das águas subterrâneas e as considerações sobre as características e evolução geoquímica destas águas em Joinville. Os resultados também foram comparados com os padrões de potabilidade e adequabilidade ao uso das águas. Os dados analíticos foram obtidos a partir da realização de 60 análises físico-químicas completas e a compilação de 19 análises de poços disponíveis na Base SIAGAS. Foram amostrados, pelas equipes do projeto, 30 poços tubulares, 18 poços de pequeno diâmetro, 5 poços escavados, 6 captações de fontes e uma água superficial, entre outubro de 2019 e dezembro de 2020.

A interpretação dos resultados e suas conclusões estão espacializadas em um mapa hidrogeoquímico na escala 1:50.000 que também compõem um SIG. Os resultados analíticos originais das análises realizadas pelo laboratório contratado pelo SGB-CPRM (Serviço Geológico do Brasil – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais) acompanham a mídia digital deste produto em formatos PDF, e os resultados resumidos, em formato XLSX.



2. CONCEITUAÇÃO TEÓRICA

2.1 Introdução

Visando o entendimento da caracterização e evolução das águas subterrâneas faz-se necessário abordar brevemente algumas conceituações teóricas e princípios básicos a respeito da química das águas, em especial das subterrâneas. Os aspectos qualitativos das águas subterrâneas são tão importantes quanto os aspectos quantitativos, pois a disponibilidade dos recursos hídricos subterrâneos para determinados usos depende fundamentalmente da qualidade físico-química.

A água, H_2O , é um líquido inorgânico encontrado na natureza, nos três estados físicos: sólido, líquido e gasoso. É a única substância natural que ocorre nos três estados físicos. A água pura é incolor, inodora, insípida e transparente, entretanto devido as suas características físico-químicas atua como um ótimo solvente e pode incorporar grandes quantidades de substâncias ao entrar em contato com os minerais constituintes dos solos e rochas nos quais circula. A água pode dissolver gases, líquidos e sólidos. Segundo Custodio e Llamas (1983), o mecanismo de dissolução pode ser algumas vezes um mecanismo simples como a dissolução do nitrogênio ou do açúcar, outras vezes um mecanismo de simples ionização como a dissolução do sal de cozinha, mas, em outras ocasiões, às vezes se trata de mecanismos muito mais complexos. Esses mecanismos complexos podem envolver reações químicas com a própria água (dissolução de NH_3) ou com a água e outras substâncias dissolvidas nela mesma (dissolução de calcário na presença de CO_2 , formação de complexos como a dissolução de metais pesados com auxílio dos ácidos húmicos ou outras substâncias orgânicas, etc.) ou através de alterações prévias produzidas pela água em materiais sólidos e insolúveis (ataque de silicatos).

2.2 Caracterização da qualidade das águas

2.2.1 Características Físicas

Segundo Feitosa *et al.* (2008), as características físicas são de ordem estética, e elevados valores de alguns destes aspectos podem causar certa repugnância a usuários mais exigentes. As águas subterrâneas raramente possuem características estéticas perceptíveis, a não ser o sabor decorrente de sais dissolvidos ou ferro em quantidade excessiva. São consideradas propriedades físicas das águas os seguintes parâmetros: temperatura, cor, odor, sabor, turbidez, sólidos em suspensão, condutividade elétrica e salinidade.

2.2.1.1 Temperatura

A temperatura tem função de acelerar reações químicas e reduzir a solubilidade dos gases, bem como acentuar o sabor e o odor das águas naturais. A amplitude térmica anual das águas subterrâneas em geral é baixa e varia de 1 a 2 °C e independe da temperatura atmosférica, a não ser nos aquíferos freáticos pouco profundos. Em profundidade, depende do grau geotérmico (1 °C / 30 m em média), podendo sofrer maiores elevações provocadas por efeitos localizados como vulcanismo e radioatividade.

A medida de temperatura deve ser feita no local de amostragem com um termômetro apropriado ou com o termômetro dos equipamentos multiparamétricos de medição.

2.2.1.2 Cor

A cor é função da presença de substâncias dissolvidas ou em suspensão na água, provenientes, principalmente, da lixiviação da matéria orgânica e de argilominerais. A água pura é incolor ou apresenta uma coloração azulada, arroxeadada quando rica em ferro, preta quando rica em manganês e amarelada

quando abundante em ácidos húmicos. A medida da cor é feita através da comparação com uma solução padrão de Pt-Co ou disco colorido, sendo a unidade mais utilizada, ppm de Pt-Co ou, simplesmente, ppm de Pt. Em geral, as águas subterrâneas apresentam valores de coloração inferiores a 5 ppm de Pt, mas, de forma anômala, podem atingir até 100 ppm de Pt. Geralmente, para ser considerável potável, uma água não deve apresentar nenhuma cor de considerável intensidade.

2.2.1.3 Odor e Sabor

O odor e o sabor estão intimamente relacionados e, comumente, o que se chama de gosto é realmente percebido como odor. O sabor depende da concentração e do tipo de sais dissolvidos, além de outras substâncias em solução ou suspensão. No entanto, podem acontecer casos em que a água com valor elevado de STD (Sólidos Totais Dissolvidos) apresenta melhor sabor que uma água com baixo teor de STD, porque esta última pode conter um sal que exerça maior influência sobre o sabor do que os sais que existem na água de maior salinidade. O odor e o sabor são determinações organolépticas subjetivas e seletivas. Por exemplo: águas com mais de 300 mg/L de Cl⁻ possuem sabor salgado e com mais de 400 mg/L de SO₄⁻² têm gosto salgado e amargo. O Quadro 2.1, adaptado de Custodio e Llamas (1983), descreve os principais sais e gases que imprimem sabor às águas subterrâneas.

Quadro 2.1. Principais sais e gases que dão sabor à água subterrânea (adaptado de Custodio e Llamas, 1983).

Substâncias	Sabor
NaCl – cloreto de sódio	Salgado
Na ₂ SO ₄ – sulfato de sódio	Levemente salgado
NaHCO ₃ – bicarbonato de sódio	Levemente salgado a doce
Na ₂ CO ₃ – carbonato de sódio	Amargo e salgado
CaCl ₂ – cloreto de cálcio	Muito amargo
CaSO ₄ – sulfato de cálcio	Levemente amargo
MgSO ₄ – sulfato de magnésio	Levemente amargo em saturação
MgCl ₂ – cloreto de magnésio	Amargo e salgado
CO ₂ livre – gás carbônico	Picante

A medição do odor é feita diluindo-se a água amostrada com água destilada até que nenhum odor seja perceptível. O resultado é expresso pelo número de maior diluição que ainda dá um odor. O sabor é quantificado diluindo-se a água amostrada com água destilada e experimentando-a até que nenhum sabor seja perceptível. O resultado é expresso em número de maior diluição que ainda dá um sabor.

2.2.1.4 Turbidez

A turbidez é definida como a dificuldade da água para transmitir a luz, provocada pelos sólidos em suspensão em geral compostos por silte, argila, matéria orgânica, micro-organismos e partículas inorgânicas. A turbidez é medida através do turbidímetro ou nefelômetro e os valores são expressos em FTU (*Formazin Turbidity Unit*) ou em NTU (Unidade Nefelométrica de Turbidez), sendo esta última a mais utilizada no Brasil.

2.2.1.5 Sólidos em suspensão

Os sólidos em suspensão correspondem à carga sólida em suspensão como silte, argila, matéria orgânica, micro-organismos e partículas inorgânicas depois de secos e pesados. São expressos em mg/L e podem ser separados por um simples processo de filtração. As águas subterrâneas, na sua maioria, praticamente não apresentam sólidos em suspensão, com exceção das águas que circulam em aquíferos cárstico-fissurais ou em poços mal construídos e mal desenvolvidos, que produzem argila, silte e areia.

2.2.1.6 Condutividade elétrica (CE)

Segundo Custodio e Llamas (1983), a condutividade elétrica (CE) é a medida de facilidade de uma água conduzir a corrente elétrica e está diretamente ligada com o teor de sais dissolvidos sob a forma de íons. As unidades de medida de CE são siemens por centímetro (S/cm), microsiemens por centímetro ($\mu\text{S/cm}$), e milisiemens por centímetro (mS/cm), devem ser referenciadas a uma temperatura padrão de 25 °C. A CE aumenta com a elevação da temperatura, por isso é necessário anotar a temperatura de referência da água amostrada e corrigir para 25 °C ou medi-la com modernos condutivímetros, que já apresentam os valores de condutividade elétrica corrigidos de acordo com a temperatura padrão.

A CE é uma importante medida de investigação hidrogeológica que não necessita grandes preparações prévias, nem equipamentos sofisticados e permite obter sua estimativa de modo bastante econômico e prático do teor de sais dissolvidos de uma água (FREITAS *et al.*, 2016).

2.2.1.7 Salinidade

A salinidade representa a quantidade total das substâncias dissolvidas em um determinado volume de água que podem ser precipitadas como sais (sólidos). A salinidade é expressa em gramas e medida através da condutividade elétrica, densidade, velocidade sonora ou índice de refração.

2.2.2 Características Químicas

2.2.2.1 pH

O pH é a medida da concentração hidrogeniônica da água ou solução, sendo controlado pelas reações químicas e pelo equilíbrio entre os íons presentes. O pH é basicamente uma função do gás carbônico dissolvido presente e da alcalinidade da água. Varia de 1 a 14, sendo neutro com o valor 7, ácido com valores inferiores a 7 e alcalino ou básico com valores maiores que 7.

A molécula de água (H_2O) tem uma leve tendência de romper-se em dois íons, do mesmo modo que alguns sais dissolvidos na água, como NaCl, $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ e CaSO_4 . A estrutura da água H.OH , divide-se em cátions H^+ e ânions OH^- , quando se ioniza.

A maioria das águas subterrâneas tem pH entre 5,5 e 8,5. Em casos extraordinários, o pH pode variar entre 2 e 11, casos estes relacionados a drenagens ácidas e circulação de alto tempo de residência em rochas carbonáticas, respectivamente. O pH deve ser medido *in loco* com o pHmetro portátil (precisão 0,1 a 0,2). Os valores de pH determinados em laboratórios estão sempre alterados, em geral mais altos que a realidade, em função de fugas de gases, oxidações e/ou reduções e variações de temperaturas, a que estão sujeitas as amostras de água durante a sua coleta, armazenamento e transporte.

2.2.2.2 Eh (potencial de oxirredução)

O potencial de oxirredução, também denominado Eh (E_h), potencial redox e ORP (*Oxidation Reduction Potential*), representa as condições de intensidade relativa de oxidação ou redução em soluções (HEM, 1985). O Eh determina a característica do ambiente controlando os vários processos químicos que ocorrem na natureza. O sinal convencional na geoquímica de águas naturais para esse parâmetro

é positivo (+) para condições oxidantes e negativo (-) para condições redutoras. Elementos e moléculas estão presentes na água em vários estados de oxidação, que determinam propriedades, tais como toxicidade, hidrólise, tendência de formar compostos insolúveis, etc.

2.2.2.3 Resíduo Seco

O resíduo seco é definido como o peso dos sais resultantes da evaporação de um litro de água, após a filtragem para a remoção de materiais em suspensão. Os resultados, comumente, são expressos em mg/L. Em uma análise química, a soma de todos os cátions, ânions e coloides subtraídos de metade do bicarbonato deve ser aproximadamente igual ao resíduo seco. O resíduo seco é medido em ppm (partes por milhão) ou em mg/L. Nas águas doces o resíduo seco varia entre 50 e 1.500 ppm, nas salmouras pode chegar a 300.000 ppm e na água do mar tem valores em torno de 35.000 ppm, conforme Custodio e Llamas (1983).

2.2.2.4 Sólidos Totais Dissolvidos (STD)

Os sólidos totais dissolvidos representam o peso dos constituintes minerais presentes na água, por unidade de volume. Retrata a concentração de todo o material dissolvido na água. Geralmente, o valor dos sólidos totais dissolvidos é superior ao valor do resíduo seco, em função do HCO_3^- , que em temperaturas superiores a 100 °C se decompõe como CO_3^{2-} e CO_2 , que se volatiliza e evapora da amostra. A medida dos sólidos totais dissolvidos é aproximadamente igual ao resíduo seco mais $\frac{1}{2}$ de HCO_3^- em mg/L ($\text{STD} \approx \text{RS} + \frac{1}{2} \text{HCO}_3^-$). Na maioria das águas subterrâneas naturais, a CE da água multiplicada por um fator, que varia entre 0,55 e 0,75, fornece uma boa estimativa dos sólidos totais dissolvidos na água. Para as águas salinas, o fator é comumente maior que 0,75 e para as águas ácidas pode ser menor que 0,55.

2.2.2.5 Alcalinidade

A alcalinidade é a capacidade de uma água neutralizar ácidos, sendo uma consequência direta da presença e/ou ausência de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos. A alcalinidade pode ser determinada através de titulação alcalimétrica ou titulação alcalimétrica completa. A alcalinidade é expressa em grau francês (°F) ou em mg/L de CaCO_3 . A relação entre essas unidades é: 1 °F = 10 mg/L CaCO_3 . A alcalinidade é medida por sucessivas titulações com ácido sulfúrico ou clorídrico, usando como indicador principal, a fenolftaleína, e indicador secundário, o metilorange. Tais titulações podem ser expressas como alcalinidade total (soma dos íons de carbonato, bicarbonato e hidróxido) ou como alcalinidade parcial originada pelos constituintes individuais. Somente dois tipos de alcalinidade podem ocorrer simultaneamente em uma amostra de água, já que haveria uma reação em hidróxidos e bicarbonatos, reduzindo estes à forma de carbonatos ($\text{OH}^- + \text{HCO}_3^- \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_3^{2-}$).

Os tipos de alcalinidade presentes em uma água dependem dos intervalos de pH conforme pode ser observado no Quadro 2.2.

Quadro 2.2. Tipos de alcalinidade conforme os valores de pH. Modificado de Feitosa et al. (2008).

Intervalos de pH	Tipo de alcalinidade
3,0 a 4,6	Ácidos minerais
4,6 a 8,3	Alcalinidade de bicarbonatos
8,3 a 9,4	Alcalinidade de carbonatos e bicarbonatos
9,4 a 11,0	Alcalinidade de hidróxidos e carbonatos

2.2.2.6 Dureza

A dureza é o poder de consumo de sabão por determinada água ou a capacidade de a água neutralizar o sabão pelo efeito do cálcio, magnésio ou outros elementos como Fe, Mn, Cu, Ba, etc. Geralmente, usa-se o teor de cálcio e magnésio de uma água, expresso em concentração de carbonato de cálcio, para definir a dureza. Há várias formas de expressar a dureza: dureza temporária, dureza permanente e dureza total. A dureza temporária, ou dureza de carbonatos, é causada pelos íons de cálcio e de magnésio que se combinam com o bicarbonato e o carbonato, podendo ser eliminada com a ebulição da água. A dureza permanente, ou dureza de não carbonatos (cloretos e sulfatos), é a dureza que persiste após a ebulição da água. É originada pelos íons de cálcio e de magnésio que se combinam com os íons de sulfato, cloreto, nitrato e outros. A dureza total, mais comumente utilizada, é a soma da dureza temporária com a dureza permanente. As durezas são expressas em mg/L de CaCO_3 , mesmo que seja devido ao sulfato de magnésio. As águas duras são incrustantes e levam a um grande consumo de sabão, além de dificultar o cozimento dos alimentos. O Quadro 2.3 exibe a classificação da água subterrânea quanto à dureza, com base em Custodio e Llamas (1983).

Quadro 2.3. Classificação das águas conforme a dureza (adaptada de Custodio e Llamas, 1983).

Classificação	Concentração de CaCO_3 (mg/L)
Branda	Inferior a 50
Pouco dura	Entre 50 e 100
Dura	Entre 100 e 200
Muito dura	Superior a 200

2.2.2.7 Oxigênio Dissolvido

O oxigênio dissolvido produz um meio oxidante e possui grande importância na solubilização ou insolubilização de íons que mudam com facilidade de valência, assim como na atividade de micro-organismos. A ausência de oxigênio produz um meio denominado de anaeróbio. O oxigênio é consumido com facilidade se existem no meio substâncias oxidáveis, tais como matéria orgânica, Fe^{2+} , NH_4^+ , NO_2^- , etc., sobretudo por atividade biológica. O maior problema do excesso de oxigênio na água é que ela vai possuir maior poder de corrosão, ao passo que sua ausência pode estar vinculada às fermentações anaeróbias.

As concentrações de oxigênio dissolvido da água em contato com o ar na superfície são da ordem de 10 mg/L. Antes da infiltração as águas podem estar supersaturadas em O_2 , porém, em subsuperfície, o oxigênio é consumido e a sua renovação é difícil ou impossível. As águas subterrâneas têm concentrações entre 0 e 5 mg/L de O_2 dissolvido e frequentemente as concentrações ficam abaixo de 2 mg/L de O_2 (CUSTODIO e LLAMAS, 1983).

2.2.3 Principais Íons das Águas Subterrâneas e suas Características Químicas

A grande maioria das substâncias dissolvidas nas águas subterrâneas encontra-se no estado iônico (ânions e cátions). Alguns destes constituintes iônicos estão presentes em quase todas as águas subterrâneas e a sua soma representa a quase totalidade dos íons presentes. Estes são denominados de íons principais e serão descritos sucintamente de acordo com Custodio e Llamas (1983).

2.2.3.1 Bicarbonato (HCO_3^-) e Carbonato (CO_3^{2-})

O CO_2 gás, CO_2 dissolvido, HCO_3^- , CO_3^{2-} e pH desenvolvem uma intensa relação entre eles e indicam a alcalinidade da água que é a capacidade de consumir ácido e criar uma solução tampão. Os íons

bicarbonato e carbonato não são oxidáveis e nem reduzidos nas águas naturais e podem ser precipitados facilmente como CaCO_3 . Geralmente o íon bicarbonato varia entre 50 e 350 ppm nas águas doces podendo chegar até 800 ppm. Na água do mar a concentração média do íon bicarbonato é de 100 ppm. O íon carbonato ocorre em concentrações muito menores que o bicarbonato somente quando o pH da água for superior a 8,3. Nas águas naturais muito alcalinas sua concentração pode atingir até 50 ppm. A água do mar apresenta concentrações menores de 1 ppm.

Ambos os íons não apresentam problema de toxicidade, no entanto, águas bicarbonatadas sódicas, quando utilizadas para irrigação, podem ocasionar fixação de sódio no solo e criação de um meio alcalino.

2.2.3.2 Cloreto (Cl^-)

O cloreto, em geral, é muito solúvel, possui uma forte tendência a absorver água e a se liquefazer e é muito estável em solução, logo, dificilmente precipita. Não oxida e nem se reduz em águas naturais. Sua intensa solubilidade e o lento movimento das águas no aquífero vão provocando aumentos gradativos e constantes dos teores de cloretos nas águas subterrâneas na direção do fluxo, o que favorece seu uso como indicador do sentido do fluxo dessas águas. Apesar das rochas ígneas serem pobres em cloretos, estes são provenientes da lixiviação de minerais ferromagnesianos tanto nestas rochas como, principalmente, em rochas evaporíticas, tal como o sal-gema. Os cloretos estão presentes em todas as águas naturais, com valores situados entre 10 e 250 mg/L nas águas doces. Nas águas subterrâneas, geralmente, as concentrações de cloretos são inferiores a 100 mg/L, com exceção das águas com influência de cunha salina. Já nas águas dos mares, eles são abundantes, com valores entre 18.000 e 21.000 mg/L, podendo chegar a 220.000 mg/L nas salmouras naturais (saturação). O cloreto também é um bom indicador de poluição para aterros sanitários, lixões e dejetos humanos e animais.

2.2.3.3 Sulfato (SO_4^{2-})

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

2.2.3.4 Nitrato (NO_3^-)

O nitrato é um ânion muito solúvel e dificilmente precipita. Em meios redutores, tem a tendência de ser estável, podendo passar a N_2 ou NH_4^+ e, muito raramente, para NO_2^- , em meio oxidante. Geralmente o nitrato ocorre em pequenas concentrações, que representam o estágio final da oxidação da matéria orgânica. Teores acima de 5 mg/L podem ser indicativos de contaminação da água subterrânea por atividades antrópicas, tais como esgotos, fossas sépticas, depósitos de lixo, cemitérios, adubos nitrogenados, resíduos de animais, etc. Os resíduos de produtos proteicos provenientes de esgotos, fezes etc., são ricos em nitrogênio e se decompõem em nitratos na presença de oxigênio, de acordo com o ciclo do nitrogênio (nitrogênio orgânico, amônia, nitrito e nitrato). A oxidação do amoníaco (NH_3) para nitrito (NO_2^-) ocorre com a participação de bactérias especializadas do grupo nitrosomonas. A oxidação do nitrito para nitrato (NO_3^-) requer a participação de bactérias autótrofas do grupo nitrobactérias. A presença de nitrito (NO_2^-) na água indica poluição recente. Comumente, as águas subterrâneas apresentam concentrações de nitrato entre 0,1 e 10 mg/L, porém em águas muito poluídas, os valores podem superar 1.000 mg/L.

2.2.3.5 Sódio (Na^+)

O sódio é um dos cátions mais significativos e abundantes nas águas subterrâneas, devido a sua ampla distribuição nos minerais fonte, baixa estabilidade química dos minerais que o contêm, solubilidade elevada e difícil precipitação da maioria dos seus compostos químicos em solução. As águas naturais com grandes concentrações de Na^+ , geralmente possuem elevadas concentrações de F^- . Nas águas subterrâneas o sódio ocorre, principalmente, sob a forma de cloretos, tendo como minerais fonte os plagioclásios, feldspatoides (nefelina e sodalita), anfibólios e piroxênios. O sódio é o principal responsável pelo aumento constante da salinidade das águas naturais do ponto de vista catiônico. Geralmente, ocorre um aumento gradativo dos teores de sódio nas águas subterrâneas, a partir da zona de recarga, em direção às suas porções mais confinadas ou às zonas de descarga. A concentração do sódio varia, em geral, entre 0,1 e 100 mg/L nas águas subterrâneas, entre 1 e 150 mg/L em águas naturais doces, atingindo, em média, 11.100 mg/L nas águas dos oceanos, podendo chegar a 100.000 mg/L nas salmouras naturais. As águas com concentrações elevadas de sódio são prejudiciais às plantas por reduzir a permeabilidade do solo, sendo especialmente nocivas quando simultaneamente as concentrações de Ca^{+2} e Mg^{+2} são baixas.

2.2.3.6 Potássio (K^+)

O potássio ocorre em pequenas quantidades ou está ausente nas águas subterrâneas, devido à sua participação intensa em processos de troca iônica, além da facilidade de ser adsorvido pelos minerais de argila e, ainda, de seus sais serem bastante utilizados pelos vegetais. Está presente, sobretudo, nos feldspatos potássicos, micas e leucitas, em rochas ígneas e metamórficas. Altas concentrações de potássio podem ser encontradas nos minerais de carnalita e silvinita, em evaporitos. As concentrações de potássio nas águas subterrâneas, geralmente, são inferiores a 10 mg/L, sendo mais comuns ocorrerem valores entre 1 e 5 mg/L.

2.2.3.7 Cálcio (Ca^{+2})

O cálcio compõe sais de moderada a elevada solubilidade, sendo muito comum precipitar como carbonato de cálcio (CaCO_3). É um dos principais constituintes da água e o principal responsável pela dureza, apresentando-se, em geral, sob a forma de bicarbonato e raramente como carbonato. A solubilidade do bicarbonato de cálcio (CaCO_3) aumenta na presença de sais de Na^+ e K^+ . O cálcio é o elemento mais abundante existente na maioria das águas naturais e rochas, compondo principalmente os minerais de calcita, aragonita e dolomita, em rochas calcárias. Nas rochas ígneas o plagioclásio e a apatita representam as maiores fontes de cálcio. Nas águas meteóricas, os teores de cálcio variam no intervalo 0,1 a 10 mg/L e nas águas dos oceanos, em torno de 480 mg/L. Nas águas subterrâneas, as concentrações de cálcio variam, em geral, entre 10 e 100 mg/L.

2.2.3.8 Magnésio (Mg^{+2})

O magnésio tem comportamento e propriedades muito semelhantes ao cálcio, porém, é mais solúvel e mais difícil de precipitar. Quando em solução tem a tendência de nela permanecer, daí tem-se o enriquecimento dos seus sais nas águas dos oceanos. Este elemento químico ocorre, principalmente, em rochas carbonatadas e tem como minerais fontes mais frequentes a magnesita, a biotita, a granada, a hornblenda, a clorita, a alanita e a olivina. Juntamente com o cálcio, é o responsável pela dureza e produz gosto salobro às águas. As águas meteóricas apresentam teores de magnésio entre 0,4 e 1,6 mg/L enquanto que as águas subterrâneas apresentam concentrações mais frequentes no intervalo de 1 a 40 mg/L.

2.2.3.9 Silício (Si)

O silício, embora seja o elemento mais largamente encontrado nas rochas, não ocorre em quantidades significativas nas águas subterrâneas. Aparece, frequentemente, sob a forma de partículas coloidais, devido, principalmente, à sua alta estabilidade química na maioria dos minerais, além da baixa solubilidade dos compostos que forma a partir do intemperismo das rochas. A combinação do oxigênio com o silício forma o óxido chamado de sílica (SiO_2). O silício ocorre nas águas naturais, frequentemente, no estado coloidal e em solução. Uma pequena parte ocorre no estado iônico sob a forma de SiOH^- . O intemperismo de minerais de argila e os feldspatos são as principais fontes de sílica para as águas subterrâneas. Concentrações de 20 mg/L nas águas subterrâneas não são incomuns, enquanto que nos oceanos, as concentrações de SiO_2 variam entre 1 e 30 mg/L.

2.2.4 Íons Secundários e Traços

Os constituintes secundários devem ser analisados quando há indícios de sua presença na água por alguma circunstância especial, como o meio geológico (causa natural), ou proximidade de qualquer atividade industrial, comercial e/ou presença de focos de contaminações potenciais (lixões, aterro sanitário, depósitos de rejeitos de mineração, lagoas de contenção de rejeito industrial etc.). Os constituintes iônicos e traços são inúmeros e se apresentam, geralmente, em concentrações inferiores a 1% em relação aos constituintes principais (maiores) e secundários (menores), porém, alguns são comumente encontrados nas águas subterrâneas, como, por exemplo, os brometos. Embora estes constituintes sejam raros e estejam presentes em quantidades dificilmente mensuráveis por meios químicos usuais, nem por isso deixam de ser importantes para a potabilidade da água. Em águas contaminadas, os constituintes secundários e os traços podem atingir concentrações compatíveis com as dos constituintes principais. A seguir, são apresentados os elementos secundários mais frequentes nas águas subterrâneas, descritos sucintamente de acordo com Custodio e Llamas (1983).

2.2.4.1 Alumínio (Al)

O alumínio é o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre, porém ele raramente ocorre nas águas naturais em concentrações maiores que décimos de um miligrama por litro (HEM, 1983). As exceções, na maioria das vezes, estão relacionadas às águas com pH muito baixo. O alumínio apresenta baixa solubilidade em águas com pH neutro, ficando retido em argilas e outros minerais. As fontes desse elemento estão relacionadas aos feldspatos, feldspatoides, micas e vários anfíbios.

2.2.4.2 Ferro (Fe)

O ferro ocorre frequentemente associado ao manganês e confere à água um sabor amargo adstringente e coloração amarelada e turva, decorrente de sua precipitação quando oxidado. Está presente em baixos teores (< 0,3 mg/L) em quase todas as águas, ocorrendo sob diversas formas químicas. Entretanto, a sua forma principal de ocorrência é Fe^{+3} (hidróxido férrico), podendo também ocorrer como Fe^{+2} (hidróxido ferroso). O ferro no estado ferroso é instável na presença do oxigênio do ar, alterando para o estado férrico. A principal fonte de ferro provém dos minerais ferromagnesianos, componentes dos diversos litotipos ou de solos lateríticos, tais como piroxênios, olivinas e biotita. Elevadas concentrações de ferro na água subterrânea podem estar relacionadas à ocorrência de ferrobactérias ou mesmo à corrosão dos revestimentos ou filtros dos poços.

2.2.4.3 Manganês (Mn)

A fonte de manganês nas rochas está relacionada aos minerais pirolusita (MnO_2), braunita (Mn_2O_3), manganita ($\text{Mn}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), ausmanita (Mn_3O_4), rodocrosita (MnCO_3) e rodonita (silicato de manganês). O

manganês apresenta comportamento semelhante ao ferro, tanto quimicamente como em termos de ocorrência nas águas subterrâneas. É menos abundante que o ferro nas rochas, conseqüentemente, sua presença nas águas naturais é menos comum e a sua concentração, em geral, é muito menor que a do ferro. Ocorre principalmente sob a forma de Mn^{+2} podendo também ocorrer como Mn^{+3} . O manganês, no estado Mn^{+2} , é instável na presença do ar, mudando para o estado MnO quando a água fica exposta ao oxigênio. O bicarbonato manganoso decompõe-se da mesma forma que o bicarbonato ferroso, dando origem a um depósito de cor negra e de aspecto fuliginoso. O manganês e seus compostos são altamente persistentes na água, podendo levar mais de 200 dias para ser degradado. Este elemento, geralmente, está presente com baixas concentrações (< 0,2 mg/L) em quase todas as águas naturais, sendo mais abundante nas águas ácidas. O manganês está na lista de substâncias perigosas da EPA (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América), podendo levar à morte animais, pássaros, peixes e vegetais.

2.2.4.4 Fluoreto (F)

O fluoreto possui solubilidade limitada e pouco contribui para a alcalinidade da água, pois sofre hidrólise rapidamente, sendo frequentemente encontrado em pequenas concentrações nas águas subterrâneas. A principal fonte de fluoretos em rochas ígneas é a fluorita. Normalmente, ocorrem com concentrações entre 0,1 e 1,5 mg/L nas águas naturais, podendo chegar, às vezes, até 10 mg/L e, raramente, a 50 mg/L em águas muito sódicas com pouco cálcio. Nas águas dos oceanos, seus valores estão situados entre 0,6 a 0,7 mg/L. O flúor, em baixas concentrações (até 1,5 mg/L) é benéfico à saúde, na prevenção de cáries dentárias de crianças em fase de crescimento. Concentrações superiores a 1,5 mg/L são prejudiciais, causando manchas nos dentes (fluorose dental) e deformação dos ossos.

2.2.4.5 Fósforo (P)

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

2.2.4.6 Nitrogênio (N)

O nitrogênio é um elemento essencial à vida dos microrganismos, uma vez que integra a molécula de proteína e, conseqüentemente, do protoplasma. O nitrogênio gasoso constitui cerca de 78% do ar atmosférico e forma vários sais solúveis presentes no solo, que são utilizados pelos vegetais. Ocorre em várias formas e estados de oxidação, resultantes de diversos processos bioquímicos como amônia (livre $N-NH_3$ e ionizada $N-NH_4$), nitratos ($N-NO$), nitritos ($N-NO_2$); nitrogênio molecular (N_2) e nitrogênio orgânico (N -orgânico dissolvido e em suspensão). O nitrato é produto da oxidação biológica de compostos nitrogenados reduzidos. Esse processo é chamado de nitrificação, no qual dois gêneros de bactérias participam: nitrosomonas, que oxidam o amônio a nitrito, e nitrobactérias, que oxidam o nitrito a nitrato.

2.2.4.7 Brometo (Br)

O brometo possui comportamento químico semelhante ao do íon cloreto (Cl⁻) e seu estudo colabora para o entendimento da origem das águas salgadas. Apresenta-se, em geral, com concentrações inferiores a 0,01 mg/L em águas doces, e nas águas marinhas seus teores variam em torno de 65 mg/L.

2.2.4.8 Zinco (Zn⁺²)

O zinco é encontrado em diversos minerais, como por exemplo: Blenda (ZnS), Calamina (Zn₄Si₂O₇(OH)₂), Smithsonita (ZnCO₃), Franklinita ((Zn, Mn)Fe₂O₄), e Hidrozincita (Zn₃(CO₃)₂(OH)₂). O zinco, entre os metais pesados, é o mais solúvel e seus sais são altamente persistentes na água. A sua concentração é, geralmente, inferior a 10 mg/L nas águas subterrâneas.

2.2.4.9 Antimônio (Sb)

O antimônio associa-se sempre a outros elementos, sendo praticamente constante a presença de enxofre. Pode ocorrer nos estados de oxidação +5, +3 e -3, sendo este último o menos estável. Seu principal mineral é antimônita (Sb₂S₃). A presença de antimônio na água subterrânea é tóxica para o ser humano, podendo causar danos ao músculo do fígado e do coração.

2.2.4.10 Arsênio (As)

O arsênio ocorre na natureza em quantidades reduzidas, com concentrações em torno de 0,00005%. Está presente na matéria orgânica, em quase todos os sulfetos metálicos e encontra-se, ainda, dissolvido nas águas naturais. As fontes naturais de arsênio são, principalmente, as jazidas de metais, onde o elemento se encontra na forma de arsenita (AsO₄⁻³). As principais fontes antrópicas consistem em inseticidas, herbicidas e resíduos industriais à base de arsênio. Nas águas subterrâneas, as concentrações são comumente abaixo de 0,1 mg/L, porém, em águas de poços petrolíferos e em águas minerais, ocorrem concentrações de até 4 mg/L. Vários compostos de arsênio são poderosos agentes venenosos, decorrendo daí sua aplicação como inseticidas e raticidas. Muito perigoso à saúde humana, bastando uma pequena ingestão de 100 mg para envenenar seriamente o organismo humano. É carcinógeno, sendo o seu limite de aceitação de 0,05 mg/L.

2.2.4.11 Bário (Ba⁺²)

As principais fontes de bário são os minerais de witherita (BaCO₃) e de barita (BaSO₄). O bário dissolve-se em água, gerando o hidróxido Ba(OH)₂, de forte ação alcalina. O consumo de 550 a 600 mg de bário pelo homem é fatal. O seu excesso causa bloqueio nervoso e/ou aumento da pressão sanguínea por vasoconstrição.

2.2.4.12 Cádmio (Cd⁺²)

O cádmio é um metal relativamente raro na natureza, e encontra-se principalmente nos minerais de zinco (blenda, calamina, smithsonita e hidrozincita), em porcentagens que variam de 0,1 a 0,3%. Nas águas subterrâneas apresenta concentrações inferiores a 20 mg/L. É um elemento muito tóxico para a saúde humana, tendo ação cumulativa sobre o organismo. Seu excesso pode provocar hipertensão arterial, anemia, retardamento de crescimento e morte.

2.2.4.13 Chumbo (Pb)

Segundo Hem (1985), o chumbo apresenta concentrações médias de 16 ppm em rochas ígneas, 14 ppm em arenitos e 80 ppm em folhelhos. Este metal é tolerado para o consumo humano até o limite de 0,5 mg/L. Teores acima deste podem provocar uma intoxicação variável, em função da quantidade acumulada no organismo e podem causar danos cerebrais ou levar à morte, em casos extremos.

2.2.4.14 Cobre (Cu)

O cobre tem como fonte os seguintes minerais: malaquita ($\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$) e azurita ($\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$). Este elemento exibe baixa solubilidade e elevada persistência na água. Ocorre nas águas subterrâneas com concentrações inferiores a 1 mg/L. Maiores concentrações ocorrem em águas que percolam jazidas de cobre. O cobre é um elemento que geralmente ocorre em águas naturais com baixas concentrações, entretanto, é essencial para plantas e animais. Quase todo o cobre ingerido pelo homem é eliminado, no entanto, altas concentrações podem provocar hemocromatose.

2.2.4.15 Cromo (Cr)

O cromo é um metal relativamente raro na crosta terrestre (menor que 0,03%) e não é encontrado no estado livre, mas sim, associado ao ferro e ao chumbo. Também substitui, frequentemente, o alumínio em alguns minerais como o berilo ($3\text{BeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$) e o coríndon (Al_2O_3), geralmente em baixíssimas quantidades. Entre os minerais de cromo destacam-se a cromita ($\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$) e a crocoíta (PbCrO_4). O cromo possui quatro isótopos estáveis, de números de massa 50, 52, 53 e 54. Seus números de oxidação comuns são +2, +3 e +6. O íon crômico Cr^{3+} é anfótero e pode originar sais solúveis tanto na presença de ácidos quanto de bases.

2.2.4.16 Mercúrio (Hg)

Este elemento é muito raro de ocorrer no estado elementar. O mais importante composto de mercúrio é o sulfeto cinábrio (HgS). É um metal volátil, embora em pequena intensidade, mas seus vapores são extremamente tóxicos, podendo causar cansaço, dificuldade de concentração e perda de memória. Também seus sais são venenosos, principalmente os solúveis. É o único metal líquido. Os estados de oxidação que o mercúrio pode assumir são +1 e +2.

2.2.4.17 Níquel (Ni)

O níquel ocorre nas águas naturais majoritariamente sob a forma de Ni^{+2} e é fortemente adsorvido pelos óxidos de ferro e manganês (HEM, 1983). Em pH ácido, a maioria dos compostos de níquel são solúveis e, em pH acima de 6,7, o metal existe na forma insolúvel como hidróxido de níquel.

2.2.4.18 Selênio (Se)

O selênio, elemento muito raro na natureza, apresenta comportamento químico semelhante ao do enxofre. Está presente nas rochas da crosta terrestre, quase sempre sob a forma de selenetos, geralmente acompanhando sulfetos nos minerais de berzelianita (Cu_4Se), tiemanita (HgSe) e naumanita (Ag_2Se). Nas águas subterrâneas, sua concentração varia em torno de 1 mg/L. É tóxico para homens e animais em concentrações superiores a 0,01 mg/L. O seu excesso provoca aumento de incidência de cárie dentária, atrofia muscular irreversível e é carcinógeno.

2.2.5 Compostos Orgânicos Sintéticos

Os compostos orgânicos voláteis são persistentes nas águas subterrâneas e os semivoláteis têm pressão de vapor menor que os voláteis de baixa solubilidade. Os principais compostos orgânicos sintéticos tóxicos são descritos a seguir.

2.2.5.1 Hidrocarbonetos Alifáticos ou Aromáticos

Os hidrocarbonetos alifáticos são representados por benzeno, tolueno, etilbenzeno, xilenos, etc. Devido ao uso intenso e diversificado nos diferentes setores da economia, existem riscos de contaminação das águas subterrâneas decorrentes de liberações destes produtos. Os efeitos à saúde humana,

causados pela exposição aos derivados dos hidrocarbonetos do petróleo, seja através da inalação, ingestão ou contato com a pele, são, geralmente, nocivos e graves, sendo vários destes compostos indicados como potenciais agentes carcinogênicos e denominados como Substâncias Tóxicas Perigosas. Quando presentes nas águas, estes compostos as tornam impróprias para consumo humano.

2.2.5.2 Hidrocarbonetos Totais de Petróleo

Análise de TPH (Hidrocarbonetos Totais de Petróleo) em águas visa identificar possíveis vazamentos de combustíveis tanto em solo quanto em águas, pois o seu derramamento pode causar riscos tanto para a saúde humana como para o meio ambiente. Os hidrocarbonetos são derivados do petróleo presente na gasolina e no óleo diesel, bem como seus derivados, e são analisados de acordo com seu grau de saturação.

2.2.5.3 Agrotóxicos

Estão representados pelos inseticidas, herbicidas, fungicidas, nematocidas, acaricidas, algicidas e rodenticidas. São substâncias orgânicas sintéticas, extremamente tóxicas, persistentes e de difícil biodegradabilidade (recalcitrantes). São usadas para combater insetos e ervas daninhas indesejáveis na agricultura. Nas águas subterrâneas, indicam que estas são provenientes de zonas de agricultura intensiva.

2.2.5.4 Fenóis

Os fenóis são substâncias bastante tóxicas, rapidamente degradadas no subsolo. Os compostos fenólicos mais frequentemente encontrados nas águas subterrâneas são os hidróxidos derivados do benzeno. Estes são agentes poluentes provenientes de rejeitos de águas industriais, oxidação de pesticidas, degradação microbiana de herbicidas, etc.



3. ASPECTOS METODOLÓGICOS

3.1 Introdução

Este item aborda sucintamente os critérios metodológicos de seleção, coleta das amostras, realização das análises laboratoriais e tratamento dos dados.

3.2 Seleção dos pontos amostrados

A escolha dos pontos de água para amostragem foi realizada sobre a base de dados de pontos cadastrados nas etapas anteriores. Os critérios estabelecidos para a escolha dos pontos para coleta foram:

- Distribuição espacial adequada e representatividade dos aquíferos presentes no município;
- O poço estar em atividade ou em condições de bombeamento;
- O poço apresentar acesso para coleta de água;
- Preferência para os poços que possuem perfil litológico e/ou construtivo, ou que tenha no mínimo descrição litológica;
- Avaliação dos parâmetros obtidos em campo como condutividade elétrica, pH e ORP (potencial de oxirredução).

Foram coletados, entre as campanhas de outubro e dezembro de 2019 e de novembro de 2020, 60 amostras sendo 30 de poços tubulares, 18 de poços de pequeno diâmetro, 6 de captações de fonte natural, 5 de poços escavados e uma amostra de água superficial (Figura 3.1). Também foram compiladas 19 análises físico-químicas completas de poços tubulares realizadas entre 1998 e 2017 pelos laboratórios da Universidade Federal do Paraná (LPH-UFPR), Acquaplant, Hidroclínicas e Laboratório Beckhau-ser & Barros. As análises compiladas referem-se a poços outorgados pela Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável (SDE) e outros que constam na base de dados do SIAGAS (SGB-CPRM). É relevante ressaltar que alguns destes laudos referem-se a poços que atualmente estão desativados justamente por problemas qualitativos de suas águas, mas seus resultados analíticos registram informações importantíssimas para o entendimento da hidrogeoquímica da área de estudo.

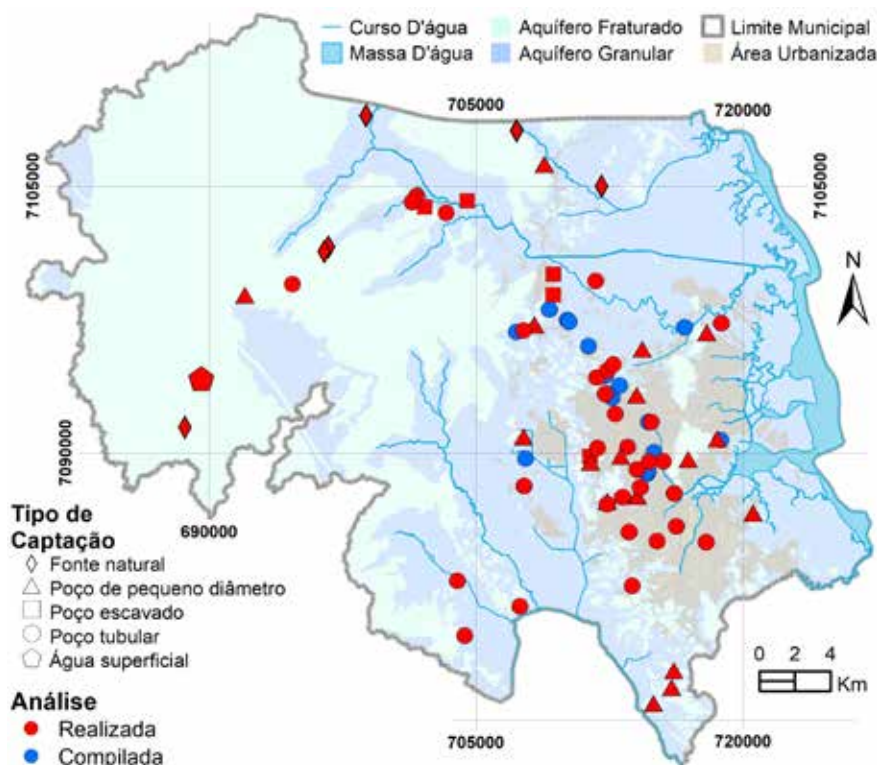


Figura 3.1. Localização dos pontos amostrados para análise laboratorial.

Os pontos amostrados e compilados também estão representados detalhadamente no Apêndice A – Mapa Hidrogeoquímico do Município de Joinville, enquanto seus resultados analíticos resumidos compõem o Anexo A – Quadro Resumido dos Resultados Analíticos e os laudos físico-químicos originais compõem o Anexo B – Laudos Físico-Químicos Originais.

3.3 Coleta das amostras

Para a coleta das amostras, tubos e seringas foram lavados com água destilada e posteriormente enxaguados com a própria água do poço, de forma a ambientar os equipamentos. Em cada local de coleta foram medidos os parâmetros físico-químicos da água (temperatura, pH, potencial de oxirredução e condutividade elétrica) com o uso de uma sonda multiparâmetros, marca Aquameter, modelo AP-800, previamente calibrada (Figura 3.2).



Figura 3.2. Medição em campo dos parâmetros pH, Eh, CE e temperatura da água durante a coleta das amostras.

Em cada ponto de amostragem também foram coletadas as alíquotas de amostras para análises de elementos principais, metais, fenóis, nitrogênio total, VOC, agrotóxicos e isótopos estáveis, conforme se vê no Quadro 3.1. As alíquotas destinadas a análises de metais foram filtradas com seringas sem agulha e unidades filtrantes com membranas milipore de 0,45 μm (Figura 3.3).

Quadro 3.1. Relação das alíquotas e preservantes de acordo com cada parâmetro analisado.

Parâmetro Analisado	Tipo de frasco	Volume	Preparo da amostra	Preservante
elementos principais	polietileno	1.000 mL	água bruta	nenhum
metais	polietileno	500 mL	água filtrada	ácido nítrico pH< 2
fenóis e nitrogênio total	polietileno	500 mL	água bruta	ácido sulfúrico pH< 2
VOC	vidro transparente	100 mL	água bruta	solução de tiosulfato de sódio 10%
agrotóxicos	vidro âmbar	1.000 mL	água bruta	nenhum
isótopos estáveis	vidro âmbar	50 mL	água bruta	nenhum



Figura 3.3. Filtração da amostra de água para análise de metais com seringa e membrana filtrante de 0,45 µm.

As amostras, etiquetadas, acondicionadas e refrigeradas em caixas de isopor com bolsas de gelo gel, foram enviadas para o laboratório no mesmo dia da coleta para o início dos procedimentos analíticos (Figura 3.4).

A coleta de amostras de água para análise isotópica de Oxigênio-18 (^{18}O) e Deutério (^2H) foi realizada em todos os pontos amostrados para análises físico-químicas da área, tomando-se cautela para que não ocorresse o fracionamento através de evaporação ou difusão do vapor de água e/ou troca isotópica com o ambiente. Os resultados serão apresentados no Produto P7 Mapa Hidrogeológico.



Figura 3.4. Acondicionamento das amostras em caixas de isopor contendo bolsas de gelo gel, para preservação das amostras durante o envio ao laboratório analítico.

3.4 ANÁLISE LABORATORIAL

As análises físico-químicas foram realizadas no Laboratório Bioética Ambiental localizado em Araxá – MG sob a responsabilidade técnica do Químico Aires Martins, CRQ nº 02404593. Os parâmetros e seus respectivos métodos de determinação estão listados a seguir, enquanto que os laudos amostrais compõem o Anexo B – Laudos Físico-Químicos Originais. O laboratório empregou os métodos de determinação em conformidade com os critérios SMWW (*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*), recomendados pela AWWA (*American Water Works Association*), pela APHA (*American Public Health Association*) e pela WEF (*Water Environment Federation*), que podem ser consultados em Baird, Eaton e Rice, (2012).

A determinação da aparência (aspecto, materiais flutuantes, óleos e graxas visíveis, resíduos sólidos objetáveis e substância que conferem odor) foi utilizada por método de observação visual ou percepção (SMWW 22ª Edição, 2012 Método 2110). Os sólidos totais foram determinados por secagem a 103-105°C, com LD: 10,0 mg/L (SMWW 22ª Edição, Método 2540 B). A determinação de Sólidos Totais Dissolvidos foi realizada por secagem a 180°C, com LD: 10,0 mg/L (SMWW 22ª Edição, Método 2540 C). A dureza total foi obtida pelo método titulométrico por EDTA LD: 2,0 mg/L de CaCO₃ (SMWW 22ª Edição). A determinação da turbidez foi realizada pelo método nefelométrico com LD: 0,2 NTU (SMWW 22ª Edição, Método 2130 B). Os cloretos foram analisados pelo método argentométrico com LD: 5,0 mg/L (SMWW 22ª Edição, Método 4500-Cl- B). A determinação de fluoretos foi efetuada pelo método do eletrodo íon seletivo, com LD: 0,1 mg/L (SMWW 22ª Edição, Método 4500-F-C). O pH foi avaliado pelo método eletrométrico na faixa 1 a 13. O sulfato foi determinado pelo método turbidimétrico com LD: 5,0 mg/L (SMWW 22ª Edição, Método 4500-SO₄). A determinação da alcalinidade (carbonato, bicarbonato, hidróxido) foi feita pelo método titulométrico, com LD: 0,5 mg/L de CaCO₃ (SMWW 22ª Edição, Método 2320 B). O ortofosfato total e dissolvido foi determinado pelo método colorimétrico com ácido ascórbico. Com LD: 0,02 mg P₀₄/L (SMWW 22ª Edição, Método 4500P E). A determinação de nitrogênio total foi por cálculo com LD: 0,1 mg N/L (SMWW 22ª Edição, Método 4500 N). A determinação de metais (Totais e Dissolvidos) foi realizada por espectrometria de emissão de plasma: método de plasma indutivamente acoplado (ICP).

A determinação de ferro férrico e ferroso (total e dissolvido) foi feita pelo método colorimétrico com fenantrolina e LD: 0,1 mg/L (SMWW 22ª Edição, Método 3500–Fe B). Todos os métodos SMWW (*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*) utilizados constam em Baird, Eaton e Rice, (2012). Os ânions foram determinados por Cromatografia Iônica – Detector de Condutividade. A determinação de compostos orgânicos voláteis (VOC), BTEX, fenóis e agrotóxicos foi realizada pela cromatografia gasosa acoplado a espectrometria de massa.

3.5 Tratamento dos dados

Os resultados analíticos das amostras coletadas e das análises compiladas foram tabelados e submetidos a técnicas de estatística univariada. Para tanto foi utilizado o pacote computacional *Aquachem 9*, *Statistica* e *Microsoft® Excel*. Posteriormente os dados foram inseridos em ambiente SIG utilizando pacote ArcGIS®.

Os íons maiores e suas razões em meq/L foram utilizados para delinear a condição do fluxo dentro dos aquíferos e a composição das águas subterrâneas, através de uma abordagem baseada no agrupamento por similaridade hidroquímica das amostras analisadas.

Os métodos de avaliação hidroquímica adotados neste estudo foram baseados em métodos gráficos, também denominados de diagramas de concentrações de íons. Os métodos gráficos adotados foram os diagramas de Piper (PIPER, 1944), os diagramas de Stiff (STIFF, 1951) e o diagrama de índice SAR (RICHARDS, 1954).



4. RESULTADOS

4.1 Introdução

A realização de análises físico-químicas das águas subterrâneas de Joinville objetivou a determinação dos tipos químicos dessas águas, sua caracterização e evolução geoquímica. Os resultados contemplam os principais parâmetros físico-químicos obtidos com a realização das análises e compilação das já existentes (dados secundários). O estudo também contempla as informações acerca dos padrões de potabilidade, processos hidrogeoquímicos envolvidos nos sistemas aquíferos e adequabilidade ao uso.

Para tanto os pontos analisados foram separados pela tipologia aquífera em aquífero fraturado (classe 1) e granular (classe 2). As captações de fontes, poços escavados e poços de pequeno diâmetro (poços ponteira) referem-se exclusivamente à captação no aquífero granular, composto por depósitos eluvionares, coluvionares, fluviais e fluvio-estuarinos. Os poços tubulares captam de modo geral as zonas fraturadas das rochas cristalinas e a porção superior dessas rochas, formadas por regolito, elúvio e colúvio, na qual prevalece a porosidade intergranular (intersticial) e se desenvolve um aquífero freático associado à zona saturada nas camadas superficiais. Este horizonte pode ou não estar interligado com o aquífero fissural subjacente. Quando há comunicação ou captação simultânea entre os dois horizontes, o aquífero passa a ser denominado como misto, mas no tratamento estatístico e hidroquímico o mesmo foi considerado como aquífero granular, uma vez que a principal entrada de água nos poços está relacionada à presença de filtros nas litologias inconsolidadas. Os poços tubulares amostrados que não possuem perfis litológicos e construtivos foram agrupados na classe 3 - aquífero não determinado. Cabe ressaltar que estes poços foram amostrados devido a impossibilidade de acesso a alguns poços com perfis anteriormente selecionados.

Uma descrição do tipo de aquífero captado e características construtivas dos pontos amostrados e dos que possuíam análises completas podem ser visualizadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Características construtivas dos pontos de captação amostrados e com análises compiladas (*).

Ponto	Tipo de captação	Aquífero	Profundidade (m)	Total de revestimento (m)	Entradas d'água (m)
JAP004	Poço tubular	fraturado	72	12	24,5
JAP007	Poço tubular	granular	70	28	
JAP010	Fonte natural	granular			
JAP016	Poço escavado	granular	6	6	
JAP019	Fonte natural	granular			
JAP030	Poço ponteira	granular	12	12	
JAP031	Poço escavado	granular	5,76	5,76	
JAP044	Poço escavado	granular	5,5	5,5	
JAP046	Fonte natural	granular			
JAP049	Fonte natural	granular			
JAP051	Poço tubular	indefinido	-	-	
JAP057	Poço tubular	misto	202	36	

continua...

...continuação

Ponto	Tipo de captação	Aquífero	Profundidade (m)	Total de revestimento (m)	Entradas d'água (m)
JAP058	Poço tubular	fraturado	252	40	104
JAP061*	Poço tubular	granular	77,5	38	
JAP062	Poço tubular	misto	50	36	
JAP069	Fonte natural	granular			
JAP072	Poço ponteira	granular	37		
JAP073*	Poço tubular	misto	110	37	
JB467*	Poço tubular	granular	120	120	
JB485*	Poço tubular	indefinido	100	-	
JB487*	Poço tubular	granular	450	46	39
JB494*	Poço tubular	granular	106	49	
JB518*	Poço tubular	fraturado	303	95	299
JB523*	Poço tubular	fraturado	216	40	
JB527*	Poço tubular	fraturado	180	36	
JB533*	Poço tubular	fraturado	354	53,2	278 e 332
JEB028*	Poço tubular	fraturado	204	17,6	25 e 75
JEB048	Poço ponteira	granular	48	48	
JEB059	Poço ponteira	granular	27	27	
JEI002	Poço ponteira	granular	8	8	
JEL030	Poço escavado	granular	5	5	
JEL032	Poço tubular	indefinido	90	-	
JEL040	Poço ponteira	granular	28	28	
JEP008	Poço ponteira	granular	19	19	
JGB001*	Poço tubular	granular	330	42	
JGB007	Poço tubular	fraturado	78	24	33 e 36
JGB008	Poço tubular	granular	145	36	
JGB012	Poço ponteira	granular	-	-	
JGB013	Poço tubular	granular	218	62	
JGB038	Poço tubular	indefinido	-	-	
JGB045	Poço ponteira	granular	-	-	
JIP002	Poço tubular	granular	74	74	30 e 60
JIP003	Poço tubular	granular	100	35	29 e 79

continua...

...continuação

Ponto	Tipo de captação	Aquífero	Profundidade (m)	Total de revestimento (m)	Entradas d'água (m)
JIP012	Poço ponteira	granular	12	12	
JIP013	Poço tubular	granular	92	70	
JIP014	Poço tubular	fraturado	120	59	73 e 79
JIP018	Poço ponteira	granular	14	14	
JIP020	Poço tubular	granular	154	40	
JIP027	Poço tubular	indefinido	122	-	
JIP028	Poço ponteira	granular	60	60	
JIP029	Poço ponteira	granular	48	48	
JIP030	Poço tubular	indefinido	240	-	
JIP031	Poço tubular	fraturado	210	32	48 e 172
JIP036	Poço tubular	fraturado	140	71	91
JIP040	Poço tubular	indefinido	170	-	
JIP045*	Poço tubular	fraturado	115	16	48 e 52
JIP053	Poço tubular	fraturado	300	36	
JIP054	Poço tubular	granular	100	53	
JMB008	Poço ponteira	granular	-	-	
JMB009	Poço ponteira	granular	40	40	
JMB030	Poço escavado	granular	5	5	
JMB033	Poço ponteira	granular	15	15	
JMB034	Poço tubular	indefinido	150	-	
JMB035	Poço ponteira	granular	7	7	
JMB036	Poço tubular	fraturado	102	55,3	58 e 66
JML004	Fonte natural	granular			
JML005	Poço tubular	fraturado	153	24	
JML007	Poço tubular	fraturado	100	59,5	
JML009	Poço tubular	fraturado	86	10	
JML010	Poço tubular	granular	70	16	
JML012*	Poço tubular	granular	162	26,3	
JML039	Poço ponteira	granular	40	40	
JML042	Poço tubular	indefinido	120	-	
JP314*	Poço tubular	granular	300	34,5	

continua...

...continuação

Ponto	Tipo de captação	Aquífero	Profundidade (m)	Total de revestimento (m)	Entradas d'água (m)
JP315*	Poço tubular	granular	64	61	
JP318*	Poço tubular	granular	110	37	
JP338*	Poço tubular	granular	300	24	
MF001	Água superficial	-			

* Dados secundários provenientes da base SIAGAS (SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM, 2021).

4.2 Características gerais da hidroquímica das águas subterrâneas

A Tabela 4.2 mostra a estatística resumida dos principais íons analisados e parâmetros físico-químicos determinados para os 17 poços tubulares que captam exclusivamente o aquífero fraturado na área de estudo, enquanto que a Tabela 4.3 representa estatística básica das 51 captações no aquífero granular. A Tabela 4.4 exhibe os resultados estatísticos dos 10 poços cujo sistema aquífero captado (granular ou fraturado) não é definido.

De um modo geral, verifica-se que as águas são semelhantes, porém apresentam nuances e características inerentes aos grupos que serão comentados a seguir.

No item referente aos resultados, nos principais parâmetros, são apresentados os diagramas de caixa ou *boxplot* para facilitar a visão do comportamento estatístico dos dados.

Tabela 4.2. Resumo estatístico dos principais parâmetros físico-químicos analisados nos poços que captam o aquífero fraturado.

	média	mediana	mínimo	máximo	quartil inferior	quartil superior	desvio padrão
Temperatura da água (° C)	23,05	23,0	21,00	25,7	22,3	23,70	1,29
pH	7,30	7,29	6,63	8,25	6,91	7,56	0,47
Eh (mV)	-45,67	-39,20	-141,30	14,00	-94,30	0,19	48,62
OD (mg/L)	2,13	1,44	0,43	4,92	0,64	3,33	1,72
CE (µS/cm)	435,29	263,00	134,00	1485,0	224,00	453,00	366,10
Turbidez (NTU)	7,17	0,70	0,26	84,10	0,50	1,06	20,77
STD (mg/L)	233,06	134,0	56,0	835,0	112,0	257,0	209,38
Dureza Total (mg/L de CaCO ₃)	134,79	77,04	41,50	680,0	60,66	139,25	156,54
Alcalinidade Total (mg/L de CaCO ₃)	153,46	90,00	39,00	1135,0	66,0	114,0	255,53
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	102,77	104,0	39,00	216,95	66,00	114,0	47,89
Cl ⁻ (mg/L)	54,26	10,00	3,79	392,83	5,81	46,06	103,14
SO ₄ ⁻² (mg/L)	9,73	6,14	0,000	31,19	1,53	13,15	9,96
Ca ⁺² (mg/L)	48,40	16,04	2,88	442,0	8,85	32,55	103,85

continua...

...continuação

	média	mediana	mínimo	máximo	quartil inferior	quartil superior	desvio padrão
Na ⁺ (mg/L)	36,99	13,40	4,29	214,0	7,50	41,10	54,15
K ⁺ (mg/L)	2,06	1,73	0,98	5,00	1,48	2,10	1,09
Mg ⁺² (mg/L)	7,85	5,17	1,82	26,18	4,08	10,01	5,89
F (mg/L)	0,30	0,17	0,005	1,40	0,09	0,34	0,35
NO ₃ ⁻ (mg/L NO ₃)	2,37	0,35	0,000	14,44	0,030	2,79	3,95
Sr ⁺² (mg/L)	0,06	0,07	0,02	0,11	0,02	0,10	0,03
Ferro Total (mg/L)	1,33	0,08	0,005	12,57	0,05	0,16	3,48
Manganês Total (mg/L)	0,12	0,015	0,015	0,58	0,015	0,12	0,19
Nitrogênio Total (mg/L)	1,81	1,40	0,28	4,76	1,00	2,46	1,42

Tabela 4.3. Resumo estatístico dos principais parâmetros físico-químicos analisados nos pontos relacionados ao aquífero granular.

	média	mediana	mínimo	máximo	quartil inferior	quartil superior	desvio padrão
Temperatura da água (° C)	22,78	22,81	19,00	26,20	21,95	23,80	1,483
pH	6,77	6,82	5,22	8,15	6,38	7,19	0,61
Eh (mV)	10,86	-22,85	-118,1	568,0	-38,25	33,95	121,55
OD (mg/L)	2,63	2,47	0,44	7,35	0,89	4,20	1,80
CE (µS/cm)	527,04	152,00	28,00	16.730,0	105,00	220,00	2322,72
Turbidez (NTU)	9,27	1,00	0,30	130,00	0,58	4,76	23,68
STD (mg/L)	236,71	82,00	28,0	6.828,0	56,00	112,00	947,66
Dureza Total (mg/L de CaCO ₃)	147,36	48,50	10,00	4.625,0	29,60	65,00	641,00
Alcalinidade Total (mg/L de CaCO ₃)	55,62	45,00	3,0	370,00	26,50	71,30	55,49
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	59,60	47,34	3,0	370,00	26,50	72,00	59,41
Cl ⁻ (mg/L)	68,19	4,75	2,62	2991,43	3,87	8,87	418,19
SO ₄ ⁻² (mg/L)	6,48	1,66	0,00	135,90	1,08	3,70	19,54
Ca ⁺² (mg/L)	17,08	7,29	2,40	267,16	4,970	14,36	38,04
Na ⁺ (mg/L)	53,69	8,40	0,40	2096,43	5,05	11,18	292,86
K ⁺ (mg/L)	2,18	1,41	0,12	24,66	0,89	2,20	3,44
Mg ⁺² (mg/L)	7,25	3,06	0,33	167,25	1,87	5,72	23,14
F (mg/L)	0,16	0,105	0,000	0,71	0,08	0,17	0,15
NO ₃ ⁻ (mg/L NO ₃)	2,92	1,33	0,020	15,15	0,03	3,94	3,78
Sr ⁺² (mg/L)	0,19	0,07	0,025	4,75	0,025	0,105	0,74

continua...

...continuação

	média	mediana	mínimo	máximo	quartil inferior	quartil superior	desvio padrão
Ferro Total (mg/L)	0,79	0,05	0,000	10,38	0,050	0,48	1,94
Manganês Total (mg/L)	0,078	0,015	0,000	0,74	0,015	0,03	0,16
Nitrogênio Total (mg/L)	2,34	1,97	0,73	5,88	1,25	3,35	1,42

Tabela 4.4. Resumo estatístico dos principais parâmetros físico-químicos analisados nos poços tubulares sem perfis litológico e ou construtivo.

	média	mediana	mínimo	máximo	quartil inferior	quartil superior	desvio padrão
Temperatura da água (° C)	22,7	22,9	22,0	23,9	22,0	23,1	0,64
pH	6,76	6,87	5,85	7,31	6,51	7,08	0,45
Eh (mV)	26,95	35,2	-133,0	164,0	-18,90	63,0	86,4
OD (mg/L)	2,77	2,65	0,31	5,06	0,93	4,17	1,78
CE (µS/cm)	285,14	199,50	54,0	1173,0	164,40	299,0	323,41
Turbidez (NTU)	22,47	3,97	0,26	140,0	0,68	26,30	43,63
STD (mg/L)	99,80	102,0	24,0	186,0	56,00	140,0	53,08
Dureza Total (mg/L de CaCO ₃)	61,03	53,25	17,5	127,5	42,0	83,5	33,84
Alcalinidade Total (mg/L de CaCO ₃)	55,39	53,50	8,5	95,5	46,0	82,5	28,74
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	56,90	53,5	8,5	95,5	46,0	84,0	29,90
Cl ⁻ (mg/L)	8,34	5,04	2,25	37,59	4,50	6,94	10,37
SO ₄ ⁻² (mg/L)	2,18	1,50	0,40	7,12	0,90	2,04	2,11
Ca ⁺² (mg/L)	14,82	13,29	3,76	44,28	9,23	17,48	11,47
Na ⁺ (mg/L)	8,65	8,65	3,05	19,62	4,10	10,31	4,86
K ⁺ (mg/L)	1,67	1,56	0,49	3,51	1,15	2,20	0,84
Mg ⁺² (mg/L)	4,97	3,1050	1,01	21,43	2,54	5,14	5,97
F ⁻ (mg/L)	0,23	0,15	0,07	0,77	0,10	0,26	0,21
NO ₃ ⁻ (mg/L NO3)	4,67	2,14	0,03	15,33	0,75	6,60	5,21
Sr ⁺² (mg/L)	0,105	0,08	0,025	0,27	0,05	0,10	0,09
Ferro Total (mg/L)	2,17	0,16	0,05	8,12	0,05	4,67	3,42
Manganês Total (mg/L)	0,18	0,015	0,000	1,01	0,015	0,23	0,33
Nitrogênio Total (mg/L)	3,86	4,13	0,28	12,68	1,19	4,76	3,76

4.3 Parâmetros analisados

4.3.1 Turbidez

Em relação à turbidez (Gráfico 4.1), as águas do aquífero fraturado são as que menos apresentam problemas, com somente dois indivíduos caracterizados como valores extremos. As águas captadas

dos aquíferos granulares apresentam maior turbidez e 7 pontos representam valores extremos. No terceiro caso, a turbidez é a mais frequente e a que apresenta maior alcance. A turbidez nas águas dos poços está intimamente relacionada à presença de ferro total nas águas, conforme pode ser observada a alta correlação direta no Gráfico 4.2.

A distribuição espacial dos valores de turbidez, representados na Figura 4.1, mostra que os maiores valores se encontram na porção leste e centro do município onde ocorrem os sedimentos quaternários e regolitos componentes do aquífero granular.

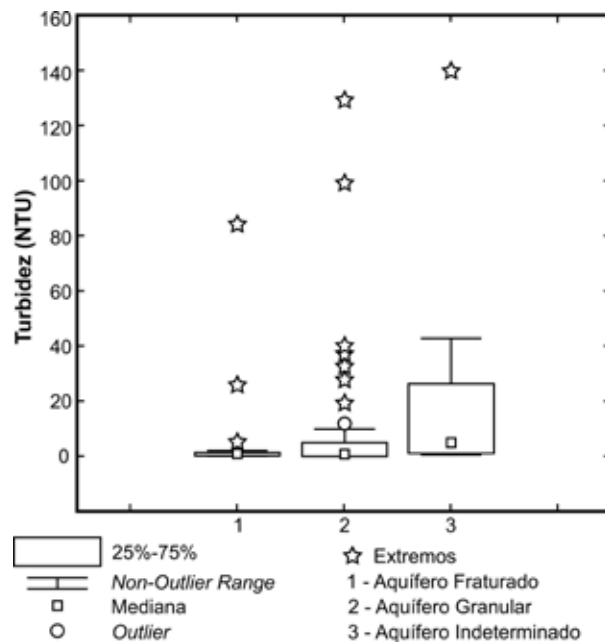


Gráfico 4.1. Boxplot do parâmetro turbidez.

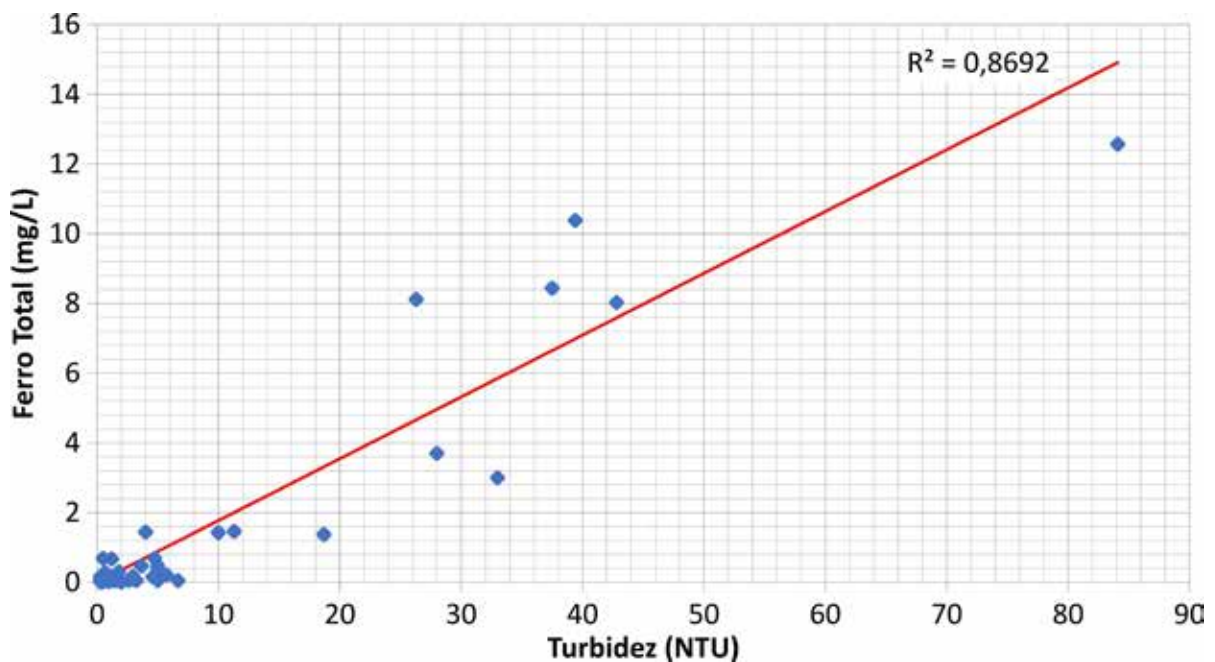


Gráfico 4.2. Diagrama de dispersão entre ferro total (Fe) e turbidez nos poços que captam o aquífero granular.

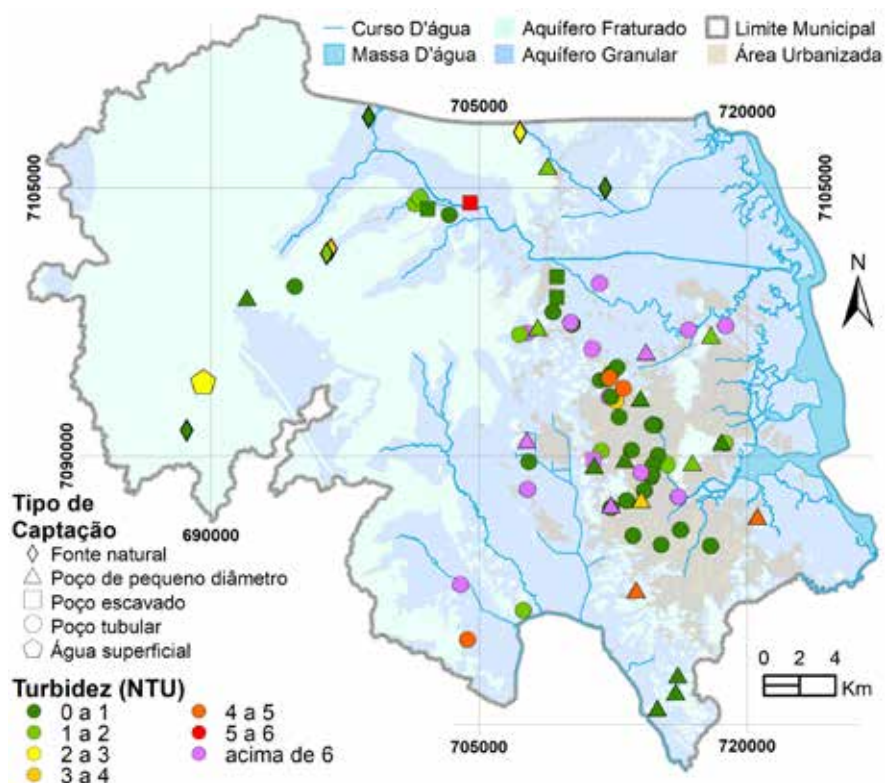


Figura 4.1. Distribuição espacial dos valores de turbidez nas amostras de água subterrânea coletadas

4.3.2 Condutividade Elétrica (CE)

A CE nas águas subterrâneas de Joinville – SC normalmente é baixa, indicando águas com pequenos teores de sais dissolvidos, decorrente da alta taxa de recarga pluviométrica e rápida circulação. No entanto, são verificados poços com valores extremos nos três grupos estudados (Gráfico 4.3), cuja concentração dos ânions principais, especialmente o Cl^- e o Na^+ , são elevadas. Tal fato pode ser explicado pela presença de águas derivadas de sedimentos de origem marinha e interferência de águas da Baía da Babitonga, que invadem os cursos d'água com a maré alta, sobretudo no entorno dos rios Cachoeira e Cubatão Norte (Figura 4.2).

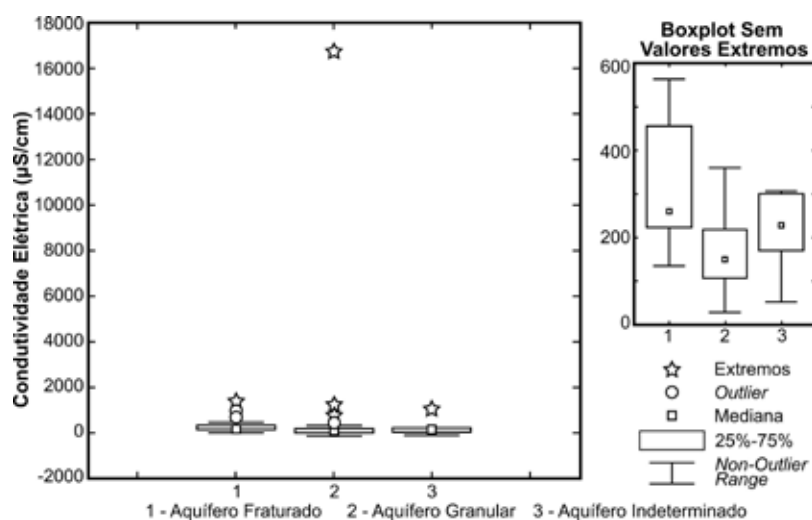


Gráfico 4.3. Boxplot da CE. À direita, para melhor visualização, observa-se o mesmo diagrama sem os valores extremos e outliers.

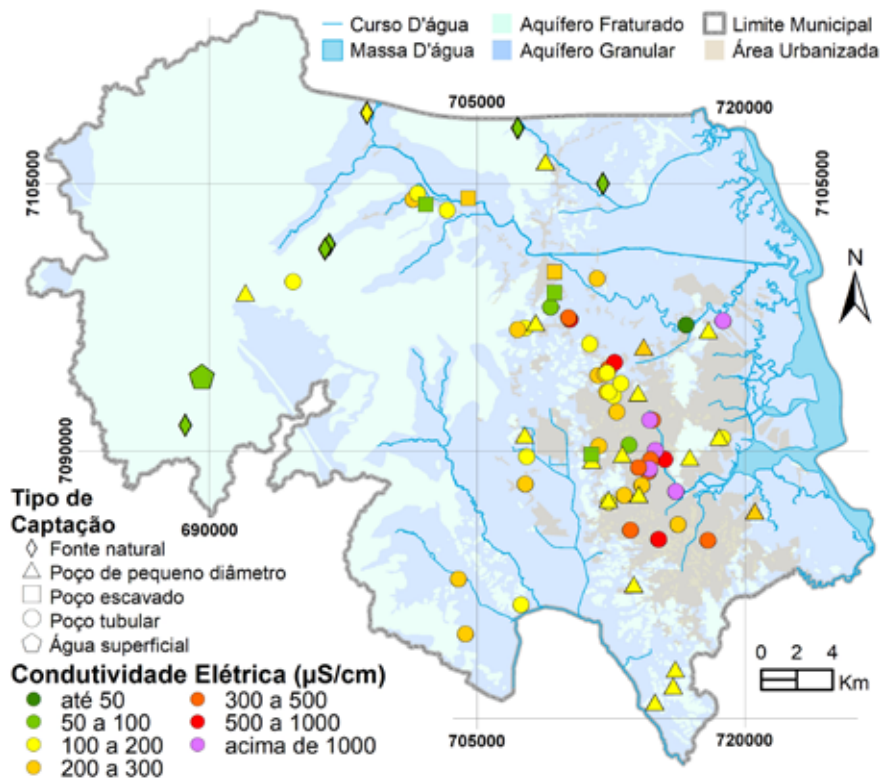


Figura 4.2. Distribuição espacial dos valores de condutividade elétrica nas amostras de água subterrânea coletadas.

4.3.3 pH

Os valores de pH classificam as águas dos aquíferos fraturados como neutras a levemente alcalinas com predomínio de valores entre 6,91 e 7,56, enquanto as dos pontos que captam o aquífero granular apresentam uma maior variação que vai desde o pH levemente ácido até levemente alcalino, mas com predominância do pH entre 6,38 e 7,19. Os poços onde o aquífero não está definido tendem a um comportamento levemente ácido a neutro. A estatística do pH nos diferentes grupos está representada no Gráfico 4.4. Observando a distribuição espacial do pH na área do município (Figura 4.3), constata-se que os valores maiores de pH predominam na área urbanizada, onde predominam poços que captam o aquífero fraturado. A tendência de maior pH nas águas subterrâneas do município pode ser explicada, entre outras causas, pelo maior tempo de residência das águas, sobretudo dos aquíferos fraturados e também pela dissolução de minerais carbonatados, como a calcita, presente nas fraturas destas rochas.

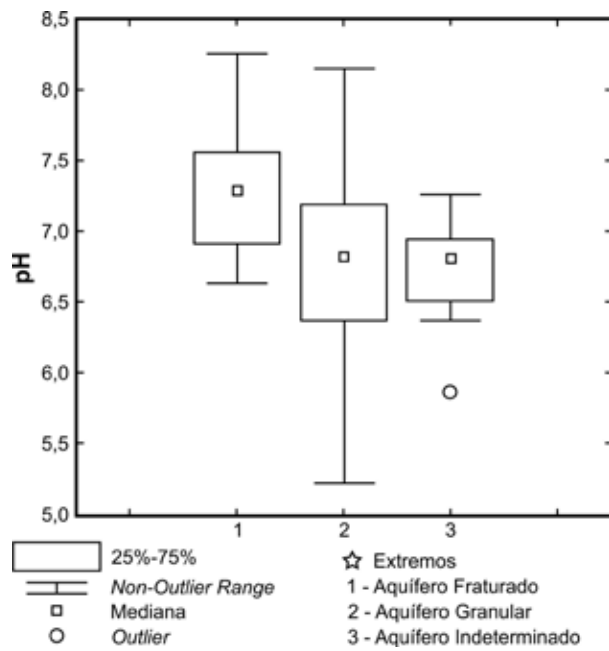


Gráfico 4.4. Boxplot do parâmetro pH, evidenciando que as águas relacionadas aos aquíferos fraturados têm maior tempo de residência.

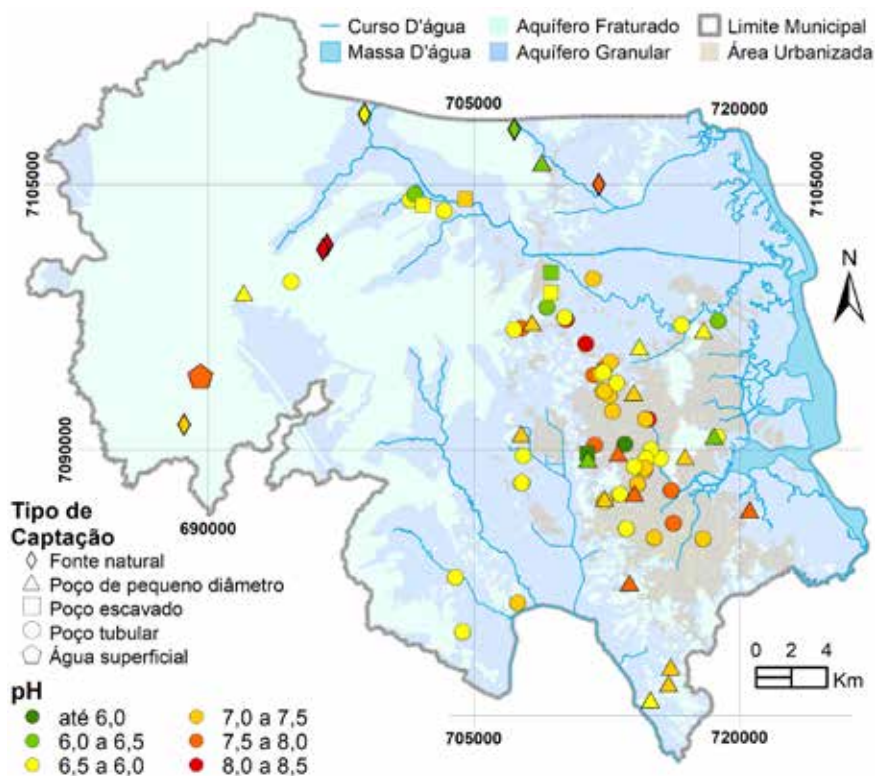


Figura 4.3. Distribuição espacial dos valores e pH das nas amostras de água subterrânea coletadas.

4.3.4 Eh (Potencial de Oxirredução)

O Eh (Gráfico 4.5) tende a ser menor e com valores negativos nos aquíferos fraturados, refletindo o ambiente redutor que predomina nos aquíferos mais profundos e sem contato com o oxigênio da

atmosfera. Nos aquíferos granulares os valores de Eh são maiores e com tendência ao positivo devido às águas serem mais próximas à superfície e estarem em um ambiente mais oxidante. O terceiro grupo apresenta poucos valores negativos, sendo semelhante aos do grupo dos aquíferos granulares. A Figura 4.4 apresenta a distribuição do Eh das águas subterrâneas com predomínio das águas com maior Eh na área central e próximo à Baía da Babitonga.

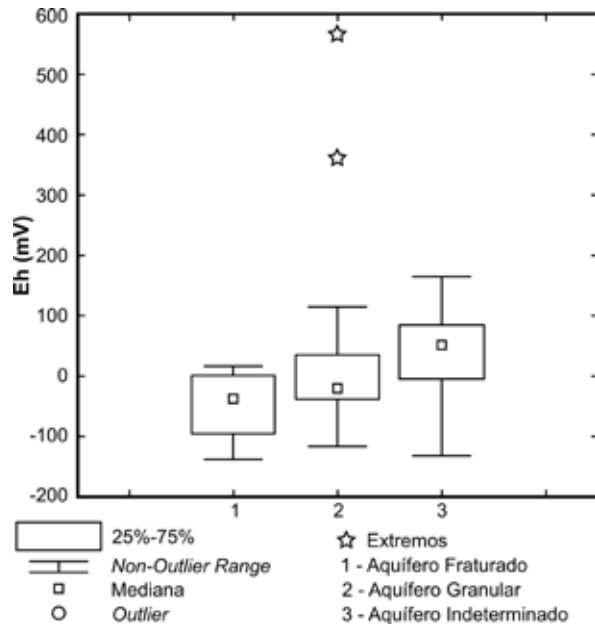


Gráfico 4.5. Boxplot dos valores de Eh nas amostras de água subterrânea coletadas.

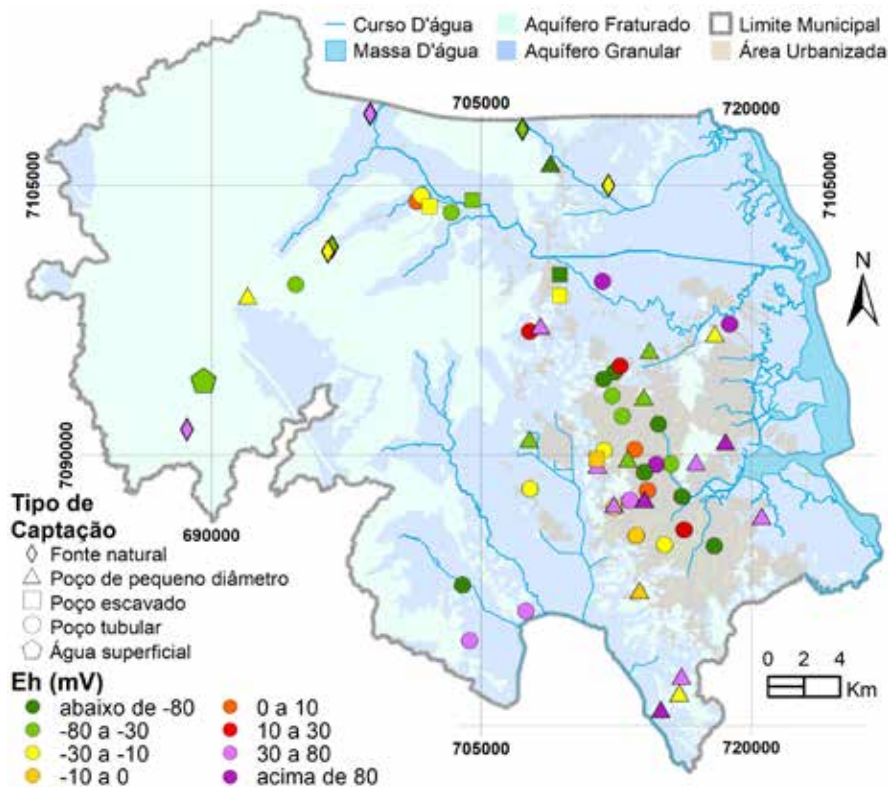


Figura 4.4. Distribuição espacial dos valores de Eh nas amostras de água subterrânea coletadas.

4.3.5 Sólidos Totais Dissolvidos (STD)

A concentração dos sólidos totais dissolvidos (STD), do mesmo modo que a CE, expressa a salinização das águas, que é função do tempo de residência e de processos de interferência das águas de origem estuarina ou marinha. Os poços que captam o aquífero fraturado exibem um intervalo maior que os demais e ocorrem poços que se enquadram como *outliers* e valores extremos (Gráfico 4.6), que são justamente os poços com interferência de água salgada. Os pontos que captam o aquífero granular apresentam menor teor de sais dissolvidos, mas também exibem dois pontos que são valores extremos. Os maiores valores de sais totais dissolvidos encontram-se distribuídos principalmente no setor leste e central do município (Figura 4.5).

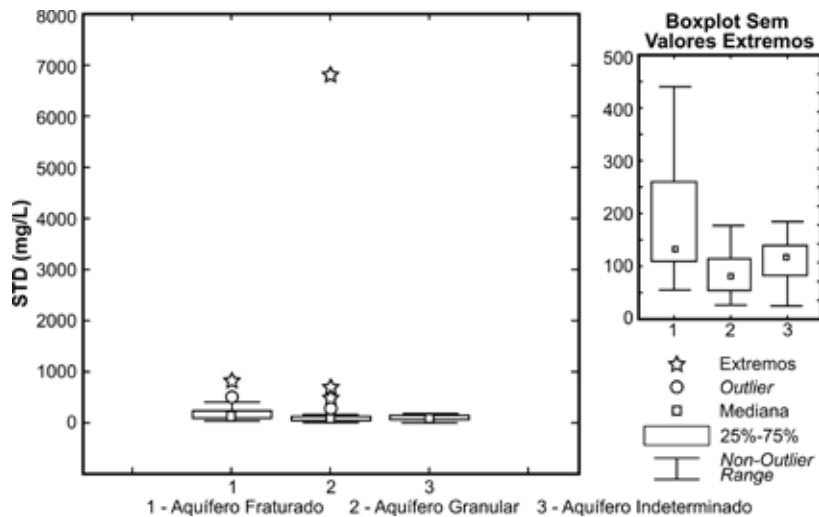


Gráfico 4.6. Boxplot do parâmetro sólidos totais dissolvidos.

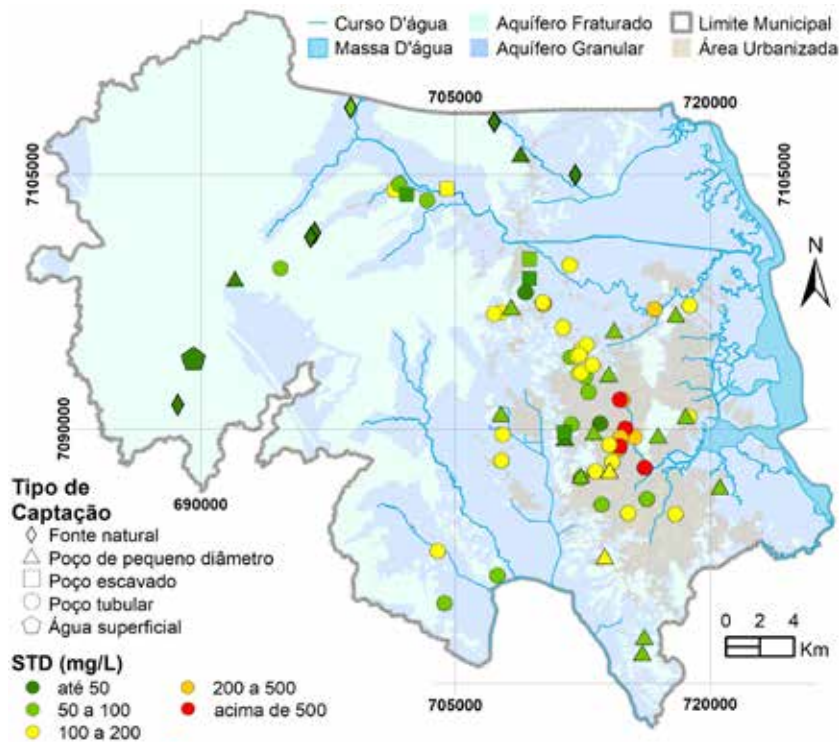


Figura 4.5. Distribuição espacial da concentração dos sólidos totais dissolvidos nas amostras de água subterrânea coletadas.

4.3.6 Alcalinidade Total

A alcalinidade total no aquífero granular e no aquífero indeterminado é semelhante e apresenta menores valores do que no aquífero fraturado (Gráfico 4.7). A alcalinidade expressa que nas águas dos aquíferos fraturados há maior presença de bicarbonatos que nos demais. Os maiores valores de alcalinidade total encontram-se na porção leste do município coincidindo com a área urbanizada (Figura 4.6). Nessa área concentram-se muitos poços tubulares que captam exclusivamente o aquífero fraturado.

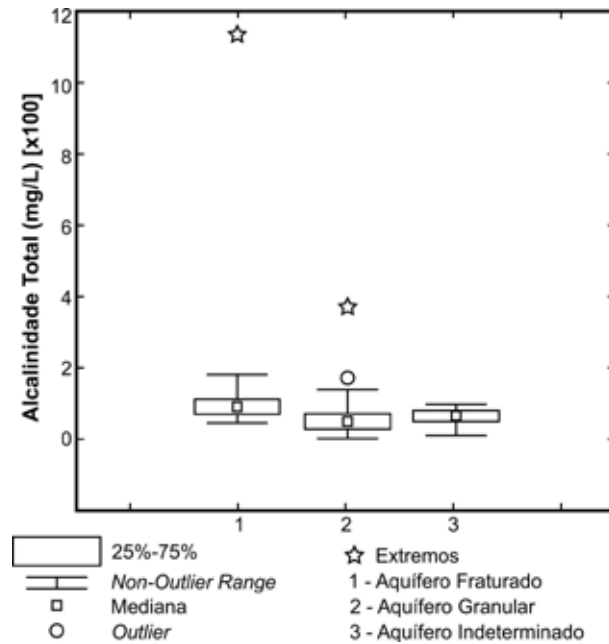


Gráfico 4.7. Boxplot da alcalinidade total das nas amostras de água subterrânea coletadas.

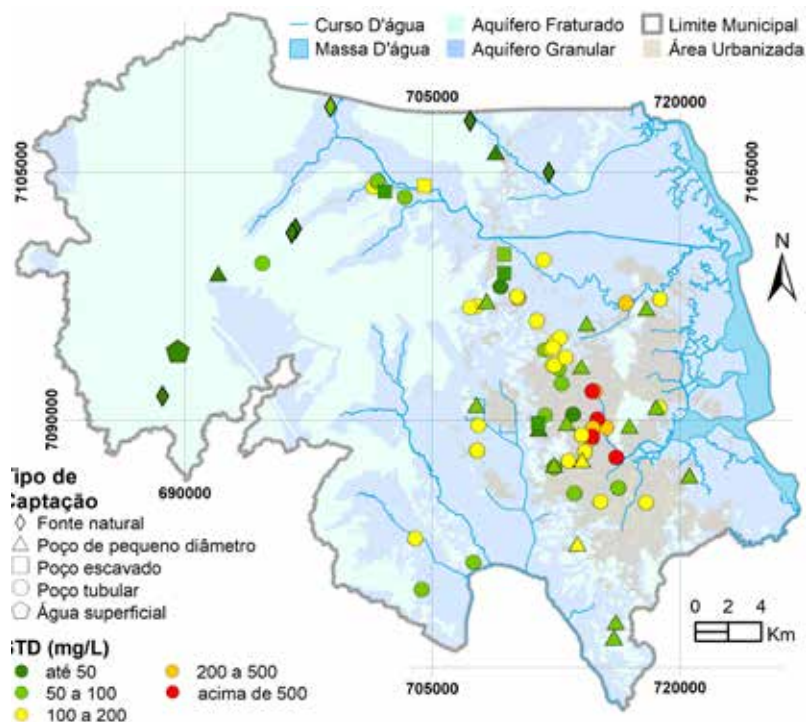


Figura 4.6. Distribuição espacial da alcalinidade total das nas amostras de água subterrânea coletadas.

4.3.7 Dureza Total

A dureza total nos poços que captam o aquífero fraturado está classificada, com base em Custodio e Llamas (1983), entre águas pouco duras a duras, com dois poços apresentando águas muito duras. O diagrama *boxplot* ilustra a diferença entre os grupos (Gráfico 4.8). Nos demais grupos as águas são predominantemente brandas a pouco duras. Observando a Figura 4.7, percebe-se que as águas mais duras estão localizadas nas partes mais baixas do município, enquanto que na área da Serra da Dona Francisca e no norte do município as águas são predominantemente brandas.

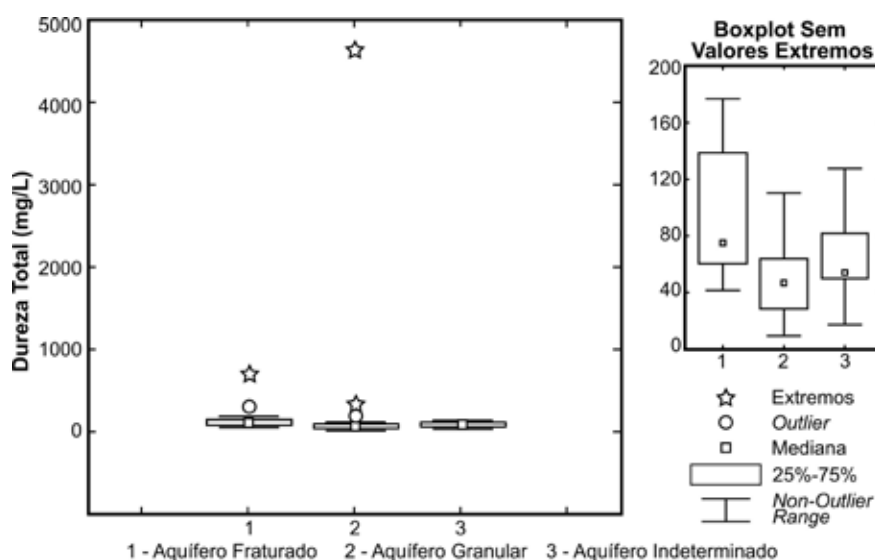


Gráfico 4.8. Boxplot da dureza total das nas amostras de água subterrânea coletadas. À direita, para melhor visualização, observa-se o mesmo diagrama sem os valores extremos e outliers.

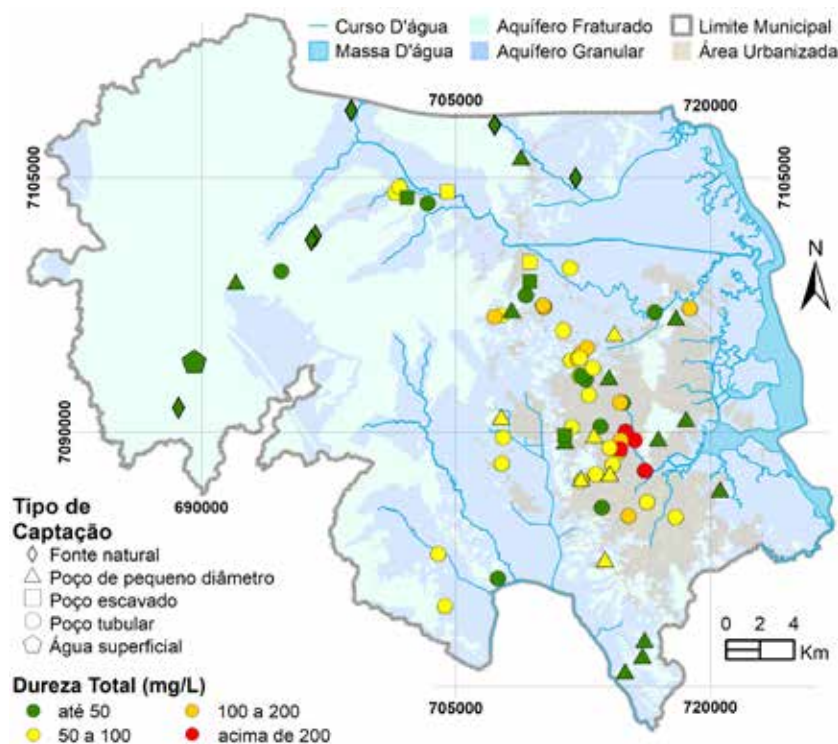


Figura 4.7. Distribuição dos valores de dureza total nas amostras de água subterrânea coletadas de Joinville – SC.

4.3.8 Bicarbonatos (HCO_3^-)

De modo geral as águas dos poços que captam o aquífero fraturado apresentam maior concentração do íon bicarbonato (HCO_3^-) que os demais grupos. Alguns pontos no aquífero granular mostram valores maiores, se comportam como *outliers* no diagrama de *boxplot* e estão relacionados a poços tubulares mais profundos (Gráfico 4.9). A Figura 4.8 ilustra que os maiores valores de bicarbonato nas águas subterrâneas estão em poços localizados na área urbanizada, estão associados a poços tubulares que captam o aquífero fraturado e fornecem águas com maior tempo de residência.

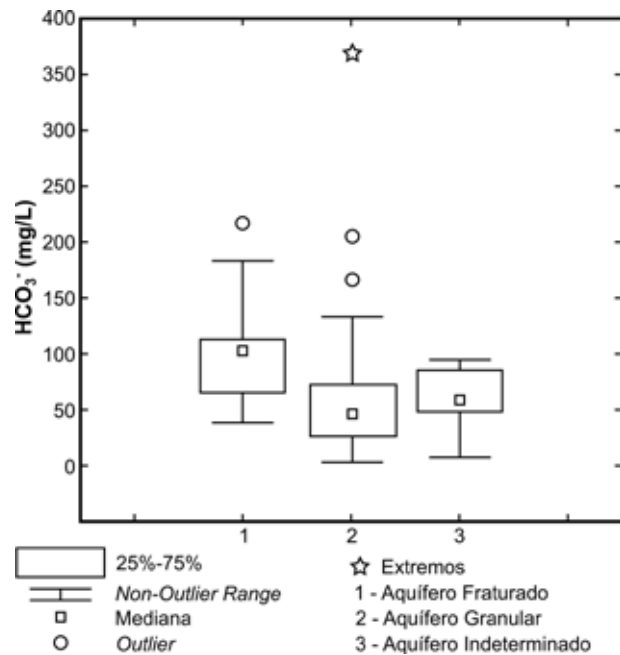


Gráfico 4.9. Boxplot de bicarbonatos (HCO_3^-) nas amostras de água subterrânea coletadas.

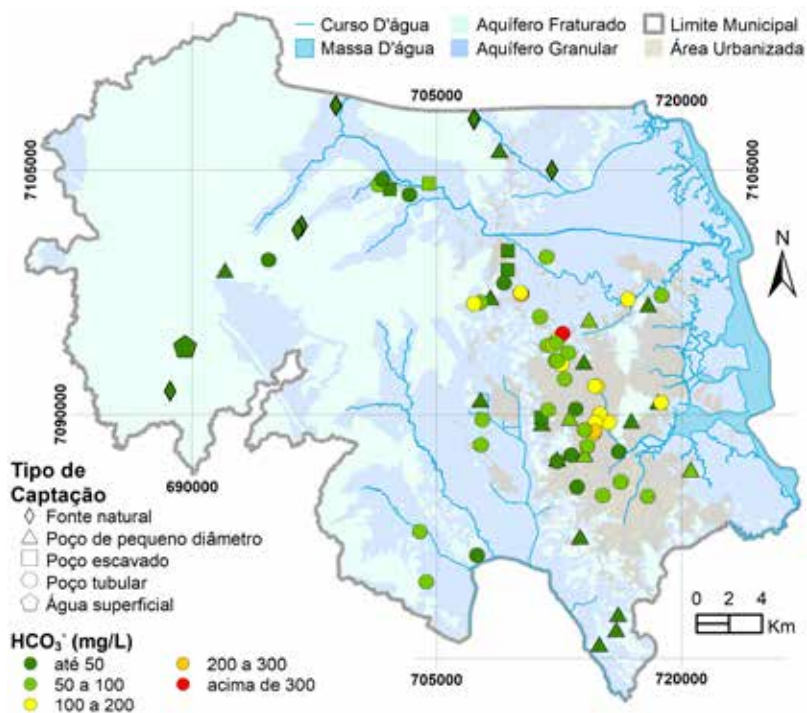


Figura 4.8. Distribuição das concentrações de bicarbonatos (HCO_3^-) nas amostras de água subterrânea coletadas.

4.3.9 Cloretos (Cl⁻)

As concentrações de cloretos (Cl⁻) nos aquíferos fraturados são, na maioria das vezes, inferiores a 50 mg/L, porém quatro poços apresentam valores extremos (Gráfico 4.10) que são indicativos de alto tempo de residência, influência de águas salinas dos sedimentos marinhos e/ou das águas da Baía da Babitonga que adentram a cidade pelos cursos de água. Nos demais grupos, as águas são empobrecidas em cloretos e representam águas mais jovens, continentais e de baixa carga iônica. A Figura 4.9 mostra que as mais altas concentrações de cloretos localizam-se na área central da cidade ao longo do rio Cachoeira.

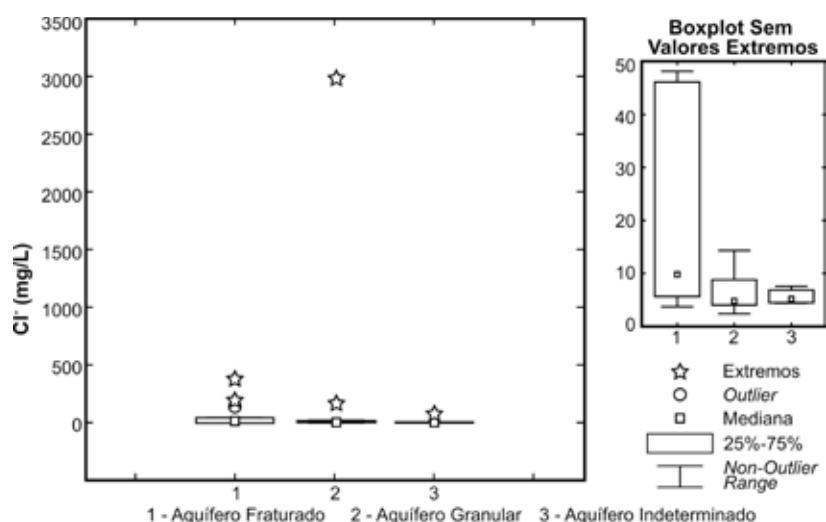


Gráfico 4.10. Boxplot do ânion cloreto (Cl⁻) nas amostras de água subterrânea coletadas. À direita, para melhor visualização, observa-se o mesmo diagrama sem os valores extremos e outliers.

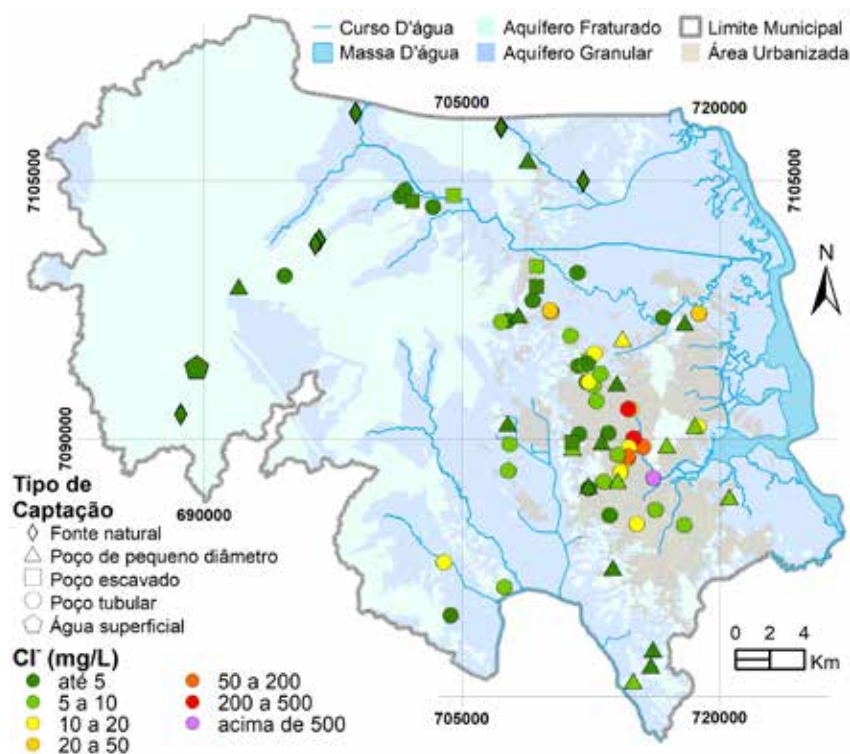


Figura 4.9. Distribuição espacial das concentrações do ânion cloreto (Cl⁻) nas amostras de água subterrânea coletadas.

4.3.10 Sulfatos (SO_4^{-2})

Os sulfatos (SO_4^{-2}) nos poços que captam o aquífero fraturado têm predominantemente suas concentrações entre 1,53 e 13,154 mg/L, ou seja, baixas concentrações de sulfatos. Nos pontos de captação exclusivamente dos aquíferos fraturados, as concentrações são até menores (entre 1,08 e 3,70 mg/L), no entanto, há alguns pontos que apresentam valores extremos (Gráfico 4.11) que atingem de 20,41 a 135,90 mg/L. No caso mais extremo, o poço apresenta água muito salinizada, rica também em cloretos, sódio, magnésio e cálcio. No grupo dos aquíferos indefinidos, os teores de sulfato são os mais baixos.

As maiores concentrações de sulfatos ocorrem na zona central do município (Figura 4.10), ao longo dos cursos d'água que cortam a cidade, coincidindo com os elevados valores de cloretos.

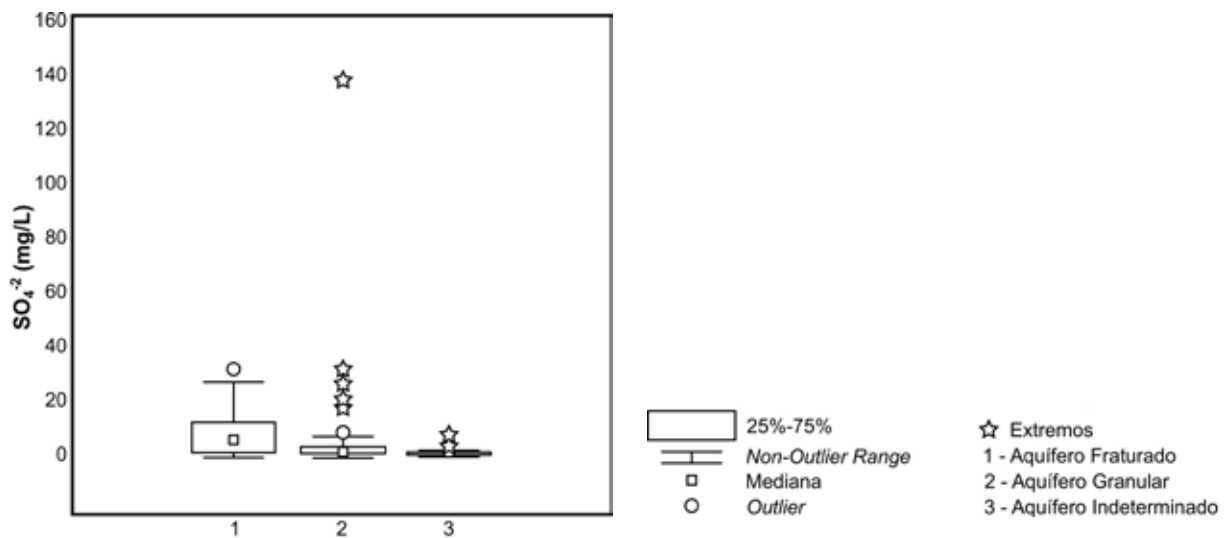


Gráfico 4.11. Boxplot do parâmetro sulfato (SO_4^{-2}) nas amostras de água subterrânea coletadas.

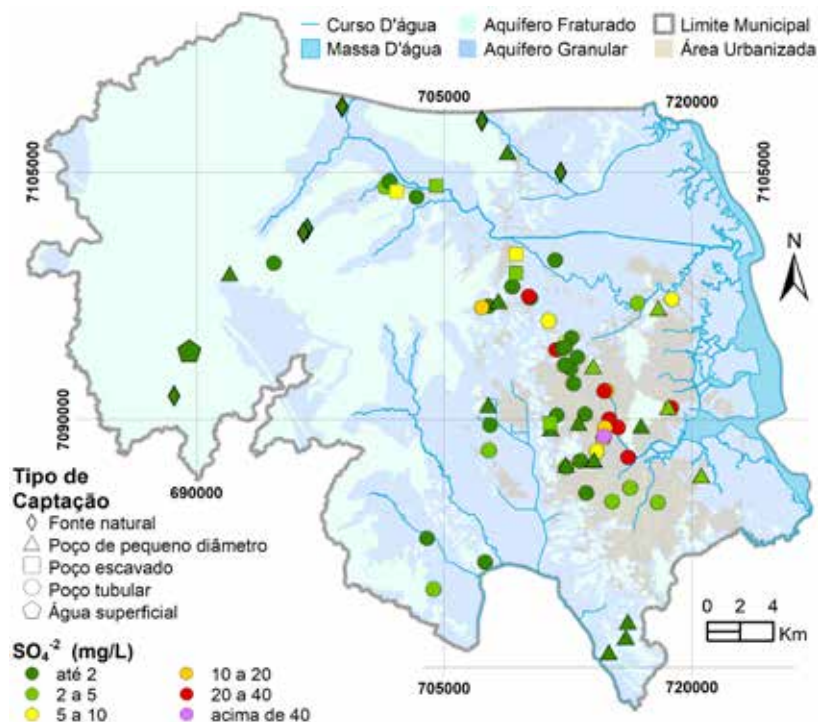


Figura 4.10. Distribuição espacial das concentrações do ânion sulfato (SO_4^{-2}) nas amostras de água subterrânea coletadas.

4.3.11 Sódio (Na^+)

As concentrações do íon sódio (Na^+) nas águas subterrâneas de Joinville tendem a ser baixas (Figura 4.11). No aquífero fraturado as concentrações desse elemento variam de 4,29 a 214,00 mg/L, entretanto a faixa predominante é entre 7,50 e 41,10 mg/L de Na^+ . Os poços que excedem esse patamar apresentam também teores de cloretos elevados e sofrem influência marinha. Os poços que captam o aquífero granular e os aquíferos indefinidos apresentam, na grande maioria das vezes, baixos valores de sódio (entre 4,10 e 11,18 mg/L), ocorrem, ainda, valores extremos que também estão relacionados à influência marinha. O Gráfico 4.12 exibe a distribuição estatística do sódio (Na^+) nos diversos grupos.

A alta correlação positiva entre sódio e cloreto nas águas com altos teores de sais dissolvidos indica que há presença do sal cloreto de sódio dissolvido, cuja origem é marinha e proveniente da interferência das águas da Baía da Babitonga, que adentram o município através dos canais nas marés altas (Gráfico 4.13).

A Figura 4.11 ilustra o comportamento do sódio nas águas subterrâneas de Joinville e confirma que os maiores valores de sódio se encontram na zona central do município, junto aos cursos d'água e próximo à Baía da Babitonga. Por outro lado, observa-se que nas partes mais elevadas do município, como na Serra da Dona Francisca e nos morros da cidade, os valores de sódio são muito baixos, indicando águas de recarga meteórica e sem nenhum aporte de água salgada.

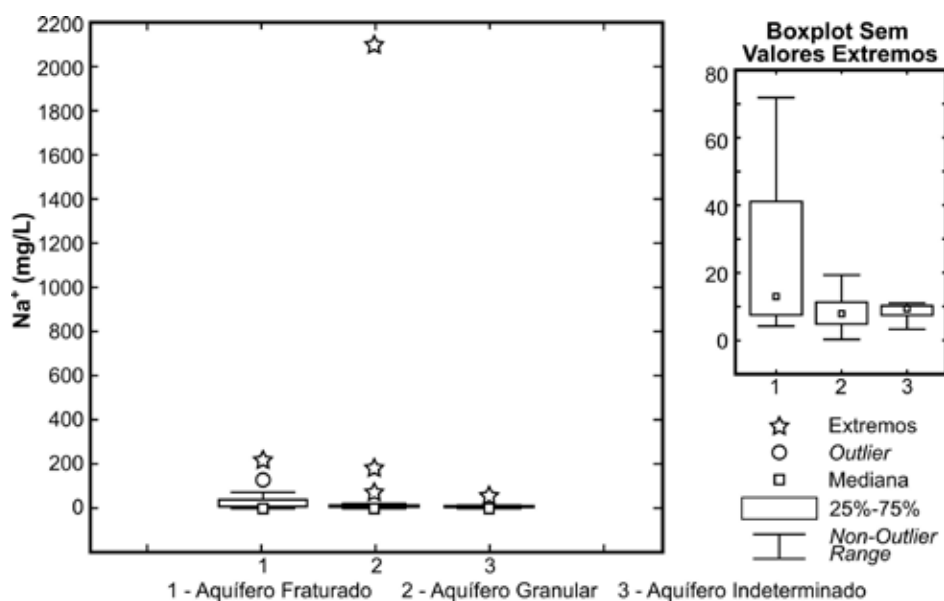


Gráfico 4.12. Boxplot do parâmetro sódio (Na^+) nas amostras de água subterrânea coletadas. À direita, para melhor visualização, observa-se o mesmo diagrama sem os valores extremos e outliers.

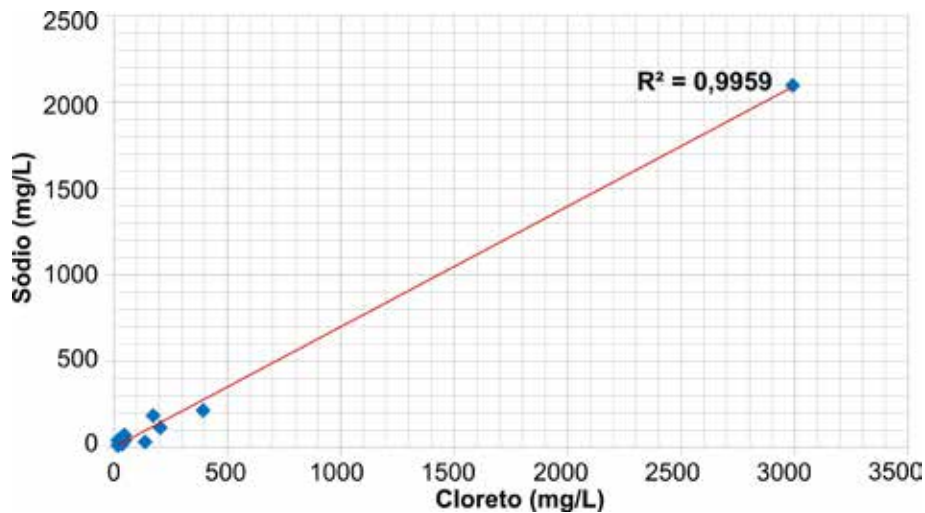


Gráfico 4.13. Forte correlação ($R^2 = 0,996$) entre cloretos e sódio, indicando que os poços que apresentam alta salinidade tem interferência de águas de origem marinha.

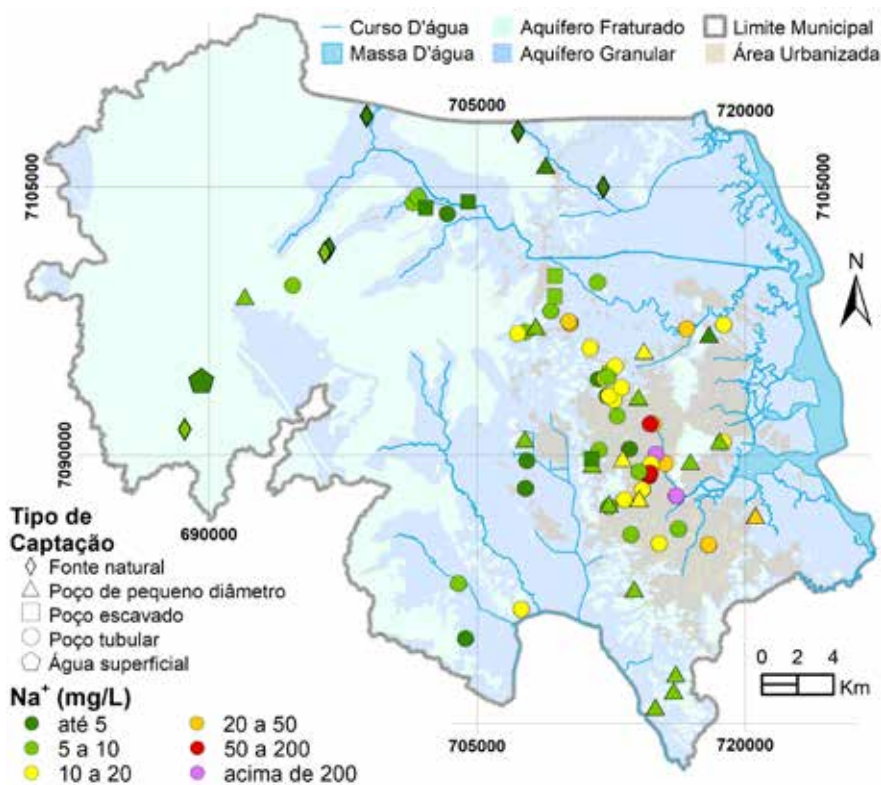


Figura 4.11. Distribuição espacial das concentrações de sódio (Na^+) nas amostras de água subterrânea coletadas.

4.3.12 Potássio (K^+)

Os valores de potássio (K^+) em geral são baixos nas águas subterrâneas quando comparados com os demais íons principais. Nas águas analisadas, os valores de potássio variam entre 0,36 e 24,66 mg/L, com mediana em todos os grupos ficando abaixo de 2 mg/L (Gráfico 4.14). Em alguns pontos de captação, sobretudo no aquífero granular, a concentração de potássio excede o patamar de 3,0 mg/L, em águas mais carregadas em seu conteúdo iônico. A Figura 4.12 ilustra a distribuição espacial das concentrações de K^+ na área de estudo.

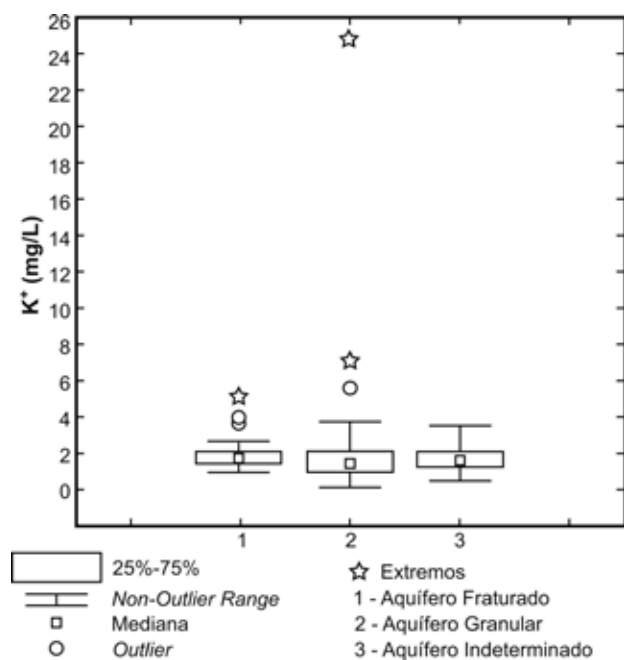


Gráfico 4.14. Boxplot do parâmetro potássio (K^+) nas amostras de água subterrânea coletadas.

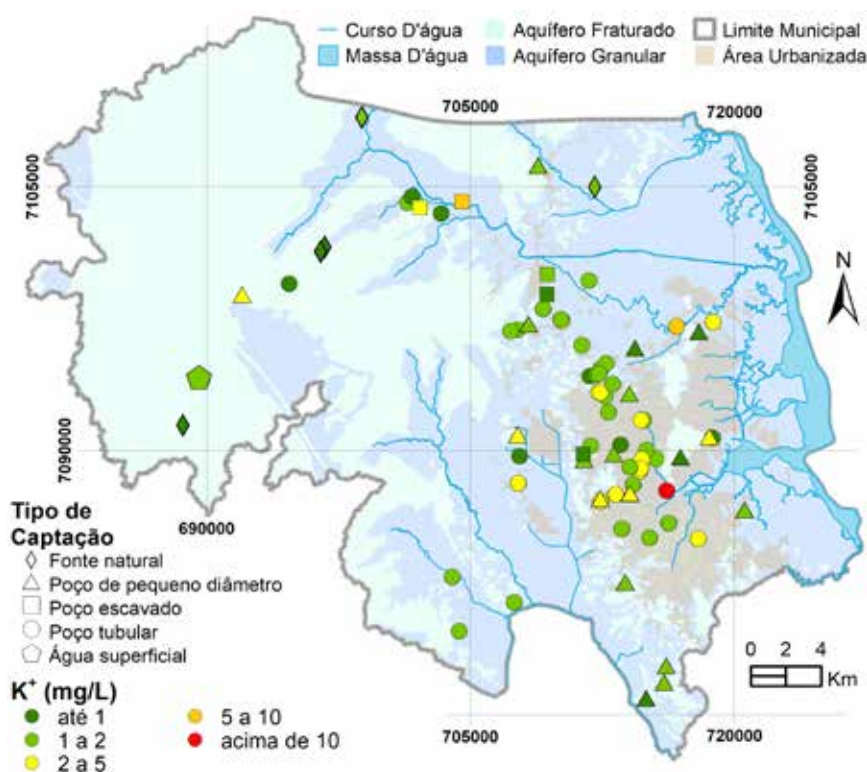


Figura 4.12. Distribuição espacial das concentrações de potássio (K^+) nas amostras de água subterrânea coletadas.

4.3.13 Cálcio (Ca^{+2})

Nos poços que representam os aquíferos fraturados, as concentrações do íon cálcio (Ca^{+2}) variam de 2,88 a 442,00 mg/L, com mediana de 16,90 mg/L e com a maior parte dos dados limitados entre 8,85 e 32,55 mg/L. Nos aquíferos granulares, a maioria das concentrações ocorrem entre 4,97 e 14,36 mg/L, com mediana de 7,29 mg/L. Nos poços nos quais não se conhece qual aquífero está sendo captado, as

concentrações de Ca^{+2} variam de 3,76 a 44,28 mg/L, com mediana de 13,29 mg/L. Em todos os grupos observam-se valores extremos (Gráfico 4.15) que representam anomalias que, na maioria das vezes, denotam a presença de calcita ou a interferência de água salgada.

A Figura 4.13 exibe as concentrações de cálcio nos pontos amostrados em Joinville, sendo que os maiores valores tendem a ocorrer na porção centro-leste da área de estudo.

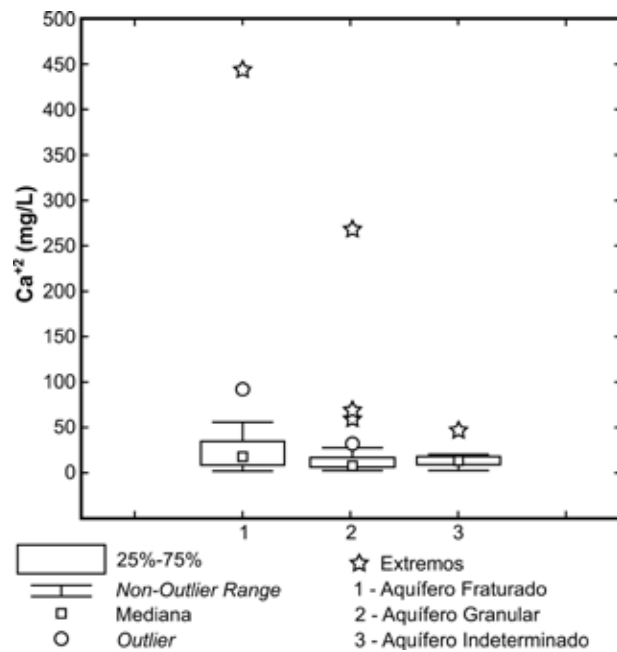


Gráfico 4.15. Boxplot de cálcio (Ca^{+2}) nas amostras de água subterrânea coletadas.

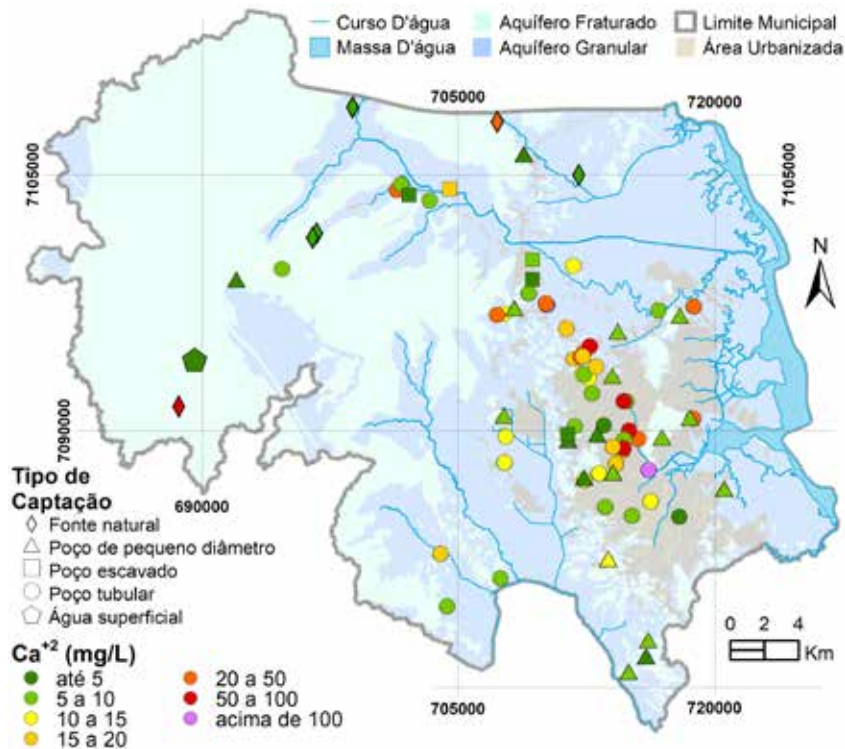


Figura 4.13. Distribuição espacial das concentrações do íon cálcio (Ca^{+2}) nas amostras de água subterrânea coletadas.

4.3.14 Magnésio (Mg^{+2})

Os valores de magnésio (Mg^{+2}) nos pontos de captação de água subterrânea amostrados variam entre 0,33 e 167,25 mg/L, com a maioria das concentrações ficando inferiores a 10,01 mg/L. Valores extremos atingem concentrações em torno de 20,00 mg/L, e, no poço JIP020, alcançam 167,25 mg/L. Observando-se o diagrama *boxplot* do Gráfico 4.16, constata-se que o comportamento do magnésio é muito semelhante nos três grupos, porém o grupo do aquífero fraturado exibe um *range* e mediana um pouco mais elevados que os demais.

A Figura 4.14 comprova que as maiores concentrações de magnésio, como os demais íons principais, estão geralmente relacionadas à influência de sedimentos de origem marinha, ocorrendo no setor centro-leste do município.

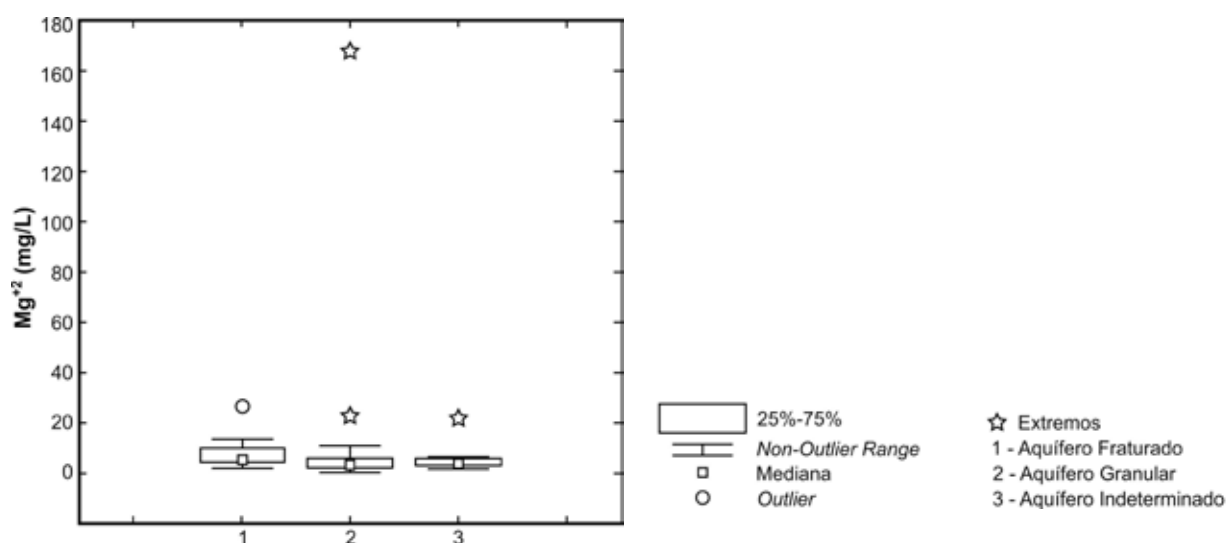


Gráfico 4.16. Boxplot do magnésio (Mg^{+2}) nas amostras de água subterrânea coletadas.

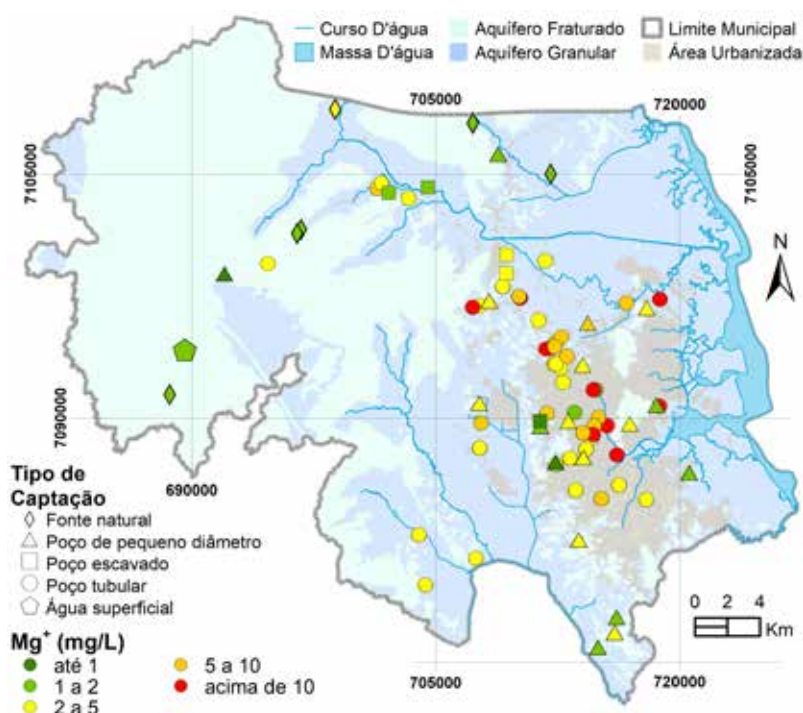


Figura 4.14. Distribuição espacial dos valores de magnésio (Mg^{+2}) nas amostras de água subterrânea coletadas.

4.3.15 Nitratos (NO_3^-)

As concentrações de nitratos (NO_3^-) nas análises realizadas foram medidas em mg/L de N (VMP = 10 mg/L), enquanto que nas análises compiladas em mg/L NO_3^- (VMP = 45 mg/L). Para uma melhor compatibilização e comparação, os resultados das análises realizadas foram recalculados para nitrato expresso em mg/L NO_3^- . Os grupos estudados apresentam resultados bem diversos, sendo que nos poços que captam o aquífero fraturado, as concentrações de nitrato são as menores. Este fato corrobora com o modelo conceitual de que as águas subterrâneas captadas no aquífero fraturado estão em maiores profundidades e isoladas da superfície. Por outro lado, os poços que captam o aquífero granular apresentam maiores concentrações médias e muitos valores classificados como *outliers* (Gráfico 4.17). Seu comportamento é muito semelhante ao terceiro grupo, dos poços onde não se conhece o aquífero captado. É importante ressaltar que mesmo os *outliers* e valores extremos representam cerca de um terço dos valores máximos permitidos (VMP), que é de 45 mg/L de NO_3^- . Há uma tendência de os maiores valores de nitrato ocorrerem na área central do município mais densamente ocupada (Figura 4.15).

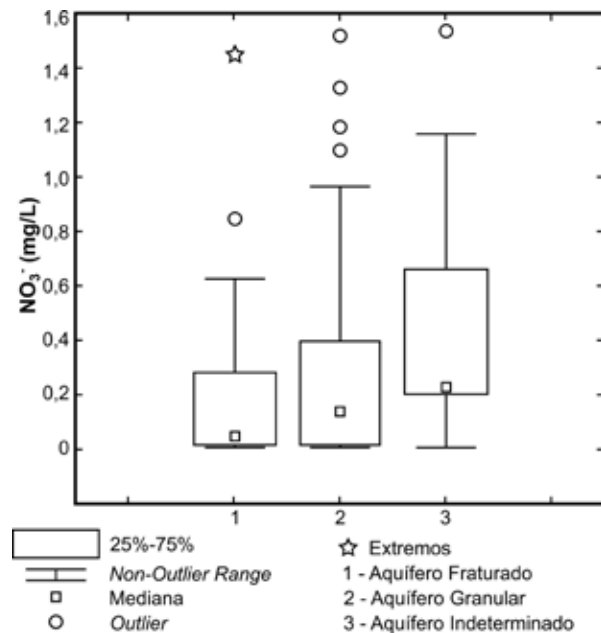


Gráfico 4.17. Boxplot de nitratos (NO_3^-) nas amostras de água subterrânea coletadas.

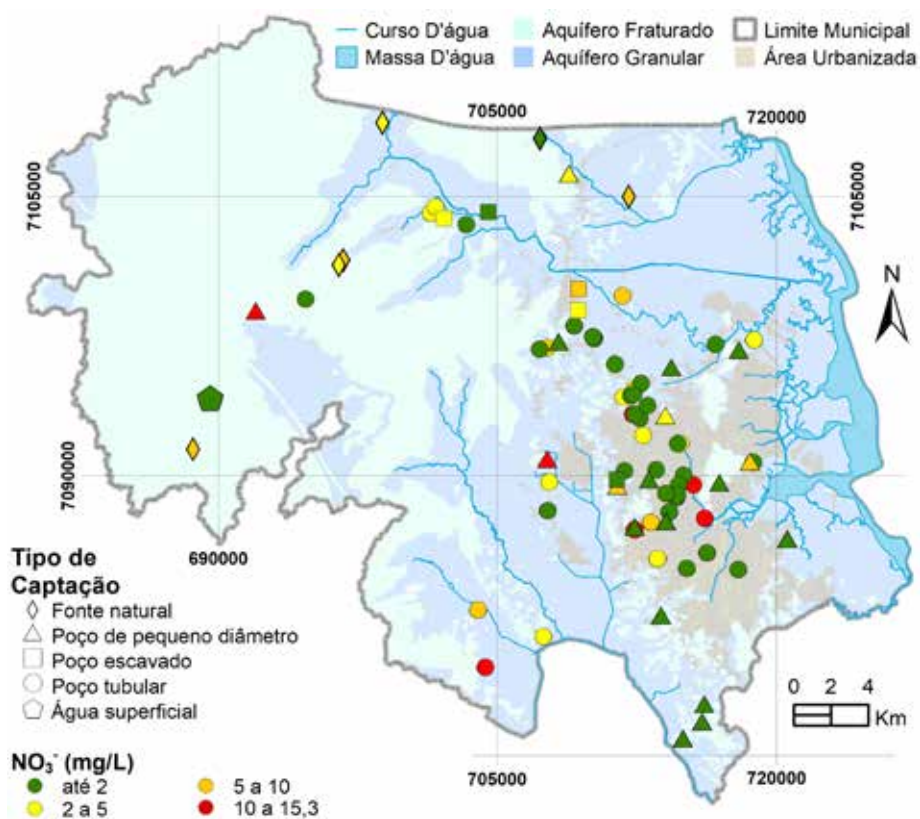


Figura 4.15. Concentrações de nitratos (NO_3^-) nas amostras de água subterrânea coletadas, expressas em mg/L de NO_3^- .

4.3.16 Nitritos (NO_2^-)

O nitrito (NO_2^-) apresenta a grande maioria das concentrações medidas abaixo do limite de detecção (LD) que é 0,03 mg/L; somente dois poços registram valores superiores ao LD, ou seja, 3,32 e 0,44 mg/L. A Figura 4.16 ilustra o comportamento espacial do nitrito nas águas subterrâneas amostradas em Joinville. Nota-se que apenas dois poços alcançaram valores acima do limite de detecção.



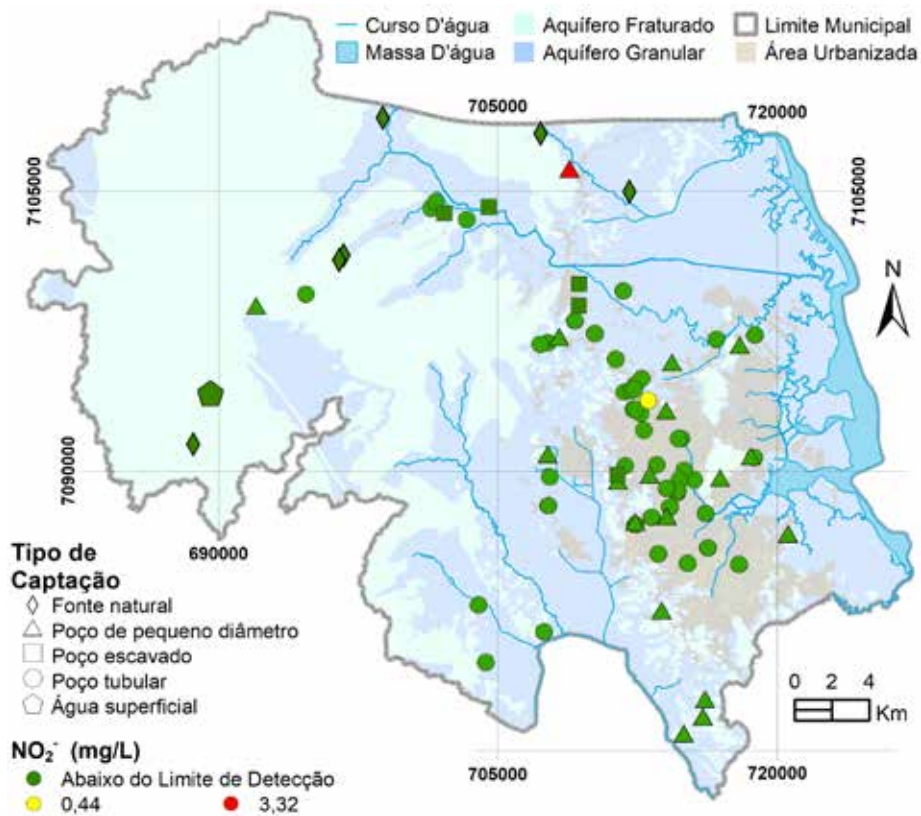


Figura 4.16. Distribuição espacial do nitrito (NO_2^-) nas amostras de água subterrânea coletadas.

4.3.17 Nitrogênio Total (N)

Diversas são as fontes de nitrogênio nas águas naturais. Os esgotos sanitários constituem, em geral, a principal fonte, lançando nas águas nitrogênio orgânico, devido à presença de proteínas, e nitrogênio amoniacal, pela hidrólise da ureia na água. Alguns efluentes industriais também concorrem para as descargas de nitrogênio orgânico e amoniacal nas águas, como certas indústrias químicas, petroquímicas, siderúrgicas, farmacêuticas, conservas alimentícias, matadouros, frigoríficos e curtumes. A atmosfera é outra fonte importante devido a diversos mecanismos como a biofixação desempenhada por bactérias e algas presentes nos corpos hídricos, que incorporam o nitrogênio atmosférico em seus tecidos, contribuindo para a presença de nitrogênio orgânico nas águas. Nas áreas agrícolas, o escoamento das águas pluviais pelos solos fertilizados também pode contribuir para a presença de diversas formas de nitrogênio.

Em Joinville os resultados analíticos indicam que o nitrogênio total varia de 0,28 a 12,68 mg/L com os pontos de captação no aquífero granular e nos poços nos quais o aquífero é indeterminado apresentando as maiores concentrações (Gráfico 4.18).

As concentrações de nitrogênio total espacializadas no município de Joinville (Figura 4.17) indicam que os maiores valores estão associados à área urbanizada central e à área rural localizada ao sudoeste do município. Esse fato se deve, provavelmente, às questões relacionadas a rede de esgoto (fossas sépticas e vazamentos na rede de esgoto sanitário) na área urbanizada e à aplicação de fertilizantes nas áreas rurais.

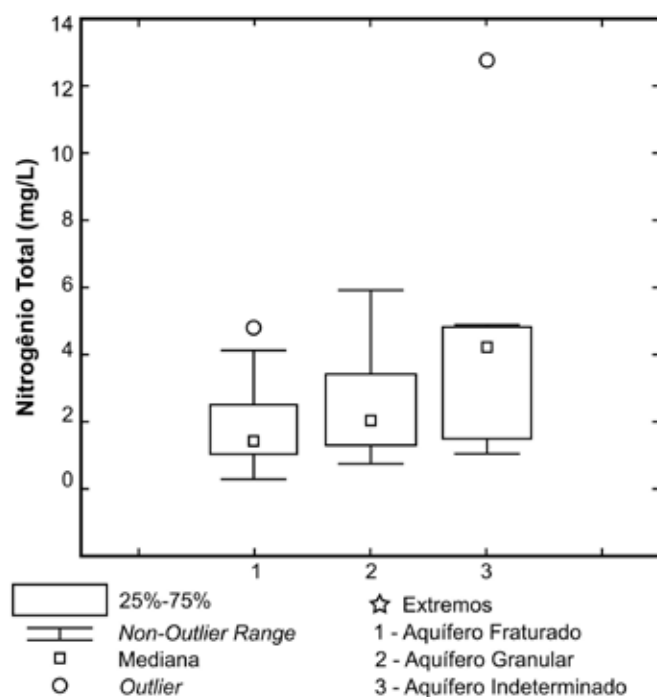


Gráfico 4.18. Boxplot das concentrações de nitrogênio total (N) nas amostras de água subterrânea coletadas.

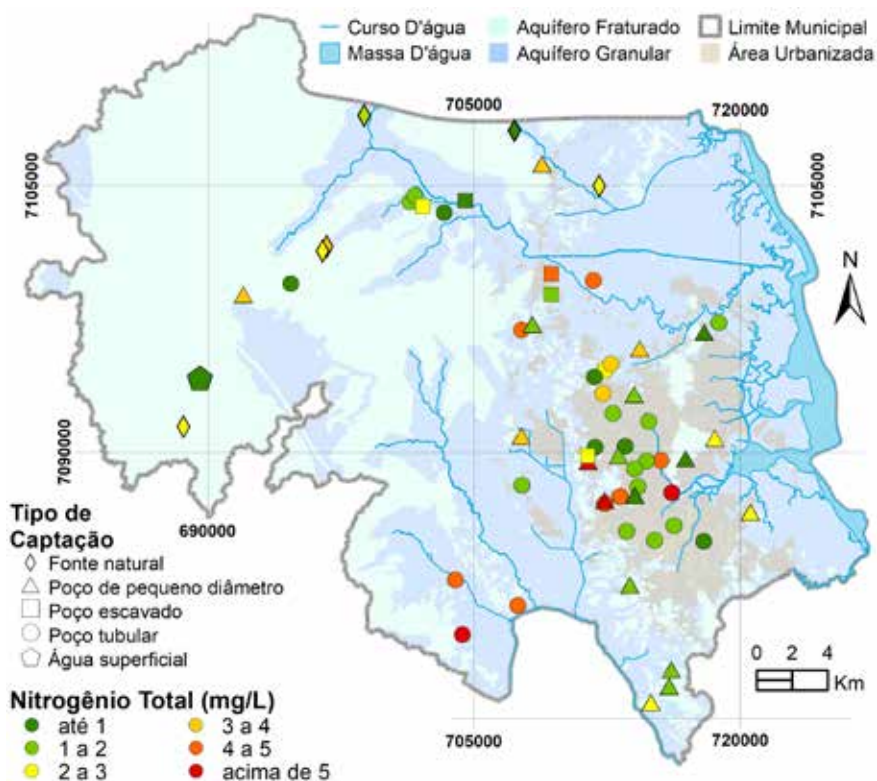


Figura 4.17. Distribuição espacial das concentrações de nitrogênio total (N) nas amostras de água subterrânea coletadas.

4.3.18 Ferro Total (Fe)

As concentrações de ferro total nas águas subterrâneas de Joinville oscilam entre 0 e 12,57 mg/L (Figura 4.18). Nos aquíferos fraturados a mediana é de 0,08 mg/L e os valores mais frequentes estão entre 0,05 e 0,16 mg/L, no entanto ocorrem valores extremos em três poços que superam este patamar (Gráfico 4.19). Nos aquíferos granulares o intervalo dos valores mais frequente está entre 0,05 e 0,48 mg/L e há muito mais registros de valores extremos e *outliers*. No terceiro grupo, dos poços sem aquífero definido, as concentrações de ferro total são as maiores.

O ferro (Fe) nas águas subterrâneas ocorre mais comumente nos estados de oxidação Fe^{+2} e Fe^{+3} . O íon ferroso (Fe^{+2}) é mais solúvel do que o férrico (Fe^{+3}). Os inconvenientes que o ferro traz às águas devem ser atribuídos principalmente ao ferro "ferroso", que, por ser mais solúvel, é mais frequente, sobretudo nas condições de pH encontradas nas águas subterrâneas da área de estudo. O ferro está presente em minerais máficos como a magnetita, biotita, pirita, piroxênios e anfibólios. Em Joinville provavelmente o ferro total é derivado desses minerais máficos relacionados à alteração dos gnaisses granulíticos (Figura 4.19 e Figura 4.20) e formações ferríferas bandadas.

Nas águas subterrâneas, captadas principalmente em solos e terrenos aluvionares, o ferro está sob as formas quimicamente reduzidas (Fe^{+2}), solúveis e invisíveis e quando em contato com o oxigênio, o material sofre oxidação, seja ela através da aeração ou então pela adição de cloro, e os minerais são precipitados, fazendo com que a água adquira uma aparência avermelhada escura (MORUZZI, 2012). Na área de estudo esse fenômeno atua principalmente em regiões onde ocorrem depósitos orgânicos, detritos de plantas, coloides (Figura 4.21 e Figura 4.22) ou húmus, comuns nos sedimentos aluvionares e solos. As captações de água subterrânea nesses materiais inconsolidados estão mais suscetíveis a ocorrência de ferro, como pode ser observado no Gráfico 4.19. Esse fato pode ocorrer também nos poços tubulares que captam, por intermédio de filtros, os aquíferos intergranulares relacionados aos mantos de intemperismo ou sedimentos quaternários.

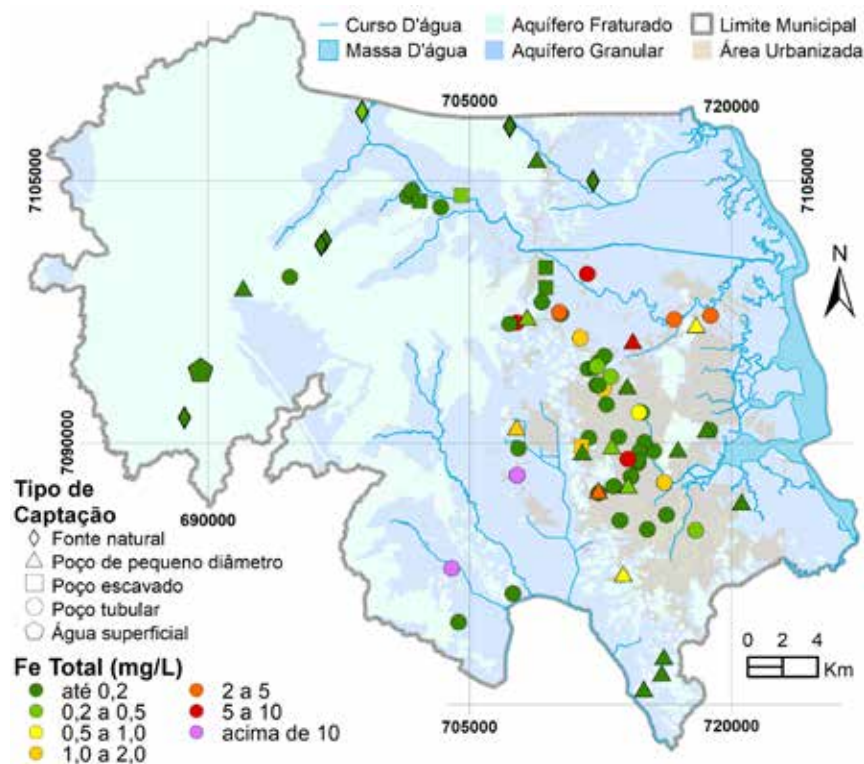


Figura 4.18 Distribuição espacial das concentrações de ferro total (Fe) nas amostras de água subterrânea coletadas.

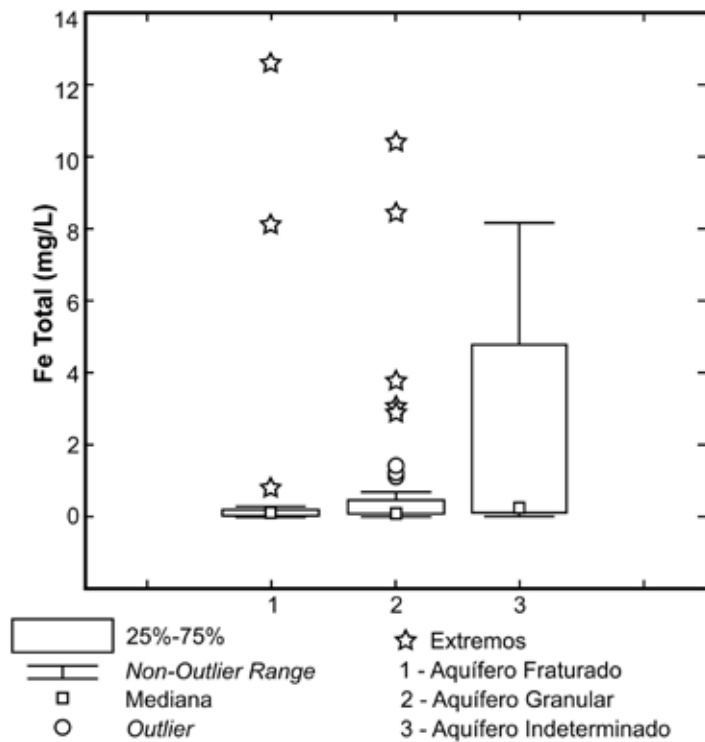


Gráfico 4.19. Boxplot das concentrações de ferro total (Fe) nas amostras de água subterrânea coletadas.



Figura 4.19. Auréola de alteração em gnaiss granulítico liberando o óxido de ferro de minerais máficos (amostra coletada na localidade Rio Bonito (latitude 26° 08' 52" S; longitude 48° 54' 53,6" O).



Figura 4.20. Presença de óxidos de ferro no manto de alteração de rocha gnáissica em corte de estrada na Serra da Dona Francisca (latitude 26° 12' 47,5" S; longitude 49° 03' 07" O).



Figura 4.21. Ferro sob a forma coloidal em águas freáticas no solo localizado junto a SC-418 (latitude 26° 12' 17,2" S; longitude 49° 07' 50" O).



Figura 4.22. Ferro coloidal impregnando ao revestimento do poço JAP051 da antiga Cervejaria Antártica.

4.3.19 Manganês Total (Mn)

O comportamento do manganês (Mn) nas águas é muito semelhante ao do ferro em seus aspectos mais diversos, sendo que a sua ocorrência é mais rara. O manganês desenvolve coloração negra na água, podendo-se apresentar nos estados de oxidação Mn^{+2} (forma mais solúvel) e Mn^{+4} (forma menos solúvel). A concentração de manganês menor que 0,05 mg/L geralmente é aceitável em mananciais, devido ao fato de não ocorrerem, nesta faixa de concentração, manifestações de manchas negras ou depósitos de seu óxido nos sistemas de abastecimento de água.

O manganês também tem origem associada aos minerais ferro magnesianos presentes nas rochas gnáissicas e em fraturas e falhas onde ocorrem mineralização de manganês da área de estudo, como no Morro do Timbé (Figura 4.23).

Nas águas subterrâneas associadas ao aquífero fraturado o manganês varia de 0,28 a 0,58 mg/L, com a maioria dos valores ocorrendo entre 0,015 e 0,12 mg/L. No aquífero granular os valores de Mn são menores, apesar de vários pontos atingirem valores extremos. Os poços que apresentam as maiores concentrações são os do terceiro grupo (Gráfico 4.20).

Observando a distribuição espacial das concentrações de manganês total (Figura 4.24) nota-se que os maiores valores ocorrem na porção leste do município.



Figura 4.23. Ocorrência de mineralização de óxido de manganês (pirolusita) na pedra no Morro do Timbé (latitude 26° 13' 03,2"S; longitude: 48° 49' 26,9" O).

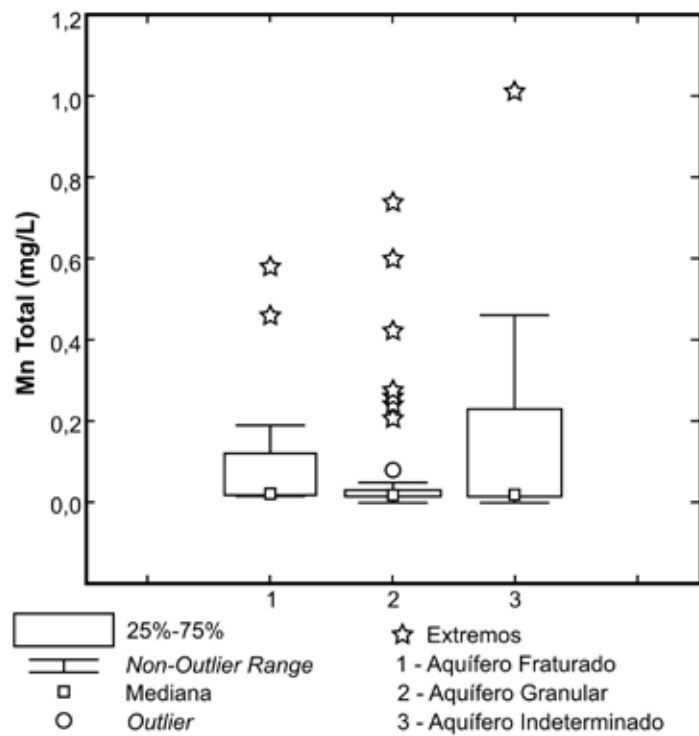


Gráfico 4.20. Boxplot do manganês total (Mn) nas amostras de água subterrânea coletadas.

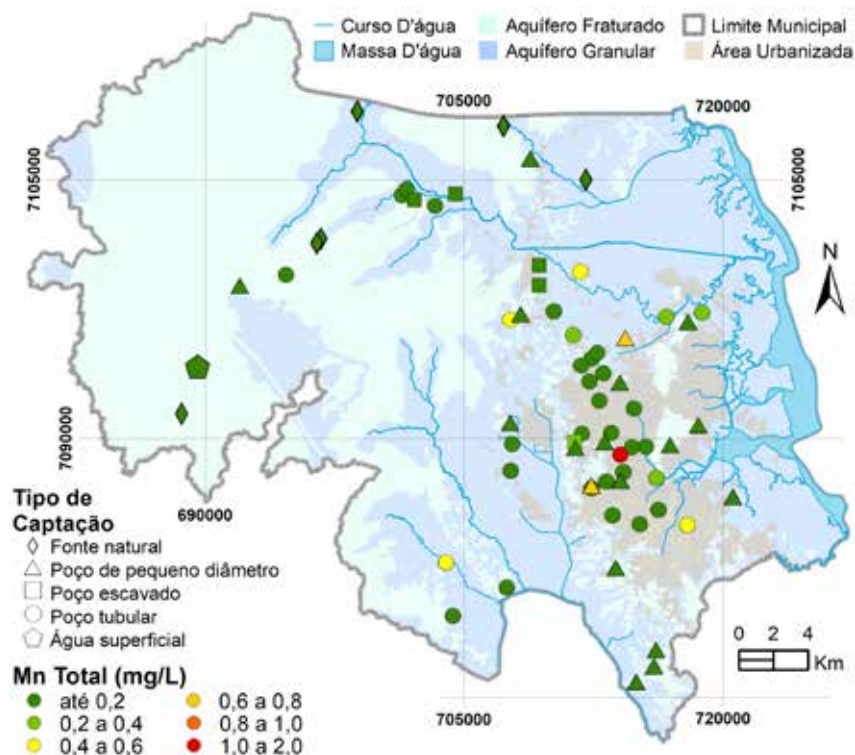


Figura 4.24. Distribuição espacial das concentrações do manganês total (Mn) nas amostras de água subterrânea coletadas.

4.3.20 Fluoretos (F⁻)

A concentração do íon fluoreto (F⁻) em Joinville varia entre 0 e 1,40 mg/L, com as maiores concentrações associadas aos aquíferos fraturados, conforme pode ser observado no Gráfico 4.21. O fluoreto tem sua origem nas fluoritas e flúor apatita, minerais de ocorrência rara nos gnaisses granulíticos. Na área de estudo, os Granitos Pirai apresentam o registro do mineral fluorita associada a veios hidrotermais, no entanto não há poços sobre essa unidade. Valores acima de 0,5 mg/L são comuns na porção leste do município, principalmente associados a poços tubulares que captam os aquíferos fraturados e alguns poços de pequeno diâmetro (Figura 4.25).

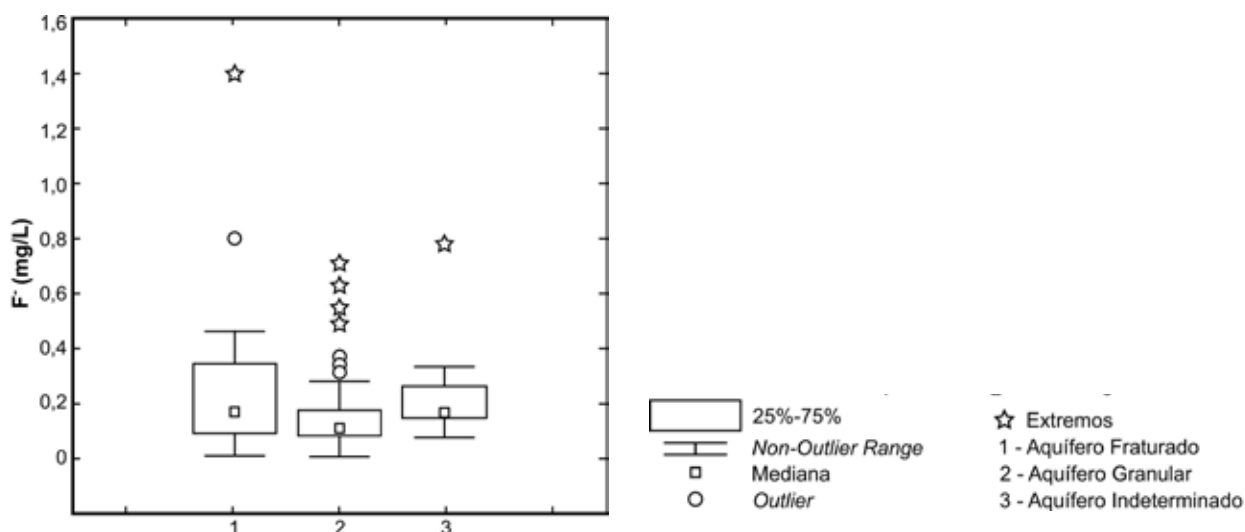


Gráfico 4.21. Boxplot das concentrações de fluoretos (F⁻) nas amostras de água subterrânea coletadas.

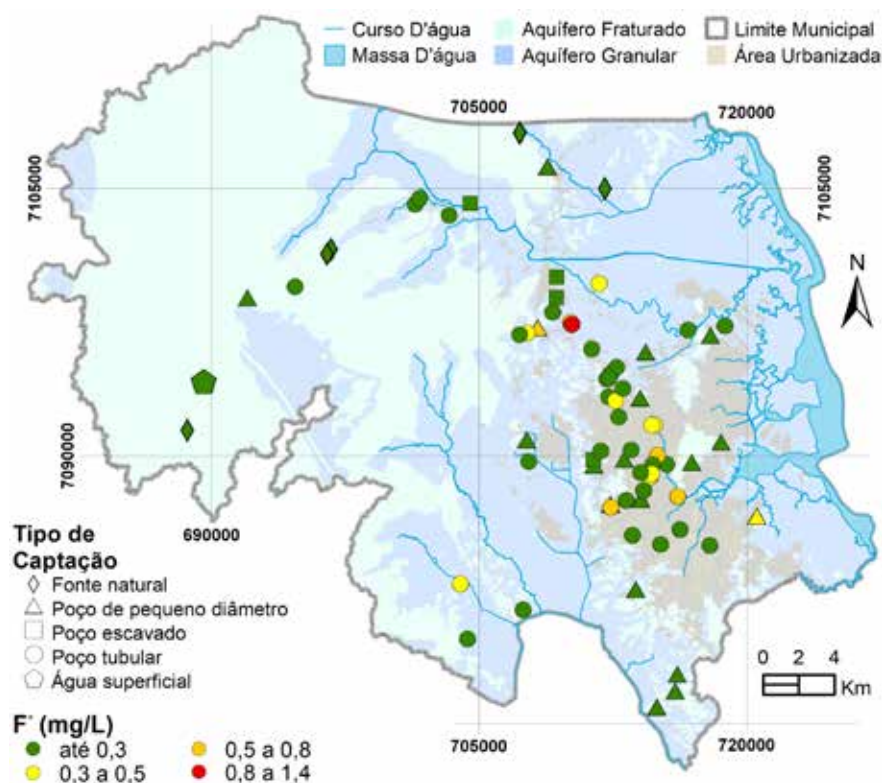


Figura 4.25. Distribuição dos valores de fluoretos (F^-) nas amostras de água subterrânea coletadas.

4.3.21 Fosfatos (PO_4^{-3})

O fósforo aparece em águas naturais devido, principalmente, às descargas de esgotos sanitários e o fosfato total representa a forma oxidada desse elemento. A principal fonte de fósforo é a matéria orgânica fecal e os detergentes em pó empregados em larga escala nas residências. Alguns efluentes industriais, como os de indústrias de fertilizantes, pesticidas, químicas em geral, conservas alimentícias, abatedouros, frigoríficos e laticínios, apresentam fósforo em quantidades excessivas. As áreas agrícolas também podem propiciar a presença excessiva de fósforo nas águas. O fósforo está representado nas águas sob a forma de fosfatos orgânicos, onde o fósforo compõe moléculas orgânicas, como a de um detergente, por exemplo. A Figura 4.26, que ilustra a distribuição das concentrações de fosfato (PO_4^{-3}), indica que nas áreas urbanizadas destacam-se os valores mais elevados.

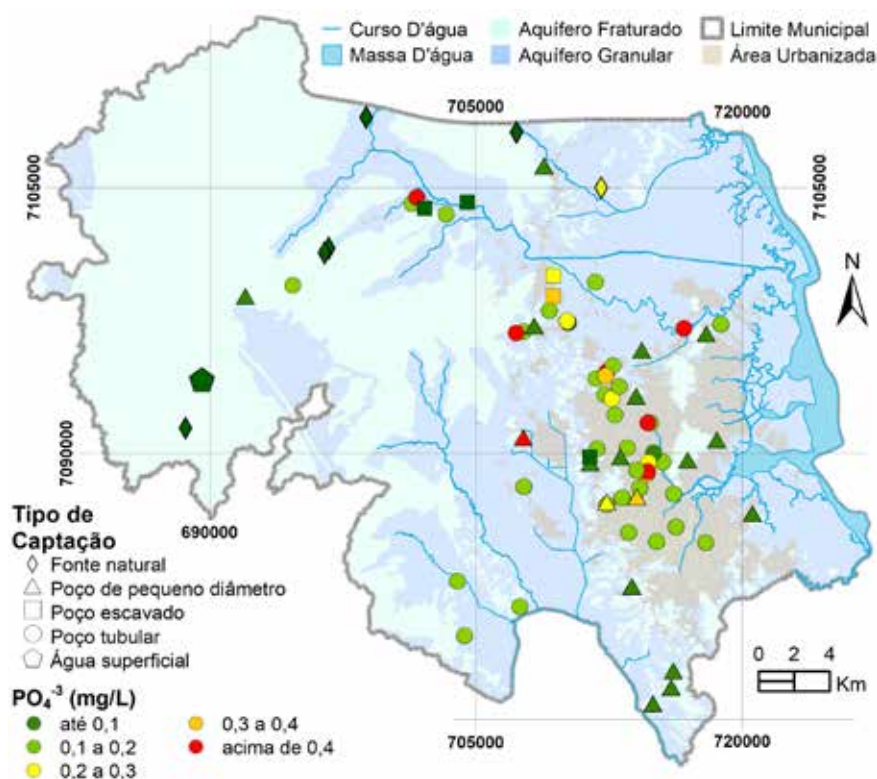


Figura 4.26. Distribuição espacial do fosfato (PO_4^{-3}) nas amostras de água subterrânea coletadas.

4.3.22 Alumínio Total (Al)

Embora o alumínio (Al) represente o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre, raramente ocorre em grandes concentrações nas águas subterrâneas (HEM, 1985). A exceção dá-se em águas com pHs muito baixos. Segundo o mesmo autor, como o alumínio é muito abundante e largamente distribuído nos solos e rochas, a maioria das águas naturais tem oportunidade de dissolvê-lo.

Em 55% das análises realizadas as concentrações de alumínio total resultaram em valores abaixo do limite de detecção. Nos demais casos, o alumínio variou de 0,05 a 0,97 mg/L com os maiores valores predominantemente associados a captações no aquífero granular por fontes, poços escavados e poços de pequeno diâmetro, conforme pode ser observado na Figura 4.27.

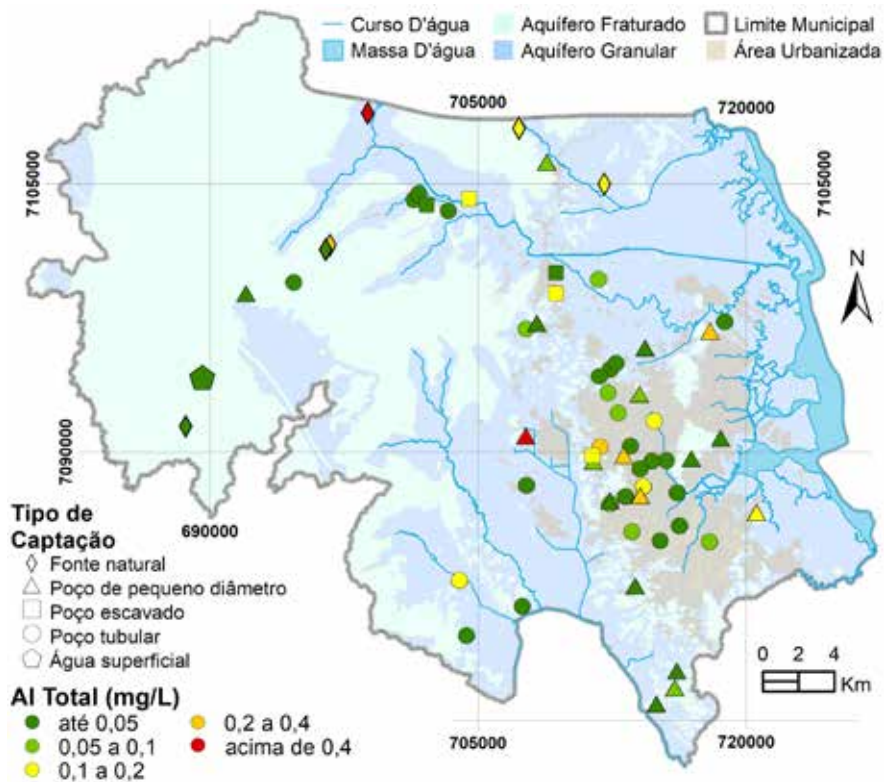


Figura 4.27. Distribuição espacial das concentrações de alumínio total (Al) nas amostras de água subterrânea coletadas.

4.3.23 Arsênio Total (As)

Em todas as análises realizadas os valores de arsênio total (As) ficaram abaixo do limite de detecção do laboratório.

4.3.24 Bário Total (Ba)

Em 90% das análises realizadas os valores de bário total (Ba) ficaram abaixo do limite de detecção do laboratório. No restante dos casos, as concentrações variaram de 0,22 a 0,43 mg/L, classificadas como dentro do limite de potabilidade de acordo com o Anexo XX da Portaria de Consolidação nº 5/2017. A Figura 4.28 indica que os pontos onde foram registrados valores de bário total estão localizados nas áreas planas do município cobertas por sedimentos inconsolidados.

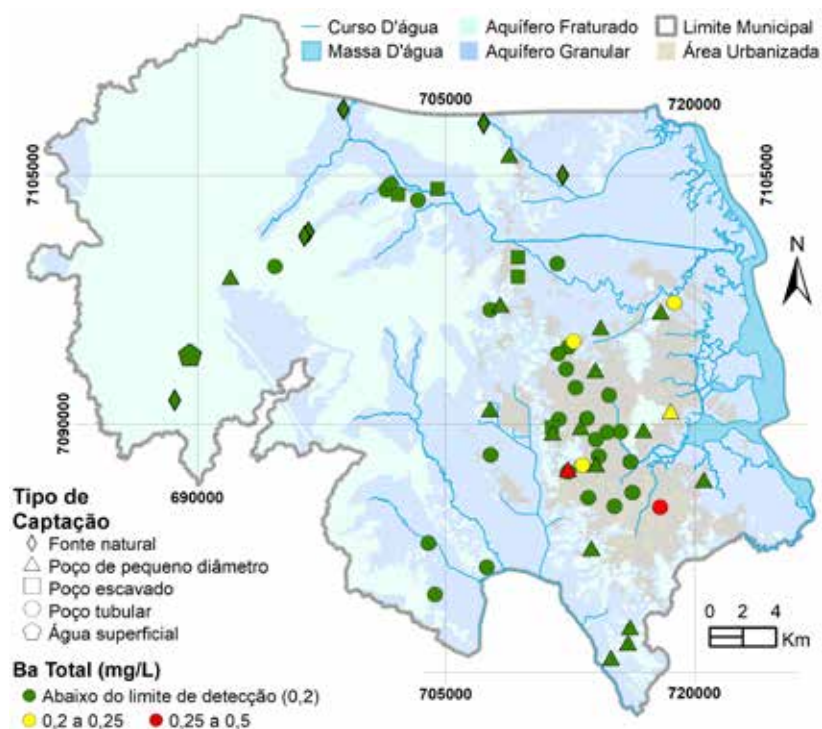


Figura 4.28. Distribuição espacial das concentrações de bário total (Ba) nas amostras de água subterrânea coletadas.

4.3.25 Boro Total (B)

Somente dois poços apresentaram boro (B), com os restantes dos poços analisados ficando abaixo do limite de detecção. São eles o poço JIP020 e JGB013 com 0,45 e 0,15 mg/L de boro total (B), respectivamente (Figura 4.29).

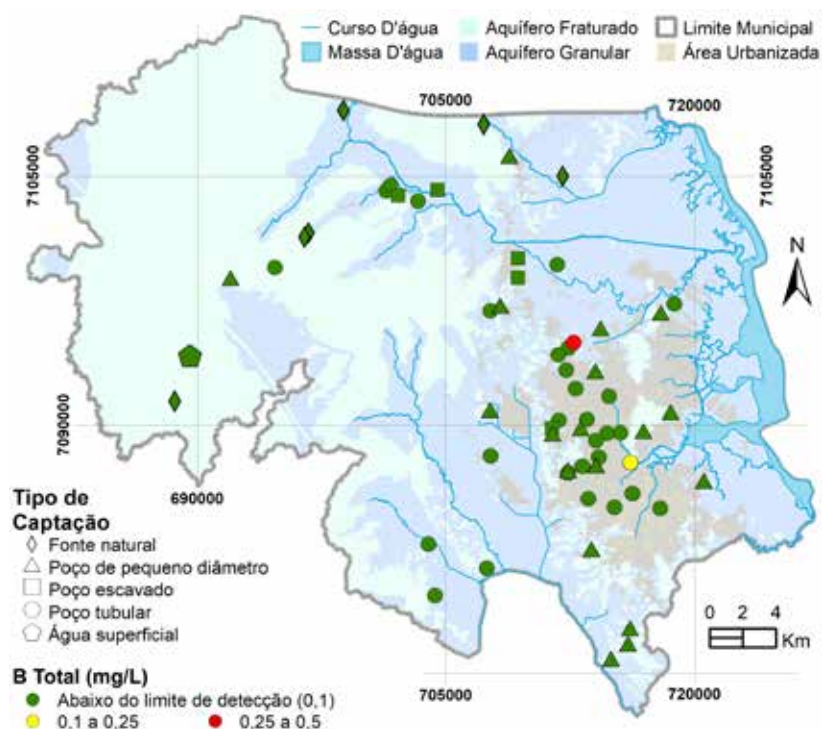


Figura 4.29. Distribuição espacial das concentrações de boro total (B) nas amostras de água subterrânea coletadas.

4.3.26 Brometos (Br)

Do total de ensaios realizados nas águas subterrâneas, somente cinco poços apresentaram valores de brometos (Br) acima do limite de detecção pelo laboratório. Nestes, as concentrações variam de 0,11 a 0,45 mg/L de brometo. A Figura 4.30 ilustra onde ocorre o registro de brometo nas águas subterrâneas.

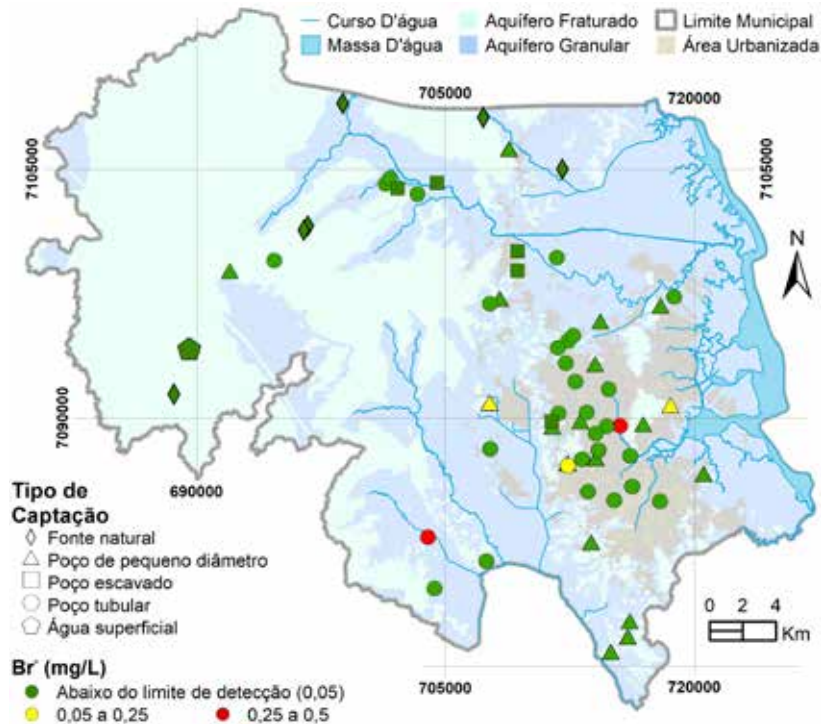


Figura 4.30. Distribuição espacial das concentrações de brometos (Br) nas amostras de água subterrânea coletadas.

4.3.27 Cádmi Total (Cd)

Em todas as análises as concentrações de cádmio total (Cd) exibiram valores abaixo do limite de detecção do laboratório.

4.3.28 Chumbo Total (Pb)

Dos valores encontrados de chumbo total (Pb) somente cinco pontos amostrados apresentaram valores acima do limite de detecção do laboratório. Esses resultados mostram valores de 0,01 a 0,08 mg/L de Pb total, sendo todos relacionados a poços tubulares. A Figura 4.31 ilustra a distribuição espacial dos valores de chumbo total nas águas subterrâneas amostradas.

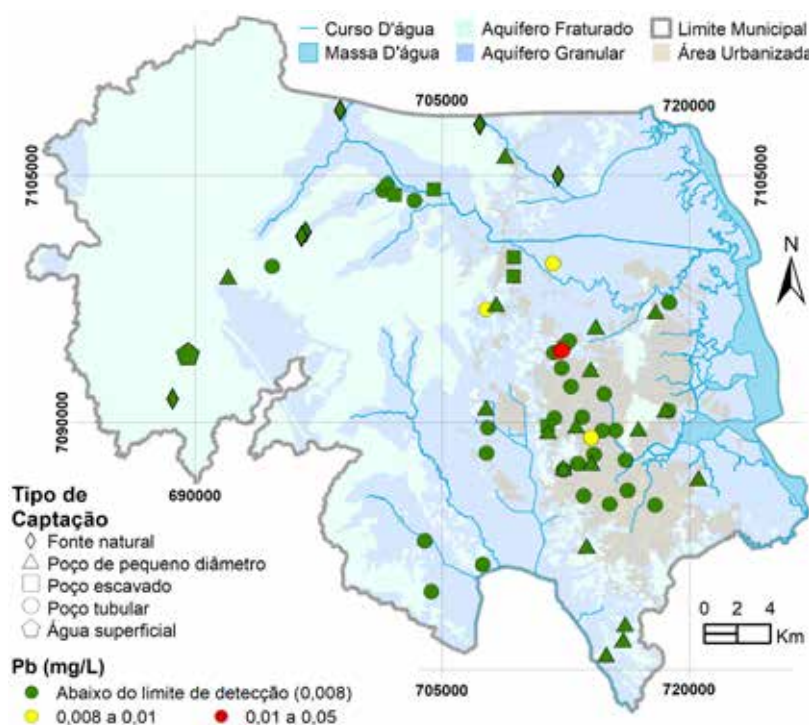


Figura 4.31. Distribuição espacial das concentrações de chumbo total (Pb) nas amostras de água subterrânea coletadas.

4.3.29 Cobalto Total (Co)

Em todas as análises, as concentrações de cobalto (Co) exibiram valores abaixo do limite de detecção do laboratório.

4.3.30 Cobre Total (Cu)

Do total de análises realizadas somente seis pontos registraram valores de cobre acima do limite de detecção laboratorial. Estes registros variam de 0,01 a 0,04 mg/L (Figura 4.32).

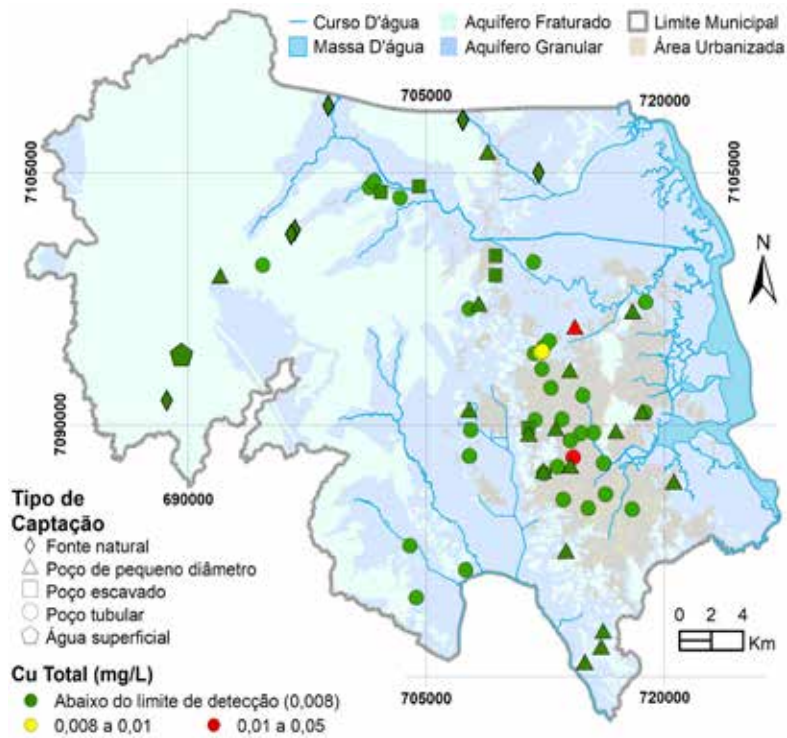


Figura 4.32. Distribuição espacial das concentrações de cobre total (Cu) nas amostras de água subterrânea coletadas.

4.3.31 Cromo Total (Cr)

Somente dois poços apresentaram resultados acima do limite de detecção para cromo, os poços JM033 e JAP057, com concentrações de 0,01 e 0,02 mg/L, respectivamente. A Figura 4.33 exibe os resultados para o cromo nas águas subterrâneas da área de estudo.

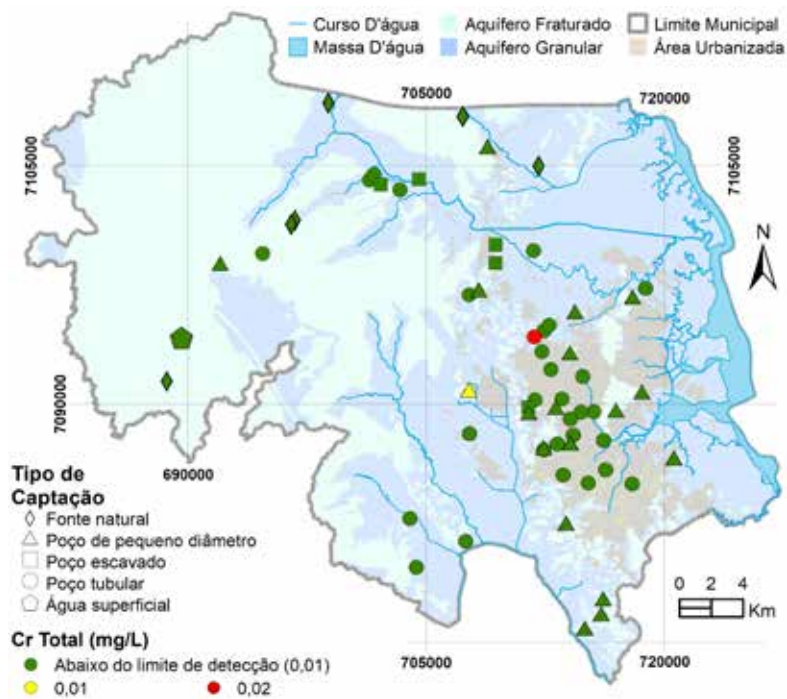


Figura 4.33. Distribuição espacial das concentrações de cromo total (Cr) nas amostras de água subterrânea coletadas.

4.3.32 Estrôncio Total (Sr)

Do total das análises realizadas, 67% exibiram valores para estrôncio (Sr) acima do limite de detecção do laboratório. As concentrações de estrôncio variam de 0,05 a 4,7 mg/L com mediana de 0,09 mg/L. Os maiores valores de Sr estão localizados no setor centro-leste onde ocorrem sedimentos quaternários, conforme pode ser observado na Figura 4.34.

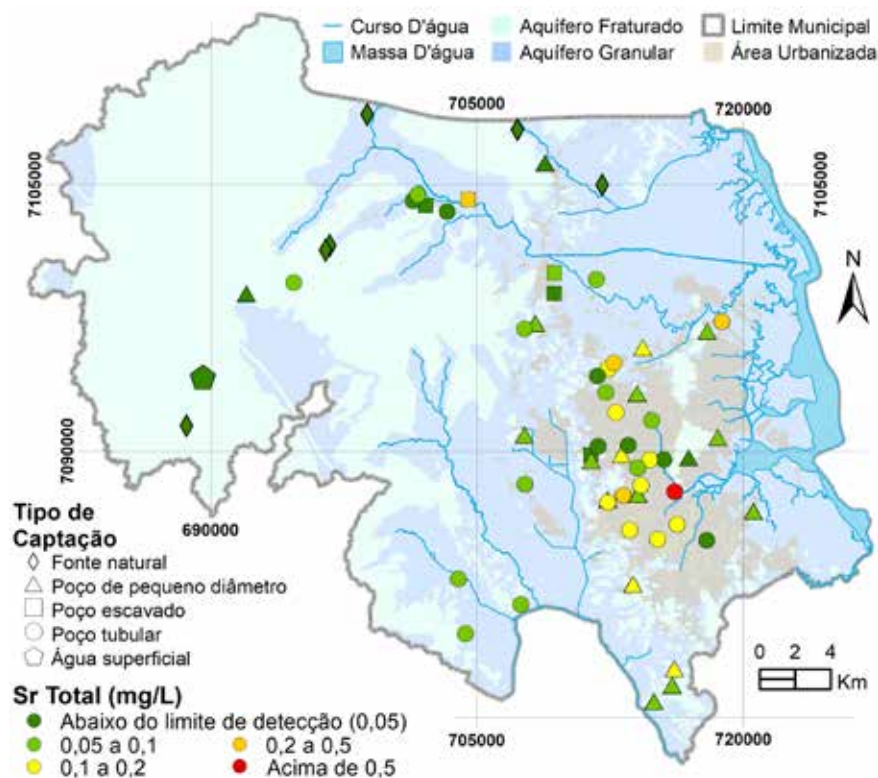


Figura 4.34. Distribuição espacial das concentrações de estrôncio total (Sr) nas amostras de água subterrânea coletadas.

4.3.33 Lítio Total (Li)

Nenhum ponto amostrado registrou concentração de lítio (Li) acima do limite de detecção do laboratório.

4.3.34 Molibdênio Total (Mo)

O parâmetro molibdênio (Mo) não foi detectado em nenhum ponto amostrado com os resultados ficando abaixo do limite de detecção do laboratório.

4.3.35 Mercúrio Total (Hg)

Nenhum dos pontos amostrados registrou concentração de mercúrio (Hg) acima do limite de detecção do laboratório.

4.3.36 Níquel Total (Ni)

Somente onze pontos registraram valores de níquel (Ni) acima do limite de detecção do laboratório nos quais a variação ocorre entre 0,02 e 0,78 mg/L. A Figura 4.35 exibe a distribuição espacial do níquel total nas águas subterrâneas amostradas.

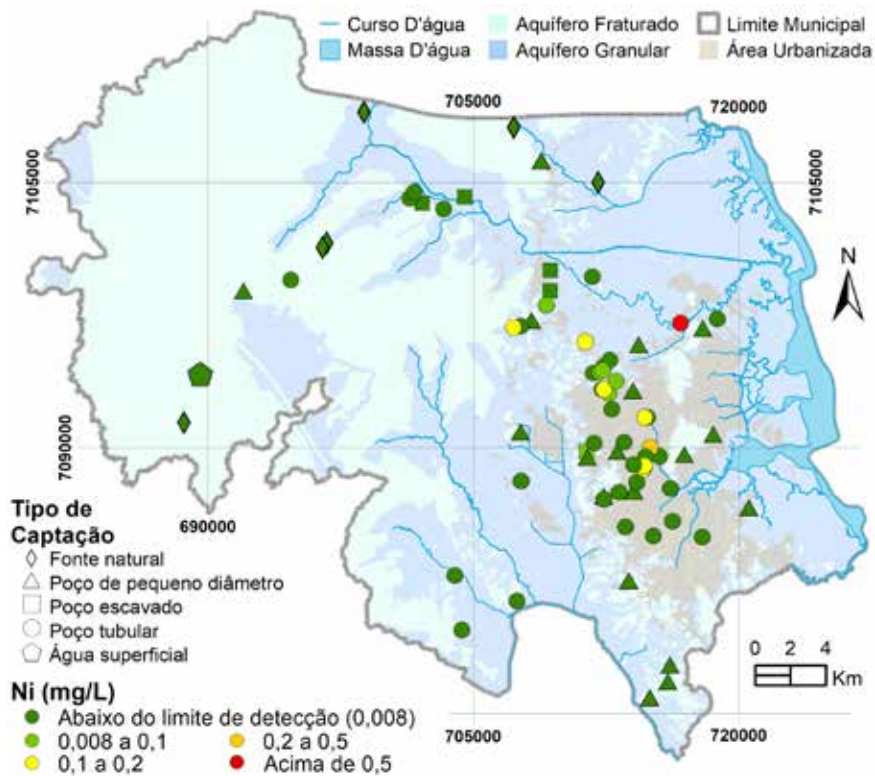


Figura 4.35. Distribuição espacial das concentrações de níquel (Ni) nas amostras de água subterrânea coletadas.

4.3.37 Selênio Total (Se)

Nenhum dos pontos amostrados registrou concentração de selênio (Se) acima do limite de detecção do laboratório.

4.3.38 Vanádio Total (V)

Todas as captações amostradas registraram valores de vanádio (V) abaixo do limite de detecção laboratorial.

4.3.39 Zinco Total (Zn)

Os resultados para as análises de zinco (Zn) nas águas subterrâneas mostram que somente sete pontos amostrados contêm valores acima do limite de detecção (0,06 mg/L). Esses valores variam de 0,09 a 0,65 mg/L, todos muito abaixo dos valores máximos permitidos para potabilidade (5mg/L).

A Figura 4.36 exibe as concentrações de zinco total para as águas subterrâneas amostradas em Joinville e indica que os maiores valores encontrados ocorrem preferencialmente na área urbanizada.

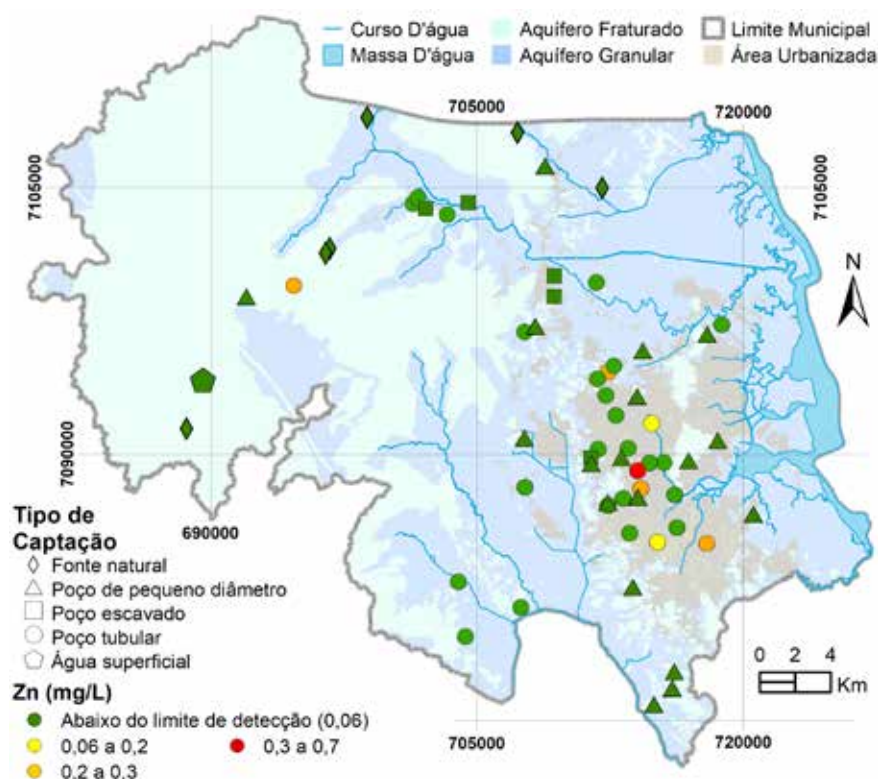


Figura 4.36. Distribuição espacial das concentrações de zinco (Zn) nas amostras de água subterrânea coletadas.

4.3.40 Prata Total (Ag)

Nenhum dos pontos amostrados registrou concentração de prata (Ag) acima do limite de detecção do laboratório.

4.3.41 Fenóis Totais

Os fenóis totais foram amostrados e analisados em todos os sessenta pontos coletados; no entanto, não houve nenhum registro acima de 0,003 mg/L, que é o limite de detecção do método laboratorial.

4.3.42 BTEX

À exemplo dos fenóis totais, em nenhum ponto amostrado foram detectados elementos do grupo BTEX (ou BTXE), que se referem a benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno.

4.3.43 HPA

Em nenhum dos sessenta pontos amostrados foram registrados hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA).

4.3.44 TPH

Os hidrocarbonetos totais de petróleo (TPH), termo usado para descrever uma grande família de várias centenas de compostos químicos que originalmente vêm do petróleo bruto, também não foram registrados nas águas subterrâneas amostradas em Joinville. Todos os pontos ficaram abaixo do limite de quantificação do laboratório.

4.3.45 Agrotóxicos

Em todos os pontos amostrados, independentemente de ocorrerem em áreas de produção agrícola, foram analisados os denominados agrotóxicos, compostos por: Alaclor, Aldrin + Dieldrin, Atrazina, Clordano Gama, Clorpirifós + Clorpirifós-oxon, DDT + DDD + DDE, Endosulfan (α , β e sais), Endrin, Lindano (gama HCH), Metamidofós, Metolacloro, Molinato, Pendimentalina, Permetrina, Profenofós, Simazina, Tebuconazol, Terbufós, Trifluralina, Aldicarbe + Aldicarbe Sulfona + Aldicarbe Sulfóxido, Carbendazim + Benomil, Carborfuran, Diuron, Glifosato + AMPA, Mancozebe e Parationa Metílica.

Os resultados obtidos demonstram que em nenhum ponto de captação foi registrado algum desses compostos, mesmo nos poços e fontes localizados na área rural e agrícola.

4.4 Tipos hidroquímicos

4.4.1 Métodos Gráficos

Os dados das análises químicas podem ser interpretados com base nas análises individuais ou a partir do conjunto de dados. Para uma avaliação espacial de um conjunto de dados em uma área de estudo, são utilizados métodos gráficos elaborados por *softwares* específicos. O manejo de uma grande quantidade de dados fica simplificado pelo uso dos diagramas hidroquímicos que servem, sobretudo para enfatizar as diferenças ou similaridades entre os grupos. Tais grupos são reflexos das características hidroquímicas e processos geoquímicos envolvidos.

Os diagramas aqui utilizados são o trilinear denominado diagrama de Piper (PIPER, 1944) e o individual de Stiff (STIFF, 1951). O diagrama de Piper é utilizado para classificar os distintos grupos de águas subterrâneas a partir da concentração em meq/L dos íons principais dominantes. Nos diagramas de Stiff as concentrações iônicas dos íons principais são representadas sobre linhas paralelas horizontais. Ligando-se todos os pontos respectivos é obtida uma figura geométrica característica para a água analisada (Figura 4.37 e Figura 4.38). Os diagramas de Stiff fazem parte do corpo principal do mapa hidrogeoquímico que acompanha este relatório.

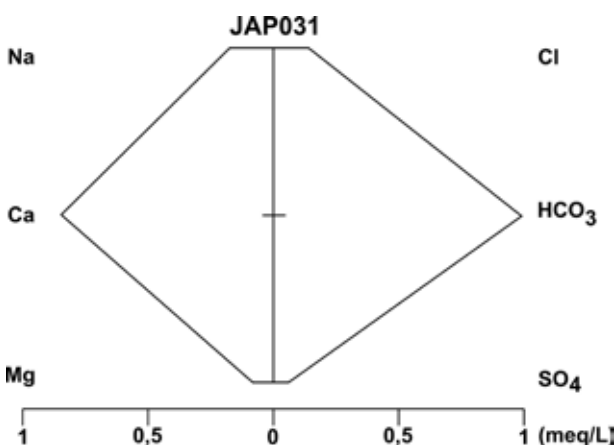


Figura 4.37. Diagrama de Stiff do poço JAP031 exibindo uma típica água bicarbonatada cálcica.

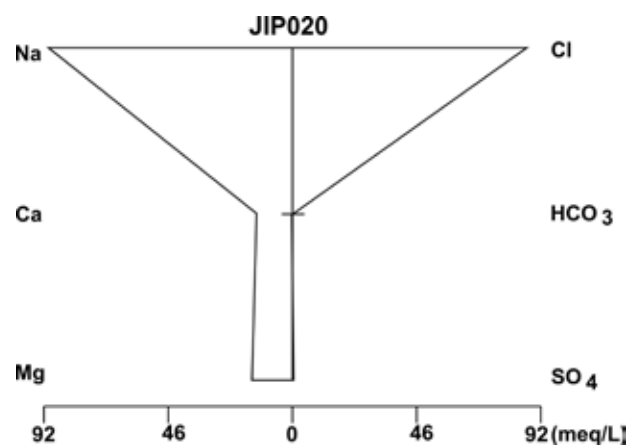


Figura 4.38. Diagrama de Stiff do poço JIP020 exibindo uma água cloretada sódica com alta concentração de sais dissolvidos.

4.4.2 Grupos Hidroquímicos

Os pontos de captação foram inicialmente agrupados de acordo com o tipo de aquífero captado em: fraturado, granular e aquífero indefinido (poços tubulares sem perfis litológico-constructivos). Também foi lançada a única análise de água superficial do rio do Júlio. Plotando-se os pontos no diagrama de Piper (Figura 4.39) observa-se que há uma similaridade entre os grupos, incluindo a análise de água superficial, predominando águas bicarbonatadas mistas, o que explica que essas captações acessam basicamente as mesmas águas de origem pluvial em diferentes níveis aquíferos. Convém ressaltar que a recarga do aquífero fraturado subjacente é realizada através do aquífero granular, principalmente os relacionados aos elúvios e colúvios.

O histograma do Gráfico 4.22 exhibe os principais tipos hidroquímicos das águas subterrâneas amostradas no município de Joinville, onde predominam as águas bicarbonatadas mistas (44 casos), seguidas pelas águas bicarbonatadas cálcicas (13 casos) e sódicas (13 casos), cloretadas sódicas (3 casos), mistas (2 casos), mistas sódicas (1 caso), bicarbonatadas magnesianas (1 caso) e cloretada mista (1 caso). Esses tipos hidroquímicos estão representados espacialmente na Figura 4.40, onde se pode notar que as águas bicarbonatadas mistas correm em praticamente todos os setores do município associadas, principalmente, às áreas relacionadas às rochas gnáissicas e coberturas regolíticas. Algumas nascentes e poços escavados apresentam águas bicarbonatadas cálcicas que estão intimamente relacionadas às águas de origem meteórica de baixo tempo de residência, sobretudo na região da Serra da Dona Francisca e Estrada Bonita. As águas bicarbonatadas sódicas predominam na porção centro-leste na área de ocorrência de sedimentos quaternários e de topografia plana. As águas cloretadas indicam áreas onde há processo de salinização devido à interferência das águas da Baía da Babitonga que adentram a cidade através dos cursos d'água, sobretudo pelo rio Cachoeira. As demais classes, pouco expressivas, revelam águas mistas onde vários processos de misturas estão ocorrendo.

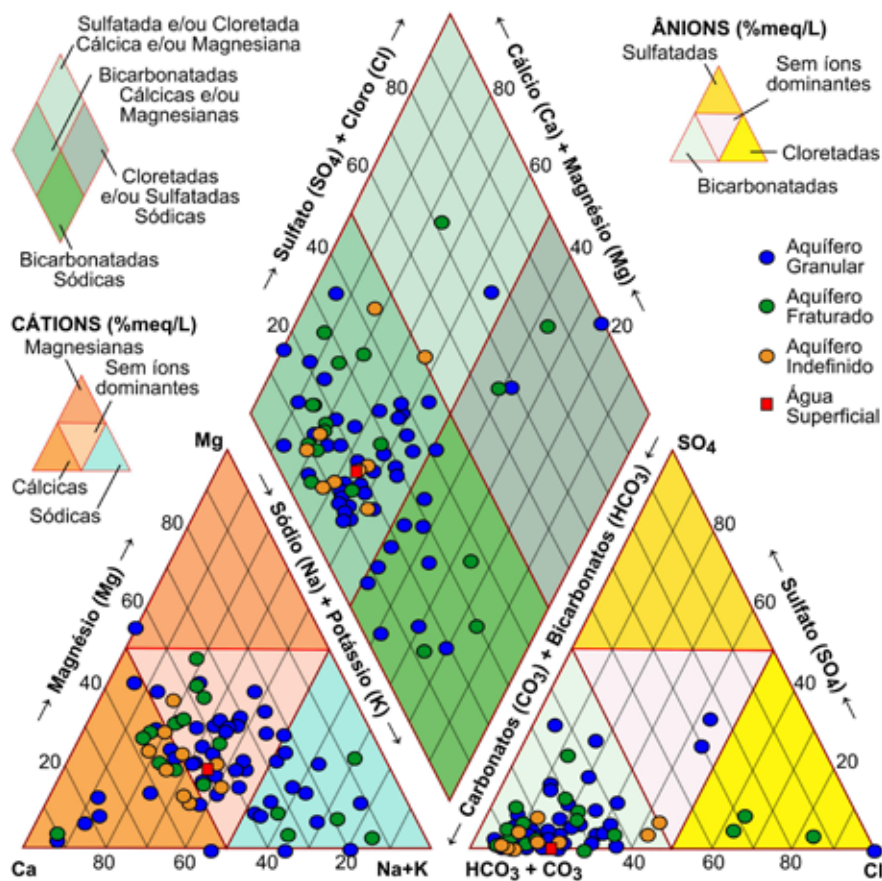


Figura 4.39. Diagrama de Piper para todas as amostras de águas analisadas.

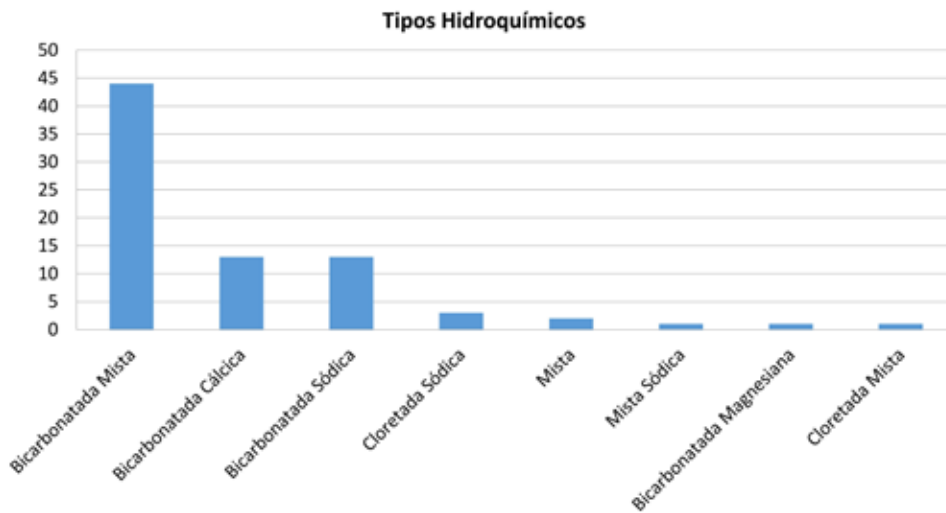


Gráfico 4.22. Histograma dos tipos hidroquímicos das águas subterrâneas em Joinville – SC.

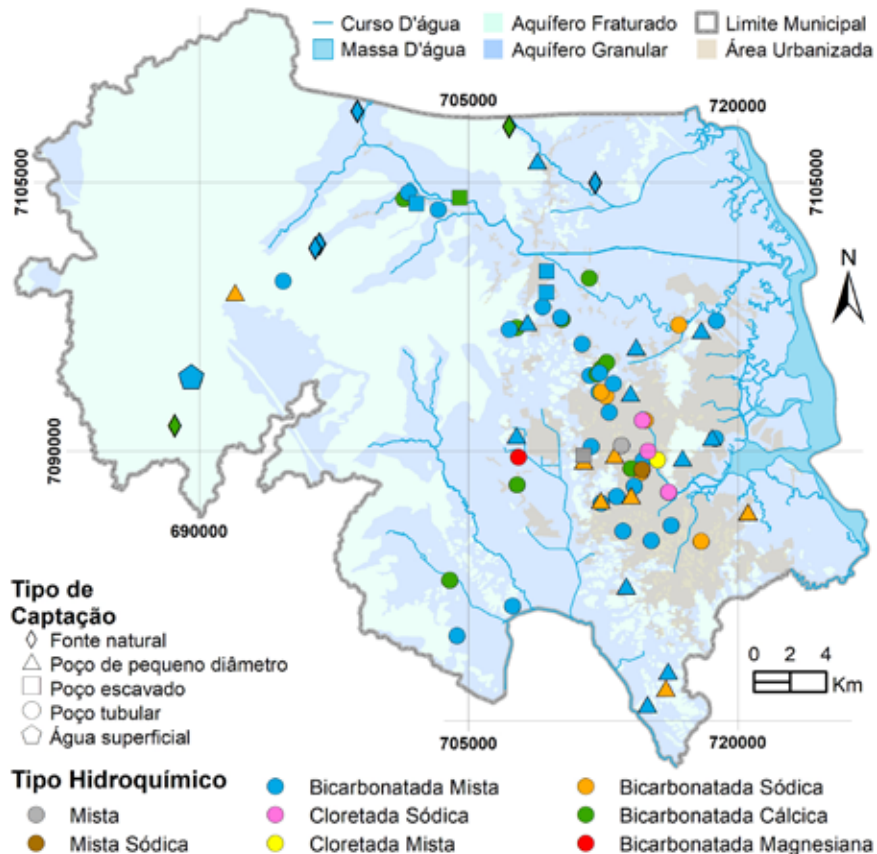


Figura 4.40. Distribuição espacial dos tipos hidroquímicos das águas nas amostras de água subterrânea coletadas.

A análise gráfica realizada separadamente, segundo cada classe, revela as gradações entre os diversos grupos que indicam os vários processos hidroquímicos envolvidos e suas fácies. O diagrama de Piper (Figura 4.41), confeccionado para os poços que captam o aquífero fraturado, exibe águas, quanto aos ânions, predominantemente bicarbonatadas, seguidas de três águas cloretadas. Em relação aos

cátions, as águas mais frequentes não têm cátions dominantes, também denominadas mistas, seguidas por águas cálcicas e sódicas. Observando o conjunto de íons principais, as águas do aquífero fraturado são em ordem de ocorrência do tipo bicarbonatadas cálcicas ($\text{HCO}_3 - \text{Ca}$) e/ou magnesianas $\text{HCO}_3 - \text{Mg}$, seguidas pelas bicarbonatadas sódicas ($\text{HCO}_3 - \text{Na}$) e cloretadas sódicas (Cl-Na). As águas bicarbonatadas cálcicas e cálcicas magnesianas são águas de origem meteórica com pouco tempo de residência que passaram pelo manto de alteração e recarregaram as fraturas. As águas bicarbonatadas sódicas configuram águas com um maior tempo de residência que as primeiras, pois o cátion sódio predomina. Por outro lado, as águas cloretadas sódicas representam águas cuja influência de sedimentos de origem marinha e de marés é verificada.

Nos poços que captam os aquíferos granulares (Figura 4.42) predominam as fácies das águas bicarbonatadas mistas, seguidas pelas bicarbonatadas cálcicas e bicarbonatadas sódicas. Ainda ocorrem a classe cloretada sódica e a classe mista. Estas duas últimas refletem poços salinizados por captarem águas com influência das marés e dos sedimentos de origem marinha.

Na terceira classe (Figura 4.43), dos poços de aquífero indefinido, as águas predominantes são bicarbonatadas cálcicas e mistas, relacionadas às águas com baixo tempo de residência e que foram recarregadas exclusivamente por precipitação pluviométrica. Essa classe tem comportamento muito semelhante à classe que capta o aquífero granular, indicando que em muitos desses poços deve haver captação no aquífero relacionado ao manto de alteração das rochas cristalinas.

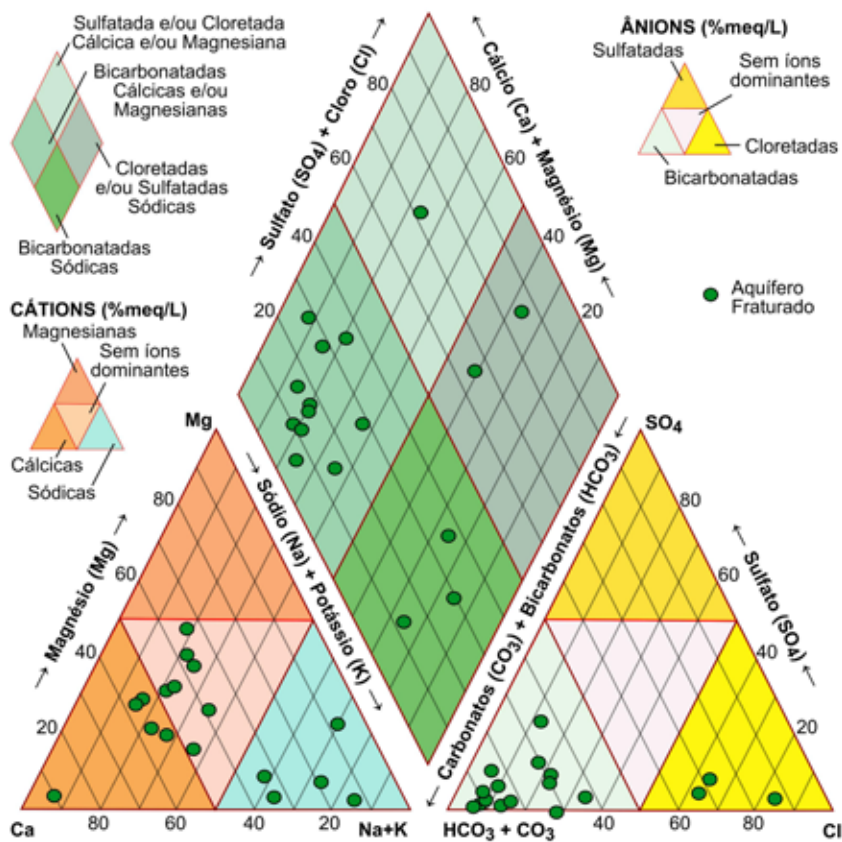


Figura 4.41. Diagrama de Piper para os poços que captam exclusivamente o aquífero fraturado.

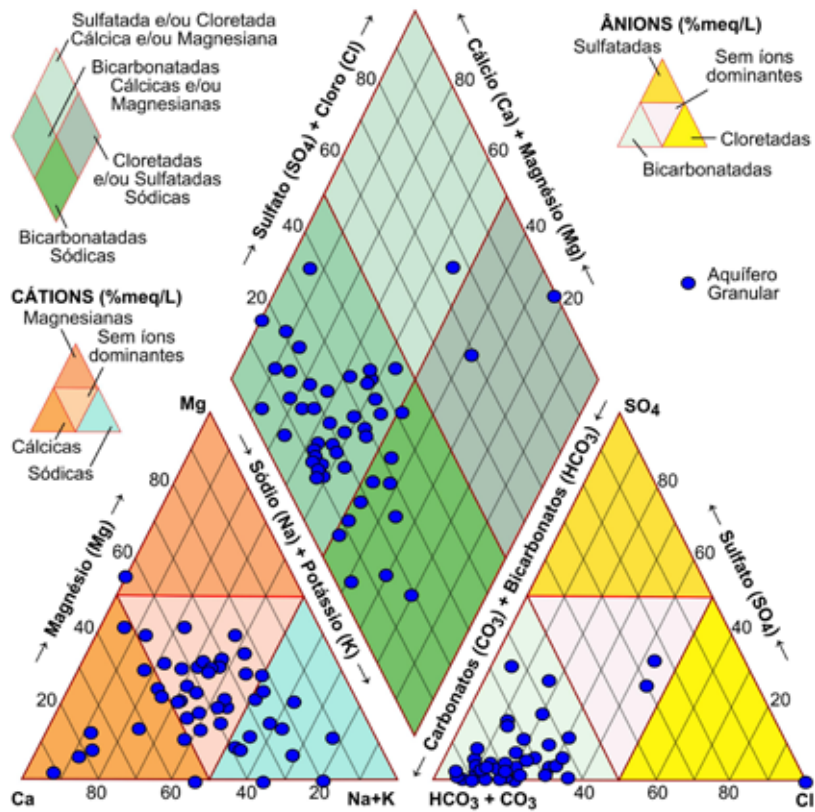


Figura 4.42. Diagrama de Piper para os pontos de captação que captam o aquífero granular.

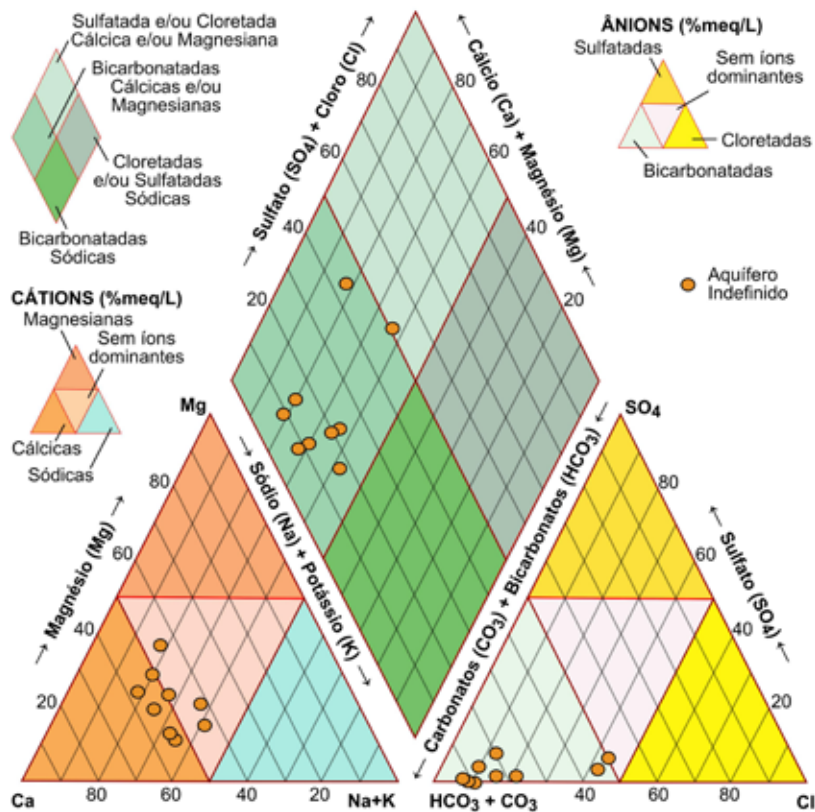


Figura 4.43. Diagrama de Piper para os pontos de captação onde o aquífero não é definido.

4.5 Evolução geoquímica das águas subterrâneas

Geralmente a composição química da água é função da mineralogia do aquífero e do tempo de residência da água no sistema. A descrição a seguir busca o entendimento da evolução geoquímica das águas subterrâneas em Joinville, através de um modelo conceitual construído a partir do conhecimento atual da hidrogeologia e dos resultados das análises físico-químicas realizadas.

O fluxo local é mais dinâmico, o que significa menor tempo de contato água-litologia e tendência de água do tipo bicarbonatada, decorrente da dissolução do CO_2 da atmosfera. Esse fato controla as águas subterrâneas de Joinville, especialmente aquelas que ocorrem nas porções mais elevadas do município. A topografia elevada e declivosa, aliada à grande precipitação pluviométrica, imprime às águas subterrâneas nesses locais um caráter de baixos sais dissolvidos e bicarbonatadas cálcicas ou mistas (cálcio e magnésio).

Na medida em que as águas atingem as áreas mais planas e menos declivosas, o fluxo vai diminuindo sua velocidade e as águas vão sofrendo processos e reações durante esse trajeto, influenciados pelos fatores naturais e antrópicos. Os cátions são mais suscetíveis às reações de troca iônica, complexação e precipitação, portanto apresentam mudanças mais significativas que os ânions. Com o fluxo mais lento na zona de transição, pode haver troca de cátions, como por exemplo, o Ca^{+2} e Mg^{+2} pelo Na^+ presentes nas argilas, dando origem às águas bicarbonatadas sódicas. No último estágio, a água encontra os sedimentos quaternários de origem marinha, como os depósitos de mangue, eólicos litorâneos, flúvio-estuarinos, paleo-estuarinos, e de planície de maré. Nesta fase, a concentração dos sais solúveis associados à água do mar, trapeada no ambiente de deposição ou que adentrou o continente através das marés ao longo dos canais, torna a água subterrânea muito salina e do tipo cloretada. Outra importante fonte de salinização das águas subterrâneas que pode explicar a presença de águas mistas ou levemente cloretadas na porção continental do município são os aerossóis marinhos. Uma origem possível destes íons é a deposição úmida de aerossóis procedentes do mar, responsável por estes íons nas águas de chuvas em áreas da costa (REBOUÇAS 1973; SANTIAGO 1984; MOREIRA-NORDMAN *et al.*, 1989).

A averiguação desse modelo pode ser confirmada pelo estudo das razões iônicas em mili-equivalente por litro como a $r \text{K}^+ / r \text{Na}^+$, $r \text{Cl}^- / r \text{HCO}_3^-$ e $r \text{Mg}^{+2} / r \text{Ca}^{+2}$ (CUSTODIO e LLAMAS, 1983).

Segundo esses autores, a razão $r \text{K}^+ / r \text{Na}^+$ varia em águas doces de 0,001 a 1,0, sendo mais comum o intervalo entre 0,004 a 0,3, enquanto que em ambientes marinhos os valores mais frequentes estão entre 0,02 e 0,025. Essa razão é alicerçada no comportamento do potássio que decresce ao longo das linhas de fluxo. Observando a Figura 4.44, nota-se que a evolução geoquímica das águas se dá de oeste para leste, respectivamente, das porções mais elevadas do município para as zonas planas e baixas. Também se destacam os menores valores associados a poços cuja influência marinha é verificada.

A razão $r \text{Cl}^- / r \text{HCO}_3^-$ (Figura 4.45), relevante para compreender o sentido de fluxo das águas subterrâneas, baseia-se na tendência do íon bicarbonato permanecer relativamente constante nas águas (CUSTODIO e LLAMAS, 1983). Também é útil para o entendimento da intrusão salina, já que as águas continentais tendem a apresentar valores em torno de 0,1 a 0,5 e a água do mar valores bem maiores (dezenas a centenas de vezes). Valores superiores a 1 indicam mistura das águas do aquífero com as águas salinizadas.

A razão $r \text{Mg}^{+2} / r \text{Ca}^{+2}$ indica para águas continentais valores entre 0,3 e 1,5, sendo que valores maiores que 1 estão associados ao intemperismo de rochas básicas (CUSTODIO e LLAMAS, 1983). Em locais onde há mistura de águas subterrâneas e águas do mar são comuns razões elevadas. Observando essas razões para as águas subterrâneas no município de Joinville, nota-se que poços situados ao longo do rio Cachoeira apresentam valores mais elevados que indicam mistura com águas salgadas (Figura 4.46).

Com o conhecimento até agora obtido nos estudos hidrogeológicos de Joinville é possível tecer, de modo generalizado, um zoneamento hidroquímico das águas subterrâneas (Figura 4.47), dividido em três zonas básicas: zona com predomínio de águas bicarbonatadas cálcicas e mistas; zona com predomínio de águas bicarbonatadas sódicas e zona com predomínio das águas cloretadas.

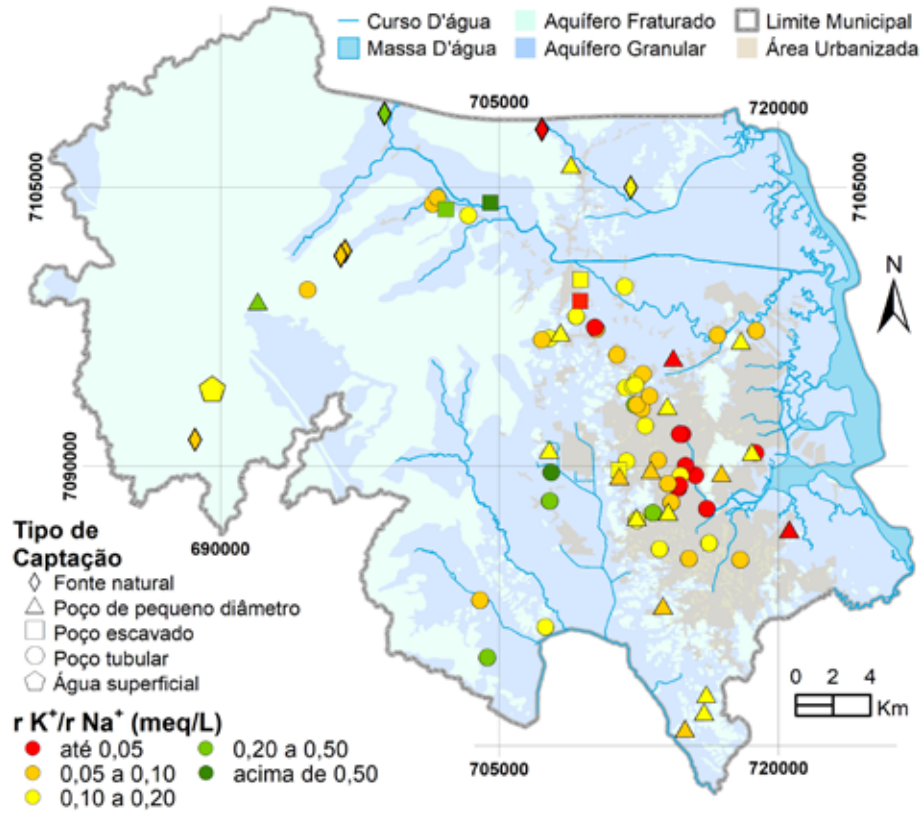


Figura 4.44. Mapa da razão $r K^+ / r Na^+$.

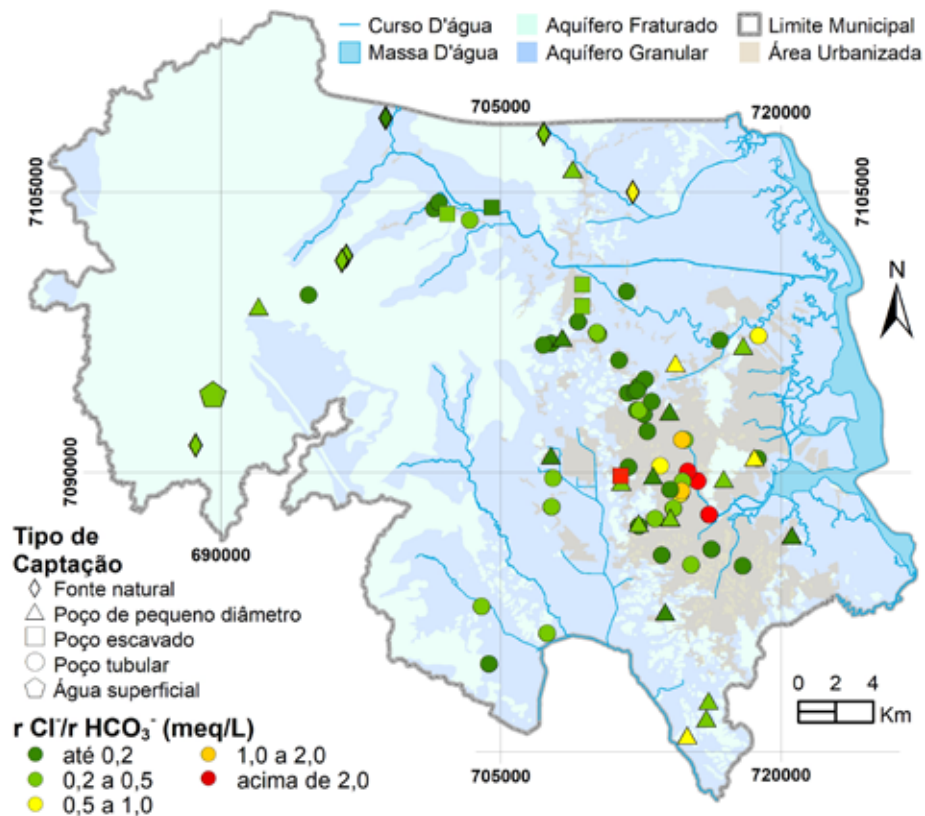


Figura 4.45. Mapa da razão $r Cl^- / r HCO_3^-$.

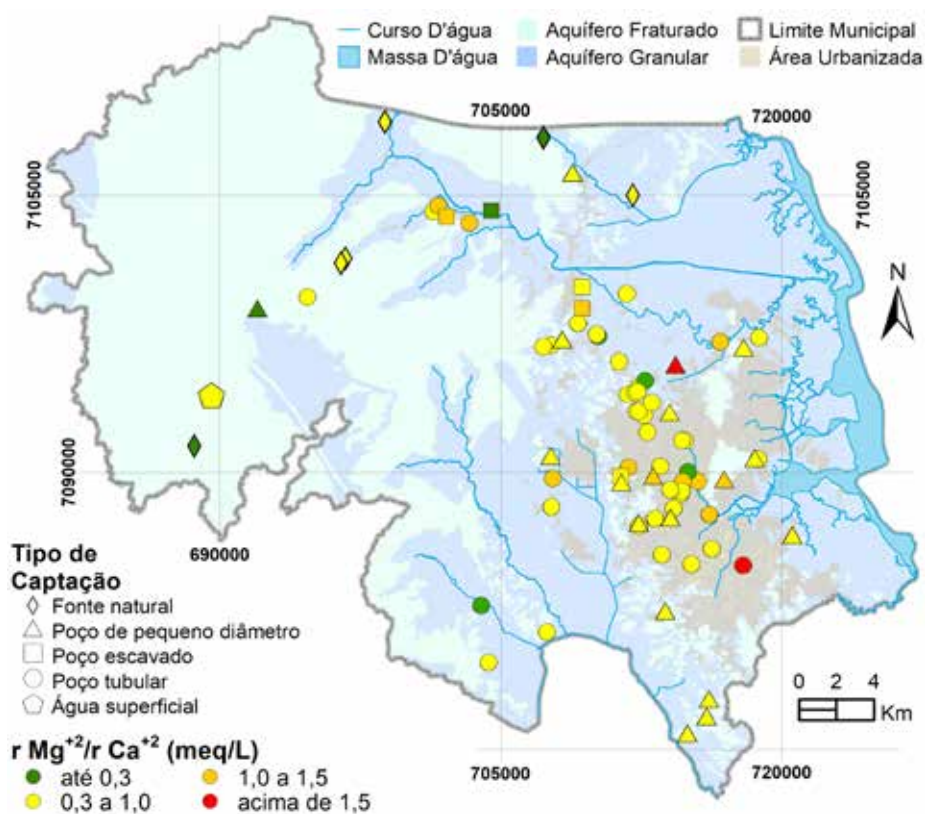


Figura 4.46. Mapa da razão $r \text{Mg}^{+2}/r \text{Ca}^{+2}$.



Figura 4.47. Zoneamento hidroquímico das águas subterrâneas em Joinville.

A primeira zona corresponde as porções mais elevadas e de relevo acidentado, bem como os contrafortes da Serra do Mar cobertos por densa vegetação nativa sobre solos profundos constituídos por colúvios e elúvios. Corresponde às áreas de recargas regionais e apresentam águas com baixa concentração de sais dissolvidos e preferencialmente bicarbonatadas cálcicas e cálcio magnesianas.

A zona com predomínio de águas bicarbonatadas sódicas ocorre nas grandes planícies aluvionares que recarregam os aquíferos fraturados subjacentes. Nessas áreas as águas, com maior tempo de residência, sofreram processos de troca catiônica e enriquecimento em sódio.

A última zona é aquela mais distante das áreas de recarga onde predominam águas cloretadas sódicas e cloretadas mistas com alto teor de sais dissolvidos. Nessas áreas predominam sedimentos de origem marinha, por vezes recobertas por depósitos continentais aluvionares. Nesses locais é comum a interferência de marés que misturam águas subterrâneas às águas salgadas.

4.6 Adequabilidade das águas subterrâneas ao uso

4.6.1 Potabilidade

A potabilidade das águas subterrâneas é determinada pelos valores máximos permitidos (VMP) dos parâmetros determinados pela Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017, do Ministério da Saúde/ANVISA (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2017). Esta portaria, no Anexo XX, Art. 1º, determina que: “*Ficam definidos os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.*”(Origem: PRT MS/GM 2914/2011, Art. 1º, conforme BRASIL, 2011). Também nesta portaria, no Capítulo 1, das Disposições Gerais, em seu Art. 2º, determina que este anexo se aplica a água destinada ao consumo humano a partir de sistemas e solução alternativa de abastecimento de água. Ressalta-se que as disposições deste Anexo não se aplicam à água mineral natural, à água natural e às águas adicionadas de sais destinadas ao consumo humano após o envasamento, e a outras águas utilizadas como matéria-prima para elaboração de produtos, conforme Resolução (RDC) nº 274, de 22 de setembro de 2005, da Diretoria Colegiada da ANVISA. (Origem: PRT MS/GM 2914/2011, Art. 2º, Parágrafo Único, conforme BRASIL, 2011).

Esta portaria leva em consideração aqueles parâmetros cujos valores acima dos máximos permitidos podem acarretar problemas à saúde humana, quando estas águas são ingeridas de forma contínua.

Dentre todos os parâmetros analisados nas águas subterrâneas de Joinville, aqueles que apresentaram valores acima dos padrões acima do máximo permitido foram os seguintes: turbidez, cor, manganês total (Mn), dureza total, ferro total (Fe), níquel (Ni), chumbo (Pb), cloretos (Cl⁻), alumínio (Al) e sódio (Na⁺).

De modo geral, a turbidez presente nas águas subterrâneas é sempre baixa, já que a velocidade de percolação destas águas nos aquíferos é comumente muito baixa, não transportando materiais em suspensão. A elevada turbidez está associada diretamente às altas concentrações de sólidos em suspensão nas águas provenientes dos poços, provocadas principalmente pela má construção dos mesmos, onde partes do solo ou rochas sedimentares atravessadas pela perfuração não são devidamente revestidas, ou revestidas com materiais inapropriados, permitindo o arraste de sedimentos através do bombeamento. A falta de cimentação do espaço anular, ou a má instalação desta, é outro fator preponderante para o aumento da turbidez das águas subterrâneas captadas através de poços. Além disso, poços que apresentam concentrações elevadas de Fe²⁺, ao serem bombeados, oxidam o ferro para Fe³⁺, podendo gerar também águas turvas.

Dos 79 poços com análises de turbidez, cerca de 20% apresenta valores acima do máximo permitido pela legislação para a potabilidade, que é de 5 NTU. A Tabela 4.5. Pontos com turbidez acima do valor máximo permitido para potabilidade (5 NTU). apresenta os poços cuja turbidez encontra-se acima dos valores máximos permitidos.

O padrão de potabilidade considerado para a cor é de até 15 UC (Unidades Colorimétricas). Das 61 amostras de água analisadas para o parâmetro cor, apenas 6,56 % apresentam valores acima do valor máximo permitido para o consumo humano. Os poços que representam estes valores são mostrados na Tabela 4.6. Nota-se que todos estes poços também apresentam turbidez acima dos limites máximos para potabilidade. Estes parâmetros são correlacionáveis, embora nem todos os poços que apresentam turbidez elevada possuem cor elevada.

Tabela 4.5. Pontos com turbidez acima do valor máximo permitido para potabilidade (5 NTU).

Ponto	Turbidez (NTU)	Tipo de Captação
JAP031	5,73	Poço escavado
JEI002	37,50	Poço de pequeno diâmetro
JEL032	26,30	Poço tubular
JGB001	28,00	Poço tubular
JGB008	6,67	Poço tubular
JGB038	140,00	Poço tubular
JIP020	18,70	Poço tubular
JIP029	130,00	Poço de pequeno diâmetro
JIP040	42,80	Poço tubular
JMB030	11,30	Poço escavado
JMB033	99,50	Poço de pequeno diâmetro
JML007	26,30	Poço tubular
JML009	84,10	Poço tubular
JML010	39,40	Poço tubular
JP314	10,00	Poço tubular
JP338	33,00	Poço tubular
JAP031	5,73	Poço escavado

Tabela 4.6. Relação dos poços com a cor acima dos padrões de potabilidade (VMP= 5 UC).

Ponto	Cor (UC)	Tipo de Captação
JEL032	300,00	Poço tubular
JML007	300,00	Poço tubular
JML009	150,00	Poço tubular
JML010	150,00	Poço tubular
JEL032	300,00	Poço tubular

Conforme a Portaria de Consolidação nº 5, do Ministério da Saúde, o valor máximo de dureza permitido para potabilidade é 500 mg/L (CaCO_3). Das 78 amostras analisadas para dureza, apenas duas apresentam dureza acima dos valores máximos permitidos para o consumo humano. Estas amostras correspondem a dois poços possivelmente influenciados por processos de salinização, os JIP020 e JIP036, com valores de 4625 mg/L (CaCO_3) e 680 mg/L CaCO_3), respectivamente. Embora o valor máximo de dureza permitido seja de 500 mg/L (CaCO_3), a objeção ao uso humano fica por conta do gosto, que pode ser considerada uma característica desagradável de águas muito duras. As águas duras são incrustantes e podem dificultar o cozimento dos alimentos. Quando aquecidas, estas águas precipitam o carbonato de cálcio (CaCO_3), na forma do mineral calcita, responsáveis pelas manchas esbranquiçadas em superfícies que foram submetidas ao aquecimento.

A Portaria de Consolidação nº 5 prevê que os valores máximos permitidos para o ferro e manganês nas fontes de abastecimento de água potável devem ser 0,3 e 0,1 mg/L, respectivamente. Quase todas as amostras que apresentam concentrações de manganês impróprias para consumo, também apresentam concentrações inadequadas de ferro (Figura 4.48).

A Tabela 4.7 e Tabela 4.8 mostram os poços que possuem concentrações acima do máximo permitido para manganês e ferro, respectivamente. Do total de 78 amostras analisadas para ferro, 73,08% estão dentro dos padrões estabelecidos para o consumo humano, enquanto que 26,92% estão em desacordo com a legislação.

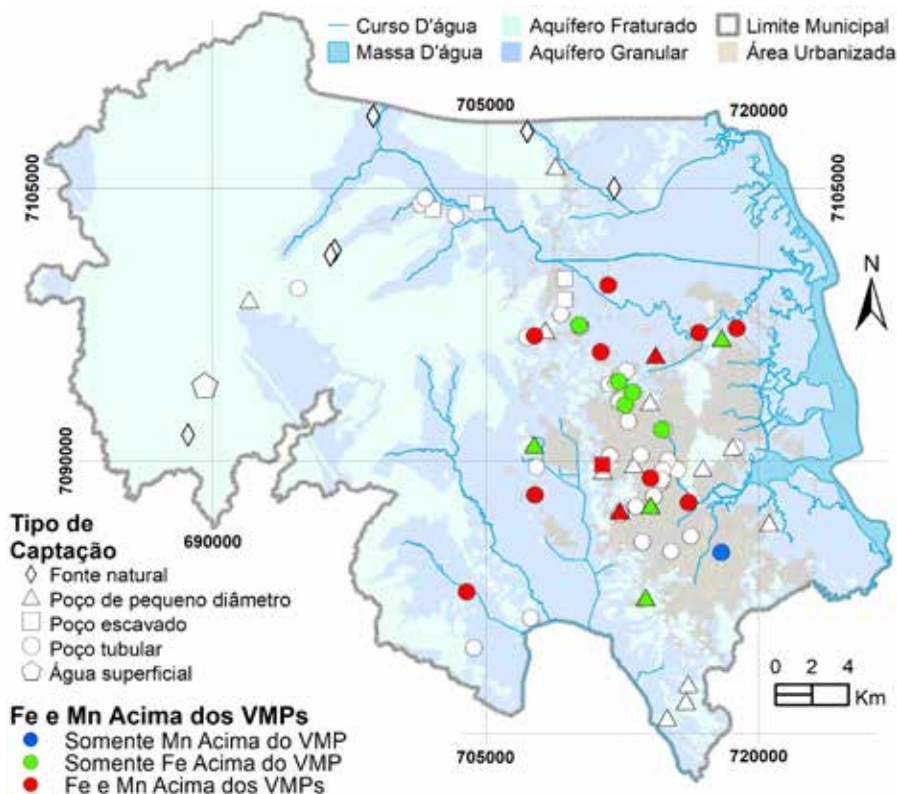


Figura 4.48. Mapa representando os poços que possuem VMP acima padrão de potabilidade para ferro (Fe) e manganês (Mn).

Tabela 4.7. Poços com concentração de manganês acima dos valores máximos permitidos (VMP=0,1 mg/L).

Ponto	Mn (mg/L)	Tipo de Captação
JEI002	0,74	Poço de pequeno diâmetro
JEL032	0,46	Poço tubular
JGB001	0,21	Poço tubular
JGB038	0,23	Poço tubular
JIP014	0,58	Poço tubular
JIP020	0,27	Poço tubular
JIP029	0,60	Poço de pequeno diâmetro
JIP040	1,01	Poço tubular
JMB030	0,25	Poço escavado
JML007	0,46	Poço tubular
JML009	0,19	Poço tubular
JML010	0,42	Poço tubular
JP314	0,24	Poço tubular

Tabela 4.8. Poços com concentração de ferro acima dos valores máximos permitidos (0,3 mg/L).

Ponto	Ferro Total (mg/L)	Tipo de Captação
JB485	0,42	Poço tubular
JB494	1,44	Poço tubular
JB527	0,69	Poço tubular
JEB048	0,69	Poço de pequeno diâmetro
JEI002	8,44	Poço de pequeno diâmetro
JEL032	8,12	Poço tubular
JGB001	3,70	Poço tubular
JGB012	0,67	Poço de pequeno diâmetro
JGB038	4,67	Poço tubular
JIP020	1,37	Poço tubular
JIP028	0,47	Poço de pequeno diâmetro
JIP029	2,90	Poço de pequeno diâmetro
JIP040	8,03	Poço tubular
JMB030	1,46	Poço escavado
JMB033	1,19	Poço de pequeno diâmetro

continua...

...continuação

Ponto	Ferro Total (mg/L)	Tipo de Captação
JML007	8,12	Poço tubular
JML009	12,57	Poço tubular
JML010	10,38	Poço tubular
JP314	1,43	Poço tubular
JP318	0,48	Poço tubular
JP338	3,00	Poço tubular

Pode-se observar que há uma relação direta entre os poços que possuem concentrações excessivas de ferro e aqueles que têm altas taxas de turbidez. Dos poços amostrados, todos aqueles que dispõem turbidez mais elevada, também detêm concentrações de ferro elevadas, a exceção dos poços JB031 e JP318. Além disso, constata-se que a maior incidência dos poços com problemas nos valores de ferro são os do tipo tubular, provavelmente provocados pelo regime mais alto de vazão empregado, com bombeamentos mais expressivos, provocando o arraste de sedimentos do solo e das formações geológicas ricas em ferro e manganês para dentro dos poços, na forma de materiais em suspensão e pela oxidação do FeO para Fe₂O₃, precipitando minerais que fazem aumentar as concentrações nas águas subterrâneas provenientes destes poços. Isto ocorre principalmente em poços mal construídos, sem as devidas proteções sanitárias, como a ausência de cimentação do espaço anular ou a instalação indevida dos revestimentos, que proporcionam o incremento do ferro e manganês nas águas subterrâneas. Também pode-se acrescentar o fato de que os poços tubulares apresentam maiores profundidades, atingindo formações geológicas mais profundas, constituídas por rochas alteradas, ricas em minerais de ferro e manganês, comuns nas bandas máficas dos granulitos que ocorrem na região de Joinville.

Um outro fator que pode gerar o aumento das concentrações do ferro em poços tubulares é a corrosão dos tubos metálicos de revestimento, que pode ser de forma química, física e biológica, ou de forma combinada entre eles.

O níquel é um metal com pouca abundância na crosta terrestre. Ele comumente substitui o ferro em rochas ígneas ferro-magnesianas e tende a precipitar conjuntamente com óxidos de ferro e, principalmente, com óxidos de manganês (HEM,1985). As concentrações de níquel nas águas subterrâneas são extremamente baixas; entretanto, quando presentes em quantidades excessivas, podem ser tóxicas e cancerígenas, se ingeridas de forma contínua. Além disso, devem permanecer no ambiente aquoso por muito tempo, já que o níquel não é consumido por atividades bacterianas. O valor máximo permitido (VMP) pela Portaria 5 do Ministério da Saúde para o níquel é de 0,07 mg/L. Das 64 amostras analisadas para níquel, 13,89% apresentam valores acima do máximo permitido para consumo humano. As análises que apresentam estes valores foram compiladas de poços cadastrados no SIAGAS do SGB-CPRM e foram submetidos a processos de outorga junto ao DRH-SDE (Departamento de Recursos Hídricos da Secretaria de Desenvolvimento Econômico Sustentável do Estado de Santa Catarina); nota-se que todas as captações são do tipo poço tubular (Tabela 4.9).

A Figura 4.49 mostra a distribuição espacial destes poços no município. Estas concentrações anômalas de níquel, que se concentram preferencialmente nas áreas urbanizadas, devem ser mais bem estudadas e monitoradas, pois podem ser oriundas tanto de questões naturais (rochas e minerais fontes), quanto de processos antropogênicos (depósitos de resíduos industriais, solos contaminados, etc.).

Tabela 4.9. Poços com concentração de níquel acima dos valores máximos permitidos (0,07 mg/L).

Ponto	Níquel (mg/L)	Tipo de captação
JB485	0,07	Poço tubular
JB487	0,08	Poço tubular
JB518	0,11	Poço tubular
JB523	0,13	Poço tubular
JB527	0,17	Poço tubular
JB533	0,23	Poço tubular
JGB001	0,78	Poço tubular
JP314	0,17	Poço tubular
JP315	0,17	Poço tubular
JB467	0,18	Poço tubular

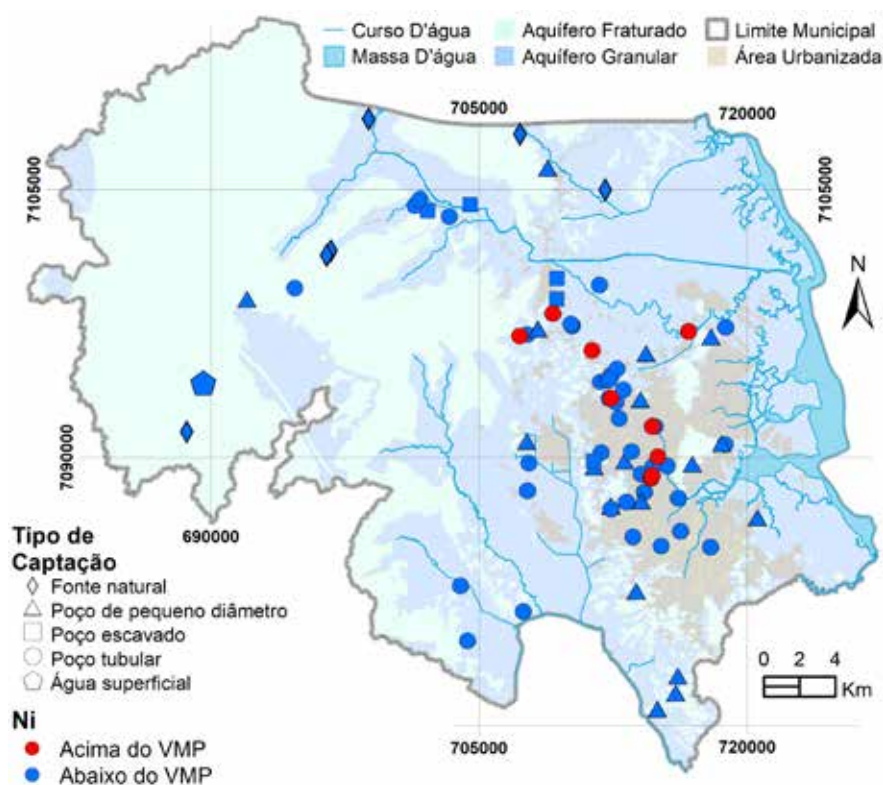


Figura 4.49. Localização dos poços com concentração de níquel acima do VMP.

O chumbo é outro metal que apresenta análises com padrões acima do máximo permitido para potabilidade. O chumbo entra no ciclo hidrológico como o íon Pb^{+2} , porém, devido a sua baixa solubilidade, tende a se manter com baixas concentrações nas águas subterrâneas. O valor máximo permitido para consumo humano é 0,01 mg/L. Apenas três poços tubulares foram identificados com concentrações acima destes padrões (JAP061, JAP073 e JP318) e já se encontram desativados. Enfatiza-se que as concentrações medidas são baixas (0,05 mg/L), mas com valores um pouco acima do máximo permitido para o consumo humano.

Com relação ao alumínio, o valor máximo permitido para potabilidade é de 0,20 mg/L. Das 61 amostras de água analisadas para alumínio, sete apresentaram valores acima do padrão de potabilidade. Entretanto, não são concentrações muito expressivas, embora acima dos valores máximos permitidos (Tabela 4.10).

Destaca-se que duas fontes situadas em zona rural (Figura 4.50) apresentam concentrações mais altas de alumínio, indicando a probabilidade de que a forma de ocorrência do alumínio nestas águas seja através de particulados que possuem tamanhos de 0,10 µm (HEM, 1985), menores do que muitas malhas de filtros utilizados nas coletas de água e não sob a forma dissolvida na água.

Das 78 amostras analisadas para sódio e cloretos, apenas duas apresentaram valores acima do padrão: JB533 e JIP020 (Figura 4.51). Ambas representam um processo de salinização das águas subterrâneas naquelas locais, provavelmente influenciados pela entrada de águas salinizadas de origem marinha, identificadas em cursos de água e em aquíferos freáticos.

Tabela 4.10. Pontos com concentração de alumínio acima dos valores máximos permitidos (0,07 mg/L).

Ponto	Alumínio (mg/L)	Tipo de captação
JAP010	0,26	Fonte natural
JAP019	0,70	Fonte natural
JGB012	0,33	Poço de pequeno diâmetro
JIP012	0,23	Poço de pequeno diâmetro
JIP028	0,28	Poço de pequeno diâmetro
JMB033	0,97	Poço de pequeno diâmetro
JMB036	0,21	Poço tubular

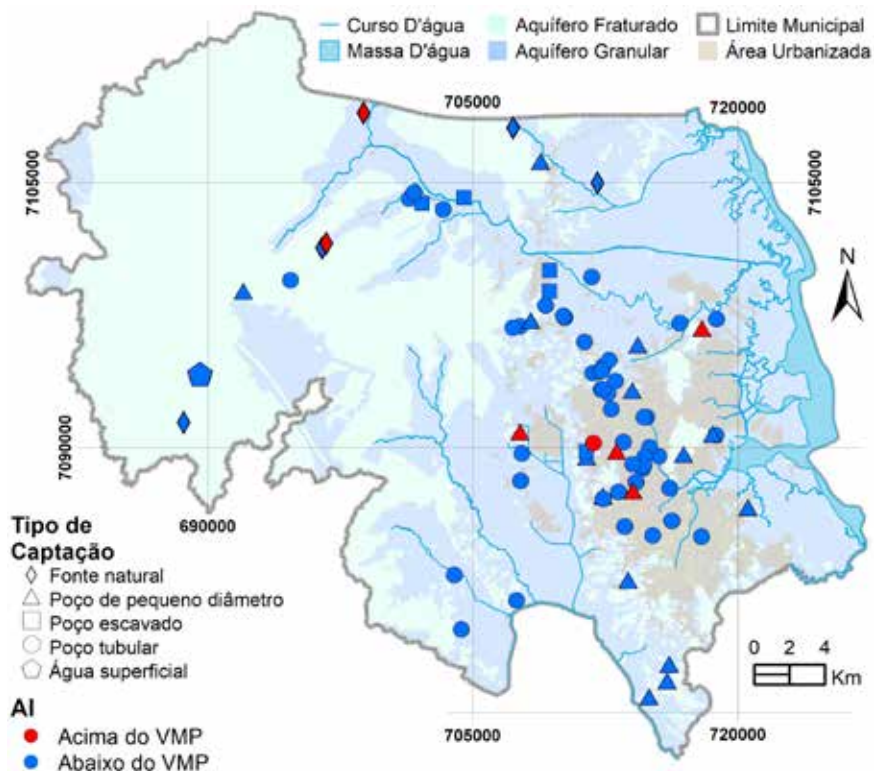


Figura 4.50. Localização dos pontos com concentração de alumínio acima do VMP.

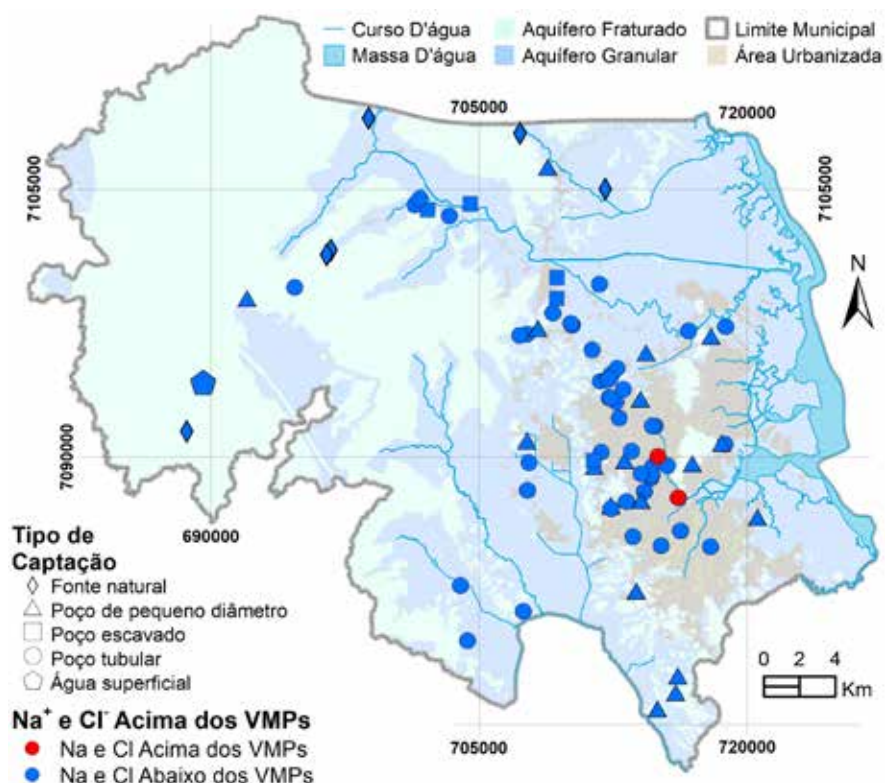


Figura 4.51. Localização dos poços com excessos de sódio e cloretos.

De acordo com as análises efetuadas em 60 amostras de água, não foram constatados em nenhuma das captações valores acima do máximo permitido para consumo humano para agrotóxicos, fenóis, BTEX e hidrocarbonetos totais. Em todas as análises, os valores medidos estiveram abaixo dos limites de detecção dos equipamentos do Laboratório Bioética que efetuou as análises.

4.6.2 Uso industrial

Os padrões da água para fins industriais são complexos em função da diversidade de uso da água, pois dependem do tipo da indústria e dos processos de industrialização, gerando necessidades diferentes de qualidade de água para cada uso (FEITOSA *et al.*, 2008).

Vários autores apresentaram alguns parâmetros importantes para cada tipo de uso industrial da água, de acordo com os tipos de equipamentos utilizados e as particularidades de cada segmento industrial. A Tabela 4.11 mostra os valores de referência para estes parâmetros, conforme os autores Mathess (1982), Sziksay (1993) e Driscoll (1986) *apud* Feitosa *et al.* (2008).

Tabela 4.11. Valores de referência de alguns parâmetros das águas para os diferentes usos industriais. Modificada de Mathess (1982), Sziksay (1993) e Driscoll (1986) *apud* Feitosa *et al.* (2008).

Parâmetro	Tipo de indústria						
	Unidade	Refrigeração	Laticínios	Conservas	Cervejaria	Ind. Bebidas	Têxtil
pH	x	x	x	7,5	6,5 - 7	x	x
Dureza	mg/L CaCO ₃	50		50-80	50-75	25	50
Alcalinidade	mg/L CaCO ₃	x	x	80-150		128	x

continua...

...continuação

Parâmetro	Tipo de indústria						
	Unidade	Refrigeração	Laticínios	Conservas	Cervejaria	Ind. Bebidas	Têxtil
Cálcio	mg/L Ca	x	x	500	200	x	10
Cloretos	mg/L Cl	x	30	X	100	250	100
Ferro	mg/L Fe	0,5	0,3	0,2	0,1	0,2	0,25
Manganês	mg/L Mn	0,5	0,1	0,2	0,1	0,2	0,25
Resíduo Seco	mg/L	x	500	850	1000	850	x
Nitrato	mg/L N	x	30	15	10	x	x
Amônia	mg/L NH ₃	x	traços	0,5	x	x	x
Sulfatos	mg/L SO ₄	x	60	x	x	250	100
fluoretos	mg/L F	x	x	1	1	1	x
Magnésio	mg/L Mg	x	x	x	10	x	x

Com base nestes valores de referência, constata-se que de acordo com as análises químicas das captações efetuadas no âmbito deste projeto, os maiores riscos aos usos industriais estão relacionados principalmente às águas com concentrações elevadas de ferro e manganês, já anteriormente apontadas no item de potabilidade. Estas concentrações elevadas podem gerar incrustações e corrosão nos diversos equipamentos utilizados nas indústrias, bem como afetar diretamente os processos industriais. As incrustações, por exemplo, podem levar ao entupimento de tubulações de caldeiras e demais equipamentos.

4.6.3 Agricultura

A classificação das águas para fins agrícolas é determinada pela concentração de alguns íons, tais como o sódio, potássio, cloretos, sulfatos, bicarbonato e boro, e parâmetros como a concentração total de cátions, que influenciam de maneira diferenciada no crescimento de cada espécie vegetal.

Existem alguns critérios que permitem verificar a adequabilidade da água para agricultura, sendo, atualmente, o critério mais aceito e utilizado a classificação do *United States Salinity Laboratory – USSL* (Laboratório de Salinidade dos Estados Unidos). Esta classificação baseia-se no índice SAR (RICHARDS, 1954; GLOVER, 1996) como indicador do perigo de alcalinização ou sodificação do solo, e na condutividade elétrica (CE) como indicador do perigo de salinização do solo. Quanto maior a razão, menos apropriada é a água para fins de irrigação. O SAR (*Sodium Adsorption Ratio*), ou RAS (Razão de Adsorção de Sódio), indica a percentagem de sódio contido numa água que pode ser adsorvido pelo solo e é calculado através da seguinte equação:

$$SAR = \frac{rNa}{\sqrt{\frac{r(Ca + Mg)}{2}}}$$

Onde r representa as concentrações de sódio, cálcio e magnésio em miliequivalente por litro (meq/L). As categorias de águas da classificação do USSL são as seguintes:

- C_0 – águas de muito baixa salinidade. Podem ser utilizadas sem restrições para a irrigação;
- C_1 – águas de baixa salinidade. Pode-se utilizá-la na maioria das culturas e solos;
- C_2 – águas de salinidade média. Devem ser usadas com precaução e somente em solos silto-arenosos, siltosos ou arenoargilosos. Há a necessidade de serem selecionadas as plantas a serem irrigadas;
- C_3 – águas de alta salinidade. Somente devem ser utilizadas em solos com boa drenagem interna;
- C_4 – águas de salinidade muito alta. Somente podem ser usadas em casos muito especiais, em solos arenosos e plantas com alta tolerância;
- C_5 – águas de salinidade extremamente alta. Não devem ser utilizadas.

As categorias de sódio são:

- S_1 – águas fracamente sódicas. Podem ser utilizadas em todos os tipos de solos e para quase todas as plantas;
- S_2 – águas medianamente sódicas. Podem ser utilizadas em solos de textura grosseira com boa permeabilidade;
- S_3 – águas altamente sódicas. Podem ser usadas somente em solos de textura grosseiras e em plantas altamente toleráveis ao sódio;
- S_4 – águas extremamente sódicas. Águas imprestáveis para a irrigação, a menos que a salinidade seja baixa, mas seu uso deve ser feito com cautela e em solos altamente drenáveis.

Os resultados analíticos de 78 pontos de captação estão expressos através dos seus percentuais de risco de sódio e de salinização na Tabela 4.12.

Tabela 4.12. Percentuais de risco a salinização, conforme classes do SAR.

Classe	Nº	%	Classe	Nº	%
S1	76	97,00	C0	14	18,00
S2	1	1,00	C1	40	51,00
S3	0	0,00	C2	17	22,00
S4	1	1,00	C3	6	8,00
			C4	0	0,00
			C5	1	1,00

O Gráfico 4.23 apresenta o diagrama de SAR relativo aos riscos de salinização dos solos utilizados para a irrigação. Observa-se que apenas uma amostra (JIP020) apresenta risco excepcionalmente alto de salinização e pode ser classificada como água imprestável para qualquer tipo de uso, conforme a classificação baseada no SAR (o mesmo que RAS). Apresentam tanto risco alto com relação ao sódio quanto à condutividade elétrica. Já as amostras que possuem risco alto de salinização, classificadas como C3-S2 (JB533) e C3-S1 (JIP003, JIP467, JGB038, JB527 e JIP036), correspondem a 6,4% das amostras analisadas, baseados na condutividade elétrica. Com relação ao risco de adsorção de sódio, apresentam baixo risco.

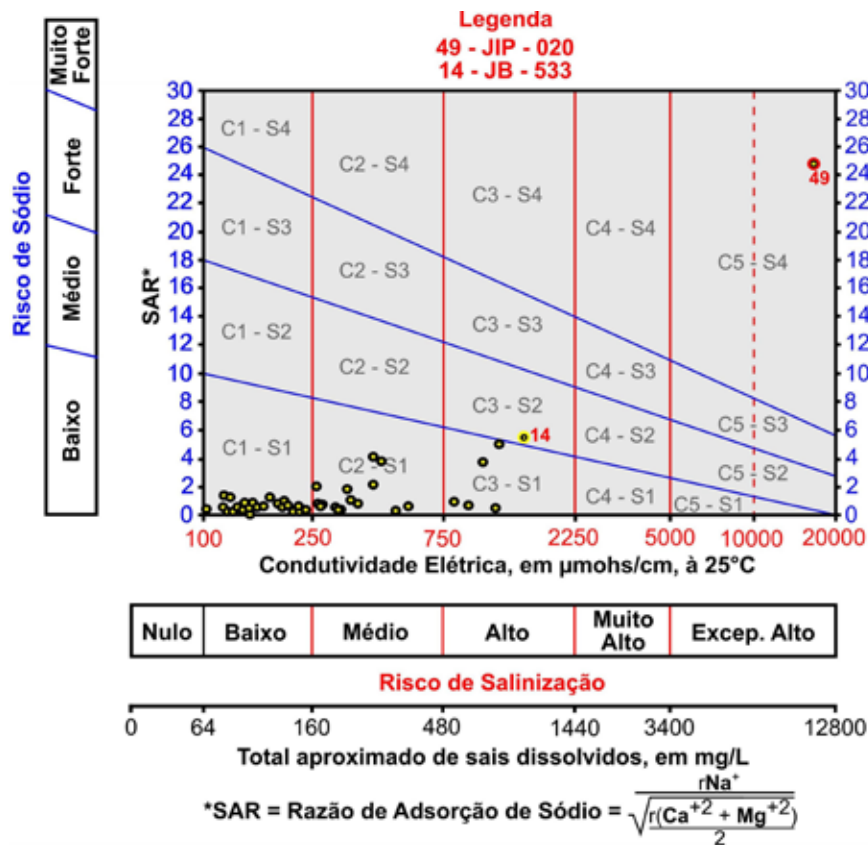


Gráfico 4.23. Classificação das captações amostradas conforme o índice SAR. Os poços que apresentam risco à salinização do solo e às plantas encontram-se destacados.

As demais amostras analisadas apresentam risco médio e baixo de salinização e baixo risco de adsorção de sódio, não proporcionando qualquer tipo de implicação no uso para fins de agricultura e danos aos solos. O ferro e o manganês, já abordados no item potabilidade, são outros parâmetros que podem interferir diretamente nos processos relacionados aos usos da água na agricultura. As concentrações elevadas destes metais podem afetar o solo e as plantas, impedindo, desta forma, a utilização da água na irrigação.



5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados aqui apresentados refletem um panorama atual geral das águas subterrâneas amostradas nesses poços e fontes, nas condições encontradas na época das coletas. A abordagem visou amostrar representativamente os vários tipos de captação e de aquíferos possíveis numa escala de mapeamento 1:50.000.

A realização de 60 análises físico-químicas completas e a compilação de 19 análises disponíveis permitiram traçar um diagnóstico da qualidade das águas subterrâneas de Joinville. Os pontos foram agrupados de acordo com o tipo de aquífero captado em: fraturado, granular e aquífero indefinido (poços tubulares sem perfis litológico-constructivos).

As águas dos aquíferos fraturados apresentam maiores concentrações dos seguintes parâmetros: condutividade elétrica, sais totais dissolvidos, pH, dureza total, Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Na^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Mn total e F⁻. Por outro lado, os aquíferos granulares exibem maiores valores de turbidez, Eh, K^+ , NO_3^- e Fe total.

Uma correlação positiva entre Na^+ e Cl^- em poços de maior salinidade indicam a dissolução de halita (NaCl) presente nas águas subterrâneas misturadas com as águas de origem marinha.

As águas dos aquíferos fraturados tendem a ser de pouco duras a duras, enquanto que a dos aquíferos granulares de brandas e pouco duras.

Os poços perfurados no aquífero fraturado com valores anômalos de ferro total geralmente estão associados a problemas constructivos nos seus revestimentos.

A presença de mineralização de manganês nas rochas está afetando a qualidade das águas subterrâneas em alguns locais como, por exemplo, no Morro do Timbé.

Muitos metais não foram detectados nas águas subterrâneas amostradas em Joinville como As, Cd, Co, Li, Mo, Hg, Se, V e Ag.

Existe uma similaridade entre os aquíferos fraturado e granular no tocante a tipologia hidroquímica. Isso ocorre porque essas captações acessam basicamente as mesmas águas de origem pluvial em diferentes níveis profundidades. O predomínio é das águas bicarbonatadas mistas, seguidas pelas águas bicarbonatadas cálcicas e sódicas, cloretadas sódicas, mistas, mistas sódicas, bicarbonatadas magnesianas e cloretadas mistas. As águas bicarbonatadas mistas correm em praticamente todos os setores do município associadas principalmente às áreas de rochas gnáissicas e coberturas regolíticas. Algumas nascentes e poços escavados apresentam águas bicarbonatadas cálcicas intimamente relacionadas às águas de origem meteórica, de baixo tempo de residência, sobretudo na região da Serra da Dona Francisca e Estrada Bonita. As águas bicarbonatadas sódicas predominam na porção centro-leste na área de ocorrência de sedimentos quaternários e com relevo plano. As águas cloretadas indicam áreas onde há processos de salinização devido à interferência das águas da Baía da Babitonga que adentram a cidade através dos cursos d'água na maré alta. As demais classes, pouco expressivas, revelam águas mistas onde há vários processos de mistura. Os resultados dos estudos isotópicos a serem apresentados nos estudos hidrogeológicos posteriores poderão dar respostas em relação ao fluxo das águas subterrâneas que irão aperfeiçoar o conhecimento hidrogeoquímico até aqui obtido.

As características hidroquímicas possibilitam dividir a área de estudo em zona de predomínio de águas bicarbonatadas cálcicas e mistas; zona de predomínio de águas bicarbonatadas sódicas e zona de predomínio das águas cloretadas. Esse zoneamento reflete regionalmente a evolução geoquímica das águas subterrâneas, que vão de uma água bicarbonatada cálcica no início do ciclo até atingir uma água cloretada sódica.

Em relação aos padrões de potabilidade, uso na indústria e na agricultura, as águas subterrâneas no município de Joinville são afetadas principalmente pelos parâmetros ferro e manganês. Estes elementos estão presentes nas rochas e minerais que constituem boa parte das formações geológicas do município. A lixiviação dos solos e a solubilização destes elementos proporcionam suas concentrações elevadas nas águas subterrâneas, inviabilizando o uso destas águas seja para consumo humano (potabilidade) para uso na agricultura e na indústria. O enriquecimento do ferro e manganês pode ocorrer tanto

de forma dissolvida quanto em suspensão nas captações. Esta última forma ocorre provavelmente pela má construção das captações. Cita-se, por exemplo, a instalação de forma inadequada dos revestimentos dos poços e ausência de cimentação dos espaços anelares.

A quantidade de sedimentos em suspensão é responsável pela elevada turbidez e cor observadas em algumas análises, coincidindo com aquelas que possuem concentrações elevadas de ferro e manganês.

Apenas dois poços apresentaram valores acima do permitido para a potabilidade, em relação aos parâmetros Cl^- e Na^+ . Essas mesmas águas representam riscos de salinização dos solos e das plantas, além de causar problemas para equipamentos industriais. As captações com estes parâmetros mais elevados ocorrem próximos a cursos d'água e em sedimentos rasos, ambos possivelmente submetidos às condições de variações de marés, onde águas mais salinizadas penetram nos cursos de água e em aquíferos freáticos, mais superficiais.

Outros metais, como chumbo, alumínio e níquel, apresentaram, em algumas amostras, VMP acima do recomendado pela Portaria N° 5 do Ministério da Saúde. Estes metais ocorrem de forma muito rara nas águas subterrâneas. Mesmo as concentrações mais elevadas encontradas estão muito próximas daquelas estabelecidas para a potabilidade, constituindo-se em valores considerados baixos. Não há explicação hidrogeoquímica para a ocorrência destas concentrações no âmbito do município. As solubilizações dos metais estão normalmente relacionadas às condições de pH muito baixo, o que não foi constatado na região. As origens dos valores mais elevados destes metais teriam que ser melhor estudadas, de forma localizada onde foram identificadas e monitoradas a fim de que se comprove ou não alguma contaminação.

Não foram constatados em nenhuma das captações de águas subterrâneas amostradas valores acima do máximo permitido para consumo humano para agrotóxicos, fenóis, BTEX e hidrocarbonetos totais. Em todas as análises, os valores medidos estiveram abaixo dos limites de detecção dos equipamentos do laboratório que efetuou as análises. Considerando que em Joinville há um histórico de intensa atividade industrial, sobretudo do setor metal mecânico e de fundição, algumas considerações devem ser tecidas. Do total de 60 pontos coletados para realização de análises completas, 15 localizam-se em áreas que contêm atividades com potencial de contaminação das águas subterrâneas, sendo que 14 estão ligadas a atividades industriais e uma delas em área de rizicultura. A ausência de elementos contaminantes possivelmente esteja relacionada à função de proteção natural que as camadas de materiais argilosos, constituintes dos mantos de alteração nas rochas gnáissicas, desempenham. É evidente que nos níveis freáticos mais rasos, onde a vulnerabilidade natural do aquífero é mais elevada, a probabilidade de detecção de elementos contaminantes, sobretudo em áreas de passível ambiental, é bem maior. Existem estudos localizados e de detalhe, entre outros, os de Gonçalves e Barbosa (2002), Gonçalves *et al.* (2003), Giesel (2007) e Ghanem (2009), que revelam pontualmente problemas de parâmetros que não estão de acordo com as normas vigentes de potabilidade. Sugere-se que futuramente o município crie um plano de amostragem mais abrangente e estabeleça, baseado nos resultados encontrados, uma rede de monitoramento qualitativo. Também são recomendados estudos localizados e em escala de maior detalhe, sobretudo nas áreas de passivo ambiental e nas áreas de alto risco de contaminação das águas subterrâneas, a serem mapeadas nos estudos subsequentes.

Como exemplo de monitoramento qualitativo bem-sucedido, destaca-se o da CETESB, iniciado em 1977, em atendimento ao regulamento da Lei 997/76 e aprovado pelo Decreto Estadual 8468/76, quando foi publicado um relatório sobre a poluição das águas subterrâneas no estado de São Paulo. No entanto, somente em 1990, a rede estadual de monitoramento ambiental começou a ser efetivamente implementada, em atendimento à Lei 6.134 de 2 de julho de 1988, que dispõe sobre a preservação dos depósitos naturais de águas subterrâneas, regulamentada pelo Decreto Estadual 32.955 de 7 de fevereiro de 1991. O monitoramento da qualidade subsidia a proteção da água subterrânea. Existem vários tipos de monitoramento, sendo que a CETESB realiza o regional, preferencialmente em poços de abastecimento público de água. Os empreendimentos potencialmente poluidores executam o automonitoramento em poços rasos, que é considerado de caráter local, o que pode ser também implementado pela Prefeitura de Joinville. No caso do monitoramento da CETESB, além do critério de vulnerabilidade dos aquíferos,

foi considerada utilização da água subterrânea para poço de abastecimento público. São monitoradas, com frequência semestral, as águas de mais de 170 poços e nascentes dos diversos aquíferos do estado de São Paulo, distribuídos ainda nas diversas UGRHI (Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos). São analisados 40 parâmetros físicos, químicos e biológicos dessas águas, sendo que na Bacia do Alto Tietê – UGRHI 6 e no município de Paulínia são também monitoradas substâncias tóxicas orgânicas. Os objetivos desse monitoramento executado pela CETESB são:

1. Caracterizar a qualidade natural das águas subterrâneas;
2. Estabelecer Valores de Referência de Qualidade – VRQ para cada substância de interesse, por aquífero;
3. Avaliar as tendências das concentrações das substâncias monitoradas;
4. Identificar áreas com alterações de qualidade;
5. Subsidiar as ações da CETESB para prevenção e controle da poluição do solo e da água subterrânea;
6. Avaliar a eficácia dessas ações a longo termo;
7. Subsidiar a formulação de ações de gestão da qualidade do recurso hídrico subterrâneo, no âmbito dos comitês de bacias hidrográficas; e
8. Subsidiar a classificação das águas subterrâneas para o enquadramento e a cobrança pelo uso, a fim de efetuar sua proteção.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAIRD, R. B.; EATON, A. D.; RICE, E. W. (ed.). **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 22.ed. Washington, D. C. : AWWA; APHA; WEF, 2012.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria 2914, de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Diário Oficial a União**: seção 1, Brasília, DF, n. 239, p. 39-46, 14/dez./2011.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria de Consolidação nº 5 de 28 de setembro de 2017**. Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. Brasília, DF, 2017. Disponível em: http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2017/prc0005_03_10_2017.html. Acesso em: 09/mar./2020.

BRASIL. Ministério da Saúde. Agência Nacional de Segurança Sanitária. Resolução n. 274 de 22 de setembro de 2005. Dispõem sobre o regulamento técnico de características microbiológicas para água mineral natural e água natural. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 23/set./2005. Disponível em: http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/2005/res0274_22_09_2005.html . Acesso em: 09/mar./2020.

CUSTODIO, E.; LLAMAS, M.R. **Hidrologia subterrânea**. 2.ed., Barcelona: Omega. 2v. 1983.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E.C.; DEMÉTRIO, J. G. A. (coord.). **Hidrogeologia**: conceitos e aplicações. 3ª ed., Fortaleza: CPRM/LABHID, 2008.

FREITAS, M. A. de. **Hidrogeoquímica e isotopia da águas com alta salinidade do Sistema Aquífero Ser-ra Geral na região do Alto Rio Uruguai, Brasil**. 2016. 195 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/22171>. Acesso em: 20 abr. 2021.

GHANEM, M. A. **Avaliação da qualidade da água subterrânea em Joinville, SC e seus riscos à saúde**. Orientador: Therezinha Maria Novais de Oliveira. 2009. 111 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade da Região de Joinville, Joinville, SC, 2009.

GIESEL, S. R. **Avaliação da água subterrânea na cidade de Joinville e seus possíveis impactos na saúde pública**. Orientador: Mônica Lopes Gonçalves. 2007. 82 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade da Região de Joinville, Joinville, SC, 2007.

GLOVER, C. R. **Irrigation water classification systems**. Las Cruces, Mexico: New Mexico State University 1996. (Guide A-116). Disponível em: <http://projects.mans.edu.eg/heepf/ilppp/courses/12/pdf%20course/37/a-116.pdf> . Acesso em: 24 abr. 2021.

GONÇALVES, M. L.; BARBOSA, B. C. R. A hidrogeologia da micro bacia hidrográfica do rio Mississipi (SC) In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS,12., 2002, Florianópolis. **Anais** [...] Florianópolis: ABAS, 2002.

GONÇALVES, M. L.; WAGNER, T. M.; CARVALHO, J. C.; VOLTZ, R. R. Caracterização da qualidade da água subterrânea da região da bacia hidrográfica do rio Cubatão, Joinville, SC. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 22., 2003, Joinville, **Anais** [...] Joinville, SC: ABES, 2003.

HEM, J. D. **Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water**. 3.ed. [Reston] : USGS, 1985. (U.S. Geological Survey Water-Supply Paper n. 2254).

MOREIRA-NORDMAN, L. M.; FERREIRA, C.; MAGALHÃES, L. A.; MELO, W. Z.; SILVA FILHO, E.; PANITZ, C.

M. N.; SANTIAGO, M. M. F.; SOUZA, C. F. Rain water chemistry in the coast of Brazil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GLOBAL AND REGIONAL ENVIRONMENTAL ATMOSPHERIC CHEMISTRY, 1989, Beijing, China. **Anais**[...]. China: [s.n.], 1987.

MORUZZI, R. B.; REALI, M. A. P. Oxidação e remoção de ferro e manganês em águas para fins de abastecimento público ou industrial: uma abordagem geral. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 4, n. 1, p. 29-43, 2012.

PIPER, A. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. **Eos Transactions AGU**, American Geophysical Union, Washington, D.C., v. 25, n. 6, p. 914-928, 1944. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/toc/23249250a/1944/25/6> . Acesso em: 24 abr. 2021.

REBOUÇAS, A. C. **Le problème de l'eau dans la zone semi-aride du Brésil- Evaluation des res-sources, orientation pour la mise en valeur**: 1973. 285 f. Tese (Doutorado) - Université de Strasbourg, France, Strasbourg, 1973.

RICHARDS, L. A. (ed.) Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. **United States Department Agricultura Handbook**, Washington, D.C., n. 60, 1954. Disponível em: https://efotg.sc.egov.usda.gov/references/Public/AZ/HB60_saline_alkali_soils.pdf . Acesso em: 24 abr. 2021

SANTIAGO, M. M. F. **Mecanismos de salinização em regiões semi-áridas**: estudo dos açudes Pereira de Miranda e Caxitoré no Ceará. 1984. 176 f. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1984.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL –CPRM. **Sistema de Informações de Águas Subterrâneas – SIAGAS**. [Brasília, DF]: CPRM, 2021. Disponível em: <http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/>. Acesso em: 09 ago. 2021.

STIFF, H.A. Jr. The interpretation of chemical water analysis by means of patterns. **Journal of Petroleum Technology**, Society of Petroleum Engineers, Richardson, Texas, v. 3, n. 10, p. 15-16, 1951.

RICHARDS, L. A. (ed.) – United States Salinity Laboratory Staff. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. **USDA Handbooks**, v. 1, n. 60, United States Government Printing Office, Washington, D.C., 1954. Disponível em: https://efotg.sc.egov.usda.gov/references/Public/AZ/HB60_saline_alkali_soils.pdf . Acesso em: 24 abr. 2021.

7. RESPONSÁVEIS TÉCNICOS

Marcos Alexandre de Freitas

Geólogo DSc
CREA RS 068952
RN 2218579863

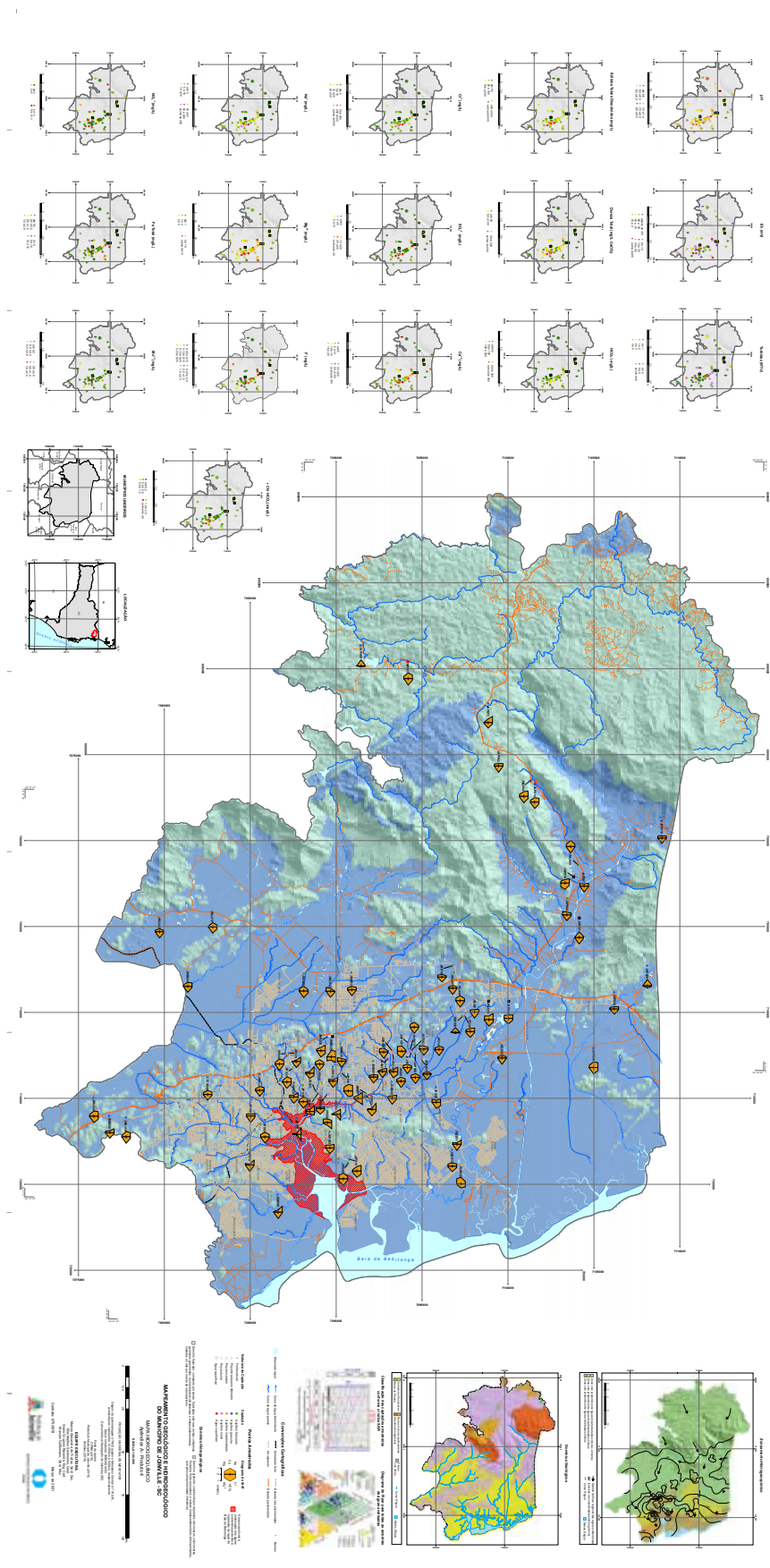
Marcelo Goffermann

Geólogo MSc
CREA SC 063873-7
RN 2200017715

Eliel Martins Senhorinho

Geólogo
CREA RS 072512
RN 2201074771

8. APÊNDICE A – MAPA HIDROGEOQUÍMICO DO MUNICÍPIO DE JOINVILLE



9. ANEXO A – QUADRO RESUMIDO DOS RESULTADOS ANALÍTICOS

O quadro resumido dos resultados físicos químicos em formato XLSX, ao que se refere este anexo, está disponível em meio digital no conteúdo de mídia (HD externo) pertencente ao conjunto de dados entregue à Prefeitura Municipal de Joinville no âmbito deste projeto.

10. ANEXO B – LAUDOS FÍSICO-QUÍMICOS ORIGINAIS

A coleção de laudos físicos-químicos originais, a qual se refere este anexo, está disponível em meio digital no conteúdo de mídia (HD externo) pertencente ao conjunto de dados entregue à Prefeitura Municipal de Joinville no âmbito deste projeto.

O Produto P4 apresenta os resultados do estudo hidrogeoquímico realizado no âmbito do Projeto Mapa Geológico e Hidrogeológico de Joinville. O trabalho foi baseado na realização de análises físico-químicas completas e na compilação de informações existentes na Base SIAGAS. Para a realização dos ensaios laboratoriais foram amostrados 30 poços tubulares, 18 poços de pequeno diâmetro, 5 poços escavados, 6 captações de fontes e uma água superficial. O mapeamento hidrogeoquímico tem por finalidade identificar e quantificar as principais propriedades e constituintes das águas subterrâneas, procurando estabelecer uma relação com o meio físico e enquadrá-las segundo os padrões de potabilidade e adequabilidade ao uso.

A interpretação dos resultados e suas conclusões estão especializadas em um mapa hidrogeoquímico na escala 1:50.000, que também compõe um SIG. Os resultados analíticos originais das análises realizadas pelo laboratório contratado pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM acompanham este produto em formato digital.

Contrato SEI N° 1621270-SAP.GABE/SAP.USU/SAP.USU.ADI

Serviço Geológico do Brasil – CPRM
Superintendência Regional de Porto Alegre
Rua Banco da Província, 105 – Santa Tereza
Porto Alegre – RS – CEP: 90840-030
Tel.: (51) 3406-7300