

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS
PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E
SANEAMENTO AMBIENTAL

AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS HIDROQUÍMICAS, DA QUALIDADE E
DO TEOR DE SÓDIO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DOS PRINCIPAIS
SISTEMAS AQUÍFEROS DO RIO GRANDE DO SUL

TAILANA BUBOLZ JESKE

Porto Alegre

2022

TAILANA BUBOLZ JESKE

**AValiação das Características Hidroquímicas, da Qualidade e
do Teor de Sódio das Águas Subterrâneas dos Principais
Sistemas Aquíferos do Rio Grande do Sul**

Dissertação submetido ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental apresentado como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientador (a): Prof. Dr. Pedro Antonio Roehé Reginato

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Porto Alegre

2022

CIP - Catalogação na Publicação

Jeske, Tailana Bubolz
AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS HIDROQUÍMICAS, DA
QUALIDADE E DO TEOR DE SÓDIO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS
DOS PRINCIPAIS SISTEMAS AQUÍFEROS DO RIO GRANDE DO SUL
/ Tailana Bubolz Jeske. -- 2022.
107 f.
Orientador: Pedro Antonio Roehe Reginato.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas,
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e
Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2022.

1. Padrões de potabilidade. 2. Águas subterrâneas.
3. Constituintes principais. 4. Avaliação de risco. 5.
Sódio. I. Reginato, Pedro Antonio Roehe, orient. II.
Titulo.

TAILANA BUBOLZ JESKE

**AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS HIDROQUÍMICAS, DA QUALIDADE E
DO TEOR DE SÓDIO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DOS PRINCIPAIS
SISTEMAS AQUÍFEROS DO RIO GRANDE DO SUL**

Dissertação submetido ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental apresentado como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Aprovado em 24 de setembro de 2022.

Prof. Dr. Pedro Antonio Roehe Reginato
Orientador

Prof^a. Dra. Lucia Ribeiro Rodrigues
Examinadora (IPH – UFRGS)

Prof. Dr. Tiago de Vargas
Examinador (IPH – UFRGS)

Prof. Dra. Camila de Vasconcelos Müller Athayde
Examinadora (UFPR)

Porto Alegre

2022

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Pedro, que disponibilizou seu conhecimento e tempo na elaboração deste trabalho.

Ao CNPq pela concessão da bolsa de mestrado.

Ao Serviço Geológico do Brasil (CPRM), em especial ao Eliel, pelo fornecimento de dados para o desenvolvimento deste trabalho.

Às instituições, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), por proporcionarem o ambiente para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (PPGRHSA), pelo profissionalismo e ensino de excelência.

À minha família e aos meus amigos, sou grata pelo incentivo.

Ao Universo.

Muito obrigada!

RESUMO

Este trabalho avaliou dados hidroquímicos de poços dos principais sistemas aquíferos no estado do Rio Grande do Sul (RS), procurando identificar variações na composição das águas desses poços e entender os processos responsáveis por essas alterações com base na avaliação dos constituintes principais, razões iônicas e aspectos hidrogeológicos. Além disso, avaliou-se a qualidade de água para consumo com destaque a alguns parâmetros (cloreto, sódio, sulfato e sólidos totais dissolvidos), constantes da Portaria GM/MS nº 888 de 2021 e Resolução CONAMA 396/2008 e para o sódio, avaliou-se o risco à saúde humana por meio do cálculo do quociente de perigo não carcinogênico do Manual de Avaliação da Saúde Humana da U.S. EPA. Ao todo foram analisados 4.687 dados hidrogeoquímicos de poços tubulares que captam águas nos Aquíferos Permianos (AP), Sistema Aquífero Embasamento Cristalino (SAEC), Sistema Aquífero Guarani (SAG), Sistema Aquífero Quaternário Costeiro (SAQC), Sistema Aquífero Palermo - Rio Bonito (SAPRB) e Sistema Aquífero Serra Geral (SASG). Deste total, 166 poços apresentam condições inadequadas ao consumo, quanto aos parâmetros avaliados. Com base na distribuição espacial dos poços que ultrapassam ao menos um dos parâmetros investigados, foi possível observar, para os elementos cloreto, sódio e sulfato, que as amostras estão concentradas em pontos geográficos específicos dos Sistemas Aquíferos. Para o elemento sódio, as altas concentrações no SASG podem estar relacionadas com misturas de águas com os aquíferos SAG e pré-SAG. Para o SAG, as altas concentrações também podem estar relacionadas com misturas de águas do pré-SAG, além da presença de argilo-minerais presentes nas rochas das formações geológicas do SAG. As altas concentrações de sódio nos AP e no SAPRB podem estar relacionadas a dissolução de halita; e troca de cátions entre as águas subterrâneas e os argilo-minerais presentes nas rochas das unidades Irati e Sub-grupo Estrada Nova. Já as altas concentrações de sódio no SAQC podem estar relacionadas a grande influência dos aerossóis marinhos na água da chuva que incide sobre a área. Todos os sistemas aquíferos apresentam mais de 30 % dos poços com valores de sódio acima da recomendação da U.S. EPA sobre a concentração de sódio na água potável menor que 20 mg/L para indivíduos com dieta restritiva de sódio (500 mg/dia). Apenas 10 poços no RS apresentaram indicações de risco não carcinogênico. Enfim, os resultados demonstram que as altas concentrações de sódio na água subterrânea estão relacionadas a distintas características dos Sistemas Aquíferos.

Palavras-chave: Padrões de potabilidade; Águas subterrâneas; Constituintes principais; Razões iônicas; Avaliação de risco; Saúde humana; Sódio.

ABSTRACT

This work evaluated hydrochemical data from wells from the main aquifer systems in the state of Rio Grande do Sul (RS), seeking to identify variations in the water composition of these wells and to understand the processes responsible for these changes based on the evaluation of the main constituents, ionic ratios and hydrogeological. In addition, the quality of water for consumption was evaluated, highlighting some parameters (chloride, sodium, sulfate and total dissolved solids), contained in Ordinance GM/MS n° 888 of 2021 and CONAMA Resolution 396/2008 and for sodium, evaluated The risk to human health is calculated by calculating the non-carcinogenic hazard quotient from the US EPA Human Health Risk Assessment. Altogether, 4,687 hydrogeochemical data were analyzed from tubular wells that capture water in the Permian Aquitards (AP), Crystalline Basement Aquifer System (SAEC), Guarani Aquifer System (SAG), Coastal Quaternary Aquifer System (SAQC), Palermo - Rio Bonito Aquifer System (SAPRB) and Serra Geral Aquifer System (SASG). Of this total, 166 wells present inadequate conditions for consumption, regarding the parameters evaluated. Based on the spatial distribution of wells that exceed at least one of the parameters investigated, it was possible to observe, for the elements chloride, sodium and sulfate, that the samples are concentrated in specific geographic points of the Aquifer Systems. For the element sodium, the high concentrations in the SASG may be related to water mixtures with the SAG and pre-SAG aquifers. For the SAG, the high concentrations may also be related to pre-SAG water mixtures, in addition to the presence of clay-minerals present in the rocks of the geological formations of the SAG. The high sodium concentrations in the AP and SAPRB may be related to halite dissolution; and exchange of cations between groundwater and clay minerals present in the rocks of the Irati and Estrada Nova sub-groups. The high concentrations of sodium in the SAQC may be related to the great influence of marine aerosols in the rainwater that falls on the area. All aquifer systems have more than 30 % of wells with sodium values above the U.S. recommendation. EPA on drinking water sodium concentration less than 20 mg/L for subjects on a sodium-restricted diet (500 mg/day). Only 10 wells in RS showed indications of non-carcinogenic risk. Finally, the results demonstrate that high concentrations of sodium in groundwater are related to different characteristics of Aquifer Systems.

Keywords: Potability standards; groundwater; Main constituents; Ionic ratios; Risk assessment; Human health; Sodium.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Limites entre as províncias geológicas que constituem o Estado do Rio Grande do Sul.....	20
Figura 2 - Mapa Hidrogeológico do Estado do Rio Grande do Sul	22
Figura 3 - Fluxograma do cálculo do Índice Relativo de Risco (IRR) para ingestão de água superficial in natura, aplicado para as bacias hidrográficas que não apresentaram risco, quando comparadas com os Valores Máximos Permitidos (VMPs)	42
Figura 4 - Diagrama da sequência metodológica e das atividades desenvolvidas	49
Figura 5 - Percentual de poços por sistema aquífero.....	53
Figura 6 - Mapa da localização dos poços com informação de Sódio (Na) no Estado do Rio Grande do Sul	54
Figura 7 - Mapa da concentração de Sódio nos poços dos Aquitardos Permianos	69
Figura 8 - Mapa da concentração de Sódio nos poços do Sistema Aquífero Embasamento Cristalino	72
Figura 9 - Mapa da concentração de Sódio nos poços do Sistema Aquífero Guarani - área aflorante.....	75
Figura 10 - Mapa da concentração de Sódio nos poços do Sistema Aquífero Guarani - área confinada.....	77
Figura 11 - Mapa da concentração de Sódio nos poços do Sistema Aquífero Quaternário Costeiro.....	81
Figura 12 - Mapa da concentração de Sódio nos poços do Sistema Aquífero Palermo – Rio Bonito	84
Figura 13 - Mapa da concentração de Sódio nos poços do Sistema Aquífero Serra Geral	87
Figura 14 - Concentração de sódio dos poços em relação ao Valores Máximos Permitidos (VMP) da Portaria GM/MS Nº 888 (BRASIL, 2021).	89
Figura 15 - Usos dos poços com concentração de sódio acima do Valores Máximos Permitidos (VMP) da Portaria GM/MS Nº 888 (BRASIL, 2021).....	89
Figura 16 - Mapa com as amostras que atendem e ultrapassam os Valores Máximos Permitidos (VMP) de acordo com a Portaria GM/MS nº 888 de 2021.	90
Figura 17 - Concentração de sódio dos poços em relação à recomendação da U.S. EPA.	92
Figura 18 - Risco não carcinogênico (NHQ) para as concentrações de sódio dos poços dos Sistemas Aquíferos	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos constituintes dissolvidos nas águas subterrâneas	26
Tabela 2 – Valor Máximo Permitido (VMP) e Valor de Investigação (VI) para parâmetros com ocorrência em águas subterrâneas	39
Tabela 3 - Parâmetros de exposição sugeridos para ingestão de água contaminada para os cenários urbano e rural	43
Tabela 4 - Valores estatísticos para os parâmetros de pH, Condutividade Elétrica (CE) e Sólidos Totais dissolvidos (STD) para os Aquitardos Permianos.....	55
Tabela 5 - Concentrações (mg/L) dos principais constituintes dos Aquitardos Permianos	56
Tabela 6 - Principais Razões Iônicas para os Aquitardos Permianos.....	56
Tabela 7 - Valores estatísticos para os parâmetros de pH, Condutividade Elétrica (CE) e Sólidos Totais dissolvidos (STD) para o Sistema Aquífero Embasamento Cristalino...	57
Tabela 8 - Concentrações (mg/L) dos principais constituintes do Sistema Aquífero Embasamento Cristalino.....	57
Tabela 9 - Principais Razões Iônicas para o Sistema Aquífero Embasamento Cristalino	58
Tabela 10 - Valores estatísticos para os parâmetros de pH, Condutividade Elétrica (CE) e Sólidos Totais dissolvidos (STD) para o Sistema Aquífero Guarani - área aflorante....	58
Tabela 11 - Concentrações (mg/L) dos principais constituintes do Sistema Aquífero Guarani - área aflorante	59
Tabela 12 - Principais Razões Iônicas para o Sistema Aquífero Guarani - área aflorante	59
Tabela 13 - Valores estatísticos para os parâmetros de pH, Condutividade Elétrica (CE) e Sólidos Totais dissolvidos (STD) para o Sistema Aquífero Guarani - área confinada ..	60
Tabela 14 - Concentrações (mg/L) dos principais constituintes do Sistema Aquífero Guarani - área confinada.....	61
Tabela 15 - Principais Razões Iônicas para o Sistema Aquífero Guarani - área confinada	61
Tabela 16 - Valores estatísticos para os parâmetros de pH, Condutividade Elétrica (CE) e Sólidos Totais dissolvidos (STD) para o Sistema Aquífero Quaternário Costeiro	61
Tabela 17 - Concentrações (mg/L) dos principais constituintes do Sistema Aquífero Quaternário Costeiro.....	62

Tabela 18 - Principais Razões Iônicas para o Sistema Aquífero Quaternário Costeiro .	63
Tabela 19 - Valores estatísticos para os parâmetros de pH, Condutividade Elétrica (CE) e Sólidos Totais dissolvidos (STD) para o Sistema Aquífero Palermo – Rio Bonito.....	63
Tabela 20 - Concentrações (mg/L) dos principais constituintes do Sistema Aquífero Palermo – Rio Bonito	64
Tabela 21 - Principais Razões Iônicas para o Sistema Aquífero Palermo – Rio Bonito	65
Tabela 22 - Valores estatísticos para os parâmetros de pH, condutividade Elétrica (CE) e Sólidos Totais dissolvidos (STD) para o Sistema Aquífero Serra Geral.....	65
Tabela 23 - Concentrações (mg/L) dos principais constituintes do Sistema Aquífero Serra Geral	66
Tabela 24 - Principais Razões Iônicas para o Sistema Aquífero Serra Geral.....	66
Tabela 25 - Perfis construtivos de poços com concentração elevada de sódio - Aquitardos Permianos	68
Tabela 26 - Perfis construtivos de poços com concentração elevada de sódio - Sistema Aquífero Embasamento Cristalino	71
Tabela 27 - Perfis construtivos de poços com concentração elevada de sódio – Sistema Aquífero Guarani - área aflorante.....	74
Tabela 28 - Perfis construtivos de poços com concentração elevada de sódio – Sistema Aquífero Guarani - área confinada	78
Tabela 29 - Perfis construtivos de poços com concentração elevada de sódio - Sistema Aquífero Quaternário Costeiro	80
Tabela 30 - Perfis construtivos de poços com concentração elevada de sódio - Sistema Aquífero Palermo – Rio Bonito.....	83
Tabela 31 - Perfis construtivos de poços com concentração elevada de sódio - Sistema Aquífero Serra Geral	86
Tabela 32 - Número de poços que ultrapassam os padrões de potabilidade selecionados conforme a Resolução CONAMA 396/2008 e Portaria GM/MS nº 888 de 2021.....	88
Tabela 33 - Variação estatística do quociente de risco não carcinogênico (NHQ) do elemento Sódio para os Sistemas Aquíferos	92

LISTA DE SIGLAS

AP	Aquitardos Permianos
Ca	Cálcio
CE	Condutividade Elétrica
Cetesb	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
Cl	Cloreto
Conama	Conselho Nacional de Meio de Ambiente
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DRH	Departamento de Recursos Hídricos
Fepam	Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler
IRR	Índice Relativo de Risco
K	Potássio
LQP	Limites de quantificação praticáveis
Mg	Magnésio
MS	Ministério da Saúde
Na	Sódio
OMS	Organização Mundial da Saúde
pH	Potencial Hidrogeniônico
RfD	Dose de referência para via de ingresso
RS	Rio Grande do Sul
SAEC	Sistema Aquífero Embasamento Cristalino
SAG	Sistema Aquífero Guarani
SAQC	Sistema Aquífero Quaternário Costeiro
SAPRB	Sistema Aquífero Palermo – Rio Bonito
SASG	Sistema Aquífero Serra Geral
STD	Sólidos Totais Dissolvidos
Siagas	Sistema de Informações de Águas Subterrâneas
Siout RS	Sistema de Outorga de Água do Rio Grande do Sul
SO ₄	Sulfato
T	Temperatura

U.S. EPA *United States Environmental Protection Agency*

VI Valor de Investigaçãõ

VMP Valor Máximo Permitido

Sumário

1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS.....	17
2.1. Objetivo Geral.....	17
2.2. Objetivos Específicos	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1. ÁGUA SUBTERRÂNEA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.....	18
3.1.1. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS.....	19
3.1.2. CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLOGICAS	21
3.1.2.1. Aquitardos Permianos (AP).....	21
3.1.2.2. Sistema Aquífero Embasamento Cristalino (SAEC).....	22
3.1.2.3. Sistema Aquífero Guarani (SAG)	23
3.1.2.4. Sistema Aquífero Quaternário Costeiro (SAQC)	24
3.1.2.5. Sistema Aquífero Palermo - Rio Bonito (SAPRB)	25
3.1.2.6. Sistema Aquífero Serra Geral (SASG).....	25
3.2. COMPOSIÇÃO E QUALIDADE DA ÁGUA SUBTERRÂNEA.....	26
3.2.1. Hidroquímica dos Principais Sistemas Aquíferos do Estado do RS	32
3.2.1.1. Aquitardos Permianos (AP).....	33
3.2.1.2. Sistema Aquífero Embasamento Cristalino (SAEC).....	33
3.2.1.3. Sistema Aquífero Guarani (SAG)	34
3.2.1.4. Sistema Aquífero Quaternário Costeiro (SAQC)	35
3.2.1.5. Sistema Aquífero Palermo - Rio Bonito (SAPRB)	36
3.2.1.6. Sistema Aquífero Serra Geral (SASG).....	37
3.3. ÁGUA SUBTERRÂNEA PARA ABASTECIMENTO E SAÚDE PÚBLICA .	38
3.3.1. Legislação Federal e Estadual	39
3.3.2. Métodos de Avaliação do Risco à Saúde Humana.....	41
3.3.3. Efeitos do Sódio na Saúde Humana	44

4. MATERIAIS E MÉTODOS	49
4.1. Levantamento de Dados Hidroquímicos e Hidrogeológicos	49
4.2. Análise de Dados e Seleção dos Sistemas Aquíferos	50
4.3. Identificação das Principais Características Hidroquímicas dos Sistemas Aquíferos	50
4.4. Análise e caracterização da ocorrência de sódio nos Sistemas Aquíferos.....	51
4.5. Avaliação da Qualidade de Água para Consumo	51
4.6. Avaliação do sódio em relação à saúde humana.....	51
5. RESULTADOS.....	53
5.1. Levantamento e análise dos Dados Hidroquímicos e Hidrogeológicos e Seleção dos Sistemas Aquíferos.....	53
5.2. Identificação das Principais Características Hidroquímicas dos Sistemas Aquíferos	55
5.2.1. Aquitardos Permianos (AP)	55
5.2.2. Sistema Aquífero Embasamento Cristalino (SAEC)	56
5.2.3. Sistema Aquífero Guarani (SAG) - área aflorante	58
5.2.4. Sistema Aquífero Guarani (SAG) - área confinada	60
5.2.5. Sistema Aquífero Quaternário Costeiro (SAQC).....	61
5.2.6. Sistema Aquífero Palermo – Rio Bonito (SAPRB)	63
5.2.7. Sistema Aquífero Serra Geral (SASG).....	65
5.3. Análise e caracterização da ocorrência de sódio nos Sistemas Aquíferos.....	67
5.3.1. Aquitardos Permianos (AP)	67
5.3.2. Sistema Aquífero Embasamento Cristalino (SAEC)	70
5.3.3. Sistema Aquífero Guarani (SAG) - área aflorante	73
5.3.4. Sistema Aquífero Guarani (SAG) - área confinada	76
5.3.5. Sistema Aquífero Quaternário Costeiro (SAQC).....	79
5.3.6. Sistema Aquífero Palermo – Rio Bonito (SAPRB)	82
5.3.7. Sistema Aquífero Serra Geral (SASG).....	85

5.4. Avaliação da Qualidade de Água para Consumo	88
5.5. Avaliação do sódio em relação à saúde humana.....	91
5.6. Discussão dos resultados	93
5.6.1. Aquíferos Permianos (AP)	93
5.6.2. Sistema Aquífero Embasamento Cristalino (SAEC)	94
5.6.3. Sistema Aquífero Guarani (SAG)	94
5.6.4. Sistema Aquífero Quaternário Costeiro (SAQC).....	95
5.6.5. Sistema Aquífero Palermo – Rio Bonito (SAPRB)	96
5.6.6. Sistema Aquífero Serra Geral (SASG).....	96
5.6.7. Sódio em relação à saúde humana.....	97
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	98
Referências	100

1. INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas são essenciais para a vida, pois abastecem as cidades e o campo, servem de insumo para diversas atividades econômicas e, também, por sustentarem vários sistemas aquáticos. Nos aquíferos encontram-se 97% das águas doces e líquidas do planeta, o que os torna o maior reservatório de água potável da humanidade, portanto as águas subterrâneas são consideradas críticas para a segurança hídrica global (HIRATA *et al.*, 2019).

Muitos solos são ricos em sódio, pois o sódio é um elemento alcalino muito abundante na crosta terrestre, com cerca de 2,8%. Além disso, devido à sua alta solubilidade, pode ser encontrado dissolvido em diferentes concentrações na água. De modo geral, as águas subterrâneas contêm concentrações mais elevadas de sódio do que as águas superficiais (PACHECO, 2008).

As águas subterrâneas normalmente são potáveis, porém há problemas de altas concentrações naturais de determinados elementos que podem inviabilizar seu uso para consumo humano e animal (FREITAS, 2010). Segundo a Portaria GM/MS nº 888 de 2021, o VMP de sódio na água para consumo humano é de 200 mg/L (BRASIL, 2021).

A caracterização hidroquímica é um importante método para avaliação da composição das águas. A interpretação de análises físico-química e bacteriológicas, juntamente com as características da área podem fornecer informações para definir a qualidade das águas (ARAÚJO, 2006).

A água mineral da marca Crystal vendida no Rio Grande do Sul mudou de fonte, em 2017, após uma série de polêmicas sobre o alto teor de sódio. Conforme Sfredo (2017), a água, que era coletada no município de Ijuí, em decorrência das características naturais da origem, caracterizava-se por possuir um teor de sódio de 103 mg/L. Já, também em decorrência das características naturais da origem, a nova fonte tem 80% menos sódio em relação a envasada na Fonte Ijuí.

No município de São Gabriel, localizado na Campanha gaúcha, próximo da fronteira com o Uruguai, conforme o estudo desenvolvido por Goffermann (2013), os Sistemas Aquíferos que sofrem influência das formações Irati e Sub-grupo Estrada Nova são as que apresentam maiores concentrações de sódio na região. As altas concentrações de sódio podem estar relacionadas a dois processos geoquímicos distintos: dissolução de

halita; e troca de cátions entre as águas subterrâneas e os argilo-minerais presentes nas rochas das unidades Irati e Sub-grupo Estrada Nova.

O *Drinking Water Advisory* da U.S. EPA recomenda que a concentração de sódio na água potável não exceda a faixa de 30 a 60 mg/L por causa de possíveis efeitos adversos no sabor em concentrações mais altas (U.S. EPA, 2003). A Diretiva de Água Potável da União Europeia (1998) fornece um valor do parâmetro de 200 mg de sódio por litro. Segundo as diretrizes para a qualidade da água potável do Canadá, o objetivo estético para sódio na água potável é ≤ 200 mg/L (HEALTH CANADA, 2020). Conforme o *Australian drinking water guidelines* (NHMRC, 2011), as diretrizes australianas de água potável têm um nível de orientação estética para o sódio com base no sabor de 180 mg/L.

O consumo excessivo em sódio está associado ao aumento da pressão arterial e às doenças cardiovasculares consequentes, a doenças renais e ao risco de desmineralização óssea (DE WARDENER; MACGREGOR, 2002). Nos últimos anos, as doenças crônicas não-transmissíveis (DCNTs) tornaram-se a principal causa de mortes e adoecimentos no mundo e, dentre os fatores de risco dietético, o consumo excessivo de sódio representa o maior impacto global (AFSHIN *et al.*, 2019).

Este trabalho avalia os principais constituintes hidroquímicos, a qualidade e a ocorrência de sódio nas águas subterrâneas dos principais sistemas aquíferos do estado do Rio Grande do Sul. No caso do teor de sódio, foi feita uma análise sobre as concentrações e as possíveis implicações na saúde humana.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Avaliar as características hidroquímicas, a qualidade e o teor de sódio das águas subterrâneas dos principais sistemas aquíferos do estado do Rio Grande do Sul.

2.2. Objetivos Específicos

- Identificar as características hidroquímicas dos principais Sistemas Aquíferos do estado do Rio Grande do Sul.
- Avaliar a qualidade de água para consumo com destaque a alguns parâmetros (cloreto, sódio, sulfato e sólidos totais dissolvidos) constantes da Portaria GM/MS nº 888 de 2021 e Resolução CONAMA 396/2008.
- Quantificar as concentrações de sódio existentes nos principais Sistemas Aquíferos do estado do Rio Grande do Sul.
- Analisar as concentrações de sódio encontradas nas águas subterrâneas com recomendações sobre a concentração de sódio na água potável.
- Avaliar o risco à saúde humana por meio do cálculo, para o sódio, do quociente de perigo não carcinogênico (NHQ) do Manual de Avaliação da Saúde Humana da U.S. EPA.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta revisão bibliográfica, são abordadas as características geológicas e hidrogeológicas dos sistemas aquíferos do Estado do Rio Grande do Sul (Capítulo 3.1), a composição e qualidade da água subterrânea, onde são explanados os constituintes principais e constituintes traços presentes nas águas subterrâneas, além das características hidroquímicas dos principais Sistemas Aquíferos do Estado do Rio Grande do Sul (Capítulo 3.2). Por fim, no Capítulo 3.3, são apresentados tópicos sobre a água subterrânea para abastecimento e saúde pública, como: legislações, métodos de avaliação de risco à saúde humana e efeitos do sódio na saúde humana.

3.1. ÁGUA SUBTERRÂNEA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

Os problemas dos recursos hídricos no estado do Rio Grande do Sul, entre eles a contaminação dos mananciais superficiais e as frequentes estiagens ocorridas, intensificaram a busca por águas subterrâneas (MACHADO; FREITAS, 2005).

No Rio Grande do Sul, principalmente em municípios com sedes de pequeno a médio porte, os mananciais subterrâneos apresentam grande importância no abastecimento urbano. Segundo Atlas Águas, 63% das sedes urbanas do Estado são abastecidas exclusivamente por mananciais subterrâneos, o que corresponde a 311 municípios e 12% da população do Estado (ANA, 2021). A dependência do Estado em relação à água subterrânea é demonstrada pelo fato de que 63% das municipalidades são total ou parcialmente abastecidas por tal recurso. Apesar dessa dependência, conforme a Secretaria do Meio Ambiente (2007) observam-se situações críticas de disponibilidade de água subterrânea nas Bacias Hidrográficas dos rios Gravataí, Sinos, Caí e Lago Guaíba e situações críticas em termos de qualidade da água subterrânea nas Bacias Hidrográficas dos rios Gravataí, Sinos, Vacacaí, Vacacaí Mirim, Baixo Jacuí, Lago Guaíba, Pardo, Mirim São Gonçalo, Turvo-Santa-Rosa -Santo Cristo, Ibicuí, Santa Maria, Negro e Várzea.

Segundo Roisenberg *et al.* (2007), a distribuição dos poços no Rio Grande do Sul não é homogênea e a grande maioria situa-se na Depressão Central, explorando aquíferos porosos Mesozoicos e, principalmente, o Sistema Aquífero Guarani. Devido à agricultura extensiva e à intensa industrialização, a degradação da qualidade das águas superficiais no Estado tem conduzido, em especial no eixo Caxias do Sul-Porto Alegre, ao crescente uso de água subterrânea para abastecimento público (Roisenberg *et al.*, 2007).

De acordo com a Sema (2022), o uso mais relevante de água subterrânea é o abastecimento público/consumo humano, representando 27,1% das vazões registradas no Siout RS. O uso para irrigação fica em segundo lugar, representando 11,1% das demandas totais para o Estado. O uso para dessedentação animal representa 2,3% do total dos usos subterrâneos e uso industrial representa 0,2%. A maior parte das vazões (59,3%) está indicada para a finalidade “Misto/Outros”, ou seja, usuários que indicaram mais de uma finalidade, ou nenhuma das finalidades principais.

3.1.1. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS

A Figura 1 apresenta os limites entre as províncias geológicas que constituem o Estado do Rio Grande do Sul e serão descritas a seguir.

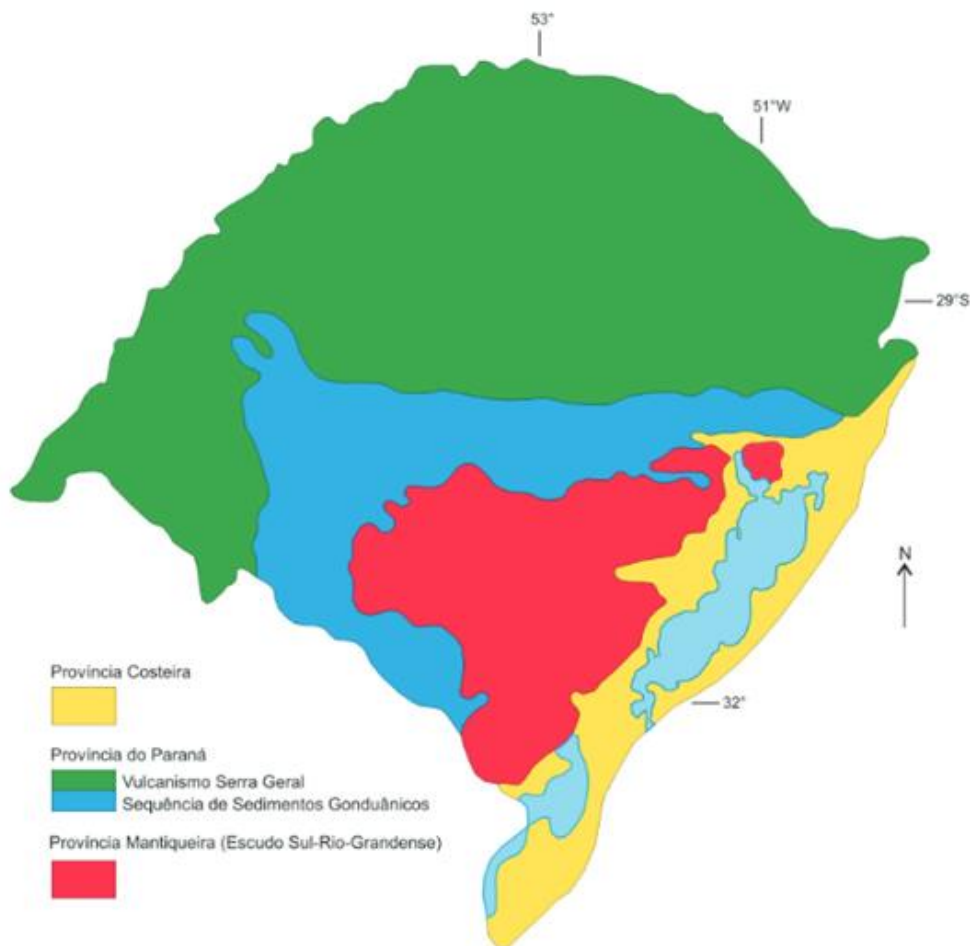
A região central do Estado é ocupada pelo Escudo Sul-Rio-Grandense, que é o resultado de processos de geração, amalgamação e deformação de frações de crosta continental e oceânica, cuja contribuição maior ocorreu em dois grandes ciclos orogênicos: Transamazônico (2,26-2,00 Ga) e Brasileiro (900-535 Ma). Quatro domínios geológicos do Escudo podem ser individualizados por suas diferenças estruturais, petroectônicas e isotópicas: Terreno Taquarembó, representante do Cráton Rio de La Plata; Terreno São Gabriel, Terreno Tijucas e o Batólito Pelotas, constituintes do Cinturão Dom Feliciano (HARTMANN *et al.*, 2007).

O Escudo Sul-Rio-Grandense é constituído por associações de rochas ígneas de composição predominantemente granítica, as quais, geralmente, são intrusivas em um conjunto de rochas metamórficas (gnaisses, rochas máficas e ultramáficas de assoalho oceânico, xistos e mármore), que estão recobertas por rochas sedimentares intercaladas a rochas vulcânicas com cerca de 5.000 m de espessura (WILDNER; LOPES, 2010).

A Bacia do Paraná tem aproximadamente 1.400.000 km² e forma alongada segundo SW-NE, ocupando parte dos territórios do Brasil, Argentina, Uruguai e Paraguai (ZALÁN *et al.*, 1990). Os ciclos de preenchimento da bacia são organizados em supersequências, denominadas: Rio Ivaí, Paraná, Gondwana I, Gondwana II e Gondwana III (MILANI, 1997). Sendo que as três últimas ocorrem no Estado do Rio Grande do Sul, ocupando a área central e norte do mesmo. A Cobertura Sedimentar Gonduânica implantada no Siluriano Inferior, na Bacia do Paraná, marcou o início de uma nova sedimentogênese, onde formaram-se, até o Jurássico, extensas e espessas

sequências de sedimentos de granulação basicamente fina, com intercalações de calcários e raros conglomerados (KAUL, 1990).

Figura 1 - Limites entre as províncias geológicas que constituem o Estado do Rio Grande do Sul



Fonte: Adaptado de Porcher e Lopes (2000).

A região litorânea do Estado é ocupada pela Planície Costeira, onde as fácies sedimentares dessa região podem ser entendidas como tendo se acumulado como produtos de processos desenvolvidos em ambientes pertencentes, fundamentalmente, a dois tipos de sistemas deposicionais: Sistema de Leques Aluviais e Sistema tipo Laguna-Barreira (VILLWOCK, 1984). A natureza dos sedimentos nestes dois sistemas deposicionais, durante o Cenozoico, foi formado por processos internos, específicos de cada sistema e, por processos externos relativos ao comportamento tectônico, variações climáticas e flutuações do nível do mar que atuaram na região costeira (VILLWOCK; TOMAZELLI, 2005).

O Sistema deposicional de Leques Aluviais, que compreende o conjunto de fácies sedimentares resultantes de processos de transporte associados aos ambientes de encosta das terras altas, é subdividido em três subsistemas: leques alimentados pelo Escudo Pré-cambriano, leques alimentados pelo Planalto e leques alimentados pela Barreira I (VILLWOCK; TOMAZELLI, 2005).

Além do sistema deposicional de leques aluviais desenvolvido a oeste, para o leste, desenvolveu-se a Província Costeira do Rio Grande do Sul, constituída por quatro sistemas deposicionais do tipo “laguna-barreira”, três de idade pleistocênica (I, II e III) e um de idade holocênica (IV), que foram formados a partir de picos de transgressões, seguidos de eventos regressivos e resultaram na deposição dos diferentes tipos de sedimentos e de matéria orgânica em ambientes distintos, tais como: eólico, praiial, lagunar, marinho, paludal (VILLWOCK; TOMAZELLI, 2005).

3.1.2. CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS

A Figura 2 apresenta o mapa hidrogeológico do RS. As características hidrogeológicas dos principais sistemas aquíferos serão descritas a seguir.

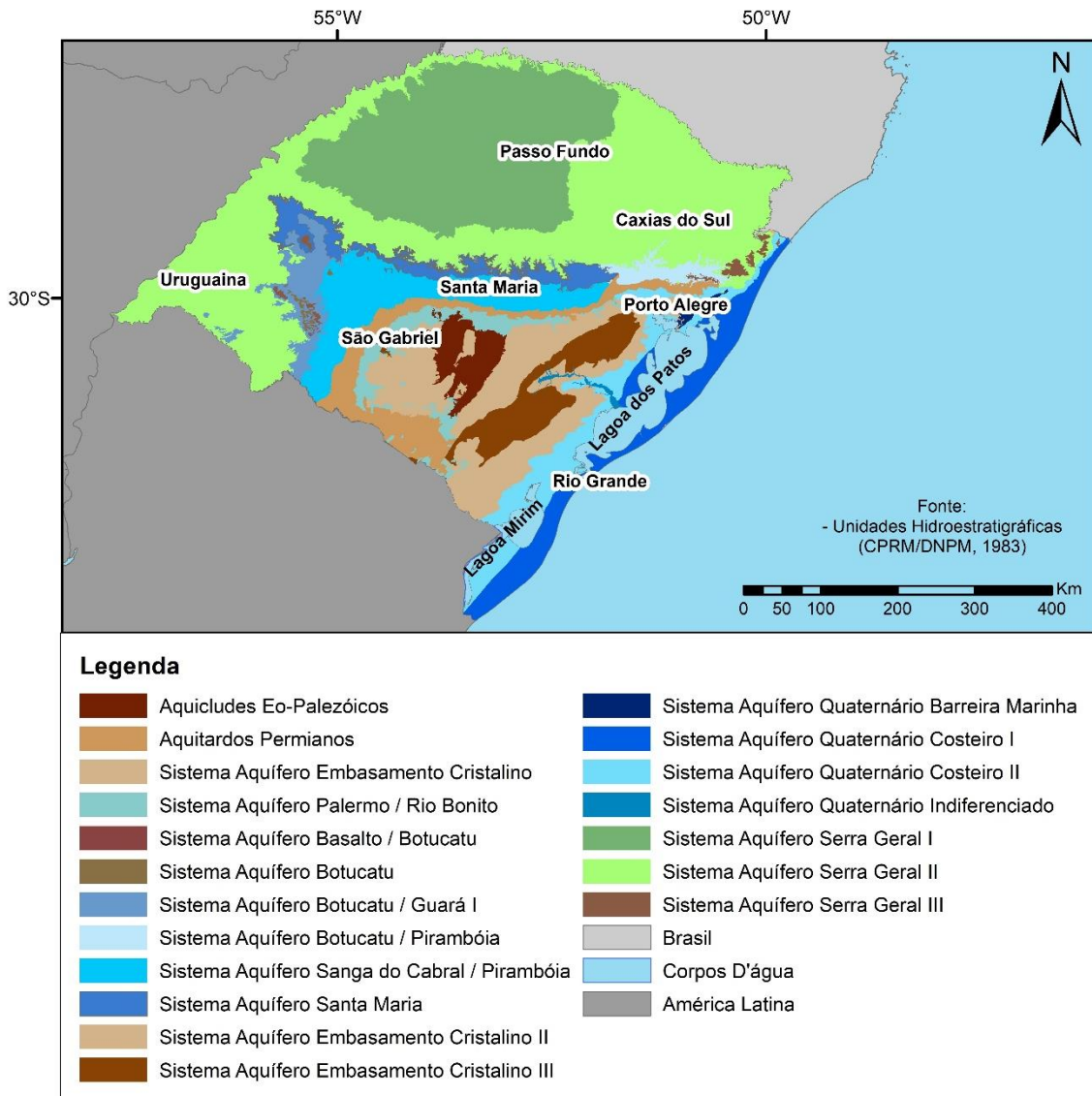
3.1.2.1. *Aquitardos Permianos (AP)*

Os Aquitardos Permianos estão localizados na Depressão Periférica, circundando o Embasamento Cristalino em uma estreita faixa de 18.048 km², desde Candiota (sul do Estado) até Taquara (leste do Estado). São constituídos por áreas com siltitos argilosos, argilitos cinza-escuros, folhelhos pirobetuminosos e pequenas camadas de calcários e arenitos finos. As águas subterrâneas podem ser salobras ou duras com a presença de grande quantidade de sais de cálcio e de magnésio (FREITAS, 2010; MACHADO; FREITAS, 2005).

Os Aquitardos Permianos compreendem as formações Palermo, Irati, Subgrupo Estrada Nova e Formação Rio do Rasto. Os poços presentes nos Aquitardos Permianos geralmente apresentam vazões muito baixas ou são secos. As capacidades específicas são inferiores a 0,1 m³/h/m (FREITAS, 2010; MACHADO; FREITAS, 2005). São considerados como aquitardos por serem constituídos essencialmente de rochas sedimentares finas, porém um aumento da circulação de água pode ocorrer em lentes calcárias, camadas de arenitos, planos entre os folhelhos e fraturas. Associados à mineralogia destas rochas, os Aquitardos Permianos, em função do ambiente deposicional marinho, podem se constituir em horizontes contaminantes do Sistema Aquífero Rio

Bonito, especialmente quando este está em contato com os folhelhos pirobetuminosos da Formação Irati (HAUSTMAN, 1995).

Figura 2 - Mapa Hidrogeológico do Estado do Rio Grande do Sul



Fonte: Elaboração própria.

3.1.2.2. Sistema Aquífero Embasamento Cristalino (SAEC)

O **Sistema Aquífero Embasamento Cristalino I** ocorre na região sul do Estado, entre Jaguarão e Pinheiro Machado, e na porção nordeste do Escudo Sul-Rio-Grandense, em Porto Alegre. É constituído por rochas graníticas muito fraturadas, com capacidades específicas geralmente inferiores a 0,5 m³/h/m. De modo geral, as águas subterrâneas apresentam salinidades muito baixas, com valores raramente superiores a 200 mg/L (FREITAS, 2010; MACHADO; FREITAS, 2005).

O Sistema Aquífero Embasamento Cristalino II ocorre em uma área de 64.538 km² no Embasamento Cristalino, e inclui municípios como Bagé, Caçapava do Sul, Encruzilhada do Sul e uma pequena porção de Porto Alegre. Compreende rochas graníticas, gnáissicas, andesitos, xistos, filitos e calcários, que localmente estão afetadas por fraturamentos e falhas (FREITAS, 2010; MACHADO; FREITAS, 2005). Do ponto de vista hidrogeológico, o domínio de rochas gnáissicas e granitoides não possui bons aquíferos. As vazões são consideradas baixas e estão sujeitas ao sistema de fraturamento e falhas, por isso para uma maior produtividade os poços devem estar localizados no cruzamento de fraturas (RIO GRANDE DO SUL, 2015). As capacidades específicas geralmente são inferiores a 0,5 m³/h/m, ocorrendo também poços secos. Em áreas onde há cobertura de sedimentos de origem marinha, as águas subterrâneas podem apresentar altos teores de sais dissolvidos, já nas demais áreas as salinidades são inferiores a 300 mg/L. As águas captadas em poços construídos nas rochas graníticas normalmente apresentam enriquecimento em flúor (FREITAS, 2010; MACHADO; FREITAS, 2005).

O Sistema Aquífero Embasamento Cristalino III está localizado nas porções mais elevadas do Embasamento Cristalino e é formado principalmente por rochas graníticas maciças, gnaisses pouco alterados. A perfuração de poços tubulares produtivos nessa unidade é impossibilitada devido à ausência de fraturas interconectadas, pequena espessura do manto de alteração e a condição topográfica desfavorável (FREITAS, 2010; MACHADO; FREITAS, 2005).

3.1.2.3. Sistema Aquífero Guarani (SAG)

O Sistema Aquífero Guarani ocorre no Rio Grande do Sul sob duas maneiras: aflorante e confinado. No Estado o sistema é representado por nove unidades hidroestratigráficas (Botucatu, Guará, Arenito Mata, Caturrita, Alemoa, Passo das Tropas 1 e 2, Sanga do Cabral e Piramboia), sendo compartimentado em quatro grandes blocos (Oeste, Leste, Central-Missões e Norte Alto Uruguai). Dependendo do compartimento o SAG será formado por duas ou mais unidades hidroestratigráficas (MACHADO; FREITAS, 2005).

A área aflorante é constituída por nove unidades hidroestratigráficas que ocorrem na região correspondente à depressão central do Rio Grande do Sul, entre os municípios de Santana do Livramento à oeste e Santo Antônio da Patrulha à leste. A área aflorante com maior produtividade é a unidade hidroestratigráfica Guará, com vazões que alcançam

mais de 100 m³/h, e capacidades específicas médias entre 2 e 4 m³/h/m (FREITAS, 2010; MACHADO; FREITAS, 2005).

A área confinada do SAG está situada entre a fronteira oeste até a região litorânea do Estado, sendo que o confinamento é dado pelas rochas vulcânicas da Formação Serra Geral. A unidade hidroestratigráfica Botucatu possui o principal aquífero da área confinada e os poços presentes na unidade podem operar com vazões superiores a 500 m³/h. As capacidades específicas variam de 5 a 10 m³/h/m na fronteira oeste do Estado, enquanto em outras regiões as capacidades específicas encontram-se entre 0,5 e 2 m³/h/m (FREITAS, 2010; MACHADO; FREITAS, 2005).

3.1.2.4. Sistema Aquífero Quaternário Costeiro (SAQC)

Conforme Lisboa *et al.* (2004), no RS, o Sistema Aquífero Planície Costeira, considerado o Sistema Aquífero de maior potencial do Cenozóico, é formado por areias e arenitos fracamente cimentados multicamadas de origens variadas que podem alcançar grandes extensões e apresentar condições livres, semiconfinadas a confinadas.

O **Sistema Aquífero Quaternário Costeiro I** ocorre desde o município de Chuí até Torres e é formado por sedimentos depositados por barreiras marinhas, lagunares e planície deltaica. Os aquíferos são constituídos por areias inconsolidadas de granulometria fina a média, intercalados com siltes, argilas e, localmente, seixos e concheiros de variada procedência. Em geral, as capacidades específicas são altas, ultrapassando 4 m³/h/m (FREITAS, 2010; MACHADO; FREITAS, 2005).

O **Sistema Aquífero Quaternário Costeiro II** ocupa uma área de pouco mais de 9.600 km², desde o município de Santa Vitória do Palmar até Torres, compreende os aquíferos relacionados aos sedimentos da Planície Costeira. É composto por areias finas inconsolidadas e argilas. As capacidades específicas variam entre 0,5 e 1,5 m³/h/m (FREITAS, 2010; MACHADO; FREITAS, 2005).

O **Sistema Aquífero Quaternário Barreira Marinha** é o sistema aquífero mais produtivo e importante da Região Metropolitana de Porto Alegre e está localizado em uma pequena faixa com 585,7 km² de direção nordeste, do município de Barra do Ribeiro até Santo Antônio da Patrulha. Fazem parte da sua constituição, areias inconsolidadas de granulometria fina a média com pouca matriz argilosa. As capacidades específicas são elevadas e podem ultrapassar 4 m³/h/m (FREITAS, 2010; MACHADO; FREITAS, 2005).

O **Sistema Aquífero Quaternário Indiferenciado** está situado na calha do rio Camaquã, entre os municípios de Cristal e Amaral Ferrador. Ocorre em áreas de aluviões constituídas por areias grossas e cascalhos inconsolidados, que foram originados dos efeitos da erosão sobre as rochas graníticas e eopaleozoicas do Escudo Sul-Rio-Grandense. Normalmente, as capacidades específicas são elevadas, da ordem de $4 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ (FREITAS, 2010; MACHADO; FREITAS, 2005).

3.1.2.5. Sistema Aquífero Palermo - Rio Bonito (SAPRB)

O Sistema Aquífero Palermo - Rio Bonito circunda a região alta das rochas do Escudo Sul-Rio-Grandense, desde Candiota até Santo Antônio da Patrulha, passando pelos municípios de Cachoeirinha, Dom Pedrito, Minas do Leão e São Gabriel. Ocorre em uma área de $5.891,9 \text{ km}^2$ e é composto por arenitos finos a médios, cinza a esbranquiçados, intercalados com camadas de siltitos argilosos e carbonosos, de cor cinza-escura. Geralmente, apresenta capacidades específicas inferiores a $0,5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ (FREITAS, 2010; MACHADO; FREITAS, 2005).

O SAPRB compreende as unidades litoestratigráficas do Grupo Guatá, ou seja, as formações Palermo e Rio Bonito. Porém, as litologias da Formação Palermo funcionam mais como aquíferos confinantes do Aquífero Rio Bonito, do que propriamente como aquífero (MACHADO; FREITAS, 2005).

3.1.2.6. Sistema Aquífero Serra Geral (SASG)

O **Sistema Aquífero Serra Geral I** ocupa cerca de 27% da área do Estado e ocorre no centro-oeste do Planalto Sul-Rio-Grandense. De modo geral, o sistema aquífero é composto por rochas basálticas, amigdaloides e fraturadas, capeadas por espesso solo avermelhado. As capacidades específicas são variáveis, predominando valores entre $1,0$ e $4,0 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ (FREITAS, 2010; MACHADO; FREITAS, 2005).

O **Sistema Aquífero Serra Geral II** está presente nas regiões oeste, norte, nordeste e central do Estado e ocupa uma área de $84.614,8 \text{ km}^2$. É constituído por riolitos, riodacitos e basaltos. Geralmente, a capacidade específica é inferior a $0,5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$, embora em áreas mais fraturadas ou com arenitos na base do sistema, situada na região oeste do Estado, possa alcançar valores superiores a $2,0 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ (FREITAS, 2010; MACHADO; FREITAS, 2005).

O **Sistema Aquífero Serra Geral III** encontra-se nas porções mais elevadas dos derrames Serra Geral, na região nordeste do Estado, e em morros isolados de áreas muito dissecadas, no noroeste do Estado. É formado por riódacitos e basaltos e os seus poços possuem vazões específicas muito baixas ou são secos (FREITAS, 2010; MACHADO; FREITAS, 2005).

3.2. COMPOSIÇÃO E QUALIDADE DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

Alguns constituintes iônicos são denominados de principais porque a sua soma corresponde a aproximadamente o total dos íons presentes nas águas subterrâneas e representam não apenas os substratos rochosos percolados, mas também a variação do comportamento geoquímico dos compostos químicos envolvidos (FILGUEIRAS, 2016). Já alguns elementos químicos, devido as baixas concentrações são comumente classificados como elementos-traço. Gaillardet *et al.* (2014) afirmam que espécies químicas, por apresentar baixa presença nas águas, não influenciam os valores de Sólidos Dissolvidos Totais, pois suas massas combinadas não são significativas quando comparadas aos montantes de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , H_4SiO_4 , HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , Cl^- , e NO_3^- juntos. A Tabela 1 apresenta os constituintes das águas subterrâneas de acordo com a sua abundância, segundo Custódio e Llamas (1983).

Tabela 1 - Classificação dos constituintes dissolvidos nas águas subterrâneas

Const. maiores (> 5 mg/L)	Const. menores (0,01 - 10 mg/L)	Constituintes traços (< 0,1 mg/L)
Bicarbonato	Boro	Alumínio, Arsênio, Antimônio, Bário, Berílio, Bismuto, Bromo, Cádmio, Césio, Chumbo,
Cálcio	Carbonato	Cromo, Cobalto, Cobre, Escândio, Estanho,
Cloreto	Estrôncio	Fosfato, Gálio, Germânio, Índio, Irídio, Iodo,
Magnésio	Ferro	Lantânio, Lítio, Mercúrio, Manganês,
Sílica	Fluoreto	Molibdênio, Níquel, Nióbio, Ouro, Prata,
Sódio	Nitrato	Platina, Rádio, Rubídio, Rutênio, Selênio,
Sulfato	Potássio	Tálio, Titânio, Tungstênio, Urânio, Vanádio, Zinco, Zircônio

Fonte: Adaptado de Custódio e Llamas (1983)

Nas rochas ígneas e metamórficas, o sódio está presente em minerais de baixa solubilidade (feldspatos, micas, anfibólios e piroxênios), já em rochas sedimentares pode

ocorrer em fases minerais de elevada solubilidade, como a halita, presente em evaporitos e outros sedimentos marinhos. Os evaporitos e os sedimentos de ambientes oceânicos são as rochas que apresentam as maiores concentrações de sódio em relação aos outros elementos. Quando o sódio está em solução em meios aquosos, a tendência é que permaneça neste estado, dado que não há precipitação de minerais de sódio que faça diminuir seus teores na água. O sódio, no entanto, é adsorvido por muitos minerais, especialmente as argilas, que em processos de troca de cátions tendem a fixar os divalentes, como o cálcio e o magnésio, e desprender os monovalentes, como o sódio (HITCHON *et al.*, 1999). Nas águas doces, o sódio geralmente é presente como íons Na^+ ; em soluções concentradas ocorrem NaCO_3^- , NaHCO_3^- e NaSO_4^- . As mais altas concentrações de sódio ocorrem em associação com íons Cl^- (CELLIGOI, 1999).

O cálcio é encontrado em plagioclásios ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), em anfibólios e em piroxênios; perfaz 25.700 mg/Kg nas rochas ígneas; e forma depósitos de carbonatos, calcita e aragonita (CaCO_3) e dolomita ($\text{CaCO}_3.\text{MgCO}_3$), bem como a anidrita (CaSO_4) e outros diversos minerais. Ademais, é o cátion mais comum em águas doces e seu conteúdo na maioria dos casos é determinado pelo sistema de equilíbrio $\text{CaCO}_3\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{CO}_3\text{-HCO}_3\text{-CO}_3^{2-}$, conhecido como equilíbrio carbonato de cálcio-dióxido de carbono (CELLIGOI, 1999).

Conforme Celligoi (1999), as principais ocorrências de magnésio estão nas olivinas (MgSiO_4 - forsterita), granadas, piroxênios, entre outros. O íon magnésio tem raio iônico menor e densidade de carga maior que o sódio e o potássio e tende a formar revestimento de 6 moléculas de água - $\text{Mg}(\text{H}_2\text{O})_6^{2+}$. Além disso, possui grande solubilidade, porém é encontrado em menores quantidades nas águas doces, provavelmente pela baixa abundância geoquímica do magnésio (17.600 mg/Kg nas rochas ígneas).

A presença de cloreto em águas subterrâneas pode ser atribuída à dissolução de depósitos salinos, descargas de efluentes de indústrias químicas, intrusões salinas, entre outros. Os íons cloreto são altamente móveis e não são retidos em rochas permeáveis, porém em argilitos, cristais de NaCl ou soluções de Na-Cl podem ser contidos em poros. Ademais, os íons cloreto são geralmente presentes em baixas concentrações ($< 10 \text{ mg/L}$) nas águas subterrâneas, portanto altas concentrações podem indicar poluição antrópica (CELLIGOI, 1999)

O enxofre ocorre principalmente em gases magmáticos e a maior parte do elemento nas rochas ocorre em minerais como o gipso ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) e anidrita (CaSO_4). Consideráveis quantidades de sulfato são adicionadas ao ciclo hidrológico com as precipitações da atmosfera e são originadas do "spray" do mar, da poeira dos continentes e da oxidação de H_2S , bem como das substâncias orgânicas do solo. Nas águas subterrâneas circulantes em rochas ígneas, a concentração de sulfato é baixa ($< 30 \text{ mg/L}$), porém em rochas evaporíticas podem existir altas concentrações (CELLIGOI, 1999)

A quantidade de carbonatos nas águas naturais está ligada a função do pH e do gás carbônico dissolvido. A fonte de íon carbonato são as rochas calcárias, constituídas majoritariamente de carbonato de cálcio, embora quase insolúvel pequena quantidade se dissolve em contato com água gerando íons bicarbonatos (FILGUEIRAS, 2016). O carbonato apenas excederá o bicarbonato quando o pH for igual ou superior a 10 (LOGAN, 1965).

O bicarbonato é produto da dissolução de rochas carbonáticas, especialmente calcita (CaCO_3) e dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), através de uma reação de hidrólise, por águas contendo ácido carbônico e ácidos húmicos e fúlvicos presentes no solo. O predomínio do bicarbonato sobre os outros ânions indica que a água não é de circulação regional com longos tempos de residência (CUSTODIO; LLAMAS, 1983). O gás carbônico (CO_2) pode ser encontrado na água, no estado de carbonatos e bicarbonatos de metais alcalino e alcalino terrosos. Em contato com a água, o gás carbônico combina-se formando um ácido fraco, o ácido carbônico (H_2CO_3), ocasionado a queda do pH. Contudo, em áreas de rochas calcárias, o ácido carbônico reage com o meio carbonático formando os bicarbonatos (solúveis), que funcionam como uma solução tampão e com maior capacidade de manter um quadro mediano do pH (PÁDUA, 2002). Em águas naturais, o bicarbonato predomina em faixas de pH entre 6 a 10 (FILGUEIRAS, 2016).

O nitrato ocorre em baixas concentrações, refletindo o estágio final da oxidação da matéria orgânica. As águas subterrâneas apresentam, em geral, teores de nitrato entre 0,1 e 10 mg/L, porém os teores podem chegar a 1.000 mg/L em águas poluídas, sendo que teores já acima de 5 mg/L podem ser indicativos de contaminação por atividades antrópicas, tais como esgotos, fossas sépticas, depósitos de lixo, cemitérios, adubos nitrogenados, resíduos de animais, entre outros. Os resíduos de produtos proteicos provenientes de esgotos e fezes 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). Ademais, a presença de nitrito na água subterrânea é um indicativo de poluição recente (SANTOS, 2008).

Segundo Celligoi (1999), o potássio apresenta em torno de 25.700 mg/Kg em rochas ígneas e ocorre na forma de vários minerais, como microclina e ortoclásio ($KAlSi_3O_8$), muscovita, biotita, entre outros. Os íons são liberados pelo intemperismo, porém após migração mais ou menos prolongada, eles tendem a fixar-se, adsorvidos em minerais de argila, entre os espaços da illita, formando minerais secundários. Além disso, possui baixa mobilidade geoquímica nas águas doces e é raramente encontrado em concentrações iguais ou maiores que o sódio.

O flúor ocorre em minerais como fluorita (CaF_2) e apatita ($Ca_5[(F,Cl)(PO_4)_3]$), e a sua ocorrência é mais abundantemente que o cloro em rochas ígneas. O flúor forma íons F^- em água, o qual pode formar complexos solúveis com Al, Be, Fe e B. Os teores abaixo de 1 mg/L são comuns em basaltos e arenitos, já teores altos em águas subterrâneas são relacionados com deficiência em cálcio. O fluoreto em presença de cálcio é controlado pelo produto de solubilidade da fluorita (CELLIGOI, 1999). O flúor, em baixos teores, até 1,5 mg/L é benéfico à saúde, na prevenção de cáries dentárias de crianças em fase de crescimento. Acima deste teor já é prejudicial, causando fluorose dental e deformação dos ossos. Já doses excessivas podem levar o homem à morte. Além disso, é muito tóxico para os vegetais (SANTOS, 2008).

O ferro ocorre geralmente associado ao manganês e pode estar presente com baixos teores ($< 0,3$ mg/L) em quase todas as águas, ocorrendo sob as formas: hidróxido férrico (Fe^{+3}) e hidróxido ferroso (Fe^{+2}). O ferro no estado ferroso é instável na presença do oxigênio do ar, mudando para o estado férrico. Componentes dos diversos litotipos ou de solos lateríticos, os minerais ferromagnesianos, tais como piroxênios, olivinas e biotita, são os principais minerais portadores de ferro. Nos arenitos e nos folhelhos, os óxidos, os carbonatos e os hidróxidos de ferro constituem, frequentemente, o material de cimentação. Na água subterrânea, alto teor de ferro pode estar ligado à ocorrência de ferrobactérias ou mesmo à corrosão do revestimento ou filtro do poço (SANTOS, 2008).

O manganês não ocorre livre, aparecendo principalmente na forma de pirolusita (MnO_2), braunita (Mn_2O_3), manganita ($Mn_2O_3 \cdot H_2O$), ausmanita (Mn_3O_4), rodocresita ($MnCO_3$) e rodonita. O manganês, regularmente, está presente com baixos teores ($< 0,2$ mg/L) em quase todas as águas naturais, sendo mais abundante nas águas ácidas.

Ocorre principalmente sob a forma de Mn^{+2} podendo também ocorrer como Mn^{+3} . No estado Mn^{+2} , o manganês é instável na presença do ar, mudando para o estado MnO_2 quando a água que o contém é exposta ao ar, pois se oxida facilmente. O bicarbonato manganoso decompõe-se da mesma forma que o bicarbonato ferroso, deixando a água sob a forma de um depósito de cor negra e de aspecto fuliginoso, ao desprender-se o gás carbônico. O manganês e seus compostos são muito persistentes na água, podendo levar mais de 200 dias para ser degradado. Além disso, o manganês é uma substância perigosa, podendo levar à morte animais, pássaros, peixes e vegetais (SANTOS, 2008).

O arsênio ocorre naturalmente em jazidas de metais, onde o elemento está na forma de arsenita (AsO_4^{-3}). Também é encontrado em herbicidas, inseticidas e resíduos industriais à base de arsênio. Nas águas subterrâneas, as concentrações de arsênio são normalmente abaixo de 0,1 mg/L, porém ocorrem concentrações de até 4 mg/L em águas de poços petrolíferos e em águas minerais. Muito perigoso à saúde pública, o arsênio é cancerígeno e bastando uma pequena ingestão de 100 mg, para envenenar seriamente o organismo humano (SANTOS, 2008).

A interpretação das análises químicas de águas subterrâneas por meio de programas computacionais permite a geração de diferentes gráficos, que caracterizam e classificam as águas subterrâneas. Um dos métodos muito utilizados é o diagrama de Piper, que faz a classificação e comparação de distintos grupos de águas quanto aos cátions e ânions dominantes (BACK, 1960; PIPER, 1944).

As águas subterrâneas de terrenos graníticos geralmente são bicarbonatadas sódicas e cálcicas. Os cátions lixiviados pela água em rochas cristalinas normalmente são: Na^+ , K^+ , Mg^{+2} e Ca^{2+} , sendo que K^+ é o menos abundante. Na maioria dos casos, o HCO_3^- é o íon dominante e o SiO_2 está presente em maior concentração relativa que os cátions. Os ânions Cl^- e SO_4^{2-} normalmente ocorrem em pequenas quantidades ou traços (SILVA, 1984).

As variações das misturas de minerais das camadas e regiões das rochas sedimentares ou depósitos inconsolidados podem causar grandes diferenças na química da água subterrânea. As águas são sulfetadas cálcicas em terrenos com gipsita e em terrenos de origem continental com argilas, as águas são bicarbonatadas cálcicas, já em terrenos sedimentares de origem marinha com argila, as águas são cloretadas sódicas com pouco cálcio e magnésio e podem conter flúor (SILVA, 1984).

Os processos e fatores que influenciam na caracterização da qualidade das águas subterrâneas podem ser intrínsecos e extrínsecos ao aquífero. As concentrações de substâncias dissolvidas na água subterrânea tendem a aumentar à medida em que a água se move nos diferentes aquíferos, porém outros fatores podem interferir nesse aumento, tais como: o clima, a composição da água de recarga, o tempo de contato entre água e rocha, as litologias atravessadas, além da contaminação causada pelo homem (SANTOS, 2008).

Em frente aos processos de degradação ambiental, as águas subterrâneas apresentam condições de vulnerabilidade menores do que os mananciais superficiais, em razão da proteção natural estabelecida pela zona vadosa ou por camadas confinantes. No entanto, a eficácia destas unidades protetoras varia em diferentes locais, como resultado de suas características físicas, químicas e geométricas, com especial destaque para a mineralogia, textura, conteúdo de matéria orgânica, espessura e condições de pH e Eh do meio. A transferência dos contaminantes do solo para as águas subterrâneas é determinada pelos princípios que regem o comportamento das barreiras geoquímicas (ROISENBERG *et al.*, 2007).

Cada elemento químico ou espécie geoquímica possui comportamento e mobilidade próprio no meio físico, portanto o seu desenvolvimento, varia em cada caso, na zona saturada do aquífero. Os processos de adsorção, dessorção, troca iônica e complexação de superfície, bem como pela precipitação e a dissolução de minerais em menor escala, controlam, principalmente, a mobilidade geoquímica de íons e moléculas dissolvidas (ROISENBERG *et al.*, 2007).

Paim (2018) desenvolveu um trabalho que avalia a qualidade da água subterrânea de poços ponteira, que possuem profundidades na sua maioria, inferiores a 20 metros e que captam água do Sistema Aquífero Quaternário Costeiro na região de Osório (RS). A maioria das águas subterrâneas apresentam valores de pH entre 5,6 e 6,5 e valores de condutividade elétrica entre 0 a 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$. As concentrações de nitrato oscilam entre 0 e 2 mg/L N-NO₃, de cloretos e sódio não ultrapassam 30 mg/L, os sólidos totais dissolvidos variam entre 0 e 200 mg/L, indicando a ocorrência de águas doces com baixa mineralização. A comparação dos resultados das análises com os VMP da antiga portaria do Ministério da Saúde Nº 2914/11, indicaram a ocorrência de poços que apresentam alterações nos parâmetros pH, amônia, ferro, cor, manganês, turbidez, bem como presença de Coliformes Totais e *E.coli*.

Da Costa *et al.* (2010) realizaram um estudo de avaliação a qualidade das águas subterrâneas em áreas de preservação permanente (Sistema Aquífero Guarani – SAG) da Bacia Hidrográfica do Rio Pardo, RS, através de variáveis físicas, químicas e microbiológicas, tendo como base a resolução Conama nº 396/2008. Os resultados indicaram que a maioria dos poços avaliados se enquadraram na Classe 4 de usos da água, correspondendo a águas de usos menos restritivos. Verificou-se que a qualidade das águas de poços com profundidade inferior a 6 metros está mais vulnerável devido a alterações antrópicas em função da concentração de nitrato, coliformes totais e termotolerantes, enquanto que a qualidade das águas de poços mais profundos depende basicamente de suas características hidrogeológicas e hidrogeoquímicas naturais, em função das variáveis sulfato e sódio. Contudo, também apresentaram contaminação por atividade antrópica, principalmente pela presença de nitrato.

Cecconello *et al.* (2020) avaliaram a qualidade da água subterrânea na zona rural do município de Pelotas, RS. As variáveis de qualidade da água analisadas foram turbidez, nitrogênio amoniacal, cloretos, potencial hidrogeniônico, coliformes totais, coliformes fecais, temperatura da água, sólidos dissolvidos totais e condutividade elétrica. Em cinco pontos, houve variação ao longo do tempo na qualidade da água subterrânea, sendo consideradas impróprias para consumo humano, conforme os padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria do Ministério da Saúde nº 05/2017.

Descovi Filho *et al.* (2011) analisaram alguns aspectos da qualidade da água subterrânea, como concentrações de sólidos totais dissolvidos e nitratos, para enquadramento e gestão da bacia do Santa Maria, sudoeste do Estado do Rio Grande do Sul, que possui afloramentos do Sistema Aquífero Guarani. As águas subterrâneas da bacia apresentam problemas pontuais em relação as concentrações de STD, estreitamente ligados com a geologia e hidrogeologia penetradas pelas captações (Formação Irati), e problemas pontuais em relação as concentrações de nitrato, que sugerem contaminação das águas subterrâneas por atividades humanas.

3.2.1. Hidroquímica dos Principais Sistemas Aquíferos do Estado do RS

A seguir são apresentadas as características hidroquímicas dos principais Sistemas Aquíferos do Estado do Rio Grande do Sul.

3.2.1.1. *Aquitardos Permianos (AP)*

Segundo Machado e Freitas (2005), as águas dos Aquitardos Permianos podem ser duras, com grande quantidade de sais de cálcio e magnésio.

Goffermann *et al.* (2015) desenvolveram um estudo no município de São Gabriel (RS), onde os resultados analíticos das águas subterrâneas da região mostram uma grande variedade composicional, assim uma análise estatística permitiu separar quatro grupos hidroquímicos distintos. O grupo 4, que representa o estágio mais avançado em termos de evolução geoquímica das águas subterrâneas na região estudada, possui os maiores valores de CE (1476 a 3740 $\mu\text{S}/\text{cm}$) e STD (942 a 2404 mg/L), com pH variando entre 6,90 e 8,10, Ca^{+2} entre 65,20 e 79,20 mg/L, Cl^- entre 70,40 e 219,00 mg/L e Na^+ entre 240 a 522 mg/L. São classificadas como bicarbonatadas sódicas e, em termos de salinidade, 80% das amostras do grupo 4 são de água salobra e 20% de águas salgadas, portanto são águas impróprias para consumo humano. Todas as amostras situam-se dentro dos Aquitardos Permianos, constituídos pelo Subgrupo Estrada Nova e Formação Irati. As captações ocorrem basicamente nos níveis arenosos da Formação Irati, entre os planos interlaminares dos folhelhos e em fraturas que interceptam todo o pacote.

Wink (2015) realizou uma avaliação hidroquímica nas águas subterrâneas captadas por poços localizados no distrito de Ipiranga, região noroeste do município de Gravataí, RS. A área de estudo se encontra na região dos Aquitardos Permianos e foram identificadas uma sequência de camadas formadas por sedimentos, arenitos, siltitos e folhelhos, que fazem parte das Formações Rio do Rastro, Rio Bonito, Rosário do Sul e Irati. As águas analisadas na região apresentaram pH médio de 7,13, variando de 5,09 a 8,30. A condutividade elétrica apresentou grande variação entre os pontos, com valores entre 27 e 391 $\mu\text{S}/\text{cm}$. As concentrações de cloretos tiveram valores que variaram de 2,5 a 9,18 mg/L, com média de 7,29 mg/L. As águas subterrâneas foram classificadas como bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas (mistas bicarbonatadas - 40%) e bicarbonatadas sódicas (60%).

3.2.1.2. *Sistema Aquífero Embasamento Cristalino (SAEC)*

Conforme Machado e Freitas (2005), existe uma predominância de ânions bicarbonato e cátions sódicos no Sistema Aquífero Embasamento Cristalino I. As águas são classificadas como bicarbonatadas mistas a sódicas e as salinidades são muito baixas, com valores geralmente inferiores a 200 mg/L.

As salinidades nas áreas não cobertas por sedimentos de origem marinha são inferiores a 300 mg/l, no **Sistema Aquífero Embasamento Cristalino II**. Os poços presentes nas rochas graníticas podem apresentar enriquecimento em flúor (MACHADO; FREITAS, 2005).

Ericksson (2015) realizou um estudo na região de Guaíba (RS) onde há ocorrência de aquíferos fraturados associados as rochas do Escudo Sul Rio Grandense. As águas subterrâneas do Sistema Aquífero Embasamento Cristalino nessa região são classificadas como bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas (bicarbonatadas mistas) e bicarbonatadas sódicas.

Goffermann (2013) desenvolveu um trabalho no município de São Gabriel (RS). Na região, os poços associados com o Embasamento Cristalino apresentam teores elevados de flúor, com valores entre 1,41 e 11,60 mg/L. As concentrações de sódio chegam ao máximo em 189 mg/L.

3.2.1.3. Sistema Aquífero Guarani (SAG)

A qualidade das águas do Sistema Aquífero Guarani é variável de acordo com o grau de confinamento das unidades hidroestratigráficas. As unidades hidroestratigráficas Botucatu e Guará na fronteira oeste do Estado do Rio Grande do Sul apresentam águas doces com menos de 400 mg/L de sais. Na porção norte do planalto meridional, o Botucatu é a principal unidade hidroestratigráfica, contendo valores de salinidade superiores aos padrões de potabilidade, geralmente acima de 800 mg/L. Na região leste, o sistema aquífero Botucatu/Pirambóia contém águas de baixa salinidade, em geral abaixo de 400 mg/L. A unidade hidroestratigráfica Passo das Tropas 2 confinada apresenta altos valores de salinidade e localmente teores elevados de flúor, inviabilizando seu uso em abastecimento público (MACHADO; FREITAS, 2005).

Santiago e Silva (2011) desenvolveram um estudo sobre a classificação hidroquímica de águas subterrâneas do Sistema Aquífero Guarani no Rio Grande do Sul e Santa Catarina. A área de estudo foi dividida em três zonas que compõem o Sistema Aquífero Guarani: Zonas de Afloramento, Confinamento e Forte Confinamento. Na Zona de Forte Confinamento, 52,6% são de águas bicarbonatadas sódicas, 26,3% sulfatadas cloretadas sódicas, 10,5% sulfatadas sódicas, 5,3% cloretadas sulfatadas sódicas e 5,3% são classificadas como bicarbonatadas magnesianas, além disso 83% dos poços apresentavam características de águas hidrotermais ($T > 25^{\circ}\text{C}$). Já na Zona de

Confinamento, verifica-se que houve a predominância de águas sódicas com temperatura de águas frias. A Zona de Afloramento também apresentou uma predominância de águas sódicas, considerando a temperatura das águas, nesta zona, todos os poços caracterizaram como águas frias, que penetram o SAG podendo receber contribuições pré-SAG (Aquíferos e Aquitardos Permianos).

Matos (2020) realizou um estudo sobre a compartimentação estrutural e a ocorrência de interações hidrogeológicas, entre os Sistemas Aquíferos Guarani e Serra Geral na região nordeste do Rio Grande do Sul. No SAG foi possível identificar a individualização de 4 grupos hidroquímicos, com destaque para dois grupos com águas típicas do SAG de alto confinamento, classificadas como sulfatadas ou cloretadas sódicas, e que podem ter influência de águas do pré-SAG, apresentando como principais marcadores os valores elevados de sódio, cloreto, sulfato, fluoreto e condutividade elétrica. Utilizando esses marcadores do SAG, aliado a uma potenciometria favorável desse sistema aquífero, e a existência de estruturas de conexão, foi possível identificar dois grupos hidroquímicos do SASG onde ocorre a interação entre as águas dos aquíferos, com águas que variam de bicarbonatadas sódicas à sulfatadas ou cloretadas sódicas.

3.2.1.4. Sistema Aquífero Quaternário Costeiro (SAQC)

No **Sistema Aquífero Quaternário Costeiro I**, as águas variam de bicarbonatadas a cloretadas sódicas, com salinidades inferiores a 400 mg/L, porém eventualmente são encontradas águas cloretadas com maior teor salino. O **Sistema Aquífero Quaternário Costeiro II** também apresenta águas bicarbonatadas a cloretadas sódicas, com sólidos totais dissolvidos variando entre 600 e 2000 mg/L. O **Sistema Aquífero Quaternário Barreira Marinha** caracteriza-se pelo teor salino muito baixo, em média menor do que 50 mg/L. Já no **Sistema Aquífero Quaternário Indiferenciado** as salinidades são baixas, em média 150 mg/L (MACHADO; FREITAS, 2005).

Segundo Reginato *et al.* (2009), as águas subterrâneas existentes nos diferentes aquíferos do litoral médio e sul do Rio Grande do Sul são águas que apresentam qualidade variável. Observa-se que a maior parte das águas são classificadas como doces (88,2%) e uma pequena porcentagem (11,8%) como águas salobras. São classificadas em três grandes grupos de águas: bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas, bicarbonatadas sódicas e águas sulfatadas ou cloretadas sódicas. Observa-se, na classificação das águas

para fins de irrigação, que as águas subterrâneas existentes na região apresentam problemas com relação ao risco de salinidade e risco de sódio.

Soares (2016) realizou a caracterização hidroquímica das águas subterrâneas no município de Osório (RS), na qual as águas do Sistema Aquífero Quaternário Costeiro foram classificadas como bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas, sulfatadas ou cloretadas sódicas, sulfatadas ou cloretadas cálcicas ou magnesianas e bicarbonatadas sódicas e apresentam diferentes graus de mineralização, indicando a proveniência tanto de aquíferos livres quanto de confinados.

3.2.1.5. Sistema Aquífero Palermo - Rio Bonito (SAPRB)

Segundo Machado e Freitas (2005), as salinidades variam entre 800 e 1.500 mg/L no Sistema Aquífero Palermo - Rio Bonito. Em grandes profundidades as águas são salinas com sólidos totais dissolvidos superiores a 10.000 mg/L.

Goffermann *et al.* (2012) desenvolveram um estudo do Sistema Aquífero Palermo-Rio Bonito na porção sul do município de São Gabriel (RS). As águas subterrâneas desta região possuem teores de STD que variam entre 60 e 300 mg/L, de sódio, entre 3,2 e 190 mg/L e de fluoreto, entre 0,05 e 1,30 mg/L. São classificadas como bicarbonatadas cálcicas e sódicas, sendo que estes tipos hidroquímicos estão relacionados às litologias locais e ao tempo de circulação no meio por onde passam, principalmente às rochas sedimentares arenosas com matriz constituída por minerais calcícticos, que favorecem o enriquecimento dos íons Ca^+ e Na^+ , sugerindo uma evolução geoquímica das águas cálcicas para sódicas, na medida em que aumentam as profundidades e as distâncias das áreas de recarga.

Cezimbra (2019) realizou um estudo hidroquímico com a análise de 14 poços do Aquífero Rio Bonito, nos municípios de Aceguá, Hulha Negra e Candiota (RS). De maneira geral os poços apresentam pH fracamente alcalino, com a temperatura média de 20,9°C e valores altos de CE e STD em alguns poços, com valor máximo para 2670 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 973 mg/L, respectivamente. A análise dos parâmetros hidroquímicos em poços que interceptam uma ou mais camadas aquíferas indicou uma concentração alta de CE e STD para as camadas 1 e 2 e a diminuição progressiva dos mesmos para as camadas profundas, tal fato foi relacionado com o paleoambiente marinho transicional da camada aquífera superficial. As águas das amostras analisadas foram classificadas em sua maioria como bicarbonatadas sódicas e cálcicas, com baixo a alto risco de salinização e baixo a forte

risco de sódio, sendo que apenas quatro poços apresentaram valores acima do permitido para os componentes organolépticos e inorgânicos.

3.2.1.6. Sistema Aquífero Serra Geral (SASG)

O **Sistema Aquífero Serra Geral I**, como regra geral, possui águas que podem ser agrupadas em bicarbonatadas cálcicas a mistas ou bicarbonatadas sódicas, com salinidades baixas, em média 200 mg/L. No **Sistema Aquífero Serra Geral II**, as salinidades também apresentam valores baixos, geralmente inferiores a 250 mg/L. Já valores mais elevados de pH, salinidade e teores de sódio podem ser encontrados nas áreas influenciadas por descargas ascendentes do Sistema Aquífero Guarani (MACHADO; FREITAS, 2005).

Reginato *et al.* (2012) realizaram a caracterização hidroquímica do Sistema Aquífero Serra Geral na região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul, identificando alguns padrões típicos para essa unidade, bem como indícios que apontam para uma possível conexão hidráulica com o Sistema Aquífero Guarani. O SAG, na região, é um aquífero confinado, associado às rochas sedimentares da Formação Botucatu, com águas bicarbonatadas sódicas, bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas, sulfatadas sódicas e valores mais altos para condutividade (270 a 686 uS/cm) e pH (7,9 a 9,6), em contrapartida o SASG está associado às rochas vulcânicas da Formação Serra Geral e suas águas são bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas, com concentrações variáveis de cálcio, magnésio, sódio, carbonatos, bicarbonatos, condutividade inferiores a 200 uS/cm e pH menores que 7,5. Contudo, ocorrências de águas no SASG classificadas como bicarbonatadas sódicas a sulfatadas cálcicas ou magnesianas, relacionadas ao aumento na concentração de sódio, potássio, carbonatos, bicarbonatos, cloretos, sulfatos, pH e condutividade elétrica, indica a possível existência de uma conexão entre as duas unidades, que pode ocorrer nas áreas onde há maior grau de fraturamento e menor espessura do pacote de rochas vulcânicas.

Bortolin *et al.* (2014) realizaram um estudo hidroquímico dos aquíferos fraturados que formam o Sistema Aquífero Serra Geral na zona urbana do município de Carlos Barbosa (RS). As águas desses aquíferos são do tipo bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas, predominando as águas bicarbonatadas mistas e cálcicas, indicando baixas variações quanto à concentração dos íons e suas razões iônicas. Segundo os autores, essas características são típicas de águas que circulam por estruturas de rochas vulcânicas

ácidas e apontam um baixo tempo de residência, porém as concentrações variam conforme as profundidades das entradas da água.

Freitas *et al.* (2016) realizaram uma análise exploratória de dados da condutividade elétrica nas águas do Sistema Aquífero Serra Geral no Rio Grande do Sul e Santa Catarina. A técnica estatística de Análise Exploratória de Dados (AED) foi aplicada a 7.620 medidas de campo de condutividade elétrica nas águas do SASG. Valores de condutividade elétrica superiores a 378,35 $\mu\text{S}/\text{cm}$ são anômalos, enquanto o intervalo de *background* está compreendido entre 117,35 e 378,35 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

3.3. ÁGUA SUBTERRÂNEA PARA ABASTECIMENTO E SAÚDE PÚBLICA

Muitas doenças endêmicas registradas pelo sistema de saúde pública têm sua origem no abastecimento de água subterrânea, que não oferece condições adequadas de potabilidade. Em muitos casos, a degradação da qualidade da água decorre de processos naturais, por meio da interação água-rocha. Por outro lado, decorre de processos antrópicos, como a falta de saneamento básico, o vazamento de combustíveis em postos de abastecimento e o lançamento de efluentes industriais, além das aglomerações populacionais, a mineração e a agricultura extensiva, que são importantes vetores da contaminação das águas subterrâneas (ROISENBERG *et al.*, 2007).

As propriedades que demarcam o modelo de água destinada ao abastecimento doméstico, denominadas padrões de potabilidade de consumo humano, envolvem critérios essenciais e critérios complementares. Os critérios essenciais correspondem, especialmente, à proteção contra a contaminação por micro-organismos patogênicos e contra a poluição por substâncias tóxicas ou venenosas. Os critérios complementares tencionam o controle da qualidade no que diz respeito ao melhoramento da água em aspectos estéticos, organolépticos e econômicos, que apesar de desejáveis, não são essenciais à proteção da saúde pública (cor, sabor, odor, turbidez, dureza, temperatura, pH). As águas em geral são consideradas potáveis quando podem ser consumidas pelo homem sem ocasionar prejuízos à sua saúde. Os padrões internacionais de potabilidade para consumo humano, em função das peculiaridades locais, variam em cada país, porém há uma tendência mundial de padronização das normas existentes, através da OMS. Em épocas passadas, os padrões de potabilidade da água eram regidos apenas pela avaliação dos sentidos da visão, gustação e olfato (SANTOS, 2008).

O avanço das técnicas de análises químicas, físico-químicas, biológicas e radiológicas, ao longo do tempo, possibilitou o desenvolvimento dos padrões de potabilidade da água para consumo humano, ainda que existam, nas águas, constituintes químicos de natureza inorgânica e orgânica, pouco estudados em termos de avaliações e normas de potabilidade (SANTOS, 2008).

3.3.1. Legislação Federal e Estadual

A Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021 (BRASIL, 2017) altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.

A Resolução Conama nº 396, de 3 de abril de 2008 (CONAMA, 2008), que dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências, em seu Anexo I, apresenta a lista de parâmetros com maior probabilidade de ocorrência em águas subterrâneas, seus respectivos Valores Máximos Permitidos (VMP) para cada um dos usos considerados como preponderantes e os limites de quantificação praticáveis (LQP), considerados como aceitáveis para aplicação da Resolução.

A Resolução Conama nº 420, de 28 de dezembro de 2009 (CONAMA, 2009) dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade e uso do solo e água subterrânea quanto à presença de substâncias químicas e estabelecem Valores de Investigação (VI) que são os teores acima dos quais existem riscos potenciais, diretos ou indiretos, à saúde humana, considerando um cenário de exposição padronizado.

Na Tabela 2 são apresentados os VMP definidos pela Portaria GM/MS 888 e pela Resolução Conama 396 e os VI estabelecidos pela Conama 420 para algumas substâncias presentes nas águas subterrâneas.

Tabela 2 – Valor Máximo Permitido (VMP) e Valor de Investigação (VI) para parâmetros com ocorrência em águas subterrâneas

Parâmetro	VMP (mg/L)		
	Portaria GM/MS 888	VMP (mg/L) Conama 396	VI (mg/L) Conama 420
Alumínio	0,2	0,2	3,5

Antimônio	0,005	0,005	0,005
Arsênio	0,01	0,01	0,01
Bário	0,7	0,7	0,7
Cádmio	0,005	0,005	0,005
Chumbo	0,01	0,01	0,01
Cloreto	250	250	-
Cobre	2	2	2
Cromo	0,05	0,05	0,05
Ferro	0,3	0,3	2,45
Fluoreto	1,5	1,5	-
Manganês	0,1	0,1	0,4
Mercúrio	0,001	0,001	0,001
Níquel	0,07	0,02	0,02
Nitrato (como N)	10	10	10
Selênio	0,01	0,01	0,01
Sódio	200	200	-
Sólidos Totais Dissolvidos (STD)	500	1000	-
Sulfato	250	250	-
Zinco	5	5	1,05

Segundo a Lei Estadual 10.350/94 (RIO GRANDE DO SUL, 1995), todos os empreendimentos ou atividades que modifiquem as condições quali-quantitativas das águas superficiais e subterrâneas dependerão da outorga do uso da água, observado o Plano Estadual de Recursos Hídricos e os Planos de Bacia Hidrográfica. A outorga será emitida pelo Departamento de Recursos Hídricos quando o uso da água alterar condições quantitativas das águas e pelo órgão ambiental estadual, se o uso alterar condições qualitativas. Por fim, são dispensados da outorga os usos de caráter individual para satisfação das necessidades básicas da vida.

Conforme o Decreto nº 37033/96 (RIO GRANDE DO SUL, 1996), as águas de domínio do Estado do Rio Grande do Sul, superficiais e subterrâneas, somente poderão ser objeto de uso após outorga pelo DRH e Fepam, mediante licença de uso. O usuário deverá atender às condições definidas pelos órgãos em função da disponibilidade quali-

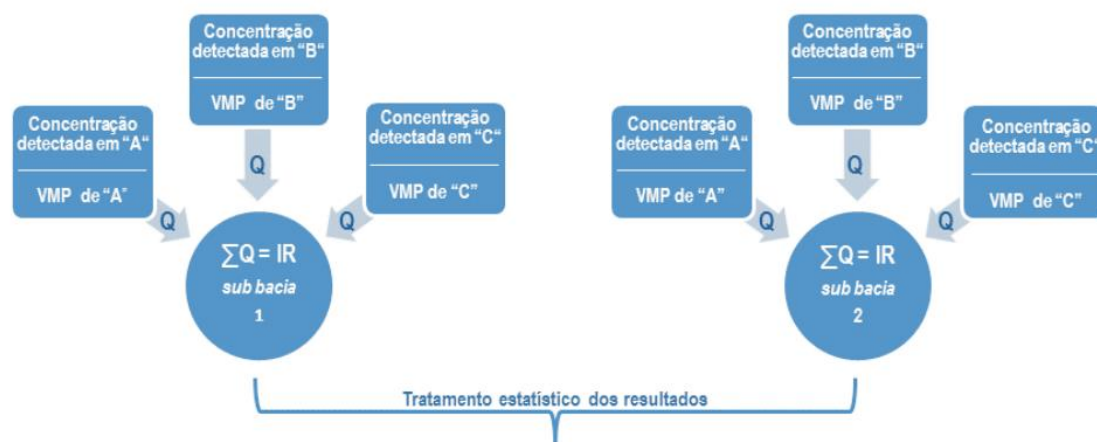
quantitativa da água na bacia e autorização, nos casos em que não haja definição das condições referidas. Além disso, cabe a Fepam estabelecer também os critérios para a gestão da qualidade das águas subterrâneas.

O Decreto nº 42.047 (RIO GRANDE DO SUL, 2012) regulamenta o gerenciamento e a conservação das águas subterrâneas e dos aquíferos no Estado do Rio Grande do Sul. Segundo os artigos 6 e 7, é dever da Fepam normalizar procedimentos de prevenção, controle e fiscalização da qualidade das águas subterrâneas e da Secretaria Estadual da Saúde, em articulação com os Municípios, a fiscalização da qualidade das águas subterrâneas destinadas ao consumo humano, quanto ao atendimento do padrão da potabilidade, estabelecida por legislação específica. Em seu artigo 14, institui que os estudos hidrogeológicos, projetos, e as obras de captação de águas subterrâneas deverão ser realizados por profissionais, empresas ou instituições legalmente habilitadas perante seus respectivos Conselhos Profissionais, exigindo-se o comprovante de Anotação de Responsabilidade Técnica. Qualquer obra de captação de águas subterrâneas no território do Estado deverá ser cadastrada no DRH pelo construtor e usuário.

3.3.2. Métodos de Avaliação do Risco à Saúde Humana

Um método que é utilizado como ferramenta hidroquímica para classificação de bacias hidrográficas é o Índice Relativo de Risco (IRR), que tem como base a detecção de multielementos dissolvidos na água e suas características tóxicas e/ou carcinogênicas. O cálculo do IRR é realizado pela divisão entre a concentração de parâmetros (cátions e ânions) na amostra e seus respectivos VMPs. Ao final os quocientes (Q) de cada parâmetro são somados, resultando no índice da bacia como ilustra a Figura 3 (ATHAYDE *et al.*, 2014).

Figura 3 - Fluxograma do cálculo do Índice Relativo de Risco (IRR) para ingestão de água superficial in natura, aplicado para as bacias hidrográficas que não apresentaram risco, quando comparadas com os Valores Máximos Permitidos (VMPs)



Fonte: Athayde *et al.* (2014)

Outro método utilizado é a Avaliação do Risco apresentado no Manual de Avaliação da Saúde Humana da U.S. EPA. Para estimativa de risco de desenvolvimento de efeitos carcinogênicos à saúde humana são utilizados os fatores de inclinação, para estimar o risco, que são definidos como o limite superior de probabilidade de uma resposta, ou seja, câncer, por unidade de consumo de uma substância química, ao longo da vida. O potencial não carcinogênico de efeitos à saúde, a partir da exposição oral é avaliado pela comparação dos níveis diários de ingestão estimados com doses de referência (RfDs). Já para a avaliação da exposição, devem ser identificadas as populações que podem estar expostas, considerando a proximidade e a facilidade de entrar em contato com a possível fonte de contaminação (U.S. EPA, 1989).

Para a caracterização do risco, são utilizados os parâmetros da Tabela 3. Com as concentrações das substâncias químicas e os parâmetros de exposição, calcula-se o ingresso, que é definido, segundo Cetesb (2001), como a quantidade de composto químico disponível para absorção que poderá entrar em contato com determinado organismo. A fórmula utilizada para o cálculo do ingresso por ingestão de água contaminada é apresentada pela Equação 1.

Tabela 3 - Parâmetros de exposição sugeridos para ingestão de água contaminada para os cenários urbano e rural

Parâmetro	Residencial Urbano		Residencial Rural	
	Adulto	Criança	Adulto	Criança
IR (L/dia)	2	1	2	1
EF (dia/ano)	350	350	350	350
ED (ano)	30	6	72	6
BW (kg)	70	15	63	15
ATn (dias)	10950	2190	26280	2190
ATc (dias)	26280	26280	26280	26280

Fonte: Cetesb (2013)

$$I = C \times \frac{IR \times EF \times ED}{BW} \times \frac{1}{AT} \quad \text{Equação 1}$$

Onde: I = Ingresso por ingestão de água contaminada (mg/kg.dia); C = Concentração do composto químico na água (mg/L); IR = Taxa de ingestão de água (L/dia); EF = Frequência da exposição (dias/ano); ED = Duração média da exposição (ano); BW = Peso corpóreo médio do indivíduo durante a exposição (kg); e AT = Período de exposição médio durante a exposição (dias).

O risco carcinogênico é quantificado pela Equação 2. Os efeitos carcinogênicos são somados, por meio da Equação 3, para todas as substâncias químicas presentes nas vias de exposição. Esse somatório de riscos carcinogênicos assume que todas as substâncias produzem o mesmo efeito (U.S. EPA, 1989).

$$Risco = I_n \times SF \quad \text{Equação 2}$$

Onde: I_n = Dose de ingresso para o cenário de exposição “n” (mg/kg.dia); e SF = “*Slope Factor*” ou Fator Potencial Carcinogênico (mg/kg.dia).

$$Risco T = \sum Risco_n \quad \text{Equação 3}$$

Onde: Risco T = Risco Total Carcinogênico, expresso como uma probabilidade unidestrítica; e Risk = Estimativa de risco para a substância “n”.

Os efeitos não carcinogênicos são avaliados pelo cálculo do quociente de risco não carcinogênico (NHQ) que é obtido por meio da comparação de um nível de exposição por período de tempo (dose de ingresso) com uma RfD para um período de exposição similar, conforme apresentado na Equação 4.

$$NHQ = \frac{I_n}{RfD_i} \quad \text{Equação 4}$$

Onde: I_n = Dose de ingresso para o cenário de exposição “n” (mg/kg.dia); e RfD_i = Dose de referência para via de ingresso “i” (mg/kg.dia).

Ao contrário das estimativas de risco carcinogênico, o NHQ não é expresso como probabilidade. Valores de NHQ menores do que 1 indicam que as exposições provavelmente não estão associadas a efeitos não carcinogênicos adversos. Conforme o NHQ vai aumentando, ou seja, valores superiores à 1, a probabilidade de efeitos adversos aumenta até o ponto onde devem ser tomadas ações para redução da exposição humana. Em razão das incertezas que envolvem essas estimativas, valores entre 1 e 10 são preocupantes, especialmente quando fatores de risco significantes estão presentes. Porém, em decorrência de que os RfDs não possuem igual precisão e não são baseados no mesmo efeito, a avaliação dos índices de perigo devem levar em conta as incertezas associadas com os RfDs (U.S. EPA, 1989).

O índice de risco não carcinogênico (HI) é definido pelo somatório de dois ou mais NHQs para múltiplas substâncias químicas e rotas de exposição, como é apresentado na Equação 5.

$$HI = \sum \frac{I_n}{RfD_i} \quad \text{Equação 5}$$

Onde: I_n = Dose de ingresso para o cenário de exposição “n” (mg/kg.dia); e RfD_i = Dose de referência para via de ingresso “i” (mg/kg.dia).

3.3.3. Efeitos do Sódio na Saúde Humana

O íon sódio é um dos principais minerais do plasma sanguíneo e o mais importante no meio extracelular. A principal função do sal no organismo humano consiste na modulação e permuta de líquidos entre os vários órgãos, permitindo uma troca constante e bem regulada dos nutrientes e dos produtos de desgaste entre a célula e o seu meio externo, motivo este que torna o sódio essencial à manutenção osmótica do sangue, plasma e fluídos (NILSON; JAIME; RESENDE, 2012).

Atuando também no equilíbrio ácido-base do sangue, o sódio mantém o pH estável em 7,4 por meio da solução tampão ácido carbônico e bicarbonato de sódio, o que também ocorre com o ácido fosfórico e o tampão fosfato de sódio. Esses efeitos

tamponantes impedem a acidose e a alcalose sanguíneas e apontam destacadas consequências no processo de excreção renal, na digestão e na respiração (VEIGA JUNIOR *et al.*, 2019).

O sódio é importante no controle das concentrações de sais nos tecidos e células a fim de manter de forma ativa as condições adequadas à atividade metabólica, isto é, homeostasia (equilíbrio entre água e sais minerais no organismo), por meio da osmorregulação (regulação da pressão osmótica interna em certos limites, independente da concentração do meio externo). Quando se obtém o íon sódio a partir da alimentação, a urina e o suor são responsáveis por eliminá-lo. Desse modo, os rins têm importante papel em manter a osmolaridade desse íon no organismo. Quando ocorre uma diminuição na concentração do sódio na corrente sanguínea, por exemplo: em uma dieta hipossódica, o rim libera mais água, a fim de armazenar mais sódio. Já quando ocorre o contrário, e sua concentração aumenta a partir de uma dieta com altos teores de sódio, o rim o libera, a fim de manter a água para uso do corpo. Esse equilíbrio é essencial à saúde e, conseqüentemente, uma dieta controlada de íons sódio é imprescindível à sua manutenção. Em suma, com uma dieta rica em sódio, os rins não dão conta de eliminar seu excesso, aumentam a retenção de água e volume sanguíneo, com conseqüentes edemas e elevação da pressão arterial (VEIGA JUNIOR *et al.*, 2019).

O consumo diário médio de sal do brasileiro chega a 12 gramas (IBGE, 2011). No entanto, a Organização Mundial da Saúde (WHO, 2003) recomenda uma ingestão diária para adultos não hipertensos de no máximo 5 g de sal, que é equivalente a 2.000 mg de sódio, sendo sugerido para aqueles acometidos de hipertensão somente 1 g de sal por dia. Para crianças e adolescentes o consumo de baixas concentrações de sódio pode representar melhoria da saúde cardíaca na vida adulta (COXSON *et al.*, 2013).

Vários estudos mostraram que as crianças são mais sensíveis do que os adultos à ingestão elevada de sódio (ELTON *et al.* 1963; GAUTHIER *et al.* 1969; DEGENARO; NYHAN, 1971). Este aumento de sensibilidade é associado à menor capacidade do rim imaturo de controlar os níveis de sódio em comparação com a do rim adulto. No entanto, em uma base de mg/kg, a necessidade de sódio para bebês e crianças é maior do que para adultos (NRC, 1989).

Além das crianças, os idosos podem ser mais sensíveis aos efeitos adversos à saúde decorrentes de alta exposição ao sódio. Isso ocorre porque os idosos têm uma maior

incidência de doenças cardiovasculares (incluindo pressão alta) do que indivíduos mais jovens (SOWERS; LESTER, 2000). Portanto, os efeitos hipertensivos do sódio podem ser mais graves em idosos. Além disso, como os idosos tendem a ter um limite de sabor mais alto para o sal, eles podem ter uma ingestão maior de sal (HYDE; FELLER, 1981; STEVENS, 1996).

A hipernatremia, que é o excesso agudo de sódio, pode ser fatal, e, mesmo em níveis não-tóxicos, porém elevados, o consumo excessivo de sódio está relacionado ao aumento da pressão arterial e de desfechos cardiovasculares associados (STRAZZULLO; LECLERCQ, 2014). Concomitantemente, a hiponatremia, que é a falta de sódio, também é grave, ainda que rara, relacionada a outras doenças de base, particularmente em pacientes hospitalizados (ROCHA, 2011).

Embora a quase onipresença atual do sal em alimentos, na evolução humana a inserção do sal na dieta humana é relativamente recente. O homem evoluiu por milhões de anos com uma dieta de menos de 0,1g/dia de sódio (0,25g/dia de sal), naturalmente presente nos alimentos (EATON; KONNER, 1985) e o sal só começou a fazer parte das dietas nos últimos 5.000 a 10.000 anos (HE; MACGREGOR, 2007). Ademais, evidências indicam que a aceitação e preferência pelo sal são supostamente adquiridas e moldadas cedo na infância, por meio da exposição a alimentos com maior quantidade de sal (STEIN; COWART; BEAUCHAMP, 2012). Em termos evolutivos, isso significa que a programação genética dos humanos está associada à dieta ancestral, de menos de 0,25g/dia de sal, e foi adaptada para a conservação de sódio no organismo, por mecanismos fisiológicos complexos incluindo a redução da eliminação pela urina e suor, por exemplo. Consequentemente, a mudança para uma dieta rica em sal, atualmente de 9g a 12g/dia, representa um enorme desafio aos sistemas fisiológicos humanos considerando a necessidade de extinguir o excesso de sal pelos rins por meio da urina (BOON *et al.* 2010).

Os Padrões Internacionais de Água Potável de 1958, 1963 e 1971 da OMS não se referiam ao sódio. Na primeira edição do *Guidelines for Drinking-water Quality* (WHO, 2006), publicado em 1984, concluiu-se que não havia evidências suficientes para justificar um valor de diretriz para o sódio na água com base em considerações de risco à saúde, mas observou-se que a ingestão de sódio da água potável pode ser de maior importância em bebês e pessoas que necessitam de uma dieta restrita ao sódio.

Estabeleceu-se um valor de diretriz de 200 mg/L para o sódio com base em considerações de sabor. Não foi proposto nenhum valor de diretriz à base de saúde para o sódio nas Diretrizes de 1993, uma vez que não foram realizadas conclusões firmes sobre a possível associação entre o sódio na água potável e a ocorrência de hipertensão. No entanto, concentrações superiores a 200 mg/L podem dar origem a um sabor inaceitável. Essa avaliação foi antecipada para a terceira edição das Diretrizes, publicada em 2004, e para a quarta edição das Diretrizes, publicada em 2011.

A água potável não desempenha um papel significativo na exposição ao sódio para a maioria dos indivíduos, porém aqueles que estão sob tratamento para hipertensão sensível ao sódio devem consultar seu médico sobre os níveis de sódio em seu abastecimento de água potável e a conveniência de usar uma fonte alternativa de água ou tratamento no local de uso para reduzir o sódio. Para indivíduos com dieta com baixo teor de sódio (500 mg/dia), a U.S. EPA recomenda que o sódio da água potável não exceda 20 mg/L. Para evitar efeitos adversos no paladar, a U.S. EPA recomenda que as concentrações de sódio na água potável não excedam 30 a 60 mg/L, um limite para segmentos da população sensíveis ao paladar. Muitos indivíduos não serão capazes de detectar a presença de sódio nesta faixa de concentração (U.S. EPA, 2003). A U.S. EPA exige que os Sistemas Públicos de Água que excedam 20 mg/L notifiquem os funcionários de saúde pública locais e estaduais (U.S. EPA, 1996).

As diretrizes australianas de água potável têm um nível de orientação estética para o sódio com base no sabor de 180 mg/L. Nenhum valor de orientação baseado na saúde foi definido para o sódio, pois uma pessoa não poderá beber uma grande quantidade de água com níveis de sal altos o suficiente para causar-lhe algum dano (NHMRC, 2011). Wright *et al.* (2019) relatam que os australianos consomem muito sal e muitos precisam reduzir o sal em sua dieta, portanto, o componente de sódio do sal tem implicações importantes para a saúde. Para pessoas que seguem dietas com baixo teor de sódio por motivos de saúde, o sal da água potável pode ser importante. Em geral, é recomendado que pessoas em dietas com baixo teor de sódio bebam água com menos de 20 mg de sódio por litro, mas nas cidades de Brisbane, Adelaide e a maior parte de Perth têm água mais salgada do que isso.

O *Guidelines for Canadian Drinking Water Quality* (2020) apresenta que o objetivo estético do sódio na água potável é de ≤ 200 mg/L. Geralmente, o sabor da água

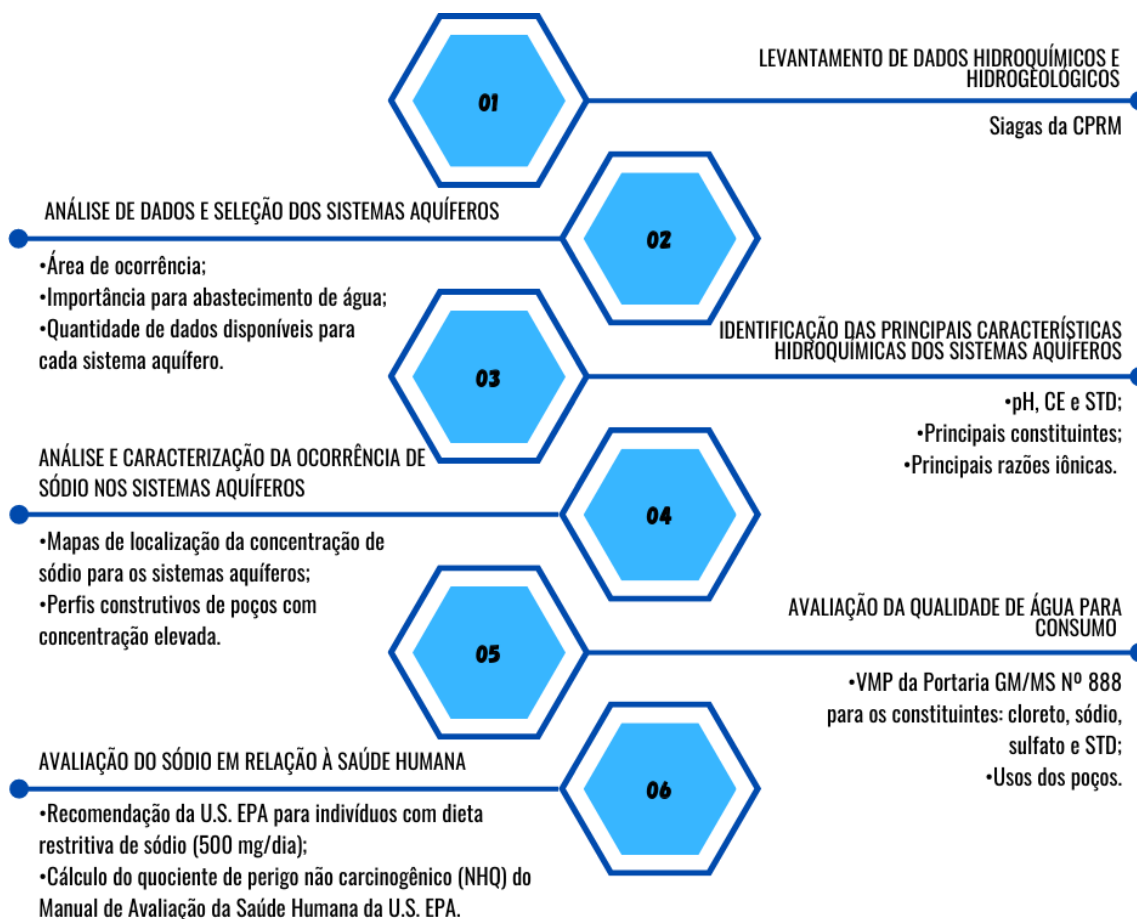
potável é desagradável a uma concentração de sódio acima de 200 mg/L. Segundo o Documento Técnico de Diretrizes, o sódio não é considerado um elemento tóxico. Até 5 g/dia de sódio é consumido por adultos normais sem efeitos adversos aparentes. Embora vários estudos tenham demonstrado que a redução da ingestão de sódio reduz a pressão arterial em hipertensos, não se pode inferir que o aumento da ingestão de sódio cause hipertensão. Portanto, não foi estabelecida uma concentração máxima aceitável de sódio na água potável. Para manter uma ingestão diária total de sódio de 500 mg, como é amplamente prescrito para pessoas com dieta restrita em sódio, seria necessária uma concentração de sódio na água potável não superior a 20 mg/L (HEALTH CANADA, 2020).

Devido às recomendações da OMS e de outros países citadas nos parágrafos acima referente às concentrações de sódio na água potável com base no sabor e em dietas com baixo teor de sódio, verifica-se a necessidade desenvolvimento de estudos relacionem a ocorrência de sódio na água com o risco em relação à saúde humana. Além disso, devido não existir nenhum estudo hidroquímico regional para aquíferos com enfoque no elemento sódio, apenas estudos locais desenvolvidos por Goffermann (2012; 2013 e 2015), este trabalho será importante, pois abordará a ocorrência do sódio nos principais aquíferos do Rio Grande do Sul, portanto poderá servir de apoio a prestadoras de serviço de abastecimento de água e a órgãos ambientais e de saúde.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir é apresentada a Figura 4, que apresenta a sequência metodológica das atividades desenvolvidas neste estudo. Já em seguida são descritos e detalhados cada um dos 6 itens apresentados no diagrama.

Figura 4 - Diagrama da sequência metodológica e das atividades desenvolvidas



4.1. Levantamento de Dados Hidroquímicos e Hidrogeológicos

A elaboração do banco de dados foi realizada por meio da consulta e levantamento de dados hidroquímicos (pH, CE, STD, Na, K, Ca, Mg, Cl, Sulfatos, Alcalinidade, Dureza, Fluoreto, Manganês, Ferro e Nitrato) e hidrogeológicos de poços cadastrados (localização, profundidade do poço, tipo de aquífero, nível estático e vazão) no Siagas da CPRM. Os dados obtidos foram armazenados em uma planilha Excel e foram utilizados no desenvolvimento das atividades previstas nas próximas etapas.

4.2. Análise de Dados e Seleção dos Sistemas Aquíferos

Com base nos dados obtidos e armazenados na planilha Excel foi realizada a identificação dos sistemas aquíferos e a avaliação dos dados disponíveis para cada sistema aquífero.

A identificação dos sistemas aquíferos foi feita com base na localização dos poços em relação ao mapa hidrogeológico do Estado do Rio Grande do Sul, bem como por meio da análise da formação geológica que está associado ao aquífero que está sendo captado pelo poço. Para a avaliação da localização dos poços foi utilizado o programa *ArcGis*, onde os poços foram plotados, tendo como base o mapa hidrogeológico para identificar os sistemas aquíferos que estão sendo captados por cada um dos poços.

A seleção dos principais sistemas aquíferos foi feita com base nos seguintes critérios: área de ocorrência, importância para abastecimento de água e quantidade de dados disponíveis para cada sistema aquífero.

Os dados de poços sem perfil construtivo ou com descrições geológicas simplificadas ou controversas em relação a formação geológica ou, ainda, com localização duvidosa foram retirados do estudo.

Após, a seleção dos sistemas aquíferos, foram elaboradas planilhas em Excel com os dados disponíveis de cada um dos sistemas aquíferos.

4.3. Identificação das Principais Características Hidroquímicas dos Sistemas Aquíferos

Com base nos dados armazenados na planilha *Excel*, foram feitas avaliações do pH, CE, STD dos principais sistemas aquíferos. Além disso, também foram avaliados os principais constituintes das águas subterrâneas, por meio de análises estatísticas descritivas visando a determinação de valores máximos e mínimos, média, mediana, desvio padrão e quartis.

Os valores de STD foram obtidos por meio dos valores de CE com a Equação ($STD = 0,65 \times CE$) que é utilizada pelo software Qualigraf (MOBUS, 2002). Os valores de STD entre 500 e 1.500 mg/L indicam a ocorrência de águas salobras e acima de 1.500 indicam a ocorrência de águas salgadas, conforme a Resolução Conama 357/2005, além disso, valores acima de 500 mg/L ultrapassam o VMP da Portaria GM/MS nº 888 de 2021.

Nessa etapa foram avaliadas as principais razões iônicas (rMg^{+2}/Ca^{+2} ; rK^{+}/Na^{+} ; rNa^{+}/Ca^{+2} ; $rNa^{+}/Ca^{+2}+Mg^{+2}$; rCl^{-}/HCO_3^{-} ; rNa^{+}/Cl^{-} ; $rHCO_3^{-}/Ca^{+2}$; rCa^{+2}/Mg^{+2} ; rNa^{+}/K^{+}) de cada um dos sistemas aquíferos.

4.4. Análise e caracterização da ocorrência de sódio nos Sistemas Aquíferos

Para cada sistema aquífero foi realizada a avaliação da ocorrência de sódio, sendo que para isso foram realizadas análises estatísticas visando a determinação de valores máximos e mínimos, média, mediana, desvio padrão e quartis.

Ademais, foram gerados mapas de localização da concentração de sódio para os sistemas aquíferos, sendo que os mapas foram gerados com uso do *ArcGis*. As concentrações de sódio dos poços foram divididas em classes de valores, os intervalos de valores adotados foram: abaixo de 200 mg/L, entre 200 e 400 mg/L, entre 400 e 600 mg/L, entre 600 e 800 mg/L, entre 800 e 1.000 mg/L, entre 1.000 e 1.500 mg/L e acima de 1.500 mg/L. Esses intervalos foram escolhidos devido ao número de dados e, também, devido a visualização da distribuição espacial dos poços.

4.5. Avaliação da Qualidade de Água para Consumo

Para a avaliação da qualidade água para consumo humano foi realizada a análise das concentrações constituintes (cloreto, sódio, sulfato e STD) que possuem padrões de potabilidade conforme a Portaria GM/MS N° 888 (BRASIL, 2021). Ademais, foi realizada a análise dos usos dos poços que possuem concentrações superiores aos VMPs da Portaria GM/MS N° 888.

4.6. Avaliação do sódio em relação à saúde humana

Primeiramente, foi realizada a análise das concentrações de sódio com relação à recomendação da U.S. EPA e de outros países sobre a concentração de sódio na água potável menor que 20 mg/L para indivíduos com dieta restritiva de sódio (500 mg/dia).

Posteriormente, foi realizada a avaliação do risco do sódio em relação à saúde humana, por meio dos resultados obtidos pelo cálculo do quociente de perigo não carcinogênico (NHQ).

Primeiramente, foi calculada a dose ingresso da água subterrânea por meio da Equação 1 ($I = C \times \frac{IR \times EF \times ED}{BW} \times \frac{1}{AT}$). Foi considerado um cenário de ingestão de água subterrânea para o período de exposição médio durante a exposição de substância química

não carcinogênica, cujos receptores escolhidos serão adultos em um cenário de residencial urbano, conforme Tabela 3. Após, foi calculado o quociente de perigo não carcinogênico (NHQ) por meio da Equação 4 ($NHQ = \frac{I_n}{RfD_i}$). A Dose de referência para via de ingresso (RfD) considerada no cálculo do NHQ é referente à Recomendação de 2010 da *American Heart Association* de 1.500 mg/dia de sódio, dividido por 70 kg adulto, que é igual a 21 mg/kg-dia, conforme utilizado pelo Departamento de Qualidade Ambiental de Michigan (MDEQ, 2015). O cenário de adultos de residencial urbano foi escolhido, pois o peso corpóreo médio do indivíduo durante a exposição é o mesmo valor que é utilizado na RfD.

5. RESULTADOS

5.1. Levantamento e análise dos Dados Hidroquímicos e Hidrogeológicos e Seleção dos Sistemas Aquíferos

A elaboração do banco de dados foi realizada por meio de levantamento de dados secundários, onde se realizou a consulta de dados hidroquímicos e hidrogeológicos de poços cadastrados no Siagas da CPRM, sendo que ao total foram obtidos dados de 19.513 poços.

Dos poços levantados, 4.687 possuem informação referente à concentração de sódio. A Figura 6 apresenta a localização dos poços que possuem dados referente a concentração de sódio. É possível observar que a região com a maior concentração de poços com dados é no eixo Caxias do Sul - Porto Alegre.

Também foi avaliado o sistema aquífero dos poços que continham informação de sódio. A Figura 5 apresenta o percentual de poços por sistema aquífero. A maioria dos poços encontram-se no sistema aquífero Serra Geral, seguido pelo sistema aquífero Guarani. Após isso, os dados foram avaliados por sistema aquífero e os resultados serão apresentados nos próximos itens desse capítulo.

Figura 5 - Percentual de poços por sistema aquífero

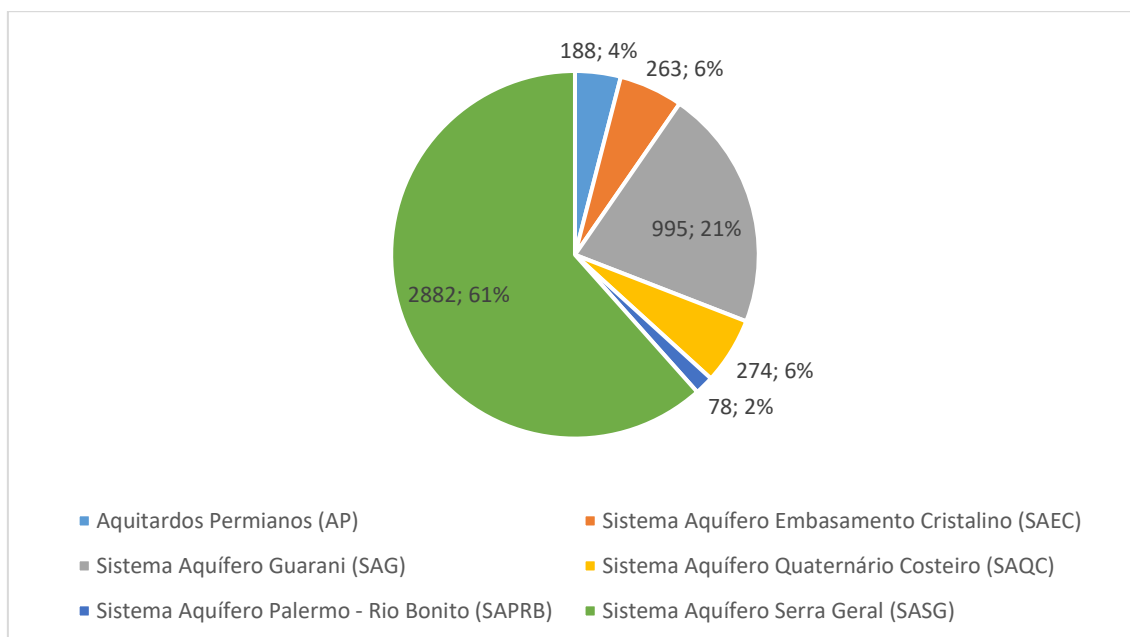
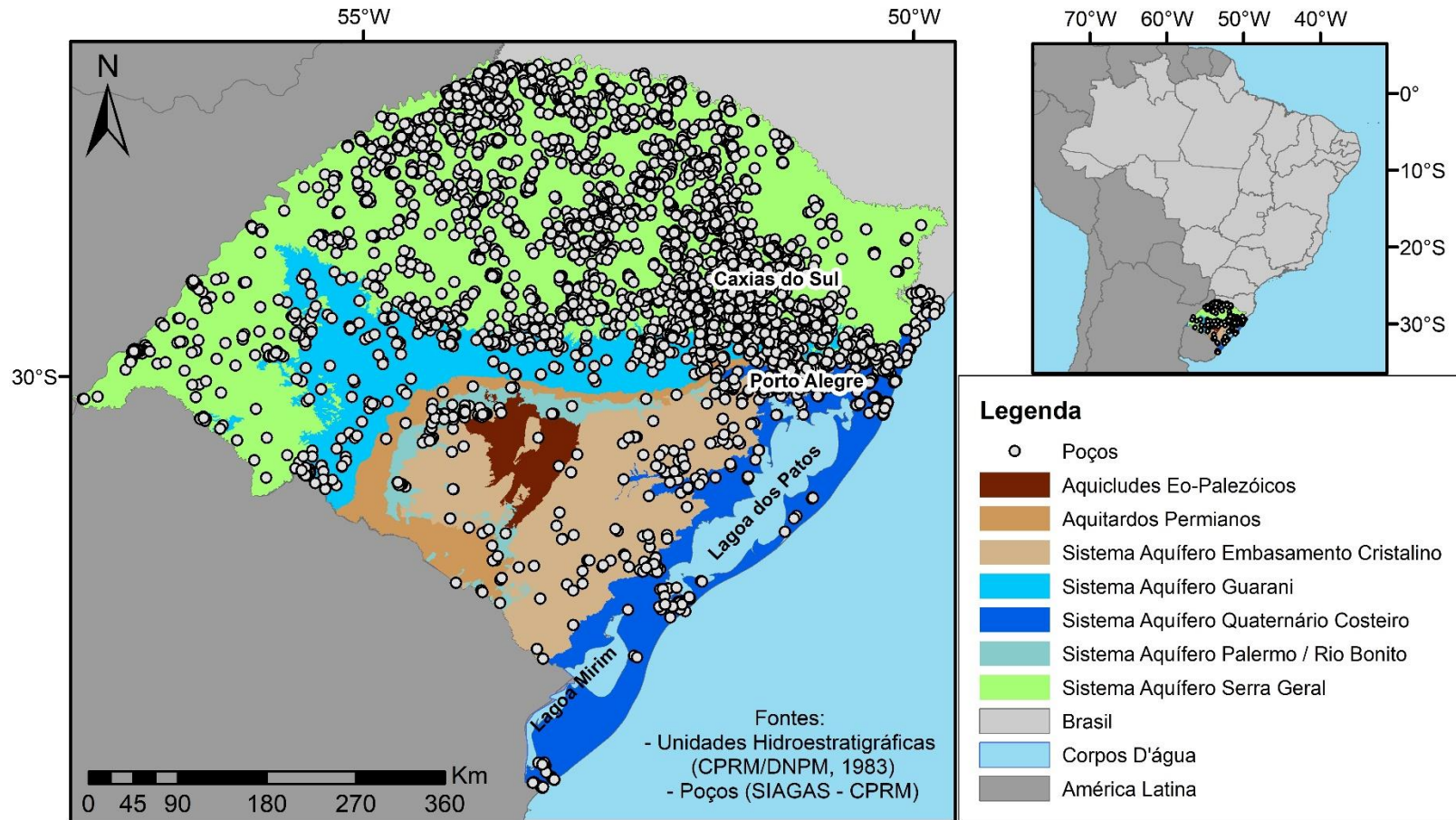


Figura 6 - Mapa da localização dos poços com informação de Sódio (Na) no Estado do Rio Grande do Sul



5.2. Identificação das Principais Características Hidroquímicas dos Sistemas Aquíferos

5.2.1. Aquitardos Permianos (AP)

Na Tabela 4 são apresentados os valores dos parâmetros de pH, CE e STD das análises físico químicas dos poços que apresentavam tais dados.

Tabela 4 - Valores estatísticos para os parâmetros de pH, Condutividade Elétrica (CE) e Sólidos Totais dissolvidos (STD) para os Aquitardos Permianos

	pH	Condutividade elétrica ($\mu\text{S/cm}$)	STD (mg/L)
Valor Médio	7,89	575,02	373,76
Valor Máximo	9,64	4800	3120
Valor Mínimo	6,1	33,5	21,78
Valor Mediana	7,82	372	241,78
Desvio Padrão	0,83	648,89	421,78
Número de poços	58	183	183

O valor do pH variou entre 6,1 a 9,64, com média de 7,89, assim as águas variam de uma acidez fraca a uma alcalinidade média, mas a maioria mantém o pH neutro a fracamente alcalino. Observa-se que a faixa de valores de pH encontrada é semelhante aos resultados obtidos para os Aquitardos Permianos na região de Gravataí (WINK, 2015).

Os valores de condutividade elétrica, parâmetro relacionado com a facilidade da água conduzir corrente elétrica, está relacionada diretamente ao teor de sais dissolvidos sob a forma de íons. Os valores variam entre 33,5 $\mu\text{S/cm}$ a 4800 $\mu\text{S/cm}$, com média 575,02 $\mu\text{S/cm}$, conforme a Tabela 4, demonstrando que há uma variação alta na CE dos poços.

As águas subterrâneas dos Aquitardos Permianos na região de São Gabriel (GOFFERMANN, 2015) apresentavam valores mais elevados (1.476 a 3.740 $\mu\text{S/cm}$), já na região de Gravataí (WINK, 2015) apresentavam valores mais baixos, entre 27 e 391 $\mu\text{S/cm}$. As águas subterrâneas dos Aquitardos Permianos avaliadas neste estudo abrangeram toda a área do Estado, portanto apresentaram esta grande variação nos valores de CE.

Os STD é a medida de peso total dos constituintes minerais presentes na água, por unidade de volume. Representa a concentração de todo material dissolvido na água, seja ou não volátil. Os valores dos poços analisados variaram de 21,78 a 3.120 mg/L, com média 373,76 mg/L e mediana de 241,78 mg/L. Portanto, o valor máximo de STD para os AP ultrapassa o VMP e indica a ocorrência de água salgada.

As concentrações dos principais constituintes para os poços que captam água dos Aquitardos Permianos são apresentadas, em mg/L, na Tabela 20. Observa-se valores elevados nas concentrações dos elementos em geral, o valor máximo das concentrações de Cloreto, Sódio e Sulfato ultrapassam os VMPs estabelecidos pela Portaria GM/MS 888 e Resolução Conama 396.

Tabela 5 - Concentrações (mg/L) dos principais constituintes dos Aquitardos Permianos

	Cálcio (Ca)	Cloreto (Cl)	Potássio (K)	Magnésio (Mg)	Sódio (Na)	Sulfato (SO₄)	Alcalinidade total
Valor Médio	23,02	61,13	4,03	11,14	97,15	51,99	189,22
Valor Máximo	340,69	1561,5	180	129,77	880	1100	511
Valor Mínimo	0,74	0,14	0,01	0,01	2	0,95	6,35
Valor Mediana	15	15,47	2	6,7	45	14,21	178,17
Desvio Padrão	38,65	173,49	15,14	14,22	129,8	115,4	92,95
VMP(*)	-	250	-	-	200	250	-

(*) VMPs estabelecidos pela Portaria GM/MS 888 e Resolução Conama 396.

As principais razões iônicas para os poços que captam água dos Aquitardos Permianos são apresentadas na Tabela 21. Nota-se valores bem variados entre o valor mínimo e valor máximo para cada razão iônica. As razões iônicas onde o Na⁺ aparece no numerador apresentaram valor máximo e valores médios elevados.

Tabela 6 - Principais Razões Iônicas para os Aquitardos Permianos

	rMg⁺² /Ca⁺²	rK⁺ /Na⁺	rNa⁺ /Ca⁺²	rNa⁺ /Ca⁺²+Mg⁺²	rCl⁻ /HCO₃⁻	rNa⁺ /Cl⁻	rHCO₃⁻ /Ca⁺²	rCa⁺² /Mg⁺²	rNa⁺ /K
Média	1,11	0,14	15,2	8,93	0,64	10,49	9,68	9,25	513,81
Mediana	0,86	0,02	2,99	1,51	0,14	3,83	4,05	1,16	41,22
Mínimo	0,001	0,0001	0,1	0,05	0,01	0,1	0,09	0,12	0,09
Máximo	8,18	10,61	405,09	303,82	24,09	352,8	113,24	1.197,65	26.454,29
Desvio Padrão	1,14	0,9	43,25	28,44	2,36	33,76	16,41	93,99	2.721,83

5.2.2. Sistema Aquífero Embasamento Cristalino (SAEC)

Na Tabela 7 são apresentados os valores dos parâmetros de de pH, CE e STD das análises físico químicas dos poços que apresentavam tais dados.

Tabela 7 - Valores estatísticos para os parâmetros de pH, Condutividade Elétrica (CE) e Sólidos Totais dissolvidos (STD) para o Sistema Aquífero Embasamento Cristalino

	pH	Condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	STD (mg/L)
Valor Médio	7,25	411,07	267,46
Valor Máximo	9,4	6.290	4.088,5
Valor Mínimo	5,66	0,19	0,12
Valor Mediana	7,2	244,5	157,3
Desvio Padrão	0,77	605,79	395,39
Número de poços	84	240	240

O valor do pH variou entre 5,66 a 9,4, com média de 7,25, assim as águas variam de uma acidez fraca a uma alcalinidade média, mas a maioria mantém o pH neutro a fracamente alcalino.

Os valores de condutividade elétrica variam entre 0,19 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 6.290 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com média 411,07 $\mu\text{S}/\text{cm}$, demonstrando que há uma concentração bastante alta em alguns poços. Já para Sólidos Totais Dissolvidos (STD), os valores dos poços analisados variaram de 0,12 a 4.088,5 mg/L, com média 267,46 mg/L e mediana de 157,3 mg/L.

As concentrações dos principais constituintes para os poços que captam água do Sistema Aquífero Embasamento Cristalino são apresentadas, em mg/L, na Tabela 20. Observa-se altos valores nas concentrações dos elementos em geral, o valor máximo das concentrações de Cloreto, Sódio e Sulfato ultrapassam os VMPs estabelecidos pela Portaria GM/MS 888 e Resolução Conama 396.

Observa-se que as concentrações de Sódio encontradas para os poços do SAEC neste estudo, ultrapassam o valor máximo da concentração de sódio (189 mg/L) encontrado por Goffermann (2013) no município de São Gabriel.

Tabela 8 - Concentrações (mg/L) dos principais constituintes do Sistema Aquífero Embasamento Cristalino

	Cálcio (Ca)	Cloreto (Cl)	Potássio (K)	Magnésio (Mg)	Sódio (Na)	Sulfato (SO₄)	Alcalinidade total
Valor Médio	26,54	57,91	3,1	9,57	60,53	28,94	116,57
Valor Máximo	380	1.684	12,5	146	780	812,5	287,23
Valor Mínimo	0,2	0,004	0,01	0,01	2	0,1	7,07

	Cálcio (Ca)	Cloreto (Cl)	Potássio (K)	Magnésio (Mg)	Sódio (Na)	Sulfato (SO₄)	Alcalinidade total
Valor Mediana	19	10,62	2,5	5,2	23	9	98
Desvio Padrão	36,09	170,77	2,38	13,44	111,88	78,21	103,65
VMP^(*)	-	250	-	-	200	250	-

(*) VMPs estabelecidos pela Portaria GM/MS 888 e Resolução Conama 396.

As principais razões iônicas para os poços que captam água do SAEC são apresentadas na Tabela 21. Nota-se valores bem variados entre o valor mínimo e valor máximo para cada razão iônica. As razões iônicas onde o Na⁺ aparece no numerador apresentaram valor máximo e valores médios elevados.

Tabela 9 - Principais Razões Iônicas para o Sistema Aquífero Embasamento Cristalino

	rMg⁺² /Ca⁺²	rK⁺ /Na⁺	rNa⁺ /Ca⁺²	rNa⁺ /Ca⁺²+Mg⁺²	rCl⁻ /HCO₃⁻	rNa⁺ /Cl⁻	rHCO₃⁻ /Ca⁺²	rCa⁺² /Mg⁺²	rNa⁺ /K
Média	0,77	0,09	2,85	1,61	0,79	30,68	2,77	20,87	83,59
Mediana	0,54	0,05	1,29	0,82	0,19	3,30	2,00	1,87	18,99
Mínimo	0,0002	0,0002	0,03	0,02	0,0001	0,06	0,05	0,09	0,85
Máximo	11,33	1,18	43,91	34,78	18,35	6.559,82	32,41	4.125,17	5.765,68
Desvio Padrão	1,02	0,13	5,51	3,01	2,29	410,52	3,53	265,01	459,44

5.2.3. Sistema Aquífero Guarani (SAG) - área aflorante

Na Tabela 10 são apresentados os valores dos parâmetros de pH, CE e STD das análises físico químicas dos poços do SAG (área aflorante) que apresentavam tais dados.

Tabela 10 - Valores estatísticos para os parâmetros de pH, Condutividade Elétrica (CE) e Sólidos Totais dissolvidos (STD) para o Sistema Aquífero Guarani - área aflorante

	pH	Condutividade elétrica (µS/cm)	STD (mg/L)
Valor Médio	7,29	312,43	199,83
Valor Máximo	10,88	6.196	4.027,4
Valor Mínimo	5,1	0,25	0,16
Valor Mediana	7,2	236	148,2
Desvio Padrão	1,01	417,36	268,82
Número de poços	317	692	692

O valor do pH variou entre 5,1 a 10,88, com média de 7,29, assim as águas variam de uma acidez média a uma alcalinidade elevada, mas a maioria mantém o pH neutro a fracamente alcalino.

Os valores de condutividade elétrica variam entre 0,25 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 6.196 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com média 312,43 $\mu\text{S}/\text{cm}$, demonstrando que há uma concentração significativa em alguns poços. Já para STD, os valores dos poços analisados variaram de 0,16 a 4.027,4 mg/L, com média 199,83 mg/L e mediana de 148,2 mg/L.

As concentrações dos principais constituintes para os poços que captam água do SAG (área aflorante) são apresentadas, em mg/L, na Tabela 11. Observa-se valores elevados nas concentrações dos elementos em geral, o valor máximo das concentrações de Cloreto, Sódio e Sulfato ultrapassam os VMPs estabelecidos pela Portaria GM/MS 888 e Resolução Conama 396.

Tabela 11 - Concentrações (mg/L) dos principais constituintes do Sistema Aquífero Guarani - área aflorante

	Cálcio (Ca)	Cloreto (Cl)	Potássio (K)	Magnésio (Mg)	Sódio (Na)	Sulfato (SO₄)	Alcalinidade total
Valor Médio	17,93	18,9	2,45	5,31	46,01	34,31	109,2
Valor Máximo	139	794	41	47	882	1.651,4	551,33
Valor Mínimo	0,2	0,1	0,01	0,003	0,06	0,01	0,05
Valor Mediana	14,35	7,12	1,8	3,6	17	5	103
Desvio Padrão	16,16	54,64	3,03	5,54	89,14	131,56	73,15
VMP^(*)	-	250	-	-	200	250	-

(*) VMPs estabelecidos pela Portaria GM/MS 888 e Resolução Conama 396.

As principais razões iônicas para os poços que captam água do Sistema Aquífero Guarani (área aflorante) são apresentadas na Tabela 12. Nota-se valores bem variados entre o valor mínimo e valor máximo para cada razão iônica. As razões iônicas onde o Na⁺ aparece no numerador apresentaram valor máximo e valores médios elevados.

Tabela 12 - Principais Razões Iônicas para o Sistema Aquífero Guarani - área aflorante

	rMg²⁺ /Ca²⁺	rK⁺ /Na⁺	rNa⁺ /Ca²⁺	rNa⁺ /Ca²⁺+Mg²⁺	rCl⁻ /HCO₃⁻	rNa⁺ /Cl⁻	rHCO₃⁻ /Ca²⁺	rCa²⁺ /Mg²⁺	rNa⁺ /K
Média	1,99	0,31	8,44	5,40	0,72	9,50	10,48	14,57	120,34
Mediana	0,48	0,05	1,04	0,71	0,10	4,35	2,03	2,10	18,34
Mínimo	0,0002	0,0001	0,02	0,01	0,002	0,005	0,002	0,001	0,03
Máximo	686,88	29,98	496,91	135,66	52,49	670,31	2.254,56	5.220,21	11.700,94

Desvio Padrão	27,58	1,74	27,31	13,92	4,14	31,24	100,04	211,90	597,98
----------------------	-------	------	-------	-------	------	-------	--------	--------	--------

5.2.4. Sistema Aquífero Guarani (SAG) - área confinada

Na Tabela 10 são apresentados os valores dos parâmetros de pH, CE e STD das análises físico químicas dos poços do Sistema Aquífero Guarani (área confinada) que apresentavam tais dados.

Tabela 13 - Valores estatísticos para os parâmetros de pH, Condutividade Elétrica (CE) e Sólidos Totais dissolvidos (STD) para o Sistema Aquífero Guarani - área confinada

	pH	Condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	STD (mg/L)
Valor Médio	7,5	331,15	213,81
Valor Máximo	9,7	7.073	4.597,81
Valor Mínimo	6	27,94	18,16
Valor Mediana	7,5	263	169
Desvio Padrão	0,65	461,37	298,19
Número de poços	116	303	303

O valor do pH variou entre 6 a 9,7, com média de 7,5, assim as águas variam de uma acidez fraca a uma alcalinidade média, mas a maioria mantém o pH neutro a fracamente alcalino.

Os valores de condutividade elétrica variam entre 27,94 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 7.073 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com média 331,15 $\mu\text{S}/\text{cm}$, demonstrando que há uma concentração significativa em alguns poços. Já para STD, os valores dos poços analisados variaram de 18,16 a 4.597,81 mg/L, com média 213,81 mg/L e mediana de 169 mg/L

As concentrações dos principais constituintes para os poços que captam água do Sistema Aquífero Guarani (área confinada) são apresentadas, em mg/L, na Tabela 11. Observa-se valores elevados nas concentrações dos elementos em geral, o valor máximo das concentrações de Cloreto, Sódio e Sulfato ultrapassam os VMPs estabelecidos pela Portaria GM/MS 888 e Resolução Conama 396. No estudo desenvolvido por Matos (2020) dois grupos com águas típicas do SAG de alto confinamento apresentaram como principais marcadores os valores elevados de sódio, cloreto, sulfato e condutividade elétrica. Segundo o autor estas águas podem ter influência de águas do pré-SAG.

Tabela 14 - Concentrações (mg/L) dos principais constituintes do Sistema Aquífero Guarani - área confinada

	Cálcio (Ca)	Cloreto (Cl)	Potássio (K)	Magnésio (Mg)	Sódio (Na)	Sulfato (SO₄)	Alcalinidade total
Valor Médio	27,54	23,76	1,99	9,04	34,25	22,72	120,40
Valor Máximo	438	2.699	42,3	223	950	1.136,70	526
Valor Mínimo	0,8	0,47	0,003	0,07	0,67	0,1	0,07
Valor Mediana	24,67	7	1,2	6,93	14	4,1	116
Desvio Padrão	28,37	157,05	4,14	14,65	78,97	83,92	63,35
VMP(*)	-	250	-	-	200	250	-

(*) VMPs estabelecidos pela Portaria GM/MS 888 e Resolução Conama 396.

As principais razões iônicas para os poços que captam água do Sistema Aquífero Guarani (área confinada) são apresentadas na Tabela 12. Nota-se valores bem variados entre o valor mínimo e valor máximo para cada razão iônica. As razões iônicas onde o Na⁺ aparece no numerador apresentaram valor máximo e valores médios elevados.

Tabela 15 - Principais Razões Iônicas para o Sistema Aquífero Guarani - área confinada

	rMg⁺² /Ca⁺²	rK⁺ /Na⁺	rNa⁺ /Ca⁺²	rNa⁺ /Ca⁺²+Mg⁺²	rCl⁻ /HCO₃⁻	rNa⁺ /Cl⁻	rHCO₃⁻ /Ca⁺²	rCa⁺² /Mg⁺²	rNa⁺ /K
Média	0,68	0,18	2,90	2,36	0,61	8,19	2,65	3,43	233,44
Mediana	0,53	0,04	0,54	0,37	0,08	3,35	1,79	1,90	23,53
Mínimo	0,02	0,0001	0,02	0,02	0,001	0,11	0,10	0,05	0,13
Máximo	21,50	7,90	288,45	288,45	33,37	551,71	44,19	62,40	11.022,62
Desvio Padrão	1,40	0,75	17,37	16,83	3,45	32,79	4,47	5,85	1.082,90

5.2.5. Sistema Aquífero Quaternário Costeiro (SAQC)

Na Tabela 16 são apresentados os valores dos parâmetros de pH, CE e STD das análises físico químicas dos poços que apresentavam tais dados.

Tabela 16 - Valores estatísticos para os parâmetros de pH, Condutividade Elétrica (CE) e Sólidos Totais dissolvidos (STD) para o Sistema Aquífero Quaternário Costeiro

	pH	Condutividade elétrica (µS/cm)	STD (mg/L)
Valor Médio	6,86	648,89	421,78

Valor Máximo	8,86	7.845	5.099,25
Valor Mínimo	4,4	1,71	1,11
Valor Mediana	7	362	235,3
Desvio Padrão	0,93	1.020,91	663,59
Número de poços	84	206	206

O valor do pH variou entre 4,4 a 8,86, com média de 6,86, assim as águas variam de uma acidez média a uma alcalinidade baixa, mas a maioria mantém o pH neutro a fracamente ácido.

Os valores de condutividade elétrica variam entre 1,71 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 7845 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com média 648,89 $\mu\text{S}/\text{cm}$, demonstrando que há uma concentração bastante elevada em alguns poços. Já para Sólidos Totais Dissolvidos, os valores dos poços analisados variaram de 1,11 a 5099,25 mg/L, com média 421,78 mg/L e mediana de 235,3 mg/L.

As concentrações dos principais constituintes para os poços que captam água do SAQC são apresentadas, em mg/L, na Tabela 17. Observa-se altos valores nas concentrações dos elementos em geral, o valor máximo das concentrações de Cloreto, Sódio e Sulfato ultrapassam os VMPs estabelecidos pela Portaria GM/MS 888 e Resolução Conama 396.

Tabela 17 - Concentrações (mg/L) dos principais constituintes do Sistema Aquífero Quaternário Costeiro

	Cálcio (Ca)	Cloreto (Cl)	Potássio (K)	Magnésio (Mg)	Sódio (Na)	Sulfato (SO₄)	Alcalinidade total
Valor Médio	30,77	121,8	7,39	13,97	90,14	28,59	120,4
Valor Máximo	977,9	5.041	180	517,9	1.752,3	1.035,5	716,7
Valor Mínimo	0,39	0,1	0,01	0,07	0,96	0,1	0,5
Valor Mediana	17	34	3	6	36,5	6,6	97
Desvio Padrão	69,19	375,82	16,23	39,67	196,4	97,84	107,96
VMP(*)	-	250	-	-	200	250	-

(*) VMPs estabelecidos pela Portaria GM/MS 888 e Resolução Conama 396.

As principais razões iônicas para os poços que captam água do SAQC são apresentadas na Tabela 18. Nota-se valores bem variados entre o valor mínimo e valor máximo para cada razão iônica. As razões iônicas onde o Na⁺ aparece no numerador apresentaram valor máximo e valores médios elevados.

Tabela 18 - Principais Razões Iônicas para o Sistema Aquífero Quaternário Costeiro

	rMg ⁺² /Ca ⁺²	rK ⁺ /Na ⁺	rNa ⁺ /Ca ⁺²	rNa ⁺ /Ca ⁺² +Mg ⁺²	rCl ⁻ /HCO ₃ ⁻	rNa ⁺ /Cl ⁻	rHCO ₃ ⁻ /Ca ⁺²	rCa ⁺² /Mg ⁺²	rNa ⁺ /K
Média	0,93	0,17	3,81	2,04	1,47	16,28	2,69	2,41	54,20
Mediana	0,67	0,05	2,45	1,42	0,74	1,30	1,95	1,50	18,65
Mínimo	0,03	0,0002	0,02	0,02	0,001	0,01	0,11	0,05	0,09
Máximo	18,54	10,61	35,13	19,95	25,41	916,44	28,00	30,64	4.409,05
Desvio Padrão	1,33	0,80	4,78	2,45	2,52	85,47	3,21	3,60	301,38

5.2.6. Sistema Aquífero Palermo – Rio Bonito (SAPRB)

Na Tabela 19 são apresentados os valores dos parâmetros de pH, CE e STD das análises físico químicas dos poços que apresentavam tais dados.

Tabela 19 - Valores estatísticos para os parâmetros de pH, Condutividade Elétrica (CE) e Sólidos Totais dissolvidos (STD) para o Sistema Aquífero Palermo – Rio Bonito

	pH	Condutividade elétrica (µS/cm)	STD (mg/L)
Valor Médio	7,69	794,18	516,22
Valor Máximo	8,77	4.400	2.860
Valor Mínimo	5,9	32,2	20,93
Valor Mediana	7,78	509,24	331,18
Desvio Padrão	0,83	858,44	557,99
Número de poços	23	70	70

O valor do pH variou entre 5,9 a 8,77, com média de 7,69, assim as águas variam de uma acidez fraca a uma alcalinidade baixa, mas a maioria mantém o pH neutro a fracamente alcalino.

Os valores de condutividade elétrica variam entre 32,2 µS/cm a 4.400 µS/cm, com média 794,18 µS/cm, demonstrando que há CE significativa em alguns poços. Já para Sólidos Totais Dissolvidos, os valores dos poços analisados variaram de 20,93 a 2860 mg/L, com média 516,22 mg/L e mediana de 331,18 mg/L.

Observa-se que as concentrações de Sólidos Totais Dissolvidos são inferiores à que foi descrita por Machado e Freitas (2005) para águas em grandes profundidades do SAPRB, que possuem valores superiores a 10.000 mg/L, visto que teor máximo de STD encontrado neste estudo foi de 2.860 mg/L. Já no estudo desenvolvido por Goffermann

et al. (2012) na região de São Gabriel, os teores de STD variam entre 60 e 300 mg/L no SAPRB. No estudo desenvolvido por Cezimbra (2019) nos municípios de Aceguá, Hulha Negra e Candiota (RS), os poços do Aquífero Rio Bonito apresentaram altos valores de STD, com valor máximo de 973 mg/L.

As concentrações dos principais constituintes para os poços que captam água do SAPRB são apresentadas, em mg/L, na Tabela 20. Observa-se valores elevados nas concentrações dos elementos em geral, o valor máximo das concentrações de Cloreto, Sódio e Sulfato ultrapassam os VMPs estabelecidos pela Portaria GM/MS 888 e Resolução Conama 396.

Observa-se que foram encontrados valores de concentração de Sódio superiores ao do estudo desenvolvido Goffermann *et al.* (2012) na região de São Gabriel, onde as concentrações variaram entre 3,2 e 190 mg/L.

Tabela 20 - Concentrações (mg/L) dos principais constituintes do Sistema Aquífero Palermo – Rio Bonito

	Cálcio (Ca)	Cloreto (Cl)	Potássio (K)	Magnésio (Mg)	Sódio (Na)	Sulfato (SO₄)	Alcalinidade total
Valor Médio	29,69	90,1	3,11	11,3	111,17	93,29	199,27
Valor Máximo	413	2.050	16	170	450	1.192	565
Valor Mínimo	0,69	0,1	0,25	0,1	1	0,04	7
Valor Mediana	17	25,46	2,9	4,38	62,25	38,55	210
Desvio Padrão	52,36	278,31	2,48	22,92	120,36	184,54	113,45
VMP^(*)	-	250	-	-	200	250	-

(*) VMPs estabelecidos pela Portaria GM/MS 888 e Resolução Conama 396.

As principais razões iônicas para os poços que captam água do Sistema Aquífero Palermo – Rio Bonito são apresentadas na Tabela 21. Observa-se valores bem variados entre o valor mínimo e valor máximo para cada razão iônica.

Tabela 21 - Principais Razões Iônicas para o Sistema Aquífero Palermo – Rio Bonito

	rMg^{+2} / Ca^{+2}	rK^{+} / Na^{+}	rNa^{+} / Ca^{+2}	$rNa^{+} / Ca^{+2} + Mg^{+2}$	rCl^{-} / HCO_3^{-}	rNa^{+} / Cl^{-}	$rHCO_3^{-} / Ca^{+2}$	rCa^{+2} / Mg^{+2}	rNa^{+} / K
Média	0,88	0,08	14,14	9,48	1,80	6,31	7,07	6,25	94,82
Mediana	0,49	0,02	1,92	1,19	0,17	4,53	2,49	2,03	44,09
Mínimo	0,004	0,001	0,14	0,10	0,01	0,07	0,13	0,13	1,36
Máximo	7,69	0,74	170,54	146,87	29,13	30,51	70,33	238,28	763,10
Desvio Padrão	1,24	0,16	30,00	21,79	5,84	6,73	12,59	28,72	122,95

5.2.7. Sistema Aquífero Serra Geral (SASG)

Na Tabela 22 são apresentados os valores dos parâmetros de pH, condutividade Elétrica (CE) e Sólidos Totais Dissolvidos (STD) das análises físico químicas dos poços que apresentavam tais dados.

Tabela 22 - Valores estatísticos para os parâmetros de pH, condutividade Elétrica (CE) e Sólidos Totais dissolvidos (STD) para o Sistema Aquífero Serra Geral

	pH	Condutividade elétrica ($\mu S/cm$)	STD (mg/L)
Valor Médio	7,74	223,64	145,87
Valor Máximo	10,6	5.200	3.380
Valor Mínimo	5,2	0,24	0,16
Valor Mediana	7,5	177,95	115,8
Desvio Padrão	1,01	238,72	155,32
Número de poços	665	2167	2167

O valor do pH variou entre 5,2 a 10,6, com média de 7,74, assim as águas variam de uma acidez média a uma alcalinidade elevada, mas a maioria mantém o pH neutro a fracamente alcalino.

Os valores de condutividade elétrica variam entre 0,24 $\mu S/cm$ a 5.200 $\mu S/cm$, com média 223,64 $\mu S/cm$, demonstrando que há CE significativa em alguns poços. Já para Sólidos Totais Dissolvidos, os valores dos poços analisados variaram de 0,16 a 3.380 mg/L, com média 145,87 mg/L e mediana de 155,32 mg/L.

Observa-se que alguns os valores de condutividade elétrica e pH foram superiores aos que foram encontrados por Reginato *et al.* (2012) no SASG na região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul, onde as águas apresentaram condutividade inferiores a 200 $\mu S/cm$ e pH menores que 7,5. Contudo o autor ressalta que a ocorrências de águas no SASG que possuem um aumento na concentração de sódio, potássio, carbonatos, bicarbonatos, cloretos, sulfatos, pH e condutividade elétrica, indica a possibilidade de existência de uma conexão entre os Sistemas Aquíferos Guarani e Serra Geral, que pode

ocorrer nas regiões onde há maior grau de fraturamento e menor espessura do pacote de rochas vulcânicas.

As concentrações dos principais constituintes para os poços que captam água do Sistema Aquífero Serra Geral são apresentadas, em mg/L, na Tabela 23. Observa-se valores elevados nas concentrações dos elementos em geral, o valor máximo das concentrações de Cloreto, Sódio e Sulfato ultrapassam os VMPs estabelecidos pela Portaria GM/MS 888 e Resolução Conama 396.

Tabela 23 - Concentrações (mg/L) dos principais constituintes do Sistema Aquífero Serra Geral

	Cálcio (Ca)	Cloreto (Cl)	Potássio (K)	Magnésio (Mg)	Sódio (Na)	Sulfato (SO₄)	Alcalinidade total
Valor Médio	16,68	8,64	2,23	4,83	28,03	16,18	93,45
Valor Máximo	577	912	152	164	771	1.648	1.147
Valor Mínimo	0,001	0,001	0,001	0,001	0,004	0,01	0,5
Valor Mediana	14,4	3,42	1	3,6	14	2,2	85
Desvio Padrão	20,9	34,51	5,58	6,29	42,57	74,17	60,11
VMP^(*)	-	250	-	-	200	250	-

(*) VMPs estabelecidos pela Portaria GM/MS 888 e Resolução Conama 396.

As principais razões iônicas para os poços que captam água do Sistema Aquífero Serra Geral são apresentadas na Tabela 24. Nota-se valores bem variados entre o valor mínimo e valor máximo para cada razão iônica. As razões iônicas onde o Na⁺ aparece no numerador apresentaram valor máximo e valores médios elevados.

Tabela 24 - Principais Razões Iônicas para o Sistema Aquífero Serra Geral

	rMg⁺² /Ca⁺²	rK⁺ /Na⁺	rNa⁺ /Ca⁺²	rNa⁺ /Ca⁺²+Mg⁺²	rCl⁻ /HCO₃⁻	rNa⁺ /Cl⁻	rHCO₃⁻ /Ca⁺²	rCa⁺² /Mg⁺²	rNa⁺ /K
Média	8,09	0,28	12,36	9,78	0,91	21,87	6,03	3,92	84,74
Mediana	0,46	0,06	0,70	0,50	0,05	5,66	1,93	2,15	16,96
Mínimo	0,002	0,0002	0,0003	0,0002	0,00004	0,0003	0,002	0,0001	0,01
Máximo	17.682,63	100,25	6.452,43	6.452,43	774,29	7.717,43	452,36	594,02	6.099,18
Desvio Padrão	356,23	3,15	134,29	128,08	19,93	164,00	20,36	13,83	257,94

5.3. Análise e caracterização da ocorrência de sódio nos Sistemas Aquíferos

5.3.1. Aquitardos Permianos (AP)

A Figura 7 apresenta a espacialização dos poços com concentrações de sódio nos Aquitardos Permianos. Observa-se alguns pontos com concentrações acima de 200 mg/L no sentido leste, oeste e sudoeste da área dos AP, além de pontos com concentração acima de 400 mg/L, 600 mg/L e 800 mg/L no sentido leste da área dos AP.

A Tabela 25 apresenta dois perfis de poços que captam água subterrânea dos Aquitardos Permianos e possuem elevadas concentrações de Sódio na água. O poço situado em Canoas possui três entradas de água e as suas entradas de água estão no contato entre o argilito e o diabásio, na primeira camada de folhelho e na última camada siltito. Já o poço situado em São Leopoldo possui as quatro entradas de água e suas entradas nas camadas de arenito fino e siltito. Ambos os poços possuem concentração de sódio acima de 500 mg/L. Cabe ressaltar que os poços possuem várias entradas de água e algumas profundas acima de 100 metros, sendo que isso tem importância, pois influencia na circulação, tempo de residência e interação da água rocha que pode ter reflexo na concentração de elementos como o Na.

No Sistema Aquífero Palermo – Rio Bonito também há um poço em Canoas que possui alta concentração de sódio, conforme o item 5.3.6. Assim, pode ser que uma das causas seja a mistura de águas entre os sistemas aquíferos.

Tabela 25 - Perfis construtivos de poços com concentração elevada de sódio - Aquitardos Permianos

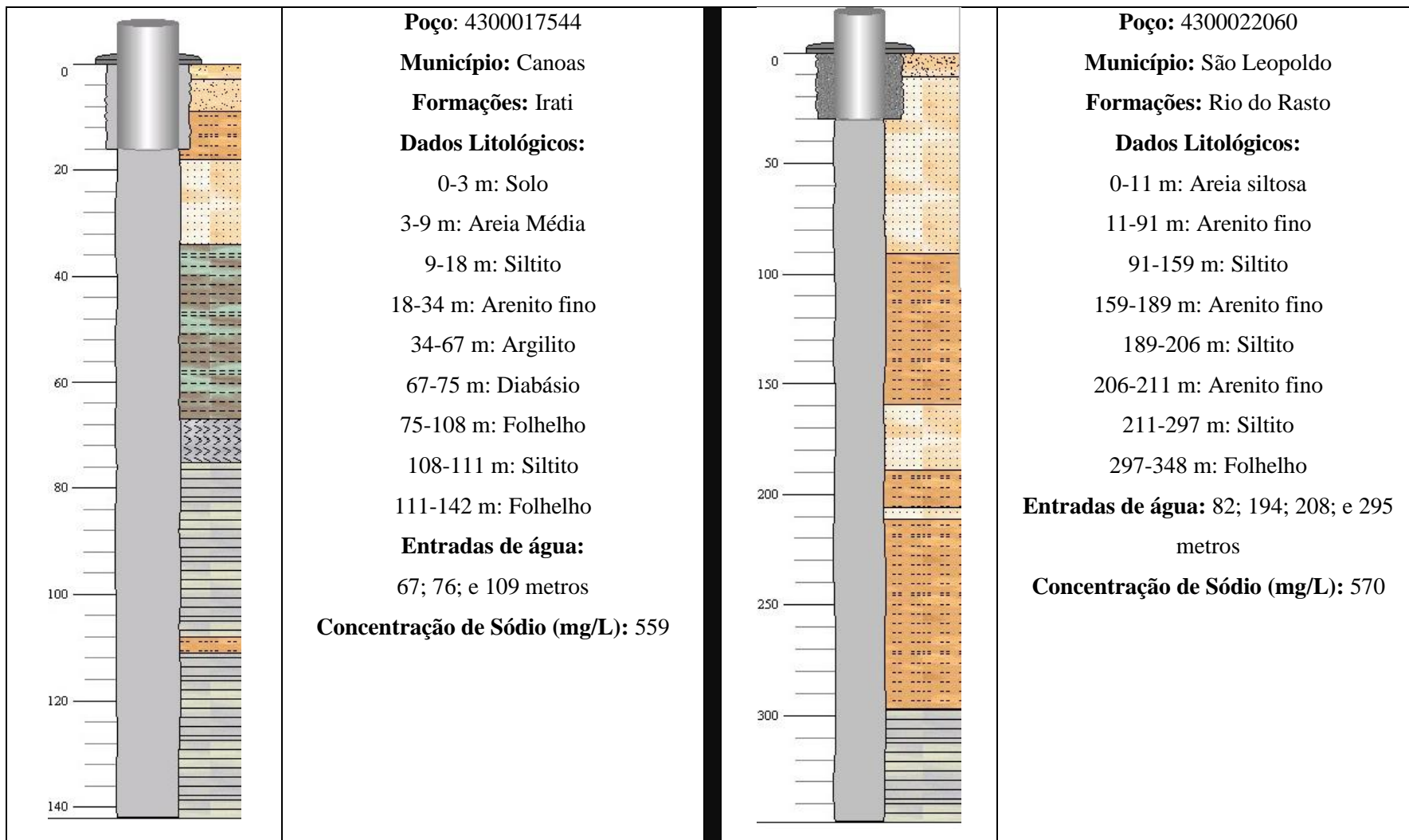
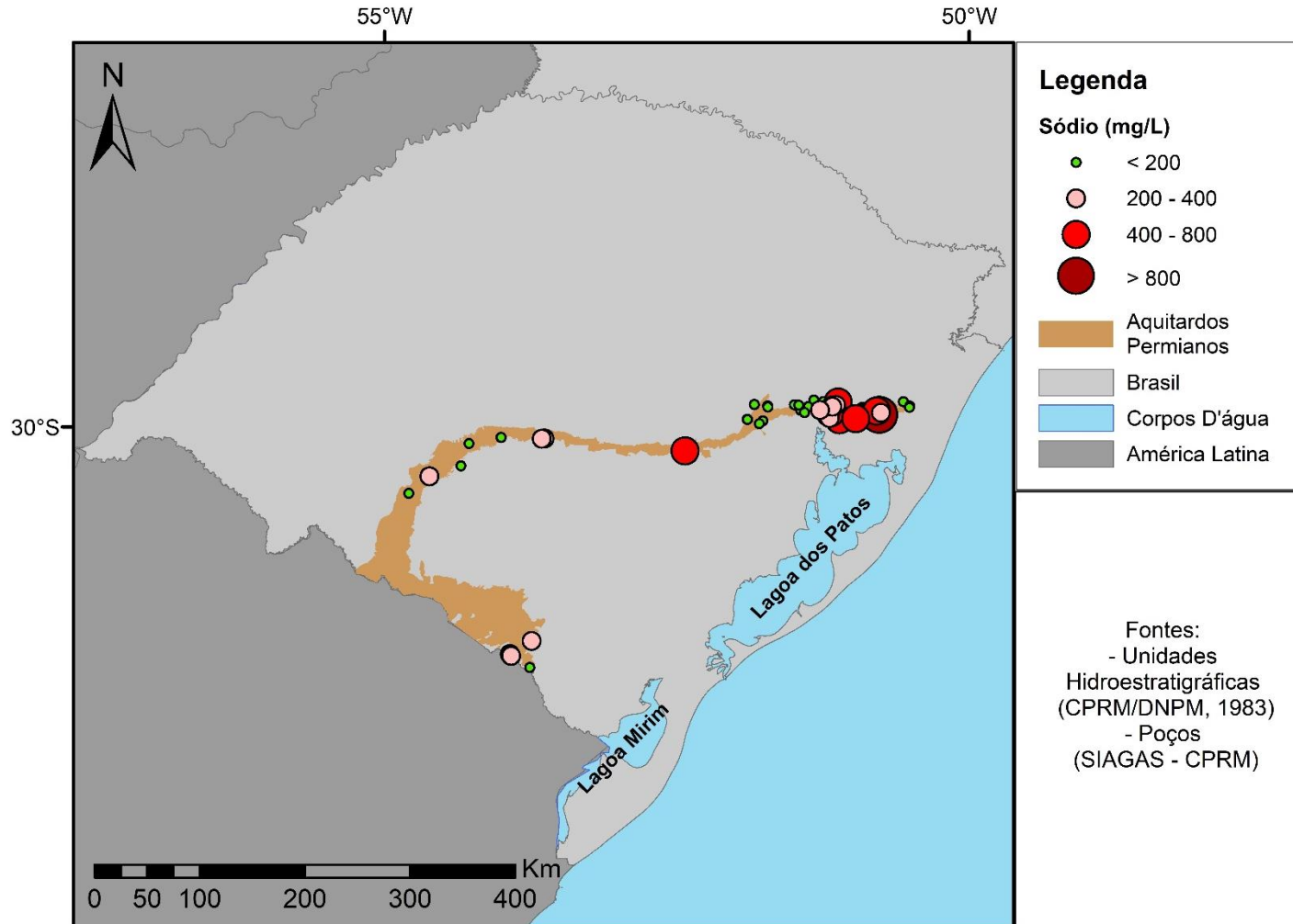


Figura 7 - Mapa da concentração de Sódio nos poços dos Aquitardos Permianos



5.3.2. Sistema Aquífero Embasamento Cristalino (SAEC)

A Figura 8 apresenta a espacialização dos poços com concentrações de sódio no Sistema Aquífero Embasamento Cristalino. Observa-se alguns pontos com concentrações acima de 200 mg/L no sentido leste, oeste e sudoeste da área do SAEC, além de pontos com concentração acima de 400 mg/L e 600 mg/L no sentido leste e sudoeste do SAEC.

A Tabela 26 apresenta dois perfis de poços que captam água subterrânea do Sistema Aquífero Embasamento Cristalino e possuem elevadas concentrações de Sódio na água. Observa-se que os dois poços apresentam uma entrada de água. O poço situado em Jaguarão possui a sua entrada de água na camada de gnaisses. Já o poço situado em Porto Alegre possui a sua entrada na camada de granito. Ambos os poços possuem revestimento incompleto que não isola totalmente a camada de sedimentos e rochas que ocorrem antes das litologias do embasamento cristalino. Outro ponto importante é que os poços possuem entradas de água localizadas em grandes profundidades, acima de 100 metros, isso pode ter influência no fluxo e tempo de residência contribuindo com o aumento do sódio, bem como de outros parâmetros como pH e CE.

Tabela 26 - Perfis construtivos de poços com concentração elevada de sódio - Sistema Aquífero Embasamento Cristalino

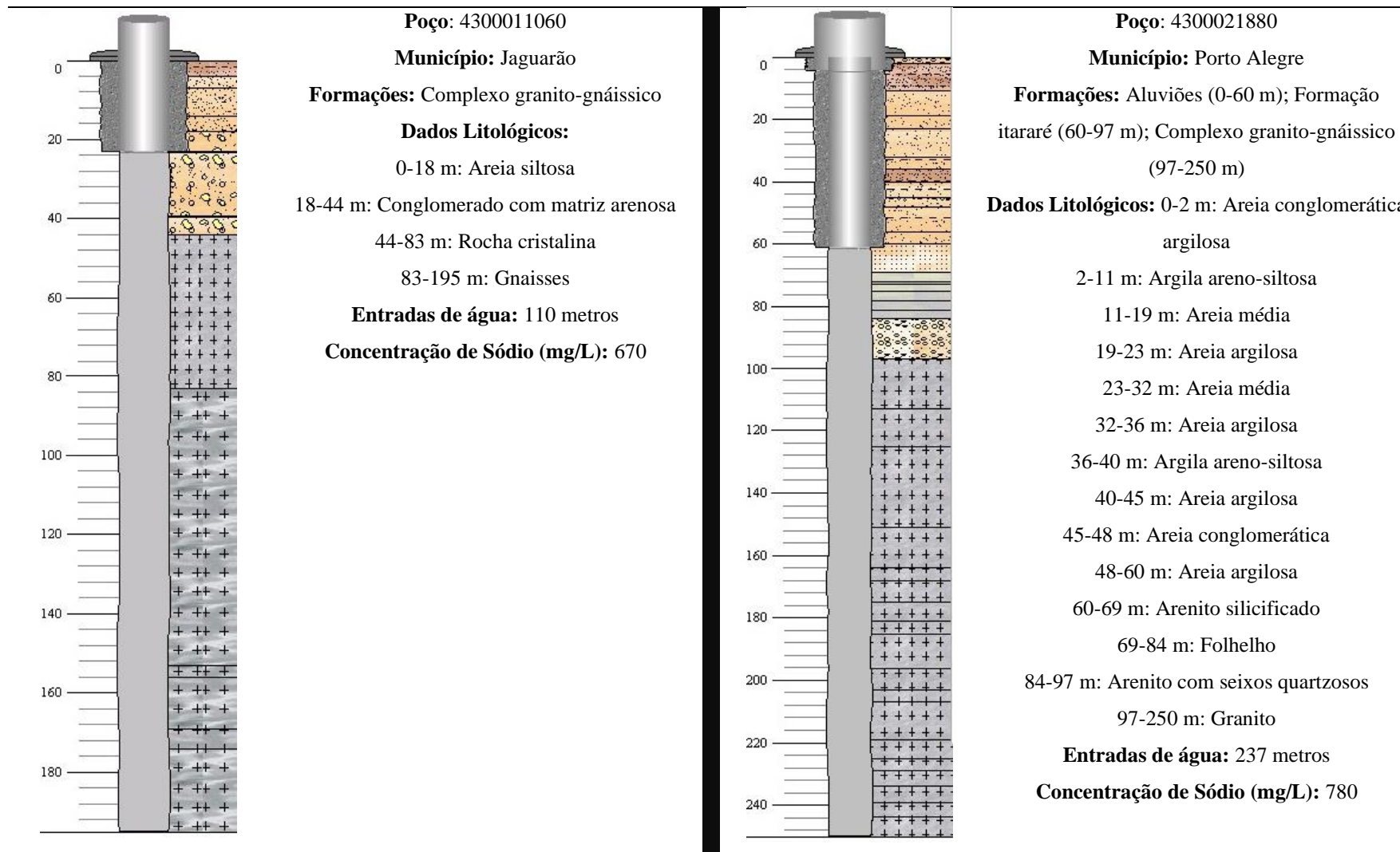
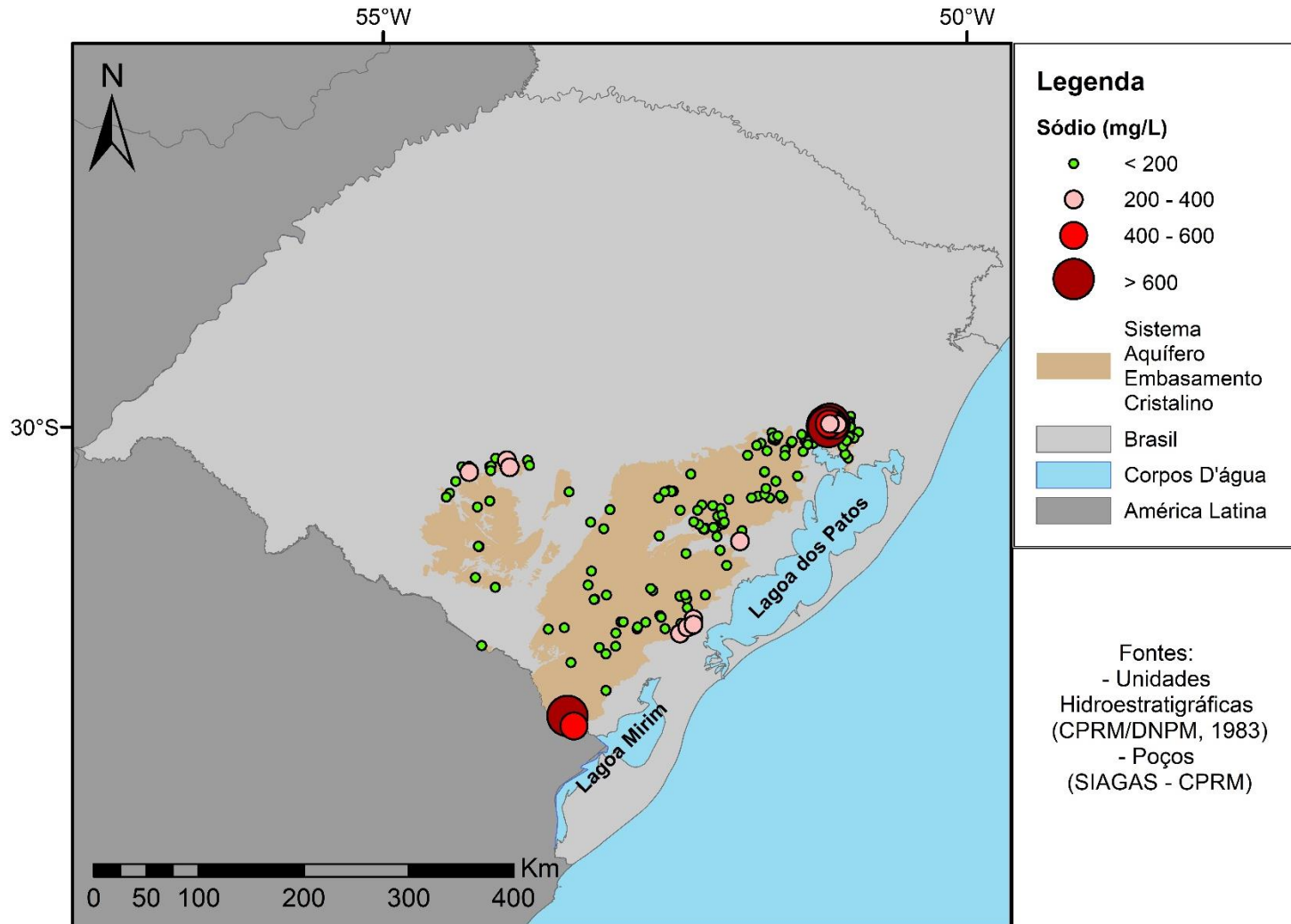


Figura 8 - Mapa da concentração de Sódio nos poços do Sistema Aquífero Embasamento Cristalino

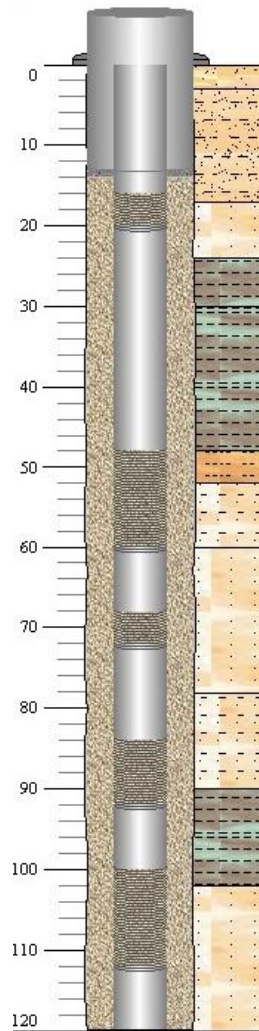


5.3.3. Sistema Aquífero Guarani (SAG) - área aflorante

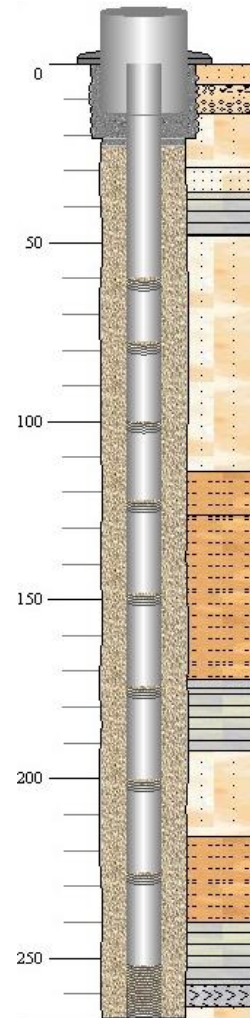
A Figura 9 apresenta a espacialização dos poços com concentrações de sódio nos Sistema Aquífero Guarani em sua área aflorante. Observa-se alguns pontos com concentrações acima de 200 mg/L, 400 mg/L e 600 mg/L no sentido leste e centro da área do SAG, além de pontos com concentração acima de 800 mg/L no centro do SAG.

A Tabela 27 apresenta dois perfis de poços que captam água subterrânea do Sistema Aquífero Guarani (área aflorante) e possuem elevadas concentrações de Sódio na água. O poço situado em Santa Maria não possui informações de entradas de água, porém os filtros estão presentes nas camadas de arenito e siltito. Já o poço situado em Triunfo possui três entradas de águas e as suas entradas estão na camada de arenito médio, pertencente à Formação Sanga do Cabral (SAG), na segunda camada de siltito, pertencente à Formação Rio do Rasto. A mistura de águas no poço situado em Triunfo pode influenciar na alta concentração de sódio (800 mg/L). Além disso, os poços possuem filtros localizados em grandes profundidades, acima de 100 metros, isso pode ter influência no fluxo e tempo de residência contribuindo com o aumento do sódio, bem como de outros parâmetros como pH e CE. Ou ainda, pode ser a influência de misturas de água vinda de aquíferos sotopostos ao SAG (pré-SAG).

Tabela 27 - Perfis construtivos de poços com concentração elevada de sódio – Sistema Aquífero Guarani - área aflorante

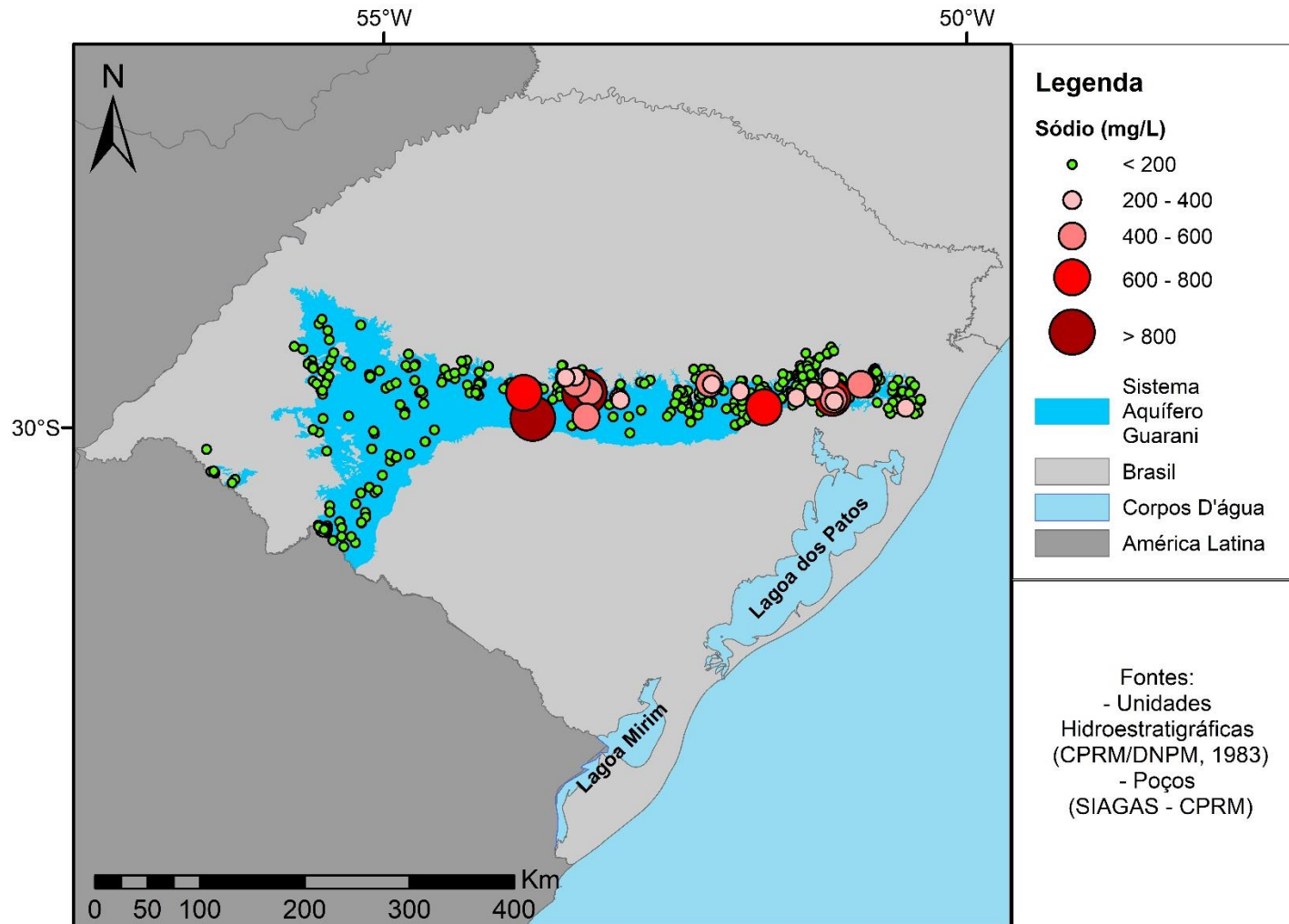


Poço: 4300023001
Município: Santa Maria
Formações: Santa Maria (0-102 m)
 Sanga do Cabral (102-120 m)
Dados Litológicos:
 0-3 m: Solo
 3-17 m: Areia argilosa
 17-24 m: Arenito médio
 24-48 m: Argilito
 36-48 m: Folhelho
 48-52 m: Siltito
 52-60 m: Arenito argiloso
 60-78 m: Arenito médio
 78-90 m: Arenito argiloso
 90-102 m: Argilito
 102-120 m: Arenito médio
Filtros: 16-20 m; 48-60 m; 68-72 m; 84-92 m; e 100-112 m
Concentração de Sódio (mg/L): 640



Poço: 4300021640
Município: Triunfo
Formações: Sanga do Cabral (0-114 m);
 Rio do Rasto (114-267 m)
Dados Litológicos:
 0-6 m: Solo areno-argiloso
 6-14 m: Areia conglomerática
 14-29 m: Arenito médio
 29-36 m: Arenito fino
 36-48 m: Folhelho
 48-114 m: Arenito médio
 114-126 m: Siltito
 126-172 m: Siltito
 172-192 m: Folhelho
 192-216 m: Arenito médio
 216-240 m: Siltito
 240-258 m: Folhelho
 258-264 m: Diabásio
 264-267 m: Arenito médio
Entradas de água: 61; 149; e 262 metros
Concentração de Sódio (mg/L): 800

Figura 9 - Mapa da concentração de Sódio nos poços do Sistema Aquífero Guarani - área aflorante



5.3.4. Sistema Aquífero Guarani (SAG) - área confinada

A Figura 10 apresenta a espacialização dos poços com concentrações de sódio nos Sistema Aquífero Guarani em sua área confinada, onde são apresentadas as áreas do SAG aflorante e do SASG, aquífero que confina o SAG. A área confinada do SAG possui alguns pontos com concentrações acima de 200 mg/L, 400 mg/L e 600 mg/L no sentido leste e centro da área do SASG no mapa, além de um ponto com concentração acima de 400 mg/L e outro acima de 800 mg/L ao norte da área do SASG no mapa.

A Tabela 28 apresenta dois perfis de poços que captam água subterrânea da área confinada do SAG e possuem elevadas concentrações de Sódio na água, acima do VMP da Portaria GM/MS nº 888 de 2021. Um do poço está situado próximo ao litoral norte do RS, em Terra de Areia e o outro mais ao centro do Estado, em Arroio do Meio. Observa-se que os dois poços captam água no arenito da formação Botucatu, sendo que o poço em Terra de Areia também possui uma entrada de água na formação Serra Geral.

Figura 10 - Mapa da concentração de Sódio nos poços do Sistema Aquífero Guarani - área confinada

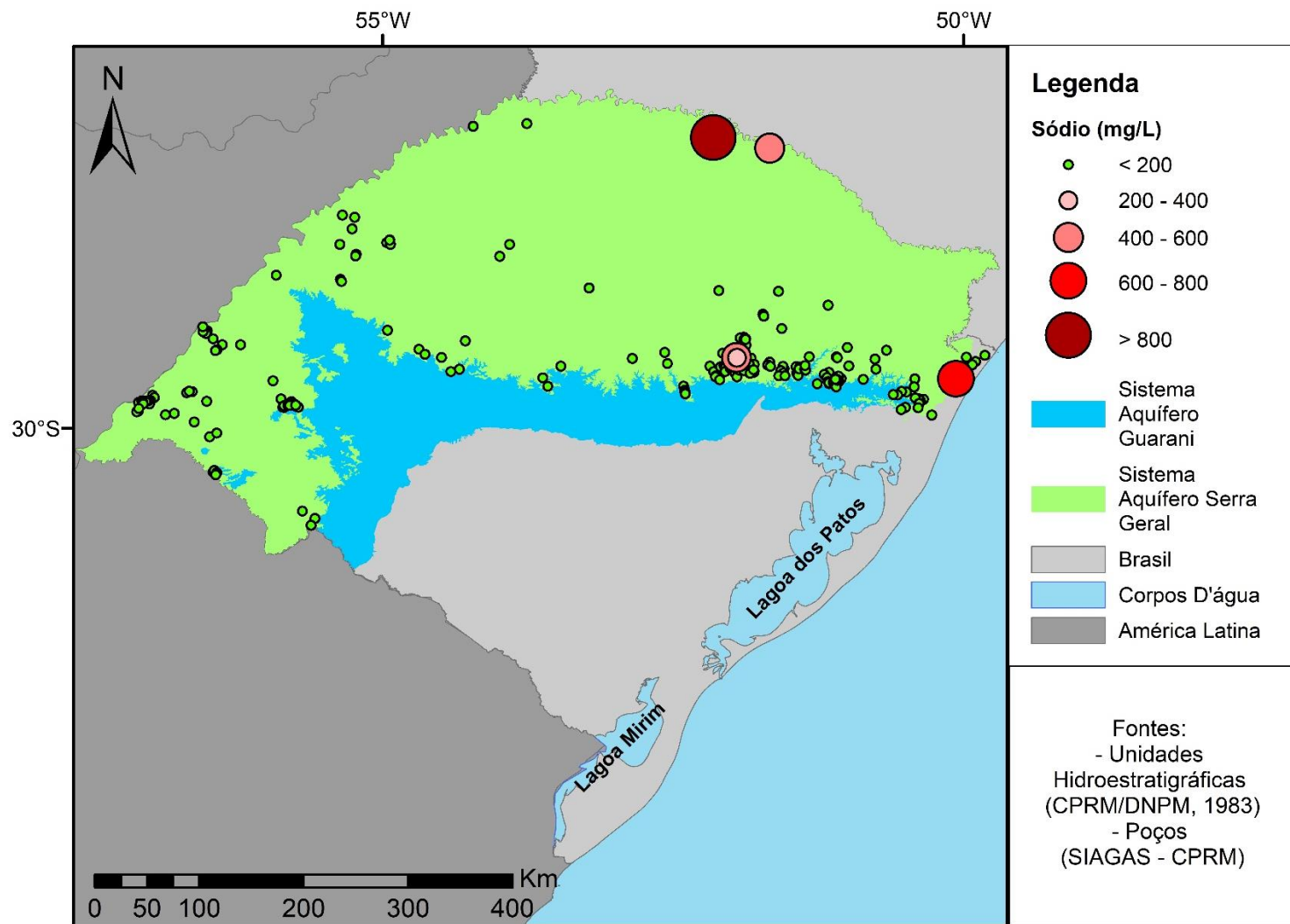
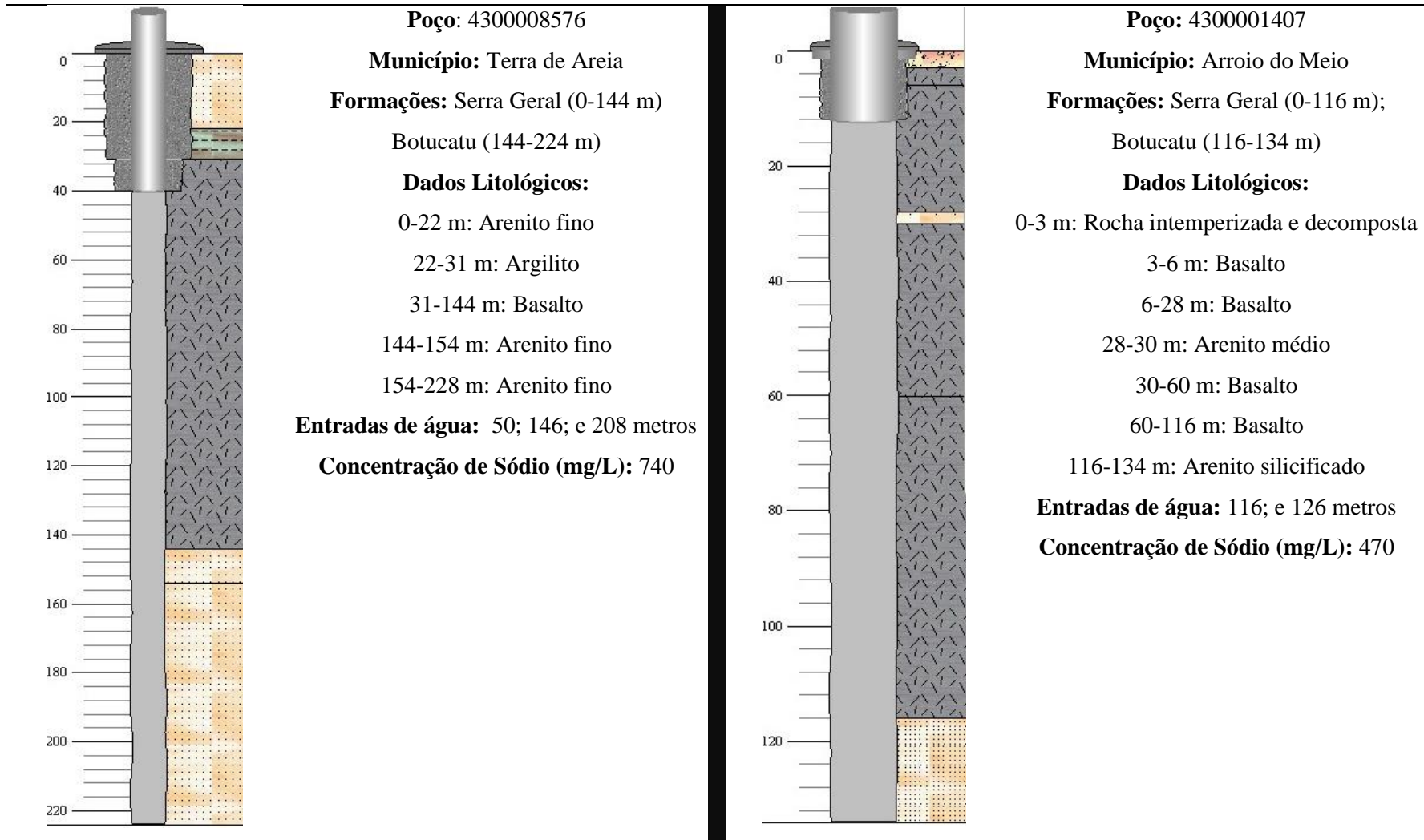


Tabela 28 - Perfis construtivos de poços com concentração elevada de sódio – Sistema Aquífero Guarani - área confinada

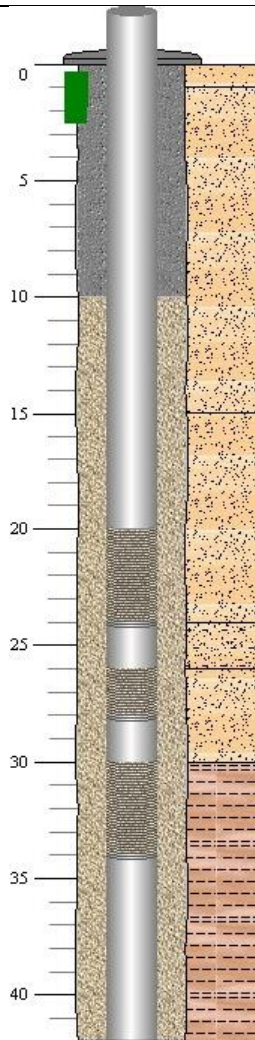


5.3.5. Sistema Aquífero Quaternário Costeiro (SAQC)

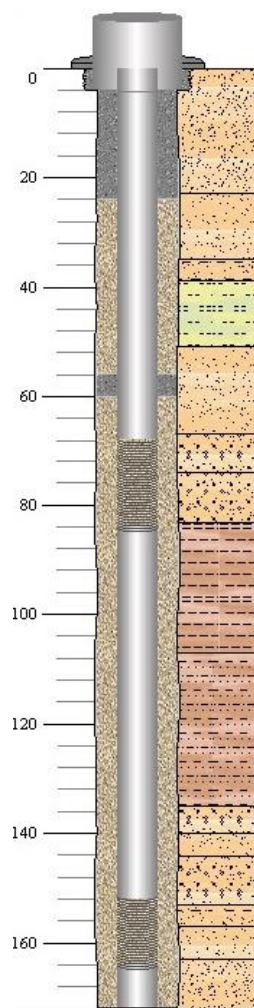
A Figura 11 apresenta a espacialização dos poços com concentrações de sódio nos Sistema Aquífero Quaternário Costeiro. Nota-se alguns pontos com concentrações acima de 200 mg/L no litoral sul do RS e próximo à foz da Lagoa dos Patos, alguns pontos com concentração acima de 400 mg/L no litoral sul do RS, no entorno da Lagoa dos Patos, alguns pontos com concentração acima de 1.000 mg/L no litoral norte do RS e no sul da Lagoa dos Patos e ao nordeste da Lagoa Mirim, além de um ponto com concentração acima de 1.500 mg/L ao noroeste da Lagoa dos Patos.

A Tabela 29 apresenta dois perfis de poços que captam água subterrânea do Sistema Aquífero Quaternário Costeiro e possuem elevadas concentrações de Sódio na água, acima de 1.000 mg/L. Um do poço está situado no litoral norte do RS, em Capão da Canoa e o outro no litoral norte, próximo à foz da Lagoa dos Patos, em Rio Grande. Observa-se que os dois poços captam água de camadas aquíferas que estão em diferentes profundidades e possuem diferentes condições de confinamento, sendo que o poço de Capão da Canoa possui uma secção filtrante localizada em grande profundidade. Algumas das possíveis causas das altas concentrações de sódio nestes poços são a ocorrência de sedimentos depositados em ambientes marinhos e a intrusão salina, devido à proximidade com o Oceano Atlântico.

Tabela 29 - Perfis construtivos de poços com concentração elevada de sódio - Sistema Aquífero Quaternário Costeiro

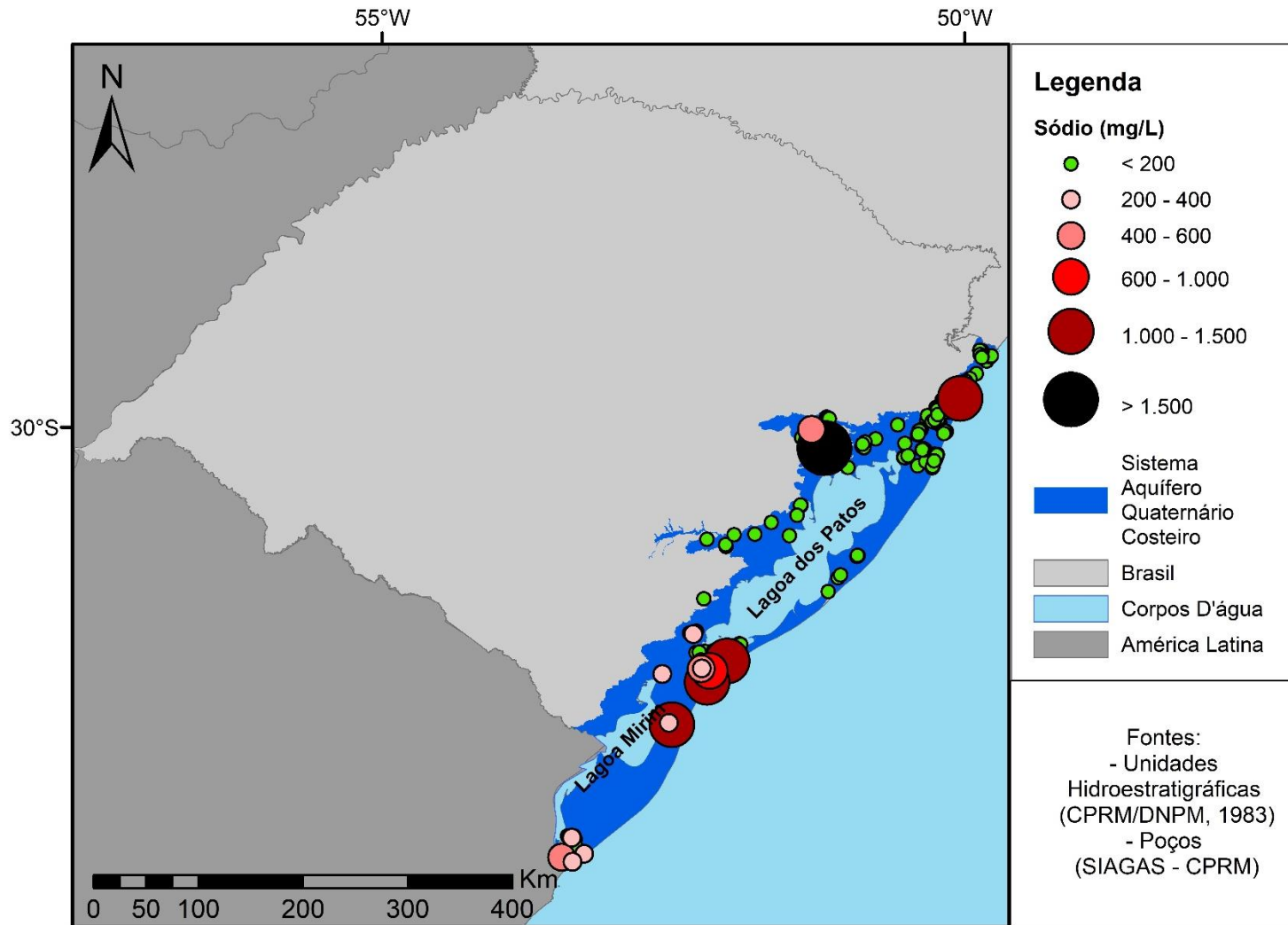


Poço: 4300022639
Município: Rio Grande
Formações: Depósitos litorâneos
Dados Litológicos:
 0-1 m: Areia média
 1-24 m: Areia fina
 24-26 m: Areia siltosa
 26-30 m: Areia fina
 30-42 m: Argila
Filtros: 20-24 m; 26-28 m; e 30-34 m
Concentração de Sódio (mg/L): 1.470



Poço: 4300008746
Município: Capão da Canoa
Formações: Depósitos litorâneos
Dados Litológicos:
 0-23 m: Areia fina
 23-35 m: Areia média
 35-39 m: Areia argilosa
 39-51 m: Silte
 51-67 m: Areia média
 67-83 m: Areia grossa
 83-107 m: Argila
 107-135 m: Argila arenosa
 135-140 m: Areia grossa
 140-144 m: Areia média
 144-153 m: Areia grossa
 153-157 m: Areia argilosa
 157-163 m: Areia média
 163-172 m: Areia fina
Filtros: 68-84 m; e 152-164 m
Concentração de Sódio (mg/L): 1.250

Figura 11 - Mapa da concentração de Sódio nos poços do Sistema Aquífero Quaternário Costeiro



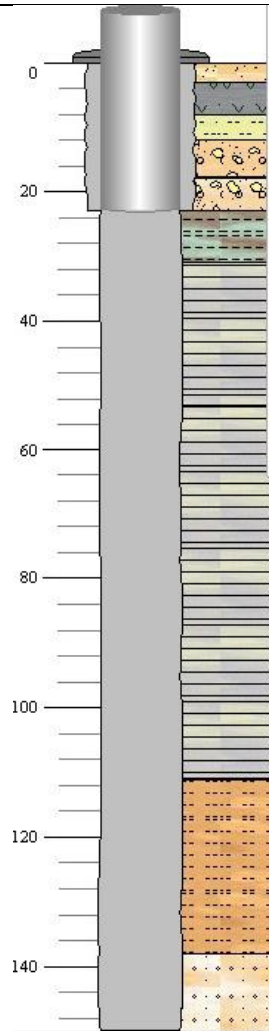
5.3.6. Sistema Aquífero Palermo – Rio Bonito (SAPRB)

A Figura 12 apresenta a espacialização dos poços com concentrações de sódio no Sistema Aquífero Palermo – Rio Bonito. Observa-se alguns pontos com concentrações acima de 200 mg/L e também acima de 400 mg/L no sentido leste, oeste e sudoeste da área do SAPRB.

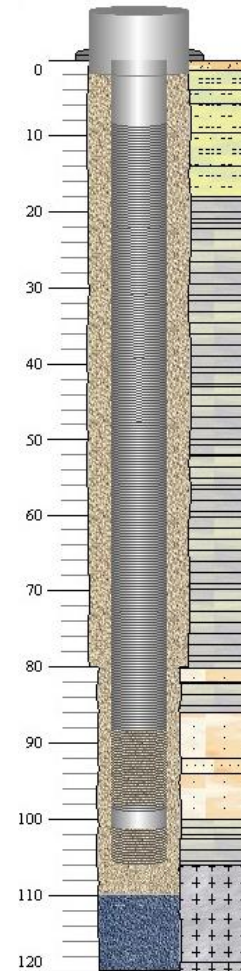
A Tabela 30 apresenta dois perfis de poços que captam água subterrânea no Sistema Aquífero Palermo – Rio Bonito e possuem elevadas concentrações de Sódio na água. O poço situado em Canoas possui três entradas de água e suas entradas nas camadas de folhelho e siltito. Já o poço situado em Dom Pedrito possui dois filtros situados em diferentes camadas com distintas formações geológicas. Os dois poços possuem entradas de água ou filtros localizados em grande profundidade e isso pode influenciar a circulação da água, dar condições para um maior confinamento dos aquíferos e proporcionar um aumento na concentração de elementos.

Nos Aquitardos Permianos também há um poço em Canoas que possui alta concentração de sódio, conforme o item 5.3.1. Assim, pode ser que uma das causas seja a mistura de águas entre os sistemas aquíferos. Já o Sistema Aquífero Palermo – Rio Bonito, segundo Cezimbra (2019), que fez o trabalho em Hulha Negra e Candiota, é formado por unidades hidroestratigráficas, sendo que algumas dessas unidades possui características hidroquímicas bem diferenciadas com elevada concentração de elementos e condutividade, cuja explicação poderia estar relacionada com as rochas e o ambiente de sedimentação das mesmas.

Tabela 30 - Perfis construtivos de poços com concentração elevada de sódio - Sistema Aquífero Palermo – Rio Bonito

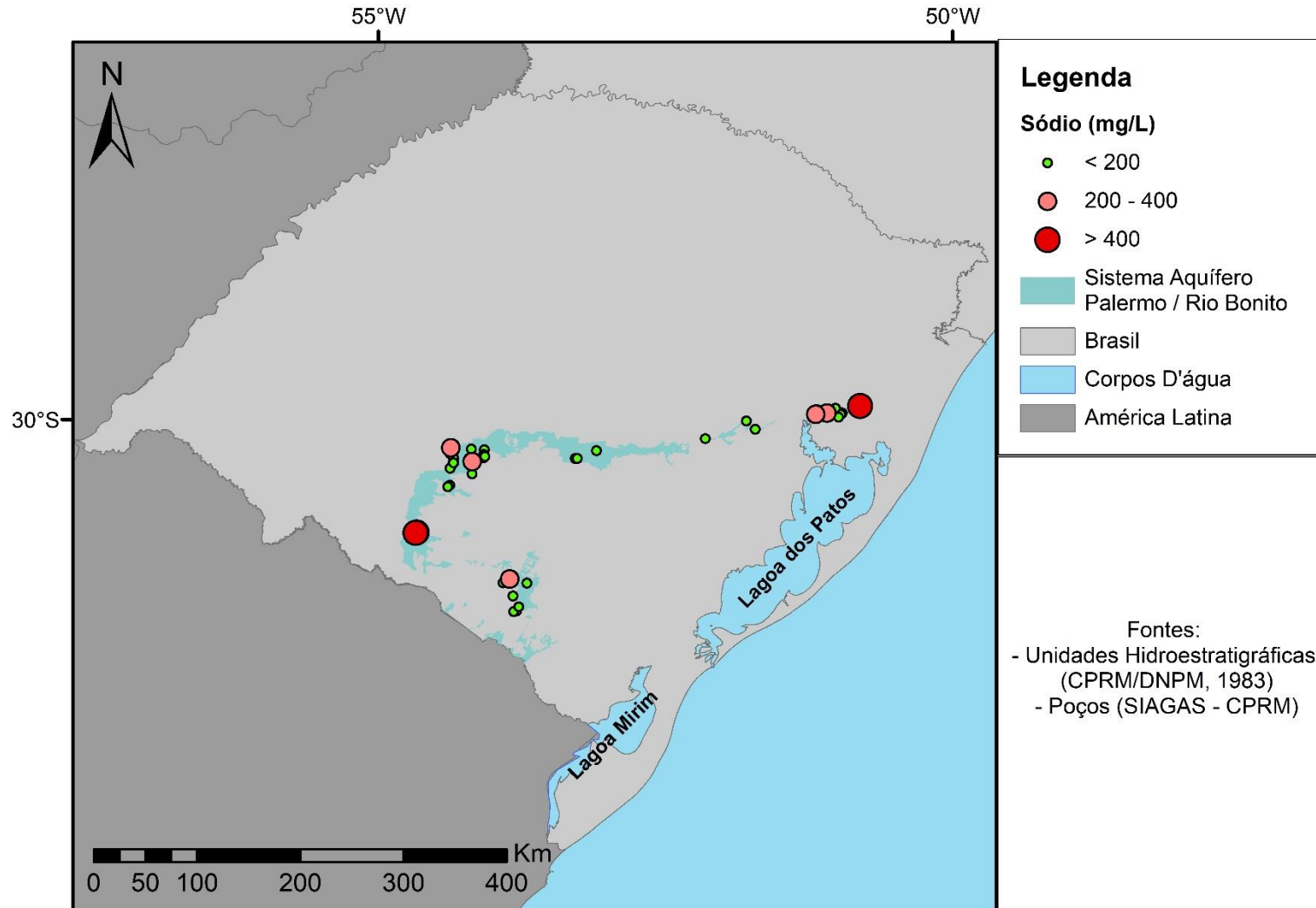


Poço: 4300017549
Município: Glorinha
Formações:
 Rio Bonito
Dados Litológicos:
 0-3 m: Solo
 3-8 m: Solo orgânico
 8-12 m: Silte
 12-23 m: Conglomerado com matriz arenosa
 23-31 m: Argilito
 31-111 m: Folhelho
 111-138 m: Siltito
 138-150 m: Arenito grosso
Entradas de água: 46; 130; e 133 metros
Concentração de Sódio (mg/L): 242



Poço: 4300020691
Município: Dom Pedrito
Formações: Estrada Nova (0-18 m);
 Irati (18-80 m)
 Rio Bonito (80-82 m)
 Palermo (82-86 m)
 Rio Bonito (86-100 m)
 Palermo (100-106 m)
Dados Litológicos: 0-1,3 m: Solo
 1,3-14 m: Silte
 14-18 m: Silte
 18-80 m: Folhelho
 80-82 m: Arenito médio
 82-86 m: Folhelho
 86-92 m: Arenito médio
 92-94 m: Arenito fino
 94-100 m: Arenito médio
 100-106 m: Folhelho
 106-120 m: Granito
Filtros: 8,3-98,3 metros
 e 101,3-105,3 metros
Concentração de Sódio (mg/L): 400

Figura 12 - Mapa da concentração de Sódio nos poços do Sistema Aquífero Palermo – Rio Bonito



5.3.7. Sistema Aquífero Serra Geral (SASG)

A Figura 13 apresenta a espacialização dos poços com concentrações de sódio nos Sistema Aquífero Serra Geral. Observa- alguns pontos com concentrações acima de 200 mg/L ao norte e ao sul da área do SASG, um ponto com concentração acima de 600 mg/L próximo ao litoral e outros pontos com concentração acima de 400 mg/L, 600 mg/L e 800 mg/L no norte da área do SASG.

A Tabela 31 apresenta dois perfis de poços que captam água subterrânea do Sistema Aquífero Serra Geral e possuem elevadas concentrações de Sódio na água. Os dois poços não possuem informações sobre entradas de águas, porém ambos apresentam uma grande profundidade sendo que embora não tenha interceptado rochas sedimentares que estão associadas ao SAG, os mesmos podem ter misturas de água do SAG, até do mesmo do pré-SAG, provocando um aumento na concentração de sódio.

Tabela 31 - Perfis construtivos de poços com concentração elevada de sódio - Sistema Aquífero Serra Geral

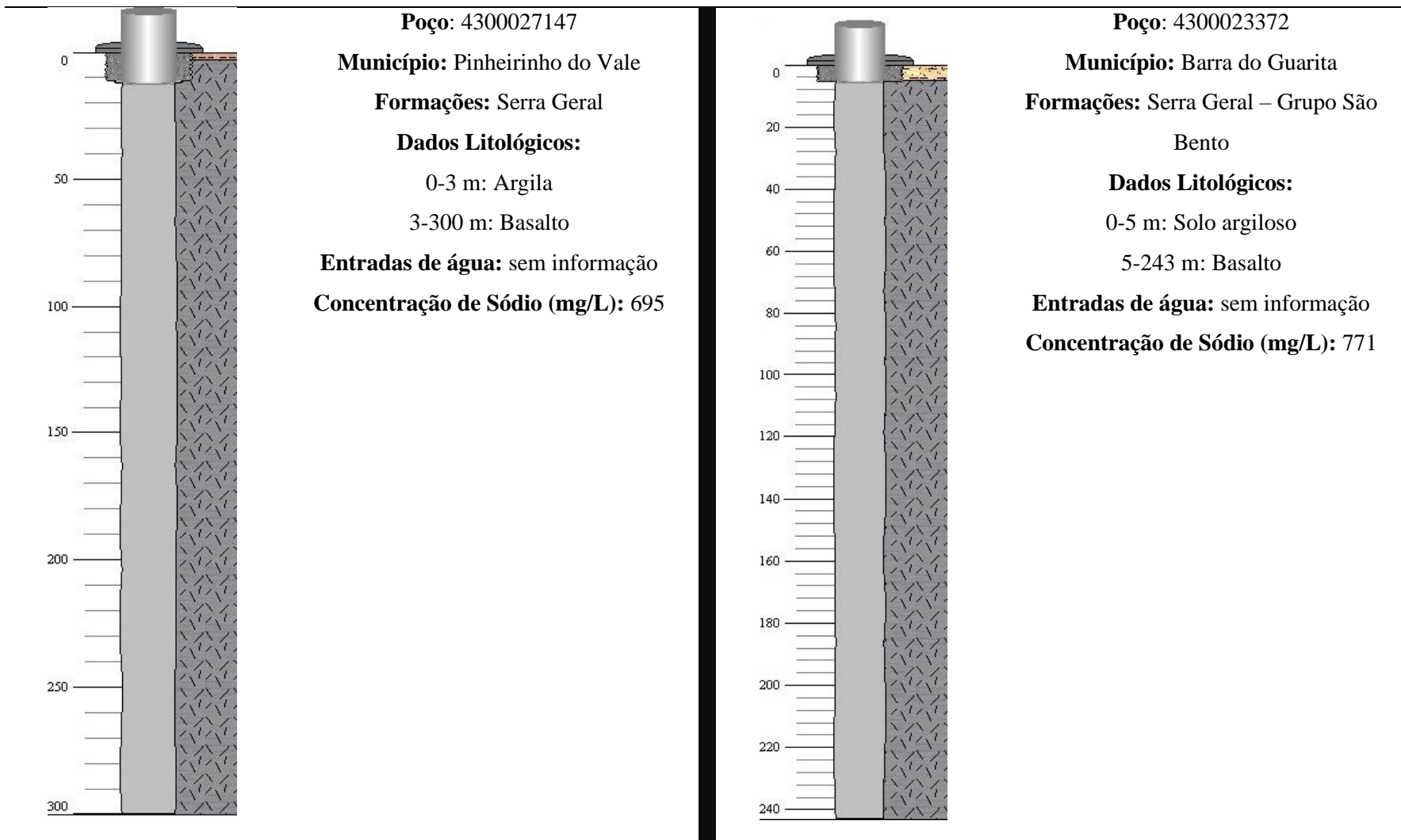
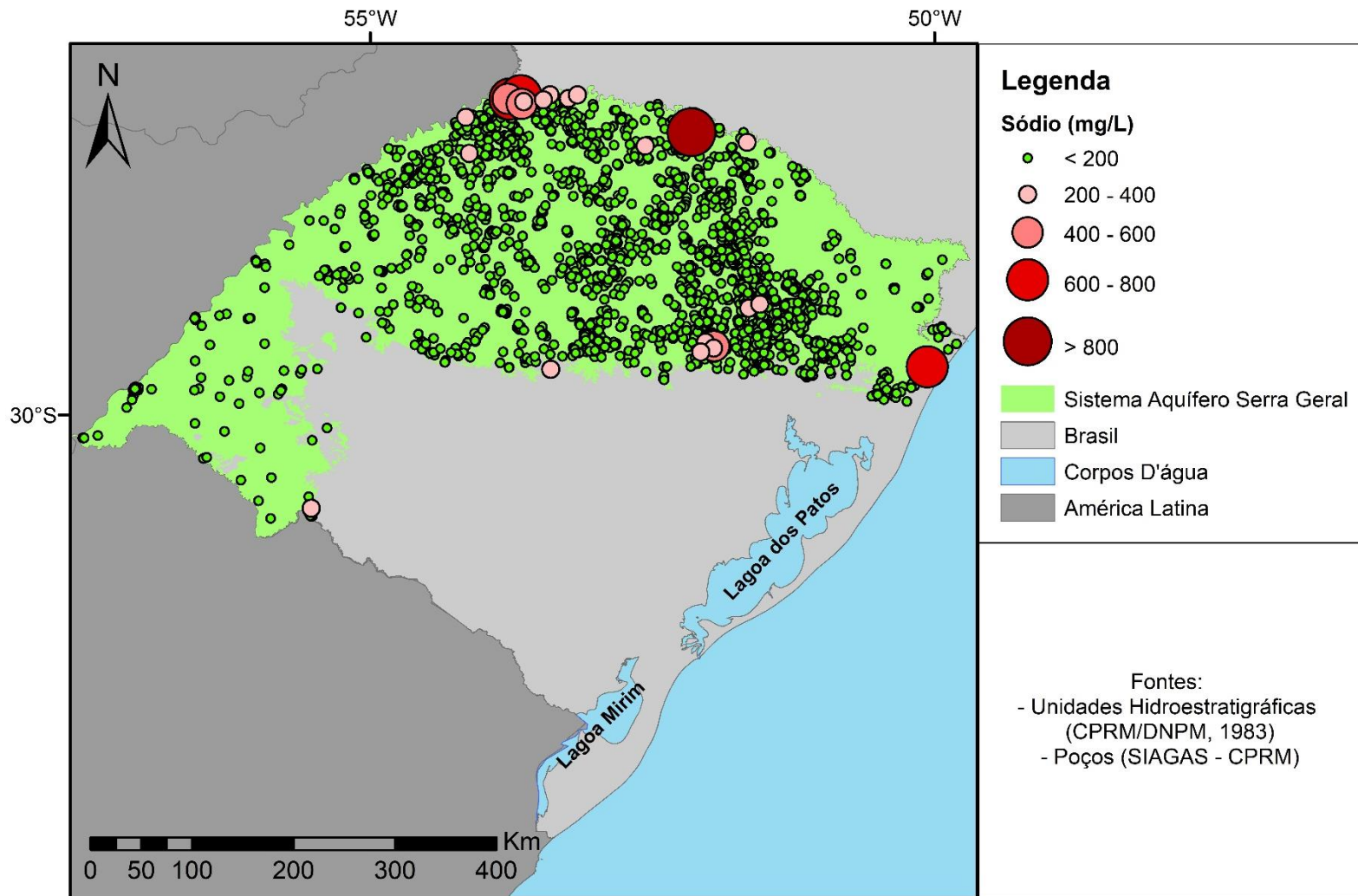


Figura 13 - Mapa da concentração de Sódio nos poços do Sistema Aquífero Serra Geral



5.4. Avaliação da Qualidade de Água para Consumo

A avaliação da qualidade água para consumo humano foi realizada por meio da análise das concentrações de cloreto, sódio, sulfato e STD com relação ao VMPs da Portaria GM/MS N° 888 (BRASIL, 2021).

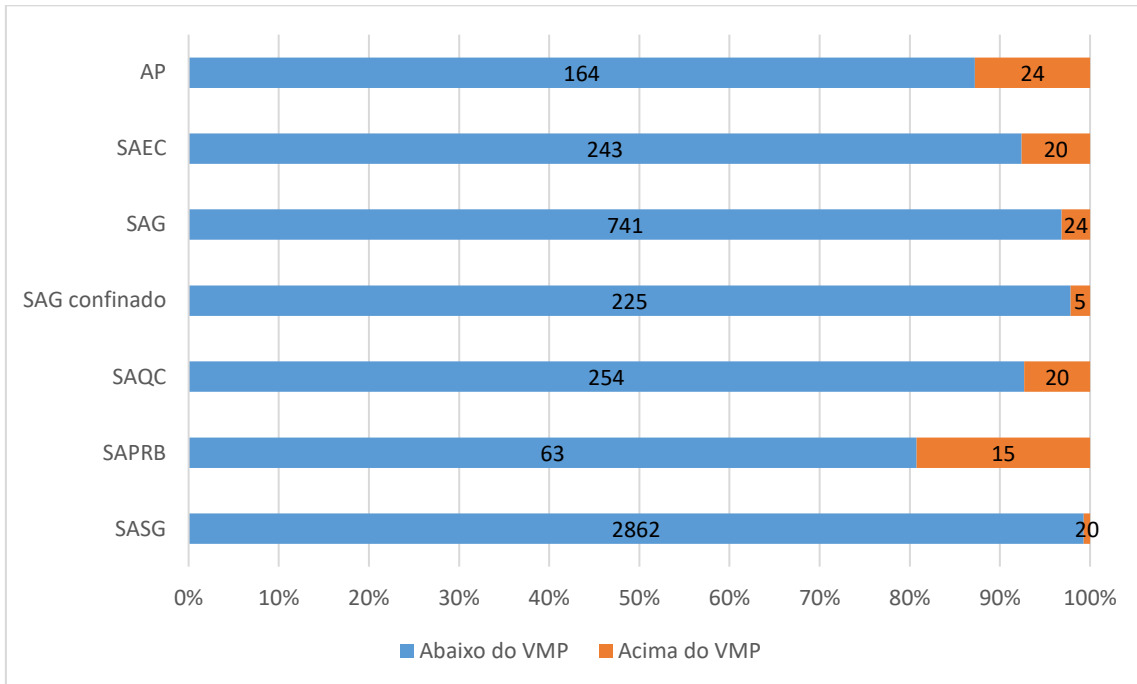
Na Tabela 32, são apresentados o quantitativo e percentual de poços que não atendem aos padrões de potabilidade conforme a Resolução CONAMA 396/2008 e Portaria GM/MS n° 888 de 2021. Já a Figura 16 apresenta espacialmente as amostras que atendem e não atendem o VMP. Nota-se que a maioria das amostras que não atendem o VMP estão ao norte, leste e litoral do Estado do Rio Grande do Sul.

Tabela 32 - Número de poços que ultrapassam os padrões de potabilidade selecionados conforme a Resolução CONAMA 396/2008 e Portaria GM/MS n° 888 de 2021.

Sistema Aquífero	Total de poços	Número de poços que não atendem	Percentual
AP	188	26	13,83%
SAEC	263	26	9,89%
SAG	765	33	4,31%
SAG confinado	230	7	3,04%
SAQC	274	32	11,68%
SAPRB	78	16	20,51%
SASG	2.882	26	0,9%

A Figura 13 apresenta o percentual de poços em relação ao VMP da Portaria GM/MS N° 888 (BRASIL, 2021) somente para a concentração de sódio. Observa-se que o SAPRB e os AP apresentam o maior percentual de poços que apresentam concentração de sódio acima do VMP da Portaria GM/MS N° 888, respectivamente. Já o SASG e SAG confinado são os que apresentam menor percentual de poços que apresentam concentração de sódio acima do VMP da Portaria GM/MS N° 888, respectivamente. Para o SAG confinado, o fato de ter pouco poços está relacionado ao número de poços que se tem disponível para essa área, visto que espera-se que numa situação de alto confinamento tenhamos mais poços com problemas de sódio. Então, vale a pena destacar que com o aumento de perfuração e novos dados esse cenário para o SAG confinado pode alterar.

Figura 14 - Concentração de sódio dos poços em relação ao Valores Máximos Permitidos (VMP) da Portaria GM/MS Nº 888 (BRASIL, 2021).



Para os poços que apresentam concentração de sódio acima do VMP da Portaria GM/MS Nº 888 (BRASIL, 2021), a Figura 15 apresenta o percentual por tipo de usos. Observa-se que a maioria dos poços (56%) não possui informação do uso, já 16% dos poços são utilizados para abastecimento urbano.

Figura 15 - Usos dos poços com concentração de sódio acima do Valores Máximos Permitidos (VMP) da Portaria GM/MS Nº 888 (BRASIL, 2021).

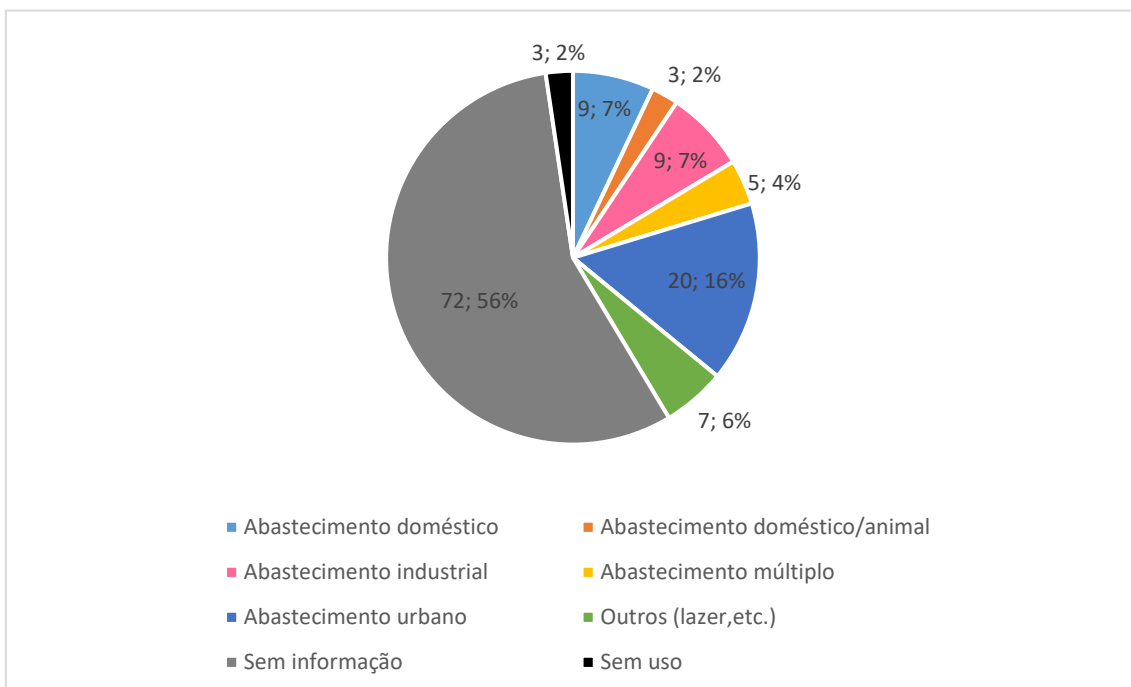
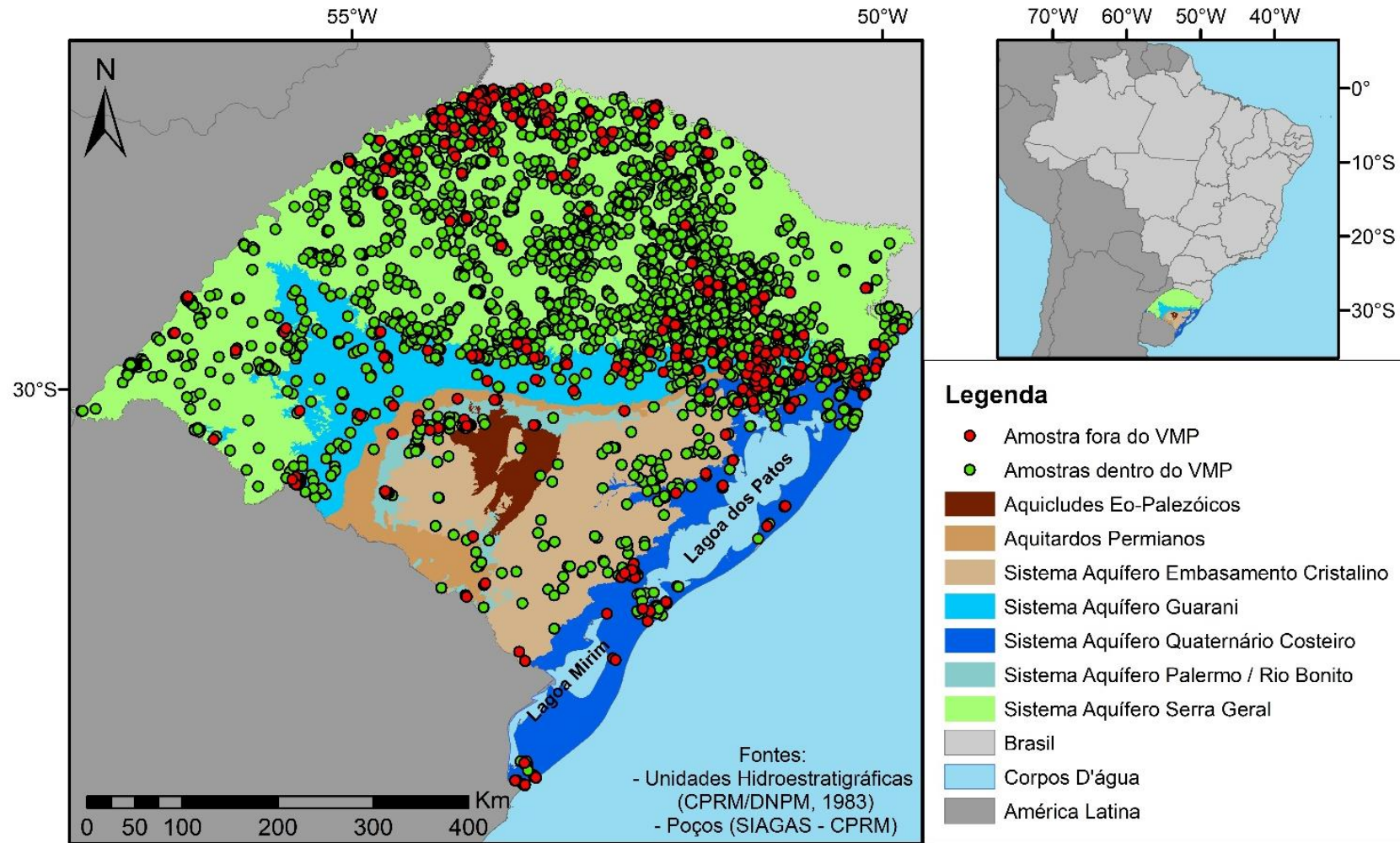


Figura 16 - Mapa com as amostras que atendem e ultrapassam os Valores Máximos Permitidos (VMP) de acordo com a Portaria GM/MS nº 888 de 2021.



5.5. Avaliação do sódio em relação à saúde humana

A análise das concentrações de sódio com relação à recomendação da U.S. EPA e de outros países sobre a concentração de sódio na água potável menor que 20 mg/L para indivíduos com dieta restritiva de sódio (500 mg/dia).

Para cada poço que continha a informação de concentração de sódio, foi calculada a dose ingresso da água subterrânea, considerado um cenário de ingestão de água subterrânea para o período de exposição médio durante a exposição de substância química não carcinogênica, cujos receptores escolhidos foram adultos. Após, foi calculado o quociente de perigo não carcinogênico (NHQ), sendo que o RfD considerado no cálculo do NHQ é referente à Recomendação de 2010 da *American Heart Association* de 1.500 mg/dia de sódio, dividido por 70 kg adulto, que é igual a 21 mg/kg-dia, conforme utilizado pelo Departamento de Qualidade Ambiental de Michigan. Nos itens abaixo são apresentadas as estatísticas dos resultados de dose ingresso e quociente de risco não carcinogênico para cada sistema aquífero.

A Figura 17 apresenta o percentual de poços que se enquadram dentro da recomendação da U.S. EPA sobre a concentração de sódio na água potável menor que 20 mg/L para indivíduos com dieta restritiva de sódio (500 mg/dia). Observa-se que os AP e o SAPRB apresentam o maior percentual de poços que apresentam concentração de sódio acima de 20 mg/L, respectivamente. Já o SASG e SAG confinado são os que apresentam menor percentual de poços que apresentam concentração de sódio acima de 20 mg/L, respectivamente. Destaca-se também, o fato do SAG confinado ter poucos poços disponíveis para essa área, visto que espera-se que numa situação de alto confinamento tenhamos mais poços com problemas de sódio.

A Tabela 33 apresenta a variação estatística do quociente de risco não carcinogênico (NHQ) do elemento Sódio para os Sistemas Aquíferos. Observa-se que o SAPRB apresenta a maior média e o SASG apresenta a menor média. O SAEC, o SAPRB e o SASG são os sistemas aquíferos que não possuem valor máximo acima de 1. Conforme U.S. EPA (1989), valores superiores à 1 provavelmente indicam efeitos não carcinogênicos adversos.

Figura 17 - Concentração de sódio dos poços em relação à recomendação da U.S. EPA.

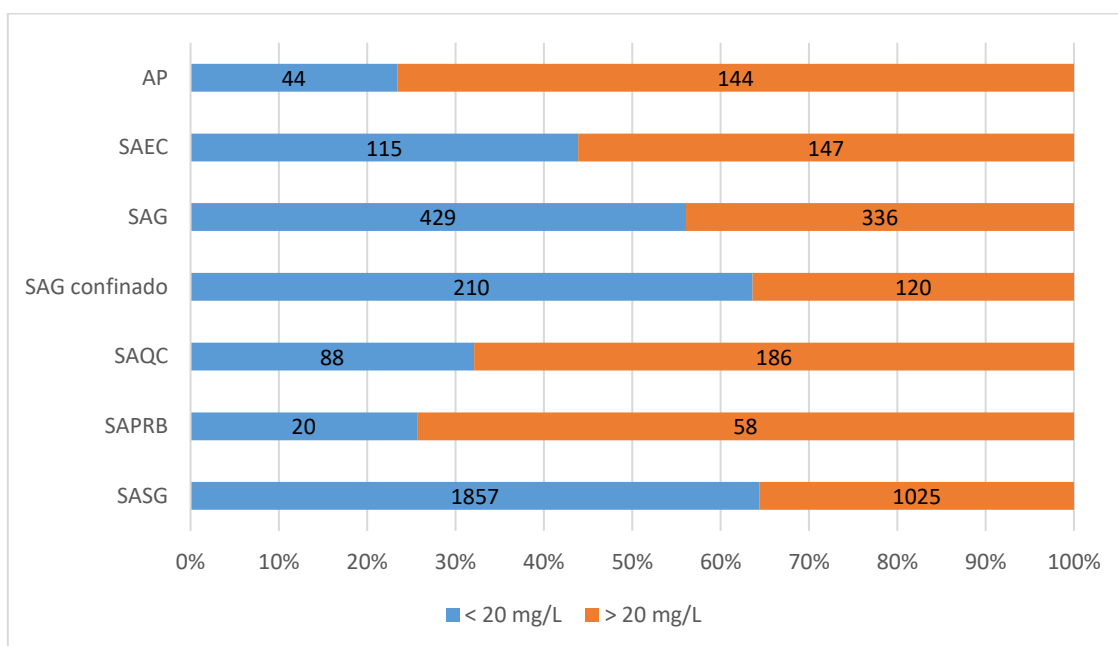


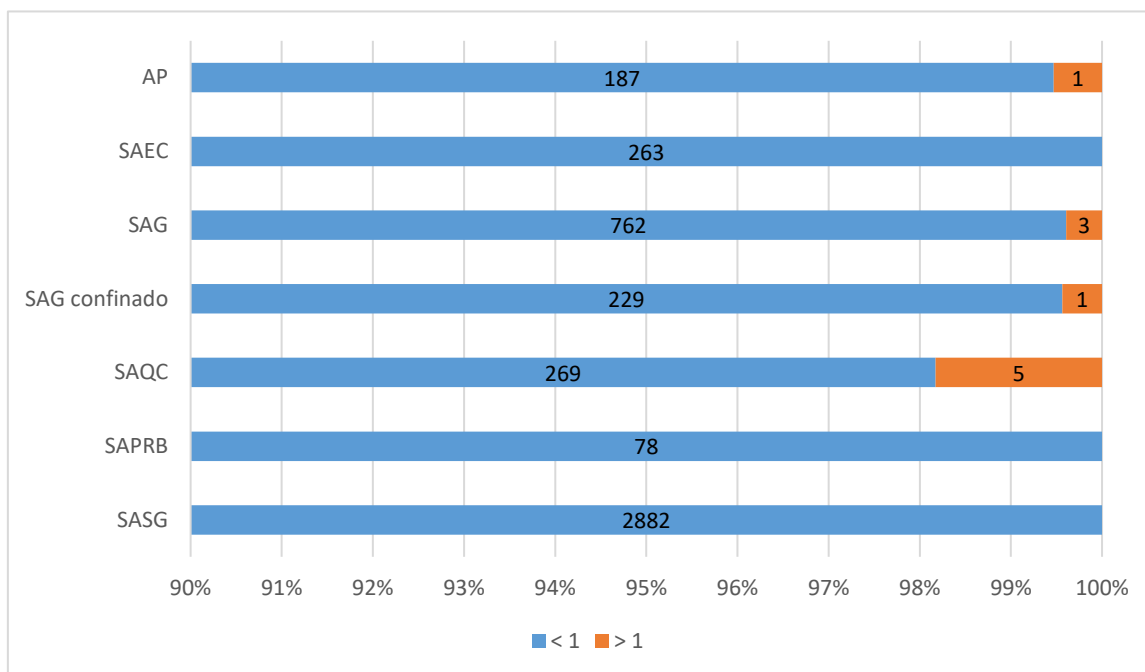
Tabela 33 - Variação estatística do quociente de risco não carcinogênico (NHQ) do elemento Sódio para os Sistemas Aquíferos

Sistema Aquífero	Valor Médio	Valor Mediano	Valor Mínimo	Valor Máximo	Desvio Padrão
AP	0,12	0,06	0,003	1,13	0,16
SAEC	0,08	0,03	0,003	0,99	0,14
SAG	0,06	0,02	0,00008	1,13	0,12
SAG confinado	0,04	0,02	0,0009	1,21	0,10
SAQC	0,12	0,05	0,001	2,24	0,25
SAPRB	0,14	0,08	0,001	0,58	0,15
SASG	0,04	0,02	0,00001	0,99	0,05

A Figura 18 apresenta o percentual de poços dos Sistemas Aquíferos em relação ao NHQ para as concentrações de sódio. Observa-se que o SAEC, o SAPRB e o SASG são os sistemas aquíferos que não possuem valor acima de 1 para o NHQ. Além disso, os demais sistemas aquíferos apresentam percentual de poços abaixo de 2%. Os AP e o SAG confinado apresentaram apenas um 1 poço com valor superior à 1 para o NHQ, já SAG aflorante apresentou 3 poços e os SAQC foram os que apresentaram o maior número de poços, com 5 poços com valor superior à 1 para o NHQ. Destaca-se também, que espera-

se que numa situação de alto confinamento tenhamos mais poços com problemas de sódio, porém o SAG confinado possui poucos poços disponíveis para essa área.

Figura 18 - Risco não carcinogênico (NHQ) para as concentrações de sódio dos poços dos Sistemas Aquíferos



5.6. Discussão dos resultados

No que se refere aos parâmetros analisados, nota-se que grande parte das águas subterrâneas dos poços dos Sistemas Aquíferos do RS possuem concentrações que habilitam seu consumo humano. No entanto, os resultados demonstram que há amostras em todos os Sistemas Aquíferos que indicam concentrações de alguns parâmetros físico-químicos em desconformidade com as normativas.

5.6.1. Aquitardos Permianos (AP)

Os Sistemas Aquíferos que sofrem influência das formações Irati e Sub-grupo Estrada Nova são as que apresentam maiores concentrações de sódio na região de São Gabriel (RS). As altas concentrações de sódio podem estar relacionadas a dois processos geoquímicos distintos: dissolução de halita; e troca de cátions entre as águas subterrâneas e os argilo-minerais presentes nas rochas das unidades Irati e Sub-grupo Estrada Nova (Goffermann, 2013).

Neste estudo, poços em outras regiões do Estado do RS e que possuem, em seus perfis construtivos, litologias correspondentes as formações Irati e Sub-grupo Estrada Nova também apresentaram altas concentrações de sódio, acima do VMP.

5.6.2. Sistema Aquífero Embasamento Cristalino (SAEC)

Conforme Viero *et al.* (2013), na região de São Gabriel (RS), altas concentrações de STD, sódio, sulfato, cálcio, cloreto originadas, principalmente no Aquitardo Permiano (Formação Irati) ocorrem, também, no Aquífero Rio Bonito e Embasamento Cristalino, o que denota a ocorrência de conexões hidráulicas (drenância vertical) entre os aquitardos permianos e aquíferos sotopostos.

Observa-se, neste estudo, que os altos teores de STD, sódio, sulfato e cloreto no SAEC estão próximos a região de ocorrência dos Aquitardos Permianos. Além de altos teores de STD, sódio e cloreto próximos a região de ocorrência do SAQC. Alguns poços que possuem em seus perfis construtivos, litologias correspondentes as formações dos AP e SAQC apresentaram altas concentrações destes elementos.

5.6.3. Sistema Aquífero Guarani (SAG)

Áreas de confinamento intermediárias do SAG, dispõem grau médio de mineralização com predomínio do processo de intercâmbio iônico; enquanto as regiões de maior confinamento do SAG, com águas de alta a média mineralização e mais salinas (OEA, 2009). A concentração de Na^+ tende a aumentar nas porções mais profundas do SAG. A composição química das águas subterrâneas varia de bicarbonato de cálcio próximo à zona de recarga a bicarbonato de sódio em porções confinadas (GASTMANS *et al.*, 2010). Para Matos (2020), águas típicas do SAG de alto confinamento apresentaram como principais marcadores os valores elevados de sódio, cloreto, sulfato e condutividade elétrica. Estas águas podem ter influência de águas do pré-SAG. Neste estudo, observa-se alguns valores elevados de sódio, cloreto, sulfato e STD tanto para área confinada do SAG, quanto para a área aflorante.

A razão Na/Cl demonstrou um comportamento variado nos poços com concentrações acima do VMP de sódio, de 0,42 a 6,93 na área confinada do SAG e de 1,71 a 92,61 na área aflorante. A relação entre esses elementos expõe concentrações mais altas de sódio em relação ao cloreto, podendo esse fato indicar possivelmente a existência de mais de uma fonte de sódio no meio. Para Marimon *et al.* (2012) valores superiores a dois da relação de sódio e cloreto indicam a ocorrência de processos de troca catiônica

intensa do sódio com o cálcio procedente de argilominerais, especialmente a esmectita. Manzano e Guimaraens (2009) descrevem que possíveis fontes de cloreto em águas mais salinizadas do SAG poderiam ser devido a presença de silvita ou cloromagnesita. Porém, estes autores expõem que o excesso de sódio sobre o cloreto em litologias silicatadas podem ocorrer por causa da dissolução de feldspato plagioclásio como a albita e das trocas de íons entre o sódio, o cálcio e o magnésio. Conforme Luiz *et al.* (2018), em caso de inexistência de contaminação ambiental, os conteúdos de sódio e cloreto em meq/L tanto em águas superficiais quanto subterrâneas tendem a valores próximos a unidade ($\text{Na} \approx \text{Cl}$). Além disso, o cloreto, uma vez dissolvido do sal de cloreto de sódio, tem pouca afinidade para ocorrer reações químicas. Ao contrário, estando o cálcio mais abundante do que o magnésio nas águas do SAG, o sódio pode realizar intercâmbio iônico com outros cátions como o cálcio e o magnésio.

5.6.4. Sistema Aquífero Quaternário Costeiro (SAQC)

A composição das águas subterrâneas na planície costeira do extremo sul do Brasil é tomada por características geológicas/pedológicas e climáticas específicas da savana meridional da América do Sul. A composição quartzo-arenosa dos solos pobres em cátions alcalino-terrosos (Ca^{2+} , Mg^{2+}), a alta taxa de precipitação e o moderadamente denso carpete de vegetação herbácea criam condições de formação de águas subterrâneas muito doces ($\text{STD} < 100 \text{ mg/L}$) e levemente ácidas (pH 5,5-6) detendo como íons principais sódio e cloreto (Mirlean *et al.*, 2005). Conforme Evangelista (1989), quando se faz referência aos principais cátions em águas subterrâneas, o íon sódio é dominante de aquíferos costeiros com interferência de salinização e que está profundamente relacionado com processos de trocas iônicas, principalmente com o Ca^{2+} .

A razão Na/Cl demonstra que a maior parte das amostras com concentrações superiores ao VMP de sódio possui uma relação iônica próxima à água marinha (valores entre 0,87 e 0,89), porém, os resultados não necessariamente indicam que está havendo movimentação ou intrusão salina nestes poços, em virtude de que as razões Mg/Ca (valores entre 0,3 e 1,5) e Cl/ HCO_3 (valores entre 0,1 e 5), que indicam águas de origem continental, conforme Feitosa *et al.* (2008). Devido à grande influência dos aerossóis marinhos na água da chuva que incide sobre a área, a água do SAQC acaba obtendo as características da água que recarrega o manancial, ainda que diluída.

5.6.5. Sistema Aquífero Palermo – Rio Bonito (SAPRB)

Goffermann *et al.* (2012) desenvolveram um estudo do Sistema Aquífero Palermo-Rio Bonito na porção sul do município de São Gabriel (RS). As águas subterrâneas desta região possuem teores de STD que variam entre 60 e 300 mg/L, de sódio, entre 3,2 e 190 mg/L e de fluoreto, entre 0,05 e 1,30 mg/L. As litologias locais e o tempo de circulação no meio por onde passam, principalmente às rochas sedimentares arenosas com matriz constituída por minerais calcínicos, que favorecem o enriquecimento dos íons Ca^+ e Na^+ , sugerindo uma evolução geoquímica das águas cálcicas para sódicas, na medida em que aumentam as profundidades e as distâncias das áreas de recarga.

Segundo Viero *et al.* (2013), onde o aquífero Rio Bonito sofre influência das rochas sedimentares da Formação Irati são registradas altas concentrações destes íons que tornam a água imprópria para consumo humano. Os arenitos da Formação Rio Bonito representam o principal aquífero da região de São Gabriel (RS), ao passo que a Formação Irati se caracteriza como a principal fonte de salinização das águas, tendo o cálcio, o bicarbonato e o sulfato origem na dissolução e hidrólise de calcita e anidrita, enquanto o sódio deriva, principalmente, de troca catiônica com o cálcio. Embora a fonte dos sais dissolvidos resida essencialmente na Formação Irati, as águas salinizadas são encontradas na maioria das unidades hidroestratigráficas da região, o que decorre das conexões hidráulicas entre as mesmas.

Neste estudo, poços que captam água do SAPRB possuem, em seus perfis construtivos, litologias correspondentes as formações Irati e Sub-grupo Estrada Nova também apresentaram altas concentrações de sódio, acima VMP.

5.6.6. Sistema Aquífero Serra Geral (SASG)

Os poços que possuem concentrações dos parâmetros de origem natural (cloreto, fluoreto, sódio, sulfato, STD em condições alcalinas), que excedem os VMP, estão possivelmente associadas a padrões de circulação regionais, na Bacia do Paraná, de águas subterrâneas do SASG e SAG, com o contato água-rocha dentro do aquífero fraturado ou o contato entre águas de diferentes aquíferos (QUAGGIO *et al.*, 2018). Conforme Athayde *et al.* (2007), a possibilidade de mistura confirma-se pela similaridade hidroquímica entre o SASG e o SAG, as águas do SASG apresentam enriquecimento em sódio, cloreto, sulfato e pH, além das elevadas temperaturas, também observadas na região noroeste do Estado por Mancuso *et al.* (2014). O enriquecimento de sódio também

é indicado como evidência de mistura com águas profundas por Teixeira e Viero (2017), que atribuem a sua proveniência aos aquíferos confinados sedimentares da Bacia do Paraná.

Segundo Gastmans *et al.* (2017), as águas que possuem maior tempo de residência do SASG no Estado de São Paulo, porção sudeste, possuem características bicarbonatadas sódicas, por causa dos processos naturais de troca de íons, sem associação com provável atividade antrópica. Para este estudo, pode ser rejeitada, a origem antrópica, dado que para os poços com concentrações acima do VMP de sódio, as razões Na/Cl, que careceriam de ser próximas a 1, se a origem dos elementos fosse relacionada à dissolvência de cloreto, são superiores a 1. A razão iônica Na/Cl variou 1,15 a 875,93 para os poços com concentrações de sódio acima do VMP, portanto esses resultados apontam que a origem do sódio esteja relacionada a processos de troca iônica e/ou à dissolução de feldspatos, como proposto por Gastmans *et al.* (2017).

5.6.7. Sódio em relação à saúde humana

Na abrangência deste estudo, mais de 100 poços ultrapassaram o valor máximo permitido de sódio na água da Portaria nº 888 de 2021 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2021), já mais 2.000 poços ultrapassam a concentração recomendada pela U.S. EPA sobre a concentração de sódio na água potável menor que 20 mg/L para indivíduos com dieta restritiva de sódio. No entanto, apenas 10 poços obtiveram valores superiores à 1 para o NHQ. O número de poços com valores superiores à 1 para o NHQ é baixo, pois muitas incertezas envolvem a estimativa do NHQ, como o próprio valor da RfD, além dos parâmetros para o cálculo do ingresso por ingestão de água contaminada. Mesmo assim, fica o alerta para os locais onde estão situados estes poços. Os municípios onde estão situados estes poços são: Agudo, Capão da Canoa, Glorinha, Porto Alegre, Rio Grande (2 poços), Santa Maria, São José do Norte, Três Arroios e Triunfo.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise da qualidade das águas subterrâneas dos principais Sistemas Aquíferos do Estado do RS, baseado em um conjunto de dados de 4.687 poços apontou que para alguns parâmetros da Portaria nº 888 de 2021 do Ministério da Saúde e da Resolução CONAMA 396/2008 (cloreto, sulfato, sódio e STD), grande parte dos poços possui boas condições de potabilidade, visto que apenas em 166 deles os VMP não foram atendidos.

A distribuição espacial dos poços que ultrapassam o VMP do sódio, aponta que os poços estão concentrados em pontos geográficos específicos de alguns Sistemas Aquíferos. No SASG e SAG confinado, muitas dessas amostras foi coletada em poços situados próximos ao limite dos estados de SC e RS, seguindo a margem do Rio Uruguai. Já no SAEC, as amostras se encontram próximas aos AP, ao SAPRB e ao SAQC. A maioria dos poços (56%), que ultrapassam o VMP do sódio, não possuem informação sobre o uso, porém 16% dos poços são utilizados para abastecimento urbano.

As altas concentrações de sódio no SASG podem estar relacionadas com misturas de águas com os aquíferos SAG e pré-SAG. Para o SAG, as altas concentrações também podem estar relacionadas com misturas de águas do pré-SAG, além da presença de argilo-minerais presentes nas rochas das formações geológicas do SAG. As altas concentrações de sódio nos AP e no SAPRB podem estar relacionadas a dissolução de halita; e troca de cátions entre as águas subterrâneas e os argilo-minerais presentes nas rochas das unidades Irati e Sub-grupo Estrada Nova. Por fim, as altas concentrações de sódio no SAQC podem estar relacionadas a grande influência dos aerossóis marinhos na água da chuva que incide sobre a área.

Todos os sistemas aquíferos apresentam mais de 30% dos poços com valores de sódio acima da recomendação da U.S. EPA sobre a concentração de sódio na água potável menor que 20 mg/L para indivíduos com dieta restritiva de sódio (500 mg/dia), sendo que os AP e os SAPRB apresentam o maior percentual, ultrapassando 70% dos poços.

Os AP e o SAG confinado apresentaram apenas um 1 poço com valor superior à 1 para o quociente de perigo não carcinogênico (NHQ), já SAG aflorante apresentou 3 poços e os SAQC foram os que apresentaram o maior número de poços, com 5 poços com valor superior à 1 para o NHQ. O número de poços com valores superiores à 1 para o NHQ é baixo, pois muitas incertezas envolvem a estimativa do NHQ, como o próprio valor da RfD, além dos parâmetros para o cálculo do ingresso por ingestão de água

contaminada. Então, recomenda-se investigar os locais onde estão situados os 10 poços que obtiveram valores superiores à 1 para o NHQ.

Para os locais onde os poços, utilizados para abastecimento urbano, não atendem aos padrões de potabilidade conforme a Portaria GM/MS nº 888 de 2021, recomenda-se analisar a relação entre as altas concentrações dos constituintes com profundidades de entrada de água nos poços, pois as altas concentrações podem estar relacionadas a apenas uma determinada formação geológica. Além disso, recomenda-se analisar a possibilidade de uso de outros mananciais nesses locais.

Referências

- AFSHIN, Ashkan *et al.* Health effects of dietary risks in 195 countries , 1990 – 2017 : a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study. **The Lancet**, v. 393, n. 19, p. 1958–1972, 2019. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(19\)30041-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(19)30041-8)
- ANA. **Atlas águas: segurança hídrica do abastecimento urbano**. Brasília, 2021.
- ARAÚJO, Sandrine Ferraz. **HIDROQUÍMICA DOS AQÜÍFEROS FREÁTICOS DA BACIA DO RIO JARDIM – DF**. 2006. - Universidade de Brasília, *Brasília*, 2006.
- ATHAYDE, Camila Müller *et al.* Índice Relativo de Risco, ferramenta de tomada de decisão em bacias hidrográficas destinadas ao abastecimento público. **Boletim Paranaense de Geociências**, v. 71, n. 1, p. 12–20, 2014a. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/geo.v71i0.34986>
- ATHAYDE, G. B., MÜLLER, C. V., ROSA FILHO, E. F., HINDI, E. Estudo sobre os tipos das águas do Aquífero Serra Geral, no município de Marechal Cândido Rondon – PR. **Águas Subterrâneas**, 21(1), 111-122, 2007. <https://doi.org/10.14295/ras.v21i1.16174>
- BACK, William. Hydrochemical facies and ground-water flow patterns in Northern Atlantic Coastal Plain. **AAPG Bulletin**, v. 44, n. 7, p. 1244–1245, 1960.
- BOON, Caitlin S. *et al.* **Strategies to reduce sodium intake in the United States**. National Academies Press, 2010
- BORTOLIN, Taison Anderson *et al.* Hidrogeologia e hidroquímica dos aquíferos fraturados associados às rochas vulcânicas ácidas no Município de Carlos Barbosa (RS). **Revista Ambiente & Água**, v. 9, p. 55-67, 2014.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro. Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 07 mai. 2021. Seção 1, ed.58, p. 127.
- CECCONELLO, Samanta Tolentino; CENTENO, Luana Nunes; LEANDRO, Diuliana. Avaliação da qualidade da água subterrânea na zona rural do município de Pelotas, RS. **Revista Thema**, v. 17, n. 1, p. 57-73, 2020.
- CELLIGOI, André. Considerações sobre análises químicas de águas subterrâneas. **Geografia**, v. 8, n. 1, p. 91–97, 1999. Disponível em: <http://www.uel.br/revistas/wrevojs246/index.php/geografia/article/view/10207>
- CETESB. **Planilhas para Avaliação de Risco em Áreas Contaminadas sob Investigação**. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/planilhas-para-avalia%C3%A7%C3%A3o-de-risco/8-planilhas>. Acesso em: 13 jun. 2020. São Paulo, 2013.
- CEZIMBRA, Flora Dallagnol. Caracterização hidrogeológica e hidroquímica do Aquífero Rio Bonito nos municípios de Aceguá, Hulha Negra e Candiota e análise do seu aspecto transfronteiriço. 2019.
- CONAMA. Resolução Nº 396, de 3 de abril de 2008. **Diário Oficial [da] União**, 2008.

CONAMA, Resolução Nº 420, de 28 de dezembro de 2009. **Diário Oficial [da] União**, 2009.

COXSON, Pamela G. *et al.* Mortality benefits from US population-wide reduction in sodium consumption: projections from 3 modeling approaches. v. 61, n. 3, p. 564–570, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1161/HYPERTENSIONAHA.111.201293>

CUSTODIO, E.; LLAMAS, M. R. Hidrologia subterrânea, 2 edição corrigida. Barcelona. **Ômega S/A**, 1983.

DA COSTA, Adilson Ben et al. AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE (SISTEMA AQUÍFERO GUARANI–SAG), BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARDO, RS, BRASIL. **Tecno-Lógica**, v. 14, n. 1, p. 26-38, 2010.

DEGENARO, Frank; NYHAN, William L. Salt--a dangerous" antidote". **The Journal of pediatrics**, v. 78, n. 6, p. 1048-1049, 1971.

DESCOVI FILHO, Leonidas Luiz Volcato *et al.* Aspectos qualitativos dos recursos hídricos subterrâneos na Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria – RS. 2011.

DE WARDENER, H. E.; MACGREGOR, G. A. Harmful effects of dietary salt in addition to hypertension. **Journal of Human Hypertension**, v. 16, n. 4, p. 213–223, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/sj/jhh/1001374>

EATON, S. Boyd; KONNER, Melvin. Paleolithic nutrition: a consideration of its nature and current implications. **New England Journal of Medicine**, v. 312, n. 5, p. 283-289, 1985.

ELTON, Norman W. *et al.* Pathology of acute salt poisoning in infants. **American journal of clinical pathology**, v. 39, p. 252-264, 1963.

ERICKSSON, Maurício da Silva. Caracterização hidrogeológica do município de Guaíba (RS). 2015.

EVANGELISTA, Ignacio Morell. Salinización por intrusión marina. Aspectos teóricos y metodológicos. Aplicación a los acuíferos costeros de la provincia de Castellón. Diputación de Castellón, 1989.

FEITOSA, Fernando A. Carneiro et al. Hidrogeologia: conceitos e aplicações. CPRM, 2008.

FILGUEIRAS, Conceição Maria. **CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOQUÍMICA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA ILHA DE BOIPEBA LITORAL DA BAHIA - BRASIL**. 2016. - Universidade Federal Fluminense, 2016.

FREITAS, Marcos Alexandre. Recursos Hídricos Subterrâneos. *In*: VIERO, Ana Cláudia; DA SILVA, Diogo Rodrigues Andrade (org.). **Geodiversidade do estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: CPRM, 2010. p. 73–86.

FREITAS, Marcos Alexandre de; ROISENBERG, Ari; ANDRIOTTI, José Leonardo Silva. Análise exploratória de dados da condutividade elétrica nas águas do Sistema Aquífero Serra Geral no Rio Grande do Sul e Santa Catarina. 2016.

GAILLARDET, J.; VIERS, J.; DUPRÉ, B. Trace elements in river waters. **Treatise on geochemistry**, v. 5, p. 605, 2003.

GASTMANS, D; CHANG, H.K; HUTCHEON, I. Groundwater geochemical evolution in the northern portion of the Guarani Aquifer System (Brazil) and its relationship to diagenetic features. **Applied Geochemistry Journal**, v. 25, n. 1, p.16-33, 2010.

GASTMANS, Didier; MENEGÁRIO, Amauri Antônio; HUTCHEON, Ian. Stable isotopes, carbon-14 and hydrochemical composition from a basaltic aquifer in São Paulo State, Brazil. **Environmental earth sciences**, v. 76, n. 4, p. 1-16, 2017.

GAUTHIER, B.; FREEMAN, R.; BEVERIDGE, J. Accidental salt poisoning in a hospital nursery. **Journal of Paediatrics and Child Health**, v. 5, n. 2, p. 101-105, 1969.

GOFFERMANN, Marcelo. **Caracterização hidrogeológica e hidroquímica das águas subterrâneas da região de São Gabriel, RS**. 2013.

GOFFERMANN, Marcelo; VIERO, Antônio Pedro; TREIN, Heinz Alfredo. Caracterização hidrogeológica do Sistema Aquífero Palermo-Rio Bonito na região sul do município de São Gabriel, RS. 2010.

GOFFERMANN, Marcelo; VIERO, Antonio P.; SILVA, Eliane B. Caracterização hidrogeológica e hidroquímica das águas subterrâneas da região de São Gabriel, RS. **Pesquisas em Geociências**, v. 42, n. 3, p. 239-261, 2015.

HARTMANN, L. A.; CHEMALE JR, Farid; PHILIPP, R. P. Evolução geotectônica do Rio Grande do Sul no pré-cambriano. **Ianuzzi R. & Frantz JC. (Org.)**, v. 50, p. 97-123, 2007.

HAUSTMAN, Abrão. **Províncias hidrogeológicas do Estado do Rio Grande do Sul, RS**. São Leopoldo, Brasil, 1995.

HEALTH CANADA. **Guidelines for Canadian Drinking Water Quality**. Water and Air Quality Bureau, Healthy Environments and Consumer Safety Branch, Health Canada, Ottawa, Ontario. 2020.

HE, Feng J.; MACGREGOR, Graham A. Salt, blood pressure and cardiovascular disease. **Current opinion in cardiology**, v. 22, n. 4, p. 298-305, 2007.

HIRATA, Ricardo *et al.* **A revolução silenciosa das águas subterrâneas no Brasil: uma análise da importância do recurso e os riscos pela falta de saneamento**. Instituto Trata Brasil, 2019.

HITCHON, Brian et al. Sedimentary basins and greenhouse gases: a serendipitous association. **Energy Conversion and Management**, v. 40, n. 8, p. 825-843, 1999.

HYDE, Robert J.; FELLER, Ralph P. Age and sex effects on taste of sucrose, NaCl, citric acid and caffeine. **Neurobiology of aging**, v. 2, n. 4, p. 315-318, 1981.

IBGE. **Pesquisa de Orçamentos Familiares 2008 - 2009**. Rio de Janeiro 2011.

KAUL, Pedro F. T. Geologia. *In: Geografia do Brasil; Região Sul*. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1990. v. 2p. 29–54.

LISBOA, Nelson Amoretti et al. Síntese da Ocorrência Geológica das Águas Subterrâneas do Rio Grande do Sul. **Águas Subterrâneas**, n. 1, 2004.

LOGAN, J. **Interpretação e Análises Químicas de Águas**. Recife: U.S. Agency International Development, 1965. 67 p.

LUIZ, Thiago Boeno Patricio; DA SILVA, José Luiz Silvério; DESCOVI FILHO, Leônidas Luiz Volcato. Investigação hidroquímica de teores elevados de fluoreto em águas subterrâneas de porção do Sistema Aquífero Guarani, no sul do Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 41, n. 1, p. 52-65, 2018.

MACHADO, José Luiz Flores; FREITAS, Marcos Alexandre. **Projeto Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 2005.

MANCUSO, M. A., FORMENTINI, J., GRIEBELER, J. S. Caracterização de hipotermalismo na região noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. XVIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 18 p. 2014. Belo Horizonte: ABAS.

MANZANO, M.; GUIMARAENS, M. Estudio del origen de la composición química de las aguas subterrâneas del Sistema Aquífero Guaraní. 2009.

MARIMON, Maria Paula C. et al. Hydrogeochemistry and statistical analysis applied to understand fluoride provenance in the Guarani Aquifer System, Southern Brazil. **Environmental geochemistry and health**, v. 35, n. 3, p. 391-403, 2013.

MATOS, Alex Bortolon de. Compartimentação estrutural e interações hidrogeológicas entre o Sistema Aquífero Guarani e Serra Geral na região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul. 2020.

MDEQ, Michigan Department of Environmental Quality. CHEMICAL UPDATE WORKSHEET. 2015.

MILANI, Edilson José. **Evolução tecnoestratigráfica da bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozoica do Gondwana sul-ocidental**. 1997. - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

MIRLEAN, Nicolai et al. O impacto industrial na composição química das águas subterrâneas com enfoque de consumo humano (Rio Grande, RS). **Química Nova**, v. 28, p. 788-791, 2005.

MOBUS, G. Qualigraf: programa para análise da qualidade da água. **Fortaleza: FUNCENE**, p. 2849-2861, 2002.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL, NRC. 1989. Recommended dietary allowances. Washington, DC: **National Academy of Sciences**, National Academy Press, pp. 247–261.

NHMRC, National Water Quality Management Strategy. Australian drinking water guidelines. **Commonwealth of Australia**, 2011.

NILSON, Eduardo Augusto Fernandes; JAIME, Patrícia Constante; RESENDE, Denise de Oliveira. Iniciativas desenvolvidas no Brasil para a redução do teor de sódio em alimentos processados. **Rev Panam Salud Publica**, v. 32, n. 4, p. 287–292, 2012.

ORGANIZAÇÃO DOS ESTADOS AMERICANOS, Aquífero Guarani: programa estratégico de ações [Guarani Aquifer: strategic program of actions]. OEA, Washington, DC. 2009, 424 p.

PACHECO, Patricia. **Água Destinada ao Consumo Humano: Risco para a saúde humana resultantes da exposição a sódio**. Lisboa e Vale do Tejo: Departamento de Saúde Pública, 2008.

PÁDUA, H. B. **Águas com dureza e alcalinidade elevada: observações iniciais na Região de Bonito/MS**. Br. registro de dados - 2001/2 - alguns conceitos e comportamentos ambientais (parte 01). [S.l.: s.n.], 2002. 64 p. Disponível em: <www.abrappesq.com.br/apostila_helcias.doc>. Acesso em: 26 ago. 2020.

PAIM, Rosana Alves. Avaliação da qualidade da água subterrânea de poços ponteira no município de Osório, RS. 2018.

PIPER, Artur M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 25, n. 6, p. 914–928, 1944.

PORCHER, Carlos Alfredo; LOPES, Ricardo da Cunha. Cachoeira do Sul: folha SH. 22-YA. 2000.

QUAGGIO, Carolina Stager et al. Variações na composição das águas subterrâneas do Sistema Aquífero Serra Geral em território brasileiro e sua relação com anomalias hidrogeoquímicas. **Águas Subterrâneas**, v. 32, n. 3, p. 283-294, 2018.

REGINATO, Pedro Antonio Roehe; AHLERT, Siclério; SCHNEIDER, Vania Elisabete. Caracterização hidroquímica do sistema aquífero Serra Geral na região nordeste do Rio Grande do Sul. **Águas Subterrâneas**, v. 27, n. 1, 2013.

REGINATO, Pedro Antonio Roehe *et al.* **ÁGUA SUBTERRÂNEA UTILIZADA PARA IRRIGAÇÃO NA PLANÍCIE COSTEIRA DO RIO GRANDE DO SUL E SEU RISCO A SALINIZAÇÃO**. **Águas Subterrâneas**, 2009.

RIO GRANDE DO SUL. Lei Estadual 10.350, de 30 de dezembro de 1995. Institui o Sistema Estadual de Recursos Hídricos, regulamentando o artigo 171 da Constituição do Estado do Rio Grande do Sul. **Diário Oficial [Do Estado do Rio Grande do Sul]**, Porto Alegre, 30 dez. 1995.

RIO GRANDE DO SUL. Decreto nº 37.033, de 21 de novembro de 1996. Regulamenta a outorga do direito de uso da água no Estado do Rio Grande do Sul, prevista nos artigos 29, 30 e 31 da Lei nº 10.350, de 30 de dezembro de 1994. **Diário Oficial [Do Estado do Rio Grande do Sul]**, Porto Alegre, 21 nov. 1996.

RIO GRANDE DO SUL. Decreto nº 42.047, de 26 de dezembro de 2002. Regulamenta disposições da Lei nº 10.350, de 30 de dezembro de 1994 com alterações relativas ao gerenciamento e à conservação das águas subterrâneas e dos aquíferos. **Diário Oficial [Do Estado do Rio Grande do Sul]**, Porto Alegre, 27 dez. 2012.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria do Meio Ambiente. GAMA Engenharia e Recursos Hídricos. **Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Camaquã**, 2016.

ROCHA, Paulo Novis. Hiponatremia: conceitos básicos e abordagem prática. **Brazilian Journal of Nephrology**, v. 33, p. 248-260, 2011.

ROISENBERG, Ari *et al.* Os recursos hídricos subterrâneos do Rio Grande do Sul: uma visão sobre a saúde das águas e implicações na saúde das populações. *In*: IANNUZZI, Roberto; FRANTZ, José Carlos (org.). **50 anos de geologia**. Porto Alegre: Comunicação e Identidade, 2007. p. 355–367.

SANTOS, Almany Costa. Noções de Hidroquímica. *In*: FEITOSA, Fernando A. C. *et al.* (org.). **Hidrogeologia Conceitos e Aplicações**. 3º ed. Rio de Janeiro: CPRM : LABHID, 2008. p. 325–357.

SANTIAGO, Mariana Ribeiro; SILVÉRIO DA SILVA, J. L. Classificação Hidroquímica de Águas Subterrâneas do Sistema Aquífero Guarani no RS e SC. *In*: **Anais do XIII Congresso Brasileiro de Geoquímica-III Simp. Geoq. Países do Mercosul, RS, Out. BR.** 2011. p. 1041-1044.

SECRETARIA ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. Relatório anual sobre a situação dos recursos hídricos no Estado do Rio Grande do Sul 2007-2008. Porto Alegre: SEMA, dez. 2008.

SECRETARIA ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE E INFRAESTRUTURA (Rio Grande do Sul). Relatório Anual sobre a Situação dos Recursos Hídricos no Estado do Rio Grande do Sul 2021. Porto Alegre: SEMA, 2022.

SFREDO, Marta. **Por que a água mineral Crystal está com menos sódio**. Disponível em: <https://gauchazh.clicrbs.com.br/colunistas/marta-sfredo/noticia/2017/12/por-que-a-agua-mineral-crystal-esta-com-menos-sodio-cjav5ha20084j01mk94a868f2.html>. Acesso em: 30 jul. 2020. Porto Alegre, 2017.

SILVA, Adelbani Braz da. Evolução química das águas subterrâneas. **Águas Subterrâneas**, v. 7, n. 1, 1984. Disponível em: <https://doi.org/10.14295/ras.v7i1.11253>

SOARES, Alice Dutra. Caracterização hidrogeológica e hidroquímica das águas subterrâneas do município de Osório, RS. 2016.

SOWERS, James R.; LESTER, Mel. Hypertension, hormones, and aging. **Journal of Laboratory and Clinical Medicine**, v. 135, n. 5, p. 379-386, 2000.

STEIN, Leslie J.; COWART, Beverly J.; BEAUCHAMP, Gary K. The development of salty taste acceptance is related to dietary experience in human infants: a prospective study. **The American journal of clinical nutrition**, v. 95, n. 1, p. 123-129, 2012.

STEVENS, Joseph C. Detection of tastes in mixture with other tastes: issues of masking and aging. **Chemical Senses**, v. 21, n. 2, p. 211-221, 1996.

STRAZZULLO, Pasquale; LECLERCQ, Catherine. Sodium. **Advances in Nutrition**, v. 5, n. 2, p. 188-190, 2014.

TEIXEIRA, G. V., VIERO, P. A. Evolução hidrogeoquímica dos aquíferos mesozoicos da porção sul da bacia do Paraná no oeste do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista Águas Subterrâneas**, 31(1), 36-51, 2017. <https://doi.org/10.14295/ras.v31i1.28577>

UNIÃO EUROPEIA. Diretiva 98/83/CE do Conselho, de 3 de novembro de 1998. Relativa à Qualidade da água destinada ao consumo humano. 1998.

U.S. EPA. 1996. **Code of Federal Regulations: Protection of the Environment**. Parts 126-149. Section 141.41. Office of the Federal Register, National Archives and Records Administration. Washington DC. pp. 352-353.

U.S. EPA. Risk Assessment Guidance for Superfund. Volume I Human Health Evaluation Manual (Part A). v. I, n. December, p. 289, 1989. Disponível em: <https://doi.org/EPA/540/1-89/002>

U.S. EPA. **Drinking Water Advisory: Consumer Acceptability Advice and Health Effects Analysis on Sodium**. Washington, DC: 2003.

VEIGA JUNIOR, Valdir Florêncio da *et al.* **Sódio**. 1ª ed. São Paulo: Sociedade Brasileira de Química, 2019.

VIERO, Antonio Pedro; GOFFERMANN, Marcelo; DA SILVA, Eliane Born. CONTROLE LITOESTRATIGRÁFICO DA SALINIZAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DE SÃO GABRIEL, RS. In: Simposio Brasileiro de Geofísica. 2016.

VILLWOCK, Jorge Alberto. Geology of the Coastal Province of Rio Grande do Sul, Southern Brazil. A Synthesis. **Pesquisas em Geociências**, v. 16, n. 16, p. 5–49, 1984.

VILLWOCK, Jorge Alberto; TOMAZELLI, Luiz José. Mapeamento geológico de planícies costeiras: o exemplo da costa do Rio Grande do Sul. **Gravel**, v. 3, n. 1, 2005.

WHO, World Health Organization. **Guidelines for Drinking-water Quality**. v. 1

WILDNER, Wilson; LOPES, Ricardo da Cunha. EVOLUÇÃO GEOLÓGICA: DO PALEOPROTEROZOICO AO RECENTE. In: VIERO, Ana Cláudia; DA SILVA, Diogo Rodrigues Andrade (org.). **Geodiversidade do estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: CPRM, 2010. p. 17–30.

WINCK, Nícolas Bitello. Avaliação hidrogeológica, hidroquímica e da ocorrência de ferro e manganês nas águas subterrâneas do distrito de Ipiranga, região noroeste do município de Gravataí. 2015.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **The world health report 2003: shaping the future**. World Health Organization, 2003.

WRIGHT, Ian A. et al. Elevated sodium concentrations in Australian drinking water supplies. In: **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. IOP Publishing, 2019. p. 012032.

ZALÁN, Pedro Victor *et al.* Bacia do Paraná. In: TRZECIAK, Magdalena; NOWICKI, Roman (org.). **Origem e evolução de bacias sedimentares**. 2. ed. [S. l.]: Petrobras, 1990. p. 135–168.