



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

GUILHERME CASAROTTO TROIAN

COMPARTIMENTAÇÃO HIDROESTRATIGRÁFICA DO SISTEMA AQUÍFERO COSTEIRO NO
ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

Porto Alegre
2021

GUILHERME CASAROTTO TROIAN

**COMPARTIMENTAÇÃO HIDROESTRATIGRÁFICA DO SISTEMA AQUÍFERO
COSTEIRO NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental apresentado como requisito necessário para obtenção do título de Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Antônio Roehe Reginato.

Coorientador: Prof. Dr. Ricardo Giumelli Marquezan.

CIP - Catalogação na Publicação

Troian, Guilherme
COMPARTIMENTAÇÃO HIDROESTRATIGRÁFICA DO SISTEMA
AQUÍFERO COSTEIRO NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL /
Guilherme Troian. -- 2021.
144 f.
Orientador: Pedro Antônio Reginato.

Coorientador: Ricardo Marquezan.

Tese (Doutorado) -- 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, 2021.

1. Hidrogeologia. 2. Hidroestratigrafia. 3. Sistema
Aquífero Costeiro. 4. Hidrogeoquímica. I. Reginato,
Pedro Antônio, orient. II. Marquezan, Ricardo,
coorient. III. Título.

GUILHERME CASAROTTO TROIAN

**COMPARTIMENTAÇÃO HIDROESTRATIGRÁFICA DO SISTEMA AQUÍFERO
COSTEIRO NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental apresentado como requisito necessário para obtenção do título de Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Aprovado em: Porto Alegre, 03 dezembro de 2021.

Prof. Dr. Pedro Antônio Roehe Reginato - IPH/UFRGS
Orientador

Profa. Dra. Franciéle Schwanck Carlos IPH/UFRGS
Examinadora

Dr. Roberto Eduardo Kirchheim – SGB/CPRM
Examinador

Prof. Dr. Alex Bortolon de Matos – UFRR
Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço de coração as pessoas (familiares e amigos) que fizeram parte da minha vida durante esses 5 anos! A maioria delas um dia ouviu a frase: “o Guilherme não pode (ou não vai) porque está escrevendo o doutorado”.

Mas em primeiro lugar a minha amada família (esposa Vera e filhos Vítor, Celina e Catarina) que são o motivo maior de tudo que penso e faço. Obrigado por me acolherem com calma e paciência nos momentos de “descontrole”, e por sempre me incentivar!

Aos meus queridos pais (Claudino e Elaine Troian) pelo esforço e incondicional apoio dados para minha educação e formação pessoal e profissional.

Aos colegas de trabalho do SGB/CPRM pelas inúmeras oportunidades de boas conversas e trocas de conhecimento.

Ao professor Pedro Reginato, um exemplo raro de orientador, por ter me compreendido e realmente me orientado durante este longo percurso.

Por fim a UFRGS e ao povo brasileiro que a mantem, ao qual tenho certeza que devo retribuir com muito trabalho e honestidade.

Espero que todo o esforço dedicado para realizar esta tese seja útil de alguma forma para ampliação do conhecimento sobre o nosso litoral do Rio Grande do Sul.

RESUMO

O Sistema Aquífero Costeiro (SAC) localizado na região da Planície Costeira do Estado do Rio Grande do Sul (PCRS) representa uma importante reserva de água subterrânea no Estado. O SAC ocupa praticamente toda a extensão da faixa litorânea entre os municípios de Torres e Chuí, sendo formado por intercalações de sedimentos arenosos e argilosos com até 1500 metros de espessura e aproximadamente 23.500km² de área aflorante. Esse estudo teve por objetivo a identificação e avaliação das unidades hidroestratigráficas do SAC, bem como a elaboração de um modelo hidrogeológico conceitual das unidades identificadas. Para isso tomou-se por base levantamentos geológicos, hidrogeológicos, hidroquímicos e geofísicos, cujos dados foram empregados na identificação das principais características de cada uma das unidades. Foram identificadas 06 diferentes unidades hidroestratigráficas distribuídas nas regiões norte, central e sul da PCRS, sendo que de forma geral: (i) as UH-1 e UH-3 (confinada) representam aquíferos regionais com características produtivas e de qualidade favoráveis a exploração de água subterrânea; (ii) as UH-2 e UH-4, presentes em toda a região, apesar de apresentarem boas características produtivas, exercem a função de barreiras semi-permeáveis, e também induzem o aumento expressivo da salinidade das águas subterrâneas; (iii) as UH-3 (livre) e UH-5 apresentam ocorrência restrita, representando aquíferos com grande importância local. As assinaturas isotópicas indicam predomínio de recarga meteórica para o SAC, com valores variando de -2,43‰ a -4,41‰ ($\delta^{18}\text{O}$) e -9,9‰ a -23,5‰ ($\delta^2\text{H}$). A partir do resultado deste estudo foi possível entender como está estruturado o SAC e quais as características quantitativas e qualitativas de cada unidade aquífera. O modelo conceitual desenvolvido para o SAC é um resultado pioneiro que representa um conhecimento imprescindível para a realização de uma gestão correta e mais eficiente desse importante recurso hídrico.

Palavras-Chave: hidroestratigrafia, sistema aquífero costeiro, hidrogeoquímica.

ABSTRACT

The Coastal Aquifer System (SAC) located within the Coastal Plain of the State of Rio Grande do Sul (PCRS) represents an important groundwater reservoir. The SAC occupies practically the entire length of the coastal area between the municipalities of Torres and Chuí. It is constituted by intercalations of sandy and clay sediments up to 1.500 m thick and approximately 23.500 km² of outcropping area. This study had as objective the identification and evaluation of the hydrostratigraphic units that make up the SAC, as well as the development of its conceptual hydrogeological model. In order to achieve this goal, geological, hydrogeological and geophysical assessments and surveys were carried out and used as basis. Six different hydrostratigraphic units were identified, distributed in the north, central and south regions along the PCRS. Each of them were described in terms of their main hydrogeological and hydrochemical characteristics: (i) The UH-1 and UH-3 (confined) represent regional aquifers with productive and quality characteristics favorable to the exploitation of groundwater water; (ii) The UH-2 and UH-4 were identified throughout the whole region and despite having good production characteristics, they play the role of semi-permeable barriers, and also induce a significant increase in the salinity of groundwater; (iii) The UH-3 (unconfined) and UH-5 have a restricted occurrence and represent aquifers of great local importance. Isotopic signatures indicate a predominance of meteoric recharge for the groundwater in the SAC, with values ranging from - 2.43‰ to -4.41‰ ($\delta^{18}\text{O}$) and -9.9‰ to -23.5‰ ($\delta^2\text{H}$). The results found in this study allowed the discretization into hydrostratigraphic units, their quantitative and qualitative characteristic, therefore, a better understanding of the whole SAC. The conceptual model developed for the SAG is a pioneering result which represents an important step towards enhanced groundwater management policies.

Keywords: Hydrostratigraphy, Coastal Aquifer System, hydrogeochemistry.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

UH: Unidade Hidroestratigráfica
CECO: Centro de Estudos Costeiros
CORSAN: Companhia Riograndense de Saneamento
CPRM: Companhia de Pesquisas e Recursos Minerais
FURG: Universidade Federal de Rio Grande
Ka: Mil Anos
Km: Quilômetro
km²: Quilômetro Quadrado
m: Metro
m²: Metro Quadrado
Ma – Milhões de Anos
mg/L – Miligramas por Litro
m³/h/m: metro cúbico por hora por metro
m³/h: metro cúbico por hora
m²/h : metro quadrado por hora
µS/cm – Micro-Siemens por Centímetro
GMS: *Groundwater Modeling Systems*
NE: Nível Estático
ND: Nível Dinâmico
Q: Vazão
Q/s: Vazão Específica
T: Transmissividade
SAC: Sistema Aquífero Costeiro
SAQC: Sistema Aquífero Quaternário Costeiro
PCRS: Planície Costeira do Rio Grande do Sul
PETROBRAS: Petróleo Brasileiro S.A
RIMAS: Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas
RS: Rio Grande do Sul
SIAGAS: Sistema de Informação das Águas Subterrâneas
UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Localização da Planície Costeira do Estado do Rio Grande do Sul..... | 18 |
| Figura 2: Taxonomia Hidrogeológica proposta em Diniz <i>et al.</i> (2014). | 22 |
| Figura 3: Modelo hidrogeológico conceitual de um sistema aquífero costeiro. Modificado de Barlow, 2003. | 23 |
| Figura 4: Modelos hidrogeológicos mostrando a influência da estratigrafia nos aquíferos costeiros regionais, modificado de FREEZE & CHERRY (2017)..... | 23 |
| Figura 5: Sistema aquífero costeiro correspondente a planície costeira de Nova Jersey, modificado de FITTS (2015). A numeração indica as diferentes unidades aquíferas identificadas..... | 24 |
| Figura 6: Seção geológica esquemática da Bacia de Pelotas, modificada de Villwock, 1984. | 26 |
| Figura 7: Seção geológica da porção norte da PCRS entre os municípios de Tramandaí e Torres, mostrando a espessura dos aquíferos cenozóicos. Fonte: Machado, 2005..... | 28 |
| Figura 8: Mapa das províncias geomorfológicas do Rio Grande do Sul. | 29 |
| Figura 9: Mapa Geológico da PCRS, extraído de Tomazelli & Villwock (2000)..... | 30 |
| Figura 10: Perfil esquemático mostrando os sistemas deposicionais da PCRS (modificado por ROSA, 2012 de Tomazelli & Villwock, 2000). | 31 |
| Figura 11: Perfil esquemático da região norte da PCRS proposto por Collischonn (2018), com inserção de pacote sedimentar marinho entre os Sistemas Laguna-Barreira. | 34 |
| Figura 12: Mapa Geológico do Rio Grande do Sul, modificado de CPRM (2005). | 36 |
| Figura 13: Perfis Geológicos com a identificação das principais camadas de sedimentos e ambientes de deposição presentes no município de Cassino. Fonte NASCIMENTO (2013). | 37 |
| Figura 14: Modelo hidrogeológico conceitual da zona urbana do município de Osório, proposto por Bobsin (2013)..... | 38 |
| Figura 15: Seções hidrogeológicas esquemáticas mostrando a presença de aquíferos livres, semi-confinados e confinados na região de Osório, proposto por SOARES (2016).... | 39 |
| Figura 16: Modelo de evolução da água subterrânea em regiões costeiras e seus tipos hidroquímicos. Extraído de LIMA, (2019), modificado HISCOCK (2011) | 43 |
| Figura 17: Fluxograma com a metodologia aplicada no desenvolvimento da pesquisa. | 47 |

| | |
|--|----|
| Figura 18: Localização das sondagens estratigráficas realizadas pela PETROBRAS e pela CPRM, na região da PCRS. | 48 |
| Figura 19: Localização dos poços que compõem o banco de dados. | 49 |
| Figura 20: Localização das seções hidroestratigráficas elaboradas. | 51 |
| Figura 21: Identificação das diferentes regiões da PCRS utilizadas para apresentação dos resultados. | 58 |
| Figura 22: Perfis geológicos de sondagens realizadas pela PETROBRAS na Bacia de Pelotas, localizados nos municípios de Santa Vitória do Palmar, Rio Grande e Pelotas. | 59 |
| Figura 23: Localização das sondagens e das seções elaborados para definição da espessura do SAC. | 60 |
| Figura 24: Perfil esquemático A-B paralelo a linha de costa representando espessura do SAC na PCRS. | 61 |
| Figura 25: Perfis geológico esquemático, perpendicular a linha de costa, representando a espessura do SAC na região norte (A), central (B) e sul (C). | 62 |
| Figura 26: Perfis litológicos e geofísicos representativos da região, exemplificando a ocorrência das unidades hidroestratigráficas identificadas. | 64 |
| Figura 27: Bloco diagrama esquemático do modelo conceitual gerado para a porção A da área, mostrando espessuras e distribuição das unidades hidroestratigráficas identificadas. | 65 |
| Figura 28: Bloco diagrama esquemático do modelo conceitual gerado para a porção B da área, mostrando espessuras e distribuição das unidades hidroestratigráficas identificadas. | 66 |
| Figura 29: Diagramas de caixa com os valores de resistividade elétrica, porosidade efetiva e sais totais dissolvidos para cada unidade hidroestratigráfica. | 67 |
| Figura 30: Diagramas com os valores das principais características hidrodinâmicas das unidades hidroestratigráficas. | 70 |
| Figura 31: Diagramas de caixa mostrando a distribuição dos valores dos parâmetros pH e Condutividade elétrica. | 72 |
| Figura 32: Diagramas de caixa mostrando a distribuição dos valores dos parâmetros Sólidos Totais Dissolvidos e Alcalinidade das unidades hidroestratigráficas da região norte. | 73 |
| Figura 33: Diagramas de caixa mostrando as concentrações dos principais íons constituintes das águas subterrâneas da região norte. | 74 |
| Figura 34: Relação entre $\text{Na}^+ \times \text{Cl}^-$ e $\text{Na}^+ \times \text{HCO}_3^-$ | 75 |
| Figura 35: Diagrama de Piper das águas subterrâneas na região norte da PCRS. | 77 |

| | |
|---|----|
| Figura 36: Gráfico de dispersão Biplot representando amostras das unidades hidroestratigráficas do SAC na região norte. | 78 |
| Figura 37: Diagramas de Gibbs, mostrando os principais mecanismos que controlam a composição da água subterrânea na região norte. | 79 |
| Figura 38: Gráficos das das razões $(\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+) / (\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+)$ e $(\text{Mg}/\text{Na}^+) / (\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+)$ | 80 |
| Figura 39: Relação entre $(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}-\text{SO}_4^{2-}-\text{HCO}_3^-)$ versus $(\text{Na}^+ - \text{Cl}^-)$ representando amostras das unidades hidroestratigráficas do SAC na região norte. | 80 |
| Figura 40: Delimitação da região central interna e externa da PCRS, com a localização dos perfis hidroestratigráficos apresentados..... | 81 |
| Figura 41: Perfil A-A' (paralelo a linha de costa) mostrando a distribuição das unidades hidroestratigráficas (UH) identificadas e os perfis de Raios Gama (RG). | 82 |
| Figura 42: Perfil b-b' (transversal a linha de costa) mostrando a distribuição das unidades hidroestratigráficas (UH) identificadas e os perfis de Raios Gama (RG). | 83 |
| Figura 43: Perfil c-c' (transversal a linha de costa) mostrando a distribuição das unidades hidroestratigráficas (UH) identificadas e os perfis de Raios Gama (RG). | 84 |
| Figura 44: Perfil d-d' (transversal a linha de costa) mostrando a distribuição das unidades hidroestratigráficas (UH) identificadas e os perfis de Raios Gama (RG). | 85 |
| Figura 45: Diagramas de caixa com os valores de resistividade elétrica, porosidade efetiva e sais totais dissolvidos para cada unidade hidroestratigráfica..... | 86 |
| Figura 46: Diagramas com os valores das principais características hidrodinâmicas das unidades hidroestratigráficas na região central da PCRS..... | 90 |
| Figura 47: Diagramas de caixa mostrando a distribuição dos valores dos parâmetros pH e Condutividade elétrica. | 93 |
| Figura 48: Diagramas de caixa com a concentração dos principais íons em peso equivalente (meq/L) para as UH-1, UH-2 e UH-3 livre e confinada. | 94 |
| Figura 49: Diagramas de caixa com a concentração dos principais íons em peso equivalente (meq/L) para a UH-5..... | 94 |
| Figura 50: Relação entre cátions $\text{Ca}^{2+} \times \text{Na}^+$ e ânions $\text{Cl}^- \times \text{HCO}_3^-$ nas águas subterrâneas das UH. | 95 |
| Figura 51: Relação entre $\text{Na}^+ \times \text{Cl}^-$ e $\text{Na}^+ \times \text{HCO}_3^-$ | 95 |
| Figura 52: Diagrama de Piper das águas subterrâneas na região central da PCRS. | 98 |

| | |
|---|-----|
| Figura 53: Gráfico de dispersão Biplot representando amostras das unidades hidroestratigráficas do SAC na região norte. | 100 |
| Figura 54: Diagramas de Gibbs, mostrando os principais mecanismos que controlam a composição da água subterrânea. | 100 |
| Figura 55: Gráficos das das razões $(\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+) / (\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+)$ e $(\text{Mg}/\text{Na}^+) / (\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+)$ | 101 |
| Figura 56: Relação entre $(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}-\text{SO}_4^{2-}-\text{HCO}_3^-)$ versus $(\text{Na}^+ - \text{Cl}^-)$ representando amostras das unidades hidroestratigráficas do SAC na região central. | 102 |
| Figura 57: Delimitação da região Sul da PCRS e dos perfis elaborados. | 103 |
| Figura 58: Perfil a-a', transversal a linha de costa com direção NW-SE, exemplificando a ocorrência das unidades hidroestratigráficas identificadas. | 104 |
| Figura 59: seções mostrando a espessura e distribuição das unidades hidroestratigráficas identificadas na região sul da PCRS. | 105 |
| Figura 60: Perfil b-b', transversal a linha de costa com direção NW-SE, exemplificando a ocorrência das unidades hidroestratigráficas identificadas. | 106 |
| Figura 61: Diagramas de caixa com os valores de resistividade elétrica, porosidade total e efetiva e sais totais dissolvidos para cada unidade hidroestratigráfica da região sul da PCRS. | 106 |
| Figura 62: Diagramas com os valores das principais características hidrodinâmicas das unidades hidroestratigráficas. | 108 |
| Figura 63: Diagramas de caixa mostrando a distribuição dos valores dos parâmetros pH, Condutividade elétrica (CE), Alcalinidade e Sólidos Totais Dissolvidos (STD). | 110 |
| Figura 64: Diagramas de caixa com a concentração dos principais íons em peso equivalente (meq/L). | 111 |
| Figura 65: Relação entre $\text{Na}^+ \times \text{Cl}^-$ e $\text{Na}^+ \times \text{HCO}_3^-$ | 111 |
| Figura 66: Diagrama de Piper das águas subterrâneas na região sul da PCRS. | 113 |
| Figura 67: Gráfico de dispersão Biplot representando amostras das unidades hidroestratigráficas do SAC na região sul. | 115 |
| Figura 68: Diagramas de Gibbs, mostrando os principais mecanismos que controlam a composição da água subterrânea. | 115 |
| Figura 69: Gráficos das das razões $(\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+) / (\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+)$ e $(\text{Mg}/\text{Na}^+) / (\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+)$ | 116 |

| | |
|--|-----|
| Figura 70: Relação entre $(Ca^{2+}+Mg^{2+}-SO_4^{2-}-HCO_3^-)$ versus $(Na^+ - Cl^-)$ representando amostras das unidades hidroestratigráficas do SAC na região sul. | 116 |
| Figura 71: Gráfico de correlação entre δ^2H e $\delta^{18}O$ de amostras de águas meteóricas da rede GNIP – POA (RS). O gráfico de dispersão linear contém a Linha Meteórica Local (LMWL) ($\delta^2H=7.67*\delta^{18}O + 10.59$) e Global (GMWL) ($\delta^2H=8*\delta^{18}O + 10$). | 117 |
| Figura 72 : Representação variação de $\delta^{18}O$ em relação a precipitação e temperatura. | 118 |
| Figura 73: Box-Plot representando a composição isotópica sazonal de Porto Alegre nas diferentes estações do ano. Representação dos valores médios de $\delta^{18}O$ de δ^2H | 119 |
| Figura 74: Localização dos poços da RIMAS, que contam com dados de análises isotópicas de $\delta^{18}O$ e δ^2H | 119 |
| Figura 75: Gráfico de correlação entre valores médios de δ^2H e $\delta^{18}O$ para amostras de águas meteóricas e subterrâneas. | 121 |
| Figura 76: Valores de $\delta^{18}O$ (representados pelos pontos coloridos) para as diferentes profundidades amostradas em cada poço (representadas pelas barras). | 122 |
| Figura 77: Gráfico de correlação entre δ^2H e $\delta^{18}O$ das amostras de água subterrânea contendo a Linha Meteórica Local (LMWL) e Global (GMWL). | 123 |
| Figura 78: Modelo conceitual do SAC na PCRS mostrando a distribuição e as principais características das unidades hidroestratigráficas identificadas. | 126 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1: Resumo dos Principais trabalhos descritos para a Bacia de Pelotas, modificado de Rosa (2012)..... | 27 |
| Tabela 2: Distribuição, por município, dos poços analisados e selecionados para elaboração do banco de dados. | 50 |
| Tabela 3: Resumo estatístico onde N=número de amostras, Min=Valor mínimo, Max=Valor máximo e Med=Mediana. | 69 |
| Tabela 4: Resumo estatístico onde N=número de amostras, Min=Valor mínimo, Max=Valor máximo e Med=Mediana. | 71 |
| Tabela 5: Correlação entre os principais parâmetros físico-químicos da UH-1 na região norte. | 75 |
| Tabela 6: Correlação entre os principais parâmetros físico-químicos da UH-2 na região norte. | 75 |
| Tabela 7: Correlação entre os principais parâmetros físico-químicos da UH-3 na região norte. | 76 |
| Tabela 8: Correlação entre os principais parâmetros físico-químicos da UH-4 na região norte. | 76 |
| Tabela 9: Variância total das águas do SAC na região norte. | 77 |
| Tabela 10: Matriz de Componentes das águas do SAC na região norte. | 78 |
| Tabela 11: Resumo estatístico com dados de Vazão Específica (Q/s), Transmissividade (T), Vazão (Q) e Nível Estático (NE) para as unidades hidroestratigráficas da PCRS na região central. | 89 |
| Tabela 12: Resumo estatístico com dados de pH, Condutividade elétrica, Sólidos totais dissolvidos e Alcalinidade. | 92 |
| Tabela 13: Correlação entre os principais parâmetros físico-químicos da UH-1 na região central. | 96 |
| Tabela 14: Correlação entre os principais parâmetros físico-químicos da UH-2 na região central. | 96 |
| Tabela 15: Correlação entre os principais parâmetros físico-químicos da UH-03 (livre) na região central..... | 97 |
| Tabela 16: Correlação entre os principais parâmetros físico-químicos da UH-03 (confinada) na região central. | 97 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 17: Correlação entre os principais parâmetros físico-químicos da UH-05 na região central. | 97 |
| Tabela 18: Variância total das águas do SAC na região central. | 98 |
| Tabela 19: Matriz de Componentes das águas do SAC na região central. | 99 |
| Tabela 20: Resumo estatístico com os dados e valores extraídos para cada unidade hidroestratigráfica. | 107 |
| Tabela 21: Resumo estatístico com dados de pH, Condutividade elétrica, Sólidos totais dissolvidos e Alcalinidade. | 109 |
| Tabela 22: : Correlação entre os principais parâmetros físico-químicos da UH-1 na região sul. | 112 |
| Tabela 23: Correlação entre os principais parâmetros físico-químicos da UH-2 na região sul. | 112 |
| Tabela 24: Variância total das águas do SAC na região sul. | 114 |
| Tabela 25: Matriz de Componentes das águas do SAC na região sul. | 114 |
| Tabela 26: Dados isotópicos dos poços da RIMAS localizados nas diferentes regiões do SAC. Erro de $\pm 0,09$ para $\delta^{18}\text{O}$ e $0,9$ para $\delta^2\text{H}$ | 120 |
| Tabela 27: Valores máximos e mínimos de oxigênio e deutério das UH-1, UH-2 e UH-3 confinada. | 121 |
| Tabela 28: Valores das medianas (expressos em meq/L) dos principais parâmetros avaliados, na forma de comparativo das UH nas diferentes regiões. | 125 |

SUMÁRIO

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 18 |
| 1.1 | Área de Estudo | 18 |
| 1.2 | Hipóteses e justificativas | 19 |
| 1.3 | Objetivos..... | 20 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 21 |
| 2.1 | Sistemas Aquíferos e Unidades Hidroestratigráficas | 21 |
| 2.2 | Sistemas Aquíferos Costeiros..... | 22 |
| 2.3 | Contexto Geológico..... | 26 |
| 2.3.1 | Bacia de Pelotas | 26 |
| 2.3.2 | Planície Costeira..... | 29 |
| 2.4 | Contexto Hidrogeológico | 34 |
| 2.5 | Utilização da Geofísica na Hidrogeologia..... | 39 |
| 2.5.1 | Eletrorresistividade..... | 40 |
| 2.5.2 | Perfilagem Geofísica de Poços..... | 41 |
| 2.6 | Composição Química e Isotópica da Água Subterrânea | 42 |
| 2.6.1 | Hidroquímica da Água Subterrânea | 42 |
| 2.6.2 | Isótopos Ambientais na Água Subterrânea | 44 |
| 3 | METODOLOGIA..... | 47 |
| 3.1 | Elaboração de Banco de Dados de Sondagens Estratigráficas | 47 |
| 3.2 | Elaboração de Banco de Dados de Poços Tubulares..... | 48 |
| 3.3 | Identificação do Arcabouço Geológico do Sistema Aquífero Costeiro | 50 |
| 3.4 | Identificação das Unidades Hidroestratigráficas | 50 |
| 3.5 | Caracterização Hidrodinâmica das Unidades Hidroestratigráficas | 52 |
| 3.6 | Caracterização Hidroquímica das Unidades Hidroestratigráficas | 53 |
| 3.7 | Caracterização Isotópica do SAC..... | 54 |
| 3.8 | Elaboração de Modelo Conceitual..... | 56 |
| 4 | RESULTADOS | 57 |
| 4.1 | Considerações gerais | 57 |
| 4.2 | O Arcabouço Geológico do Sistema Aquífero Costeiro no RS | 60 |
| 4.3 | O Sistema Aquífero Costeiro na Região Norte da PCRS..... | 63 |
| 4.3.1 | Unidades Hidroestratigráficas | 63 |
| 4.3.2 | Unidades Hidroestratigráficas do SAC na região Norte | 66 |
| 4.3.3 | Caracterização Hidrodinâmica do SAC na região Norte | 69 |
| 4.3.4 | Caracterização Hidroquímica do SAC na região Norte | 71 |
| 4.4 | O Sistema Aquífero Costeiro na Região Central da PCRS | 81 |
| 4.4.1 | Unidades Hidroestratigráficas | 81 |
| 4.4.2 | Unidades Hidroestratigráficas do SAC na região Central..... | 86 |
| 4.4.3 | Caracterização Hidrodinâmica do SAC na região Central..... | 89 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 4.4.4 | Caracterização Hidroquímica do SAC na região central | 91 |
| 4.5 | O Sistema Aquífero Costeiro na Região Sul da PCRS..... | 102 |
| 4.5.1 | Unidades Hidroestratigráficas | 102 |
| 4.5.2 | Unidades Hidroestratigráficas do SAC na região Sul | 106 |
| 4.5.3 | Caracterização Hidrodinâmica do SAC na região Sul | 107 |
| 4.5.4 | Caracterização Hidroquímica do SAC na região Sul..... | 108 |
| 5 | CARACTERIZAÇÃO ISOTÓPICA DO SAC | 117 |
| 5.1 | Análise da chuva histórica de Porto Alegre | 117 |
| 5.2 | Análise Isotópica das Águas Subterrâneas do SAC | 119 |
| 6 | MODELO CONCEITUAL DO SAC | 124 |
| 6.1 | Aspectos gerais | 124 |
| 6.2 | A Unidade Hidroestratigráfica 1 no SAC..... | 127 |
| 6.3 | A Unidade Hidroestratigráfica 2 no SAC..... | 128 |
| 6.4 | A Unidade Hidroestratigráfica 3 Livre no SAC | 130 |
| 6.5 | A Unidade Hidroestratigráfica 3 Confinada no SAC | 131 |
| 6.6 | A Unidade Hidroestratigráfica 4 no SAC..... | 133 |
| 6.7 | A Unidade Hidroestratigráfica 5 no SAC..... | 134 |
| 7 | CONCLUSÕES | 135 |
| 8 | RECOMENDAÇÕES..... | 137 |
| 9 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 139 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 Área de Estudo

Esse estudo foi desenvolvido na região da Planície Costeira do Estado do Rio Grande do Sul (PCRS), a qual ocupa toda a extensão da faixa litorânea entre os municípios de Torres e Chuí, totalizando aproximadamente 620km de extensão e aproximadamente 33.000Km² de área (Figura 1).

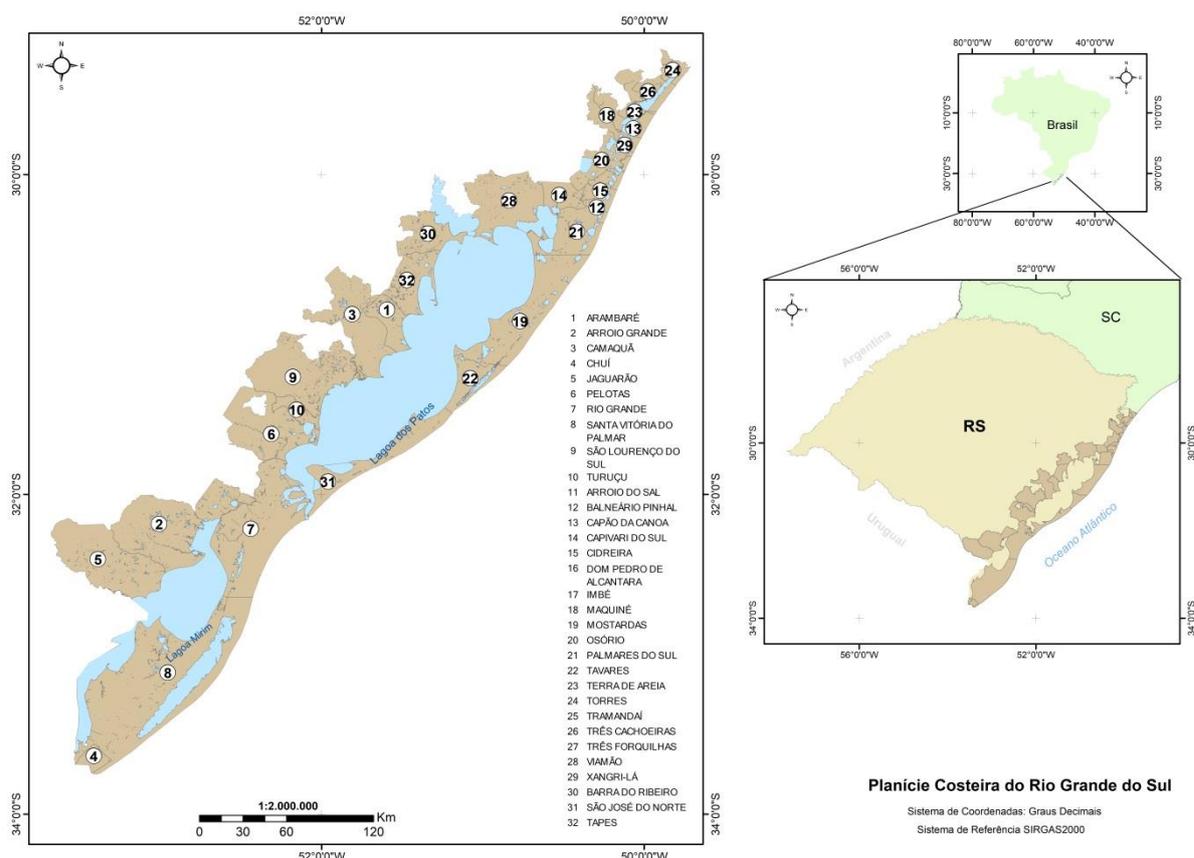


Figura 1: Localização da Planície Costeira do Estado do Rio Grande do Sul.

A PCRS Consiste em uma extensa planície com um vasto complexo de lagoas e dunas, sendo composto por 32 municípios, divididos em três regiões: Litoral Norte, composto por 11 municípios; Litoral Médio, composto por 15 municípios e Litoral Sul, composto por 6 municípios.

Segundo o Mapa Geológico do Rio Grande do Sul (CPRM, 2005) na região da PCRS ocorre o Sistema Aquífero Quaternário Costeiro (SAQC), o qual representa uma importante reserva de água subterrânea do Estado. É caracterizado por aquíferos que estão associados a camadas de sedimentos arenosos (areia grossa, média, fina e muito fina), intercaladas com

camadas de sedimentos finos (argilas e siltes) formados em diferentes ambientes de sedimentação (marinho, eólico, praial e lagunar).

1.2 Hipóteses e justificativas

As zonas costeiras representam as regiões com maior concentração populacional do planeta, gerando intensa demanda pelos recursos hídricos em geral. Apesar de existirem importantes reservas de água subterrânea nessas regiões e de geralmente os aquíferos apresentarem altas produtividades, é de fundamental importância seu gerenciamento a fim de se alcançar sua sustentabilidade. Para isso é necessário buscar conhecimento aprofundado das características hidrogeológicas do ambiente em que o recurso hídrico se encontra, através do desenvolvimento de estudos e projetos que visem identificar e caracterizar o arcabouço hidrogeológico destas regiões.

Neste contexto, no Brasil o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro (PNGC II), além de buscar o ordenamento da ocupação dos espaços litorâneos, atenta ao uso sustentável dos recursos costeiros, dentre eles as reservas de água subterrânea (CIRM, 1990).

Na PCRS o fornecimento de água potável nos municípios é de responsabilidade de companhias de abastecimento que utilizam as águas das lagoas através de tratamento simplificado e poços tubulares de grandes vazões. A água subterrânea é especialmente utilizada fora dos centros urbanos para uso residencial e para irrigação. Nesses locais são construídos poços do tipo cacimba e ponteira, os quais geralmente são perfurados sem controle técnico e sanitário e dividem espaço com fossas sépticas construídas fora das especificações técnicas.

Por falta de conhecimento da compartimentação e distribuição das unidades hidroestratigráficas que formam o sistema aquífero, muitos poços são perfurados e acabam captando águas de unidades aquíferas que apresentam problemas de qualidade, provocados pela salinização ou ocorrência de concentrações minerais elevadas. Em função disso, esses poços acabam sendo abandonados transformando-se em potenciais vetores de contaminação.

Atualmente o sistema é considerado como quaternário (MACHADO & FREITAS, 2005), estando associado às camadas de sedimentos depositadas quando do desenvolvimento dos sistemas laguna-barreira I, II, III e IV (VILLWOCK; TOMAZELLI, 1995). Esses depósitos de sedimentos ocorrem em profundidades variáveis, porém há outras camadas de sedimentos mais antigas (terciárias) abaixo, e que são unidades aquíferas captadas pelos poços tubulares existentes na região.

A hipótese deste estudo é que a ocorrência dessas diferentes camadas de sedimentos de idades quaternárias e terciárias formam o Sistema Aquífero Costeiro (SAC), o qual está estruturado em diferentes unidades hidroestratigráficas. Sendo assim, a sistematização dos dados geológicos, hidrogeológicos, hidroquímicos e isotópicos permite a discretização regional em unidades aquíferas e o desenvolvimento de modelo conceitual para o SAC.

Em função do exposto a realização desse estudo é justificada, pois com o desenvolvimento do projeto foi possível determinar, para diferentes regiões da Planície Costeira, quais as principais unidades hidroestratigráficas, suas características hidrogeológicas e quais as composições das águas subterrâneas associadas a essas unidades.

A identificação das principais unidades hidroestratigráficas bem como suas características hidrodinâmicas e hidroquímicas permite compreender melhor a compartimentação do SAC. Este incremento no conhecimento do sistema aquífero servirá como subsídio para o desenvolvimento de projetos para melhor gestão dos recursos hídricos nessa região.

1.3 Objetivos

Este trabalho tem por objetivo principal analisar a compartimentação hidroestratigráfica do Sistema Aquífero Costeiro, procurando identificar e caracterizar as suas diferentes unidades hidroestratigráficas.

Os objetivos específicos são:

- Identificar a espessura do pacote sedimentar que forma o SAC;
- Identificar as unidades hidroestratigráficas que formam o SAC;
- Avaliar as principais características hidrogeológicas e hidrodinâmicas das unidades hidroestratigráficas;
- Determinar as principais características e padrões hidroquímicos e isotópicos das unidades hidroestratigráficas;
- Elaborar modelo conceitual para o SAC.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção tem por objetivo fundamentar o estudo nos principais trabalhos científicos sobre geologia e hidrogeologia desenvolvidos na região, bem como apresentar os principais conceitos utilizados para aplicação das metodologias e na discussão dos resultados.

2.1 Sistemas Aquíferos e Unidades Hidroestratigráficas

Ambientes deposicionais formados por sedimentos inconsolidados tais como areias, argilas e cascalhos representam o tipo mais comum de aquíferos, podendo ter origens eólica, deltaica, fluvioaluvionar, lagunar ou marinha. A identificação e caracterização das principais unidades aquíferas e confinantes que formam os sistemas aquíferos, consiste em uma etapa fundamental da pesquisa hidrogeológica, dividindo-se o arcabouço litoestratigráfico em função de suas características hidrogeológicas (MACHADO & FREITAS, 2005).

Apesar da nomenclatura e representação utilizadas para a caracterização hidrogeológica serem objetos de diversos estudos ao longo do último século (MEINZER, 1923; MAXEY, 1964; POLAND; LOFGREN; RILEY, 1972; SEABER, 1988; STRUCKMEIER; MARGAT, 1995), não há padronização clara, sendo que diferentes autores utilizam os mesmos termos para representar feições diferentes.

Para realização do presente estudo optou-se por utilizar a classificação proposta por DINIZ *et al.* (2014) e descrita no “Manual de Cartografia Hidrogeológica” lançado pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM). Nesse manual é proposta uma padronização de taxonomia hidrogeológica mediante estabelecimento de unidades hidrogeológicas de referência, a fim de estabelecer a elaboração homogênea e sistemática de mapas hidrogeológicos (Figura 2).

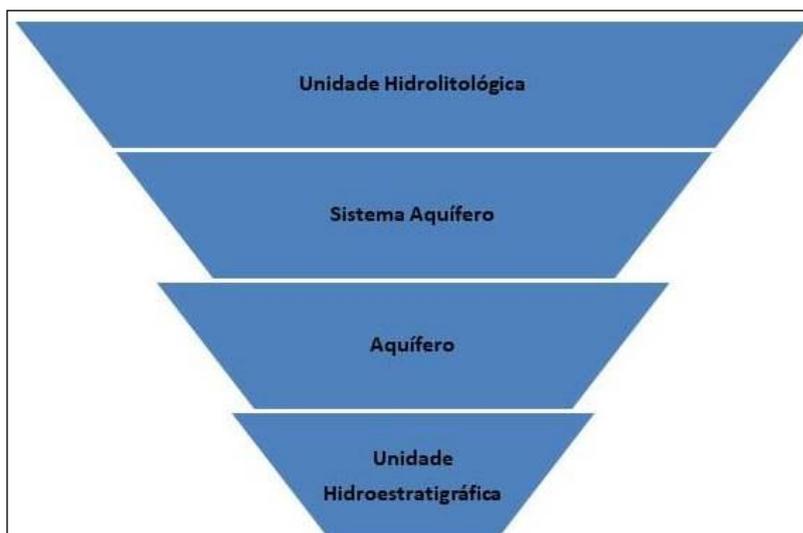


Figura 2: Taxonomia Hidrogeológica proposta em Diniz *et al.* (2014).

O conceito de Unidade Hidroestratigráfica é proposto como sendo a menor classe hierárquica, definida como “formações geológicas ou parte delas que armazenam e transmitem águas subterrâneas de forma semelhante e com produtividades da mesma ordem de grandeza”. Esta definição parte do entendimento que os limites das unidades hidroestratigráficas não necessariamente correspondem aos limites das unidades estratigráficas, pois as formações geológicas apresentam variações internas, em diferentes escalas, que alteram suas características hidrogeológicas.

A classificação de Aquíferos segue os princípios clássicos, sendo representado pela unidade estratigráfica e agregando características hidrodinâmicas gerais.

A terceira classe taxonômica são os Sistemas Aquíferos, definido com sendo “a reunião de dois ou mais aquíferos, criando um domínio espacial limitado em superfície e em profundidade, relacionados ou não entre si, mas que constituem uma unidade prática para a investigação ou exploração”.

A mais ampla classe taxonômica é a Unidade Hidrolitológica, caracterizada por não apresentar limites concretos, representando “grupos de unidades geológicas que armazenam e transmitem águas subterrâneas de forma semelhante”.

2.2 Sistemas Aquíferos Costeiros

Os Sistemas Aquíferos Costeiros estão localizados em regiões litorâneas, muitas delas densamente povoadas, e possuem grande importância, pois as águas subterrâneas desses sistemas são utilizadas para diferentes fins, como o abastecimento público e/ou doméstico, irrigação e indústria. São representados por aquíferos livres, confinados e semi-confinados

formados por sedimentos inconsolidados, característicos de ambientes deposicionais clásticos costeiros com formação durante os períodos terciário e quaternário. Em grande parte estão localizados em regiões estuarinas e geralmente apresentam conexão hidráulica com o mar (Figura 3 e Figura 4). Além dos aquíferos livres também ocorrem aquíferos fraturados formados por rochas cristalinas, estes porém em menor escala e com menor relevância hidrogeológica (FREEZE & CHERRY 2017).



Figura 3: Modelo hidrogeológico conceitual de um sistema aquífero costeiro. Modificado de Barlow, 2003.

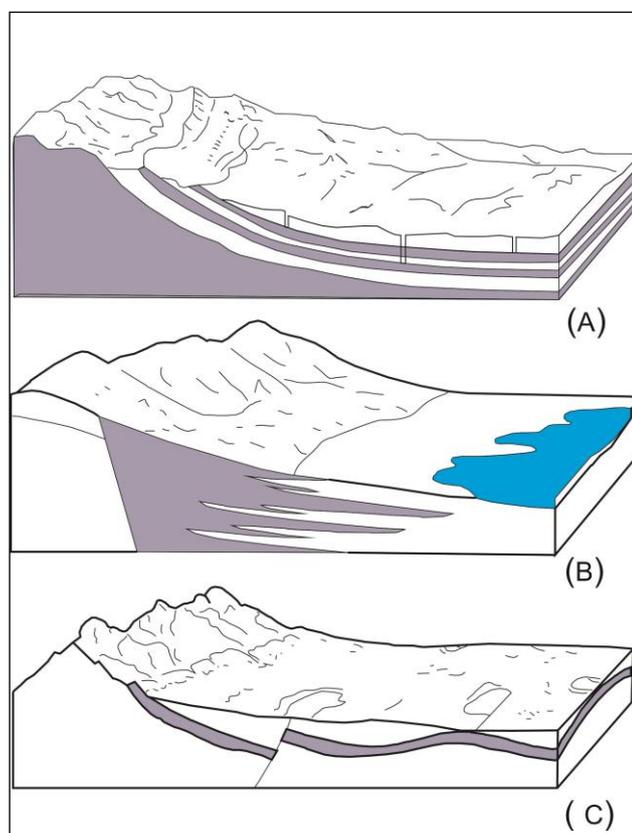


Figura 4: Modelos hidrogeológicos mostrando a influência da estratigrafia nos aquíferos costeiros regionais, modificado de FREEZE & CHERRY (2017).

Estudos sobre a hidrogeologia de sistemas aquíferos costeiros são amplamente desenvolvidos, visto sua grande importância tanto para uso de suas águas como para preservação dos ecossistemas costeiros. A grande maioria desses estudos são relacionados a interface água salgada/água doce, com mapeamento do comportamento da cunha salina em diferentes profundidades e ambientes geológicos utilizando-se de métodos hidrogeoquímicos, geofísicos e isotópicos (BARLOW, 2003)

Diversos autores têm apresentado suas definições e considerações para os Sistemas Aquíferos Costeiros. Para FITTS (2015) nas planícies costeiras há ocorrência de importantes aquíferos que estão associados a depósitos de sedimentos inconsolidados. Em geral, nessas regiões há ocorrência de uma alternância de unidades aquíferas que estão associadas a depósitos de sedimentos arenosos, intercaladas com aquítaros que estão associados a sedimentos mais finos (siltes e argilas). As camadas de sedimentos finos podem apresentar espessuras variadas, ter continuidade ou se apresentarem na forma de lentes. Geralmente correspondem ao aquítaros e aquícludes, separando camadas aquíferas.

Um exemplo de um sistema aquífero costeiro é apresentado por FITTS (2015), que corresponde ao sistema da planície costeira de Nova Jersey (Figura 5). Nesse, as camadas aquíferas são associadas às camadas de areia (em branco) que estão intercaladas com camadas de silte e argila (em cinza). As camadas mais finas são aquítaros e/ou aquícludes, dividindo os aquíferos em livres, semi-confinados e confinados. As recargas ocorrem nas áreas superficiais, onde as camadas de areia afloram. A descarga dos aquíferos ocorre ao longo dos cursos de água e na direção do oceano.

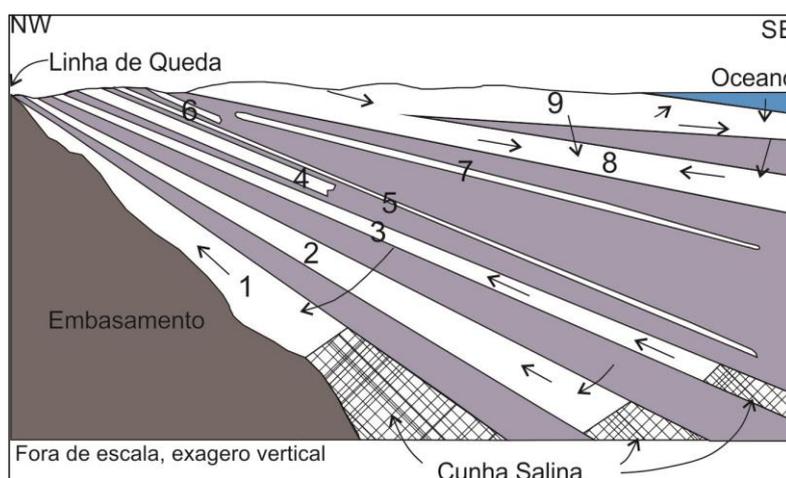


Figura 5: Sistema aquífero costeiro correspondente a planície costeira de Nova Jersey, modificado de FITTS (2015). A numeração indica as diferentes unidades aquíferas identificadas.

ERSKINE & FISHER (2001) em estudo na costa da Califórnia, colocam que o sistema aquífero presente é caracterizado por unidades aquíferas associadas a camadas de sedimentos eólicos, aluviais e fluviais que são separados por camadas de sedimentos finos (argilas). Essas camadas podem ou não apresentar continuidade, apresentando assim um papel de confinamento ou semi-confinamento das unidades aquíferas.

Para CABRAL (2004) os Sistemas Aquíferos Costeiros são complexos e há necessidade de se realizar estudos voltados para avaliação da sustentabilidade desses aquíferos. O autor comenta que o uso excessivo de água subterrânea em regiões costeiras acaba por dar origem a problemas de super-exploração, ingresso da cunha salina e alteração da qualidade da água subterrânea.

GIAMBASTIANI *et al.* (2013) avaliou um sistema aquífero associado a depósitos de sedimentos depositados durante a evolução do Sistema Deltaíco do Pó, na Itália. Nessa região os aquíferos estão associados a camadas arenosas que ocorrem intercaladas com camadas de sedimentos finos (silte e argila) e orgânicos (turfa). As camadas de sedimentos finos tem um papel de semi-confinamento das camadas aquíferas. A condutividade hidráulica é variável em cada ponto, dependendo da granulometria dos sedimentos que formam as diferentes camadas.

MURGULET & TICK (2013) em levantamento no Condado de Baldwin, Alabama, apresentam o sistema aquífero caracterizado por três unidades (A1, A2 e A3). O aquífero A2 pode ser separado das outras unidades em função da ocorrência de camadas de argila. Essas camadas podem ter continuidade ou então ocorrem na forma de lentes.

CRISTO *et al.* (2015) apresentam um modelo conceitual do aquífero de Itaipuaçu, no Rio de Janeiro, o qual trás um modelo numérico para avaliar a recarga, fluxo e interações com corpos aquosos superficiais. Esse sistema aquífero está associado a camadas de sedimentos costeiros e aluvionares, constituídos por areias quartozas e camadas de siltes e argilas intercaladas. O modelo do sistema foi elaborado contendo três unidades aquíferas que estão associadas a camadas de areias médias a grossas, separadas por camadas delgadas de argila. O aquífero superior e inferior possuem água doce, enquanto o aquífero intermediário possui água salobra.

MAHMUD *et al.* (2017) em estudo da Planície Deltaica de Ganges, demonstraram que a relação entre geomorfologia, hidroestratigrafia e qualidade da água subterrânea tem uma grande importância para a gestão dos recursos subterrâneos.

GOTTSCHALK *et al.* (2018) mostram as propriedades hidráulicas e a conectividade entre as unidades aquíferas que formam o sistema aquífero costeiro de Valley Salinas, na

Califórnia. Levantamentos geofísicos, de dados de poços e da qualidade da água, permitiram identificar que a região é caracterizada por um aquífero heterogêneo que está associado a camadas de areias que ocorrem intercaladas com camadas de sedimentos finos (argilas e siltes). Esta heterogeneidade tem influência no fluxo da água, na qualidade e no grau de exploração desse aquífero.

Em função do exposto até aqui se evidencia que os ambientes costeiros são formados por sistemas aquíferos heterogêneos, geralmente caracterizados pela ocorrência de diversas unidades hidroestratigráficas. Portanto é importante o desenvolvimento de estudos que visem a identificação e caracterização desses sistemas, desde a escala regional até escala local.

2.3 Contexto Geológico

A área de estudo compreende a Planície Costeira do Rio Grande do Sul, representada por sedimentos que constituem a parte emersa da Bacia de Pelotas.

2.3.1 Bacia de Pelotas

Originalmente definida por GHIGNONE (1960), a Bacia de Pelotas é localizada no extremo sul da Margem Continental Brasileira, e limitada ao norte pela Bacia de Santos. É caracterizada como uma bacia marginal subsidente preenchida por sequências predominantemente clásticas continentais desde o final do período Jurássico até o Quaternário (Figura 6). Sua evolução é relacionada ao rifteamento gerado pela abertura do Atlântico Sul com a maior espessura de sedimentos podendo ultrapassar 10.000 metros em seu depocentro (FONTANA 1996).

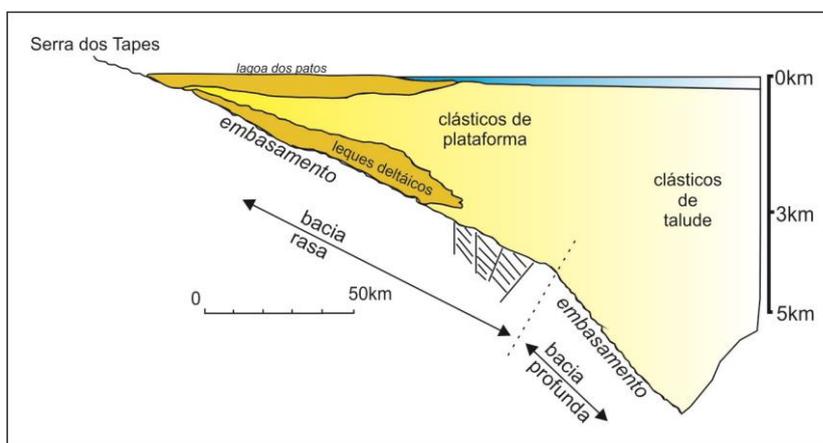


Figura 6: Seção geológica esquemática da Bacia de Pelotas, modificada de Villwock, 1984.

Um resumo do conhecimento estratigráfico da Bacia de Pelotas foi apresentado por ROSA (2012). Na Tabela 1 a autora resume os principais trabalhos definidos em diferentes escalas temporais e espaciais.

Tabela 1: Resumo dos Principais trabalhos descritos para a Bacia de Pelotas, modificado de Rosa (2012).

| Intervalo de Tempo decorrido | Tipos de dados | Resultados | Principais Referências Citadas |
|-------------------------------------|--|--|--|
| 130 Ma | Sísmicas, Sondagens | Grandes fases de preenchimento e evolução da bacia | Fontana (1997), Abreu (1998) e Bueno <i>et al.</i> (2007) |
| 130 Ma | Sísmicas, Sondagens | Quatro sequencias compostas 12 conjuntos de sequências, 56 sequências deposicionais | Abreu (1998), Neal & Abreu (2009), Abreu 2010 |
| 325 ka | Geomorfologia, sensoriamento remoto, afloramentos, sondagens, georradar (raramente com bons resultados) | Quatro sistemas do tipo laguna-barreira (parte de sequências de alta frequência) | Villwock (1984), Villwock & Tomazelli (1995), Tomazelli & Villwock (2000), Lopes <i>et al.</i> (2009 e 2011) |
| 20 ka | Geomorfologia, sensoriamento remoto, afloramentos, sondagens, georradar | Evolução da barreira holocênica (parte da sequencia de alta frequência mais jovem) | Tomazelli & Villwock (1989), Dillenburg <i>et al.</i> (2000 e 2009), Tomazelli <i>et al.</i> (2008a) Barbosa <i>et al.</i> (2009a,b,2010,2011) |
| 300, 60 e 22 anos | Geomorfologia, sensoriamento remoto incluindo series históricas, afloramentos, sondagens, perfis praias, monitoramento da linha de costa (DGPS), maregráficos, climáticos e meteorológicos, etc. | Elevação do nível lagunar (Lagoa dos Patos - 300 anos), aumento da umidade em campos de dunas (60 anos), erosão da linha de costa (22 anos). | Toldo Jr. (1989), Toldo Jr. <i>et al.</i> (1999 e 2005), Ugri (2004), Tomazelli <i>et al.</i> (2008b) e Martinho (2008). |

Dentre as diferentes hierarquizações propostas, se optou neste trabalho por contextualizar as principais fases de preenchimento da Bacia de Pelotas de acordo com o trabalho de FONTANA (1996). O autor dividiu a evolução da bacia em três fases principais: Megassequência Rífte, Megassequência Transgressiva e Megassequência Regressiva.

A Megassequência Rífte (~140 a 115 Ma) é representada por siltitos e conglomerados contendo seixos de rochas metamórficas do embasamento e de vulcânicas básicas. Estes sedimentos foram assentados sobre as rochas vulcânicas e serviram como base para deposição das sequências eo-cretácias.

A Megassequência Transgressiva (~115 a 60 Ma), subdividida em cinco sequências deposicionais, é composta por sedimentos pelíticos marinhos representados por arenitos, margas e folhelhos depositados durante intensa subsidência da bacia.

A Megassequência Regressiva (~60 Ma a recente), subdividida em doze sequências deposicionais, marca a fase tectonicamente mais estável da bacia, com a formação de espessos pacotes de sedimentos marinhos com aporte detrítico substancial da margem continental.

A porção continental emersa da Bacia de Pelotas é representada pela Planície Costeira do Rio Grande do Sul. As porções central e sul estão assentadas diretamente sobre o embasamento cristalino, formado por rochas ígneas e metamórficas pré-cambrianas. Já a porção norte, recobre as rochas sedimentares e vulcânicas da Bacia do Paraná (Figura 7).

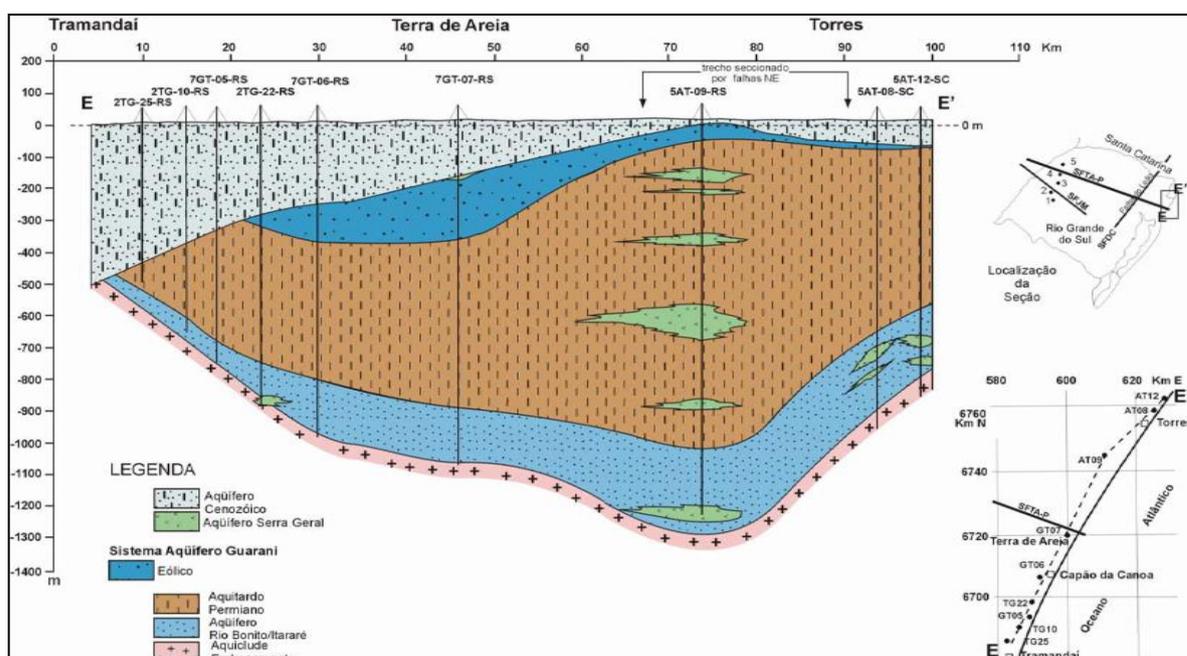


Figura 7: Seção geológica da porção norte da PCRS entre os municípios de Tramandaí e Torres, mostrando a espessura dos aquíferos cenozóicos. Fonte: Machado, 2005.

2.3.2 Planície Costeira

A província geomorfológica da planície costeira do Rio Grande do Sul foi definida por CARRARO *et al.* (1974), como a região litorânea do estado com uma extensão de 630 km e uma área aflorante de aproximadamente 33.000 km², representando a porção emersa da Bacia de Pelotas (Figura 8).

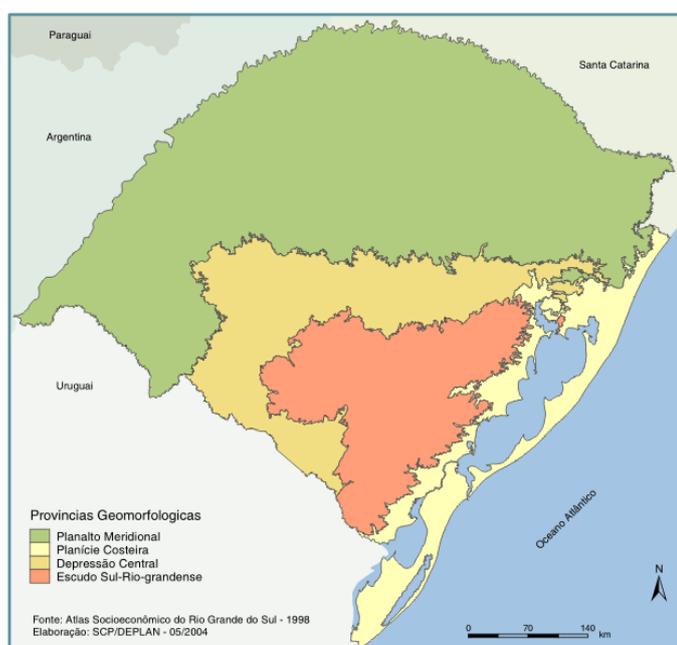


Figura 8: Mapa das províncias geomorfológicas do Rio Grande do Sul.

Desde o final do século XIX a geologia da Planície Costeira do Rio Grande do Sul (PCRS) vem sendo alvo de diversos estudos científicos. Revisões sobre os trabalhos geológicos desenvolvidos foram realizadas por diversos autores, com destaque para (VILLWOCK & TOMAZELLI, 1995; TOMAZELLI & VILLWOCK, 2000), e mais recentemente por ROSA (2012).

De acordo com VILLWOCK & TOMAZELLI (1995) o histórico do conhecimento sobre a geologia/geomorfologia da PCRS pode ser separado em duas fases. Uma fase antiga compreendida entre os anos de 1880 e 1950 dando ênfase principal nos aspectos geomorfológicos e litoestratigráficos, utilizando estudos realizados a partir das pesquisas para petróleo na Bacia de Pelotas pela empresa Petróleo Brasileiro S.A (Petrobrás). Uma segunda fase, chamada de fase moderna, onde se intensificaram os estudos desenvolvidos nas universidades, de modo especial a partir da criação do curso de geologia da UFRGS em 1957. A partir da década de 80 iniciaram-se estudos voltados a interpretação da gênese e dinâmica dos sedimentos da PCRS com abordagem da estratigrafia de seqüências.

Já a partir do ano 2000 se intensificaram os estudos sobre os depósitos sedimentares quaternários da PCRS. DILLENBURG *et al.* (2005) utilizaram dados estratigráficos e de datações por Carbono-14 para identificar a migração de barreiras transgressivas e regressivas ao longo da costa. Já Rosa (2012) utilizou geotecnologias (sensoriamento remoto, geoprocessamento e georadar) para interpretação das sequências deposicionais de alta frequência propondo um modelo de evolução paleogeográfica para os sedimentos quaternários da PCRS.

Os depósitos quaternários da PCRS foram formados pelo desenvolvimento de um sistema de leques aluviais e por quatro sistemas do tipo laguna-barreira (VILLWOCK & TOMAZELLI, 1996), sendo que cada sistema representa o pico de uma transgressão seguido por um evento regressivo (TOMAZELLI & VILLWOCK, 2000), (Figura 9).

Essa deposição pode ter sido controlada por acentuadas variações climáticas e oscilações glacio-eustáticas, sendo os três primeiros durante o Pleistoceno e o último durante o Holoceno (BARBOZA *et al.* 2008) (Figura 10).

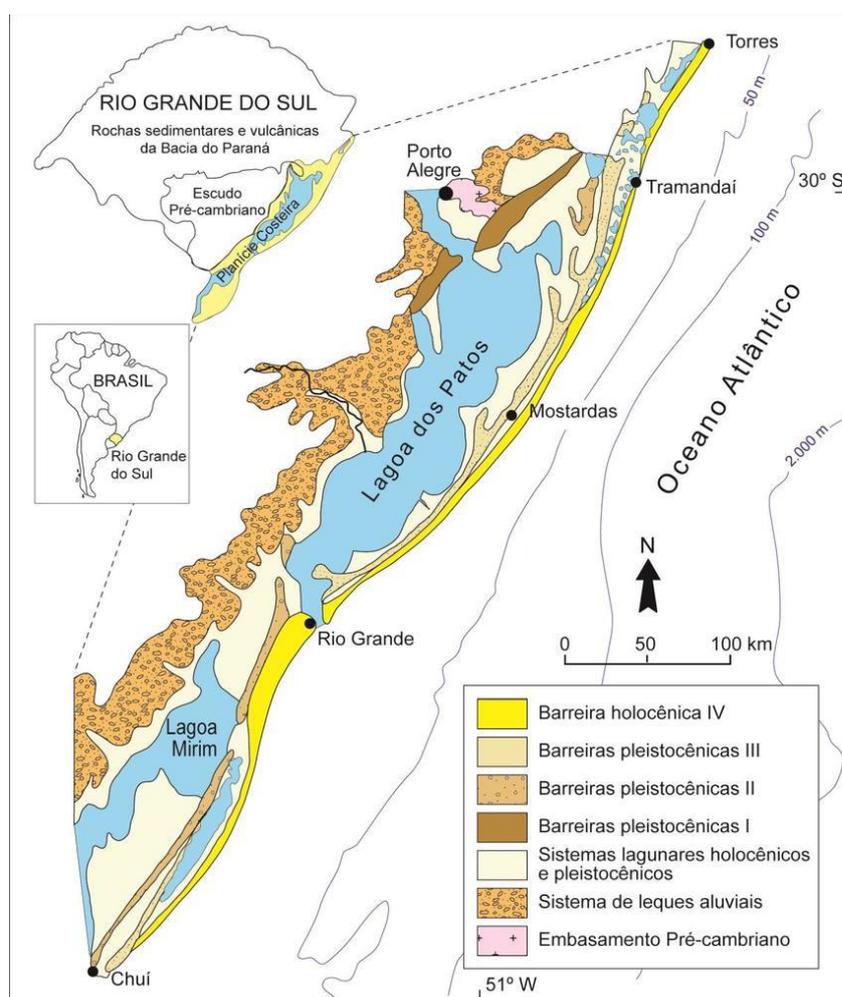


Figura 9: Mapa Geológico da PCRS, extraído de Tomazelli & Villwock (2000).

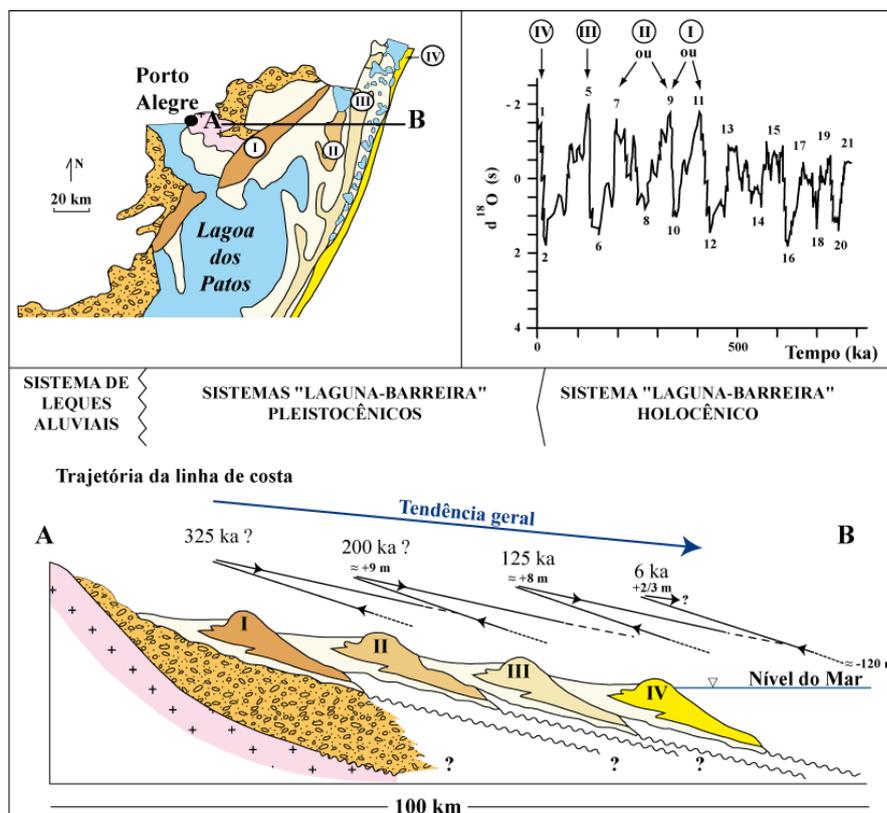


Figura 10: Perfil esquemático mostrando os sistemas deposicionais da PCRS (modificado por ROSA, 2012 de Tomazelli & Villwock, 2000).

Esses sistemas deposicionais foram assim descritos por TOMAZELLI & VILLWOCK (2000):

Os sistemas deposicionais do tipo leques aluviais desenvolveram-se, na porção norte, junto a escarpa do planalto da Serra Geral e nas porções central e sul ao longo do escudo pré-cambriano. Sua formação teve início no final do Terciário e perdura até os dias atuais com grande variação na intensidade dos processos ao longo do tempo.

Os leques alimentados pelas rochas do escudo pré-cambriano tem como característica a imaturidade textural e mineralógica e composição predominantemente arcoseana. Em suas porções proximais apresentam grânulos e seixos sustentados por matriz lamítica. Já nas porções médias e distais predominam arenitos e conglomerados relacionados a canais fluviais.

Os leques alimentados pelos basaltos e arenitos da Serra Geral apresentam grande variação dependendo do local de deposição. Junto às escarpas da serra ocorrem depósitos de conglomerados com clastos variando de grânulos a blocos suportados por sedimentos finos. Em suas porções distais predominam sedimentos arenosos pobremente selecionados.

Os sistemas deposicionais do tipo laguna barreira compreendem três subsistemas geneticamente relacionados (VILLWOCK & TOMAZELLI, 1996):

- O subsistema barreira, caracterizado pelas praias arenosas e campo de dunas eólicas;
- O subsistema lagunar desenvolvido na região baixa, situada entre a barreira e os terrenos mais antigos (*backbarrier*) onde se instalaram lagunas, lagos, pântanos, canais e deltas;
- Os canais de ligação (*inlet*), cuja função é viabilizar o contato entre as lagunas e o mar.

O sistema deposicional laguna-barreira I possui idade de aproximadamente 400 ka e desenvolveu-se como resultado do primeiro evento transgressivo-regressivo. As fácies sedimentares da Barreira I correspondem a areias quartzo-feldspáticas avermelhadas de granulometria fina a média, bem arredondadas, semi-consolidadas com elevado teor de matriz siltico argilosa de origem diagenética. O Sistema Lagunar I é caracterizado por depósitos aluviais, lagunares, lacustres e paludais de diversas idades (VILLWOCK & TOMAZELLI, 1996).

O sistema deposicional laguna-barreira II corresponde a um segundo evento transgressivo-regressivo com idade absoluta de aproximadamente 325 ka. Os depósitos praias e eólicos da Barreira II ficaram preservados como um grande pontal arenoso desenvolvido ao leste da Lagoa dos Barros e, ao sul, como um antigo sistema de ilhas-barreira, responsável pelo primeiro isolamento da Lagoa Mirim. As fácies sedimentares correspondem a areias quartzo-feldspáticas, castanho-amareladas e bem arredondadas, envoltas por uma matriz argilosa. Os depósitos do Sistema Lagunar II, instalados na região de retrobarreira são representados por areias finas, siltico-argilosas, mal selecionadas, esbranquiçadas e com laminação plano-paralela.

O sistema deposicional laguna-barreira III está associado a um terceiro evento transgressivo-regressivo e foi responsável pela implantação final do Sistema Lagunar Patos-Mirim (VILLWOCK & TOMAZELLI, 1996), se estendendo de maneira quase contínua ao longo de toda a Planície Costeira do RS. Corresponde a uma sequência costeira tipicamente regressiva (progradante) que foi dividida, com base em dados sedimentológicos e paleontológicos, em fácies distintas correlacionadas aos sistemas eólico, praias (*backshore* e *foreshore*) e marinho raso (TOMAZELLI & DILLENBURG, 2007). Os sedimentos da porção basal são compostos por fácies arenosas de coloração amarela-esverdeada, fina a muito fina

com baixo teor de silte e argila, com estruturas cruzada *hummocky*. Os sedimentos praias são compostos por areias quartzosas esbranquiçadas, finas e bem selecionadas e com estratificação bem desenvolvida. Também é notável a ocorrência de uma grande quantidade de icnofósseis representados por tubos de *Ophiomorfa* além de moldes de conchas de moluscos. Os sedimentos da porção superior da sucessão de fácies são representados por uma cobertura de areias eólicas finas de coloração marrom-avermelhada, de aspecto predominantemente maciço com alguns horizontes de paleossolos. Os depósitos correspondentes ao Sistema Lagunar III, são compostos por areias finas, siltico-argilosas, mal selecionadas, de coloração creme e com laminação plano-paralela. Concreções carbonáticas e ferruginosas são especialmente comuns nesse sistema.

O sistema deposicional laguna-barreira IV representa o mais recente e ainda ativo, sistema deposicional do tipo laguna-barreira da Planície Costeira do Rio Grande do Sul. Iniciou sua formação há 7ka, com a migração de uma barreira transgressiva durante os estágios finais da Transgressão Marinha Pós-Glacial (DILLENBURG *et al.* 2000). Os depósitos praias são constituídos essencialmente por areias quartzosas finas a muito finas de coloração cinza e bege esverdeadas, moderadamente selecionadas. Os depósitos eólicos caracterizam-se por areias finas, bem selecionadas, de coloração bege a amarelada, com níveis milimétricos esparsos de coloração cinza, produzidos por concentrações de minerais pesados. Os registros mais antigos do sistema lagunar holocênico são compostos essencialmente por depósitos de margem e de fundo lagunar. Os depósitos de margem são constituídos por areias quartzosas finas, de coloração cinza a verde claro, moderadamente a mal selecionadas, enquanto que os depósitos de fundo são marcados pela ocorrência de lamas ricas em matéria orgânica, de coloração variando de cinza a preta, com biodetritos, podendo conter esparsas intercalações de finos intervalos arenosos. O Sistema Lagunar IV situa-se na região de retrobarreira da Barreira IV e é constituído por um conjunto de ambientes e subambientes deposicionais que incluem corpos aquosos costeiros, sistemas aluviais, deltaicos e paludais (TOMAZELLI & VILLWOCK, 2005).

Utilizando dados de perfis geológicos de poços e sondagens elétricas verticais (SEV) na região norte da PCRS, COLLISCHONN (2021) estudou a gênese e a distribuição da camada aquífera conhecida como “Sal Grosso” na região do litoral norte do Rio Grande do Sul. Essa camada formada por sedimentos arenosos grosseiros teve sua origem relacionada a sistemas aluviais que se desenvolveram entre os municípios de Osório e Tramandaí.

Também neste trabalho a autora identificou pacotes de sedimentos marinhos entre os depósitos dos sistemas de leques aluviais e os depósitos dos sistemas laguna-barreira, os quais não estão representados no perfil esquemático dos sistemas deposicionais laguna-barreira proposto por TOMAZELLI & VILLWOCK (2000) (Figura 11).

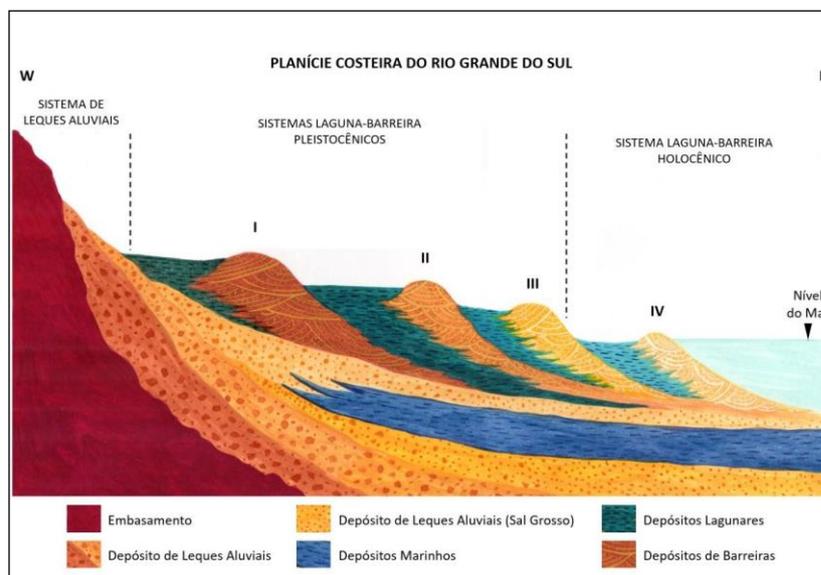


Figura 11: Perfil esquemático da região norte da PCRS proposto por Collischonn (2018), com inserção de pacote sedimentar marinho entre os Sistemas Laguna-Barreira.

Segundo a autora esses depósitos representam um sistema marinho formado com nível do mar mais alto do que quando da formação do sistema laguna barreira e apresentam espessura média de 45m, com topo abaixo de 26 m.

2.4 Contexto Hidrogeológico

No Estado do Rio Grande do Sul (RS) o trabalho pioneiro de HAUSMAN (1960) dividiu o estado em províncias hidrogeológicas, sendo elas: Planalto Basáltico, Planalto Cristalino, Planície Uruguaia e Planície Litorânea. Visto que ainda haviam poucos dados hidrogeológicos disponíveis, o autor se deteve em demarcar áreas com maior ou menor probabilidade de ocorrência de água subterrânea, dentro de determinados limites de vazões.

SANBERG (1980) estudou o comportamento das águas subterrâneas nas quatro províncias geológicas do RS. Utilizou métodos de análises estatísticas das variáveis hidrodinâmicas e hidroquímicas que mais influenciam nas condições das águas subterrâneas e, desta forma, obteve agrupamentos de poços com características semelhantes em cada Província Geológica.

Com o incremento de informações geológicas e de perfuração de poços, HAUSMAN (1995) revisou trabalhos anteriores e propôs a divisão das províncias em sub-províncias hidrogeológicas. Este trabalho resultou no primeiro mapa de Províncias Hidrogeológicas do RS na escala 1:1.000.000, onde a região costeira do estado ficou classificada como Província Litorânea e dividida, segundo as condições de captação e de qualidade da água, em subprovíncias denominadas Oceânica, Lagunar Externa, Lagunar Interna (norte e sul), Itapuã e Guaíba.

CAICEDO (1998) estudou o comportamento hidrogeológico dos aquíferos costeiros do Litoral Norte do RS através da análise de dados de piezômetros multiníveis com até 30m de profundidade, instalados ao longo da costa. Foram identificados aquíferos livres e confinados com as áreas próximas às lagoas sendo caracterizada por alta condutividade hidráulica horizontal e baixa recarga. As áreas que compreendem as cotas mais altas foram caracterizadas com condutividade hidráulica horizontal baixa e alta recarga. Já as áreas junto ao mar foram caracterizadas por condutividade hidráulica e recarga moderada. As águas foram consideradas como sendo próprias ao consumo humano, dando ressalva as concentrações de ferro e a presença de coliformes fecais em algumas amostras.

DE FREITAS, *et al*, 2002 realizaram estudo do comportamento do potencial aquífero relacionado a barreira marinha no município de Viamão utilizando-se de modelagem computacional. Identificaram a grande potencialidade aquífera dos sedimentos que formam a conhecida unidade geomorfológica “Coxilha das Lombas”.

A partir do estudo e interpretação de dados estratigráficos, estruturais e geomorfológicos, LISBOA *et al*. (2004) abordaram o modo de ocorrência das águas subterrâneas no Estado do Rio Grande do Sul. Definiram o Sistema Aquífero Cenozóico Planície Costeira, como sendo o aquífero mais influenciado por variações verticais e laterais de fácies, sendo formado por dois sistemas deposicionais: Sistema Depositional Quaternário de Cobertura Laguna-Barreira, aflorante em toda a Planície Costeira e, em subsuperfície, o Sistema Depositional Terciário Bacia rasa de Pelotas.

O Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM), em convênio com o Governo do Estado do RS elaboraram o primeiro Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul na escala 1:750.000, definindo os principais aquíferos do estado e caracterizando suas principais potencialidades qualitativas e quantitativas (MACHADO & FREITAS, 2005), Figura 12.

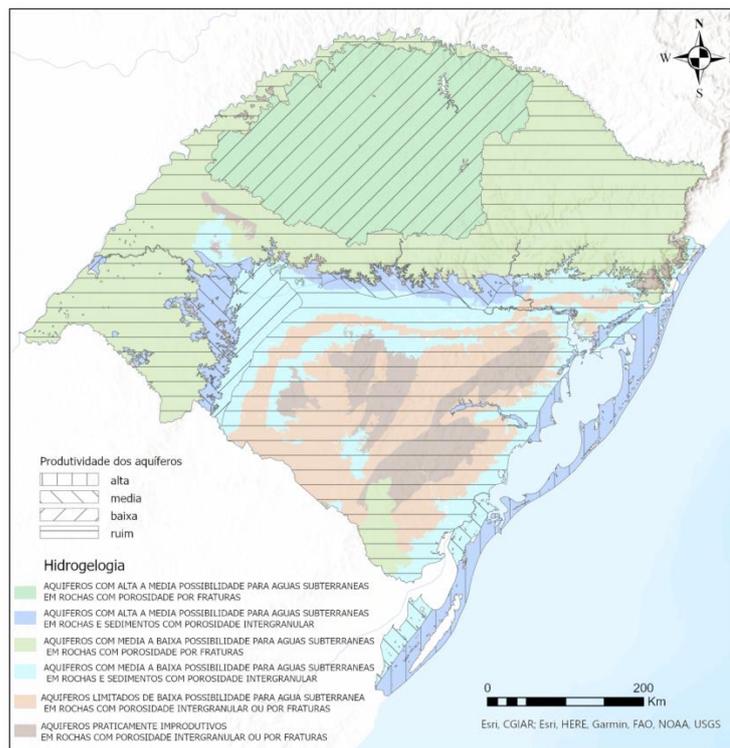


Figura 12: Mapa Geológico do Rio Grande do Sul, modificado de CPRM (2005).

Segundo os autores na região da PCRS ocorrem os Sistemas Aquíferos Quaternário Costeiro (SAQC) I e II, sendo assim descritos:

O SAQC I estende-se desde Torres até o Chuí, e é caracterizado por uma sucessão de fácies arenosas inconsolidadas de granulometria fina a média, esbranquiçadas, intercaladas com camadas siltico-arenosas e argilosas. Os poços desse sistema possuem capacidades específicas geralmente altas, ultrapassando 4 m³/h/m. Quanto à salinidade, as concentrações são inferiores a 400 mg/L, porém também são encontradas águas cloretadas com maior teor salino associadas a áreas de recarga. Esse sistema possui uma alta vulnerabilidade à contaminação nas porções mais superficiais devido, principalmente, aos altos valores de porosidade, de permeabilidade e de vazão nos poços.

O SAQC II desenvolve-se desde Torres até Santa Vitória do Palmar e é caracterizado por uma sucessão de areias finas inconsolidadas, esbranquiçadas e argila cinza, sendo que, no topo, predominam camadas pelíticas bastante cimentadas. Os poços desse sistema apresentaram capacidades específicas entre 0,5 e 1,5 m³/h/m. Os sólidos totais dissolvidos variam entre 600 e 2.000 mg/L. As águas deste sistema aquífero foram classificadas como bicarbonatadas a cloretadas sódicas.

Na região do litoral médio e sul do RS, REGINATO *et al.* (2009) avaliaram a hidroquímica das águas subterrâneas utilizada na irrigação. Foram identificados diferentes tipos de poços (tubulares, ponteira, cacimba ou escavados) com profundidades variáveis entre 3 e 132 metros e com nível estático localizado entre 2 e 25 metros. Nesse estudo, constatou-se que há um predomínio de águas bicarbonatadas sódicas, entretanto algumas análises apresentaram tipologias químicas como bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas e sulfatadas ou cloretadas sódicas. Além disso, essas águas, se forem utilizadas na irrigação, apresentam risco de salinidade médio a alto.

NASCIMENTO (2013) identificou três camadas que formam a unidade aquífera Barreira Holocênica no município de Cassino (Figura 13). A primeira camada de sedimentos de origem eólica possui espessura entre 0 e 3 metros e se caracteriza por ser um excelente reservatório, pois apresenta altas porosidades e bons coeficientes de transmissividade. A camada de sedimentos de ambiente praiial e marinho raso ocorre abaixo do pacote eólico, em profundidades que variam entre 4 e 20m e com espessuras entre 15 e 17m, podendo apresentar altos valores de salinidade. A terceira camada é caracterizada por argilas com alto grau de compactação, se comportando como camadas confinantes (aquícludes).

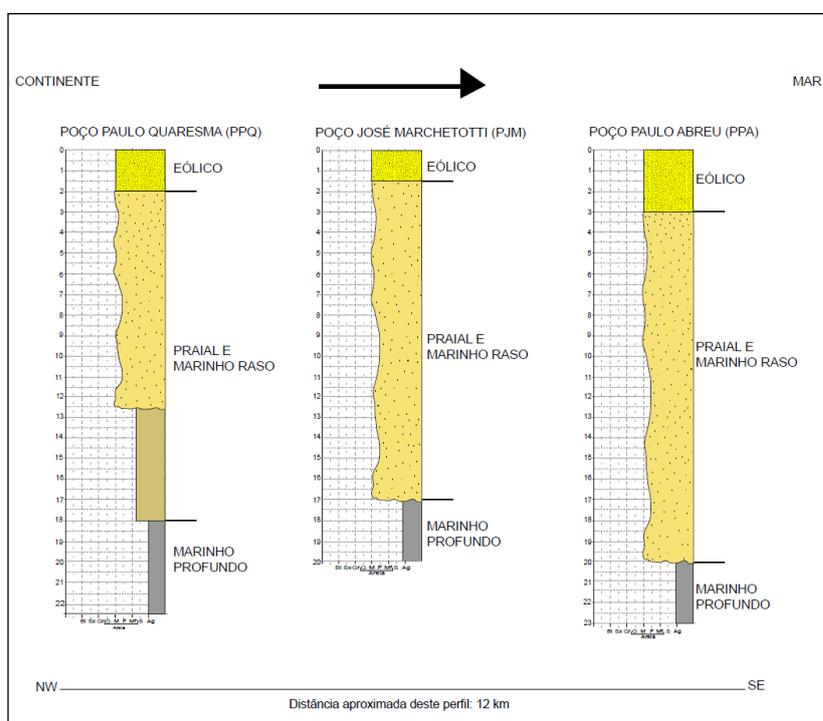


Figura 13: Perfis Geológicos com a identificação das principais camadas de sedimentos e ambientes de deposição presentes no município de Cassino. Fonte NASCIMENTO (2013).

BOBSIN (2013) caracterizou as águas subterrâneas na zona urbana do município de Osório-RS, com base em poços tipo ponteira (Figura 14). Nesse trabalho, o autor constatou que os aquíferos associados ao Sistema Laguna-Barreira III apresentam comportamentos hidrodinâmico e físico-químicos distintos. O Sistema Lagunar III possui vazões de até 2,8 m³/h, porém com águas de baixa qualidade, incluindo a presença excessiva de ferro. Já os poços associados ao Sistema Barreira III apresentam vazões menores, entre 1,0 e 2,0 m³/h e águas de melhor qualidade, porém nem sempre propícias para o consumo humano.

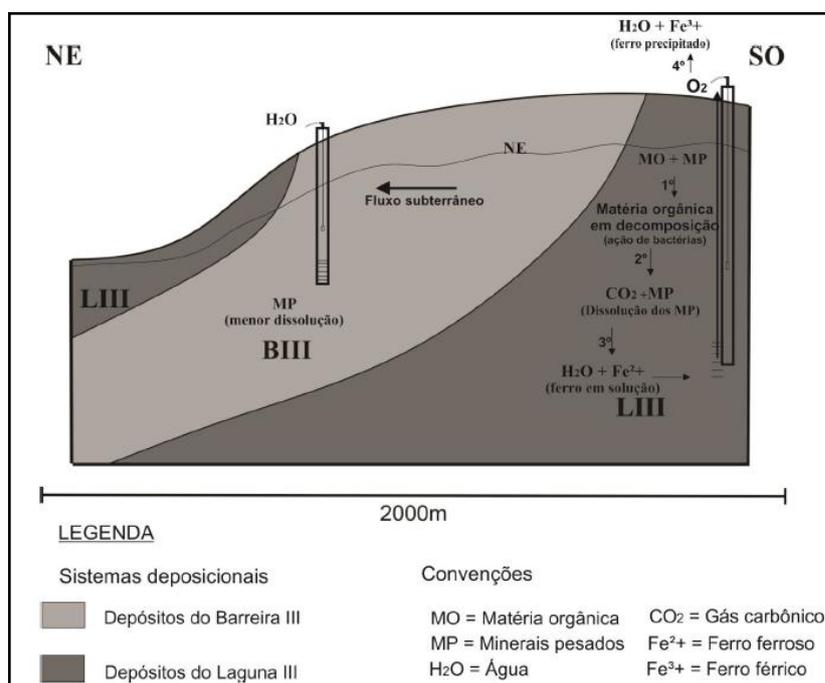


Figura 14: Modelo hidrogeológico conceitual da zona urbana do município de Osório, proposto por Bobsin (2013).

Também no município de Osório, SOARES (2016) identificou a ocorrência de aquíferos livres e semi-confinados a profundidades menores que 30m, e aquíferos confinados a profundidades maiores que 30m (Figura 15). As águas captadas foram classificadas como bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas, sulfatadas ou cloretadas sódicas, sulfatadas ou cloretadas cálcicas ou magnesianas e bicarbonatadas sódicas, sendo essa variação nas concentrações iônicas (águas mais ou menos mineralizadas) decorrentes principalmente ao tipo de aquífero e de litologia por onde as águas circulam. Também é destacado os altos teores dos elementos ferro e de manganês presentes na água, os quais apresentam valores acima do máximo permitido para consumo humano segundo Portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde.

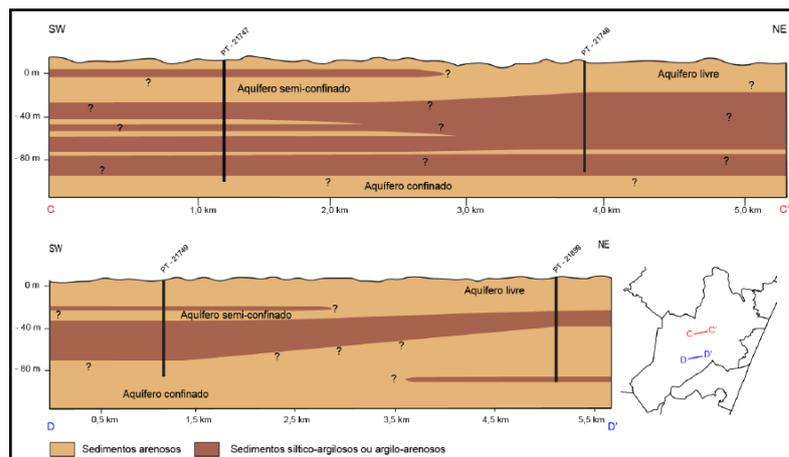


Figura 15: Seções hidrogeológicas esquemáticas mostrando a presença de aquíferos livres, semi-confinados e confinados na região de Osório, proposto por SOARES (2016).

Com objetivo de ampliar a base de conhecimento hidrogeológico dos aquíferos e acompanhar as alterações espaciais e temporais na qualidade e quantidade das águas subterrâneas, a partir do ano de 2010 a CPRM implantou a Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas – RIMAS no aquífero costeiro da RS (TROIAN, 2016). Conforme dados disponibilizados no sítio da CPRM, até o mês de março de 2021 a rede conta com 14 poços de monitoramento quali-quantitativo das águas subterrâneas.

TROIAN *et al.* (2017) apresentaram dados de um estudo preliminar da estimativa de recarga subterrânea no aquífero costeiro na região do litoral norte do RS. Para isso foi aplicado método *WTF* (*water table fluctuation*) por meio da utilização de dados de cinco poços tubulares pertencentes a RIMAS. A recarga mensal foi estimada entre 32mm e 60mm, e as porcentagens de recarga em relação à precipitação variaram entre 21% e 40%, com média de 28%. Estes resultados vão de encontro aos dados observados na literatura que demonstram a intensa recarga que é característica de aquíferos costeiros caracterizados por sedimentos arenosos.

Com base nesses estudos se pode evidenciar a grande heterogeneidade hidrogeológica que caracteriza a Planície Costeira do Rio Grande do Sul. Visto sua grande extensão e complexidade, fica clara a necessidade de se obter um maior conhecimento sobre a hidrogeologia da região.

2.5 Utilização da Geofísica na Hidrogeologia

O uso da geofísica na hidrogeologia consiste na aplicação de dois tipos principais de levantamentos, a eletrorresistividade e a perfilagem geofísica de poços. A seguir é

apresentado um resumo dos conceitos básicos dos métodos e alguns trabalhos científicos exemplificando sua aplicação em ambientes costeiros.

2.5.1 Eletrorresistividade

O método de eletrorresistividade ou resistividade elétrica, diz respeito à dificuldade encontrada pela corrente elétrica para se propagar num meio qualquer. As técnicas de investigação são o Caminhamento Elétrico (CE) e a Sondagem Elétrica Vertical (SEV). O CE tem por objetivo determinar em profundidade as descontinuidades laterais nos materiais geológicos, tipo de fraturamento e/ou falhamentos, contatos, diques, etc. A SEV tem por objetivo investigar em profundidade diferentes tipos e situações geológicas, determinar espessuras de resistividades e/ou cargabilidades a partir de um ponto fixo em superfície (BRAGA, 2016). Com a aplicação destas técnicas de investigação se obtém as seguintes informações:

- Caracterização de litologias;
- Determinação da profundidade do topo rochoso;
- Determinação do nível d'água;
- Detecção de cavidades;
- Estratigrafia geológica e geotécnica;
- Localização de zonas de falhas;
- Mapeamento de contatos geológicos;
- Zona de fraturas.

SILVA, (2002) mostra a aplicação de métodos geofísicos na determinação das unidades sedimentares da Planície Costeira Bragantina, nordeste do Estado do Pará. Através da interpretação dos dados obtidos indicou contatos laterais e estabeleceu assinaturas geofísicas para os depósitos da planície costeira. A autora ressalta a limitação de profundidade das SEV causada pela alta condutividade elétrica do ambiente investigado.

LEAL (2007) utilizou-se de sondagens elétricas verticais (SEV) para avaliação do potencial dos recursos hídricos subterrâneos da zona costeira do Campo Petrolífero de Fazenda Alegre, no Estado do Espírito Santo. Foram identificadas 06 camadas geoeletricas que serviram de base para locação 02 de poços na região.

COLLISCHONN (2021) estudou a gênese e a distribuição da camada aquífera conhecida como “Sal Grosso” na região do litoral norte do RS. Para delimitação de topo e

base da camada a autora utilizou dados de perfis geológicos de poços e SEVs, a partir das quais foi possível identificar um padrão de comportamento geoeletrico para a camada foco do estudo.

2.5.2 Perfilagem Geofísica de Poços

A perfilagem geofísica de poços é a área da geofísica cujos métodos são aplicados no interior de poços com a finalidade de se obter registros contínuos das características petrofísicas e/ou geométricas das formações geológicas, em função da profundidade. Os registros são apresentados em forma de perfis e visam minimizar os erros de avaliação oriundos dos métodos empíricos (tempo de perfuração e amostras de calhas) para definição dos locais das seções filtrantes. A interpretação dos parâmetros registrados pelos perfis geofísicos conduz à identificação das litologias atravessadas pelo poço, da litoestratigrafia e das zonas de maior e de menor permeabilidade. Como são corridos continuamente, do fundo do poço até a superfície, constituem instrumentos adequados ao estudo de sucessões sedimentares, em escala de metros a centenas de metros, podendo ser usados na análise da evolução paleoambiental (NERY, 2008).

Atualmente, há mais de cinquenta tipos de ferramentas de perfilagem para as mais variadas funções e necessidades de informações. Algumas delas são dispositivos de medição passivos, outras exercem alguma influência na formação (ELLIS & SINGER, 2008).

Os principais perfis geofísicos utilizados em hidrogeologia são: Raios Gama, Potencial Espontâneo, Indução e Sônico. O perfil radioativo de raios Gama fornece informações litológicas através da quantidade de argilominerais presente na formação. O Potencial Espontâneo funciona com base na mobilidade (permeabilidade) iônica e na diferença de resistividades (salinidades) entre os fluidos do poço e das camadas porosas. Os perfis elétricos de Indução registram as variações de resistividade/condutividade elétrica, identificando materiais condutores. Já o perfil Sônico é utilizado para se obter valores de porosidades (total e efetiva) através de diferença de velocidade das ondas sonoras.

A seguir são citados alguns exemplos de trabalhos acadêmicos sobre o uso dessa ferramenta nos estudos de hidrogeologia.

MENDES & VERMA (2000), aplicando os métodos geofísicos de perfilagem de poço e sondagem elétrica vertical identificaram duas zonas aquíferas bastante distintas na região de Belém, Estado do Pará. A primeira se estende até a profundidade em torno de 160 m é caracterizada por corpos arenosos com diferentes dimensões, interdigitados a pelitos. A

segunda se estende até 300m e é constituída predominantemente por areias com níveis argilosos.

NERY *et al.*, (2002) utilizaram os perfis de Indução e Raios Gama com a finalidade de investigar o aumento de cloretos na água de um poço localizado na Bacia de Alagoas, em Maceió. Este poço se apresenta revestido em PVC e os dados geofísicos permitiram identificar possíveis rotas de migração fluida causadoras do processo de salinização.

A região costeira de Recife é caracterizada por BORBA *et al.* (2010) pela ocorrência de diferentes aquíferos que estão associados a rochas sedimentares e camadas de sedimentos. O Aquífero Boa Viagem está associado a camadas de sedimentos recentes, representados por depósitos aluviais, de terraços fluviais, terraços marinhos, areias de praias, paleomangues e dunas. A dificuldade da avaliação da geometria desses aquíferos está relacionada com a baixa confiabilidade das descrições feitas nos perfis geológicos dos poços tubulares. Nesse caso a perfilagem geofísica auxilia na identificação e avaliação da geometria, pois é um produto que apresenta maior detalhamento sobre a geologia e hidrogeologia das diferentes camadas, sendo portanto mais confiável.

A literatura sobre uso da Geofísica em hidrogeologia é bastante ampla e embasa o uso dessa metodologia nos estudos de caracterização de zonas aquíferas. Contudo é importante ressaltar que o conhecimento teórico dos métodos geofísicos utilizados em cada levantamento é fundamental para uma correta interpretação dos perfis, evitando-se distorções das informações.

2.6 Composição Química e Isotópica da Água Subterrânea

2.6.1 Hidroquímica da Água Subterrânea

A água é considerada um importante solvente, sendo a primeira classificação dos constituintes orgânicos dissolvidos na água subterrânea apresentada por (DAVIS & DE WIEST, 1966). Esses constituintes podem ser classificados de acordo com sua quantificação, podendo ser maiores, menores e traços.

Os íons maiores dissolvidos na água subterrânea são: Cálcio (Ca^{2+}), Magnésio (Mg^{+2}), sódio (Na^+), potássio (K^+), bicarbonato (HCO_3^-), sulfato (SO_4^{-2}) e cloreto (Cl^-) (DAVIS & DE WIEST 1966; FREEZE & CHERRY 1979 ; DEUTSCH 1997; SANTOS 2008). Estes íons correspondem a 90% do total do conteúdo de sólidos dissolvidos.

Sendo assim os trabalhos que visam caracterizar a hidroquímica das águas subterrâneas se baseiam, em sua maioria, na quantificação das concentrações desses ânions aliado aos parâmetros físico-químicos Potencial Hidrogeniônico (pH), Potencial de Oxirredução (Eh) e Condutividade Elétrica(CE).

A água subterrânea tende a aumentar concentrações de elementos químicos dissolvidos à medida que se movimenta e aumenta seu tempo de residência. Entretanto, muitos outros fatores interferem, tais como: clima, composição da água de recarga, tempo de contato água/meio físico, litologias atravessadas, interações bioquímicas e químicas, além da contaminação causada pelo homem (SANTOS, 2008). Para uma boa interpretação da química das águas subterrâneas e identificação dos processos hidrogeoquímicos de um sistema aquífero é útil adotar o conceito de tipo hidroquímico introduzido por CHEBORATEV (1955) *apud* HISCOCK (2011). Os tipos hidroquímicos identificam zonas distintas do aquífero em que a água pode ser descrita pelos íons de maior concentração (Figura 16).

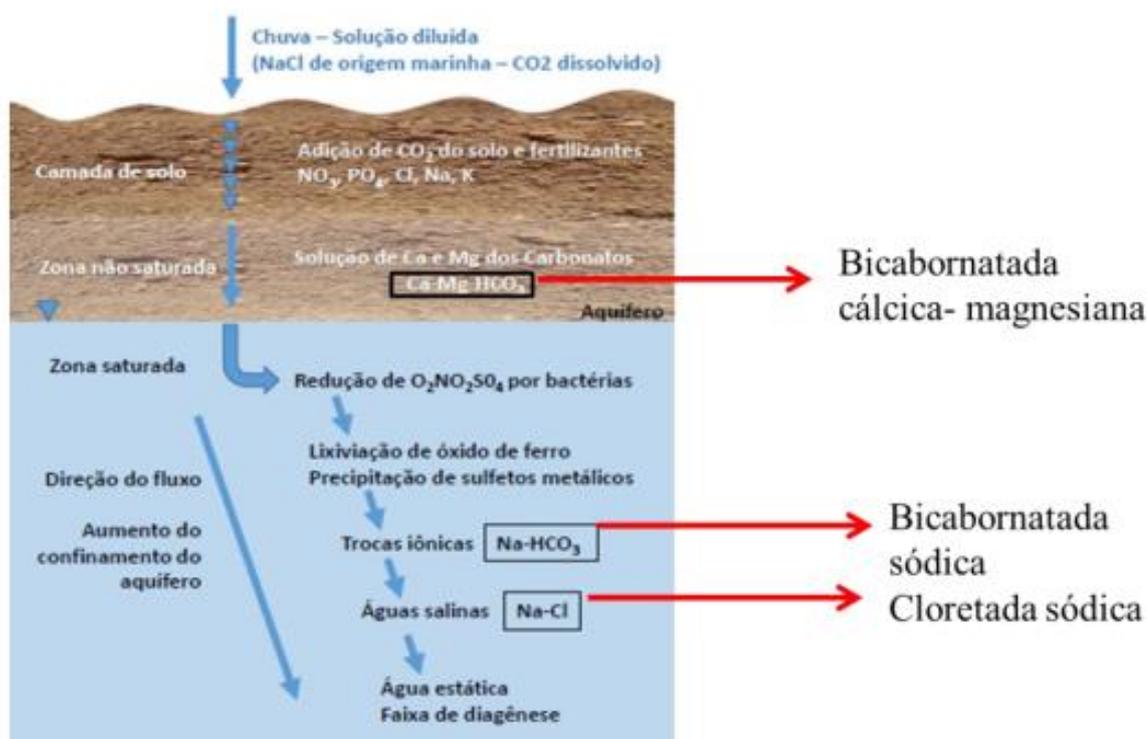


Figura 16: Modelo de evolução da água subterrânea em regiões costeiras e seus tipos hidroquímicos. Extraído de LIMA, (2019), modificado HISCOCK (2011)

Água da chuva com influência marinha (águas cloretadas – sódicas) contendo CO₂ dissolvido entra no sistema e atravessa o solo onde o CO₂ gerado pela decomposição da matéria orgânica é adicionado. Conforme a água vai infiltrando no solo da zona insaturada o

CO₂ dissolvido produz soluções ácidas de ácido carbônico (H₂CO₃) que se dissocia e promove a dissolução de cálcio e magnésio dos carbonatos dando origem a águas do tipo bicarbonatadas cálcicas/magnesianas. Ao entrar no aquífero, a zona saturada torna-se cada vez mais anóxica promovendo a redução do oxigênio, nitrato e sulfato. A presença de argilominerais na rocha hospedeira acarreta trocas iônicas onde o Mg²⁺ e o Ca²⁺ são substituídos pelo Na⁺ e K⁺ em solução gerando águas do tipo bicarbonatada-sódica. Nas zonas mais profundas do aquífero confinado ocorre a mistura de águas salinas formando águas do tipo cloretadas-sódicas até alcançar a zona de diagênese do aquífero constituindo salmouras (HISCOCK, 2011).

2.6.2 Isótopos Ambientais na Água Subterrânea

Os isótopos ambientais são seletivamente particionados em cada etapa do ciclo hidrológico, fornecendo assim uma “impressão digital” da origem da água. Dessa forma, CRAIG (1961) observou a existência de uma relação linear entre os valores isotópicos em amostras de chuva, relação essa descrita pelo que se convencionou denominar de Reta Meteórica Global (*Global Meteoric Water Line*), expressa pela equação abaixo:

$$\delta^2\text{H} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10$$

Esta reta fornece uma referência para a interpretação e proveniência de águas subterrâneas, por meio de uma Regressão Linear pelo Método dos Mínimos Quadrados. A observação é feita em torno do coeficiente angular representativo da área de estudo, denominada Reta Meteórica Local (*Local Meteoric Water Line*).

Desde 1960 existe uma rede global de monitoramento isotópico de chuvas denominado GNIP (*Global Network for Isotopes in Precipitation*) apoiado e mantido pela AIEA (*International Atomic Energy Agency*). Esta rede acumula, portanto, dados espaciais e temporais de concentrações de $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ (Deutério), e em alguns casos, ^3H (Trítio) na precipitação a partir de amostras acumuladas mensais.

Ao analisar a dinâmica local, a equação que mais se adequa como representativa da Reta Meteórica Local, o coeficiente angular de valor 7,67 é invariante, mas o coeficiente linear é representado por um parâmetro denominado de Excesso de Deutério (D), proposto por DANSGAARD (1964). Trata-se de uma variável controlada por efeitos cinéticos associados com a evaporação da água na superfície dos oceanos ou continentes e aumenta com o déficit de umidade nas massas de ar oceânicas (MERLIVAT & JOUZEL, 1979). A

ideia principal é que as chuvas em meses de verão apresentam valores mais elevados do que as chuvas relacionadas a meses de inverno, devido a diferenças na temperatura sazonal do ar.

Os isótopos ambientais presentes na molécula de água, isótopo de oxigênio ($\delta^{18}\text{O}$) e de hidrogênio ($\delta^2\text{H}$), vêm sendo analisados a fim de compreender globalmente sua aplicabilidade em estudos hidrológicos, hidrogeológicos e hidrometeorológicos (AGGARWAL *et al.*, 2012; SANTOS *et al.*, 2019; MOOK 2002). Em especial, essa análise procura incorporar a interrelação entre a isotopia e parâmetros meteorológicos como a evaporação, altitude, temperatura, precipitação, tipos de chuva, para a compreensão do ciclo hidrológico como um todo.

A molécula de água, presente na chuva, carrega consigo o que se denomina de “assinatura” isotópica, a qual é utilizada para determinar a origem e movimento da água no ciclo hidrológico. Os isótopos são átomos do mesmo elemento com variações em sua massa. As frações dos diferentes isótopos de hidrogênio e oxigênio presentes na água das chuvas variam no tempo e no espaço devido a processos físicos e químicos, como por exemplo, a evaporação, condensação e devido a variáveis meteorológicas como temperatura do ar e totais precipitados.

Uma vez que os isótopos estáveis são considerados traçadores ambientais, a busca por uma melhor análise entre o sistema superfície-atmosfera (SSA) foi acolhida por estudos acerca do tempo de residência, recarga e descarga de águas subterrâneas (JASECHKO *et al.* 2014). Assim sendo, os processos hidrometeorológicos que ocorrem, abastecidos pela molécula de água, auxiliam na interpretação do ciclo hidrológico como um todo.

A caracterização isotópica da água está associada principalmente à alguns fatores climáticos que alteram os valores isotópicos (ROZANSKI *et al.* 2013; GRAHAM *et al.*, 2014; WINNICK *et al.*, 2014). Os valores isotópicos se enriquecem em direção à zona Equatorial e empobrecem em direção aos pólos devido ao processo de fracionamento isotópico, controlado pela temperatura do ar. Assim sendo, observa-se uma diferente dinâmica entre a composição isotópica de regiões de alta latitude (ROZANSKI *et al.*, 1993) e de regiões tropicais. Contudo, a análise isotópica da precipitação em regiões tropicais ainda é pouco conhecida devido à complexidade dos processos meteorológicos regionais e locais, como os próprios sistemas de circulação atmosféricos, sistemas convectivos, atuação do ENSO/La Niña e as distintas fontes de transporte de umidade. Para isso, alguns estudos estão constantemente a busca de compreender a dinâmica isotópica em regiões tropicais (AGGARWAL *et al.*, 2016).

A utilização de isótopos estáveis para caracterização de aquíferos vem sendo bastante abordada em estudos desenvolvidos no estado do RS, principalmente nos aquíferos Serra Geral e Guarani.

GOFFERMANN (2013), utilizou dados de isótopos (^{18}O , ^2H e ^{14}C) para caracterizar a recarga dos aquíferos Rio Bonito, sistema Aquífero Sanga do Cabral-Pirambóia, sistema Aquífero do Embasamento Cristalino e Aquitardos Permianos da região do município de São Gabriel/RS. Os resultados registraram idades de recarga de 70 a 42.000 anos, enquanto isótopos de oxigênio e hidrogênio indicaram que a recarga ocorreu em climas mais secos e quentes do que os atuais.

FREITAS (2016), analisando águas subterrâneas com alta salinidade do sistema aquífero Serra Geral e Guarani na região nordeste do RS e oeste de SC, identificando a recarga meteórica de ambos os sistemas. Porém identificou águas mais antigas relacionadas a amostras do sistema aquífero Guarani de alto confinamento.

BORTOLIN *et al.*, (2020) apresentaram os resultados do monitoramento dos isótopos de oxigênio (^{18}O) e deutério (^2H) nas águas subterrâneas do sistema aquífero Serra Geral na região do município de Carlos Barbosa/RS. Os resultados indicaram que as águas subterrâneas são originadas das águas meteóricas, sendo que as variações nas assinaturas isotópicas evidenciam que as diferentes condições climáticas que ocorrem ao longo dos meses, têm influência nos processos de recarga e nas razões isotópicas das águas subterrâneas

A porção em que o município de Porto Alegre está situado é alvo da atuação de sistemas atmosféricos distribuídos especificamente em cada estação, como a dinâmica de transporte de umidade diretamente do oceano por todo o ano, Frentes Frias (FF) e Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS).

3 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste estudo a metodologia adotada inicia com a coleta de dados para elaboração de bancos de dados, passando pela avaliação e interpretação das informações existentes que serviram de base para elaboração da compartimentação hidroestratigráfica, chegando a definição de um modelo conceitual para as diferentes regiões do SAC (Figura 17).

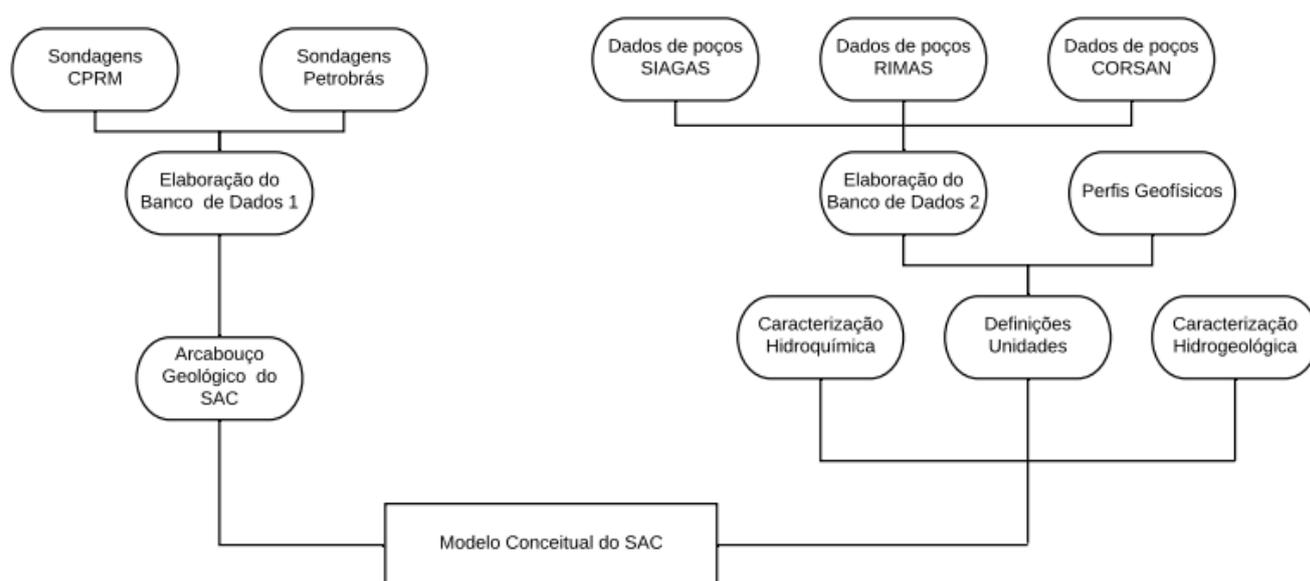


Figura 17: Fluxograma com a metodologia aplicada no desenvolvimento da pesquisa.

3.1 Elaboração de Banco de Dados de Sondagens Estratigráficas

Esta etapa teve por objetivo identificar a espessura e distribuição do pacote sedimentar que forma o SAC, correspondente a parte continental emersa da Bacia de Pelotas e que forma o arcabouço geológico do SAC.

Além da revisão bibliográfica realizada, as principais informações utilizadas nesta etapa foram os perfis geológicos de 09 poços estratigráficos perfurados pela PETROBRAS e 38 furos de sondagem realizados pela CPRM na região da Planície Costeira. Os principais dados constantes no banco de dados são profundidade, topo do embasamento e descrição das amostras de calha. A localização das sondagens está representada na Figura 18.

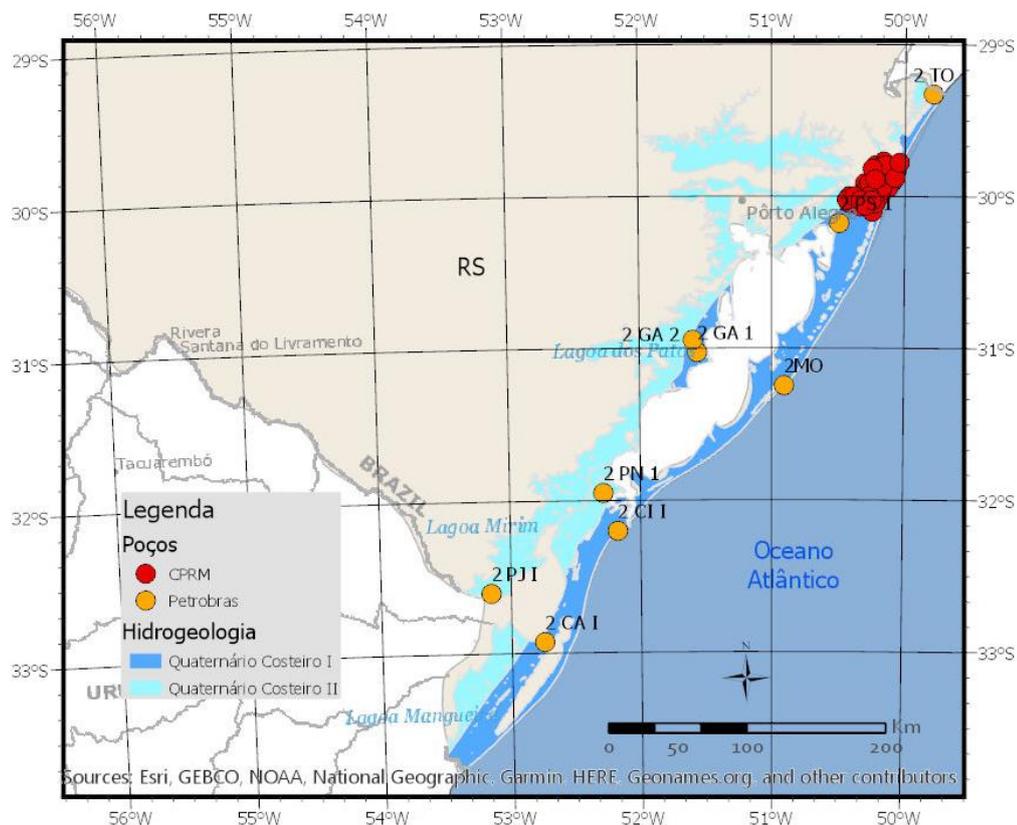


Figura 18: Localização das sondagens estratigráficas realizadas pela PETROBRAS e pela CPRM, na região da PCRS.

3.2 Elaboração de Banco de Dados de Poços Tubulares

Nessa etapa foram buscadas informações sobre a geologia e a hidrogeologia da PCRS. Foi realizado o levantamento de informações e publicações de diversos níveis, como relatórios, banco de dados, notas técnicas, artigos científicos, trabalhos de conclusão de cursos, dissertações, teses, mapas temáticos (geológico, hidrogeológico, geomorfológico, topográfico). A busca por essas informações foi realizada junto aos seguintes órgãos, entidades e empresas:

- Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica (CECO) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS);
- Repositório Institucional de Geociências (RIGEO) da Companhia de Recursos Minerais (CPRM);
- Sistema de Informação das Águas Subterrâneas (SIAGAS);
- Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas (RIMAS);
- Departamento de Oceanografia Física, Química e Geológica da Universidade Federal de Rio Grande (FURG);
- Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN).

Ao total foram analisados 1074 perfis de poços distribuídos ao longo da PCRS. Foi realizada consistência desses dados com objetivo de selecionar os poços com relatórios mais completos e confiáveis em termo de dados geológicos e hidrogeológicos. Foram descartados também os dados de poços do tipo ponteira e do tipo cacimba por apresentarem pequena profundidade e poucos dados disponíveis.

Para espacialização dos dados foi utilizado o software *ArcGis-pró* (2019). Os poços abrangem a totalidade da área da planície costeira, porém há uma clara concentração em torno dos núcleos urbanos, sendo que a região do litoral norte concentra a maior parte dos poços. A Figura 19 mostra a localização e distribuição em mapa dos poços tubulares selecionados que compõem o banco de dados.

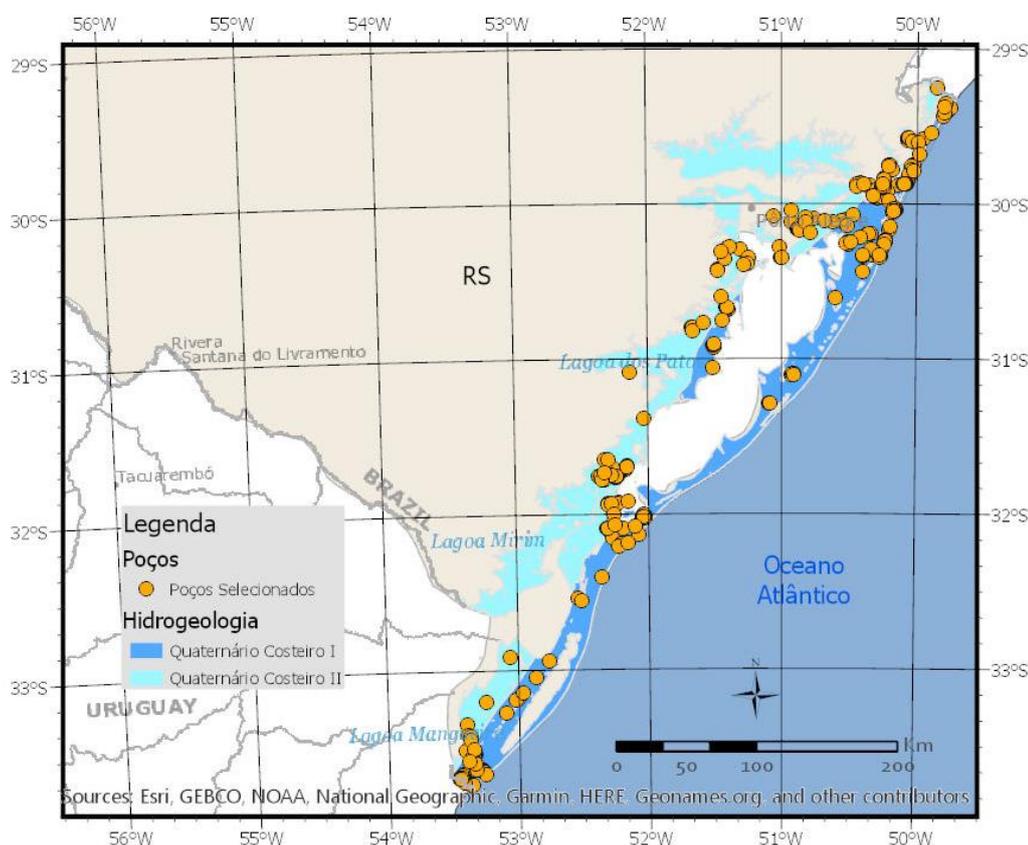


Figura 19: Localização dos poços que compõem o banco de dados.

O banco de dados foi elaborado utilizando os programas Microsoft Access[®] e Microsoft Excel[®], onde constam informações construtivas, geológicas, hidrogeológicas e hidroquímicas de 420 poços tubulares profundos selecionados. A Tabela 2 mostra a distribuição por município, dos poços analisados e dos poços selecionados para elaboração do banco de dados.

Tabela 2: Distribuição, por município, dos poços analisados e selecionados para elaboração do banco de dados.

| Município | Poços Analisados | Poços Selecionados |
|---------------------------|-------------------------|---------------------------|
| Torres | 28 | 10 |
| Arroio do Sal | 3 | 3 |
| Terra de Areia | 26 | 9 |
| Capão da Canoa | 10 | 8 |
| Xangrilá | 27 | 14 |
| Osório | 99 | 45 |
| Tramandaí | 18 | 18 |
| Cidreira | 21 | 2 |
| Capivari do Sul | 7 | 7 |
| Balneário Pinhal | 39 | 14 |
| Palmares do Sul | 56 | 26 |
| Mostardas | 41 | 13 |
| Tavares | 12 | 4 |
| São José do Norte | 30 | 15 |
| Rio Grande | 48 | 32 |
| Santa Vitória do Palmar | 88 | 56 |
| Chuí | 23 | 22 |
| Pelotas | 154 | 42 |
| São Lourenço do Sul | 22 | 3 |
| Arambaré | 28 | 14 |
| Tapes | 25 | 25 |
| Barra do Ribeiro | 22 | 15 |
| Viamão | 145 | 16 |
| Santo Antônio da Patrulha | 102 | 7 |
| TOTAL | 1074 | 420 |

3.3 Identificação do Arcabouço Geológico do Sistema Aquífero Costeiro

Os projetos de pesquisa estratigráfica realizados na Bacia de Pelotas tiveram foco no conhecimento regional da bacia (no caso dos poços da PETROBRAS) e na identificação dos depósitos de carvão mineral (no caso das sondagens da CPRM). Com isso não houve um detalhamento das camadas mais superficiais, principalmente dos depósitos quaternários.

Os dados dos perfis geológicos e estratigráficos obtidos desses projetos foram utilizados como base para elaboração de seções geológicas da espessura do pacote sedimentar que forma a PCRS. Para isso foram analisados os perfis geológicos e geofísicos dos poços identificando a profundidade do topo do embasamento e das formações geológicas da bacia do Paraná. Com isso se identificou a espessura e a distribuição espacial do pacote sedimentar que forma o SAC.

3.4 Identificação das Unidades Hidroestratigráficas

Nesta etapa foram utilizadas informações obtidas nas etapas anteriores, no reconhecimento de campo e nos dados de perfis geológicos e geofísicos dos poços tubulares.

As principais fontes destes dados foram o Sistema de Informação de Águas Subterrâneas (SIAGAS) e a Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas (RIMAS), ambos do SGB/CPRM, e o banco de dados disponibilizado pela Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN). Os dados provenientes dos mapas geológicos foram utilizados para avaliar a distribuição espacial dos diferentes depósitos de sedimentos que formam os sistemas Laguna-Barreira. Com os dados dos perfis de sondagem e perfis geológicos dos poços, foi possível avaliar a distribuição dos depósitos de sedimentos em subsuperfície e, com isso, avaliar as principais unidades hidroestratigráficas que formam o sistema aquífero.

Esses dados foram utilizados na elaboração de um conjunto de seções hidroestratigráficas em diferentes regiões da Planície Costeira (Figura 20), que representam a ocorrência das diferentes unidades hidroestratigráficas. Para o traçado dessas seções foram utilizadas transectas, que cortam determinadas partes da planície costeira e que interceptam o conjunto de poços existentes nessas regiões. Também foram elaboradas seções paralelas a linha de costa com objetivo de mostrar a espacialização das unidades.

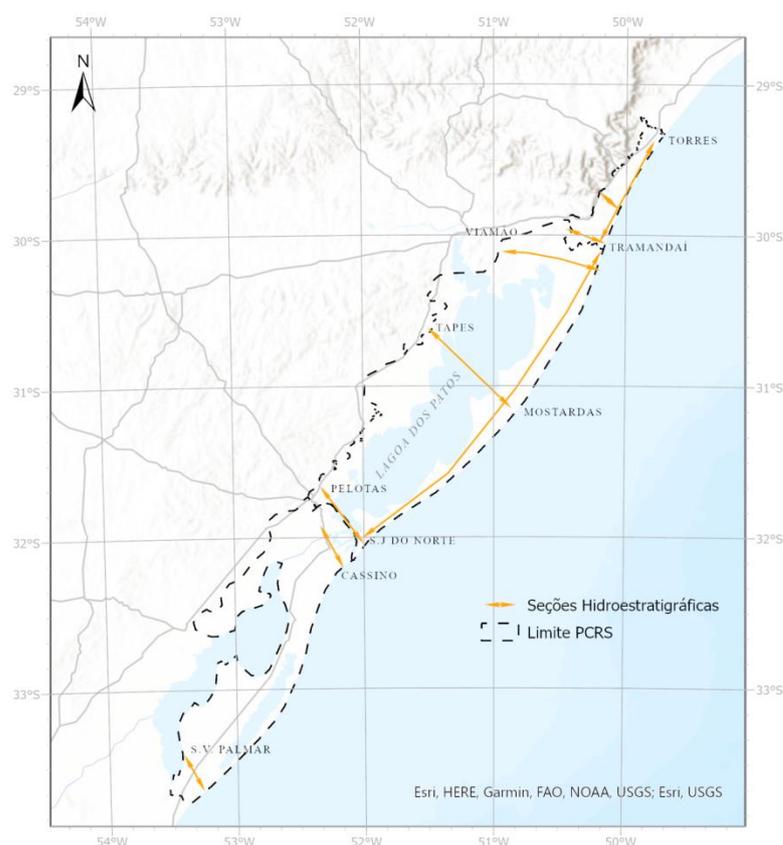


Figura 20: Localização das seções hidroestratigráficas elaboradas.

Os pacotes sedimentares que formam a região apresentam sensíveis variações granulométricas com intercalações (areia fina, média e grossa, silte, argila), o que gera

descrições geológicas sem um padrão definido, sendo que cada geólogo ou sondador tende a descrever diferentemente a mesma litologia. Para minimizar este problema foi realizado trabalho de campo para acompanhar perfuração de um poço de 106m de profundidade no município de Capivari do Sul. Apesar de representar apenas um ponto de observação em toda PCRS, durante a perfuração foi possível fazer o reconhecimento das principais características dos sedimentos permitindo identificar pequenas variações que muitas vezes não estão descritas nas fichas e relatórios de perfuração, e que podem ser extrapoladas para os demais poços analisados. Também, nesta mesma área, foi possível acompanhar a execução de levantamento geofísico utilizando o método da eletrorresistividade (caminhamentos geoelétricos e sondagens elétricas verticais).

Para separação das diferentes unidades hidroestratigráficas foi levado em consideração as variações granulométricas constantes nos perfis descritivos, buscando identificar as camadas argilosas que possam vir a funcionar como camadas mais impermeáveis, limitando assim a ocorrência de diferentes unidades hidroestratigráficas.

Também foram analisados 126 perfis geofísicos realizados em poços da CORSAN. Nesta análise buscou-se fazer uma comparação entre os dados obtidos dos perfis geológicos com as curvas geradas nos perfis geofísicos. Através das características como porosidade e conteúdo de argila foi possível identificar padrões que permitiram correlacionar os perfis das diferentes unidades hidroestratigráficas. Foram utilizados principalmente os perfis litológicos de raio gama, onde as curvas permitem identificar o volume de argila presente nos sedimentos. Foram analisados também resultados dos perfis de Salinidade, Potencial Espontâneo (SP), Resistividade e Sônico (porosidade total e efetiva).

3.5 Caracterização Hidrodinâmica das Unidades Hidroestratigráficas

A caracterização hidrodinâmica das unidades hidroestratigráficas foi realizada com base na interpretação dos dados obtidos com o levantamento de poços selecionados. Para isso, os perfis construtivos foram avaliados, sendo que a correlação entre o poço e a unidade foi realizada com base na posição das secções filtrantes. O fato de muitos poços captarem água em mais de uma unidade reduziu significativamente o número de amostras, sendo os números amostrais mostrados nas tabelas no capítulo de resultados.

A partir disso foram analisados dados de nível estático a fim de se obter informações sobre a piezometria da região. Na grande maioria dos perfis dos poços os dados altimétricos

do terreno estão ausentes ou são imprecisos. Para se obter as cotas aproximadas da boca dos poços foram utilizadas imagens de satélite ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*) de 12,5 m de resolução, de maneira similar à utilizada por LÖBLER, *et al* (2014).

Foram avaliados ensaios de bombeamento para identificação dos principais parâmetros hidrodinâmicos, como vazão (Q), transmissividade (T), condutividade hidráulica (K) e capacidade específica (Q/s). O cálculo destes parâmetros foi realizado através do uso de planilhas do *software* Microsoft Excel[®] aplicando o método de Theis.

Essas informações foram classificadas em grupos para realização de análise estatística básica com uso do *software* Past 4.03[®], onde foram identificados os valores máximos, mínimos e medianas dos diferentes parâmetros obtidos, sendo os valores expressos em tabelas e em diagramas de caixa. Esta análise foi feita para todo o sistema aquífero e para cada unidade hidroestratigráfica.

3.6 Caracterização Hidroquímica das Unidades Hidroestratigráficas

Essa etapa envolveu o estudo hidroquímico das águas subterrâneas que circulam pelas diferentes unidades hidroestratigráficas e no sistema aquífero como um todo. As análises realizadas tiveram como objetivo identificar diferentes grupos hidroquímicos relacionados com as diferentes unidades hidroestratigráficas. Em uma avaliação inicial foram selecionados poços cuja captação está associada a uma única unidade e poços com seções filtrantes em diferentes unidades, pré-definidas nas etapas anteriores.

Foram utilizadas análises químicas constantes no banco de dados sendo avaliados os seguintes parâmetros: Dureza Total, Condutividade Elétrica (CE), Alcalinidade Total, pH, Bicarbonatos (HCO_3^-), Sólidos Totais Dissolvidos (STD), Cálcio (Ca^{2+}), Magnésio (Mg^{2+}), Ferro Total (Fe^{2+}), Cloretos (Cl^-), Sulfatos (SO_4^-), Sódio (Na^+) e Potássio (K^{2+}).

Os dados obtidos foram analisados com uso do *software* Past 4.03, a fim de realizar análises estatísticas que auxiliaram a identificar e caracterizar a distribuição dos diferentes elementos químicos presentes nas águas de cada unidade hidroestratigráfica. Através do cálculo do balanço iônico foram utilizadas amostras com erros menores que 20%.

Os principais cátions (Na^+ , Mg^{2+} e Ca^{2+}) e ânions (SO_4^- , Cl^- e HCO_3^-), bem como os parâmetros pH, CE, STD e Alcalinidade são apresentados em forma de diagramas de caixa, onde é possível avaliar os valores máximos, mínimos, 1º e 3º quartis, medianas bem como *outliers*. Os valores dos íons são expressos em peso equivalente (meq/L), onde é levado em consideração a concentração e a equivalência química do elemento.

A correlação linear de *Pearson* foi realizada a fim de correlacionar os principais íons com o parâmetro STD, sendo estes valores úteis para interpretar os principais processos de evolução hidrogeoquímica que ocorrem no aquífero (ZHOU *et al* 2017).

A classificação dos grupos de águas com base nos íons dominantes foi feita a partir da utilização do diagrama de Piper, utilizando-se planilhas disponibilizadas pelo Serviço Geológico Norte Americano (USGS) através do link (<https://nevada.usgs.gov/tech/excelforhydrology/>).

A relação das razões $(Ca^{2+} + Mg^{2+} - SO_4^{2-} - HCO_3^-)$ versus $(Na^+ - Cl^-)$ foi utilizada para investigar a ocorrência e intensidade das trocas catiônicas que ocorrem principalmente em aquíferos confinados (FISHER & MULLICAN, 1997). Com objetivo de avaliar os íons dominantes nas águas das diferentes unidades também foram realizadas correlações entre os principais cátions e ânions $(Na^+/Cl^-; Na^+/HCO_3^-, Cl^-/HCO_3^-)$.

Também com a utilização do software Past4.03 foi realizada a Análise de Componentes Principais (PCA) com objetivo de identificar similaridades entre as águas das diferentes unidades. Para isso os valores das concentrações foram padronizados a partir de um score padrão, denominado Z escore.

Para melhor entender os principais processos hidroquímicos que ocorrem durante o fluxo subterrâneo, foram utilizados os diagramas $STD/(Na^+ + Ca^{2+})$ e $STD/(Cl^-/Cl^- + HCO_3^-)$, propostos por Gibbs (GIBBS, 1970) e utilizados em trabalhos recentes como ZHOU *et al*, 2017 e SILVA *et al*, 2021.

Os processos de dissolução foram avaliados através das razões $(HCO_3^-/Na^+) / (Ca^{2+}/Na^+)$ e $(Mg^{2+}/Na^+) / (Ca^{2+}/Na^+)$, onde é possível identificar os minerais dominantes no processo de interação água/sedimento (GAILLARDET *et al*, 1999)(XIAO *et al*, 2015).

Com objetivo de investigar a ocorrência de troca catiônica que ocorrem nas águas subterrâneas foi utilizada a relação $(Ca^{2+} + Mg^{2+} - SO_4^{2-} - HCO_3^-)$ versus $(Na^+ - Cl^-)$, proposta por FISHER AND MULLICAN (1997) e utilizada por ZHOU *et al*, (2017). A posição das amostras plotadas no gráfico indicam águas onde a troca catiônica é um importante processo de controle da química da água subterrânea.

3.7 Caracterização Isotópica do SAC

A avaliação isotópica das águas subterrâneas do SAC foi feita através da análise de isótopos de oxigênio e Deutério ($\delta^{18}O$ e δ^2H) presentes nas águas subterrâneas que circulam nas diferentes unidades.

Para isso foram utilizados dados analíticos cedidos pelo SGB/CPRM, referente a 14 poços da rede RIMAS, localizados nas diferentes regiões da PCRS, sendo suas localizações mostradas no capítulo de resultados. Os dados disponíveis são referentes a coletas multiníveis realizadas em diferentes seções filtrantes com uso do método de baixa vazão, totalizando 32 amostras representativas das diferentes unidades hidroestratigráficas.

Os resultados foram avaliados utilizando dados da Reta Meteorológica Global (GMWL), a Reta Meteorológica de Porto Alegre (1957 a 1983) e da estação GNIP-POA operada pelo SGB/CPRM (2017-2018).

A rede de monitoramento de Porto Alegre cobriu os períodos de 1957 a 1983 com coletas acumuladas mensais parciais, com lapsos de medição, para isótopos estáveis ($\delta^{18}\text{O}$ e $2\text{H}\delta$) e $^3\text{H}\delta$ - trítio. A estação GNIP (codificada 8396700 no *WMO Code*) localizava-se nas coordenadas (-30,8° S, -51,18° E) a altitude de 07 m. Os provedores das informações analíticas foram: AIEA, Viena (Áustria), Universidade de Copenhagen (Dinamarca) e Universidade de Ciência e Tecnologia (AGH) em Cracóvia (Polônia).

Os resultados das amostras da GNIP-POA, segundo a lógica de cômputo mensal foram iniciados em agosto de 2017. Os valores de $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ são gerados por espectrometria de massa ou por espectroscopia de absorção a laser como sendo razões $^2\text{H}/^1\text{H}$ e $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$. São expressos na unidade permil (‰), que representa o quanto a razão isotópica de uma amostra específica desvia da razão isotópica do padrão (normalmente o mais utilizado é conhecido como VSMOW – Padrão de Viena da Média das Águas do Oceano), conforme a notação conhecida como delta ($\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$). As medições possuem uma precisão de cerca de $\pm 0.1\%$ para Oxigênio e $\pm 0.8\%$ para Deutério para um desvio padrão de uma unidade.

De forma complementar à metodologia de coleta das amostras de chuva mensais, o monitoramento isotópico implica necessariamente na aquisição de médias mensais de certos parâmetros climáticos, entre eles: i) Total mensal precipitado (mm); ii) Temperatura média mensal do ar (°C) e, iii) Pressão de vapor média mensal (mb), lembrando que este parâmetro podem ser obtido a partir da umidade relativa e temperatura. A necessidade de se contar com estes parâmetros obriga a que a estação GNIP esteja vinculada a uma estação de monitoramento climatológica operante. Ressalta-se que, preferencialmente, esta estação deve pertencer à Rede Pluviométrica Nacional. No caso específico da GNIP-POA os dados do parâmetro precipitação são obtidos de uma estação de monitoramento operada pelo Serviço Geológico do Brasil e localizada na mesma unidade, a cerca de 30m de distância. Os dados de umidade e temperatura são obtidos de uma estação climatológica operada pelo Instituto

Nacional de Meteorologia, localizada a cerca de 10km da GNIP-POA. Os dados de precipitação desta estação também serão utilizados para balizar, consistir e preencher eventuais falhas de dados pluviométricos locais.

Para a análise e interpretação dos dados foram gerados gráficos com uso do programa Excel, bem como realizadas análises estatísticas descritivas.

3.8 Elaboração de Modelo Conceitual

Foram elaborados modelos hidrogeológicos conceituais, tridimensionais (para região norte) e bidimensionais (para regiões central e sul) com base na avaliação dos perfis geológicos e geofísicos, das seções geológicas, da caracterização hidrogeológica, hidroquímica e isotópica. Esses modelos serviram para demonstrar a influência da compartimentação hidroestratigráfica nas características produtivas e hidroquímicas da água subterrânea nos diferentes aquíferos, levando em consideração que o SAC é caracterizado por unidades hidroestratigráficas e que essas apresentam diferentes características hidrogeológicas (hidrodinâmicas e hidroquímicas).

Os modelos foram compostos por seções hidrogeológicas representativas das regiões norte, centro e sul da PCRS. Em virtude da grande extensão e complexidade da área, o modelo conceitual geral da PCRS foi elaborado em formato bidimensional, onde a região estudada é apresentada em planta, sendo destacados os perfis hidroestratigráficos de diferentes porções. Neste modelo, os dados hidrogeológicos são mostrados em forma de tabela, onde consta os valores das medianas dos principais parâmetros avaliados.

4 RESULTADOS

4.1 Considerações gerais

Os resultados obtidos através da aplicação da metodologia proposta são apresentados da seguinte forma:

- Delimitação do arcabouço geológico do Sistema Aquífero Costeiro (SAC);
- Apresentação do modelo hidrogeológico conceitual proposto para cada região da PCRS;
- Caracterização hidroestratigráfica, hidrogeológica e hidroquímica das diferentes regiões da PCRS;
- Caracterização isotópica do SAC;
- Discussões sobre do Modelo Conceitual do SAC.

Com o objetivo de minimizar a presença de *outliers* e erros analíticos, se optou por utilizar dados de mediana dos valores dos dados hidroquímicos e hidrogeológicos.

Devido as características geomorfológicas e a grande variabilidade hidrogeológica e hidroquímica observada, optou-se por apresentar os resultados compartimentando a planície costeira em três regiões. A Região Norte é limitada entre os municípios de Torres e Tramandaí; a Região Central entre os municípios de Cidreira e São José do Norte, subdividida em interna e externa; e a Região Sul entre os municípios de Rio Grande e Chuí. A Figura 21 identifica os limites das diferentes regiões utilizadas para apresentação dos resultados.



Figura 21: Identificação das diferentes regiões da PCRS utilizadas para apresentação dos resultados.

Através da análise e interpretação dos dados foi possível identificar a grande heterogeneidade estratigráfica que caracteriza o SAC na PCRS. Isso fica evidenciado nos perfis geológicos das sondagens exploratórias realizadas pela PETROBRAS na Bacia de Pelotas (Figura 22), onde se observa intercalações de sedimentos argilosos e arenosos com variáveis espessuras e granulometrias ao longo da seção.

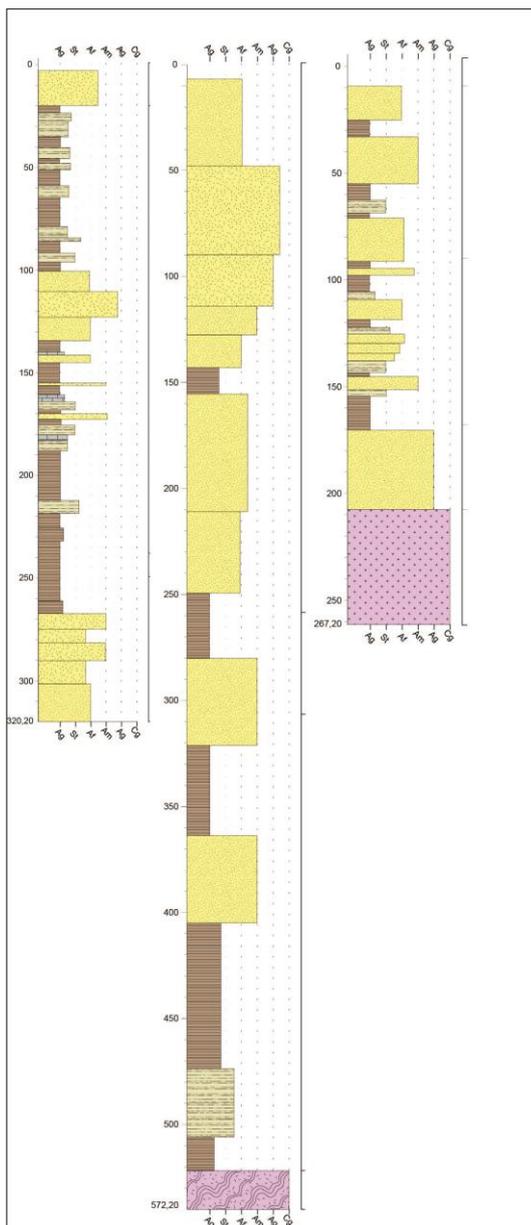


Figura 22: Perfis geológicos de sondagens realizadas pela PETROBRAS na Bacia de Pelotas, localizados nos municípios de Santa Vitória do Palmar, Rio Grande e Pelotas.

Porém, apesar dessa intensa variação nos pacotes sedimentares, é possível observar padrões de empilhamento com heterogeneidades litológicas internas que apresentam certa continuidade física e características hidroquímicas e hidrogeológicas particulares. Esses padrões foram considerados como as diferentes unidades hidroestratigráficas descritas neste trabalho.

A separação de diferentes unidades hidroestratigráficas buscou identificar pacotes sedimentares que possam apresentar, em escala regional, comportamento hidrogeológico semelhantes. Por meio dos perfis litológicos e geofísicos fica evidente a grande

heterogeneidade que marca os pacotes sedimentares, sendo que as unidades hidroestratigráficas apresentam camadas argilosas/arenosas de variadas espessuras, porém sem continuidade lateral que permita sua individualização na escala utilizada.

4.2 O Arcabouço Geológico do Sistema Aquífero Costeiro no RS

O Sistema Aquífero Costeiro (SAC) no Estado do Rio Grande do Sul é formado pelos pacotes sedimentares holocênicos, pleistocênicos e terciários que formam a parte emersa da Bacia de Pelotas. Na região norte da PCRS estes sedimentos estão depositados sobre rochas da Bacia do Paraná, e nas demais regiões diretamente sobre o embasamento cristalino com intenso controle estrutural relacionado a abertura do oceano atlântico, conforme descrito em trabalhos como FONTANA (1996), BARBOZA *et al.* (2008); ROSA *et al.* (2009).

Com objetivo de determinar a geometria do pacote sedimentar que forma o SAC nas diferentes regiões da PCRS é apresentada através de seções localizadas conforme a Figura 23.

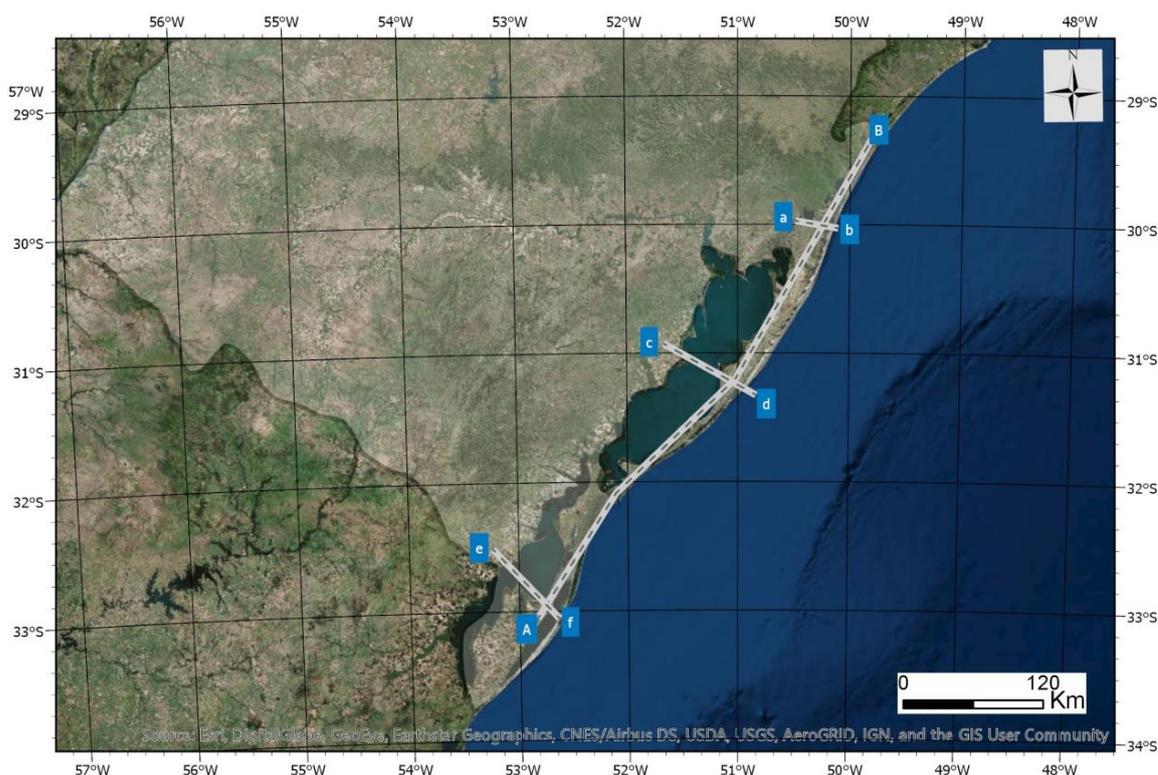


Figura 23: Localização das sondagens e das seções elaborados para definição da espessura do SAC.

Na região norte, mais precisamente entre os municípios de Osório e Torres, a espessura do SAC é apresentada com maior nível de detalhe pelo fato de que nesta região estão concentradas as sondagens realizadas pela CPRM.

O perfil geológico esquemático A-B (Figura 24), com direção SW-NE representa vista de corte paralelo a linha de costa. Na região norte, os sedimentos da Bacia de Pelotas estão sobrepostos as rochas sedimentares da Bacia do Paraná, sendo que a espessura do pacote sedimentar que representa o SAC vai diminuindo gradativamente até o município de Torres.

Na região central a sedimentação na bacia atinge 1560m de profundidade próximo a linha de praia, representando a faixa com maior espessura de sedimentos da PCRS.

Na região sul não é possível caracterizar precisamente a espessura do pacote sedimentar, visto que única sondagem realizada na região chegou a 320 metros, porém não atingindo o embasamento.

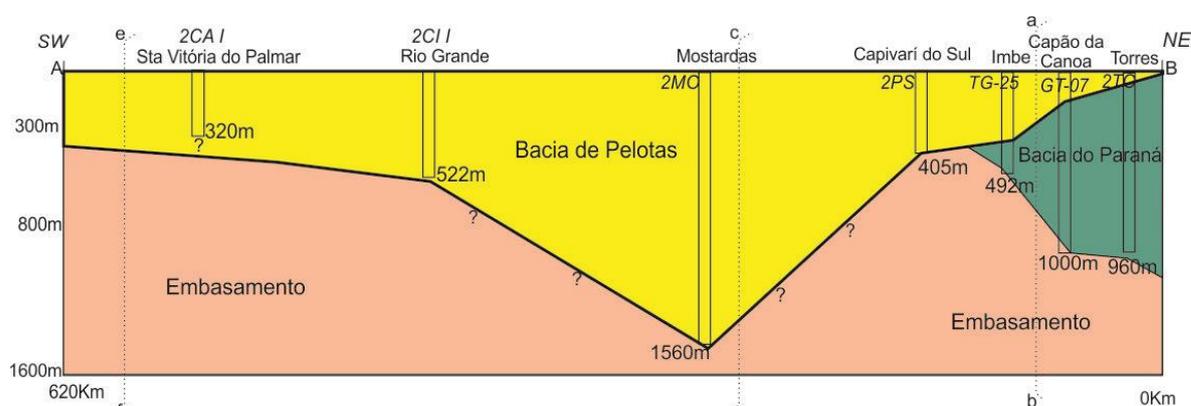


Figura 24: Perfil esquemático A-B paralelo a linha de costa representando espessura do SAC na PCRS.

Os perfis apresentados na Figura 25 representam cortes transversais a linha de costa com direção aproximada E-W.

Na região norte (Figura 25 A) os sedimentos da Bacia de Pelotas estão limitados pela escarpa formada pelas rochas vulcânicas da Bacia do Paraná. Com cerca de 20km de extensão E-W representa a faixa mais estreita da PCRS. Próximo ao município de Osório apresenta espessuras de 250 a 350m chegando a 490m próximo a linha de costa.

A região central (Figura 25 B) é onde a PCRS é mais extensa, com cerca de 100km no sentido NW-SE. Na faixa localizada a oeste as espessuras variam de 100m próximo as rochas do embasamento a 160m próximo a da Lagoa dos Patos.

Na região sul (Figura 25 C) o limite oeste da bacia é representado por rochas cristalinas do Escudo Sul-riograndense. O perfil NW-SE apresenta cerca de 80km de largura com pacotes sedimentares de 160m de espessura próximo a Lagoa Mirim.

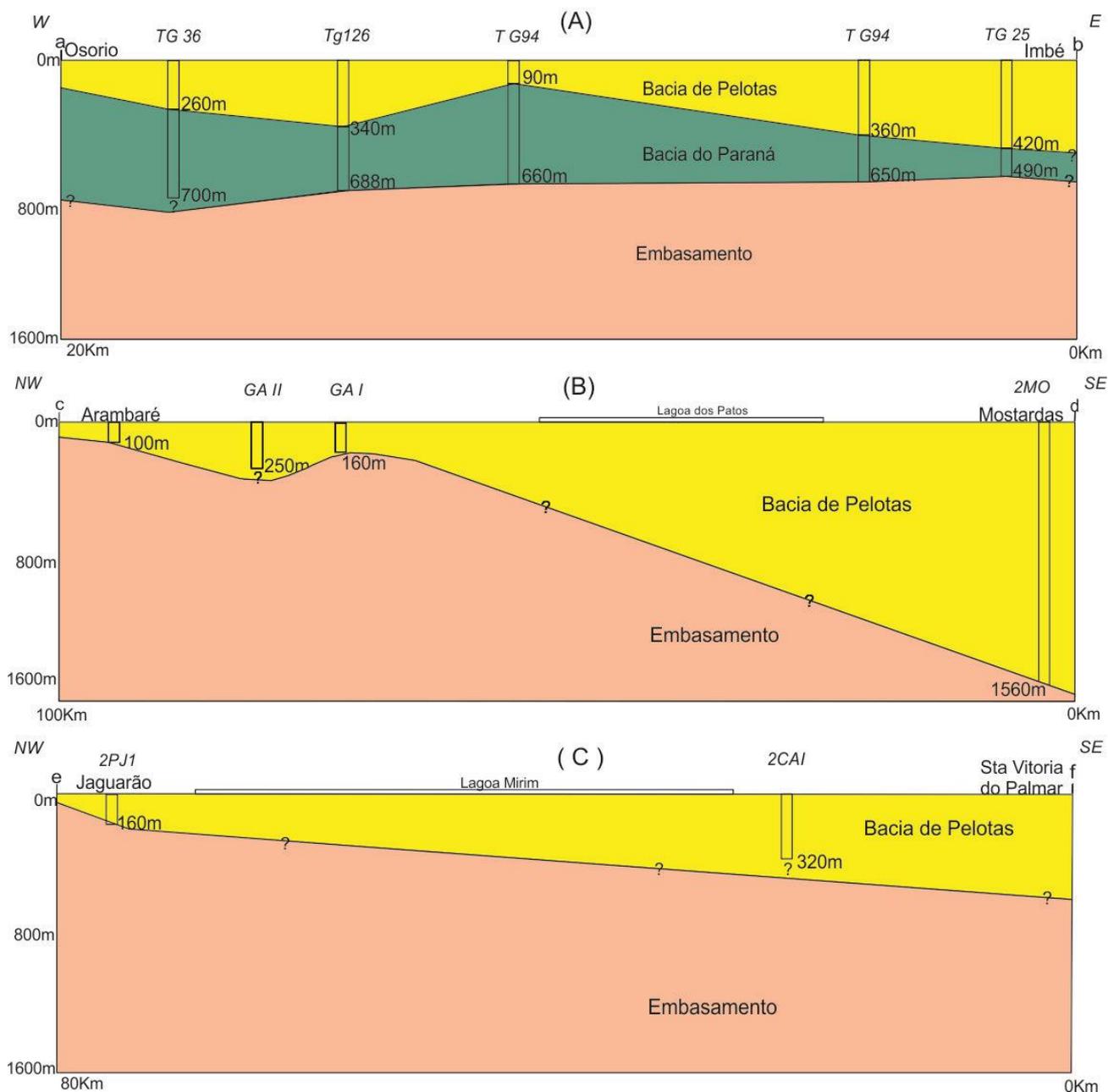


Figura 25: Perfis geológico esquemático, perpendicular a linha de costa, representando a espessura do SAC na região norte (A), central (B) e sul (C).

A análise desses perfis permite identificar uma grande variação da profundidade do embasamento para as diferentes regiões da PCRS, mostrando um claro controle estrutural. Trabalhos como o de GHIGNONE (1960); CORRÊA (1990); FONSECA (2006); e ROSA (2009) identificam e descrevem as principais estruturas formadas ao longo da evolução da bacia.

4.3 O Sistema Aquífero Costeiro na Região Norte da PCRS

4.3.1 Unidades Hidroestratigráficas

A separação de diferentes unidades hidroestratigráficas buscou identificar pacotes sedimentares que possam apresentar, em escala regional, comportamento hidrogeológico semelhantes. Por meio dos perfis litológicos e geofísicos fica evidente a grande heterogeneidade que marca os pacotes sedimentares, sendo que as unidades hidroestratigráficas apresentam camadas argilosas/arenosas de variadas espessuras, porém sem continuidade lateral que permita sua individualização em escala regional.

O resultado da correlação dos dados geológicos e geofísicos é exemplificado na Figura 26, onde estão apresentados os perfis de quatro poços representativos (selecionados dos quinze poços analisados) da região. Os respectivos perfis apresentam as separações que serviram de base para divisão em quatro unidades hidroestratigráficas.

O modelo conceitual elaborado é apresentado através de dois blocos diagramas (regiões A e B), onde está representada a distribuição espacial das quatro unidades hidroestratigráficas identificadas. Os blocos diagrama apresentam direção principal SW-NE com cortes SE-NW, com a projeção de perfis de poços representativos das diferentes unidades hidroestratigráficas. Os poços projetados estão identificados com código do SIAGAS.

Em função dos dados dos poços disponíveis, a delimitação das unidades hidroestratigráficas se limitou a 100 m de profundidade, sendo a unidade 4 considerada indivisa até a base do SAC. Os dados disponíveis para profundidades maiores se limitam a poucos poços e a perfilagens geofísicas de sondagens estratigráficas, os quais permitem supor que o principal potencial aquífero do SAC está em profundidades menores que 100 m, principalmente devido a elevados valores de sólidos totais dissolvidos identificados nos perfis geofísicos.

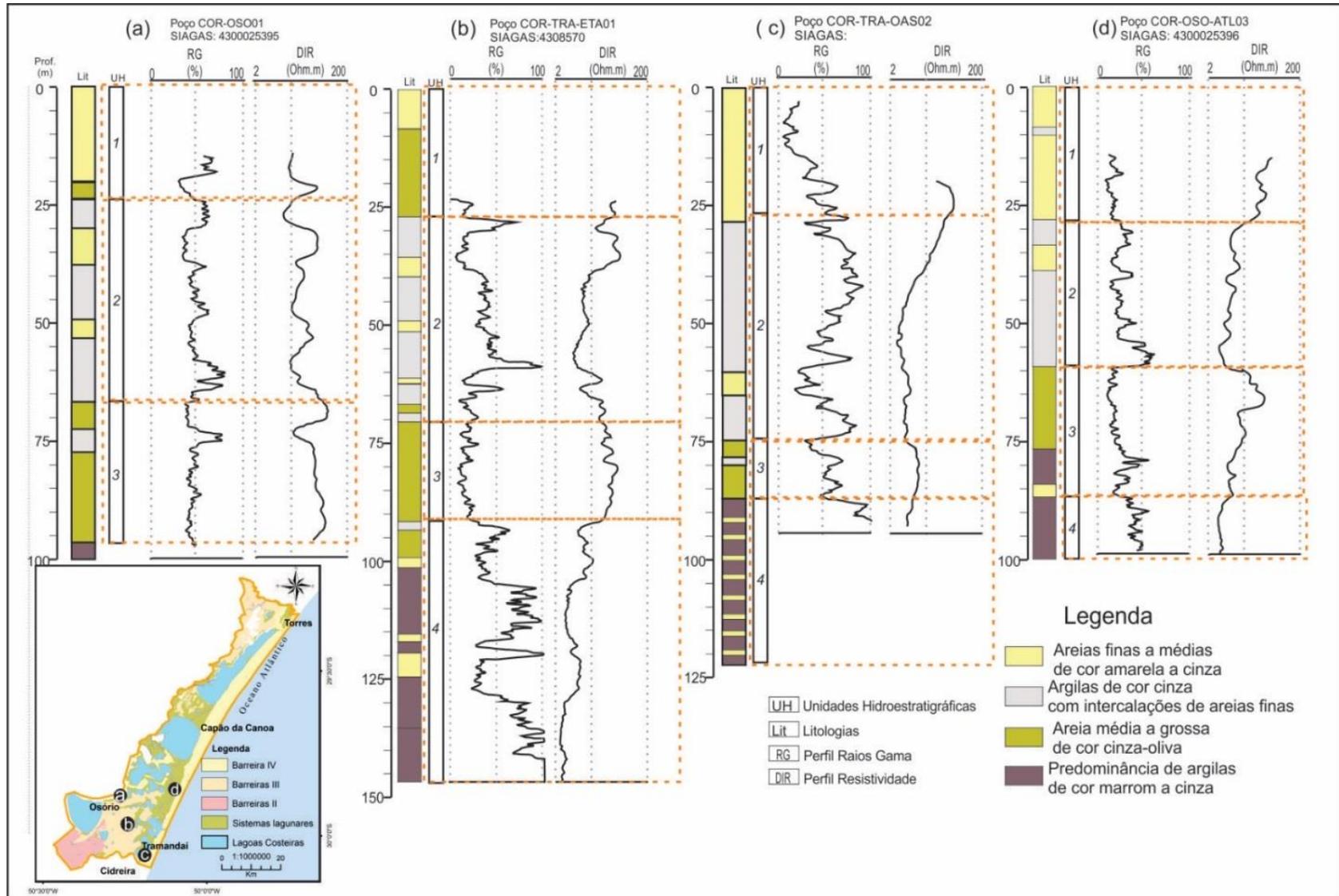


Figura 26: Perfis litológicos e geofísicos representativos da região, exemplificando a ocorrência das unidades hidroestratigráficas identificadas.

No bloco diagrama da Figura 27 está sendo representada a porção A da área, onde o SAC se apresenta em uma estreita faixa SW-NE (aproximadamente 10 km) limitada a oeste pelas rochas vulcânicas e a leste pela linha de costa.

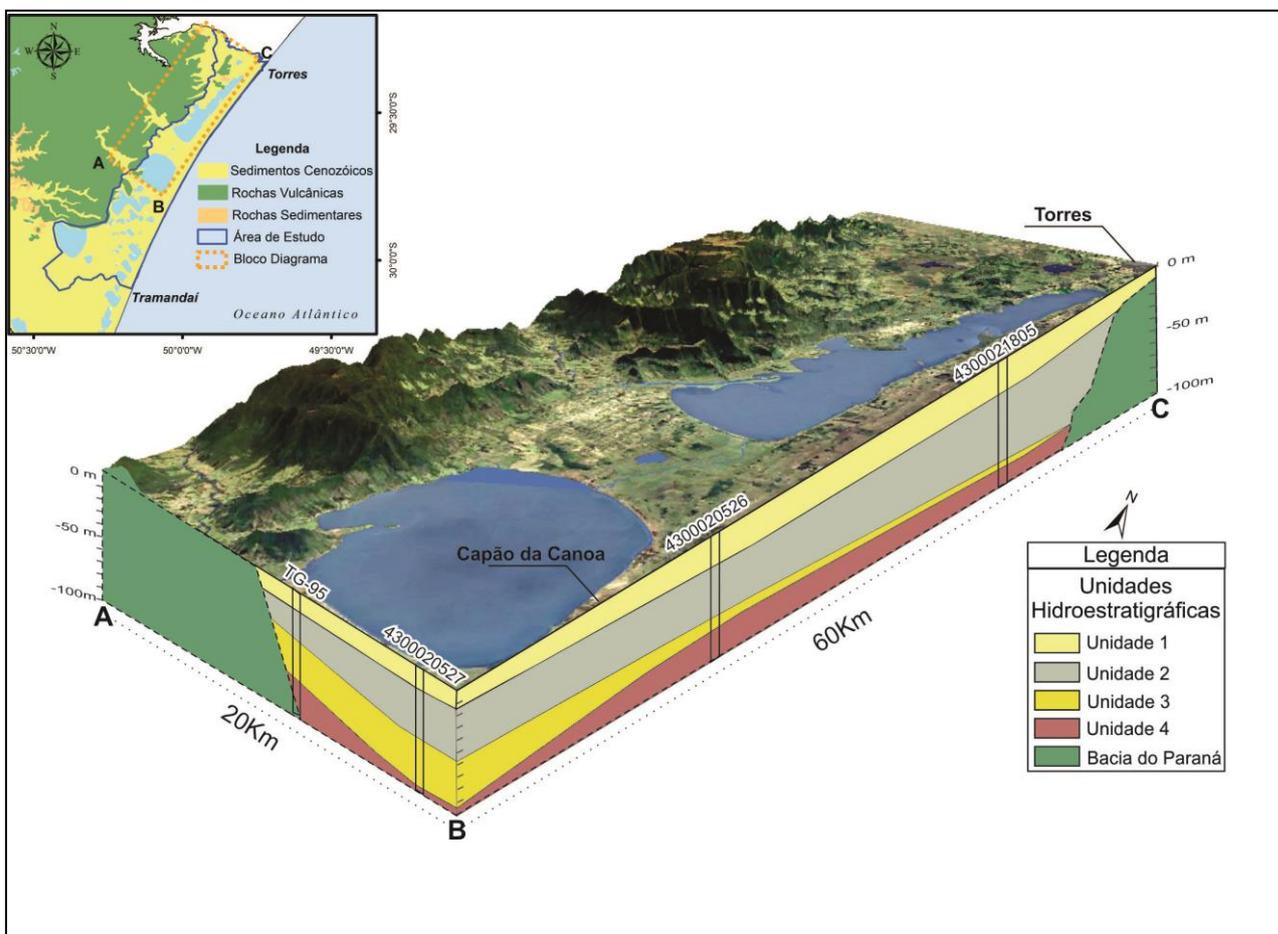


Figura 27: Bloco diagrama esquemático do modelo conceitual gerado para a porção A da área, mostrando espessuras e distribuição das unidades hidroestratigráficas identificadas.

Na Figura 28 é representada a porção B da área, onde o SAC ocupa uma área mais ampla (aproximadamente 20 km).

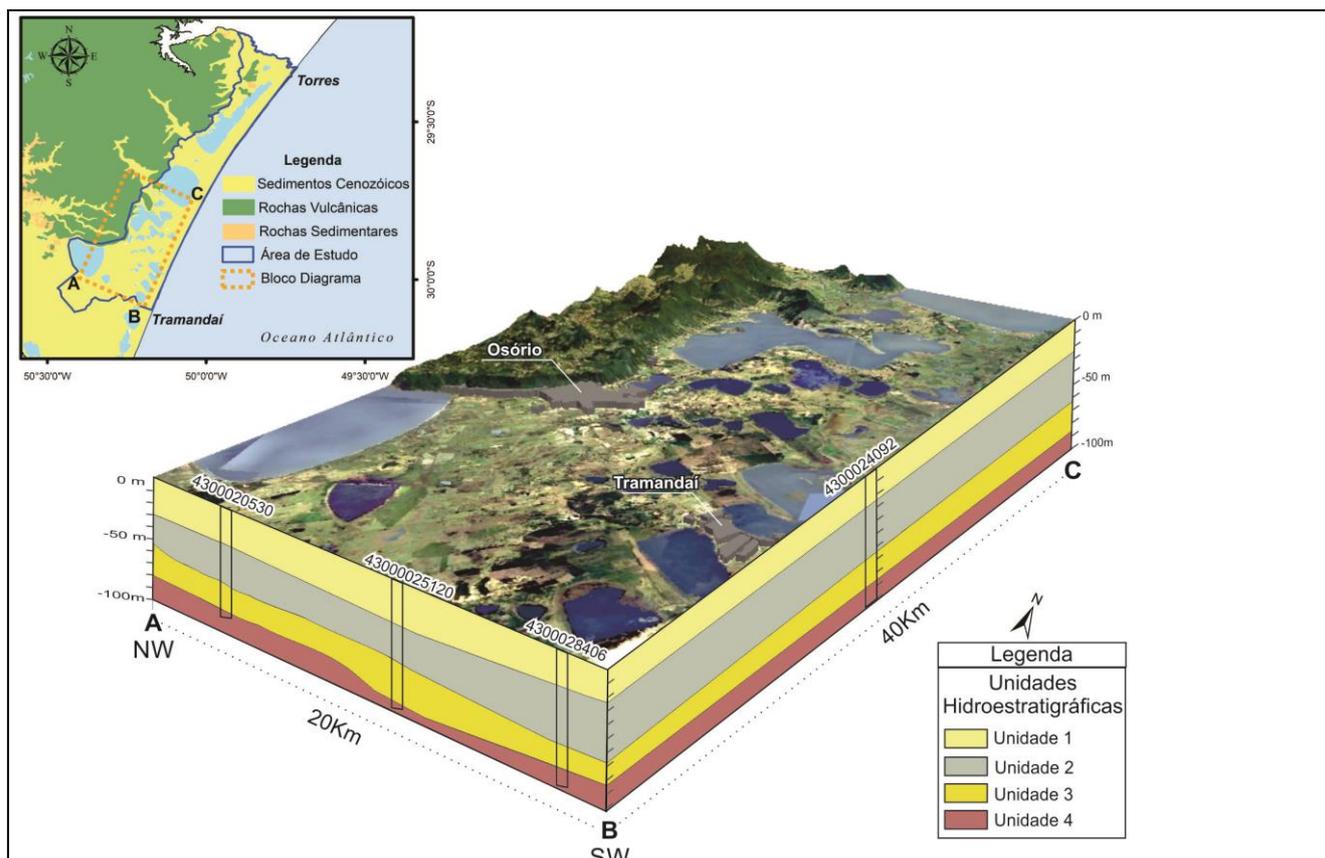


Figura 28: Bloco diagrama esquemático do modelo conceitual gerado para a porção B da área, mostrando espessuras e distribuição das unidades hidroestratigráficas identificadas.

As unidades hidroestratigráficas 1 e 2 estão relacionadas aos sistemas deposicionais laguna-barreira e marinhos, e apresentam distribuição uniforme com variações de espessuras na ordem de 10 m. Já a unidade hidroestratigráfica 3 apresenta sedimentos relacionados a porções basais do sistema laguna-barreira, com espessuras maiores na porção sul e diminuindo gradativamente em direção a norte.

4.3.2 Unidades Hidroestratigráficas do SAC na região Norte

Para a avaliação das diferentes unidades hidroestratigráficas, os valores de resistividade elétrica, porosidade total e efetiva e sais totais dissolvidos foram extraídos diretamente dos perfis compostos das perfilagens geofísicas. A Figura 29 apresenta esses dados plotados em diagramas de caixa, indicando os valores máximos, mínimos, 1º e 3º quartis e mediana para cada unidade hidroestratigráfica.

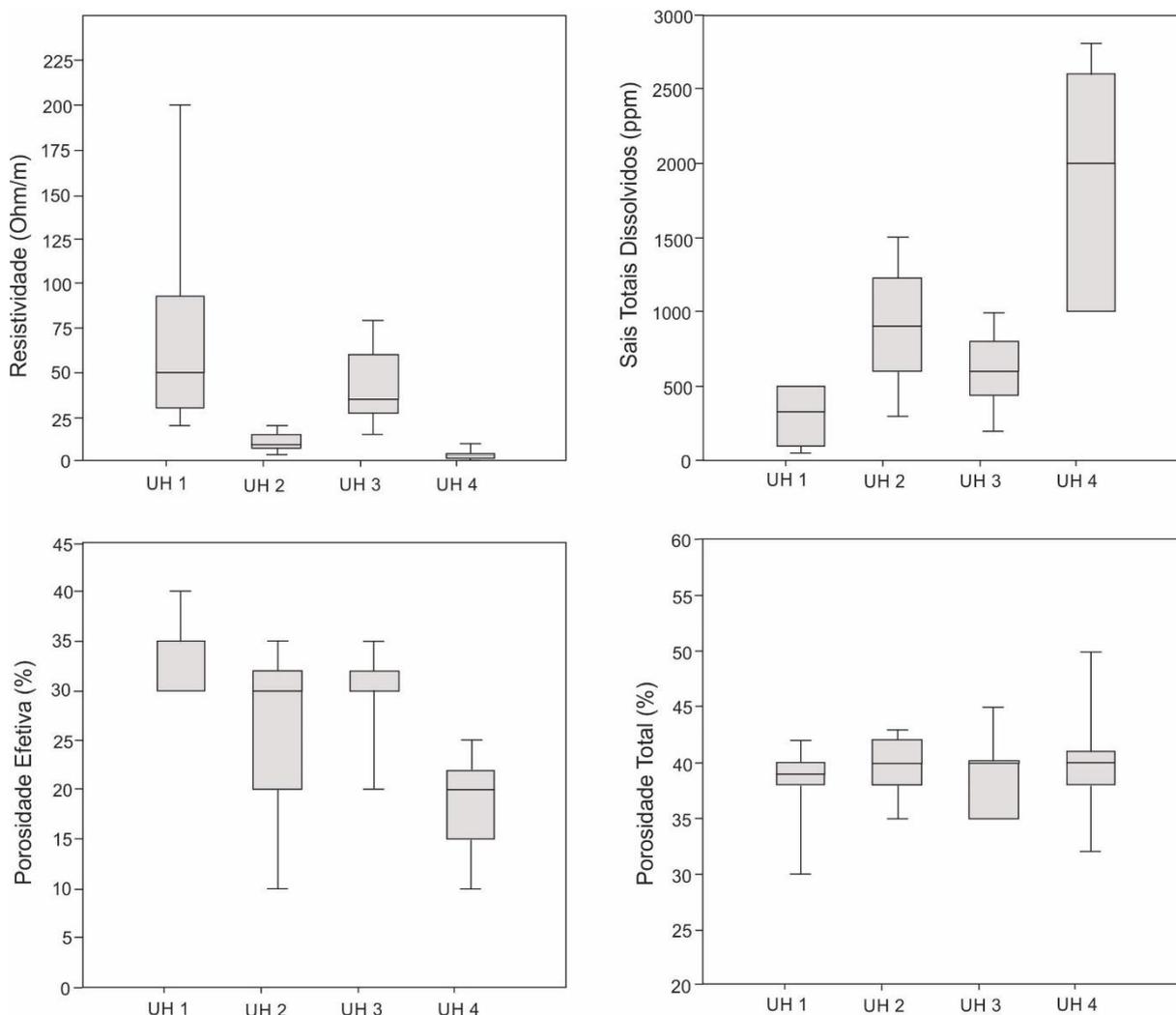


Figura 29: Diagramas de caixa com os valores de resistividade elétrica, porosidade efetiva e sais totais dissolvidos para cada unidade hidroestratigráfica.

Unidades Hidroestratigráfica 1

A unidade hidroestratigráfica 01 representa um aquífero livre e é caracterizada pela ocorrência de sedimentos arenosos inconsolidados de tonalidades amareladas, apresentando características distintas nas camadas de topo e base. No topo da unidade predominam areias de granulometria média a fina, grãos bem selecionados e baixo grau de compactação. Na base predominam areias com granulometria fina com presença de lentes argilosas descontínuas e de espessuras variáveis. Estes sedimentos demonstram uma distribuição relativamente homogênea ao longo da região e espessuras variando de 15 a 30 m. De acordo com os perfis geofísicos, essa unidade apresenta medianas com valores de resistividade elétrica de 50,0 ohm/m, concentração de sais totais dissolvidos igual a 325 ppm, porosidade total de 39% e porosidade efetiva de 35%.

Unidades Hidroestratigráfica 2

Trata-se de um espesso pacote de sedimentos predominantemente argilosos de coloração cinza com presença de lentes/camadas de areias finas a muito finas em proporções variáveis, com espessuras que alcançam valores máximos de 45 m na parte leste, com diminuição gradativa para oeste. Essas camadas podem apresentar fragmentos de conchas provavelmente relacionados a depósitos marinhos. Mostram continuidade lateral ao longo de toda a região.

De acordo com os perfis geofísicos, essa unidade apresenta medianas com valores de resistividade elétrica de 10,0 ohm/m, concentração de sais totais dissolvidos igual a 900 ppm, porosidade total de 40% e porosidade efetiva de 30%.

Unidades Hidroestratigráfica 3

É constituída predominantemente por sedimentos arenosos de granulometria média a grossa de coloração acinzentada a bege, com raras intercalações argilosas. Ao sul do município de Capão da Canoa ocorrem camadas de areia grossa a muito grossa atingindo espessuras de até 30m. Segundo (COLLISCHONN, 2021) essa camada de sedimentos de maior granulometria está associada a sistemas aluviais (paleocanais). Esta unidade possui continuidade lateral em toda a região e suas espessuras variam de 5 a 40m.

De acordo com os perfis geofísicos, essa unidade apresenta medianas com valores de resistividade elétrica de 35,0 ohm/m, concentração de sais totais dissolvidos igual a 600 ppm, porosidade total de 40% e porosidade efetiva de 30%.

Unidades Hidroestratigráfica 4

Representam camadas de sedimentos predominantemente argilosos de coloração cinza escura a marrom. A delimitação do topo da unidade é bem evidente tanto nos perfis dos poços como nos dados geofísicos, sendo possível sua caracterização a profundidades de até 100 m. Em função da escassez de poços e perfilagens mais profundas, o limite de base da unidade 4 está sendo considerado como sendo o contato inferior do SAC. Em profundidades maiores que 100 m não é possível fazer uma individualização precisa desta unidade, porém, os dados das sondagens sugerem que há um comportamento hidroestratigráfico bem próximo ao observado na porção superior, com intercalações argilo-arenosas de variadas espessuras e gradual aumento da fração argila.

De acordo com os perfis geofísicos, essa unidade apresenta medianas com valores de resistividade elétrica de 3,0 ohm/m, concentração de sais totais dissolvidos igual a 2000 ppm, porosidade total de 39% e porosidade efetiva de 20%.

4.3.3 Caracterização Hidrodinâmica do SAC na região Norte

Para caracterização hidrodinâmica das unidades hidroestratigráficas foram analisados dados de vazão (Q), nível estático (NE), capacidade específica (Q/s) e transmissividade (T).

A Tabela 3 apresenta o resumo estatístico com os dados e valores utilizados para cada unidade hidroestratigráfica. Nota-se que valores de NE das UH-1 e UH-2 são semelhantes e menos profundos que os das UH-3 e UH-4, indicando relação de diferentes condições de confinamento.

Tabela 3: Resumo estatístico onde N=número de amostras, Min=Valor mínimo, Max=Valor máximo e Med=Mediana.

| | UH-1 | | | | UH-2 | | | |
|----------------|---------------------------|---------------------|-----------------------|--------|---------------------------|---------------------|-----------------------|--------|
| | Q/s (m ³ /h/m) | T m ² /h | Q (m ³ /h) | NE (m) | Q/s (m ³ /h/m) | T m ² /h | Q (m ³ /h) | NE (m) |
| N | 13 | 3 | 15 | 15 | 4 | 1 | 4 | 4 |
| Min | 0,12 | 1,81 | 1,58 | 0,56 | 0,07 | 0,73 | 4,00 | 0,46 |
| Max | 8,06 | 7,44 | 54,55 | 3,30 | 12,39 | 0,73 | 27,31 | 8,96 |
| Mediana | 2,58 | 4,50 | 16,00 | 1,25 | 1,12 | 0,73 | 20,87 | 1,62 |
| | UH-3 | | | | UH-4 | | | |
| | Q/s (m ³ /h/m) | T m ² /h | Q (m ³ /h) | NE (m) | Q/s (m ³ /h/m) | T m ² /h | Q (m ³ /h) | NE (m) |
| N | 21 | 11 | 22 | 22 | 5 | * | 6 | 6 |
| Min | 0,2 | 0,1 | 4,5 | 0 | 2,2 | * | 8,57 | 1,8 |
| Max | 26,5 | 43,8 | 230 | 13,46 | 10,0 | * | 120 | 9,5 |
| Mediana | 5,9 | 11,0 | 60,65 | 5,12 | 4,4 | * | 28 | 7,03 |

Os valores foram obtidos dos testes de bombeamento e estão plotados no diagrama da Figura 30, sendo apresentado o comparativo entre as UH. Para o parâmetro T só constam valores das UH 1 e 3 devido ao fato de não haver dados suficientes para representação das UH 2 e 4.

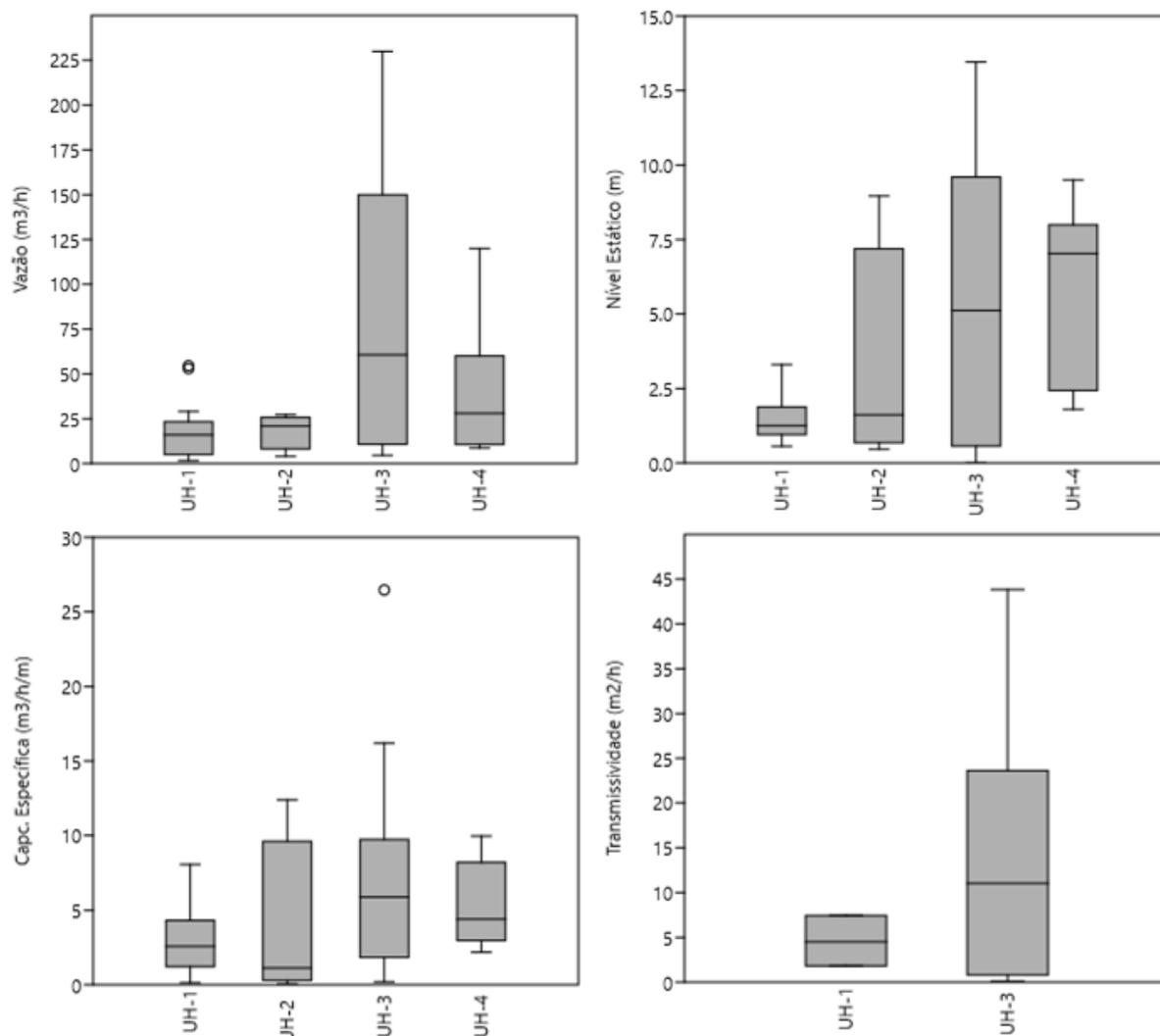


Figura 30: Diagramas com os valores das principais características hidrodinâmicas das unidades hidroestratigráficas.

Através da análise dos diagramas se pode observar a grande amplitude de valores para os diferentes parâmetros, sendo assim, os valores de mediana são os que melhor representam cada UH. Cabe ressaltar também que os valores de vazão são influenciados pela capacidade do equipamento de bombeamento instalado no poço.

A UH-1, não confinada e predominantemente arenosa, apresenta $Q_{med}=16 \text{ m}^3/\text{h}$ com valor máximo encontrado de $54,5 \text{ m}^3/\text{h}$, $Q/s_{med}=2,6 \text{ m}^3/\text{h/m}$ e $T_{med}=4,5 \text{ m}^2/\text{h}$. Os valores de NE representam bem a potenciométrica da região, com $NE_{med}=1,25 \text{ m}$ com valor máximo de $3,3 \text{ m}$.

A UH-2, predominantemente argilosa, apresenta valores de mediana próximos aos da UH-1 pelo fato de que os dados disponíveis são de poços que captam água das porções mais arenosas da unidade. As vazões são relativamente altas, com $Q_{med}=20 \text{ m}^3/\text{h}$ com $Q/s_{med}=1,1$

$\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$. Os valores de $\text{NE}_{\text{med}}=1,6\text{m}$ sugere que nessa unidade ocorra confinamentos ocasionado pelas camadas de sedimentos argilosos sobre as camadas arenosas da unidade.

Já a UH-3, formada predominantemente por areias médias, difere das unidades sobrepostas, apresentando $Q_{\text{med}}=60 \text{ m}^3/\text{h}$ com $Q/s_{\text{med}}=5,9 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ e $T_{\text{med}}=11 \text{ m}^2/\text{h}$. O valor de $\text{NE}_{\text{med}}=5,12\text{m}$ reflete o confinamento imposto principalmente pela UH-2.

A UH-4 apresenta número reduzido de amostras devido a sua profundidade e as suas características litológicas com predominância de argilas, sendo que poucos poços captam água exclusivamente nessa unidade. Contudo os poços apresentam bons dados de produção com $Q_{\text{med}}=28 \text{ m}^3/\text{h}$ com $Q/s_{\text{med}}=4,3 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$. Assim como na UH-2 os dados de $\text{NE}_{\text{med}}=7\text{m}$ indicam que essa unidade é confinada pelas camadas de sedimentos finos.

4.3.4 Caracterização Hidroquímica do SAC na região Norte

A seguir é apresentada a caracterização hidroquímica das águas baseada em dados de poços representativos de cada unidade hidroestratigráfica. A avaliação do balanço iônico das 38 amostras representativas das 4 unidades hidroestratigráficas mostra que 86% dos erros são menores que 10%, sendo aceites erros menores que 20%.

A seguir são expostos os resultados referentes aos dados dos parâmetros Potencial Hidrogeniônico (pH), Condutividade Elétrica (CE) Sólidos Totais Dissolvidos (STD) e Alcalinidade para cada uma das unidades hidroestratigráficas. A Tabela 4 apresenta o resumo estatístico com os dados utilizados para a análise desses parâmetros.

Tabela 4: Resumo estatístico onde N=número de amostras, Min=Valor mínimo, Max=Valor máximo e Med=Mediana.

| | UH-1 | | | | UH-2 | | | |
|----------------|------|-------------------------------------|---------------|------------------------|------|-------------------------------------|---------------|------------------------|
| | pH | CE ($\mu\text{S}/\text{cm}^2$) | STD (mg/l) | Alcalinidade (mg/l) | pH | CE ($\mu\text{S}/\text{cm}^2$) | STD (mg/l) | Alcalinidade (mg/l) |
| N | 12 | 12 | 11 | 12 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Min | 5,76 | 96,9 | 46 | 19 | 7,5 | 316,8 | 159 | 154 |
| Max | 7,4 | 502 | 308,8 | 140 | 8,1 | 1069 | 544 | 212,89 |
| Mediana | 6,8 | 232,7 | 155,4 | 52,5 | 7,92 | 335 | 204,9 | 165 |
| | UH-3 | | | | UH-4 | | | |
| | pH | CE ($\mu\text{S}/\text{cm}^2$) | STD (mg/l) | Alcalinidade (mg/l) | pH | CE ($\mu\text{S}/\text{cm}^2$) | STD (mg/l) | Alcalinidade (mg/l) |
| N | 19 | 19 | 18 | 19 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Min | 7,3 | 280 | 147 | 88 | 6,9 | 231 | 166 | 95 |
| Max | 8,6 | 1183 | 679 | 225 | 8 | 3540 | 1740 | 231,28 |
| Mediana | 7,7 | 534 | 298,5 | 163 | 7,28 | 523 | 292 | 166 |

A Figura 31 apresenta os diagramas de caixa mostrando a distribuição dos valores de pH e Condutividade elétrica.

Os valores de pH apresentam uma clara diferença entre a UH-1 e as demais unidades, sendo que no geral os valores se encontram entre 6,4 e 8,1, representando águas que variam de levemente ácidas a básicas. O valor de $pH_{med}=6,8$ da UH-1 reflete a origem recente das águas, provavelmente oriundas da infiltração direta da água da chuva. Valores levemente básicos das unidades 2, 3 e 4 (pH_{med} entre 7,2 e 7,9) podem estar relacionados a alcalinidade dessas águas.

Os valores de CE também demonstram a característica de águas pouco mineralizadas da UH-1, com $CE_{med}=232,7 \mu S/cm^2$ com valor máximo de $502 \mu S/cm^2$. A UH-2 apresenta valores variando de 316,8 a $1069 \mu S/cm^2$, e mesmo com pequeno número de amostras, indica a presença de águas mais mineralizadas em relação a UH-1. Os valores da UH-3 variando de 280 a $1183 \mu S/cm^2$ e $CE_{med}=534 \mu S/cm^2$ demonstram o enriquecimento iônico das águas desta unidade, porém com grande variabilidade. Já a UH-4 apresenta valores que vão de 231 a $3540 \mu S/cm^2$, porém, assim como a UH-2 está representada por um pequeno número de amostras, o que dificulta a sua caracterização.

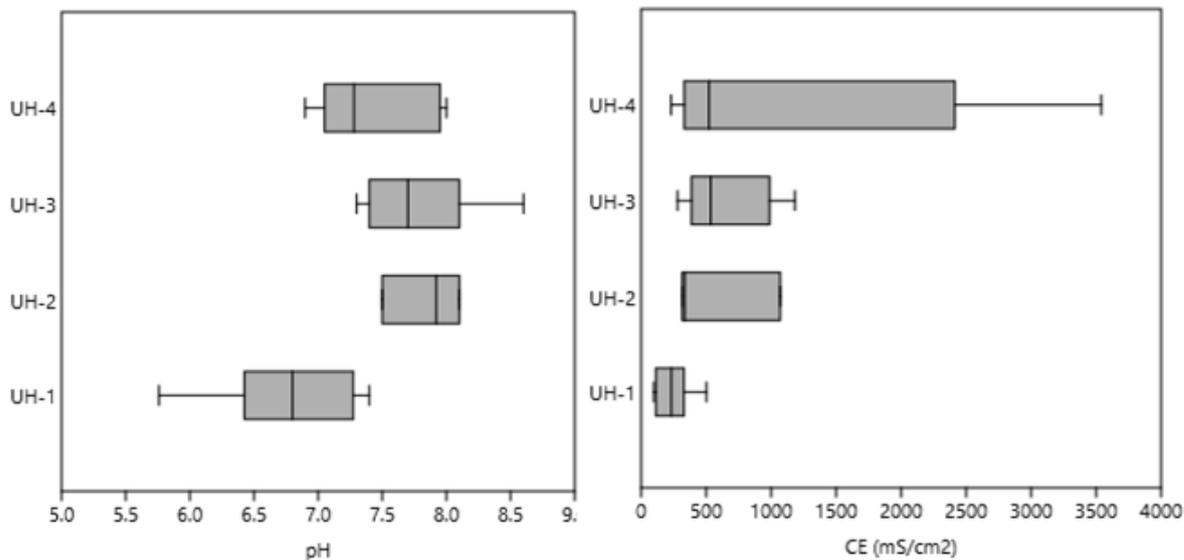


Figura 31: Diagramas de caixa mostrando a distribuição dos valores dos parâmetros pH e Condutividade elétrica.

A alta variabilidade dos valores de CE, principalmente nas UH 2, 3 e 4 reflete os graus de confinamento, as diferentes condições de circulação da água, tempo de residência e de interações água/mineral. As camadas de sedimentos possuem além de diferenças

granulométricas, características associadas ao ambiente de sedimentação, que acabam tendo influência na composição da água subterrânea das diferentes unidades.

Conforme se pode observar na Figura 32, a mesma tendência do comportamento dos parâmetros pH e CE, pode ser observado nos valores de alcalinidade e STD. A UH-1 $Alc_{med}=52,5mg/l$ e as UH 2, 3 e 4 com valores de mediana variando de 163 a 166 mg/l. Já o STD da UH-1 $med=155,4mg/l$ e as UH, 1, 2 e 3 variando de 205 a 292mg/l. Esses baixos valores de STD indicam a presença de águas pouco salinizadas ($STD < 1000$ mg/l). Porém na UH-4 foi identificada amostra com altos valores tanto de STD como de CE, podendo estar associado a origem marinha dos sedimentos ou que essa unidade pode apresentar porções com interferência de cunha salina.

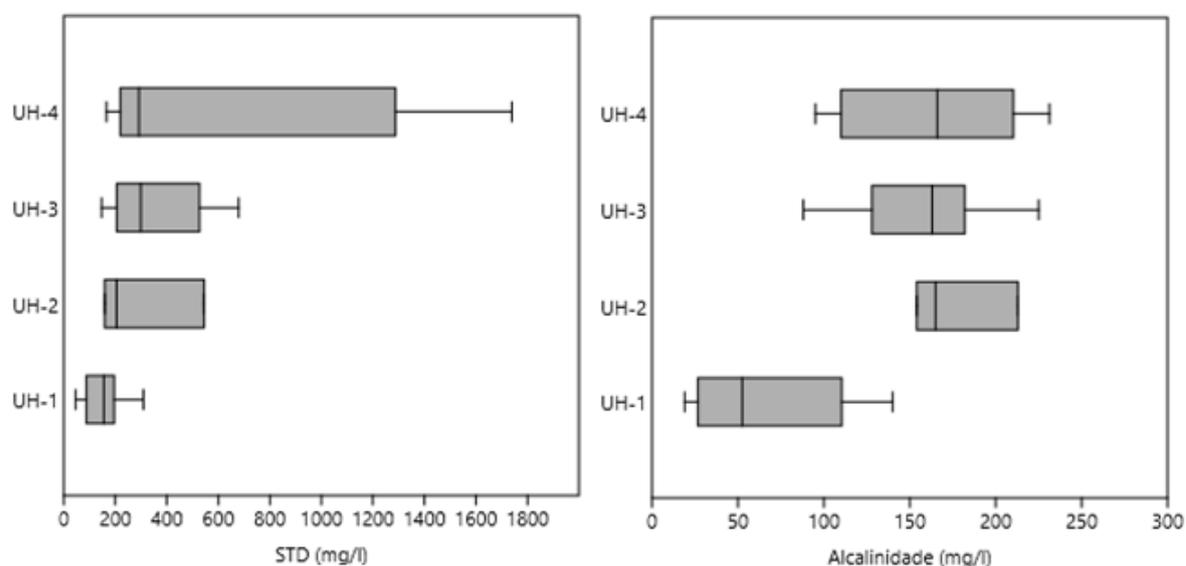


Figura 32: Diagramas de caixa mostrando a distribuição dos valores dos parâmetros Sólidos Totais Dissolvidos e Alcalinidade das unidades hidroestratigráficas da região norte.

A Figura 33 apresenta a distribuição dos principais constituintes presentes nas águas subterrâneas do SAC. Os valores de medianas das concentrações dos principais cátions seguem a seguinte ordem:

- UH-1: $Ca^{2+} > Na^+ > Mg^{2+}$;
- UH-2: $Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^+$;
- UH-3: $Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+}$;
- UH-4: $Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+}$;

Já os valores das medianas das concentrações dos principais ânions seguem a ordem $HCO_3^- > Cl^- > SO_4^{2-}$ para todas as unidades.

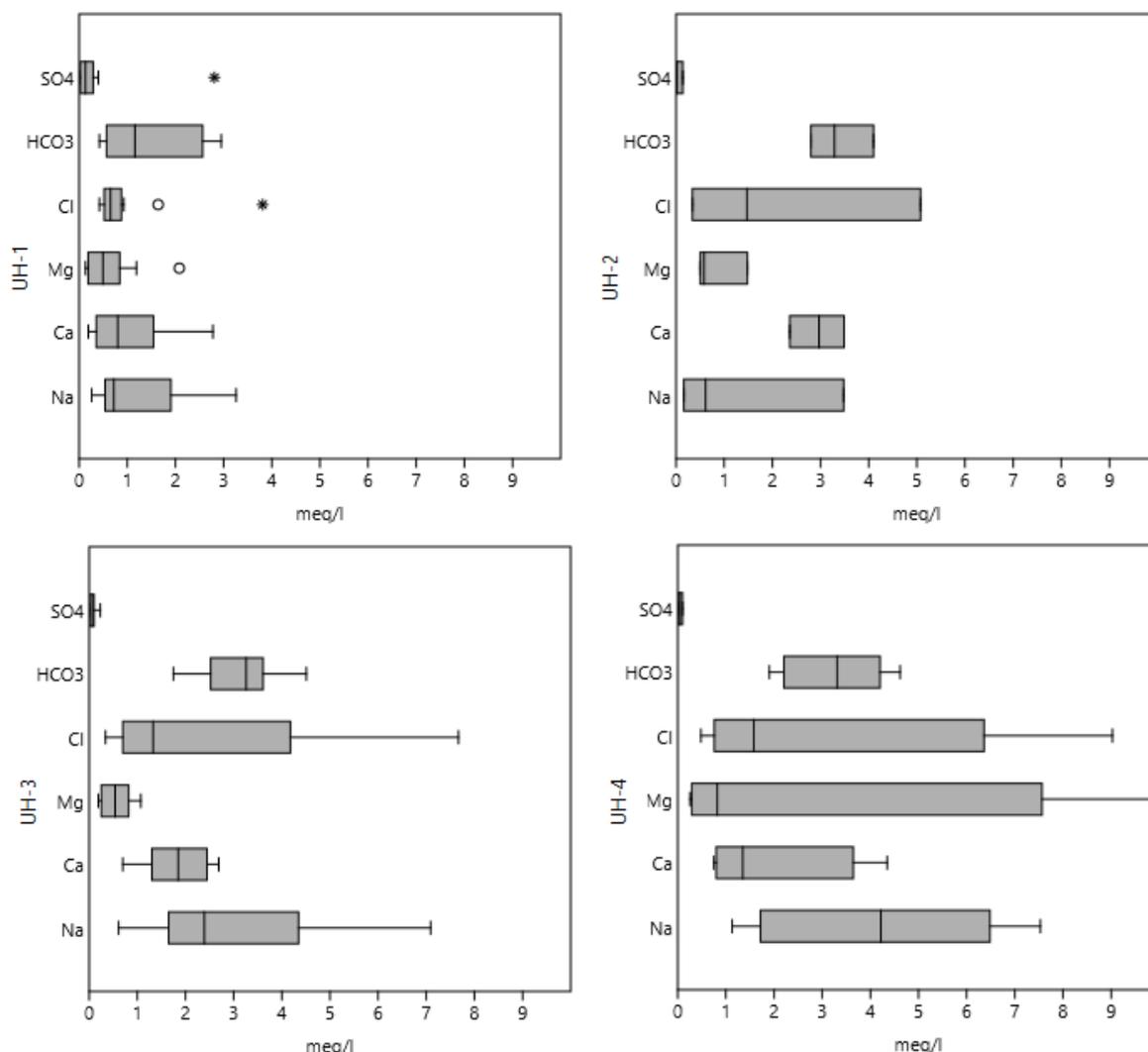


Figura 33: Diagramas de caixa mostrando as concentrações dos principais íons constituintes das águas subterrâneas da região norte.

As correlação entre o Na^+ com os ânions Cl^- e HCO_3^- é utilizada para identificar possíveis efeitos de intrusões salinas em aquíferos costeiros (KIM et al, 2003; WEN *et al.*, 2012; ZAMRSKY *et al.*, 2020). Na Figura 34 se observa que para relação Na^+/Cl^- a grande maioria das amostras se encontra acima da linha 1:1, indicando não haver grande influência de intrusões marinhas na região. As amostras com maior concentrações de cloretos podem estar relacionadas a processos de dissolução de minerais argilosos. As relações do Na^+ com o HCO_3^- , mostra a grande variação composicional das águas porém com tendência de predomínio do ânion HCO_3^- .

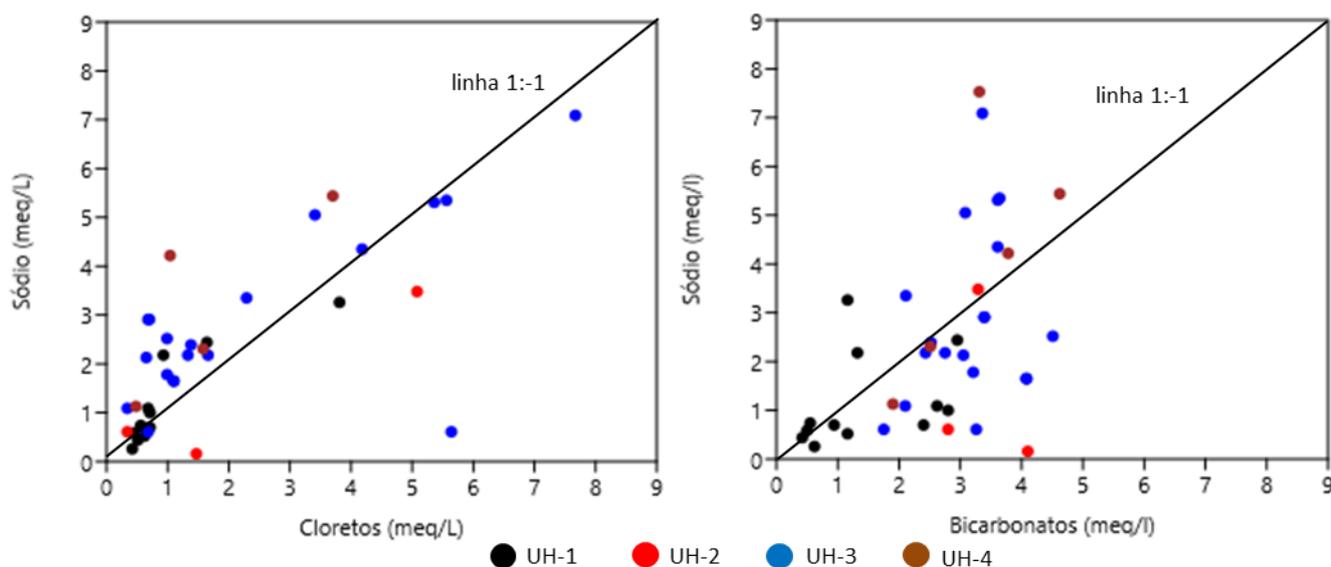


Figura 34: Relação entre $\text{Na}^+ \times \text{Cl}^-$ e $\text{Na}^+ \times \text{HCO}_3^-$.

A avaliação da associação entre os principais íons e STD são úteis para interpretar os principais processos de evolução hidrogeoquímica que ocorrem no aquífero (ZHOU; LI; LU, 2017). Para isso foi realizada a correlação de *Person* para amostras de cada unidade, apresentado nas Tabela 5 a Tabela 8, sendo destacadas as relações mais significativas (maiores que 0,8).

Tabela 5: Correlação entre os principais parâmetros físico-químicos da UH-1 na região norte.

| | STD | Alcalin | Na^+ | Ca^{2+} | Mg^{2+} | Cl^- | HCO_3^- | SO_4^{2-} |
|--------------------|------|---------|---------------|------------------|------------------|---------------|------------------|--------------------|
| STD | 1 | | | | | | | |
| Alcalin | 0,29 | 1 | | | | | | |
| Na^+ | 0,86 | 0,06 | 1 | | | | | |
| Ca^{2+} | 0,50 | 0,75 | 0,34 | 1 | | | | |
| Mg^{2+} | 0,70 | 0,34 | 0,65 | 0,85 | 1 | | | |
| Cl^- | 0,81 | -0,02 | 0,88 | -0,03 | 0,26 | 1 | | |
| HCO_3^- | 0,60 | 0,67 | 0,33 | 0,63 | 0,45 | 0,13 | 1 | |
| SO_4^{2-} | 0,47 | -0,11 | 0,41 | 0,71 | 0,83 | 0,06 | -0,03 | 1 |

Tabela 6: Correlação entre os principais parâmetros físico-químicos da UH-2 na região norte.

| | STD | Alcalin | Na^+ | Ca^{2+} | Mg^{2+} | Cl^- | HCO_3^- | SO_4^{2-} |
|--------------------|-------|---------|---------------|------------------|------------------|---------------|------------------|--------------------|
| STD | 1 | | | | | | | |
| Alcalin | -0,44 | 1 | | | | | | |
| Na^+ | 1,00 | -0,45 | 1 | | | | | |
| Ca^{2+} | 0,78 | 0,22 | 0,77 | 1 | | | | |
| Mg^{2+} | 1,00 | -0,41 | 1,00 | 0,80 | 1 | | | |
| Cl^- | 0,94 | -0,12 | 0,94 | 0,94 | 0,95 | 1 | | |
| HCO_3^- | -0,24 | 0,98 | -0,26 | 0,42 | -0,21 | 0,09 | 1 | |
| SO_4^{2-} | -0,65 | 0,97 | -0,66 | -0,02 | -0,62 | -0,36 | 0,90 | 1 |

Tabela 7: Correlação entre os principais parâmetros físico-químicos da UH-3 na região norte.

| | STD | Alcalin | Na ⁺ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Cl ⁻ | HCO ₃ ⁻ | SO ₄ ²⁻ |
|-------------------------------|-------|---------|-----------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|
| STD | 1 | | | | | | | |
| Alcalin | 0,46 | 1 | | | | | | |
| Na ⁺ | 0,70 | 0,33 | 1 | | | | | |
| Ca ²⁺ | 0,89 | 0,65 | 0,54 | 1 | | | | |
| Mg ²⁺ | 0,75 | 0,47 | 0,50 | 0,79 | 1 | | | |
| Cl ⁻ | 0,95 | 0,29 | 0,72 | 0,74 | 0,74 | 1 | | |
| HCO ₃ ⁻ | 0,43 | 0,99 | 0,27 | 0,61 | 0,33 | 0,22 | 1 | |
| SO ₄ ²⁻ | -0,66 | -0,11 | -0,28 | -0,59 | -0,40 | -0,61 | -0,08 | 1 |

Tabela 8: Correlação entre os principais parâmetros físico-químicos da UH-4 na região norte.

| | STD | Alcalin | Na ⁺ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Cl ⁻ | HCO ₃ ⁻ | SO ₄ ²⁻ |
|-------------------------------|------|---------|-----------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|
| STD | 1 | | | | | | | |
| Alcalin | 0,88 | 1 | | | | | | |
| Na ⁺ | 0,62 | 0,72 | 1 | | | | | |
| Ca ²⁺ | 0,98 | 0,81 | 0,69 | 1 | | | | |
| Mg ²⁺ | 0,93 | 0,83 | 0,34 | 0,84 | 1 | | | |
| Cl ⁻ | 0,47 | 0,39 | 0,89 | 0,62 | 0,13 | 1 | | |
| HCO ₃ ⁻ | 0,79 | 0,99 | 0,69 | 0,70 | 0,76 | 0,32 | 1 | |
| SO ₄ ²⁻ | 0,13 | 0,01 | 0,39 | 0,31 | -0,13 | 0,63 | -0,08 | 1 |

Na UH-1 (Tabela 5) e na UH-2 (Tabela 6) se destaca as fortes correlações de STD com Na⁺ e Cl⁻ indicando a predominância destes íons na composição das águas destas unidades. Variações foram identificadas nas unidades mais profundas, onde na UH-3 (Tabela 7) as correlações mais significativas do STD foram identificadas com os íons Ca²⁺ e Cl⁻, e na UH-4 (Tabela 8) com os cátions Ca²⁺ e Mg²⁺.

As águas subterrâneas das diferentes unidades hidroestratigráficas foram classificadas de acordo com o diagrama de Piper (Figura 35), onde as concentrações dos íons maiores são plotadas no diagrama, podendo ajudar a entender o processo controlador da hidroquímica das águas. Como se pode observar a amostras apresentam uma larga distribuição ao longo do diagrama, representando a grande variedade de tipos hidrogeoquímicos das águas subterrâneas.

Porém, apesar dessa larga distribuição, as UH-1 e UH-2 (área 1) são caracterizadas predominantemente por águas bicarbonatadas e cloretadas cálcicas/magnesianas. As UH-3 e UH-4 (área 2) são compostas predominantemente por águas mais evoluídas quimicamente, sendo bicarbonatadas e cloretadas sódicas.

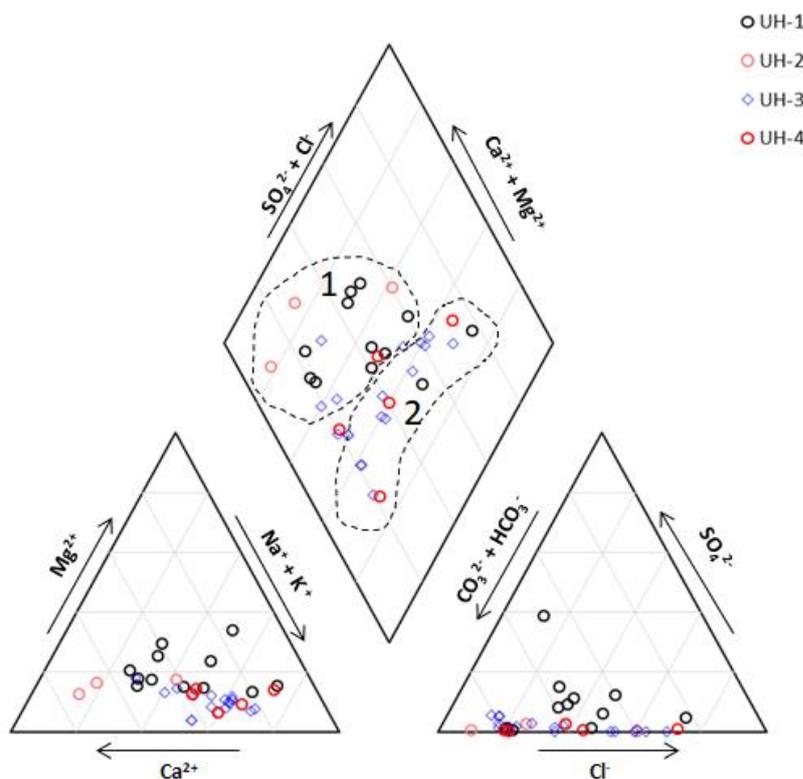


Figura 35: Diagrama de Piper das águas subterrâneas na região norte da PCRS.

A análise dos componentes principais (ACP) foi realizada com os parâmetros pH, condutividade elétrica, alcalinidade, sódio, magnésio, cloreto, bicarbonatos e sulfato. Verificou-se que as duas principais componentes são responsáveis por 64,7% da variabilidade de todo o conjunto de dados referentes às águas subterrâneas do SAC na região norte (Tabela 9).

Tabela 9: Variância total das águas do SAC na região norte.

| Componentes | Total | % variância | % cumulativa |
|-------------|-------|-------------|--------------|
| 1 | 17,00 | 45,92 | 45,92 |
| 2 | 0,69 | 18,78 | 64,70 |
| 3 | 0,59 | 16,10 | 80,80 |
| 4 | 0,34 | 9,30 | 90,10 |
| 5 | 0,26 | 7,14 | 97,24 |
| 6 | 0,05 | 1,54 | 98,78 |
| 7 | 0,02 | 0,73 | 99,51 |
| 8 | 0,01 | 0,37 | 99,88 |
| 9 | 0,004 | 0,12 | 100,00 |

Avaliando-se os componentes de forma individual (Tabela 10), temos que a componente 1 é responsável pelas variáveis mais significativas, possuindo relação positiva

com pH, CE, alcalinidade, Ca^{2+} , e bicarbonato, mostrando o caráter mais alcalino dessas águas. Já para a componente 2 as variáveis mais significativas são o Na^+ e o SO_4^- .

Tabela 10: Matriz de Componentes das águas do SAC na região norte.

| | Componentes | |
|----------------|-------------|-------|
| | 1 | 2 |
| pH | 0,51 | -0,10 |
| Cond. Elétrica | 0,31 | 0,00 |
| Alcalinidade | 0,44 | -0,18 |
| Sódio | 0,27 | 0,91 |
| Calcio | 0,33 | 0,01 |
| Magnésio | 0,043 | 0,03 |
| Cloreto | 0,17 | -0,02 |
| Bicarbonato | 0,44 | -0,14 |
| Sulfato | -0,16 | 0,31 |

A Figura 36 representa as diferentes unidades hidroestratigráficas no gráfico de dispersão *biplot*, onde a componente 1 esta representada no eixo x e a componente 2 no eixo y. O gráfico evidencia as águas pouco mineralizadas da UH-1 bem marcadas pelos baixos valores das componentes 1 e 2. A UH-3 apresenta 50% das amostras representadas predominantemente pela componente 1 e 39% representadas pela componente 1 e 2, indicando águas mais evoluídas quimicamente. Já 11% das amostras desta unidade apresentam características de águas pouco evoluídas, com baixos valores das componentes 1 e 2.

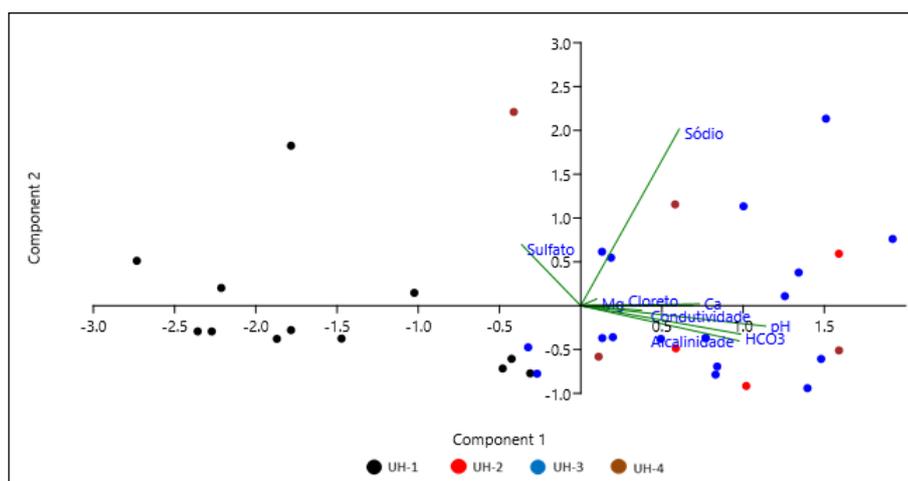


Figura 36: Gráfico de dispersão Biplot representando amostras das unidades hidroestratigráficas do SAC na região norte.

Para melhor entender os principais processos hidroquímicos que ocorrem durante o fluxo subterrâneo, as amostras são plotadas nos diagramas $STD/(Na^+ + Ca^{2+})$ e $STD/(Cl^-/Cl^- + HCO_3^-)$, propostos por Gibbs (GIBBS, 1970) e utilizados em trabalhos recentes como ZHOU *et al*, 2017 e SILVA *et al*, 2021 (Figura 37). Os diagramas indicam que a geoquímica da água subterrânea da região é controlada principalmente pelo processo de intemperismo, ou seja, da interação água/sedimento. Porém se observa, principalmente no diagrama $STD/(Cl^-/Cl^- + HCO_3^-)$ que as águas das UH-1 apresentam forte influencia do processo de precipitação na sua composição, com tendência a salinização das águas da UH-2, UH-4 e parte das amostras da UH-3.

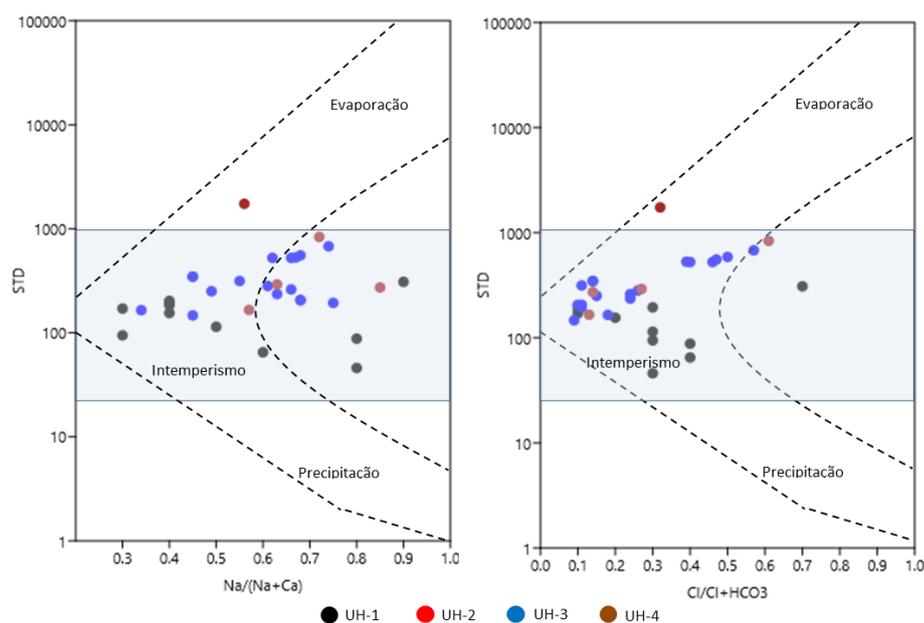


Figura 37: Diagramas de Gibbs, mostrando os principais mecanismos que controlam a composição da água subterrânea na região norte.

Os processos de dissolução são avaliados através das razões $(HCO_3^-/Na^+) / (Ca^{2+}/Na^+)$ e $(Mg^{2+}/Na^+) / (Ca^{2+}/Na^+)$ da Figura 38, onde é possível identificar os minerais dominantes no processo de interação água/sedimento (GAILLARDET *et al*, 1999) (XIAO *et al*, 2015). Se pode observar que as águas são predominantemente influenciadas pelo intemperismo de silicatos, porém com influência de carbonatos.

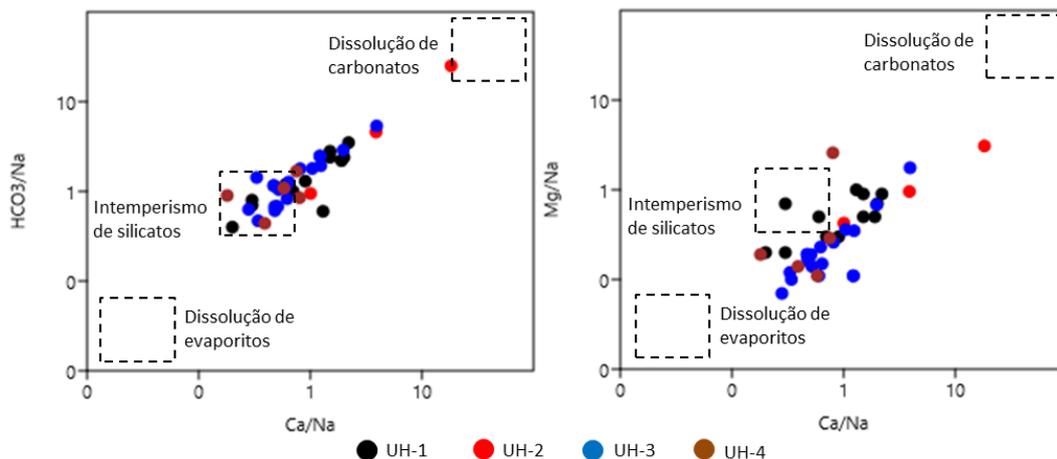


Figura 38: Gráficos das das razões $(\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+) / (\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+)$ e $(\text{Mg}/\text{Na}^+) / (\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+)$.

Segundo FISHER AND MULLICAN (1997) e ZHOU et al, (2017) a relação $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-)$ versus $(\text{Na}^+ - \text{Cl}^-)$ pode ser utilizada para investigar a ocorrência de troca catiônica que ocorrem principalmente em aquíferos confinados (Figura 39). As amostras plotadas no quadrante inferior direito do gráfico e ao longo da linha com inclinação de -1 representam águas onde a troca catiônica é um importante processo de controle da química da água subterrânea.

A Figura 39 mostra que a maioria das amostras das UH-3 e 4 apresentam excesso de Na^+ sobre Cl^- e uma deficiência de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ sobre $\text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-$. Isso indica que ocorrem trocas catiônicas nessas unidades mais profundas e confinadas.

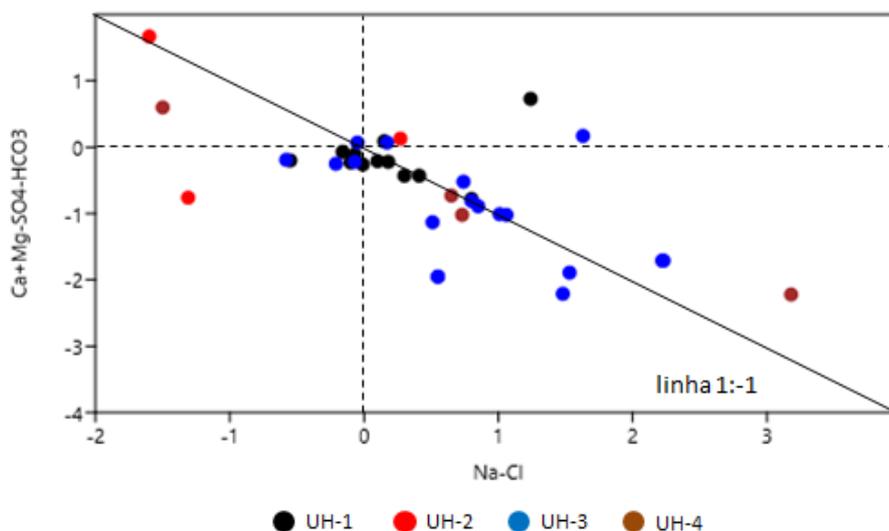


Figura 39: Relação entre $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-)$ versus $(\text{Na}^+ - \text{Cl}^-)$ representando amostras das unidades hidroestratigráficas do SAC na região norte.

4.4 O Sistema Aquífero Costeiro na Região Central da PCRS

4.4.1 Unidades Hidroestratigráficas

A região central da PCRS abrange as áreas localizadas ao entorno da lagoa dos Patos, compreendendo uma área de planície com aproximadamente 200 km de extensão. É limitada a oeste pelas rochas do embasamento cristalino, desde o município de Viamão (a norte) e Pelotas (ao sul). A leste é limitada pela linha de costa abrangendo os municípios desde Capivari do Sul (a norte) e São José do Norte (ao sul).

Esta região apresenta informações pouco espacializadas, sendo a maioria dos poços concentrados próximos aos principais núcleos urbanos. É caracterizada por uma grande variação estratigráfica lateral e vertical, onde se pode identificar alguns padrões de distribuição e caracterização das heterogeneidades hidrogeológicas observadas.

A distribuição das principais unidades hidroestratigráficas é apresentada através de um perfil longitudinal a linha de costa (A-A') e três perfis transversais (c-c', d-d', e-e'). Na Figura 40 esta apresentada a delimitação da área e a localização dos perfis hidroestratigráficos confeccionados.

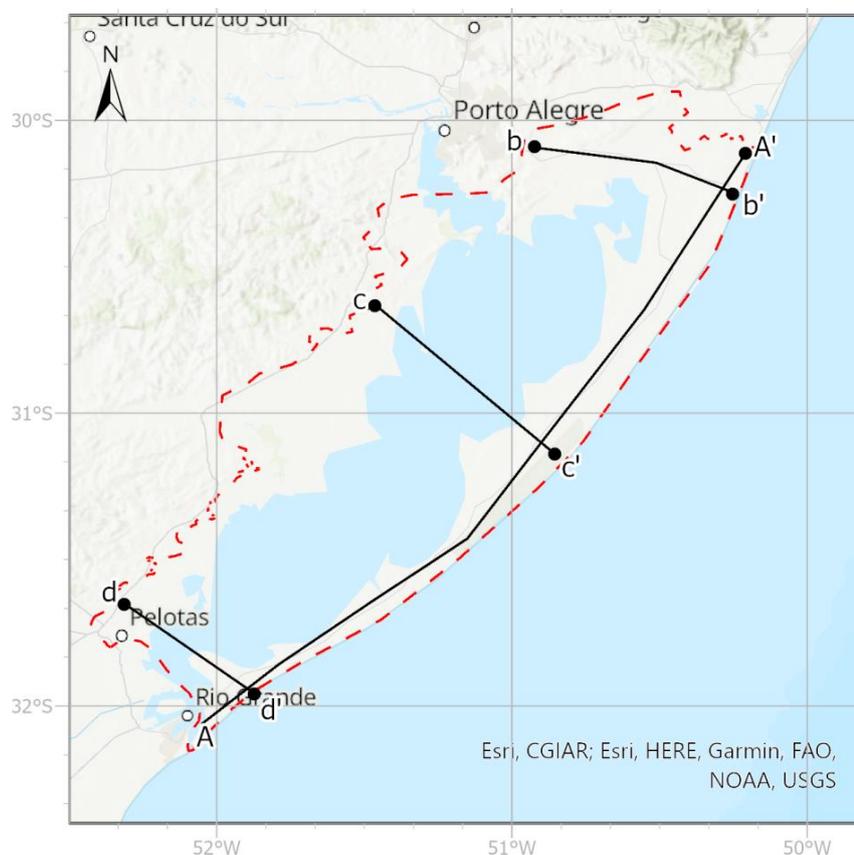


Figura 40: Delimitação da região central interna e externa da PCRS, com a localização dos perfis hidroestratigráficos apresentados.

O perfil A-A' da Figura 41 representa um corte paralelo a linha de costa com direção SW-NE. Está localizado na faixa externa da região central da PCRS, limitada a oeste pela lagoa dos patos e a leste pelo oceano atlântico.

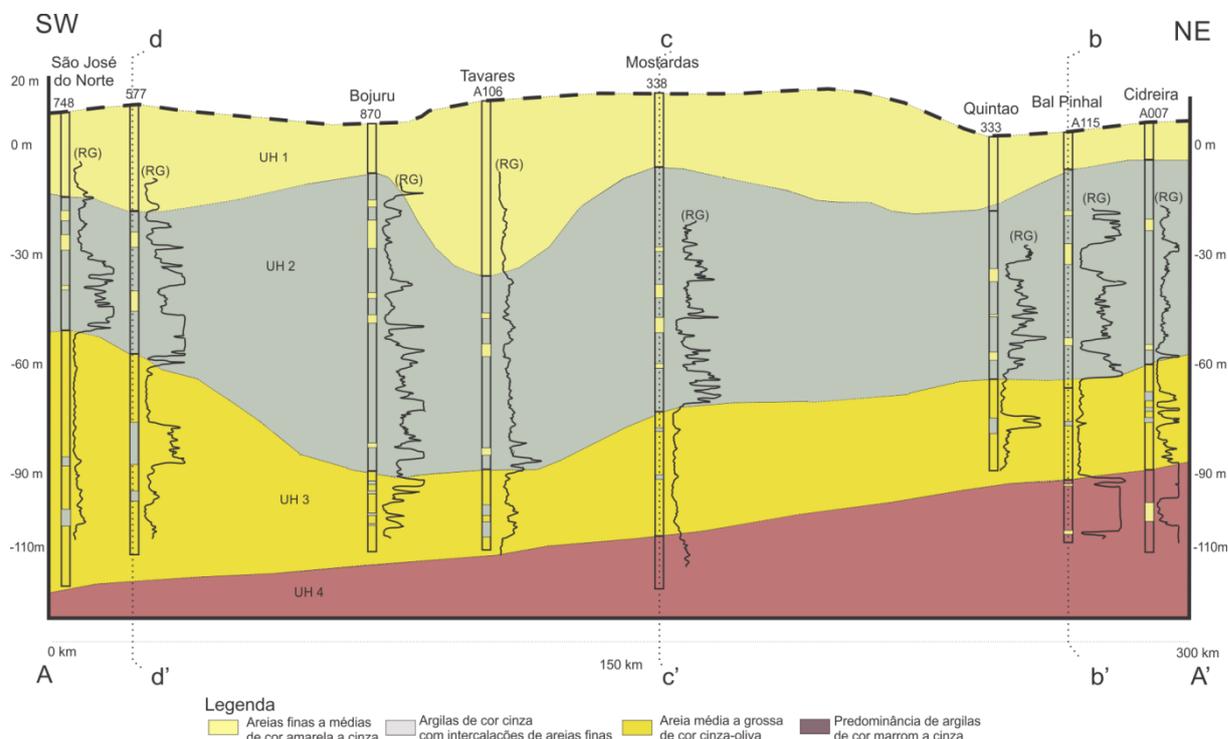


Figura 41: Perfil A-A' (paralelo a linha de costa) mostrando a distribuição das unidades hidroestratigráficas (UH) identificadas e os perfis de Raios Gama (RG).

A UH-1, relacionada ao sistema deposicional laguna-barreira, apresenta uma distribuição relativamente uniforme ao longo do perfil, com espessuras variando de 10 a 30m, com aumento de espessura nas proximidades do município de Tavares. A UH-2, relacionada ao sistema deposicional marinho, aumenta de profundidade em direção ao distrito de Bojuru, chegando a atingir 80m de espessura. Já a UH-3 com espessuras variando de 30 a 80m, apresenta sedimentos que podem estar relacionados a ambientes de deposição fluviais (paleocanais), leques aluvias e marinho. A UH-4, indivisa e predominantemente argilosa, ocorre a cerca de 90m de profundidade na região de Cidreira aumentando de profundidade em direção a sul, ocorrendo a mais de 120m próximo ao município de São José do Norte.

O perfil b-b' da Figura 42 representa um corte transversal a linha de costa com direção NW-SE, ligando os municípios de Viamão (distrito de Águas Claras) a Balneário Pinhal.

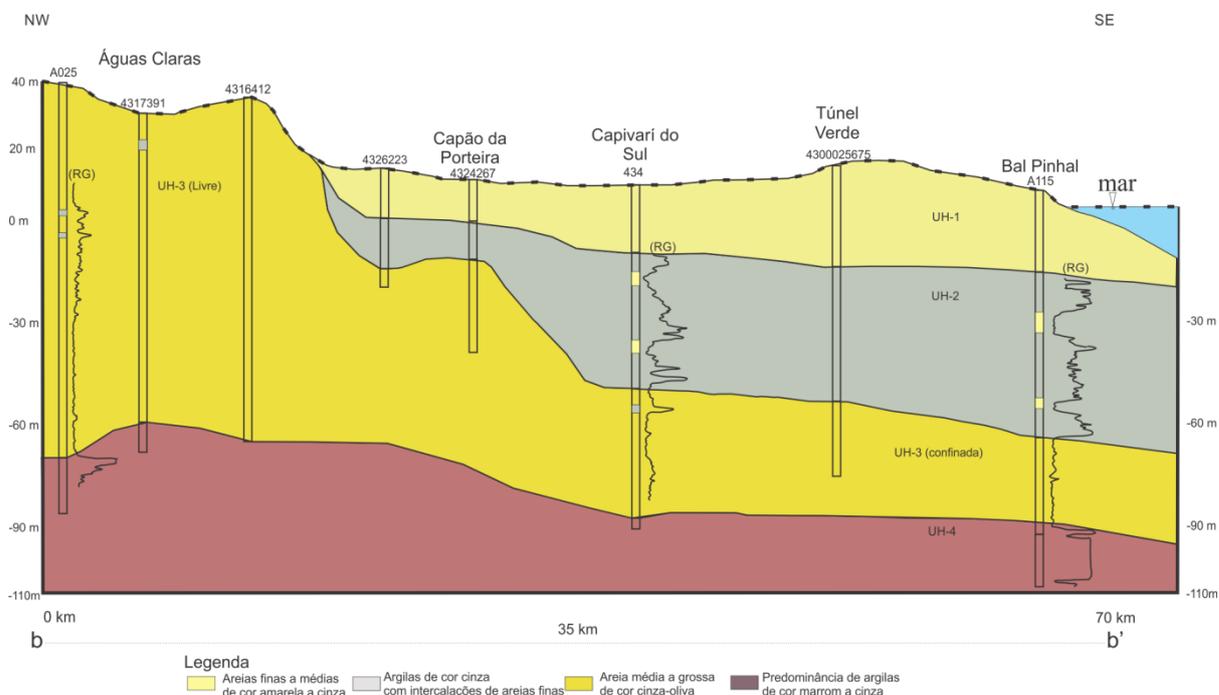


Figura 42: Perfil b-b' (transversal a linha de costa) mostrando a distribuição das unidades hidroestratigráficas (UH) identificadas e os perfis de Raios Gama (RG).

Na parte NW o perfil mostra o alto topográfico marcado pelos depósitos eólicos localizados na região do distrito de Águas Claras, representando uma importante área de recarga principalmente da UH-3. Esta unidade segue em direção a linha de costa com profundidades de 60 a 90m, onde é sobreposta pelas UH-2 e UH-1. Ocorre o aumento de porções arenosas na UH-2 na região de Capivarí do Sul e Balneário Pinhal, porém sem continuidade lateral.

O perfil c-c' da Figura 43 representa um corte transversal com direção NW-SE, ligando os municípios de Tapes, na parte interna, e Mostardas na parte externa da região central da PCRS.

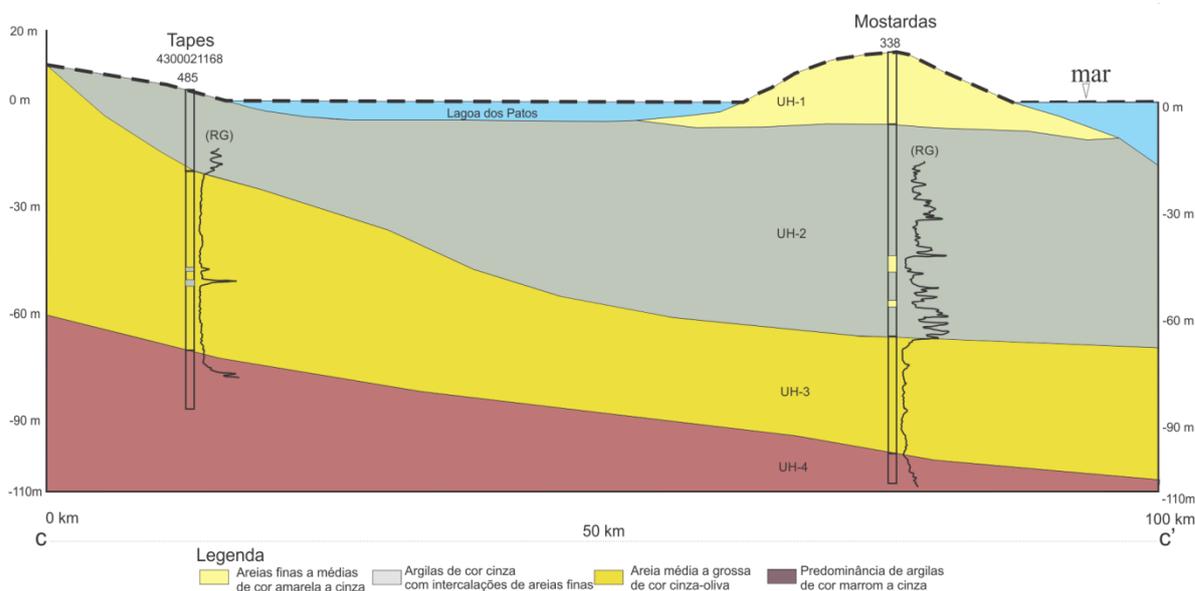


Figura 43: Perfil c-c' (transversal a linha de costa) mostrando a distribuição das unidades hidroestratigráficas (UH) identificadas e os perfis de Raios Gama (RG).

Nesta região a planície costeira é em grande parte coberta pela lagoa dos Patos, o que limita a espacialização das informações. A UH-1 ocorre apenas na parte externa com espessura de até 20m na região de Mostardas, sendo marcante a presença de camada de solo argiloso de 2 a 3 metros de espessura sobre esta unidade. O perfil evidencia a maior espessura da UH-3 na região interna enquanto a UH-2 aumenta de espessura em direção a região externa atingindo profundidades de até 70m.

Na região interna, em virtude da proximidade com os altos do embasamento (a oeste) e a lagoa (a leste), ocorre grande variação granulométrica dentro das unidades, com a presença de lentes de areias médias a grossas tanto na UH-1 como na UH-2, porém não chegam a apresentar distribuição lateral e horizontal que permita a formação de uma unidade hidroestratigráfica.

Já o perfil d-d' da Figura 44 apresenta corte transversal a linha de costa ligando os municípios de Pelotas a NW e São José do Norte a SE.

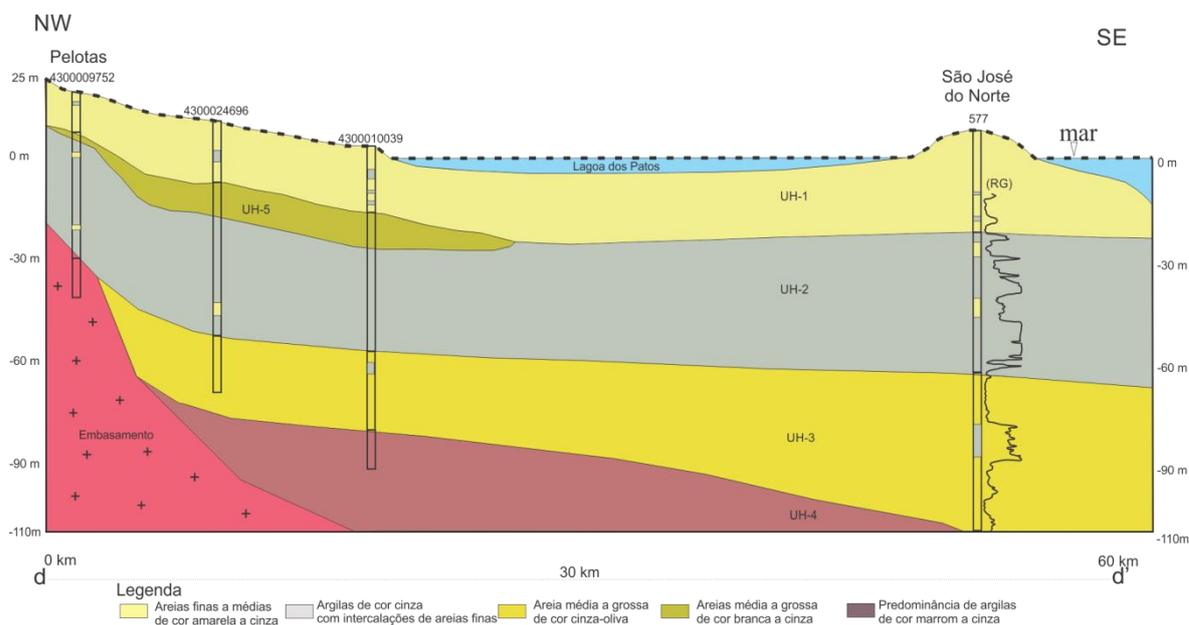


Figura 44: Perfil d-d' (transversal a linha de costa) mostrando a distribuição das unidades hidroestratigráficas (UH) identificadas e os perfis de Raios Gama (RG).

Diferentemente do que ocorre nas proximidades dos municípios de Tapes e Arambaré, na região de Pelotas os sedimentos arenosos grosseiros (areias médias a grossa) provenientes de leques aluviais do embasamento apresentam aproximadamente 15m de espessura e extensão lateral capaz de controlar o regime de fluxo subterrâneo. Tendo acima a UH-1 formada por areias finas areno-argilosas e abaixo os sedimentos argilosos da UH-2, esta unidade hidroestratigráfica foi definida como UH-5, representando um importante aquífero que é captado por grande número de poços da região.

Já na região externa, nas proximidades de São José do Norte há a presença desses sedimentos dentro da UH-2, porém ocorrendo como finas lentes intercaladas com os sedimentos predominantemente argilosos.

4.4.2 Unidades Hidroestratigráficas do SAC na região Central

Para a avaliação das diferentes unidades hidroestratigráficas presentes na região central do SAC, os valores de resistividade elétrica, porosidade total e efetiva e sais totais dissolvidos foram extraídos diretamente dos perfis compostos das 26 perfilagens geofísicas analisadas. A Figura 45 apresenta esses dados plotados em diagramas de caixa, indicando os valores máximos, mínimos, 1º e 3º quartis e mediana para cada unidade hidroestratigráfica. Os dados da UH-03 foram divididos para representar suas porções livres e confinadas. A UH-5 não apresenta dados de perfilagem, sendo identificada apenas pelos perfis estratigráficos dos poços.

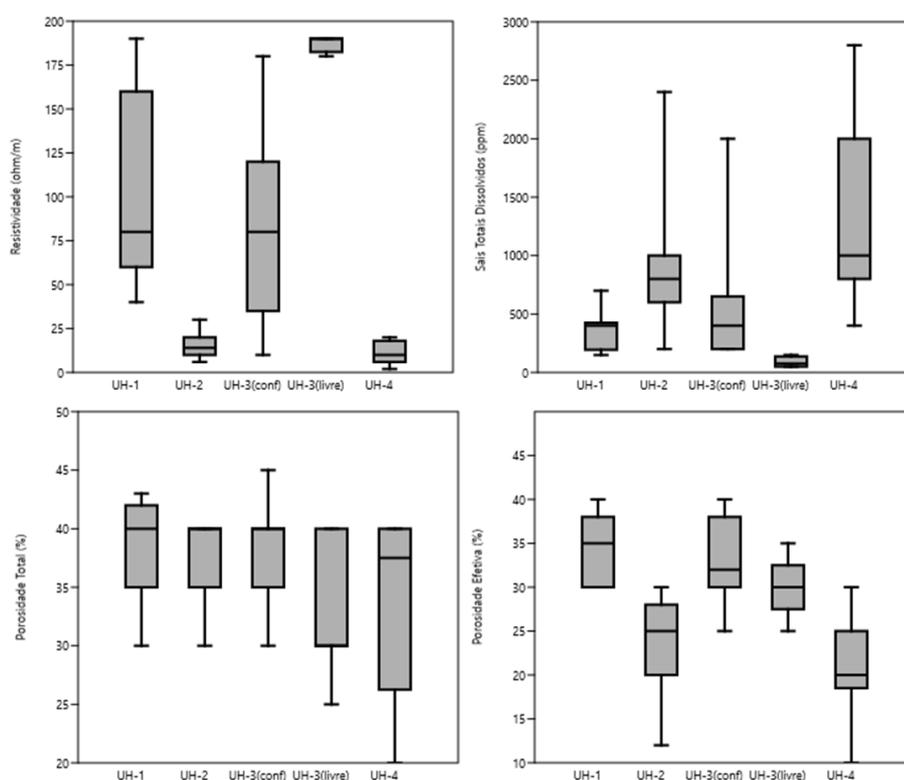


Figura 45: Diagramas de caixa com os valores de resistividade elétrica, porosidade efetiva e sais totais dissolvidos para cada unidade hidroestratigráfica.

Unidade Hidroestratigráfica 1

É a unidade hidroestratigráfica superior, aflorante em toda a região. É composta pela intercalação de areias finas, siltosas a argilosas de coloração amarelada a cinza, apresentando espessura entre 10 e 30m. Está relacionada aos depósitos laguna barreira, apresentando lentes argilo-arenosas com distribuição heterogênea, intercaladas com os sedimentos arenosos.

Apesar de sua ampla distribuição na região esta unidade apresenta algumas particularidades. Na parte externa, próximo ao município de São José do Norte, a base da

unidade apresenta uma camada de aproximadamente 5m de areias médias com presença de conchas, sendo a camada onde ocorre a captação de água da maioria dos poços da área. Na parte interna ocorre maior influência tanto dos sedimentos da lagoa dos Patos como dos sedimentos provenientes das áreas altas do embasamento, resultando em uma grande variabilidade litológica, com porções arenosas intercaladas com porções onde predominam sedimentos finos. De acordo com os dados extraídos dos perfis geofísicos essa unidade apresenta boas condições aquíferas com valores de medianas da resistividade elétrica de 80,0 ohm/m, concentração de sais totais dissolvidos igual a 400 ppm, porosidade total de 40% e porosidade efetiva de 35% (Figura 45).

Unidade Hidroestratigráfica 2

Esta unidade está relacionada aos sedimentos marinhos da PCRS, constituindo-se em uma extensa e espessa sequência de sedimentos predominantemente argilosos acinzentados presente amplamente na região. Apresenta espessuras que variam de 10 a 30 metros na parte interna podendo chegar a 80m na parte externa. Pacotes de areia fina com até 10m de espessura ocorrem distribuídos ao longo da unidade com maior ocorrência na região entre São José do Norte e Mostardas. É marcante a presença de conchas nos sedimentos, sendo predominante na região interna, principalmente próximo aos municípios de Tapes e Arambaré.

De acordo com os perfis geofísicos, essa unidade apresenta medianas com valores de resistividade elétrica de 14,0 ohm/m, concentração de sais totais dissolvidos igual a 800 ppm, porosidade total de 40% e porosidade efetiva de 25% (Figura 45) .

Unidade Hidroestratigráfica 3 Confinada

Essa unidade hidroestratigráfica representa um pacote sedimentar predominantemente arenoso, contendo areias de granulometria variada e presença de lentes de argilas. Está relacionada a depósitos fluviais (paleocanais), leques aluviais e marinho raso, e possui espessuras variando de 20 a 70m, sendo bem distribuída ao longo de toda a região central da PCRS.

Quando comparada a UH-3 da região norte se observa, em direção ao sul, o aumento de sedimentos areno-argilosos intensamente presente na região de Bojuru e atingindo até 10m de espessura na região de São José do Norte (Figura 41). Estes sedimentos ocorrem em forma de lentes descontínuas não sendo suficientes para gerar a separação de unidades aquíferas, porém podendo gerar interferência local nas condições de fluxo, circulação e características hidroquímicas e hidrodinâmicas no aquífero.

Assim como as demais unidades, a UH-3 confinada apresenta variações dependendo da proximidade com a linha de costa ou com o embasamento cristalino. Na parte interna ocorre grande heterogeneidade horizontal com predominância de areias finas na região de Arambaré e Tapes e areias médias na região de Pelotas. Já na região externa ocorre a predominância de areias médias em toda extensão paralela a linha de costa.

De acordo com os perfis geofísicos, essa unidade apresenta valores próximos ao da UH-1, com valores de medianas de resistividade elétrica de 80,0 ohm/m, concentração de sais totais dissolvidos igual a 400 ppm, porosidade total de 40% e porosidade efetiva de 32%.

Unidade Hidroestratigráfica 3 Livre

Representa os sedimentos arenosos que formam a unidade geomorfológica Coxilha das Lombas, relacionados aos depósitos do sistema laguna barreira I na região do distrito de Águas Claras. É constituída principalmente por areias de granulometria média, quartzosa de cor creme a avermelhada devido a presença de óxido de ferro. Ocorrem porções onde predominam areias finas com raras intercalações de níveis argilosos.

De acordo com os perfis geofísicos, essa unidade apresenta valores com medianas de resistividade elétrica de 190,0 ohm/m, concentração de sais totais dissolvidos igual a 75 ppm, porosidade total de 30% e porosidade efetiva de 30%.

Unidade Hidroestratigráfica 4

Representam camadas de sedimentos predominantemente argilosos de coloração cinza escura a marrom. A delimitação do topo da unidade é evidente tanto nos perfis dos poços como nos dados geofísicos, sendo possível sua caracterização a profundidades de até 100 m. Em função da escassez de poços e perfilagens mais profundas, o limite de base da unidade 4 está sendo considerado como sendo o contato inferior do SAC. Em profundidades maiores que 100 m não é possível fazer uma individualização precisa desta unidade, porém, os dados das sondagens e perfilagens geofísicas sugerem que há um comportamento hidroestratigráfico bem próximo ao observado na porção superior, com intercalações argilo-arenosas de variadas espessuras e gradual aumento da fração argila e da salinidade das águas.

De acordo com os perfis geofísicos, essa unidade apresenta medianas com valores de resistividade elétrica de 10,0 ohm/m, concentração de sais totais dissolvidos igual a 1000 ppm, porosidade total de 37% e porosidade efetiva de 20%.

Unidade Hidroestratigráfica 5

É caracterizada por sedimentos arenosos grosseiros (areias médias a grossa) de coloração esbranquiçada e de baixa esfericidade, provavelmente relacionados a leques

aluviais do embasamento cristalino. Apresentam aproximadamente 15m de espessura tendo sua distribuição limitada a parte interna nas proximidades do município de Pelotas

Para esta unidade não há dados de perfis geofísicos para avaliação dos parâmetros analisados para as demais unidades.

4.4.3 Caracterização Hidrodinâmica do SAC na região Central

Para caracterização hidrodinâmica das unidades hidroestratigráficas foram analisados dados de vazão (Q), nível estático (NE), capacidade específica (Q/s) e transmissividade (T), sendo utilizados poços com seções filtrantes que captam água somente de uma unidade.

Na Tabela 11 é apresentado resumo estatístico com os dados e valores utilizados para cada UH identificada. Na região não há poços representativos da UH-4, por este motivo ela não está sendo analisada neste capítulo.

Tabela 11: Resumo estatístico com dados de Vazão Específica (Q/s), Transmissividade (T), Vazão (Q) e Nível Estático (NE) para as unidades hidroestratigráficas da PCRS na região central.

| UH | P. Estatístico | Q/s (m ³ /h/m) | T (m ² /h) | Q (m ³ /h) | NE (m) |
|------------------|----------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------|--------|
| UH-1 | N amostral | 45 | 23 | 46 | 47 |
| | Mínimo | 0,07 | 0,00 | 2,56 | 0,23 |
| | Máximo | 9,93 | 12,48 | 80,40 | 15,56 |
| | Mediana | 1,33 | 1,14 | 15,06 | 1,91 |
| UH-2 | N amostral | 28 | 6 | 29 | 29 |
| | Mínimo | 0,02 | 0,00 | 0,50 | 0,00 |
| | Máximo | 3,80 | 4,70 | 51,15 | 21,26 |
| | Mediana | 0,27 | 0,92 | 6,55 | 4,00 |
| UH-3 (Confinada) | N amostral | 50 | 31 | 57 | 57 |
| | Mínimo | 0,03 | 0,49 | 1,00 | 0,00 |
| | Máximo | 10,00 | 30,60 | 169,60 | 25,00 |
| | Mediana | 2,86 | 3,61 | 45,00 | 5,36 |
| UH-3 (Livre) | N amostral | 25 | 9 | 35 | 27 |
| | Mínimo | 0,01 | 0,00 | 0,60 | 0,00 |
| | Máximo | 11,78 | 4,84 | 138,00 | 55,85 |
| | Mediana | 0,75 | 0,86 | 30,00 | 8,60 |
| UH-5 | N amostral | 20 | 4 | 21 | 21 |
| | Mínimo | 0,13 | 0,29 | 3,30 | 2,42 |
| | Máximo | 3,60 | 2,19 | 24,00 | 28,50 |
| | Mediana | 0,69 | 0,56 | 11,00 | 13,72 |

Os valores foram obtidos dos testes de bombeamento e estão plotados no diagrama da Figura 46, sendo apresentado em forma de comparativo entre as UH.

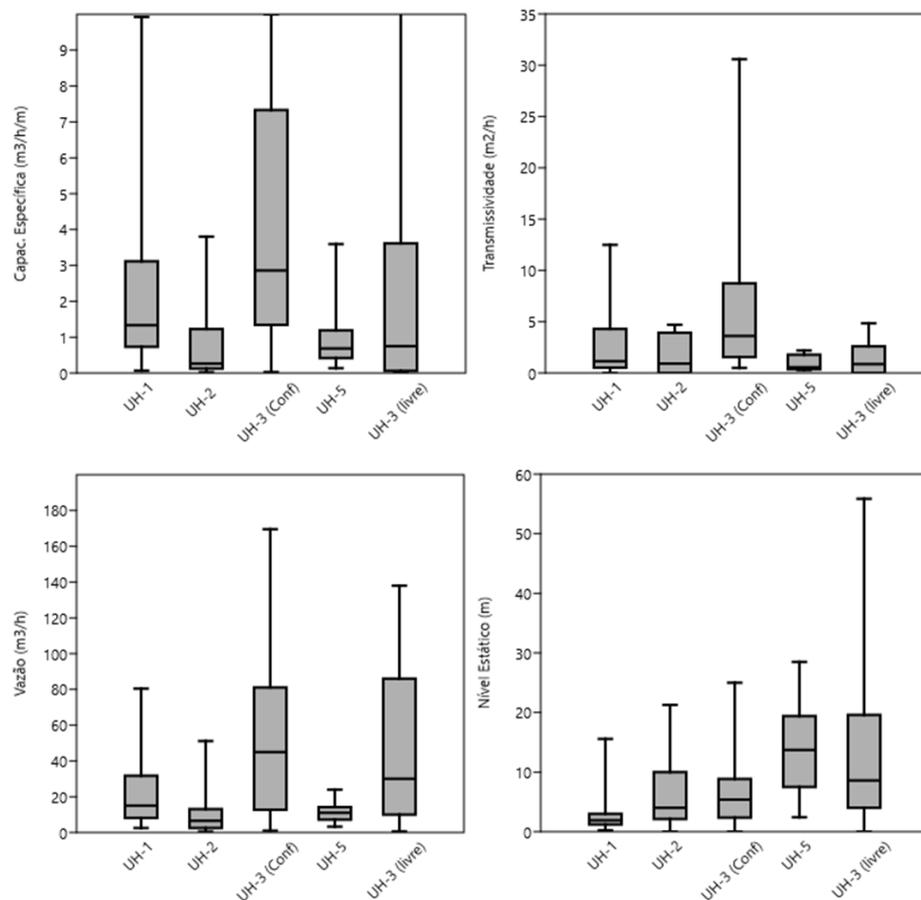


Figura 46: Diagramas com os valores das principais características hidrodinâmicas das unidades hidroestratigráficas na região central da PCRS.

Através da análise dos diagramas se pode observar a grande amplitude de valores para os diferentes parâmetros, sendo assim, os valores de mediana foram utilizados para representar cada UH. As grandes variações nos valores de vazão se dão principalmente em função das características construtivas dos poços e do equipamento de bombeamento.

A UH-1, não confinada e predominantemente arenosa, apresenta $Q_{med}=15 \text{ m}^3/\text{h}$ com valor máximo encontrado de $80\text{m}^3/\text{h}$, $Q/s_{med}=1,3 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ e $T_{med}=1,14\text{m}^2/\text{h}$. Os valores de NE representam bem a potenciométrica da região, com $NE_{med}=1,91\text{m}$ com valor máximo chegando a $15,5 \text{ m}$ na parte alta de Pelotas.

A UH-2, predominantemente argilosa, apresenta $Q_{med}=6,55 \text{ m}^3/\text{h}$ com valor máximo encontrado de $51\text{m}^3/\text{h}$, $Q/s_{med}=0,27 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ e $T_{med}=0,92\text{m}^2/\text{h}$. Os valores de NE são predominantemente maiores que a UH-1 com $NE_{med}=4,0\text{m}$ e valor máximo chegando a $15,5\text{m}$ na parte alta de Pelotas. Valores mínimos de NE próximos a zero indicam que há confinamento gerado pelas camadas de sedimentos finos sobre as camadas argilosas que formam as camadas aquíferas da unidade.

Assim como na região norte, a UH-3 (confinada), formada predominantemente por areias médias, difere das unidades sobrepostas, com características hidrodinâmicas que lhe conferem alto potencial aquífero. Apresenta $Q_{med}=45 \text{ m}^3/\text{h}$ podendo chegar a $169 \text{ m}^3/\text{h}$, com $Q/s_{med}=2,86 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ e $T_{med}=3,61 \text{ m}^2/\text{h}$. O valor de $NE_{med}=5,36\text{m}$ reflete o confinamento imposto principalmente pela UH-2.

A UH-3 (livre), formada predominantemente por areias eólicas finas a médias, representam um pacote onde a baixa diagênese aliada a suas condições deposicionais conferem ao aquífero uma excelente permeabilidade (FREITAS et al, 2002). Apresenta $Q_{med}=30 \text{ m}^3/\text{h}$ podendo chegar a $138 \text{ m}^3/\text{h}$, com $Q/s_{med}=0,75 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ e $T_{med}=0,86 \text{ m}^2/\text{h}$. O valor de $NE_{med}=8,6\text{m}$ reflete a característica de aquífero livre desta unidade.

A UH-05 é formada predominantemente pelos sedimentos arenosos finos a médios provenientes de leques aluviais, representando um importante aquífero, sendo captado pela grande maioria dos poços da região do município de Pelotas. Apresenta $Q_{med}=11 \text{ m}^3/\text{h}$ com $Q/s_{med}=0,69 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ e $T_{med}=0,56 \text{ m}^2/\text{h}$. Os valores de $NE_{med}=13,7\text{m}$ com valores máximos chegando a 28m sugerem que esta unidade não está sobre regime de confinamento.

4.4.4 Caracterização Hidroquímica do SAC na região central

A seguir é apresentada a caracterização hidroquímica das águas baseada em dados de poços representativos de cada unidade hidroestratigráfica. A avaliação do balanço iônico das 105 amostras representativas das 4 unidades hidroestratigráficas mostra que 91% dos erros são menores que 10%, sendo desconsideradas análises com erros maiores que 20%.

A seguir são expostos os resultados referentes aos dados dos parâmetros Potencial Hidrogeniônico (pH), Condutividade Elétrica (CE) Sólidos Totais Dissolvidos (STD) e Alcalinidade para cada uma das unidades hidroestratigráficas.

A Tabela 12 apresenta o resumo estatístico com os dados utilizados para a análise desses parâmetros. Para a UH-5 não são apresentados valores de STD e Alcalinidade devido a ausência de dados. A Figura 47 apresenta os diagramas de caixa mostrando a distribuição dos valores de pH e Condutividade elétrica para as diferentes UH.

Tabela 12: Resumo estatístico com dados de pH, Condutividade elétrica, Sólidos totais dissolvidos e Alcalinidade.

| Unidade Hidroestratigráfica | Parâmetro Estatístico | pH | CE ($\mu\text{S}/\text{cm}^2$) | STD (mg/l) | Alcalinidade (mg/l) |
|-----------------------------|-----------------------|------|----------------------------------|------------|---------------------|
| UH-1 | N amostral | 28 | 28 | 27 | 28 |
| | Mínimo | 5,46 | 131,60 | 69,00 | 7,00 |
| | Máximo | 8,40 | 1380,00 | 1052,00 | 297,00 |
| | Mediana | 7,40 | 299,00 | 191,00 | 88,50 |
| UH-2 | N amostral | 10 | 9 | 6 | 6 |
| | Mínimo | 6,40 | 500,00 | 418,00 | 113,00 |
| | Máximo | 8,10 | 3300,00 | 622,00 | 233,00 |
| | Mediana | 6,70 | 1050,00 | 467,00 | 204,50 |
| UH-3 (Confinada) | N amostral | 43 | 43 | 51 | 42 |
| | Mínimo | 6,00 | 124,30 | 102,00 | 17,00 |
| | Máximo | 8,90 | 1703,00 | 1012,00 | 660,00 |
| | Mediana | 7,60 | 609,00 | 321,00 | 155,50 |
| UH-3 (Livre) | N amostral | 10 | 10 | 7 | 10 |
| | Mínimo | 5,39 | 32,10 | 30,27 | 4,83 |
| | Máximo | 6,56 | 93,70 | 92,00 | 55,37 |
| | Mediana | 5,67 | 43,10 | 40,20 | 10,46 |
| UH-5 | N amostral | 14 | 11 | * | * |
| | Mínimo | 5,70 | 175,00 | * | * |
| | Máximo | 7,20 | 980,00 | * | * |
| | Mediana | 6,55 | 420,00 | * | * |

Os valores de pH na região variam de 5,39 a 8,9 com medianas variando de 5,67 a 7,6, o que demonstra a presença de águas com tendência geral a neutralidade. As unidades UH-3 (livre) e UH-5 apresentam os valores mais baixos com $\text{pH}_{\text{med}}=5,67$ e $\text{pH}_{\text{med}}=6,55$ refletindo a origem recentes das águas, provavelmente oriundas da infiltração direta da água da chuva. A presença de valores mais elevados encontrados na UH-1 ($\text{pH}_{\text{med}}=7,4$) podem estar relacionados a presença de gás carbônico (CO_2) e lixiviação de ácidos orgânicos no solo, provenientes do processo de respiração das plantas e decomposição da matéria orgânica (FENZL, 1988 *apud* RABELO, 2015). A UH-2 apresenta valores próximos a neutralidade ($\text{pH}_{\text{med}}=6,7$) e a UH-3(confinada) ($\text{pH}_{\text{med}}=7,6$) valores levemente alcalinos, provavelmente relacionados a lixiviação de bicarbonatos da unidades sobrepostas.

Os valores de CE refletem a característica de águas pouco mineralizadas da UH-3 livre ($\text{CE}_{\text{med}}=43,1\mu\text{S}/\text{cm}^2$), da UH-1 ($\text{CE}_{\text{med}}=299\mu\text{S}/\text{cm}^2$), e da UH-5 ($\text{CE}_{\text{med}}=420\mu\text{S}/\text{cm}^2$). Os valores da UH-3 (confinada) variando de 124 a 1703 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ e $\text{CE}_{\text{med}}=609\mu\text{S}/\text{cm}^2$

demonstram o enriquecimento iônico das águas desta unidade, porém com grande variabilidade, assim como observado na região norte da PCRS. Já a UH-2 apresenta valores variando de 500 a 3300 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ com $\text{CE}_{\text{med}}=1050 \mu\text{S}/\text{cm}^2$, representando a unidade com águas mais salinizadas. Essa grande variação nos valores de CE refletem os graus de confinamento, as diferentes condições de circulação da água, tempo de residência e de interações água/mineral. As camadas de sedimentos possuem além de diferenças granulométricas, características associadas ao ambiente de sedimentação, que acabam tendo influência na composição da água subterrânea das diferentes unidades.

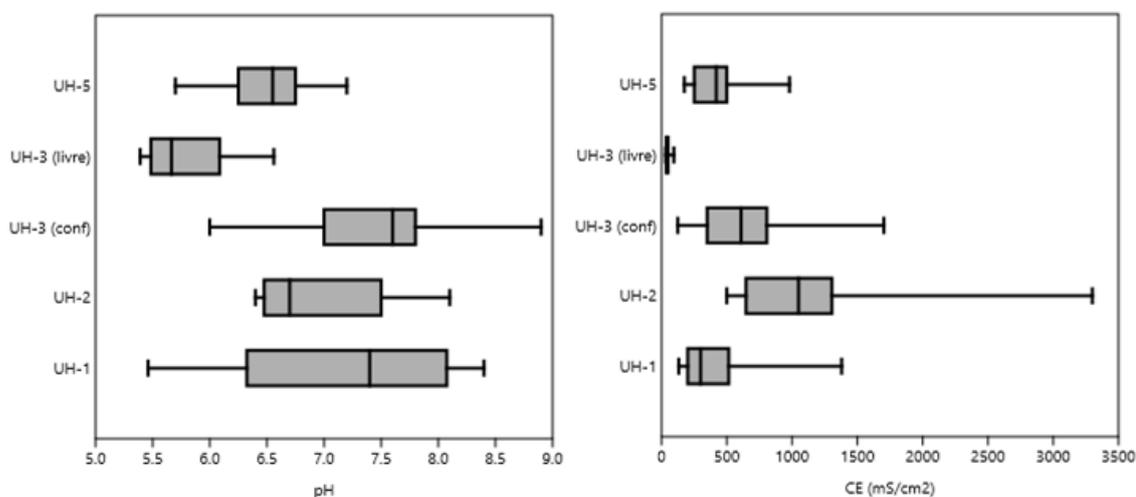


Figura 47: Diagramas de caixa mostrando a distribuição dos valores dos parâmetros pH e Condutividade elétrica.

As Figura 48 e Figura 49 apresentam a distribuição dos principais constituintes presentes nas águas subterrâneas do SAC na região central, expressas em peso equivalente (meq/L). A análise dos gráficos demonstra os diferentes graus de salinização das águas subterrâneas nas diferentes unidades. As UH-1, UH-3(livre) e a UH-5 com águas pouco a mediamente enriquecidas enquanto as unidades UH-2 e UH-3(confinada), mais profundas, com águas mais salinizadas.

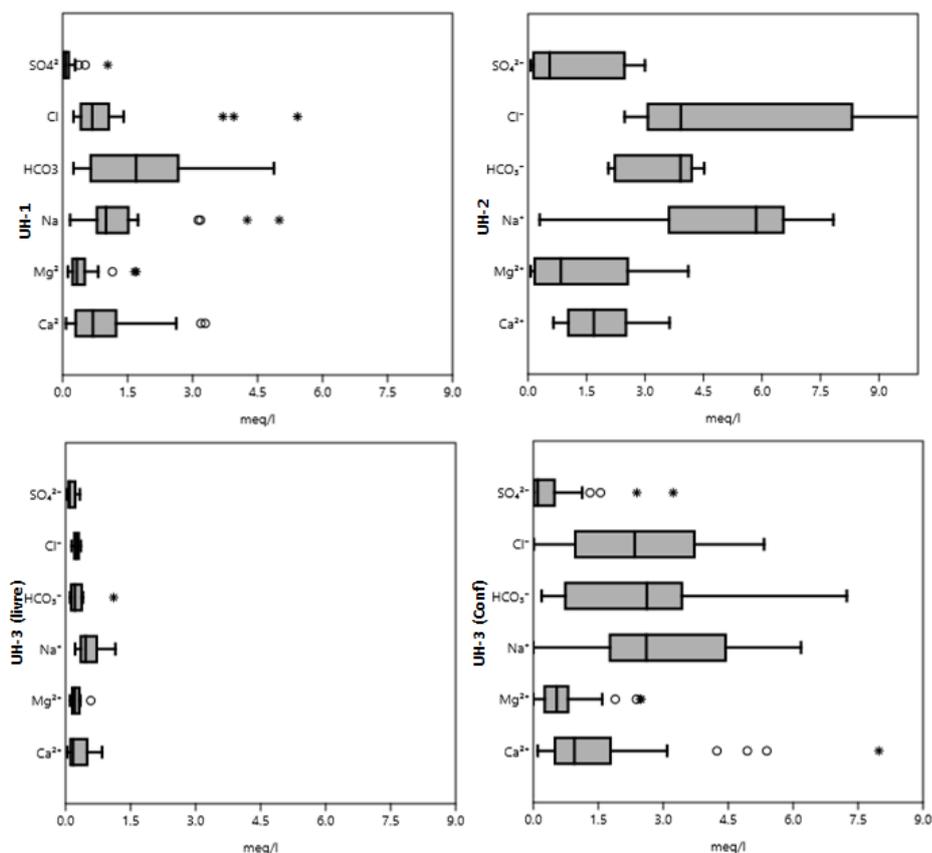


Figura 48: Diagramas de caixa com a concentração dos principais íons em peso equivalente (meq/L) para as UH-1, UH-2 e UH-3 livre e confinada.

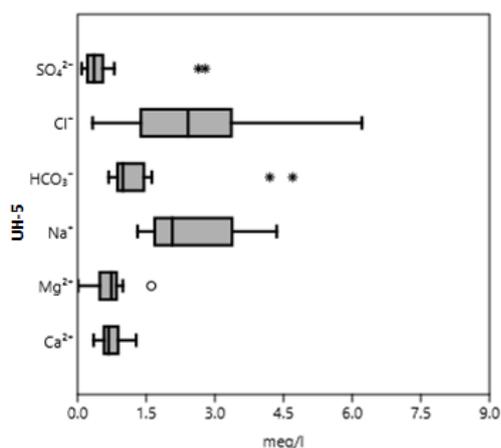


Figura 49: Diagramas de caixa com a concentração dos principais íons em peso equivalente (meq/L) para a UH-5.

Os valores de medianas das concentrações dos principais cátions mostram que as águas subterrâneas destas unidades seguem a ordem $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$, porém em diferentes proporções. Já as concentrações dos principais ânions seguem a ordem $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$ para as UH-1, UH-3(confinada) e $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-}$ nas UH-2, UH-3 (livre) e UH-5.

A Figura 50 mostra a correlação entre os cátions (Na^+ e Ca^{2+}), evidenciando a predominância de Na^+ , porém com as águas da UH-1 e UH-3(livre) com tendência de aumento de Ca^{2+} . A correlação dos ânions Cl^- e HCO_3^- mostra clara predominância de HCO_3^- nas águas da UH-1 e de Cl^- nas UH-5.

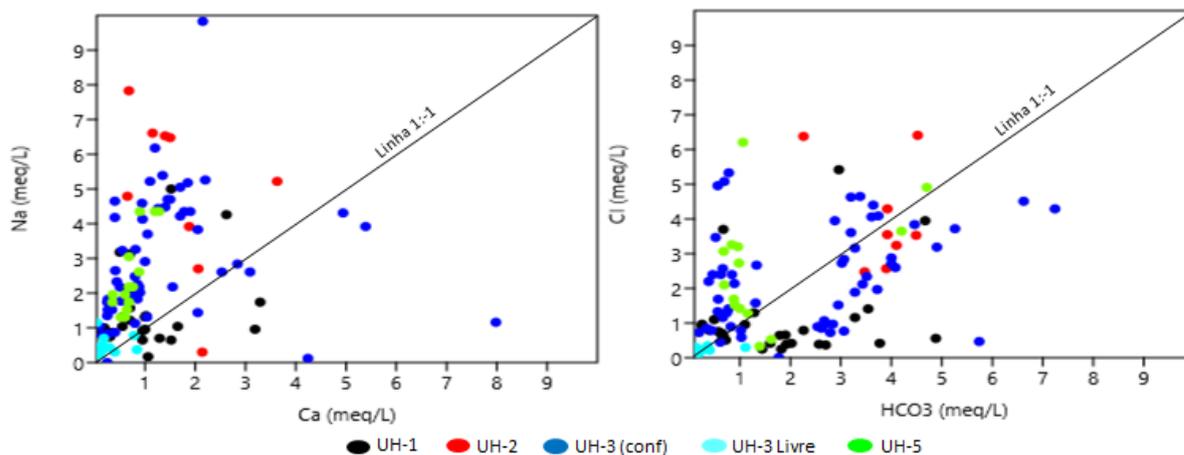


Figura 50: Relação entre cátions Ca^{2+} x Na^+ e ânions Cl^- x HCO_3^- nas águas subterrâneas das UH.

A correlação entre o Na^+ com os ânions Cl^- e HCO_3^- é utilizada para identificar possíveis efeitos de intrusões salinas em aquíferos costeiros (KIM *et al.*, 2003; WEN *et al.*, 2012; ZAMRSKY *et al.*, 2020). A correlação entre o Na^+ com os ânions Cl^- e HCO_3^- (Figura 51) mostra uma relação aproximada 1:1 do Na^+ com o Cl^- , com leve tendência ao enriquecimento em Na^+ . Já a relação Na^+ x HCO_3^- mostra a predominância de Na^+ nas UH-3, UH-2 e UH-5 e de HCO_3^- na UH-1.

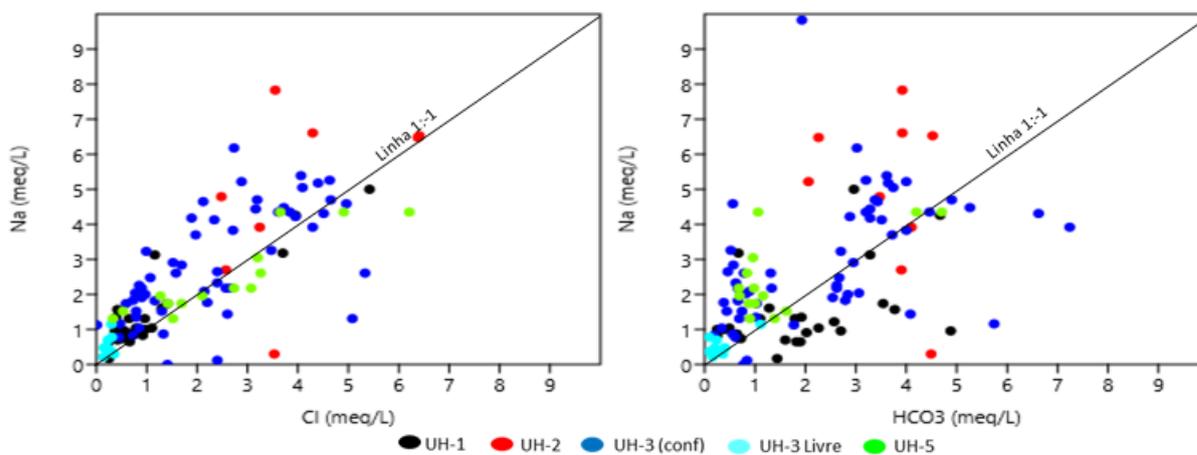


Figura 51: Relação entre Na^+ x Cl^- e Na^+ x HCO_3^- .

A avaliação da associação entre os principais íons e STD são úteis para interpretar os principais processos de evolução hidrogeológica que ocorrem no aquífero (ZHOU; LI; LU, 2017). Para isso foi realizada a correlação de *Person* para amostras de cada unidade, apresentado nas Tabela 13 a 17, sendo destacadas as relações mais significativas (maiores que 0,8).

Nas unidades livres e com águas pouco enriquecidas (UH-1 e UH-3 livre) não há forte correlação do STD com os principais íons. Porém se destaca as fortes correlações Na^+/Cl^- na UH-1 e $\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$ na UH-3 livre. Foram observadas correlações significativas entre STD com Mg^{2+} , Ca^{2+} e Cl^- na UH-2 e STD com Cl^- , Na^+ e Mg^{2+} na UH-3 confinada.

Essas relações indicam a predominância desses íons na mineralização das águas, estando associadas ao ambiente de deposição das camadas aquíferas, a presença de camadas com conchas, tempo de residência, interação água/sedimento e diferentes condições de recarga.

Tabela 13: Correlação entre os principais parâmetros físico-químicos da UH-1 na região central.

| | Ca^{2+} | Mg^{2+} | Na^+ | HCO_3^- | Cl^- | SO_4^{2-} | STD |
|--------------------|------------------|------------------|---------------|------------------|---------------|--------------------|-----|
| Ca^{2+} | 1 | | | | | | |
| Mg^{2+} | 0,56 | 1 | | | | | |
| Na^+ | 0,29 | 0,80 | 1 | | | | |
| HCO_3^- | 0,81 | 0,61 | 0,45 | 1 | | | |
| Cl^- | 0,25 | 0,79 | 0,92 | 0,23 | 1 | | |
| SO_4^{2-} | 0,27 | 0,14 | -0,10 | -0,10 | 0,00 | 1 | |
| STD | 0,24 | 0,58 | 0,43 | 0,54 | 0,29 | -0,02 | 1 |

Tabela 14: Correlação entre os principais parâmetros físico-químicos da UH-2 na região central.

| | Ca^{2+} | Mg^{2+} | Na^+ | HCO_3^- | Cl^- | SO_4^{2-} | STD |
|--------------------|------------------|------------------|---------------|------------------|---------------|--------------------|-----|
| Ca^{2+} | 1 | | | | | | |
| Mg^{2+} | 0,98 | 1 | | | | | |
| Na^+ | 0,13 | 0,28 | 1 | | | | |
| HCO_3^- | -0,56 | -0,62 | -0,36 | 1 | | | |
| Cl^- | 0,98 | 1,00 | 0,28 | -0,64 | 1 | | |
| SO_4^{2-} | 0,55 | 0,61 | 0,61 | -0,60 | 0,64 | 1 | |
| STD | 0,94 | 0,98 | 0,38 | -0,62 | 0,98 | 0,75 | 1 |

Tabela 15: Correlação entre os principais parâmetros físico-químicos da UH-03 (livre) na região central.

| | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Na ⁺ | HCO ₃ ⁻ | Cl ⁻ | SO ₄ ²⁻ | STD |
|-------------------------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------------------|-----------------|-------------------------------|-----|
| Ca ²⁺ | 1 | | | | | | |
| Mg ²⁺ | -0,06 | 1 | | | | | |
| Na ⁺ | -0,10 | -0,13 | 1 | | | | |
| HCO ₃ ⁻ | -0,46 | 0,00 | 0,72 | 1 | | | |
| Cl ⁻ | 0,44 | 0,14 | 0,31 | 0,28 | 1 | | |
| SO ₄ ²⁻ | 0,83 | -0,25 | 0,37 | -0,02 | 0,50 | 1 | |
| STD | 0,55 | -0,16 | 0,17 | -0,14 | 0,26 | 0,51 | 1 |

Tabela 16: Correlação entre os principais parâmetros físico-químicos da UH-03 (confinada) na região central.

| | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Na ⁺ | HCO ₃ ⁻ | Cl ⁻ | SO ₄ ²⁻ | STD |
|-------------------------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------------------|-----------------|-------------------------------|-----|
| Ca ²⁺ | 1 | | | | | | |
| Mg ²⁺ | 0,70 | 1 | | | | | |
| Na ⁺ | 0,16 | 0,58 | 1 | | | | |
| HCO ₃ ⁻ | 0,54 | 0,45 | 0,32 | 1 | | | |
| Cl ⁻ | 0,30 | 0,67 | 0,74 | 0,17 | 1 | | |
| SO ₄ ²⁻ | -0,09 | 0,22 | 0,36 | -0,32 | 0,19 | 1 | |
| STD | 0,46 | 0,81 | 0,84 | 0,49 | 0,86 | 0,28 | 1 |

Tabela 17: Correlação entre os principais parâmetros físico-químicos da UH-05 na região central.

| | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Na ⁺ | HCO ₃ ⁻ | Cl ⁻ | SO ₄ ²⁻ | STD |
|-------------------------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------------------|-----------------|-------------------------------|-----|
| Ca ²⁺ | 1 | | | | | | |
| Mg ²⁺ | 0,68 | 1 | | | | | |
| Na ⁺ | 0,83 | 0,70 | 1 | | | | |
| HCO ₃ ⁻ | 0,49 | 0,61 | 0,67 | 1 | | | |
| Cl ⁻ | 0,89 | 0,69 | 0,90 | 0,37 | 1 | | |
| SO ₄ ²⁻ | 0,62 | 0,73 | 0,82 | 0,94 | 0,58 | 1 | |
| STD | 0,79 | 0,78 | 0,93 | 0,87 | 0,77 | 0,96 | 1 |

As águas subterrâneas das diferentes unidades hidroestratigráficas foram classificadas de acordo com o diagrama de Piper (Figura 52), onde as concentrações dos íons maiores são plotadas no diagrama, podendo ajudar a entender o processo controlador da hidroquímica das águas. Como se pode observar a amostras apresentam uma larga distribuição ao longo do diagrama, representando a grande variedade de tipos hidrogeoquímicos das águas subterrâneas.

Porém, apesar dessa larga distribuição, as UH-1 e UH-3 (livre) (área 1) são caracterizadas predominantemente por águas bicarbonatadas e cloretadas cálcicas/magnesianas. As UH-2, UH-3 (confinada) e UH-5 (área 2) são compostas

predominantemente por águas mais evoluídas quimicamente, sendo bicarbonatadas e cloretadas sódicas.

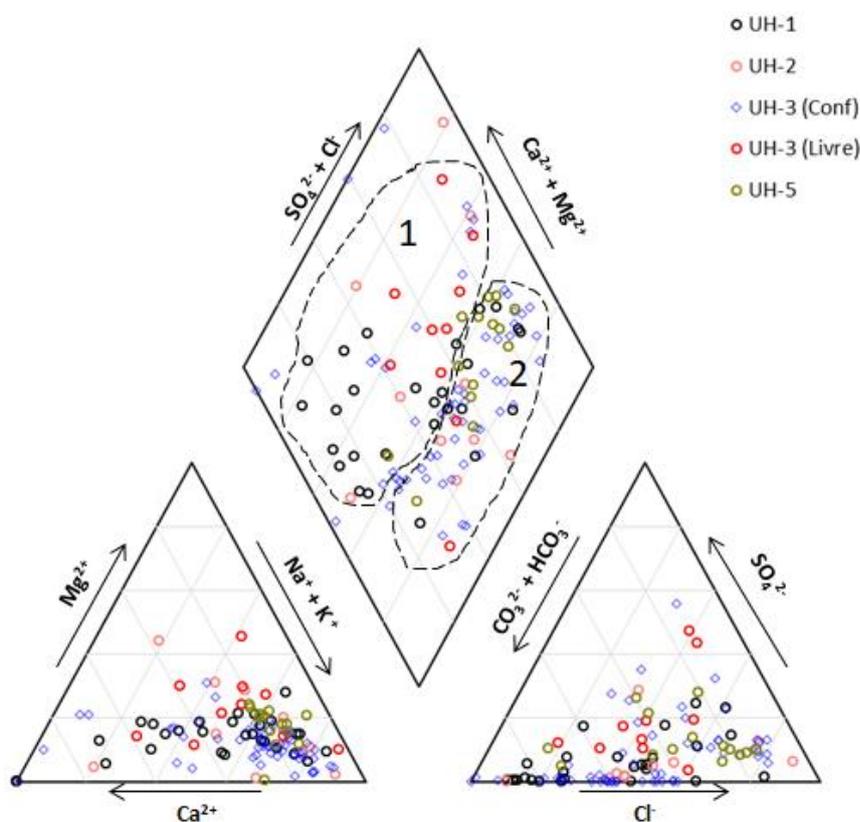


Figura 52: Diagrama de Piper das águas subterrâneas na região central da PCRS.

A análise dos componentes principais (ACP) foi realizada com os parâmetros pH, condutividade elétrica, alcalinidade, sódio, cálcio, magnésio, cloreto, bicarbonatos e sulfato. Verificou-se que as duas principais componentes são responsáveis por 72,2% da variabilidade de todo o conjunto de dados referentes às águas subterrâneas do SAC na região central (Tabela 18).

Tabela 18: Variância total das águas do SAC na região central.

| Componentes | Total | % variância | % cumulativa |
|-------------|--------|-------------|--------------|
| 1 | 416,50 | 49,60 | 49,60 |
| 2 | 189,90 | 22,60 | 72,20 |
| 3 | 0,96 | 11,55 | 83,75 |
| 4 | 0,44 | 5,22 | 88,97 |
| 5 | 0,37 | 4,50 | 93,47 |
| 6 | 0,28 | 3,40 | 96,87 |
| 7 | 0,14 | 1,70 | 98,57 |
| 8 | 0,09 | 1,05 | 99,62 |
| 9 | 0,030 | 0,39 | 100,01 |

Avaliando-se os componentes de forma individual (Tabela 19), temos que a componente 1 é responsável pelas variáveis mais significativas, possuindo relação positiva com CE, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Cl⁻ e SO₄⁻. Já para a componente 2 as variáveis mais significativas são o pH, alcalinidade e bicarbonato.

Tabela 19: Matriz de Componentes das águas do SAC na região central.

| | Componentes | |
|----------------------|-------------|-------|
| | 1 | 2 |
| pH | 0,097 | 0,53 |
| Cond Elétrica | 0,41 | -0,01 |
| Alcalinidade | 0,17 | 0,43 |
| Sódio | 0,34 | 0,10 |
| Calcio | 0,4 | 0,01 |
| Magnésio | 0,42 | -0,24 |
| Cloreto | 0,43 | -0,23 |
| Bicarbonato | 0,24 | 0,54 |
| Sulfato | 0,27 | -0,32 |

A Figura 53 representa as diferentes unidades hidroestratigráficas no gráfico de dispersão *biplot*, onde a componente 1 esta representada no eixo x e a componente 2 no eixo y.

O gráfico evidencia as águas pouco mineralizadas da UH-3(livre) e UH-5, bem marcadas pelos baixos valores das componentes 1 e 2.

A UH-1 apresenta maior distribuição, sendo que 44% das amostras apresentam baixos valores das componentes 1 e 2, 27% com valores negativos da componente 2 e positivos da componente 1; e 17% com valores positivos para componente 1 e 2.

Para UH-2 apresenta amostras com valores positivos da componente 1 e da componente 2. Já a UH-3 (confinada) apresenta grande variação, com valores positivos e negativos tanto para a componente 1 como para a componente 2

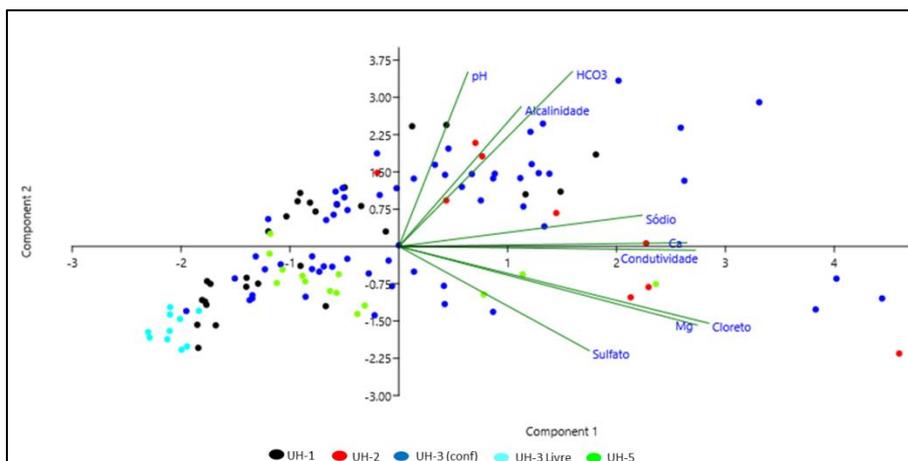


Figura 53: Gráfico de dispersão Biplot representando amostras das unidades hidroestratigráficas do SAC na região norte.

Para melhor entender os principais processos hidroquímicos que ocorrem durante o fluxo subterrâneo, as amostras são plotadas nos diagramas $STD/(Na^+ + Ca^{2+})$ e $STD/(Cl^-/Cl^- + HCO_3^-)$, propostos por Gibbs (GIBBS, 1970) e utilizados em trabalhos recentes como ZHOU *et al*, 2017 e SILVA *et al*, 2021 (Figura 54). Os diagramas indicam que a geoquímica da água subterrânea da região é controlada principalmente pelo processo de intemperismo, ou seja, da interação água sedimento. Porém se observa que as águas das UH-3(livre) apresentam forte influência do processo de precipitação na sua composição, com tendência a salinização das águas da UH-2, e parte das amostras da UH-3.

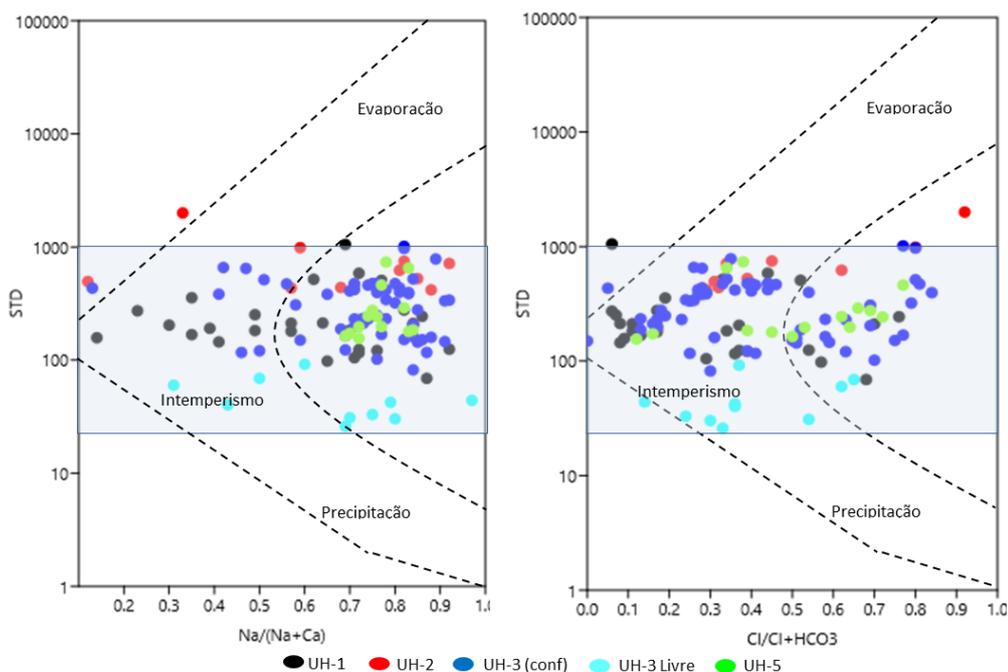


Figura 54: Diagramas de Gibbs, mostrando os principais mecanismos que controlam a composição da água subterrânea.

Os processos de dissolução são avaliados através das razões $(\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+) / (\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+)$ e $(\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+) / (\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+)$ da Figura 53, onde é possível identificar os minerais dominantes no processo de interação água/sedimento (GAILLARDET *et al*, 1999)(XIAO *et al*, 2015). Se pode observar que as águas são predominantemente influenciadas pelo intemperismo de silicatos, porém com influencia de carbonatos e dissolução de evaporitos. O reflexo da dissolução de evaporitos na composição da água pode estar relacionado a evolução da planície costeira, marcada pelas subidas e descidas do nível do mar, formando ambientes de sedimentação (lagunar por exemplo) propícios a formação de evaporitos.

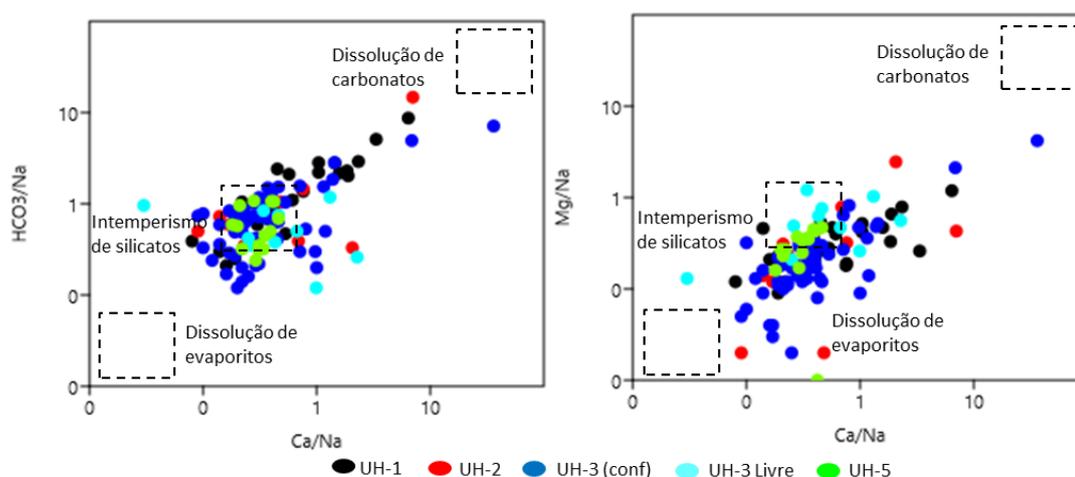


Figura 55: Gráficos das das razões $(\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+) / (\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+)$ e $(\text{Mg}/\text{Na}^+) / (\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+)$.

Segundo FISHER and MULLICAN (1997) e ZHOU *et al*, (2017) a relação $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-)$ versus $(\text{Na}^+ - \text{Cl}^-)$ pode ser utilizada para investigar a ocorrência de troca catiônica que ocorrem principalmente em aquíferos confinados. As amostras plotadas no quadrante inferior direito do gráfico e ao longo da linha com inclinação de -1 representam águas onde a troca catiônica é um importante processo de controle da química da água subterrânea.

A Figura 56 mostra que as trocas catiônicas são mais intensas nas UH mais profundas e confinadas (UH-2, UH-3 confinada), representando excesso de Na^+ sobre Cl^- e deficiência de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ sobre $\text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-$.

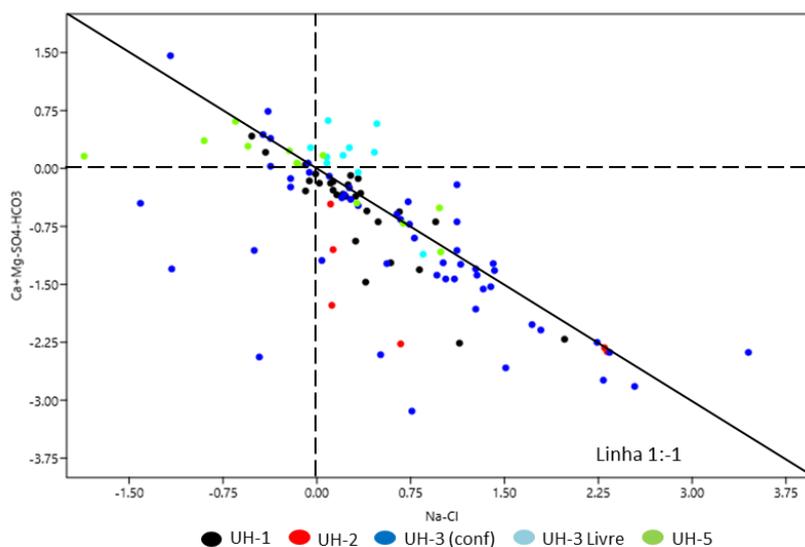


Figura 56: Relação entre $(Ca^{2+} + Mg^{2+} - SO_4^{2-} - HCO_3^-)$ versus $(Na^+ - Cl^-)$ representando amostras das unidades hidroestratigráficas do SAC na região central.

4.5 O Sistema Aquífero Costeiro na Região Sul da PCRS

4.5.1 Unidades Hidroestratigráficas

A região sul apresenta uma boa quantidade de informações, porém a maioria dos dados está concentrada na parte urbana dos municípios de Santa Vitória do Palmar, Chuí e Rio Grande. Os poços possuem profundidade média de 70m de profundidade com apenas 06 poços atingindo profundidades maiores que 100m.

A separação de diferentes unidades hidroestratigráficas buscou identificar pacotes sedimentares que possam apresentar, em escala regional, comportamentos hidrogeológicos semelhantes. Por meio dos perfis litológicos e geofísicos fica evidente a grande heterogeneidade que marca os pacotes sedimentares na região sul, sendo que as unidades hidroestratigráficas apresentam camadas argilosas/arenosas de variadas espessuras, porém sem continuidade lateral que permita sua individualização em escala regional.

O modelo conceitual elaborado é resultado da correlação dos dados geológicos e geofísicos, apresentado através de dois perfis transversais a linha de costa (perfil a-a' e b-b'), onde está representada a distribuição espacial das duas unidades hidroestratigráficas identificadas. Os perfis apresentam direção principal NW-SE com a projeção de perfis litológicos e geofísicos de poços representativos das diferentes unidades hidroestratigráficas. Os poços projetados estão identificados com código do SIAGAS.

Em função dos dados disponíveis, a delimitação das unidades hidroestratigráficas se limitou a 70 metros de profundidade no perfil localizado na região do município de Rio Grande (a-a') e a 100 m de profundidade no perfil localizado no município de Santa Vitória do Palmar (b-b').

A Figura 57 apresenta a delimitação da região Sul da PCRS e dos perfis elaborados.

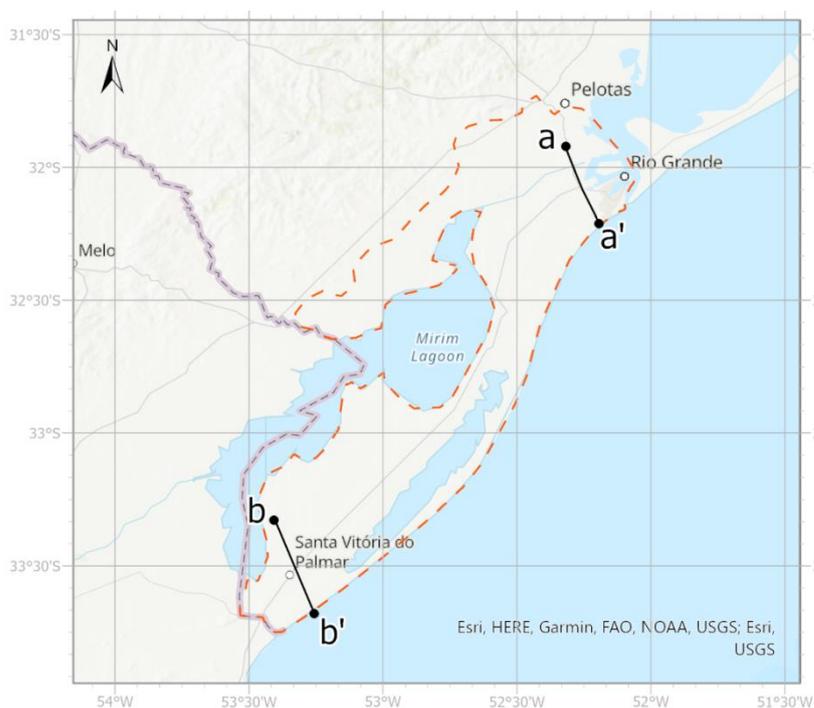


Figura 57: Delimitação da região Sul da PCRS e dos perfis elaborados.

Diferentemente das regiões norte e central da PCRS na região sul foi possível identificar apenas duas unidades hidroestratigráficas, principalmente em função das profundidades da maioria dos poços serem inferior a 60 m e pela grande heterogeneidade observada na UH-2, com camadas argilosas e arenosas sem continuidade lateral. A Figura 58 apresenta o perfil a-a', transversal a linha de costa com direção NW-SE e localizado no município de Rio Grande.

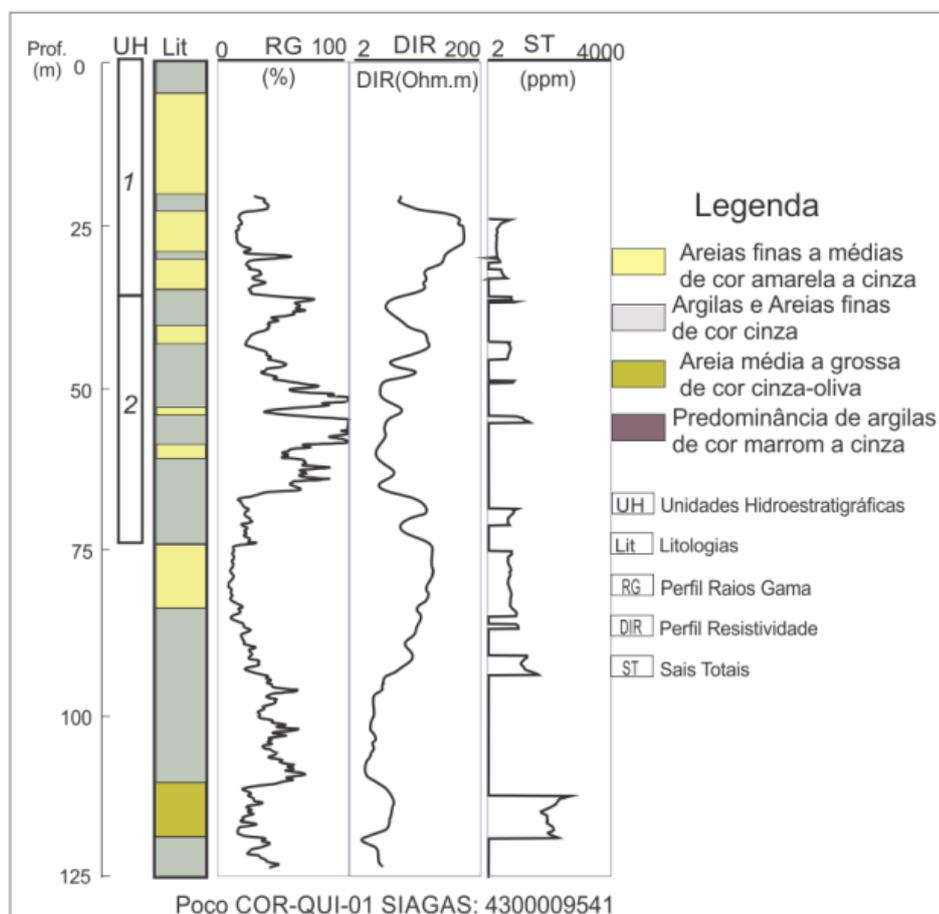


Figura 59: seções mostrando a espessura e distribuição das unidades hidroestratigráficas identificadas na região sul da PCRS.

A Figura 60 apresenta o perfil b-b', transversal a linha de costa com direção NW-SE e localizado no município de Santa Vitória do Palmar. Nesta parte da região sul a UH-1, predominantemente arenosa, apresenta distribuição relativamente homogênea com espessuras variando de 20m na região próxima Santa Vitória do Palmar e chegando a 40m na região da praia do Hermenegildo. A UH-2, predominantemente argilosa, pode ser caracterizada até cerca de 100 m de profundidade apresentando distribuição homogênea na região.

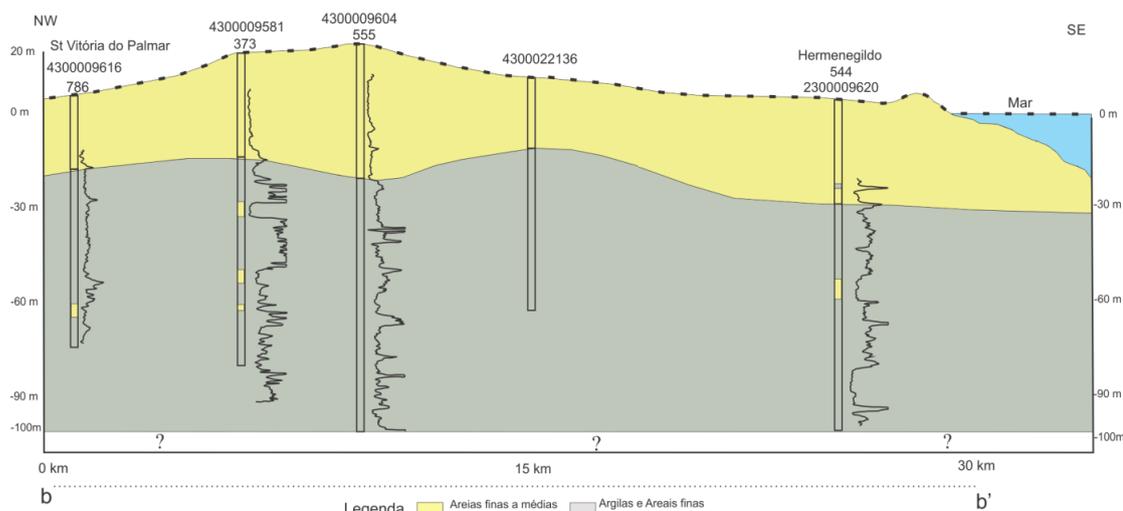


Figura 60: Perfil b-b', transversal a linha de costa com direção NW-SE, exemplificando a ocorrência das unidades hidroestratigráficas identificadas.

4.5.2 Unidades Hidroestratigráficas do SAC na região Sul

Para a avaliação das diferentes unidades hidroestratigráficas, os valores de resistividade elétrica, porosidade total e efetiva e sais totais dissolvidos foram extraídos diretamente dos perfis compostos das perfilagens geofísicas. A Figura 61 apresenta esses dados plotados em diagramas de caixa, indicando os valores máximos, mínimos, 1º e 3º quartis e mediana para cada unidade hidroestratigráficas.

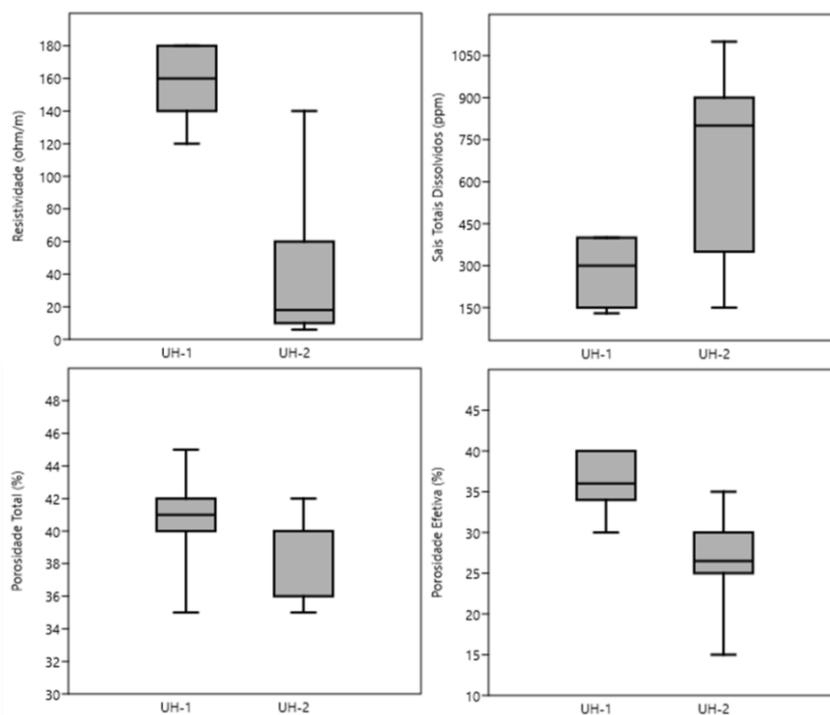


Figura 61: Diagramas de caixa com os valores de resistividade elétrica, porosidade total e efetiva e sais totais dissolvidos para cada unidade hidroestratigráfica da região sul da PCRS.

Unidade Hidroestratigráfica 1

A UH-1 é constituída predominantemente por areias de coloração amarelada que variam de granulometria fina a média, intercaladas com camadas argilosas. No topo da unidade predominam areias de granulometria média a fina, com grãos bem selecionados e de baixo grau de compactação relacionadas a depósitos eólicos, tendo a ocorrência de pequenas quantidades de argila. Na base predominam sedimentos arenosos de granulometria média a muito fina, mal selecionados com variado grau de compactação, e aumento do teor de argila.

De acordo com os perfis geofísicos, essa unidade apresenta medianas com valores de resistividade elétrica de 160 ohm/m, concentração de sais totais dissolvidos igual a 300 ppm, porosidade total de 41% e porosidade efetiva de 36%.

Unidade Hidroestratigráfica 2

Trata-se de um espesso pacote de sedimentos predominantemente argilosos de coloração cinza e alto grau de compactação, com presença de lentes/camadas de areias finas a média com variáveis espessuras e intensa presença de conchas. Representam ambientes de deposição marinho e lagunares, se estendendo a profundidades maiores que 70m.

De acordo com os perfis geofísicos, essa unidade apresenta medianas com valores de resistividade elétrica de 18,0 ohm/m, concentração de sais totais dissolvidos igual a 800 ppm, porosidade total de 40% e porosidade efetiva de 26%.

4.5.3 Caracterização Hidrodinâmica do SAC na região Sul

Para caracterização hidrodinâmica das unidades hidroestratigráficas foram analisados dados de vazão (Q), nível estático (NE), capacidade específica (Q/s) e transmissividade (T).

A Tabela 20 apresenta o resumo estatístico com os dados e valores utilizados para cada unidade hidroestratigráfica.

Tabela 20: Resumo estatístico com os dados e valores extraídos para cada unidade hidroestratigráfica.

| UH | P. Estatístico | Q/s (m ³ /h/m) | NE (m) | Q (m ³ /h) | T (m ² /h) |
|------|----------------|---------------------------|--------|-----------------------|-----------------------|
| UH-1 | N amostral | 46 | 52 | 51 | 19 |
| | Mínimo | 0,17 | 0,75 | 1,30 | 0,44 |
| | Máximo | 6,61 | 17,25 | 60,00 | 8,80 |
| | Mediana | 2,08 | 4,86 | 19,57 | 2,97 |
| UH-2 | N amostral | 30 | 31 | 31 | 12 |
| | Mínimo | 0,15 | 0,00 | 3,50 | 0,11 |
| | Máximo | 8,63 | 17,25 | 88,00 | 10,00 |
| | Mediana | 1,61 | 6,10 | 17,65 | 1,53 |

Os valores foram obtidos dos testes de bombeamento e estão plotados no diagrama da Figura 62, sendo apresentado o comparativo entre as UH.

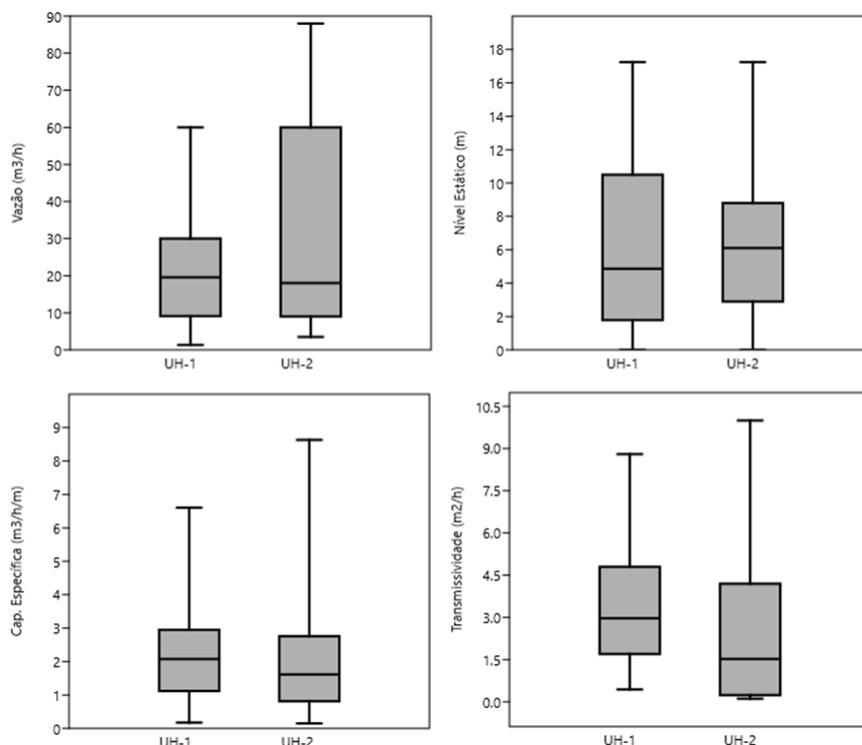


Figura 62: Diagramas com os valores das principais características hidrodinâmicas das unidades hidroestratigráficas.

A UH-1, não confinada e predominantemente arenosa, apresenta $Q_{med}=19,5 \text{ m}^3/\text{h}$ com valor máximo encontrado de $60\text{m}^3/\text{h}$, $Q/s_{med}=2,08 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ e $T_{med}=2,97\text{m}^2/\text{h}$. Os valores de NE representam bem a potentiometria da região, com $NE_{med}=4,86\text{m}$ variando de 0,75 a 17,25 m.

A UH-2, predominantemente argilosa, apresenta valores de mediana próximos aos da UH-1 pelo fato de que os dados disponíveis são de poços que captam água das porções mais arenosas da unidade. As vazões são relativamente altas, com $Q_{med}=17,6 \text{ m}^3/\text{h}$ com $Q/s_{med}=1,6 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ e $T_{med}=1,53\text{m}^2/\text{h}$. Os valores de $NE_{med}=6,10\text{m}$ sugere que essa unidade está confinada pelas camadas de sedimentos argilosos que estão entre as camadas arenosas.

4.5.4 Caracterização Hidroquímica do SAC na região Sul

A seguir é apresentada a caracterização hidroquímica das águas baseada em dados de poços representativos de cada unidade hidroestratigráfica. A avaliação do balanço iônico das

60 amostras representativas das 2 unidades hidroestratigráficas mostra que 73% dos erros são menores que 10%, sendo aceites erros menores que 20%.

A seguir são expostos os resultados referentes aos dados dos parâmetros Potencial Hidrogeniônico (pH), Condutividade Elétrica (CE) Sólidos Totais Dissolvidos (STD) e Alcalinidade para cada uma das unidades hidroestratigráficas. A Tabela 21 apresenta o resumo estatístico com os dados utilizados para a análise desses parâmetros.

Tabela 21: Resumo estatístico com dados de pH, Condutividade elétrica, Sólidos totais dissolvidos e Alcalinidade.

| Unidade Hidroestratigráfica | Parâmetro Estatístico | pH | CE ($\mu\text{S}/\text{cm}^2$) | STD (mg/l) | Alcalinidade (mg/l) |
|-----------------------------|-----------------------|------|----------------------------------|------------|---------------------|
| UH-1 | N amostral | 44 | 43 | 34 | 44 |
| | Minimo | 5,7 | 58 | 96,6 | 3,43 |
| | Máximo | 8,1 | 1983 | 2400 | 173,00 |
| | Mediana | 6,7 | 400 | 249,7 | 78,00 |
| UH-2 | N amostral | 29 | 26 | 17 | 25 |
| | Minimo | 6,16 | 153 | 72 | 40,85 |
| | Máximo | 8,5 | 3775 | 2951 | 506,50 |
| | Mediana | 7,4 | 990 | 395 | 225,00 |

A Figura 63 apresenta os diagramas de caixa mostrando a distribuição dos valores para as diferentes unidades hidroestratigráficas.

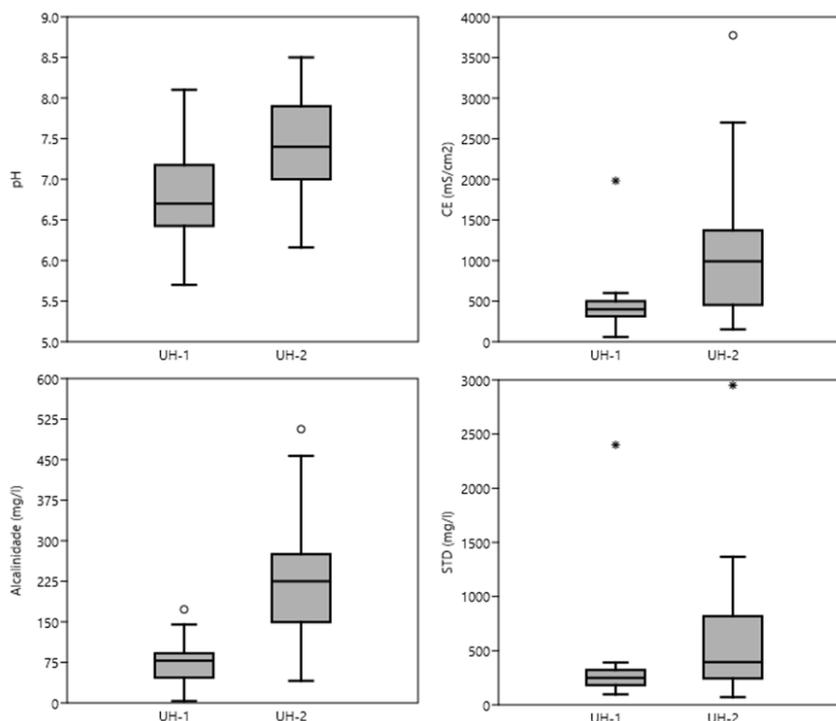


Figura 63: Diagramas de caixa mostrando a distribuição dos valores dos parâmetros pH, Condutividade elétrica (CE), Alcalinidade e Sólidos Totais Dissolvidos (STD).

Os valores de pH na região variam de 5,7 a 8,5 com medianas variando de 6,7 (UH-1) a 7,4 (UH-2), o que demonstra a presença de águas com tendência geral a neutralidade. Na UH-1 ocorrem águas levemente ácidas, com a maioria das amostras com valores entre 6,4 e 7,0 com $pH_{med}=6,7$ indicando presença de águas recentes oriundas principalmente da infiltração da água da chuva. Já na UH-2 predominam águas levemente ácidas, com valores variando de 6,16 a 8,5 e $pH_{med}=7,4$.

Os valores de CE refletem bem a característica de águas pouco mineralizadas da UH-1 com valores de $CE_{med}=400,0\mu S/cm^2$, porém podendo apresentar zonas mais salinizadas com valores chegando a $1983\mu S/cm^2$. Já na UH-2 ocorrem valores de até $3775\mu S/cm^2$ com $CE_{med}=990\mu S/cm^2$, demonstrando o enriquecimento iônico destas águas, porém com grande variabilidade, assim como observado nas regiões norte e central da PCRS. Já a UH-2 apresenta valores variando de 500 a $3300\mu S/cm^2$ com $CE_{med}=1050\mu S/cm^2$, representando a unidade com águas mais salinizadas. Essa grande variação nos valores de CE refletem os graus de confinamento, as diferentes condições de circulação da água, tempo de residência e de interações água/mineral. As camadas de sedimentos possuem além de diferenças granulométricas, características associadas ao ambiente de sedimentação, que acabam tendo influência na composição da água subterrânea das diferentes unidades.

A Figura 64 apresenta a distribuição dos principais constituintes presentes nas águas subterrâneas do SAC na região sul, expressas em peso equivalente (meq/L).

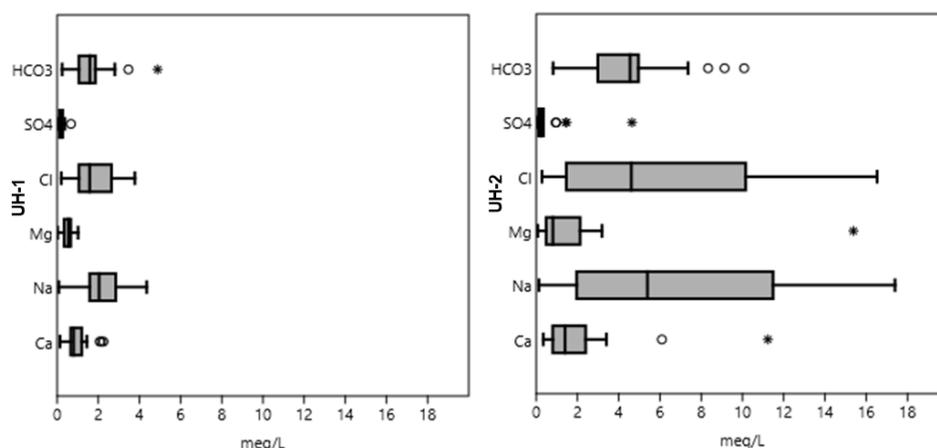


Figura 64: Diagramas de caixa com a concentração dos principais íons em peso equivalente (meq/L).

A análise dos gráficos demonstra os diferentes graus de salinização das águas subterrâneas nas diferentes unidades sendo a UH-1 com águas pouco a mediamente enriquecidas enquanto a UH-2, mais profunda, com águas mais enriquecidas. As medianas das concentrações dos principais cátions seguem a ordem $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$ e de ânions $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-}$, sendo as concentrações de Cl^- e HCO_3^- muito próximas em ambas as UH.

As correlação entre o Na^+ com os ânions Cl^- e HCO_3^- é utilizada para identificar possíveis efeitos de intrusões salinas em aquíferos costeiros (KIM et al, 2003; WEN *et al.*, 2012; ZAMRSKY *et al.*, 2020). A Figura 65 mostra a correlação entre o Na^+ com os ânions Cl^- e HCO_3^- . Se observa que a UH-1 apresenta relação aproximada de 1:1 do Na^+ com o Cl^- e o HCO_3^- , sendo que na maioria das amostras da UH-2 ocorre predomínio de Na^+ sobre o Cl^- e o HCO_3^- .

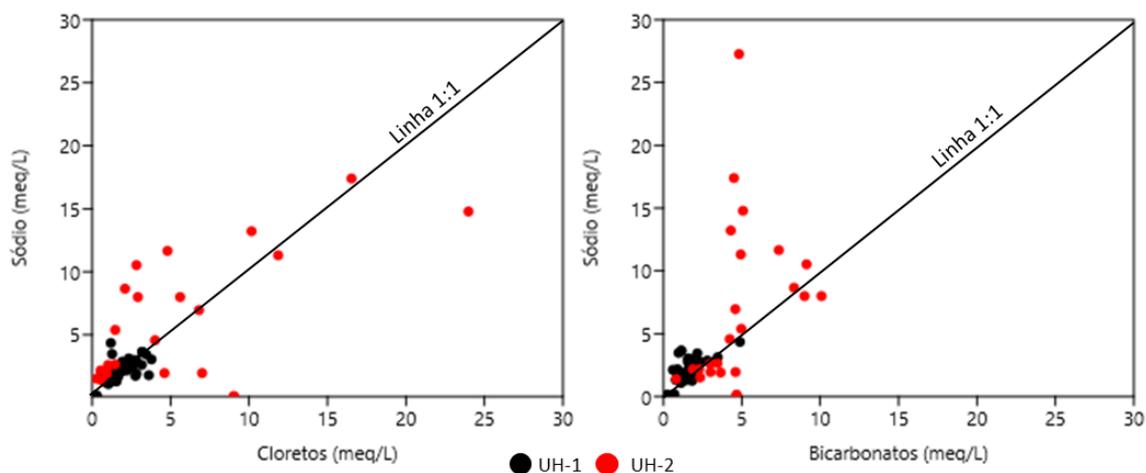


Figura 65: Relação entre $\text{Na}^+ \times \text{Cl}^-$ e $\text{Na}^+ \times \text{HCO}_3^-$.

A avaliação da associação entre os principais íons e STD são úteis para interpretar os principais processos de evolução hidrogeoquímica que ocorrem no aquífero (ZHOU; LI; LU, 2017). Para isso foi realizada a correlação de Person para amostras de cada unidade, apresentado nas Tabela 22 e 23, sendo destacadas as relações mais significativas (maiores que 0,8).

Na UH-1, livre e com águas pouco enriquecidas não há forte correlação do STD com os principais íons, indicando que não há domínio de um íon específico na mineralização da água. Os maiores índices de correlação são com Ca^{2+} (60%) e Mg^{2+} (0,76%).

Foram observadas correlações significativas entre STD com os cátions Mg^{2+} , Ca^{2+} e Na^+ na UH-2. Essas relações indicam a predominância desses íons na mineralização das águas, podendo estar associadas ao ambiente de deposição das camadas aquíferas e a presença de camadas com conchas.

Tabela 22: : Correlação entre os principais parâmetros físico-químicos da UH-1 na região sul.

| UH-1 | Ca^{2+} | Na^+ | Mg^{2+} | Cl^- | SO_4^{2-} | HCO_3^- | STD |
|--------------------|------------------|---------------|------------------|---------------|--------------------|------------------|-----|
| Ca^{2+} | 1 | | | | | | |
| Na^+ | 0,28 | 1 | | | | | |
| Mg^{2+} | 0,42 | 0,29 | 1 | | | | |
| Cl^- | 0,49 | 0,59 | 0,62 | 1 | | | |
| SO_4^{2-} | 0,39 | 0,43 | 0,31 | 0,26 | 1 | | |
| HCO_3^- | 0,40 | 0,55 | 0,30 | 0,24 | 0,14 | 1 | |
| STD | 0,60 | 0,12 | 0,76 | -0,30 | 0,03 | -0,19 | 1 |

Tabela 23: Correlação entre os principais parâmetros físico-químicos da UH-2 na região sul.

| UH-2 | Ca^{2+} | Na^+ | Mg^{2+} | Cl^- | SO_4^{2-} | HCO_3^- | STD |
|--------------------|------------------|---------------|------------------|---------------|--------------------|------------------|-----|
| Ca^{2+} | 1 | | | | | | |
| Na^+ | 0,66 | 1 | | | | | |
| Mg^{2+} | 0,91 | 0,71 | 1 | | | | |
| Cl^- | 0,86 | 0,94 | 0,92 | 1 | | | |
| SO_4^{2-} | 0,38 | 0,25 | 0,06 | 0,15 | 1 | | |
| HCO_3^- | 0,12 | 0,39 | 0,07 | 0,14 | 0,22 | 1 | |
| STD | 0,93 | 0,89 | 0,93 | 0,32 | 0,29 | 0,35 | 1 |

As águas subterrâneas das diferentes unidades hidroestratigráficas foram classificadas de acordo com o diagrama de Piper (Figura 66), onde as concentrações dos íons maiores são plotadas no diagrama, podendo ajudar a entender o processo controlador da hidroquímica das águas. Como se pode observar a amostras apresentam uma larga distribuição ao longo do

diagrama, representando a grande variedade de tipos hidrogeoquímicos das águas subterrâneas.

As UH-1 e UH-2 apresentam uma larga distribuição no diagrama não havendo diferenciação dos tipos de água subterrânea de uma unidade para outra. Predominam águas mais evoluídas quimicamente, do tipo bicarbonatadas e cloretadas sódicas.

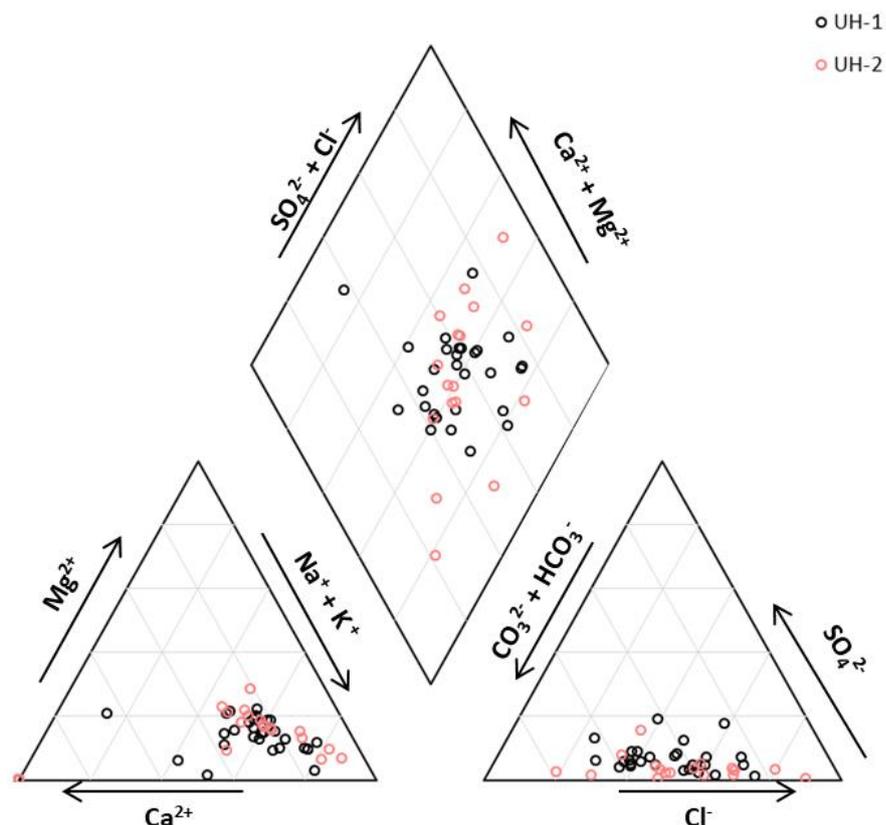


Figura 66: Diagrama de Piper das águas subterrâneas na região sul da PCRS.

A análise dos componentes principais (ACP) foi realizada com os parâmetros pH, condutividade elétrica, alcalinidade, sódio, cálcio, magnésio, cloreto, bicarbonatos e sulfato. Verificou-se que as duas principais componentes são responsáveis por 69,62% da variabilidade de todo o conjunto de dados referentes às águas subterrâneas do SAC na região sul (Tabela 24).

Tabela 24: Variância total das águas do SAC na região sul.

| Componentes | Total | % variância | % cumulativa |
|-------------|-------|-------------|--------------|
| 1 | 3,97 | 47,66 | 47,66 |
| 2 | 1,83 | 21,96 | 69,62 |
| 3 | 1,07 | 12,90 | 82,52 |
| 4 | 0,74 | 8,93 | 91,45 |
| 5 | 0,50 | 6,09 | 97,54 |
| 6 | 0,09 | 1,04 | 98,58 |
| 7 | 0,04 | 0,54 | 99,12 |
| 8 | 0,04 | 0,51 | 99,63 |
| 9 | 0,030 | 0,36 | 99,99 |

Avaliando-se os componentes de forma individual (Tabela 25), temos que a componente 1 é responsável pelas variáveis mais significativas, possuindo relação positiva com CE, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ e Cl⁻. Já para a componente 2 as variáveis mais significativas são o pH, alcalinidade, SO₄⁻ e o bicarbonato.

Tabela 25: Matriz de Componentes das águas do SAC na região sul.

| | Componentes | |
|--------------|-------------|-------|
| | 1 | 2 |
| pH | 0,15 | 0,54 |
| CE | 0,43 | -0,27 |
| Alcalinidade | 0,33 | 0,40 |
| Sódio | 0,39 | -0,25 |
| Calcio | 0,34 | -0,01 |
| Magnésio | 0,32 | -0,10 |
| Cloreto | 0,42 | -0,33 |
| Bicarbonato | 0,29 | 0,46 |
| Sulfato | 0,19 | 0,23 |

A Figura 67 representa as diferentes unidades hidroestratigráficas no gráfico de dispersão *biplot*, onde a componente 1 esta representada no eixo x e a componente 2 no eixo y.

O gráfico evidencia a ocorrência de águas pouco mineralizadas da UH-1 bem marcadas pelos baixos valores das componentes 1 e 2. A UH-2 apresenta predominância de valores positivos para as componentes 1 e 2, porém com 30% das amostras em valores negativos da componente 1. Fica destacado as 2 amostras da UH-2 mais salinizadas, apresentando altos valores da componente 1 e baixos valores da componente 2.

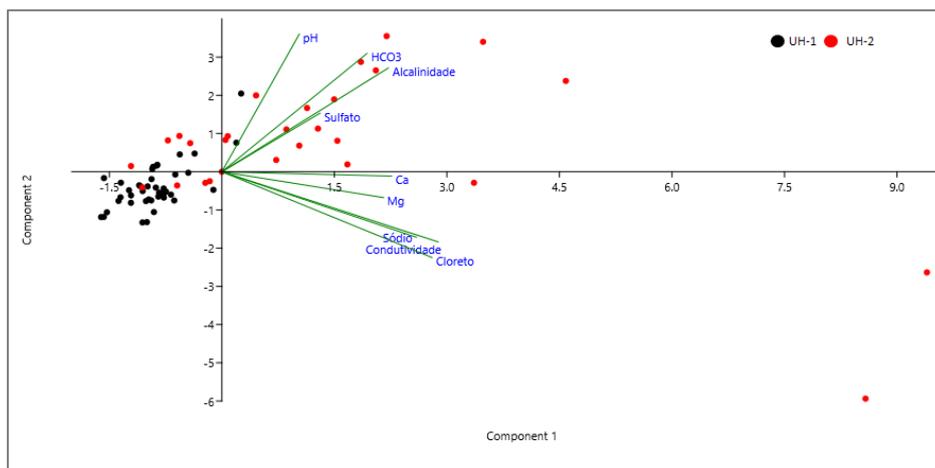


Figura 67: Gráfico de dispersão Biplot representando amostras das unidades hidroestratigráficas do SAC na região sul.

Para melhor entender os principais processos hidroquímicos que ocorrem durante o fluxo subterrâneo, as amostras são plotadas nos diagramas $STD/(Na^+ + Ca^{2+})$ e $STD/(Cl^-/Cl^- + HCO_3^-)$, propostos por Gibbs (GIBBS, 1970) e utilizados em trabalhos recentes como ZHOU *et al*, 2017 e SILVA *et al*, 2021 (Figura 68). Os diagramas indicam que a geoquímica da água subterrânea da região é controlada principalmente pelo processo de intemperismo, ou seja, da interação água sedimento.

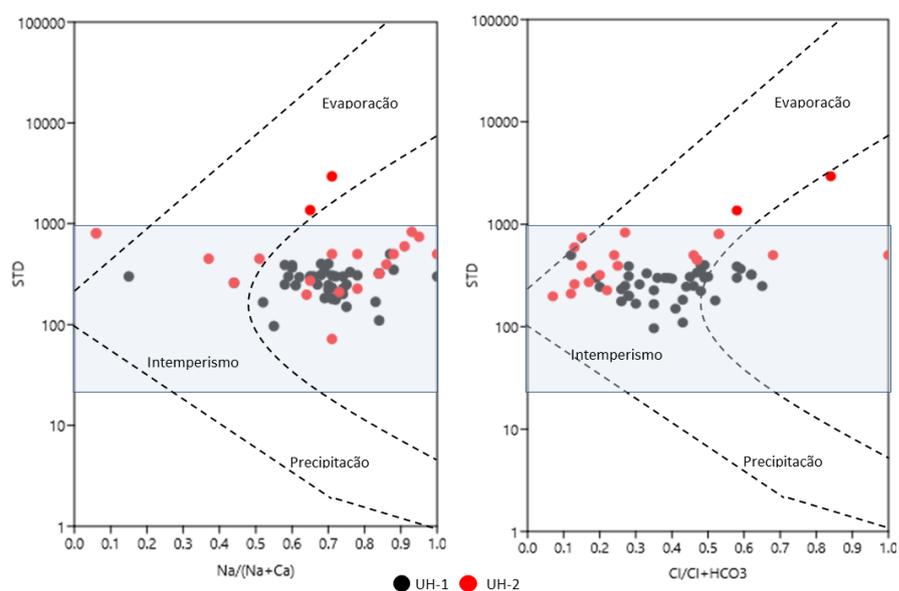


Figura 68: Diagramas de Gibbs, mostrando os principais mecanismos que controlam a composição da água subterrânea.

Os processos de dissolução são avaliados através das razões $(HCO_3^-/Na^+) / (Ca^{2+}/Na^+)$ e $(Mg^{2+}/Na^+) / (Ca^{2+}/Na^+)$ da Figura 69, onde é possível identificar os minerais dominantes

no processo de interação água/sedimento (GAILLARDET *et al*, 1999)(XIAO *et al*, 2015). Se pode observar que as águas são predominantemente influenciadas pelo intemperismo de silicatos, porém com influência tanto de dissolução de carbonatos como amostras mais mineralizadas com influência de dissolução de evaporitos.

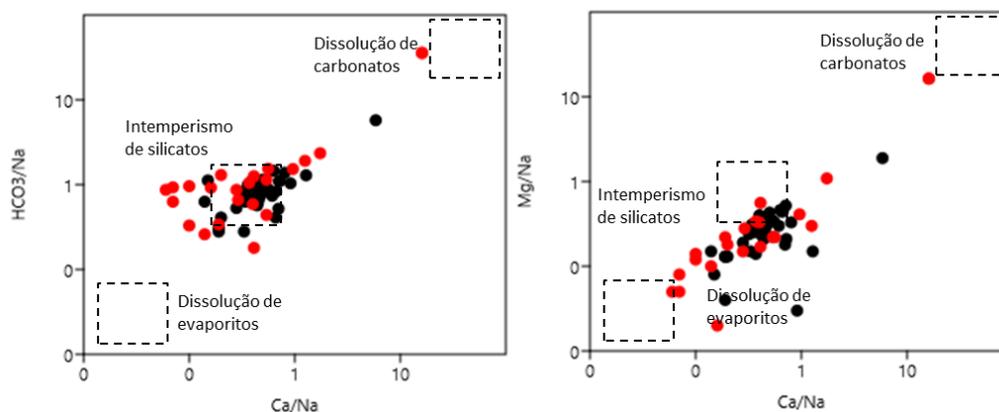


Figura 69: Gráficos das das razões $(\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+) / (\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+)$ e $(\text{Mg}/\text{Na}^+) / (\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+)$.

Segundo FISHER and MULLICAN (1997) e ZHOU *et al*, (2017) a relação $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-)$ versus $(\text{Na}^+ - \text{Cl}^-)$ pode ser utilizada para investigar a ocorrência de troca catiônica que ocorrem em aquíferos. As amostras plotadas no quadrante inferior direito do gráfico e ao longo da linha com inclinação de -1 representam águas onde a troca catiônica é um importante processo de controle da química da água subterrânea.

A Figura 70 mostra que as trocas catiônicas são mais intensas na UH-2 que é mais profunda e confinada, representando excesso de Na^+ sobre Cl^- e deficiência de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ sobre $\text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-$.

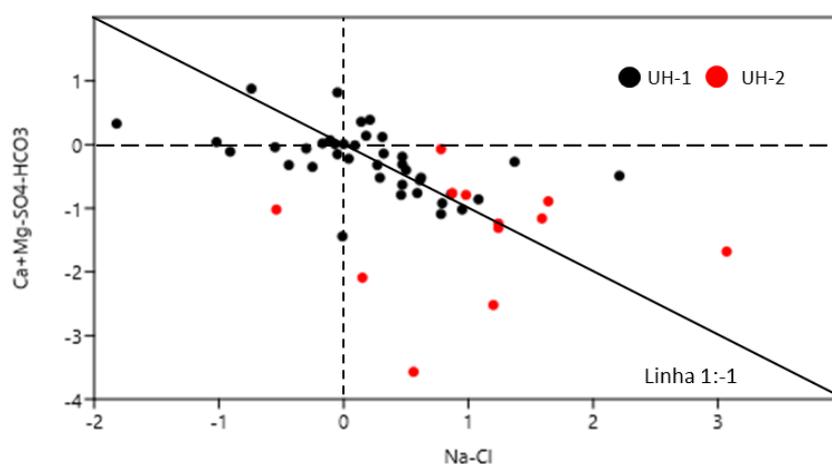


Figura 70: Relação entre $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-)$ versus $(\text{Na}^+ - \text{Cl}^-)$ representando amostras das unidades hidroestratigráficas do SAC na região sul.

5 CARACTERIZAÇÃO ISOTÓPICA DO SAC

5.1 Análise da chuva histórica de Porto Alegre

Os isótopos de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ são seletivamente particionados em cada etapa do ciclo hidrológico, fornecendo assim uma “impressão digital” da origem da água.

A Figura 71 demonstra a caracterização isotópica da água meteórica da rede de monitoramento histórica (LMWL), e da GNIP-POA (2017-2018), mostrando a correlação entre $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ com a dispersão dos resultados, assim como a regressão linear de melhor ajuste. A GNIP-POA é parte de uma rede operada pela CPRM em todo território brasileiro, composta por 20 estações (ao final de 2021) com coletas mensais, contudo o intervalo de tempo da GNIP-POA é demasiado curto e pouco representativo para considerá-la como sendo uma nova LMWL.

Os dados brutos permitem o desenvolvimento de correlações e operações entre as variáveis, cujo resultado e padrão auxiliam na interpretação e uso dos dados isotópicos como informação complementar para iniciativas diversas de caráter climático ambiental.

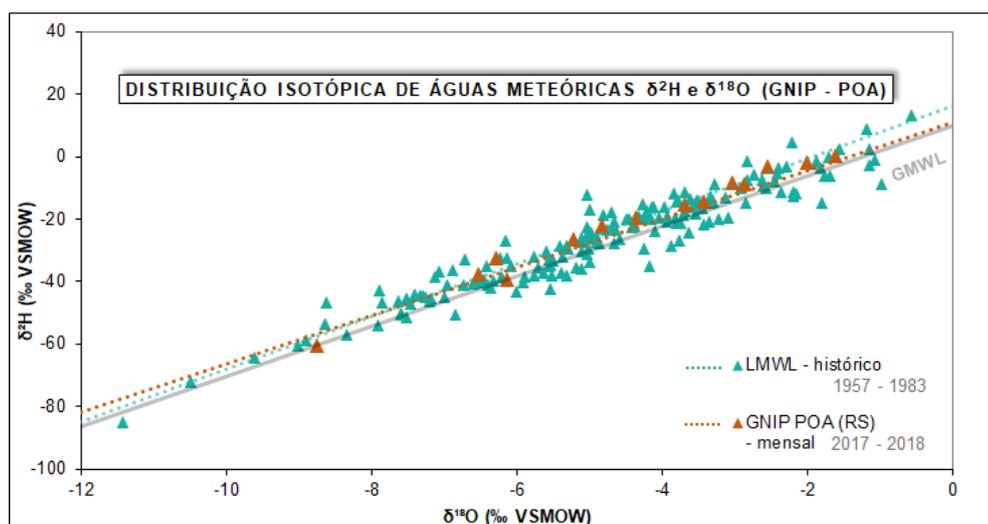


Figura 71: Gráfico de correlação entre $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ de amostras de águas meteóricas da rede GNIP – POA (RS). O gráfico de dispersão linear contém a Linha Meteórica Local (LMWL) ($\delta^2\text{H}=7.67*\delta^{18}\text{O} + 10.59$) e Global (GMWL) ($\delta^2\text{H}=8*\delta^{18}\text{O} + 10$).

A assinatura isotópica das amostras no período de análise histórico (1965–1987) apresenta variação no valor de $\delta^{18}\text{O}$ de -11.43 a 0.56‰, com média de $-4.78\pm 1.98\%$. Para $\delta^2\text{H}$ houve variação de -84.9 a 13.10‰, com média de $-26.00\pm 16.01\%$.

Toda interpretação de dados isotópicos precede do conhecimento a respeito do clima na região, objeto do estudo. A região em que o município de Porto Alegre está situado é alvo

da atuação de sistemas atmosféricos distribuídos especificamente em cada estação, como a dinâmica de transporte de umidade diretamente do oceano por todo o ano, Frentes Frias (FF), Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) (ITO & AMBRIZZI, 2000 ; BORTOLIN *et al.*, 2020). As variações sazonais dos valores de $\delta^{18}\text{O}$ relacionadas a precipitação e a temperatura são mostradas nos gráficos da Figura 72, sendo considerado o desvio padrão de cada mês e os dados mensais do isótopo de O^{18} para ambas análises.

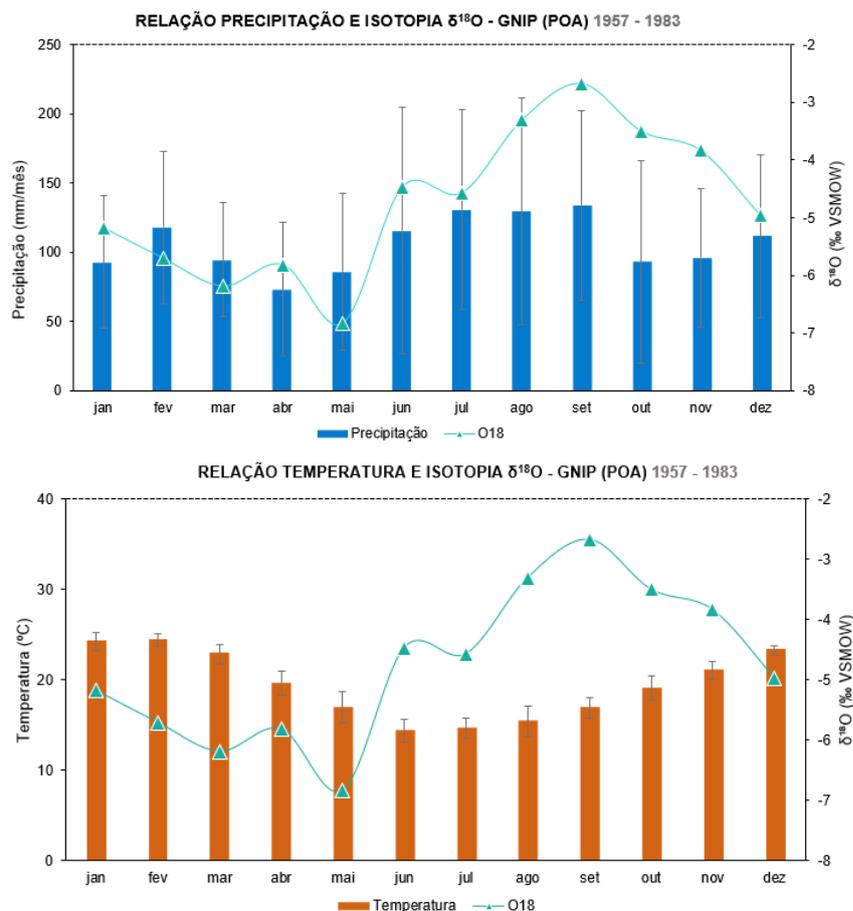


Figura 72 : Representação variação de $\delta^{18}\text{O}$ em relação a precipitação e temperatura.

A dinâmica dos processos meteorológicos, por atuar de forma distinta em cada localidade, permite compreender as possíveis razões para a variabilidade da composição isotópica. A distribuição sazonal das chuvas de Porto Alegre tem uma distribuição conforme a média mínima durante os meses de outono: março (94,53 mm), abril (73,28mm) e maio (86,14mm). Quanto a temperatura, a distribuição uniforme é visual entre as estações, com as menores temperaturas nos meses de inverno: junho (14,41°C), julho (14,63°C) e agosto (15,41°C).

Quanto a sazonalidade da dinâmica isotópica (Figura 73), os valores mais enriquecidos se distribuem nas estações da primavera, com média aritmética de -3,33‰ ($\delta^{18}\text{O}$) e -14,64‰

($\delta^2\text{H}$), e no inverno, com média aritmética de -4.07‰ ($\delta^{18}\text{O}$) e -18.74‰ ($\delta^2\text{H}$). Por outro lado, os valores isotópicos sutilmente mais empobrecidos, se encontram nas estações do verão, com média aritmética de -5.30‰ ($\delta^{18}\text{O}$) e -31.00‰ ($\delta^2\text{H}$) e, no outono, com média aritmética de -6.28‰ ($\delta^{18}\text{O}$) e -38.45‰ ($\delta^2\text{H}$).

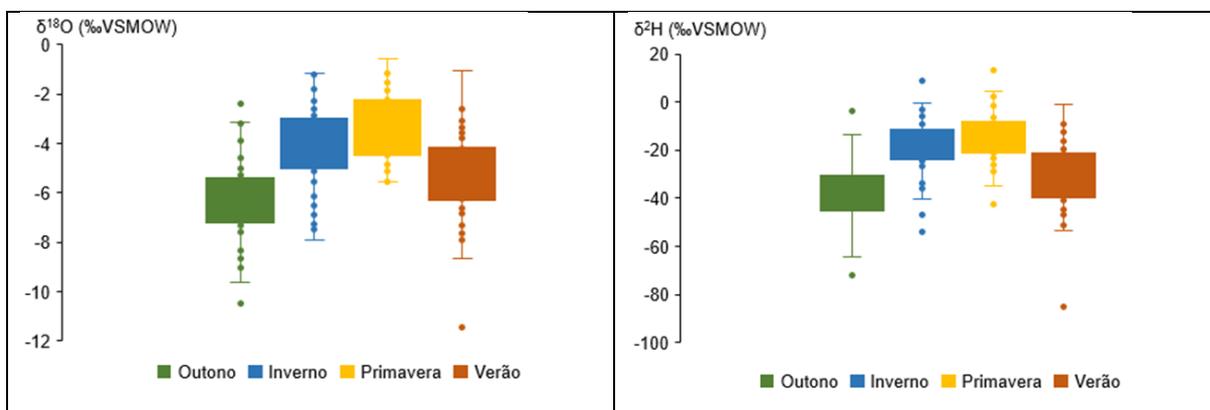


Figura 73: Box-Plot representando a composição isotópica sazonal de Porto Alegre nas diferentes estações do ano. Representação dos valores médios de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$.

5.2 Análise Isotópica das Águas Subterrâneas do SAC

Nesta análise são apresentados dados analíticos cedidos pelo SGB/CPRM, referente a 14 poços da rede RIMAS, localizados nas diferentes regiões da PCRS (Figura 74).

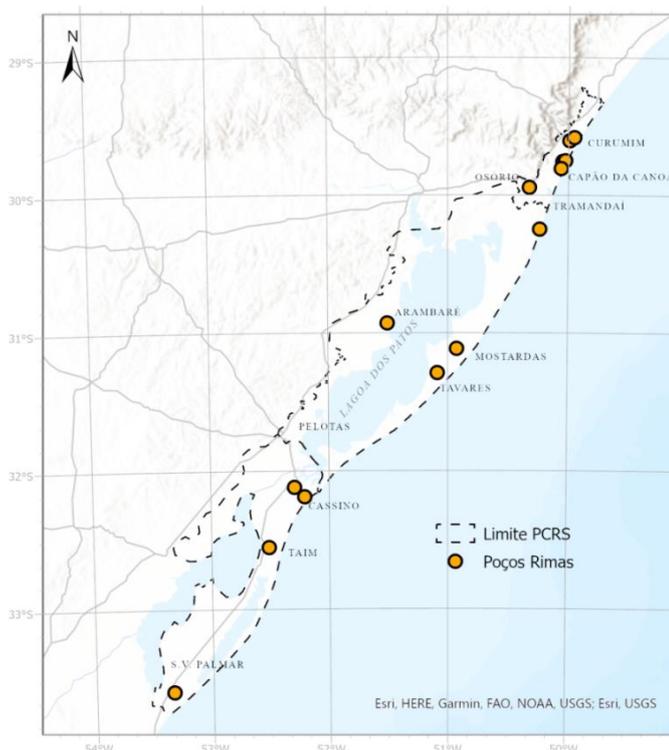


Figura 74: Localização dos poços da RIMAS, que contam com dados de análises isotópicas de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$.

Os dados disponíveis são referentes a coletas multiníveis realizadas em diferentes seções filtrantes através do uso do método de baixa vazão, totalizando 32 amostras representativas das unidades hidroestratigráficas (UH-1, UH-2 e UH-3 conf). As coletas foram realizadas no período do outono, nos meses de abril e maio de 2016, historicamente marcado como período de menor quantidade de chuva na região.

A Tabela 26 apresenta os dados isotópicos e a profundidade de coleta de cada amostra com a indicação da UH representada.

Tabela 26: Dados isotópicos dos poços da RIMAS localizados nas diferentes regiões do SAC. Erro de $\pm 0,09$ para $\delta^{18}\text{O}$ e $0,9$ para $\delta^2\text{H}$.

| Poço | Prof. Coleta | $\delta^{18}\text{O}$ (‰) | $\delta^2\text{H}$ (‰) | Prof. Poço | UH |
|-----------------------|--------------|---------------------------|------------------------|------------|--------|
| Barra do Guerino | 6 | -3,21 | -14,20 | 108 | 1 |
| | 27 | -3,20 | -14,10 | | 2 |
| | 44 | -3,24 | -14,50 | | 2 |
| ETA Curumim | 11 | -3,36 | -13,80 | 67 | 1 |
| | 32 | -3,60 | -15,50 | | 2 |
| | 50 | -3,60 | -15,60 | | 2 |
| ETE Capão da Canoa | 12 | -2,92 | -12,90 | 100 | 1 |
| | 37 | -2,84 | -12,50 | | 2 |
| | 72 | -2,80 | -12,20 | | 3 conf |
| ETA Capão da Canoa | 14 | -2,48 | -10,10 | 72 | 1 |
| | 36 | -2,47 | -10,20 | | 2 |
| | 58 | -2,43 | -9,90 | | 2 |
| ETE Osório | 14 | -4,40 | -20,10 | 88 | 1 |
| | 38 | -4,07 | -19,50 | | 2 |
| | 76 | -4,07 | -19,50 | | 3 conf |
| ETE Xangrilá | 12 | -3,90 | -17,30 | 86 | 1 |
| | 32 | -3,55 | -15,80 | | 2 |
| | 75 | -3,56 | -15,90 | | 3 conf |
| Reserva do Taim | 22 | -3,51 | -17,50 | 42 | 1 |
| | 32 | -3,44 | -17,20 | | 2 |
| Sta Vitoria do Palmar | 48 | -2,99 | -14,70 | 66 | 2 |
| Arambaré | 42 | -4,41 | -23,00 | 57 | 3 conf |
| Tavares | 10 | -4,37 | -23,50 | 60 | 1 |
| | 34 | -4,20 | -22,90 | | 2 |
| | 50 | -4,11 | -22,50 | | 3 conf |
| Mostardas | 27 | -4,39 | -23,20 | 32 | 2 |
| PZ1 - Cassino | 12 | -2,76 | -13,1 | 35 | 1 |
| | 20 | -2,68 | -12,7 | | 2 |
| PZ3 - Cassino | 8 | -2,86 | -14,8 | 24 | 1 |
| | 18 | -2,82 | -14,7 | | 2 |
| Bal. Pinhal | 39 | -3,4 | -16,2 | 105 | 2 |
| | 80 | -3,43 | -16,4 | | 3 conf |

A correlação $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ da Figura 75 apresenta os valores isotópicos médios tanto da precipitação mensal quanto das amostras de água subterrânea. O gráfico mostra que as assinaturas isotópicas das águas do SAC coincidem com as assinaturas isotópicas das chuvas das estações chuvosas (inverno e primavera), mais precisamente entre os meses de junho e novembro.

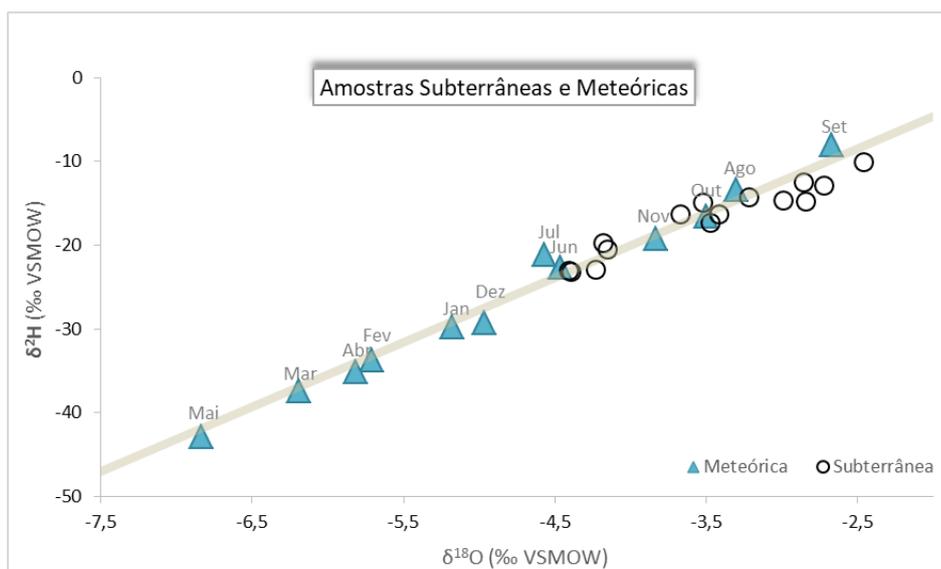


Figura 75: Gráfico de correlação entre valores médios de $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ para amostras de águas meteóricas e subterrâneas.

Para avaliação de cada UH amostrada, na Tabela 27 são apresentados os valores máximos e mínimos obtidos para $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$. Os dados mostram que não há variação considerável na composição isotópica das águas presentes nas diferentes unidades, com valores mínimos de $\delta^{18}\text{O}$ variando de -2,43‰ a -2,8‰ e máximos variando de -4,39‰ a -4,41‰. Para o $\delta^2\text{H}$ os valores mínimos variam de -9,9‰ a -12,2‰ e máximos de -23,0‰ a -23,5‰. Porém o range observado entre os valores máximos e mínimos mostram que há locais com águas mais enriquecidas em relação a outras.

Tabela 27: Valores máximos e mínimos de oxigênio e deutério das UH-1, UH-2 e UH-3 confinada.

| | UH-1 | | UH-2 | | UH-3 Conf | |
|---------------|---------------------------|------------------------|---------------------------|------------------------|---------------------------|------------------------|
| | $\delta^{18}\text{O}$ (‰) | $\delta^2\text{H}$ (‰) | $\delta^{18}\text{O}$ (‰) | $\delta^2\text{H}$ (‰) | $\delta^{18}\text{O}$ (‰) | $\delta^2\text{H}$ (‰) |
| Mínimo | -2,76 | -10,1 | -2,43 | -9,9 | -2,8 | -12,2 |
| Máximo | -4,4 | -23,5 | -4,39 | -23,2 | -4,41 | -23 |

A fim de avaliar se ocorrem variações locais na composição isotópica da água, o gráfico da Figura 76 apresenta os valores de $\delta^{18}\text{O}$ para cada profundidade amostrada nos

diferentes poços de monitoramento. O gráfico mostra que ocorrem variações de valores entre os poços, sendo que as águas mais depletadas apresentam valores de $\delta^{18}\text{O}$ menores que -4,0‰. Uma sutil variação é observada nas assinaturas isotópicas com o aumento da profundidade amostrada sendo que, com exceção do poço localizado em Curumim, há tendência da água se tornar mais enriquecida em profundidade. Essa característica vai ao encontro ao descrito por EL-SAYE *et al* (2018), em aquífero quaternário do nordeste do Egito, e pode indicar linhas de fluxo diferentes e eventos de recarga em períodos geológicos distintos (paleoclimas).

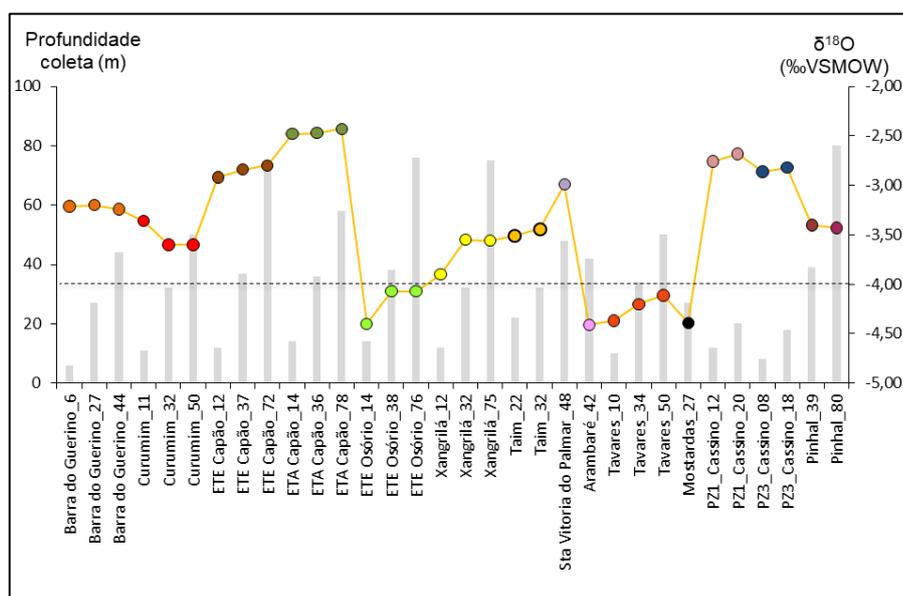


Figura 76: Valores de $\delta^{18}\text{O}$ (representados pelos pontos coloridos) para as diferentes profundidades amostradas em cada poço (representadas pelas barras).

A Figura 77 apresenta a correlação $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ das amostras de água subterrânea contendo a Linha Meteorica Local (LMWL) e Global (GMWL). Todas as amostras estão plotadas ao longo das linhas GMWL e LMWL, indicando a origem meteórica das águas do SAC. As águas dos poços localizados na região central (grupo I) formam um grupo com assinatura isotópica mais depletada em relação demais regiões, com valores variando de -4,07‰ a -4,41‰ ($\delta^{18}\text{O}$) e -23,5‰ a -22,5‰ ($\delta^2\text{H}$). Esta característica pode indicar a influência da lagoa dos Patos na recarga dos aquíferos da região, visto que a lagoa é um importante receptor de águas continentais do estado, com uma área de contribuição de aproximadamente 85.000Km². Valores depletados, -4,0 a -4,4‰ ($\delta^{18}\text{O}$) e -19,5‰ a -20,1‰ ($\delta^2\text{H}$), também são observados no poço localizado no município de Osório (grupo II). Estes valores podem estar refletindo a influencia da lagoa do Barros e das fortes chuvas de inverno na recarga local, que também é influenciada pela proximidade deste poço com a escarpa da

Serra Geral. Segundo GONFIANTINNI *et al.* (1976) o resfriamento orográfico experimentado pelas massas de ar em altitude é representado por empobrecimento progressivo nos valores de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$.

Assinaturas isotópicas relativamente enriquecidas $\delta^{18}\text{O} > -4,0\text{‰}$ e $\delta^2\text{H} > -20,0\text{‰}$ marcam a maioria das amostras (grupo III). Estes valores são indicadores que o processo de evaporação é importante na região, podendo ocorrer em diferentes taxas, de acordo com as áreas úmidas que, na PCRS, estão relacionadas predominantemente a banhados, canais de irrigação e lagoas pouco profundas (<5m). A influência do processo de evaporação também é evidenciado pela inclinação da reta das amostras analisadas, com coeficiente angular igual a 6.

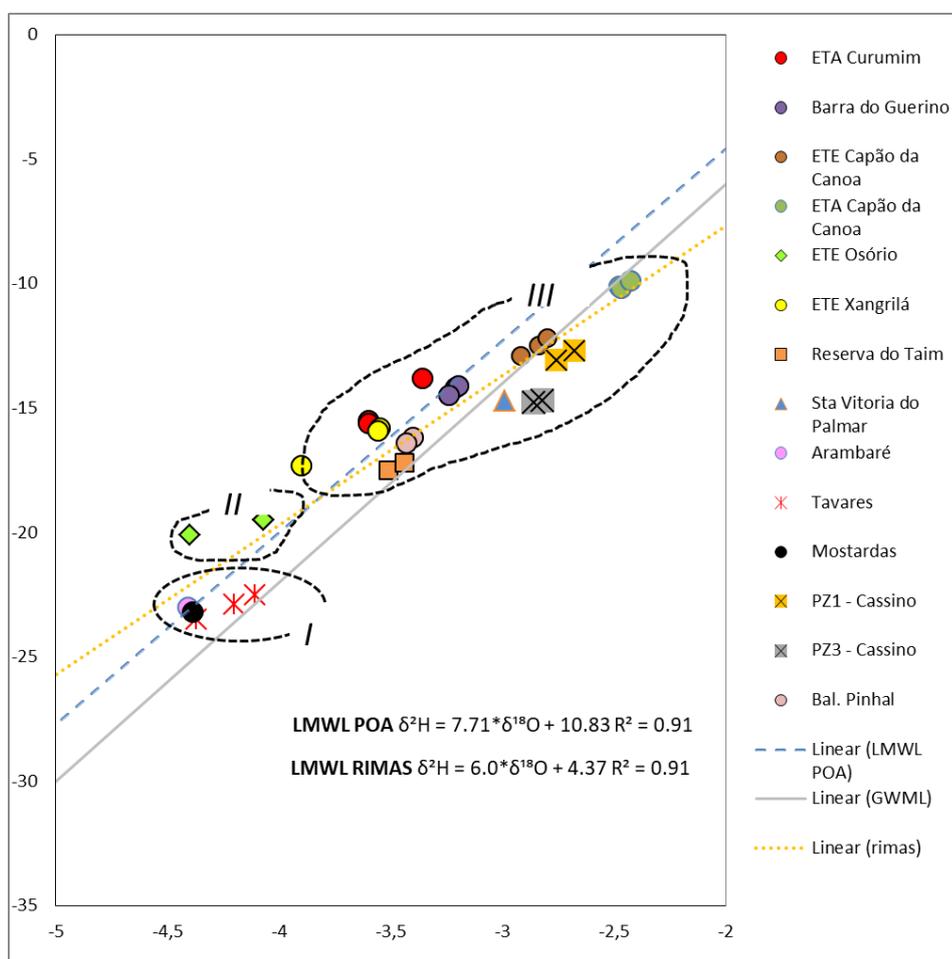


Figura 77: Gráfico de correlação entre $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ das amostras de água subterrânea contendo a Linha Meteórica Local (LMWL) e Global (GMWL).

6 MODELO CONCEITUAL DO SAC

6.1 Aspectos gerais

A sedimentação que compõe a PCRS teve sua evolução intensamente marcada pelas variações do nível mar, ocorridas desde o Terciário (VILLWOCK & TOMAZELLI, 1995)(BARBOZA *et al.* 2008). Esse processo, aliado a proximidade com o embasamento cristalino gerou a deposição e posterior retrabalhamento de diversos sistemas deposicionais (flúvio-lagunares, leques aluviais, laguna barreira, eólico e marinho), originando grande heterogeneidade litoestratigráfica e hidrogeológica na região. Esta heterogeneidade é caracterizada por camadas de sedimentos arenosos (areia grossa, média, fina e muito fina), que ocorrem em diferentes profundidades, intercaladas com camadas de sedimentos finos (argilosos e siltosos) de espessuras variadas. A ocorrência dessas diferentes camadas de sedimentos de idades quaternárias e terciárias forma um Sistema Aquífero Costeiro (SAC), que está estruturado em diferentes unidades hidroestratigráficas.

A seguir são discutidos os resultados obtidos nesse estudo, buscando mostrar uma visão geral das principais unidades hidroestratigráficas que formam o SAC, sua distribuição e as principais características hidrogeológicas e hidroquímicas que marcam as águas subterrâneas na região.

O arcabouço geológico do SAC evidencia um espesso pacote de sedimentos inconsolidados (variando de 90 a 1560m). Essas grandes profundidades aliadas as grandes variações litoestratigráficas identificadas nos perfis de sondagens, mostram de forma clara que o SAC é formado por diferentes unidades hidroestratigráficas, que representam diferentes aquíferos com características e espessuras distintas, porém não havendo dados suficientes para caracterização das suas porções mais profundas.

Devido a grande extensão e as diferentes características geomorfológicas e hidrogeológicas a apresentação dos resultados foi realizada compartimentando-se a PCRS nas regiões norte, central e sul. Os resultados obtidos para cada unidade hidroestratigráfica são aqui discutidos de forma a integrar as características da PCRS como um todo, levando em consideração a escala regional deste trabalho.

Foi possível identificar 05 unidades hidroestratigráficas presentes no SAC. Na Tabela 28 estão apresentados os resultados (medianas) dos principais parâmetros avaliados, na forma de comparativo entre as UH nas diferentes regiões. Se pode observar que as diferenças de

valores das unidades não tem variação significativa de uma região para outra. Sendo assim, as UH que ocorrem em mais de uma região serão aqui discutidas de forma unificada.

Tabela 28: Valores das medianas (expressos em meq/L) dos principais parâmetros avaliados, na forma de comparativo das UH nas diferentes regiões.

| UH1 | Q | Q/s | NE | Ca²⁺ | Mg²⁺ | Na⁺ | HCO₃⁻ | Cl⁻ | SO₄²⁻ | STD | pH | CE |
|------------------|----------|------------|-----------|------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------------------|-----------------------|------------------------------------|------------|-----------|-----------|
| Norte | 16 | 2,58 | 1,25 | 0,8 | 0,5 | 0,7 | 1,2 | 0,7 | 0,1 | 155,4 | 6,8 | 232,7 |
| Central | 15 | 1,33 | 1,91 | 0,7 | 0,3 | 1,0 | 1,7 | 0,7 | 0,1 | 197,5 | 7,4 | 299,0 |
| Sul | 19,5 | 2,08 | 2,97 | 0,8 | 0,5 | 2,0 | 1,6 | 1,6 | 0,2 | 254,7 | 6,7 | 400,0 |
| UH2 | Q | Q/s | NE | Ca²⁺ | Mg²⁺ | Na⁺ | HCO₃⁻ | Cl⁻ | SO₄²⁻ | STD | pH | CE |
| Norte | 20,9 | 1,12 | 1,62 | 3,0 | 0,6 | 0,6 | 3,3 | 1,5 | 0,0 | * | 7,9 | 335,0 |
| Central | 6,55 | 0,27 | 4 | 1,7 | 0,8 | 5,9 | 3,9 | 3,9 | 0,6 | 574,0 | 6,7 | 1050,0 |
| Sul | 17,6 | 1,61 | 1,53 | 1,4 | 0,8 | 5,4 | 4,5 | 4,6 | 0,2 | 395,0 | 7,4 | 991,0 |
| UH3 conf | Q | Q/s | NE | Ca²⁺ | Mg²⁺ | Na⁺ | HCO₃⁻ | Cl⁻ | SO₄²⁻ | STD | pH | CE |
| Norte | 60 | 5,9 | 5,12 | 1,85 | 0,54 | 2,39 | 3,26 | 1,33 | 0,07 | 298,50 | 7,70 | 534,00 |
| Central | 45 | 2,86 | 5,36 | 0,95 | 0,54 | 2,61 | 2,62 | 2,34 | 0,10 | 321,00 | 7,60 | 609,00 |
| UH3 livre | Q | Q/s | NE | Ca²⁺ | Mg²⁺ | Na⁺ | HCO₃⁻ | Cl⁻ | SO₄²⁻ | STD | pH | CE |
| Central | 30 | 0,75 | 21 | 0,17 | 0,21 | 0,46 | 0,21 | 0,25 | 0,09 | 41,30 | 5,67 | 43,10 |
| UH4 | Q | Q/s | NE | Ca²⁺ | Mg²⁺ | Na⁺ | HCO₃⁻ | Cl⁻ | SO₄²⁻ | STD | pH | CE |
| Norte | 28 | 4,4 | 7,03 | 1,35 | 0,82 | 4,22 | 3,31 | 1,58 | 0,04 | 292,00 | 7,28 | 523,00 |
| UH5 | Q | Q/s | NE | Ca²⁺ | Mg²⁺ | Na⁺ | HCO₃⁻ | Cl⁻ | SO₄²⁻ | STD | pH | CE |
| Central | 11 | 0,69 | 13,7 | 0,68 | 0,74 | 2,07 | 0,99 | 2,41 | 0,36 | 220,50 | 6,55 | 420,00 |

No geral, as características hidrogeológicas mostram que as unidades hidroestratigráficas representam aquíferos com boa capacidade de produção. Os dados mostram diferentes condições de confinamento entre e dentro das próprias unidades, com camadas arenosas sendo confinadas pelas camadas de sedimentos argilosos. As vazões variam de acordo com o aquífero interceptado e com as características construtivas e tipo de bomba utilizadas nos poços.

As características hidroquímicas das águas subterrâneas do SAC são influenciadas intensamente pelos sedimentos depositados em diferentes ambientes deposicionais, com diferentes processos hidroquímicos ocorrendo durante o fluxo subterrâneo. As diferentes metodologias de análises utilizadas nos resultados se mostraram eficientes, permitindo identificar os tipos e os principais processos controladores da composição da água subterrânea. A Figura 78 apresenta o modelo conceitual do SAC na PCRS com a distribuição

das unidades hidroestratigráficas identificadas, destacando suas principais características hidrogeológicas e hidroquímicas.

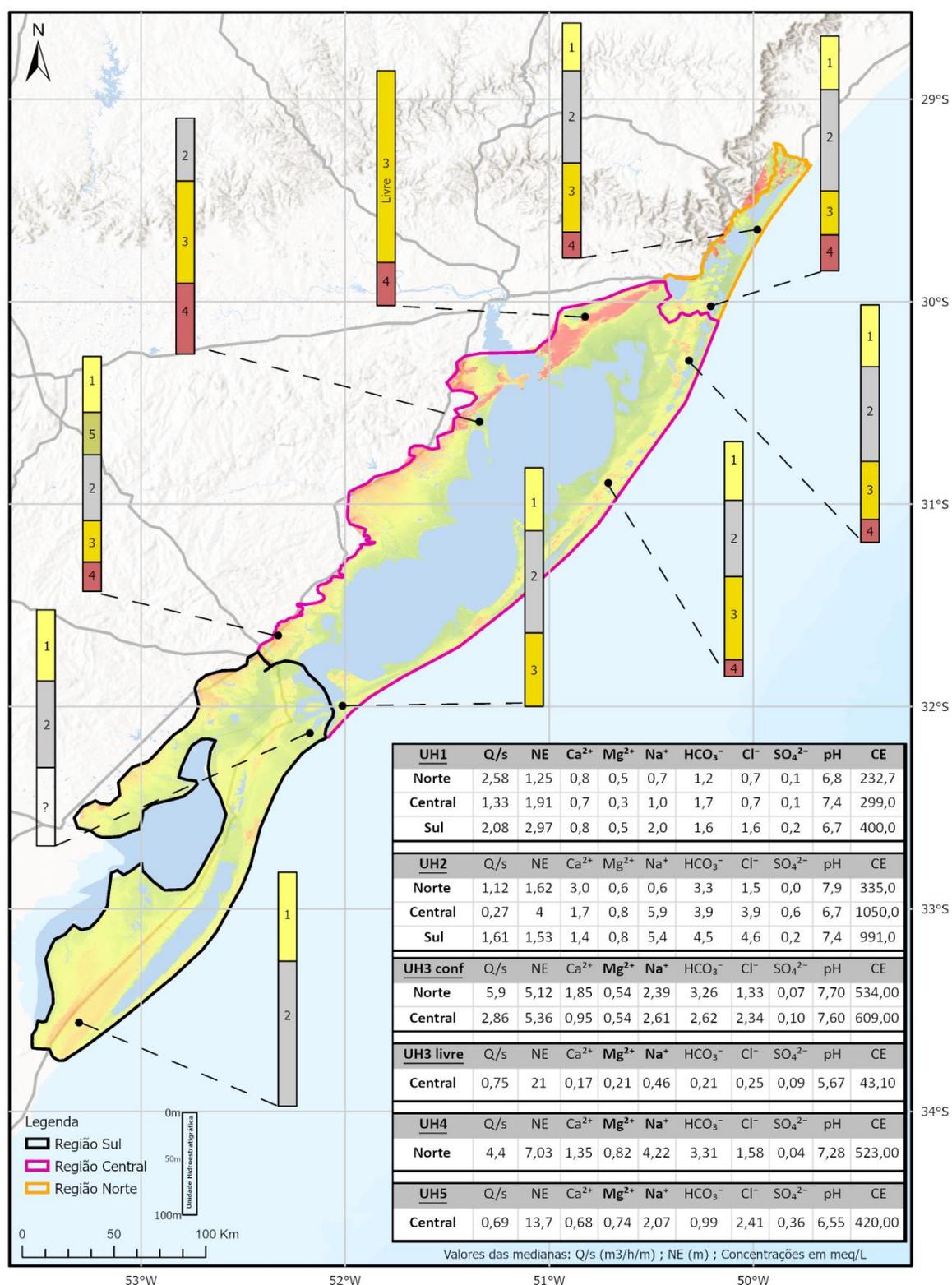


Figura 78: Modelo conceitual do SAC na PCR mostrando a distribuição e as principais características das unidades hidroestratigráficas identificadas.

A seguir são apresentadas de forma integrada as principais características de cada unidade hidroestratigráfica que compõe o SAC na PCRS.

6.2 A Unidade Hidroestratigráfica 1 no SAC

A UH-1 é a unidade superior do SAC ocorrendo integralmente nas regiões norte e sul e na parte externa da PCRS com espessuras em torno de 20m. Na região central apresenta as maiores espessuras chegando a aproximadamente 40m próximo aos municípios de Mostardas e Tavares. Essas maiores espessuras de sedimentos podem estar relacionadas a sedimentação pretérita da bacia, sugerindo que essa região representou uma área preferencial de transferência de sedimentos para porções mais profundas da bacia, conforme sugerido por ROSA, 2009. É caracterizada pela ocorrência de sedimentos arenosos (areias finas a argilosas) inconsolidados, de tonalidades amareladas a acizentadas podendo ser relacionados aos sedimentos dos sistemas laguna-barreira III e IV. Geralmente, no topo da unidade predominam areias de granulometria média a fina, grãos bem selecionados e baixo grau de compactação. Na base predominam areias com granulometria fina com presença de lentes argilosas descontínuas e de espessuras variáveis. Os sistemas deposicionais do tipo laguna-barreira geram intercalações sedimentares heterogêneas, responsáveis por variações hidrodinâmicas e hidroquímicas dentro da unidade.

Valores de mediana da capacidade específica $3 > Q/s > 2$ ($m^3/h/m$) nas regiões norte e sul, e $1,5 > Q/s > 1$ ($m^3/h/m$) na região central, e vazões máximas chegando a $80m^3/h$, indicam características de moderada a alta produtividade, situando-se dentro da média nacional de bons aquíferos (DINIZ *et al.*, 2014). Outro fator que contribui para a boa produtividade desta unidade é a alta porosidade ($>30\%$). A potenciometria mostra a característica livre desta unidade, com valores das medianas dos níveis estáticos $< 2m$.

Os valores baixos encontrados para os parâmetros físico-químicos (CE, STD e alcalinidade) permitem diferenciar claramente as águas subterrâneas desta unidade das demais, sendo marcada em geral por águas pouco salinizadas. O valor de pH levemente alcalinos ($pH_{med}=7,4$) na região central pode estar sendo influenciado pelas águas que circulam pelas camadas de sedimentos que contém conchas e que aparecem mais intensamente nessa região, porém não refletindo em aumento nas concentrações de Ca^{2+} e HCO_3^- .

No geral ocorrem pequenas variações nas composições das águas entre as diferentes regiões sendo assim distribuídas:

- Região Norte: $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+}$; $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$;
- Região Central: $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$; $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$;
- Região Sul: $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$; $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-}$.

De acordo com o diagrama de Piper predominam águas do tipo bicarbonatadas e cloretadas cálcicas/magnesianas nas regiões norte e central. Na região sul predominam águas do tipo bicarbonatadas e cloretadas sódicas. Esta presença de águas mais evoluídas quimicamente na região sul se reflete também nos altas concentrações de $\text{Cl}^-_{\text{med}}=1,6\text{meq/L}$ e $\text{Na}^+_{\text{med}}=2,0\text{meq/L}$ em relação as águas desta unidade na região norte e central. Amostras localizadas sobre a linha 1/1 na relação Na/Cl, indicam não haver influencia de intrusão marinha (HEM, 1985 ; WEN *et al.*, 2012) nesta unidade.

A localização das amostras nos diagramas de Gibbs (GIBBS, 1970) mostra que o principal mecanismo que controla a composição da água subterrânea é o intemperismo (interação água/sedimento). As razões $(\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+) / (\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+)$ e $(\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+) / (\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+)$ indicam a predominância de intemperismo de silicatos, porém com influência de dissolução de carbonatos.

A relação $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-)$ versus $(\text{Na}^+ - \text{Cl}^-)$, proposta por FISHER and MULLICAN (1997) indica que no geral trocas iônicas são um processo pouco atuante nesta unidade. Porém ocorrem em amostras das regiões central e sul. Isso implica no excesso de Na^+ sobre Cl^- e deficiência de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ sobre $\text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-$.

6.3 A Unidade Hidroestratigráfica 2 no SAC

A UH-2 ocorre estratigraficamente abaixo da UH-1, com espessura significativa ao longo de toda a PCRS, porém, pelas suas características argilosas, há um reduzido número de poços que captam água apenas desta unidade. As espessuras variam de 10 a 80m, sendo as porções menos espessas encontradas na região central interna, chegando no máximo a 45m na região norte e 70 a 80 m nas regiões central e sul. Trata-se de um espesso pacote de sedimentos predominantemente argilosos de coloração cinza com presença de lentes/camadas de areias finas a muito finas. Essas camadas/lentes ocorrem em proporções variáveis e com espessuras que alcançam até 10m, distribuídos ao longo da unidade e com maior ocorrência na região entre São José do Norte e Mostardas. Essa unidade está relacionada aos depósitos

marinhos profundos e lagunares formados durante a evolução do sistema laguna-barreira, contendo intensa presença de fragmentos de conchas intercaladas aos sedimentos argilosos.

Valores de mediana da capacidade específica $1,5 > Q/s > 1$ ($m^3/h/m$) nas regiões norte e sul, e > 1 ($m^3/h/m$) na região central, e vazões máximas variando de 27 a $80m^3/h$, indicam características de moderada produtividade, capaz de fornecer água para abastecimento de pequenas comunidades e irrigação em áreas restritas (DINIZ *et al.*, 2014). O fato desta unidade predominantemente argilosa apresentar poços com moderada produtividade se explica pelo fato das seções filtrantes estarem posicionadas nas porções arenosas de maior porosidade. Contudo os perfis geofísicos mostram que a unidade em geral apresenta valores de porosidade efetiva menores que 30%, indicando baixa capacidade de produção. A potenciometria, com valores das medianas dos níveis estáticos $1,5 < NE < 4m$ mostra que há confinamento gerado pelas camadas de sedimentos finos sobre as camadas argilo-arenosas que formam as camadas aquíferas da unidade.

Para a UH-2, os altos valores encontrados para os parâmetros físico-químicos (CE, STD, alcalinidade) permitem diferenciar claramente as águas subterrâneas desta unidade da UH-1, sendo marcada predominantemente por águas mais salinizadas.

O valor de pH levemente ácido ($pH_{med}=6,7$) na região central pode estar relacionado com as condições de circulação mais rápida em razão da maior quantidade de camadas arenosas dentro da unidade nesta região, bem como uma provável relação com ocorrência de camadas orgânicas associadas aos depósitos lagunares.

No geral, na UH-2 ocorrem variações nas composições das águas da região norte para as regiões central e sul, sendo assim distribuídas:

- Região Norte: $Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^+$; $HCO_3^- > Cl^- > SO_4^{2-}$;
- Região Central: $Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+}$, $Cl^- > HCO_3^- > SO_4^{2-}$;
- Região Sul: $Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+}$; $Cl^- > HCO_3^- > SO_4^{2-}$.

Ocorrem águas do tipo bicarbonatadas e cloretadas cálcicas/magnesianas na região norte, sendo que nas regiões central e sul predominam águas do tipo bicarbonatadas e cloretadas sódicas. Esta presença de águas mais evoluídas quimicamente na região sul se reflete nas altas concentrações de cloreto e sódio em relação às águas da UH2 na região norte. Amostras localizadas sobre a linha 1/1 na relação Na/Cl, indica que não há influência de intrusão marinha (HEM, 1985 ; WEN *et al.*, 2012) nesta unidade.

A localização das amostras nos diagramas de Gibbs (GIBBS, 1970) mostra que o principal mecanismo que controla a composição da água subterrânea é o intemperismo

(interação água/sedimento). As razões $(\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+) / (\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+)$ e $(\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+) / (\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+)$ indicam a predominância de intemperismo de silicatos, porém com influência tanto de dissolução de carbonatos quanto de evaporitos.

A relação $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-)$ versus $(\text{Na}^+ - \text{Cl}^-)$, proposta por FISHER and MULLICAN (1997) indica que ocorrem trocas iônicas nesta unidade, com maior intensidade nas amostras das regiões central e sul. Isso implica no excesso de Na^+ sobre Cl^- e deficiência de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ sobre $\text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-$.

6.4 A Unidade Hidroestratigráfica 3 Livre no SAC

A UH-3 Livre ocorre na região de cotas mais elevadas (40m alt) localizada na porção noroeste da PCRS, com espessuras em torno de 100m, e aproximadamente 60km de extensão por 5km de largura. Representa os sedimentos arenosos que formam a unidade geomorfológica Coxilha das Lombas, relacionados aos depósitos do sistema laguna barreira I na região do distrito de Águas Claras. É constituída principalmente por areias de granulometria média, quartzosa de cor creme a avermelhada devido a presença de óxido de ferro (FREITAS *et al*, 2002). Ocorrem também porções onde predominam areias finas com raras intercalações de níveis argilosos. Valores médios de porosidade total iguais aos valores de porosidade efetiva (30%) indicam a alta permeabilidade e a pequena quantidade de argila presente nos sedimentos.

Valores de capacidade específica variam de 0,01 a $11,780\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$ com $Q/s_{\text{med}}=0,75\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$, e vazões variando de 0,6 a $138\text{m}^3/\text{h}$ com $Q_{\text{med}}=30\text{m}^3/\text{h}$. Segundo (HAUSMAN, 1995) os valores de Q/s podem chegar a $30\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$, sendo possível extrair até $300\text{m}^3/\text{h}$, dependendo da construção do poço e equipamento de bombeamento (FREITAS *et al*, 2002). A potenciometria mostra valores de $NE_{\text{med}}=8,6\text{m}$ mas podendo chegar a 55m. Estes parâmetros indicam um aquífero livre com uma recarga efetiva, rápida circulação e baixo tempo de residência, podendo ser caracterizado por apresentar alta produtividade, situando-se dentro da média nacional de bons aquíferos (DINIZ *et al.*, 2014).

Hidroquimicamente se caracterizam por águas pouco salinizadas e de clara origem meteórica, onde os valores baixos encontrados para os parâmetros físico-químicos (CE, STD e alcalinidade) permitem diferenciar claramente as águas subterrâneas desta unidade das demais. O valor de pH levemente ácido ($\text{pH}_{\text{med}}=5,67$) com $\text{pH}_{\text{máx}}=6,56$, refletem a rápida circulação e a baixa interação água/sedimento.

As concentrações dos principais íons seguem a ordem $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$, $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-}$, sendo que, de acordo com o diagrama de Piper, predominam águas bicarbonatadas e cloretadas cálcicas/magnesianas, indo de encontro ao descrito por HAUSMAN, 1995.

A localização das amostras nos diagramas de Gibbs (GIBBS, 1970) e as razões $(\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+) / (\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+)$ e $(\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+) / (\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+)$, refletem as características físico-químicas das águas, mostrando que o principal mecanismo que controla a composição da água subterrânea é o intemperismo de silicatos (interação água/sedimento), porém com forte controle da precipitação.

A relação $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-)$ versus $(\text{Na}^+ - \text{Cl}^-)$, proposta por FISHER and MULLICAN (1997) indica que no geral trocas iônicas são um processo pouco atuante ou inexistente nesta unidade. Isso se reflete na relação próxima a 1:1 do Na^+ com o Cl^- e a predominância de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ sobre $\text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-$.

6.5 A Unidade Hidroestratigráfica 3 Confinada no SAC

A UH-3 Confinada é a unidade localizada estratigraficamente abaixo da UH-2, e ocorre nas regiões norte e central da PCRS, com variações litológicas e hidrogeológicas. Apresenta menores espessuras na porção norte da PCRS, próximo ao município de Torres, aumentando gradativamente de espessura em direção a região central, chegando a atingir cerca de 50m de espessura próximo ao município de São José do Norte. Na região central interna, próximo ao município de Tapes, apresenta espessuras próximas aos 60m, ocorrendo a pequenas profundidades (10-30m) sendo recoberta apenas pela UH-2.

Em geral, é caracterizada pela ocorrência de sedimentos arenosos (areias grossas a finas) inconsolidados, de tonalidades amareladas a esbranquiçadas, estando relacionados aos sedimentos que representam as porções basais do sistema laguna-barreira. Na região norte, aproximadamente entre os municípios de Osório, Xangri-lá e Tramandaí, é representada predominantemente por sedimentos arenosos grossos e angulosos que formam o chamado “aquífero Sal Grosso”. Estes sedimentos foram descritos recentemente por (COLLISCHONN, 2021), a qual interpretou essa sedimentação como representando a porção distal (fluvial) de um sistema aluvial, associado ao sistema de paleodrenagem do rio Jacuí. Nas demais porções, principalmente na região central, ocorre o aumento de sedimentos areno-argilosos, sendo destacadamente presentes na região de Bojuru e atingindo até 10m de espessura na região de São José do Norte. Essa sedimentação com variações de areias finas a médias e intercalações areno-argilosas de variadas espessuras provavelmente está relacionada aos depósitos de

ambiente marinho com influência fluvial, podendo ocorrer lentes descontínuas de areias com granulometria mais grosseira.

Esta unidade difere das unidades sobrepostas, com características hidrodinâmicas que lhe conferem alto potencial aquífero.

Na região norte os valores da $Q/s_{med}=5,9$ ($m^3/h/m$) com vazões variando de 4,5 a $230m^3/h$ e $Q_{med}=60,6m^3/h$ indicam características de alta a muita alta produtividade, configurando aquíferos que se destacam em âmbito nacional (DINIZ *et al.*, 2014). Na região central apresenta $Q_{med}= 45m^3/h$ podendo chegar a $169 m^3/h$, com $Q/s_{med}=2,86 m^3/h/m$, podendo ser caracterizado por apresentar moderada a alta produtividade, situando-se dentro da média nacional de bons aquíferos (DINIZ *et al.*, 2014).

Os valores de médios dos níveis estáticos variam próximo aos 5m, mostrando o confinamento imposto principalmente pela UH-2.

A hidroquímica das águas desta unidade é característica de águas mais evoluídas quimicamente, com variação na sua qualidade em função da variabilidade litológica e da maior profundidade de ocorrência e maior tempo de residência. Os valores de mediana das concentrações do principais íons permitem classificar águas como do tipo bicarbonatadas e cloretadas sódicas, seguindo a sequência $Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+}$ para os cátions e $HCO_3^- > Cl^- > SO_4^{2-}$ para os ânions. Os valores de pH são levemente alcalinos (em torno de 7,5) e a Condutividade Elétrica variando de ($CE_{med}=534\mu S/cm^2$) a ($CE_{med}=609\mu S/cm^2$) para as regiões norte e central, respectivamente.

A localização das amostras nos diagramas de Gibbs (GIBBS, 1970) mostra que o principal mecanismo que controla a composição da água subterrânea é o intemperismo (interação água/sedimento). Já as razões $(HCO_3^-/Na^+) / (Ca^{2+}/ Na^+)$ e $(Mg^{2+}/ Na^+) / (Ca^{2+}/ Na^+)$ indicam a predominância de intemperismo de silicatos, porém com influência tanto de dissolução de carbonatos quanto de evaporitos. Essa variação pode ser explicada pela grande heterogeneidade litológica oriunda dos ambientes deposicionais marinho e fluvial.

A relação $(Ca^{2+} + Mg^{2+} - SO_4^{2-} - HCO_3^-)$ versus $(Na^+ - Cl^-)$, proposta por FISHER and MULLICAN (1997) indica que no geral trocas iônicas são um processo bastante atuante nesta unidade. Esse fato explica o excesso de Na^+ sobre Cl^- e deficiência de $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ sobre $SO_4^{2-} - HCO_3^-$.

6.6 A Unidade Hidroestratigráfica 4 no SAC

A UH-4 é considerada como a unidade inferior e indivisa SAC, sendo identificada nas regiões norte e central. É caracterizada por camadas de sedimentos predominantemente argilosos de coloração cinza escura a marrom. A delimitação do topo da unidade é bem evidente tanto nos perfis dos poços como nos dados geofísicos, sendo possível sua caracterização a profundidades de até 110 m. Em função da escassez de poços e perfilagens mais profundas, o limite de base da unidade 4 está sendo considerado como sendo o contato inferior do SAC. Em profundidades maiores que 110m não é possível fazer uma individualização precisa desta unidade, porém, os dados das sondagens sugerem que há um comportamento hidroestratigráfico bem próximo ao observado na porção superior, com intercalações argilo-arenosas de variadas espessuras e gradual aumento da fração argila.

Os dados obtidos dos perfis geofísicos indicam sedimentos com baixa porosidade efetiva (20%) e águas com alta resistividade elétrica (3,0 ohm/m) e alta concentração de sais totais dissolvidos ($STD_{med}=2000$ ppm), mostrando uma clara tendência a salinização das águas com o aumento da profundidade.

Poços que captam água desta unidade se encontram apenas na região norte. Apesar da baixa porosidade efetiva da formação, os poços que captam água nas porções arenosas apresentam bom dados de produção com $Q/s_{med}=4,4$ ($m^3/h/m$) com vazões $Q_{med}=28m^3/h$. O confinamento da unidade fica evidente através do $NE_{med}=7,03m$.

A tendência de salinização indicada nos perfis geofísicos é também observada nos dados hidroquímicos. As águas são do tipo bicarbonatadas e cloretadas sódicas, seguindo a sequência $Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+}$ para os cátions e $HCO_3^- > Cl^- > SO_4^{2-}$ para os ânions. A localização das amostras nos diagramas de Gibbs (GIBBS, 1970) mostra que o principal mecanismo que controla a composição da água subterrânea é o intemperismo (interação água/sedimento). Já as razões $(HCO_3^-/Na^+) / (Ca^{2+}/Na^+)$ e $(Mg^{2+}/Na^+) / (Ca^{2+}/Na^+)$ indicam a predominância de intemperismo de silicatos, porém com influência tanto de dissolução de carbonatos quanto de evaporitos. Essa variação pode ser explicada pela heterogeneidade litológica oriunda dos ambientes deposicionais formadores desta unidade.

A relação $(Ca^{2+} + Mg^{2+} - SO_4^{2-} - HCO_3^-)$ versus $(Na^+ - Cl^-)$, proposta por FISHER and MULLICAN (1997) indica que no geral trocas iônicas são um processo bastante atuante nesta unidade. Esse fato explica o excesso de Na^+ sobre Cl^- e deficiência de $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ sobre $SO_4^{2-} - HCO_3^-$.

6.7 A Unidade Hidroestratigráfica 5 no SAC

A UH-05 tem sua distribuição restrita a região central interna da PCRS, ocorrendo entre as UH-1 e a UH-2 na região próxima ao município de Pelotas. É uma unidade formada predominantemente pelos sedimentos provenientes de leques aluviais do embasamento cristalino (granitos e gnaisses), representando um importante aquífero que é captado pela grande maioria dos poços da região. É caracterizada por sedimentos arenosos grosseiros (areias médias a grossa) de coloração esbranquiçada e de baixa esfericidade e com espessura de aproximadamente 15m.

Os parâmetros hidráulicos permitem caracterizar a unidade com produtividade baixa a moderada (DINIZ *et al.*, 2014), com $Q_{med}=11 \text{ m}^3/\text{h}$ $Q/s_{med}=0,69 \text{ m}^3/\text{h/m}$. Os valores de $NE_{med}=13,7\text{m}$ com valores máximos chegando a 28m sugerem que esta unidade não está sobre regime de confinamento.

Os dados hidroquímicos mostram que no geral ocorrem águas bicarbonatadas e cloretadas sódicas seguindo a sequência $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$ para os cátions e $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-}$ para os ânions. Os resultados sugerem que apesar da característica livre e do predomínio de sedimentos grosseiros na unidade, a presença de sedimentos mais finos possam interferir nas condições de recarga do fluxo subterrâneo, gerando maior interação água/sedimento e dando origem a maior quantidade de cloreto observada em relação a UH-1. Este fato também explica a variação na ocorrência de trocas iônicas na unidade, visto que este é um processo atuante em 50% das amostras e ausente no restante, conforme a relação $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-)$ versus $(\text{Na}^+ - \text{Cl}^-)$.

A localização das amostras nos diagramas de Gibbs (GIBBS, 1970) mostra que o principal mecanismo que controla a composição da água subterrânea é o intemperismo (interação água/sedimento), com predominância de dissolução de silicatos, conforme as razões $(\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+) / (\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+)$ e $(\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+) / (\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+)$.

7 CONCLUSÕES

Este estudo apresentou o arcabouço geológico e a compartimentação hidroestratigráfica que formam o Sistema Aquífero Costeiro (SAC) presente na Planície Costeira do Rio Grande do Sul (PCRS), definindo quais as unidades hidroestratigráficas de maior importância tanto no quesito quantidade como qualidade da água.

A metodologia aplicada se mostrou eficiente para alcançar os resultados e validar a hipótese de que na PCRS ocorre o SAC, e que o mesmo está estruturado em diferentes unidades hidroestratigráficas.

Ao todo foram identificadas 06 unidades hidroestratigráficas presentes no SAC, sendo que de forma geral, as UH-1 e UH-3 (confinado) representam aquíferos regionais com características produtivas e de qualidade favoráveis a exploração de água subterrânea; as UH-2 e UH-4, presentes em toda a região, apesar de apresentarem boas características produtivas, exercem a função de barreiras semi-permeáveis além de induzirem o aumento expressivo da salinidade das águas subterrâneas; as UH-3 (livre) e UH-5 apresentam ocorrência restrita, representando aquíferos com grande importância local.

A UH-1 representa o aquífero livre regional do SAC ocorrendo integralmente nas regiões norte e sul e na parte externa da PCRS com espessuras em torno de 20m a 40m, estando relacionada aos sedimentos dos sistemas laguna-barreira III e IV. Valores médios da capacidade específica variam de 1,33 a 2,58 ($\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$) com vazões máximas chegando a $80\text{m}^3/\text{h}$. As águas desta unidade apresentam baixas concentrações iônicas, com valores médios de STD inferiores a 300mg/l, ocorrendo águas neutras do tipo bicarbonatadas a cloretadas sódicas a cálcicas.

A UH-2 representa o aquífero confinante do SAC ocorrendo com espessuras de 10 a 80m ao longo de toda a PCRS, estando relacionada aos depósitos marinhos profundos e lagunares formados durante a evolução do sistema laguna-barreira, contendo intensa presença de fragmentos de conchas intercaladas aos sedimentos argilosos. Valores médios da capacidade específica variam de 0,27 a 1,6 ($\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$) e com vazões médias de 6,55 a $20,9\text{m}^3/\text{h}$. Ocorrem águas relativamente mais salinizadas com valores médios de STD superiores a 400mg/l, ocorrendo águas levemente básicas com predomínio do tipo cloretadas a bicarbonatadas sódicas a cálcicas.

A UH-3 Livre ocorre na região de cotas mais elevadas (40m) localizada na porção noroeste da PCRS, com espessuras em torno de 100m. Representa os sedimentos arenosos

que formam a unidade geomorfológica Coxilha das Lombas, relacionados aos depósitos do sistema laguna barreira I na região do distrito de Águas Claras. Apresenta grande potencial aquífero, com valores de capacidade específica chegando a $11,780\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$ com vazões médias de $30\text{m}^3/\text{h}$. Hidroquimicamente se caracterizam por águas pouco salinizadas, com valores médios de STD em torno de $40\text{mg}/\text{l}$. Os valores de pH levemente ácidos ($\text{pH}_{\text{med}}=5,67$) refletem a rápida circulação e a baixa interação água/sedimento, predominando águas do tipo bicarbonatadas cálcicas/magnesianas.

A UH-3 Confinada é a unidade localizada estratigraficamente abaixo da UH-2, e ocorre nas regiões norte e central da PCRS com espessuras em torno de 50m , estando relacionados aos sedimentos que representam as porções basais do sistema laguna-barreira. Representa o aquífero com boas características produtivas com valores medianos de capacidade específica de $5,9 (\text{m}^3/\text{h}/\text{m})$ e vazões médias em torno de $60,6\text{m}^3/\text{h}$. A hidroquímica das águas desta unidade é característica de águas mais evoluídas quimicamente, com variação na sua qualidade em função da variabilidade litológica e da maior profundidade de ocorrência e maior tempo de residência. Os valores médios de STD são em torno de $300\text{mg}/\text{l}$ com pH levemente alcalino ($\text{pH}_{\text{med}}=7,5$) predominando águas do tipo bicarbonatadas e cloretadas sódicas.

A UH-4 é considerada como a unidade inferior e indivisa SAC, sendo identificada nas regiões norte e central. O topo da unidade ocorre próximo de 90m , sendo possível sua caracterização a profundidades de até 110m . Os sedimentos apresentam baixa porosidade efetiva (20%) e águas com alta resistividade elétrica ($3,0\text{ ohm}/\text{m}$) e alta concentração de sais totais dissolvidos ($\text{STD}_{\text{med}}=2000\text{ ppm}$), mostrando uma clara tendência a salinização das águas com o aumento da profundidade. Poços que captam água nas porções arenosas da unidade apresentam bom dados de produção com capacidade específica médias de $4,4 (\text{m}^3/\text{h}/\text{m})$ e vazões médias de $28\text{m}^3/\text{h}$.

A UH-05 tem sua distribuição restrita a região central interna da PCRS, ocorrendo entre as UH-1 e a UH-2 na região próxima ao município de Pelotas com espessura de aproximadamente 15m , representando um importante aquífero que é captado pela grande maioria dos poços da região. Apresenta produtividade baixa a moderada, com capacidade específica da ordem de $0,7\text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ e vazões médias de $11\text{ m}^3/\text{h}$. Os dados hidroquímicos mostram que no geral ocorrem águas neutras do tipo bicarbonatadas e cloretadas sódicas, com valor médio de STD em torno de $220\text{mg}/\text{l}$.

A caracterização isotópica do SAC mostra que as assinaturas isotópicas indicam predomínio de recarga meteórica para o sistema, com valores variando de -2,43‰ a -4,41‰ ($\delta^{18}\text{O}$) e -9,9‰ a -23,5‰ ($\delta^2\text{H}$). As variações tanto para $\delta^{18}\text{O}$ quanto para $\delta^2\text{H}$ indicam que o processo de evaporação é importante na região, podendo ocorrer em diferentes taxas, de acordo com as áreas úmidas que, na PCRS, estão relacionadas predominantemente a áreas de banhados, canais de irrigação e lagoas.

A compartimentação hidroestratigráfica do SAC definiu quais as unidades hidroestratigráficas de maior importância tanto no quesito quantidade como qualidade da água, gerando uma base de conhecimento que atualmente é escassa, mas que é imprescindível para a realização de uma gestão correta e mais eficiente desse importante recurso hídrico.

8 RECOMENDAÇÕES

Conforme explicitado, esse estudo foi desenvolvido em escala regional, abrangendo os aspectos gerais necessários para a definição da compartimentação do SAC na PCRS. Isso gerou uma base de conhecimento que necessita ser aprimorada a partir de novos trabalhos a serem desenvolvidos a respeito da hidrogeologia da região, conforme sugestões:

- Desenvolvimento de estudos que visem delimitar e caracterizar as unidades hidroestratigráficas em escala local (por município, por exemplo), a fim de possibilitar a melhor identificação dos aquíferos que ocorrem em cada porção, minimizando o efeito das heterogeneidades que marcam a região;
- A avaliação do fluxo subterrâneo pode ser melhor compreendida através de trabalhos localizados onde há maior concentrações de poços, auxiliando a identificar como ocorre a interação das águas nas diferentes unidades;
- A UH-1 representa um aquífero livre com alta porosidade que é captado por muitos poços do tipo ponteira e cacimba, sendo utilizado tanto para consumo humano quanto para irrigação. Aliado a isso grande parte dos municípios não contam com redes de tratamento de esgoto, tornando esse aquífero altamente vulnerável a contaminação antrópica. Sendo assim se sugere estudos que visem mapear e quantificar essas possíveis fontes de contaminação que possam a vir a interferir na hidroquímica da água desta unidade;
- Altos valores de elementos como ferro e manganês ocorrem nas águas das diferentes unidades, porém não foram abordados neste estudo devido a

pequena quantidade de dados e a escala de trabalho. Estudos hidroquímicos em escala local podem ser úteis para identificar a origem e distribuição desses elementos nas diferentes unidades;

- Investigações sobre a influência ou não da cunha salina sobre as águas subterrâneas também é algo a ser investigado, principalmente através da avaliação da ocorrência de brometo em poços próximos a costa;
- A identificação, mapeamento e caracterização das áreas de recarga é de fundamental importância para melhor entender o fluxo subterrâneo e para melhor planejar e proteger os usos futuros das águas;
- Estudos com uso de isótopos estáveis, com amostragem abrangendo os diferentes períodos do ano podem auxiliar em uma melhor compreensão da dinâmica de recarga do SAC, podendo ser útil também para maior compreensão de dinâmica de interação da água superficial com as subterrâneas.
- Realizações de datações ^3H , ^{39}Ar , ^3H - ^3He , ^{14}C para conferir modelo conceitual;
- Dimensionar reservas reguladoras, permanentes e disponíveis com base no modelo conceitual.

O incremento contínuo sobre o conhecimento do SAC como um todo, é fundamental para um correto planejamento de uso e ocupação da região da PCRS, visando garantir a sustentabilidade do recurso hídrico subterrâneo.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: SCP, 2ª edição, 2002. Disponível em: <https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/hipsometria-e-unidades-geomorfologicas>

A. HAUSMAN. Províncias Hidrogeológicas do Rio Grande do Sul. **Acta Geologica Leopoldensia**, São Leopoldo, 1995.

AGGARWAL, P. K. *et al.* Proportions of convective and stratiform precipitation revealed in water isotope ratios. **Nature Geoscience**, v. 9, n. 8, p. 624–629, 2016. Available at: <https://doi.org/10.1038/ngeo2739>

AGGARWAL, P. K. *et al.* Stable isotopes in global precipitation: A unified interpretation based on atmospheric moisture residence time. **Geophysical Research Letters**, v. 39, n. 11, 2012.

BARBOZA, E. G.; ROSA, M. L. C. C.; AYUP-ZOUAIN, R. N. Cronoestratigrafia da Bacia de Pelotas: uma revisão das seqüências deposicionais. **Gravel**, v. 6, n. 1, p. 125–138, 2008.

BARLOW, P. M. Ground Water in fresh water-salt water environments of the Atlantic. **Geological Survey (USGS)**, v. 1262, p. 121, 2003.

BORTOLIN, T. A. *et al.* Seasonal variations of the isotopic ratios for oxygen and deuterium in the groundwater of the Serra Geral Aquifer System in the northeast region of the state of Rio Grande do Sul, Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 79, n. 22, p. 507, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09247-1>

BRAGA, A. C. D. O. **Geofísica Aplicada**. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

CABRAL, J. J. S. P. Sustentabilidade de aquíferos costeiros. **Anais XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**, n. 81, p. 1–13, 2004. Available at: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23643>

CAICEDO, N. L. Hidrogeologia Do Litoral Norte Do Rio Grande Do Sul. **X Congresso Brasileiro de Água Subterrânea**, n. 031, p. 1–12, 1998.

ALICE DUTRA SOARES. CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA E HIDROQUÍMICA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DO MUNICÍPIO DE OSÓRIO, RS. , 2016.

CARRARO, C. *et al.* **Mapa geológico do Estado do rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1974.

CHERT BOBSIN. UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS Unidade Acadêmica de Graduação. [s. l.], p. 53, 2013.

CIRM. **Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro**[S. l.: s. n.], 1990.

COLLISCHONN, L. **GÊNESE E ESTRATIGRAFIA DO AQUÍFERO " SAL GROSSO ", LITORAL NORTE DA PLANÍCIE COSTEIRA DO RIO GRANDE DO SUL GÊNESE E ESTRATIGRAFIA DO AQUÍFERO " SAL GROSSO ", LITORAL NORTE DA PLANÍCIE COSTEIRA DO RIO GRANDE DO SUL**. 94 f. 2021. - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [s. l.], 2021.

COLLISCHONN, L. GÊNESE E OCORRÊNCIA DA CAMADA AQUÍFERA “SAL GROSSO” NO LITORAL NORTE DO RIO GRANDE DO SUL LUÍSA COLLISCHONN Porto Alegre, 2018. **Ufrgs**, [s. l.], p. 73, 2018.

CRAIG, H. Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural waters. **Science**, [s. l.], v. 133, n. 3467, p. 1833–1934, 1961.

CRISTO, V. *et al.* Modelo conceitual do aquífero de Itaipuaçu em Maricá - RJ com uso de ferramentas hidrogeoquímicas e hidrodinâmicas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s. l.], v. 20, n. 4, p. 1063–1075, 2015.

- DANSGAARD, W. Stable isotopes in precipitation. *tellus*, [s. l.], v. 16, n. 4, p. 436–468, 1964.
- DAVIS, S. N., DE WIESE, R. J. M. **Hidrogeology**. [S. l.: s. n.], 1966.
- DE FREITAS, M. A., COSTA, C. T., TEDESCO, M. A., & DE CASTRO, M. A. H. Estudo Do Comportamento E Potencialidade Do Aquífero. *In:* , 2002. **Anais do XII Congresso Brasileiro de Água Subterrânea**. [S. l.: s. n.], 2002. p. 1–17.
- DEUTSCH, W. J. Groundwater Geochemistry. **Groundwater Geochemistry**, [s. l.], p. 214, 1997.
- DILLENBURG, S R *et al.* Modificações de Longo Período da Linha de Costa das Barreiras Costeiras do Rio Grande do Sul. **Gravel**, [s. l.], v. 3, n. 3, p. 9–14, 2005.
- DILLENBURG, Sérgio R. *et al.* Influence of antecedent topography on coastal evolution as tested by the shoreface translation-barrier model (STM). **Journal of Coastal Research**, [s. l.], v. 16, n. 1, p. 71–81, 2000.
- DINIZ, J. A. O. *et al.* Mapa Hidrogeológico do Brasil ao Milionésimo. Nota Técnica. **Hydrological Map**, [s. l.], p. 45, 2014. Available at: http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/bitstream/handle/doc/15556/rel_mapa_hidrogeo_brasil.pdf?sequence=1%0Ahttp://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/Mapas-e-Publicacoes/Mapa-Hidrogeologico-do-Brasil-ao-Milionesimo-756.html
- EL-SAYED, S. A.; MORSY, S. M.; ZAKARIA, K. M. Recharge sources and geochemical evolution of groundwater in the Quaternary aquifer at Atfih area, the northeastern Nile Valley, Egypt. **Journal of African Earth Sciences**, [s. l.], v. 142, p. 82–92, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2018.03.001>
- ELLIS, D. V.; SINGER, J. M. **Well Logging for Earth Scientists**. The Netherlands: Springer, 2008.
- ERSKINE, J.; FISHER, A. T. Complex Geometry of Depositional Facies Within a Coastal Aquifer System: Three-dimensional Mapping of Confining Layers and Hydrogeologic Implications. [s. l.], p. 517–518, 2001. Available at: https://doi.org/10.1007/978-94-010-0810-5_52
- FENZL, N. (Universidade F. do P. Processos Geoquímicos que determinam a composição química das águas naturais. *In:* INTRODUÇÃO A HIDROGEOQUÍMICA. [S. l.: s. n.], 1988. p. 33–46.
- FITTS, C. R. **Águas Subterrâneas. Tradução Daniel Vieira**. 2. ed. Rio De Janeiro: Editora Elsevier, 2015.
- FONSECA, V. P. da. **ESTUDOS MORFOTECTÔNICOS APLICADOS À PLANÍCIE COSTEIRA DO RIO GRANDE DO SUL E ADJACÊNCIAS**. 306 f. 2006. - UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, [s. l.], 2006.
- FONTANA, R. L. **Geotectonica e Sismoestratigrafia da Bacia de pelotas e Plataforma de Florianópolis**. 214 f. 1996. - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [s. l.], 1996.
- FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. **Groundwater**. [S. l.: s. n.], 1979.
- FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. **Água Subterrânea. Traduzido de Groundwater**. São Paulo: [s. n.], 2017.
- FREITAS, M. A. de. **HIDROGEOQUÍMICA E ISOTOPIA DE ÁGUAS COM ALTA SALINIDADE DO SISTEMA AQUÍFERO SERRA GERAL NA REGIÃO DO ALTO RIO URUGUAI, BRASIL**. 195 f. 2016. - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [s. l.], 2016.
- GHIGNONE, J. I. **Reconhecimento gravimétrico na Bacia de Pelotas**. Rio De Janeiro: Boletim Técnico da Petrobras, 1960.

GIAMBASTIANI, B. M. S. *et al.* Characterization of the lowland coastal aquifer of comacchio (ferrara, italy): Hydrology, hydrochemistry and evolution of the system. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 501, p. 35–44, 2013. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.07.037>

GIBBS, R. Mechanisms Controlling World Water Chemistry. **Science**, [s. l.], v. 170, n. 3962, p. 1088–1090, 1970.

GOFFERMANN, M. **Caracterização hidrogeológica e hidroquímica das águas subterrâneas da região de São Gabriel, RS**. 137 f. 2013. - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [s. l.], 2013.

GOTTSCHALK, I. *et al.* Interpretation of Hydrostratigraphy and Water Quality from AEM Data Collected in the Northern Salinas Valley, CA: Prepared for Marina Coast Water District. [s. l.], n. March, 2018. Available at: <https://cityofmarina.org/DocumentCenter/View/10408/Aem-Final-Report>

GRAHAM, H. V. *et al.* Isotopic characteristics of canopies in simulated leaf assemblages. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, [s. l.], v. 144, p. 82–95, 2014. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.gca.2014.08.032>

HAUSMAN, A. **Estudo das possibilidades de água subterrânea do Rio Grande do Sul**. [S. l.]: Boletim da Sociedade brasileira de Geologia, 1960.

HEM, J. D. **Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water**. [S. l.]: USGS, 1985.

HISCOCK, K. **Hydrogeology: Principles and practice**. [S. l.: s. n.], 2011.

IRAN CARLOS STALLVIERE CORRÊA. **Analyse morphostructurale et evolution paleogeographique de la plateforme continentale Atlantique sud-brasilienne (Rio Grande do Sul-Brésil)**. 314 f. 1990. - Univ Bourdeaux. Talence (France), [s. l.], 1990.

ITO, E. R. K.; AMBRIZZI, T. Climatologia da posição da alta subtropical do atlântico sul para os meses de inverno. *In:* , 2000. **XI Congresso Latino-americano e Ibérico de Meteorologia**. [S. l.: s. n.], 2000. p. 860–865.

J. GAILLARDET, B. DUPRE, P. LOUVAT, and C. J. A. ´egre. Global silicate weathering and CO₂ consumption rates deduced from the chemistry of large rivers. **Chemical Geology**, [s. l.], v. 159, p. 3–30, 1999.

J. XIAO, Z. D. JIN, J. WANG, AND F. ZHANG. Hydrochemical characteristics, controlling factors and solute sources of groundwater within the Tarim River Basin in the extreme arid region, NW Tibetan Plateau,. **Quaternary International**, [s. l.], v. 380, p. 237–246, 2015.

JASECHKO, S.; GIBSON, J. J.; EDWARDS, T. W. D. Stable isotope mass balance of the Laurentian Great Lakes. **Journal of Great Lakes Research**, [s. l.], v. 40, n. 2, p. 336–346, 2014.

KIM Y, LEE KS, KOH DC, LEE DH, LEE SG, PARK WB, KOH GW, W.; NC. Hydrogeochemical and isotopic evidence of groundwater salinization in a coastal aquifer: a case study in Jeju volcanic island, Korea. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 270, p. 282–294, 2003.

LEAL, C. A. Geofísica Aplicada Na Avaliação De Recursos Hídricos Subterrâneos E Meio Ambiente Da Zona Costeira Do Campo Petrolífero De Fazenda Alegre, Norte Capixaba – Espírito Santo. [s. l.], p. 182, 2007.

LIMA, L. A. DE. **EVOLUÇÃO HIDROGEOQUÍMICA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DO AQUÍFERO EMBORÊ- BACIA DE CAMPOS/RJ**. 111 f. 2019. - Universidade Federal Fluminense, [s. l.], 2019.

LISBOA, N. *et al.* Síntese da Ocorrência Geológica das Águas Subterrâneas do Rio Grande do Sul. **Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**, [s. l.], p. 1–25, 2004. Available at: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Síntese+da+ocorrência+geológica+das+águas+subterrâneas+do+Rio+Grande+do+Sul#0>

LUIZ, A. *et al.* CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA DOS AQUÍFEROS DA REGIÃO. [s. l.], n. 81, p. 1–14, [s. d.].

MACHADO, J. L. F.; FREITAS, M. A. de. Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul. [s. l.], p. 1, 2005.

MAHMUD, M. I. *et al.* Variations in hydrostratigraphy and groundwater quality between major geomorphic units of the Western Ganges Delta plain, SW Bangladesh. **Applied Water Science**, [s. l.], v. 7, n. 6, p. 2919–2932, 2017. Available at: <https://doi.org/10.1007/s13201-017-0581-x>

MAXEY, G. B. Hydrostratigraphic Units. **Journal of Hydrology**, [s. l.], ano 2, 1964. p. 124–129.

MEINZER, O. E. **The occurrence of ground water in the United States, with a discussion of principles**. Washington, DC: [s. n.], 1923. Available at: <https://doi.org/10.3133/wsp489>.

MENDES, R. L. R.; VERMA, O. P. PERFILAGEM GEOFÍSICA DE POÇO E SEV APLICADOS A DELIMITAÇÃO DE AQUÍFEROS. In: , 2000, Fortaleza. **1st Joint World Congress on Groundwater**. Fortaleza: [s. n.], 2000. p. 1–17.

MERLIVAT, L.; JOUZEL, J. Global climatic interpretation of the deuterium-oxygen 16 relationship for precipitation. **Journal of Geophysical Research**, [s. l.], v. 84, n. C8, p. 5029–5033, 1979. Available at: <https://doi.org/10.1029/JC084iC08p05029>

MOOK, W. G. **Isótopos ambientales en el ciclo hidrológico**. [S. l.]: IGME, 2002. v. 1

MURGULET, D.; TICK, G. R. Characterization of flow dynamics and vulnerability in a coastal aquifer system. **Groundwater**, [s. l.], v. 51, n. 6, p. 893–903, 2013. Available at: <https://doi.org/10.1111/gwat.12020>

NASCIMENTO, E. alves do. Caracterização hidrogeológica da unidade aquífera barreira holocênica da região de Cassino, Rio Grande (RS). [s. l.], p. 68, 2013.

NERY, G. G. Perfilagem Geofísica Aplicada a Hidrogeologia. In: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. (org.). **Hidrogeologia - Conceitos e Aplicações**. 3^aed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. p. 46.

NERY, G. G.; WANDERLEY, P. R. de M.; CAVALCANTE, A. T. Uso Dos Perfis Geofísicos Em Um Poço Da Bateria Da Praça Gonçalves Ledo (Maceió), Revestido Com Pvc. **Águas Subterrâneas**, [s. l.], v. 16, n. 1, 2002. Available at: <https://doi.org/10.14295/ras.v16i1.1298>

POLAND, J. F.; LOFGREN, B. E.; RILEY, F. S. Glossary of selected terms useful in studies in the mechanisms of the aquifer systems and land subsidence due to fluid withdrawal. **Water-Supply**, [s. l.], ano 2025, 1972. p. 9.

R.S. FISHER AND W. F. MULLICAN III. Hydrochemical evolution of sodium-sulfate and sodium-chloride groundwater beneath the Northern Chihuahuan Desert, Trans-Pecos, Texas, USA. **Hydrogeology Journal**, [s. l.], v. 5, n. 2, p. 12, 1997.

RABELO, C.; CAVALCANTE, I. N. ANÁLISE GEOQUÍMICA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DE FORTALEZA , CEARÁ – BRASIL GEOCHEMICAL ANALYSIS OF GROUNDWATER IN FORTALEZA , CEARÁ – BRASIL INTRODUÇÃO Os recursos hídricos subterrâneos da Região Metropolitana de Fortaleza são utiliza- dos de forma prioritár. [s. l.], v. 29, p. 42–59, 2015.

REGINATO, P. A. R. *et al.* Água Subterrânea Utilizada Para Irrigação Na Planície Costeira Do Rio Grande Do Sul E Seu Risco a Salinização. **I Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo**, [s. l.], p. 1–9, 2009.

ROSA, M. L. C. D. C. ANÁLISE GRAVIMÉTRICA E MAGNETOMÉTRICA DA REGIÃO SUL DA PROVÍNCIA COSTEIRA DO RIO GRANDE DO SUL, SETOR SUDOESTE DA BACIA DE PELOTAS. 79 f. 2009. - Universidade Federal do Rio Grande do Sul,

[s. l.], 2009. Available at: <https://doi.org/616.89-008.47:616->

ROSA, M. L. C. C. Geomorfologia, estratigrafia de seqüências e potencial de preservação dos Sistemas Laguna-Barreira do Quaternário costeiro do Rio Grande do Sul. [s. l.], p. 251, 2012.

ROSA, M. L. C. da C. *et al.* Integração de métodos potenciais (gravimetria e magnetometria) na caracterização do embasamento da região sudoeste da bacia de pelotas, sul do Brasil. **Revista Brasileira de Geofísica**, [s. l.], v. 27, n. 4, p. 641–657, 2009.

ROZANSKI, K.; ARAGUÁS-ARAGUÁS, L.; GONFIANTINI, R. Isotopic patterns in modern global precipitation. **Geophysical Monograph-American Geophysical Union**, [s. l.], v. 78, p. 1, 1993.

ROZANSKI, K.; ARAGUÁS-ARAGUÁS, L.; GONFIANTINI, R. Isotopic Patterns in Modern Global Precipitation. [s. l.], p. 1–36, 2013. Available at: <https://doi.org/10.1029/gm078p0001>

SAEBER, P. R. Hydrostratigraphic Units. *In*: HYDROGEOLOGY. [S. l.]: Geological Society of America, 1988. p. 9–14. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1130/DNAG-GNA-O2.9>

SANBERG, J. R. D. **Estudo hidrogeológico nas províncias litológicas do estado do Rio Grande do Sul**. 1980. - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [s. l.], 1980.

SANTOS, C. I. *et al.* Análise de padrões de isótopos da água no escoamento de base em uma bacia costeira. **Anais do XXIII SBRH 2019**, [s. l.], 2019.

SANTOS, A. C. Noções de Hidroquímica. *In*: HIDROGEOLOGIA: CONCEITOS E APLICAÇÕES. [S. l.: s. n.], 2008. p. 407–426.

SILVA, R. C. D. S. **APLICAÇÃO DOS MÉTODOS GEOFÍSICOS ELÉTRICO E ELETROMAGNÉTICO NA DETERMINAÇÃO DE UNIDADES SEDIMENTARES COSTEIRAS TROPICAIS EM BRAGANÇA, NORDESTE DO PARÁ**. 63 f. 2002. - UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, [s. l.], 2002.

SILVA, J. A. da; BARBOSA, N. da S.; SANTOS, C. B. dos. Processos Hidrogeoquímicos e Evolução das Águas Subterrâneas do Aquífero Cristalino da Folha Amargosa, SD.24-VD-II, Centro-Sul da Bahia. **Águas Subterrâneas**, [s. l.], v. 35, n. 2, p. 30023, 2021. Available at: <https://doi.org/10.14295/ras.v35i2.30023>

STRM, I. *et al.* Dados da CPRM/SIAGAS e Imagens STRM como Base Cartográfica na Elaboração de Mapeamento em Recursos Hídricos Subterrâneos em Escala Municipal: o Caso de Nova Palma, RS (Data CPRM / SIAGAS and STRM Stock as Base Cartographic Mapping the Development of ...). **Revista Brasileira de Geografia Física - ISSN: 1984-2295**, [s. l.], v. 7, n. 3, p. 513–523, 2014. Available at: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v7i3.929>

STRUCKMEIER, W. F.; MARGAT, J. **Hydrogeological Maps. A Guide and a Standard Legend**. [S. l.]: International Association of Hydrogeologists, 1995.

TOMAZELLI, L J; VILLWOCK, J. A. Mapeamento Geológico de Planícies Costeiras: o Exemplo da Costa do Rio Grande do Sul. **Gravel**, [s. l.], v. 3, n. 1678–5975, p. 109–105, 2005.

TOMAZELLI, Luiz J.; DILLENBURG, S. R. Sedimentary facies and stratigraphy of a last interglacial coastal barrier in south Brazil. **Marine Geology**, [s. l.], v. 244, n. 1–4, p. 33–45, 2007. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2007.06.002>

TOMAZELLI, Luiz José.; VILLWOCK, J. A. O Cenozóico no Rio Grande do Sul: Geologia da Planície Costeira. *In*: GEOLOGIA DO RIO GRANDE DO SUL. [S. l.: s. n.], 2000. p. 375–406.

TROIAN, Guilherme C *et al.* Estimativa De Recarga Pelo Método Water Table Fluctuation (Wtf) Na Porção Norte Do Aquífero Costeiro Do Estado Do Rio Grande Do Sul. **xxii SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS**, [s. l.], p. 1–8, 2017. Available at: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/18494>

TROIAN, Guilherme Casarotto. A REDE INTEGRADA DE MONITORAMENTO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO SISTEMA AQUÍFERO QUATERNÁRIO COSTEIRO DO RIO GRANDE DO SUL. *In:* , 2016, Porto Alegre. **Congresso Brasileiro de Geologia**. Porto Alegre: [s. n.], 2016. p. 1.

VILLWOCK, J. A.; TOMAZELLI, L. J. Geologia costeira do Rio Grande do Sul. **Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica**, [s. l.], v. 8, p. 1–45, 1995.

WEN, X. *et al.* Hydrochemical characteristics and salinization processes of groundwater in the shallow aquifer of Eastern Laizhou Bay, China. **Hydrological Processes**, [s. l.], v. 26, n. 15, p. 2322–2332, 2012. Available at: <https://doi.org/10.1002/hyp.8362>

WINNICK, M. J. *et al.* Quantifying the isotopic “continental effect”. **Earth and Planetary Science Letters**, [s. l.], v. 406, n. November, p. 123–133, 2014. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.09.005>

ZHOU, P.; LI, M.; LU, Y. Hydrochemistry and Isotope Hydrology for Groundwater Sustainability of the Coastal Multilayered Aquifer System (Zhanjiang, China). **Geofluids**, [s. l.], v. 2017, 2017. Available at: <https://doi.org/10.1155/2017/7080346>