

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS E ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

FERNANDO SCHUH RÖRIG

**AVALIAÇÃO DAS VARIAÇÕES DE NÍVEL DE ÁGUA E RECARGA DO
SISTEMA AQUÍFERO COSTEIRO (SAC) NO LITORAL NORTE DO ESTADO
DO RIO GRANDE DO SUL (RS)**

PORTO ALEGRE
OUTUBRO DE 2022

FERNANDO SCHUH RÖRIG

**AVALIAÇÃO DAS VARIAÇÕES DE NÍVEL DE ÁGUA E RECARGA DO
SISTEMA AQUÍFERO COSTEIRO (SAC) NO LITORAL NORTE DO ESTADO
DO RIO GRANDE DO SUL (RS)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao programa de graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Antônio Roehe Reginato

PORTO ALEGRE

2022

CIP - Catalogação na Publicação

Rörig, Fernando Schuh
AVALIAÇÃO DAS VARIAÇÕES DE NÍVEL DE ÁGUA E RECARGA
DO SISTEMA AQUÍFERO COSTEIRO (SAC) NO LITORAL NORTE DO
ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL (RS) / Fernando Schuh
Rörig. -- 2022.
114 f.
Orientador: Pedro Antonio Roehe Reginato.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto
de Pesquisas Hidráulicas, Curso de Engenharia
Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2022.

1. Aquífero Costeiro. 2. Recarga Subterrânea. 3.
Variação de Níveis de Água. I. Reginato, Pedro Antonio
Roehe, orient. II. Título.

FERNANDO SCHUH RÖRIG

**AVALIAÇÃO DAS VARIAÇÕES DE NÍVEL DE ÁGUA E RECARGA DO
SISTEMA AQUÍFERO COSTEIRO (SAC) NO LITORAL NORTE DO ESTADO
DO RIO GRANDE DO SUL (RS)**

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul a ser defendido em 12/09/2022 pela Comissão avaliadora constituída pelos professores:

Banca examinadora:

.....

Guilherme Casarotto Troian – SGB/CPRM

.....

Fernando Mainardi Fan – DOH-IPH-UFRGS

.....

Tiago de Vargas – DHH-IPH-UFRGS

Conceito: A

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal pela oportunidade de ensino de qualidade e pelo espaço de acolhimento, conforto e trocas de ideias nos meus anos de graduação. Agradeço à CPRM pela disponibilização dos dados de nível e precipitação, e à FAPERGS, que colaboraram para a realização deste trabalho.

Agradeço ao meu professor orientador Pedro Reginato, pelos ensinamentos, conversas e discussões, orientação na elaboração deste trabalho e principalmente pelo incentivo em pesquisar, continuar em frente, aproveitar as oportunidades e pensar grande. Certamente é graças a ele, com sua organização e apoio, que olharei com carinho para o período da conclusão de curso, momento em que consegui consolidar meu desenvolvimento e formação de maneira bem mais leve do que imaginei em momentos anteriores.

Também agradeço a todos os professores ao longo do curso, por seus ensinamentos, por uma educação diversa e multidisciplinar que hoje me deixa feliz da trajetória escolhida. Agradeço aos meus orientadores em monitorias e projetos de pesquisa, que me deram a oportunidade de iniciar novas experiências para além das salas de aula, que contribuíram em grande tamanho para minha formação e me impulsionaram para novos desafios.

Agradeço ao Engenheiros Ambientais Daniel e Walter e à Engenheira Ambiental Paula, meus orientadores de estágio e amigos, que tanto me apoiaram, ensinaram e me acompanharam nos anos finais de graduação, sempre me levando a acreditar mais em mim, sendo exemplos para o meu futuro como Engenheiro e ser humano.

Aos amigos que conheci antes de entrar na UFRGS e me acompanham há tantos anos (Thomas, Daniel e Ernesto), aos amigos de diversos momentos, histórias e aventuras (Felipe, Gabriel, Rafael, Thaís, Bernardo e Marianna) e aos amigos que me receberam tão bem na Engenharia Ambiental (Lourenço, Hosama, Pedro, Gabriela, Luana, Daniel, Heron, Heitor e Alessandra), agradeço pelos momentos compartilhados, pelas risadas, conversas, festas e aprendizados. Obrigado pelas lembranças que hoje guardo comigo com carinho.

Chego nesse momento à conclusão de que a Universidade é muito mais do que a simples soma das pessoas que nela trabalham, estudam e circulam, tendo a certeza de ter vivido uma experiência transformadora em um ambiente de intenso aprendizado, mas que pode ocorrer junto de dias descontraídos, divertidos e que certamente valeram a pena.

À Manoela, meu amor, agradeço por todo suporte, companheirismo e paciência durante os longos semestres de graduação, pelo apoio nos momentos de estudo e trabalho e principalmente pelas horas de descanso e diversão ao longo desses anos juntos. Muito obrigado por me ensinar a olhar com mais calma e atenção aos pequenos detalhes e instantes das nossas vidas.

À minha família, agradeço pelos ensinamentos, apoio e acolhimento, que me permitiram sempre lutar por um ensino melhor até o fim desse ciclo de graduação. Agradeço em especial à minha mãe Janine, que sempre prezou por uma educação de qualidade para mim, que me ajuda de inúmeras maneiras, apoia minhas decisões e é o meu maior exemplo de determinação, trabalho, carinho, atenção, empenho e amor. Obrigado por ser a minha fortaleza.

“And once the storm is over, you won’t remember how you made it through, how you managed to survive. You won’t even be sure, whether the storm is really over. But one thing is certain. When you come out of the storm, you won’t be the same person who walked in. That’s what this storm is all about.”

- Haruki Murakami ‘Kafka on the Shore’

RESUMO

Os recursos hídricos subterrâneos são de grande importância para o atendimento dos usos múltiplos da água no Brasil, o que ressalta a necessidade de uma gestão adequada das águas subterrâneas. O aumento do conhecimento sobre os Sistemas Aquíferos é essencial para a gestão, com estudos que gerem estimativas de recarga e reservas renováveis, de modo a orientar a extração sustentável dos aquíferos. A avaliação da recarga pode ser feita através de dados de nível de água, como os disponibilizados pela Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas (RIMAS/CPRM), que também permitem investigar a dinâmica dos aquíferos monitorados. Nesse contexto, este trabalho buscou analisar a variação dos níveis de água e estimar a recarga subterrânea no Sistema Aquífero Costeiro (SAC), na Planície Costeira do Rio Grande do Sul, na região do Litoral Norte. Foram utilizados dados de nível de seis poços RIMAS/CPRM localizados entre Osório e Terra de Areia, com disponibilidade entre 2012 e 2021. Para a análise das variações de nível, foi aplicada a autocorrelação e a correlação cruzada. A estimativa de recarga foi realizada com o método *Water Table Fluctuation* (WTF), em resolução temporal diária, adotando as aplicações RISE e Master Recession Curve (MRC) com análise de sensibilidade para rendimentos específicos de 20%, 25% e 30%. Foram aplicados filtros de série temporal e de suavização dos dados de nível através de média móvel de 5 dias, para corrigir ruídos e evitar a superestimativa da recarga. O trabalho obteve estimativas de recarga médias a altas, com taxas entre 0,78 e 2,38 mm/dia e razões recarga/precipitação entre 18% e 46% (média entre RISE e MRC, para $S_y = 25\%$). Os resultados foram discutidos à luz de mapas temáticos de uso e ocupação do solo, geologia, pedologia e declividade, o que permitiu discutir as heterogeneidades observadas na dinâmica dos níveis de água para os poços RIMAS. Verificou-se respostas mais rápidas à precipitação, menor efeito memória e estimativas de recarga mais elevadas nos poços com maior presença de areias médias a finas, com níveis estáticos menores e em região de entorno ocupada por pastagens e áreas urbanas. Os poços com respostas mais lentas também apresentaram estimativas de recarga menores, sendo que se encontram em camadas com maior teor de argila e apresentam maior proximidade a corpos hídricos superficiais e maior uso natural do solo. Dessa forma, o trabalho apresentou estimativas de recarga e avaliou a sua relação com a precipitação no SAC, com discussão envolvendo as características da Planície Costeira no Litoral Norte do Rio Grande do Sul, buscando contribuir para aumentar o conhecimento hidrogeológico dessa região.

Palavras-chave: Aquífero Costeiro, Recarga Subterrânea, Variação de Níveis de Água.

ABSTRACT

Groundwater resources are of great importance for the multiple uses of water in Brazil, which highlights the need for adequate groundwater management. Increased knowledge about Aquifer Systems is essential for management, with studies that generate estimates of recharge and renewable reserves, to guide the sustainable extraction of aquifers. The assessment of recharge can be done through water level data, such as those made available by the Integrated Network for Groundwater Monitoring (RIMAS/CPRM), which also allow investigating the dynamics of the monitored aquifers. In this context, this work intended to analyze the variation of water levels and estimate groundwater recharge in the Coastal Aquifer System (SAC), in the Coastal Plain of Rio Grande do Sul, in the North Coast region. Water level data were obtained from six RIMAS/CPRM wells located between Osório and Terra de Areia, with availability between 2012 and 2021. For the analysis of level variations, autocorrelation and cross-correlation were applied. Recharge estimation was performed with the Water Table Fluctuation (WTF) method at daily time resolution, with RISE and Master Recession Curve (MRC) applications and a sensitivity analysis for specific yields of 20%, 25% and 30%. Time series filters and smoothing of level data through 5-day moving average were applied to correct noise in data and avoid overestimation of recharge. The work obtained medium to high recharge estimates, with rates between 0,78 and 2,38 mm/day and recharge to precipitation ratios between 18% and 46% (average between RISE and MRC, for $S_y = 25\%$). The results were discussed considering thematic maps of land cover, geology, pedology and slope, which allowed the evaluation of the heterogeneities observed in the dynamics of water levels for the RIMAS wells. There were faster responses to precipitation, less memory effect and higher recharge estimates in wells with higher presence of medium to fine sands, with lower static levels and located in regions occupied by pastures and urban areas. The wells with slower responses also showed lower recharge estimates, are installed in layers with higher clay content and have greater proximity to surface water bodies and greater natural land use. In such manner, the work presented recharge estimates and evaluated its relationship with precipitation in the SAC, with discussion involving the characteristics of the Coastal Plain in the Northern Coast of Rio Grande do Sul, seeking to contribute to increase the hydrogeological knowledge of this region.

Keywords: Coastal Aquifer, Groundwater Recharge, Water Table Fluctuation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Unidades Geomorfológicas do Rio Grande do Sul.....	21
Figura 2 - Seção geológica esquemática transversal da Planície Costeira na latitude aproximada de Porto Alegre.	23
Figura 3 - Mapa geológico simplificado da Planície Costeira do Rio Grande do Sul.....	24
Figura 4 – Mapa de Solos do Brasil na região do Rio Grande do Sul.....	26
Figura 5 -Variabilidade da precipitação pluviométrica entre 1977 e 2006 (em mm/ano), para o estado do Rio Grande do Sul.....	28
Figura 6 – Variabilidade anual do total de dias de chuva para o período de 1970-2007 no Rio Grande do Sul.....	29
Figura 7 - Bacias Hidrográficas do Rio Grande do Sul.....	31
Figura 8 – Mapa da Bacia Hidrográfica do Rio Mampituba – L050.....	32
Figura 9 – Mapa da Bacia Hidrográfica do Rio Tramandaí – L010.....	33
Figura 10 – Mapa da Bacia Hidrográfica do Litoral Médio – L020.....	34
Figura 11 – Mapa da Bacia Hidrográfica do Litoral Médio – L030.....	35
Figura 12– Mapa da Bacia Hidrográfica Mirim São Gonçalo – L040.....	36
Figura 13 – Hidrogeologia do Rio Grande do Sul.....	37
Figura 14 – Unidades Hidroestratigráficas do Sistema Aquífero Costeiro, no Litoral Norte do Rio Grande do Sul. Legenda: (A) Porção norte do Litoral Norte. (B) Porção sul do Litoral Norte.....	40
Figura 15 – Representação esquemática dos diferentes tipos de aquíferos, de acordo com o sistema de pressão das águas e com a natureza das camadas que os delimitam no topo e na base.	43
Figura 16 -Representação do Ciclo Hidrológico.....	44
Figura 17 – Localização dos Poços RIMAS na Planície Costeira do Rio Grande do Sul.....	46
Figura 18 – Exemplo de gráfico de autocorrelação.....	47
Figura 19– Exemplo de gráfico de correlação cruzada para dados de precipitação e nível de água.....	48
Figura 20 – Representação da aplicação do Correlação Cruzada sliding windows.....	49
Figura 21 -Representação sistemática do ciclo hidrológico.....	50
Figura 22 -Representação do ΔH para o método VNA.....	52
Figura 23 - Comparação entre as aplicações do VNA: RISE e MRC.....	54
Figura 24 - Composição do escoamento em um hidrograma.....	58
Figura 25 – Fluxograma da metodologia adotada para a elaboração do trabalho.....	62
Figura 26 – Área de estudo e localização dos Poços RIMAS no Litoral Norte do Rio Grande do Sul.....	63
Figura 27 – Disponibilidade de dados de nível de água nos poços RIMAS no Litoral Norte do Rio Grande do Sul.....	64
Figura 28 – Localização dos poços RIMAS e Estações Pluviométricas.....	65
Figura 29 – Etapas adotadas para a estimativa da recarga a partir dos dados de nível de água e precipitação.....	68
Figura 30 – Unidades Aquíferas do Mapa Hidrogeológico do Brasil ao Milionésimo no entorno dos poços RIMAS no Litoral Norte.....	69
Figura 31 – Perfis construtivos dos poços 4300020526 e 4300020527 da RIMAS/CPRM no Litoral Norte.....	70
Figura 32– Perfis construtivos dos poços 4300020528 e 4300020529 da RIMAS/CPRM no Litoral Norte.....	70
Figura 33– Perfis construtivos dos poços 4300020530 e 4300020566 da RIMAS/CPRM no Litoral Norte.....	71

Figura 34 – Dados de nível de água (em azul, gráfico de linha) e precipitação (em cinza, gráfico de coluna) para os poços RIMAS no Litoral Norte do Rio Grande do Sul.	73
Figura 35 – Coeficientes de autocorrelação obtidos para os dados de nível de água dos Poços RIMAS no Litoral Norte do Rio Grande do Sul.	75
Figura 36– Coeficientes de correlação cruzada obtidos para os dados de nível de água dos Poços RIMAS no Litoral Norte do Rio Grande do Sul.	76
Figura 37 – Exemplo da ocorrência de picos secundários de coeficiente de correlação cruzada, para o poço 4300020526 (2012-2019).	77
Figura 38 – Tempos de resposta em relação à precipitação ao longo do tempo para os 11 poços da RIMAS/CPRM analisados, para a Correlação Cruzada Sliding Windows.	78
Figura 39 – Resultados da estimativa de Taxa de Recarga nos anos hidrológicos no poços RIMAS no Litoral Norte, para $S_y = 20\%$, 25% e 30%	80
Figura 40 – Resultados da estimativa de razão Recarga/Precipitação nos anos hidrológicos no poços RIMAS no Litoral Norte, para $S_y = 20\%$, 25% e 30%	81
Figura 41 – Comparação entre resultados de estimativa da razão Recarga/Precipitação para os poços RIMAS no Litoral Norte do Rio Grande do Sul, de acordo com a aplicação dos filtros (Método RISE e $S_y = 20\%$).	82
Figura 42– Classes de uso e cobertura do solo no entorno do Poço RIMAS 4300020526 (buffer de 1km).	85
Figura 43 – Classes de uso e cobertura do solo no entorno do Poço RIMAS 4300020527 (buffer de 1km).	85
Figura 44 – Classes de uso e cobertura do solo no entorno do Poço RIMAS 4300020528 (buffer de 1km).	86
Figura 45– Classes de uso e cobertura do solo no entorno do Poço RIMAS 4300020529 (buffer de 1km).	86
Figura 46– Classes de uso e cobertura do solo no entorno do Poço RIMAS 4300020530 (buffer de 1km).	87
Figura 47 – Classes de uso e cobertura do solo no entorno do Poço RIMAS 4300020566 (buffer de 1km).	87
Figura 48 – Percentual de área do entorno dos poços (buffer de 1km) conforme as classes de uso e ocupação do solo.	88
Figura 49 – Unidades Geológico-Ambientais do Rio Grande do Sul no entorno dos poços RIMAS no Litoral Norte.	90
Figura 50 – Classes de Solo do Rio Grande do Sul no entorno dos poços RIMAS no Litoral Norte.	92
Figura 51 – Declividade (em %) na região do Litoral Norte do Rio Grande do Sul, calculada a partir de MDE do SRTM, com resolução de 30 metros (FARR; KOBRICK, 2000).	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais informações a respeito das Bacias Hidrográficas na Região Hidrográfica das Bacias Litorâneas.....	31
Tabela 2 - Características das classes do Sistema Aquífero Quaternário Costeiro, na região da Planície Costeira.....	38
Tabela 3 -Características das unidades granulares na região da Planície Costeira.	38
Tabela 4 - Características das unidades hidroestratigráficas da Planície Costeira na região do Litoral Norte.....	41
Tabela 5 – Lista de poços de monitoramento da RIMAS na Planície Costeira do Rio Grande do Sul, com município, local, latitude e longitude.....	45
Tabela 6 – Fontes de informação utilizadas para caracterização a região da área de estudo.	63
Tabela 7 -Informações gerais sobre os poços RIMAS selecionados na área de estudo.	64
Tabela 8 – Estações Pluviométricas relacionadas aos poços, operadora das estações pluviométricas e distância entre poço e estação pluviométrica.....	65
Tabela 9 – Informações Construtivas e Geológicas sobre os poços de monitoramento da RIMAS/CPRM no Litoral Norte.....	71
Tabela 10 – Informações sobre os testes de bombeamento dos poços de estudo.....	72
Tabela 11- Resultados da análise de autocorrelação para os dados de nível d’água nos 6 poços da RIMAS/CPRM analisados.....	74
Tabela 12- Resultados da análise de correlação cruzada para os dados de precipitação e nível d’água nos 6 poços da RIMAS/CPRM analisados.....	76
Tabela 13 - Resultados da aplicação da correlação cruzada sliding windows entre a precipitação e o nível d’água para os 6 poços da RIMAS/CPRM analisados.	78
Tabela 14 - Resultados da estimativa da Taxa de Recarga nos poços RIMAS no Litoral Norte, para $S_y = 20\%$, 25% e 30%	79
Tabela 15 - Resultados da estimativa de razão Recarga/Precipitação nos poços RIMAS no Litoral Norte, para $S_y = 20\%$, 25% e 30%	81
Tabela 16 – Descrição das classes de uso e ocupação do solo no entorno dos poços RIMAS no Litoral Norte do Rio Grande do Sul.	84
Tabela 17 – Descrição das Unidades Geológico-Ambientais encontradas no entorno dos.....	90
Tabela 18 - Percentual de área do entorno dos Poços RIMAS no Litoral Norte (buffer de 1km) conforme as Unidades Geológico-Ambientais do Mapa de Geodiversidade do Rio Grande do Sul	91
Tabela 19 – Informações sobre as Classes de Solo do Rio Grande do Sul no entorno dos poços RIMAS no Litoral Norte.	92
Tabela 20 - Percentual de área do entorno dos Poços RIMAS no Litoral Norte (buffer de 1km) conforme as Classes de Solo do Rio Grande do Sul (COD_RADAM).	93
Tabela 21 – Estatísticas para a declividade (em %) calculada no entorno dos poços RIMAS no Litoral Norte (buffer de 1km).....	94

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

- AGRITEMPO** – Sistema de Monitoramento Agrometeorológico
- ALM** – Agência de Desenvolvimento da Bacia da Lagoa Mirim
- ANA** – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
- AP** – Antes do Presente
- BH** – Bacia Hidrográfica
- CEMADEN** – Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
- CN** – Número de curva
- CORSAN** – Companhia Riograndense de Saneamento
- DAS** – Descarga de Água Subterrânea
- EMR** – *Episodic Master Recession*
- FEPAM** – Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luis Roessler
- GEE** – *Google Earth Engine*
- GIRH** – Gestão Integrada de Recursos Hídricos
- GRACE** – *Gravity Recovery and Climate Experiment*
- INMET** – Instituto Nacional de Meteorologia
- L-010** – Bacia Hidrográfica do Rio Tramandaí
- L-020** – Bacia Hidrográfica do Litoral Médio
- L-030** – Bacia Hidrográfica do Rio Camaquã
- L-040** – Bacia Hidrográfica da Lagoa Mirim e Canal São Gonçalo
- L-050** – Bacia Hidrográfica do Rio Mampituba
- LF** – Lei Federal
- LSTM** – *Long Short-Term Memory*
- MDE** – Modelo Digital de Elevação
- MGB-IPH** – Modelo Hidrológico de Grandes Bacias
- MLP** – *Multi Layer Perceptron*
- MMA** – Ministério do Meio Ambiente
- MRC** – *Master Recession Curve*
- MRCfit** – Master Recession Curve Fitting Program
- NE** – Nordeste

PCRS – Planície Costeira do Rio Grande do Sul

PNSH – Plano Nacional de Segurança Hídrica

Q₅₀ – Vazão mínima esperada em 50% do tempo

Q₉₀ – Vazão mínima esperada em 90% do tempo

r – Coeficiente de correlação

R/P – Recarga/Precipitação

RHN – Rede Hidrometeorológica Nacional

RIMAS – Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas

SAC – Sistema Aquífero Costeiro

SBG/CPRM – Serviço Geológico do Brasil

SEMA-RS – Secretaria de Meio Ambiente e Infraestrutura do Estado do Rio Grande do Sul

SIAGAS – Sistemas de Informações de Águas Subterrâneas

SiBCS – Sistema Brasileiro de Classificação de Solos

SRH-CE – Secretaira de Recursos Hídricos do Estado de Ceará

STRM – *Shuttle Radar Topography Mission*

SW – Sudoeste

Sy – Rendimento Específico

VNA – Variação de Níveis de Água

W – Oeste

WTF – *Water Table Fluctuation*

ZFP – Plano de Fluxo Nulo

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	16
2.	OBJETIVOS	19
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
3.1.	Planície Costeira do Rio Grande do Sul.....	20
3.1.1.	Geologia e geomorfologia.....	21
3.1.2.	Pedologia.....	26
3.1.3.	Clima.....	28
3.1.4.	Hidrologia.....	30
3.2.	Hidrogeologia da Planície Costeira do Rio Grande do Sul	37
3.2.1.	Relação entre Água Subterrânea e Água Superficial na Planície Costeira.....	42
3.3.	Variações de nível de Água Subterrânea.....	43
3.3.1.	Métodos estatísticos para avaliação das Variações de nível de Água	46
3.4.	Avaliação da Recarga da Água Subterrânea	49
3.4.1.	Variação dos Níveis de Água (VNA).....	51
3.4.1.1.	Rendimento Específico	55
3.4.2.	Balanço Hídrico.....	56
3.4.3.	Separação do escoamento de base.....	57
3.4.4.	Demais métodos	59
3.5.	Consolidação da Revisão Bibliográfica	61
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	62
4.1.	Definição e obtenção de informações sobre a área de estudo	62
4.2.	Seleção e Obtenção de dados de Poços de Monitoramento	64
4.3.	Obtenção de dados de Precipitação Pluviométrica.....	65
4.4.	Análise da Dinâmica do Nível de Água e Precipitação.....	66
4.5.	Estimativa da Recarga Aquífera.....	66
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
5.1.	Caracterização Hidrogeológica	69
5.2.	Análise da Dinâmica do Nível de Água e Precipitação.....	72
5.2.1.	Autocorrelação	74
5.2.2.	Correlação cruzada.....	75
5.3.	Análise das estimativas de Recarga.....	79
5.4.	Discussão sobre a Recarga	83
5.4.1.	Uso e Ocupação do Solo	83
5.4.2.	Geologia	89
5.4.3.	Pedologia.....	92
5.4.4.	Declividade.....	93

5.4.5.	Consolidação da discussão sobre a Recarga.....	95
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	97
6.1.	Conclusões	97
6.2.	Recomendações para estudos futuros.....	98
7.	REFERÊNCIAS	99
	APÊNDICES.....	108
	APÊNDICE A – GRÁFICOS DE NÍVEL E PRECIPITAÇÃO	108

1. INTRODUÇÃO

A pressão sobre os recursos hídricos é uma das principais consequências do cenário presente, de desenvolvimento econômico crescente e expansão demográfica. Nessa conjuntura, é importante ressaltar que a manutenção da disponibilidade hídrica é de extrema importância para a vida humana, para a preservação dos ecossistemas e para as diversas atividades econômicas.

De toda água presente no planeta Terra, apenas 2,5% é água doce, cuja maior parte (68,9%) se encontra em calotas polares, geleiras e nas neves eternas. O restante da água doce está em menor parte (4%) nos cursos superficiais e 96% como água subterrânea, ressaltando a importância desse compartimento para os recursos hídricos (MMA, 2007)

No Brasil, há uma considerável disponibilidade de água superficial e subterrânea, que está distribuída de maneira desigual no território, assim como a população e os diversos usos da água. Há bastante água disponível na Região Hidrográfica Amazônica, enquanto ocorrem estiagens e secas regularmente no semiárido nordestino e conflitos pelo uso da água em regiões com elevadas demandas hídricas, no Sul e Sudeste brasileiros (ANA, 2020).

As águas subterrâneas, com disponibilidade estimada em 14.650 m³/s (ANA, 2020) também possuem distribuição irregular no território nacional, associada às diferentes características hidrogeológicas regionais. As condições climáticas e de uso e ocupação da terra também podem refletir nessa distribuição, já que influenciam os mecanismos de recarga da água subterrânea – a água que chega à zona saturada e contribui para o armazenamento dos aquíferos.

O uso da água subterrânea é extenso no Brasil, com mais de 2,5 milhões de poços tubulares¹ que extraem em torno de 17.580 Mm³/ano de água, volume capaz de abastecer anualmente 10 regiões metropolitanas do porte de São Paulo (HIRATA et al., 2019). Os poços são utilizados para atendimento doméstico (30%), agropecuária (24%), abastecimento público (18%) e para diversas atividades econômicas (CPRM, 2018).

O Atlas Águas (ANA, 2021) também ressalta o papel desse recurso hídrico, consolidando que 57% das sedes urbanas brasileiras utilizam água subterrânea para abastecimento humano (sendo que 40% das sedes têm abastecimento exclusivo por mananciais subterrâneos). A publicação aponta que os estados de São Paulo, Rio Grande do Sul e Paraná contam com grande quantidade de municípios abastecidos por poços.

Nesse âmbito, ressalta-se a importância de uma Gestão Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) que oriente a exploração sustentável desse recurso. A GIRH ganha ainda mais relevância devido às pressões das mudanças do clima, com elevações de temperatura e reduções de precipitação consideráveis já observadas e projetadas para boa parte do território brasileiro (ARIAS et al., 2021).

A GIRH e as mudanças do clima se relacionam com o conceito de Segurança Hídrica², avaliada no Plano Nacional de Segurança Hídrica – PNSH (ANA, 2019). O

¹ O estudo se baseia na compilação de dados do SIAGAS (CPRM, 2018) e do Censo Agropecuário (IBGE, 2017), não contabilizando captações por poços escavados e nascentes.

² Conforme o PNSH (ANA, 2019), embasado no conceito da Organização das Nações Unidas (ONU), a Segurança Hídrica existe quando: “*Há disponibilidade de água em quantidade e qualidade suficientes para*

PNSH aponta condições desfavoráveis de Segurança Hídrica no semiárido nordestino, em regiões com concentrações urbanas e em boa parcela do Rio Grande do Sul, indicando o potencial de armazenamento subterrâneo como relevante para garantir a resiliência a situações de escassez hídrica, que podem ser agravadas pelas mudanças do clima.

A gestão da água subterrânea deve considerar a oferta e o armazenamento de água subterrânea, com base em estudos que avaliem a recarga, as reservas existentes e os recursos renováveis em um determinado aquífero (FEITOSA, 2008). A partir de tais informações, os instrumentos de gestão de recursos hídricos podem avaliar e conciliar as demandas atuais e previstas com a oferta de água nos aquíferos, buscando integração com demais esferas de planejamento e com os usuários existentes e futuros.

Nesse contexto, destaca-se a existência do Sistema Aquífero Costeiro (SAC), que está inserido na Planície Costeira do Rio Grande do Sul, formada por depósitos de sedimentos inconsolidados, dispostos em sistemas de leques aluviais e sistemas laguna-barreira (VILLWOCK; TOMAZELLI, 2005). O SAC possui extensa área de afloramento no estado, sendo composto por camadas de areias intercaladas por finas lentes de argila, que podem formar aquíferos livres, semi-confinados a confinados (TROIAN et al., 2020).

O SAC pode apresentar camadas aquíferas com produtividade alta, no contexto dos Sistemas Aquíferos do Rio Grande do Sul (MACHADO; FREITAS, 2005), sendo importante para o abastecimento público e humano e para a irrigação (TROIAN et al., 2020). Na região do Litoral Norte do Rio Grande do Sul também se encontram camadas do SAC, e a água subterrânea é relevante para o abastecimento humano de sedes e balneários, para a agropecuária e para indústrias e estabelecimentos comerciais, por meio de poços tubulares e poços de pequenas dimensões (ponteira) (SEMA-RS, 2019).

Para a avaliação da água subterrânea, ressalta-se a presença da Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas (RIMAS), operada pelo Serviço Geológico Brasileiro (SGB/CPRM). Os poços de monitoramento da RIMAS fornecem medições de nível de água, consolidadas e disponibilizadas de maneira pública, o que contribui para a avaliação da condição dos diversos Sistemas Aquíferos monitorados (CPRM, 2022).

As medições de nível de água podem orientar a gestão da água subterrânea, já que permitem a realização de estimativas de recarga e reservas renováveis. O *Water Table Fluctuation* (WTF) ou Variação de Nível de Água (VNA) (HEALY; COOK, 2002) é um dos métodos tradicionais para estimar a recarga, a partir da diferença de níveis entre um período de recarga e recessão, ponderada pelo rendimento específico da camada aquífera. A partir de diferentes padrões de variações dos níveis, e de suas respostas a eventos de precipitação, os níveis também podem contribuir para aprofundar o conhecimento sobre o Sistema Aquífero de interesse.

Nesse sentido, considerando a necessidade de fornecer subsídios à importante gestão da água subterrânea, este trabalho se propõe a avaliar as variações de nível de água

o atendimento às necessidades humanas, à prática das atividades econômicas e à conservação dos ecossistemas aquáticos, acompanhada de um nível aceitável de risco relacionado a secas e cheias, devendo ser consideradas as suas quatro dimensões (Humana, Econômica, Ecológica e Resiliência) como balizadoras do planejamento da oferta e do uso da água em um país.”

e estimar a recarga através do método WTF no Sistema Aquífero Costeiro, a partir de dados de Poços da RIMAS localizados no Litoral Norte do Rio Grande do Sul.

2. OBJETIVOS

Este trabalho teve como objetivo geral avaliar as variações do nível de água subterrânea e estimar a recarga através do método *Water Table Fluctuation* (WTF) no Sistema Aquífero Costeiro, na Planície Costeira do Estado do Rio Grande do Sul, na região do Litoral Norte.

Como objetivos específicos, destacam-se:

- avaliar as variações do nível de água subterrânea em poços no Sistema Aquífero Costeiro e observar a relação desse parâmetro com registros de precipitação pluviométrica;
- obter estimativas de recarga subterrânea através do método ao longo de diversos anos hidrológicos, comparando com a precipitação pluviométrica no período de estudo e com as características da região;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta revisão abrange uma breve contextualização da Planície Costeira do Rio Grande do Sul, com foco nas características hidrogeológicas e na região do Litoral Norte. Também busca apresentar questões associadas ao estudo das variações do nível de água subterrânea e da recarga, apresentando seu conceito, fatores que a influenciam e as principais metodologias de estimativa, consolidando referências de modo a subsidiar o presente trabalho.

3.1. Planície Costeira do Rio Grande do Sul

A Planície Costeira é uma unidade fisiográfica e geológica baixa e composta predominantemente por areias (DELANEY, 1962) sendo formada por depósitos de sedimentos resultantes da erosão causada pela força hidráulica que os oceanos exercem na faixa litorânea dos continentes, vinculada às variações do nível do mar. Esses processos de erosão, transporte e deposição dos sedimentos nas praias arenosas são constantes e originam as características geomorfológicas da região, associadas à dinâmica litorânea composta por ventos, ondas e correntes litorâneas (VILLWOCK; TOMAZELLI, 2005). Tal unidade está presente em parte relevante das margens dos continentes e de ilhas marítimas, sendo o Brasil um país com grande extensão de planícies costeiras, estando a maior delas no Rio Grande do Sul (SCHAFER; LANZER; SCUR, 2017).

No Rio Grande do Sul, a planície costeira ocupa em torno de 33 mil km², abrangendo a totalidade da faixa litorânea do estado e apresenta extensão no sentido norte-sul de 622 km, entre as latitudes de 28°35' S e 33°55' S, desde o município de Torres (na divisa com o estado de Santa Catarina), onde apresenta larguras em torno de 10 a 15km, até o município de Chuí (na fronteira com o Uruguai), onde apresenta larguras na ordem de 100 km. Essa região é limitada a oeste pelas unidades Planalto Meridional, Depressão Central e Escudo Sul-rio-grandense e a leste pelo Oceano Atlântico. A Figura 1 expõe a localização da área descrita, no contexto das Unidades Geomorfológicas do Rio Grande do Sul.

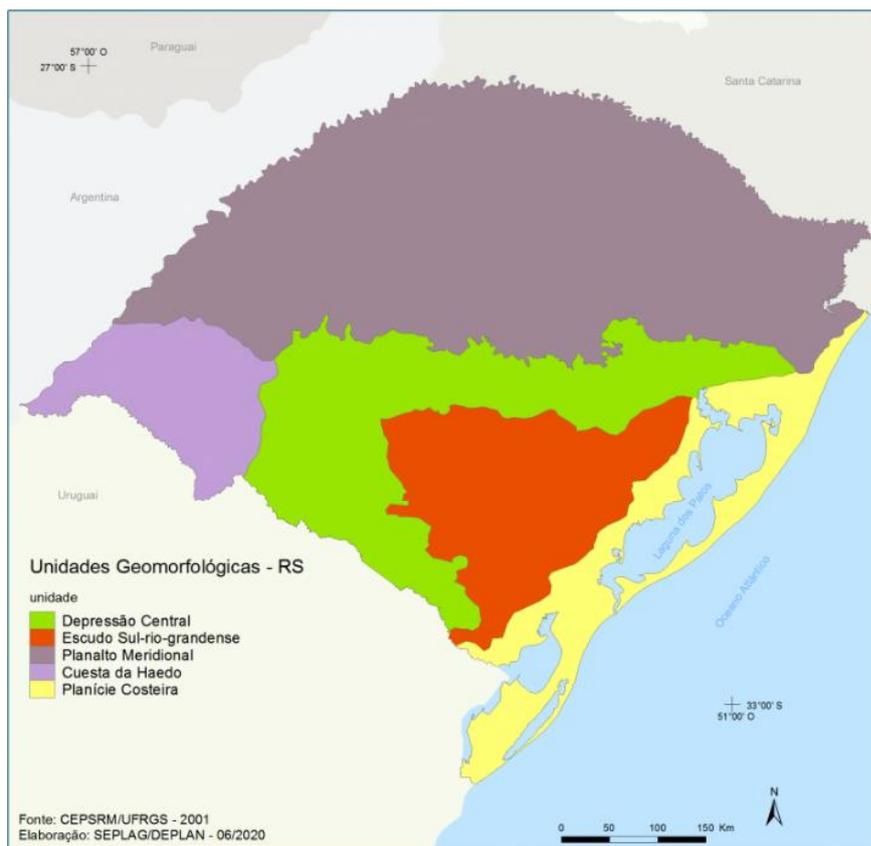


Figura 1 - Unidades Geomorfológicas do Rio Grande do Sul.

Fonte: Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul (2021).

O Litoral Norte representa uma seção relevante da planície costeira situada em sua zona ao norte, com elevada concentração populacional sazonal e atividade econômica no estado gaúcho, abrangendo mais de 20 municípios. O estudo recente de Troian *et al.* (2020), que abordou a geologia e hidrogeologia dessa região, tratou-a como uma faixa da planície costeira de aproximadamente 100 km, dos municípios de Tramandaí até Torres, na divisa com o Estado de Santa Catarina, sendo que outros estudos, como o de Tomazelli e Villwock (1991), podem variar um pouco em tal delimitação. Para caracterizar a Planície Costeira e detalhar algumas questões para a região do Litoral Norte, serão apresentados o contexto geológico, climático, pedológico e hidrológico, em sequência.

3.1.1. Geologia e geomorfologia

A geologia da Planície Costeira do Rio Grande do Sul (PCRS) é caracterizada por sedimentos que foram depositados em função das oscilações do nível do mar e em distintos ambientes deposicionais. Esses ambientes se relacionam com a presença de extensos corpos hídricos lagunares e lacustres e dão forma a grandes barreiras sedimentares (BUCHMANN *et al.*, 2009).

Essas variações de nível do mar, que geram a deposição de sedimentos (areias, siltes e argilas) e de matéria orgânica (turfas), são usualmente chamadas de transgressões (elevações de nível) e regressões (recuos de nível). Na região, também se observa a presença de restos fósseis de organismos marinhos e terrestres (DELANEY, 1962), que se agregam em areias e cascalhos nas interações com as ondas.

A Planície Costeira tem gênese em um pacote sedimentar que se acumulou na Bacia de Pelotas e se assenta sobre as rochas do embasamento cristalino e pelas sequências sedimentares e vulcânicas da Bacia do Paraná. A Bacia de Pelotas tem origem relacionada com movimentos tectônicos que conduziram à abertura do Atlântico Sul a partir do período Cretáceo (VILLWOCK; TOMAZELLI, 2005).

A geologia presente na Bacia de Pelotas apresenta mais de 10.000 de espessura, com predominância de folhelhos, arenitos, calcilitos e conglomerados (FONTANA, 1987). Já as rochas do embasamento da Bacia do Paraná pertencem em maior parte ao Escudo Sul-Rio-Grandense, na unidade Cinturão Dom Feliciano (estão presentes filitos, xistos, quartzitos, mármore, granitos e migmatitos), estando cobertas pelas formações sedimentares (FERNANDES et al., 1995). Na parte setentrional da planície, ao norte da região de Osório, os sedimentos da planície costeira também se encontram apoiados na base da escarpa da Serra Geral, interdigitados com outros depósitos de encosta pertencentes ao Sistema de Leques Aluviais (VILLWOCK; TOMAZELLI, 2005).

Conforme Delaney (1962), na Planície Costeira estão presentes sedimentos das duas subdivisões do período Quaternário: o holoceno (mais recente) e o pleistoceno (mais antigo), além de sedimentos do período Terciário. Os sedimentos são principalmente de granulação arenosa, mas podem ser encontradas argilas e siltes na região. O autor descreveu os sedimentos holocênicos como areias brancas inconsolidadas, localizados, geralmente, em regiões mais baixas. Os sedimentos pleistocênicos aparecem como areias mais oxidadas, de cor avermelhada ou amarelada, semi-consolidadas, contendo certo teor de argilas, comumente associadas a concreções ferruginosas e nódulos carbonáticos e presentes em altitudes maiores que as formações mais recentes.

Os sedimentos configuram os sistemas deposicionais da Planície Costeira, que, conforme apontam Villwock e Tomazelli (2005), são de dois tipos na região costeira gaúcha: o Sistema de Leques Aluviais e o Sistema tipo Laguna-Barreira.

O Sistema de Leques Aluviais abrange um conjunto de fácies sedimentares resultantes de processos de erosão associados aos ambientes de encosta de unidades geomorfológicas mais antigas: Escudo Sul-riograndense, Depressão Central e Planalto das Araucárias (BUCHMANN et al, 2009). Tais processos consistem na queda livre de blocos, rastejo e fluxo de detritos, que são posteriormente transportados e depositados em aluviões, formando uma “rampa suave”, conforme Villwock e Tomazelli (2005). Esse sistema deposicional é parcialmente ativo no presente, com processos pouco intensos, mas observáveis.

Já o Sistema tipo Laguna-Barreira é representado por quatro sistemas deposicionais que evoluíram de oeste (mais antigos, I, II e III) para leste (IV, o mais externo), durante o Pleistoceno e o Holoceno. Esse tipo de sistema engloba três subsistemas relacionados: o lagunar (a região mais baixa em termos topográficos, de lagunas, lagos costeiros, pântanos etc.), o barreira (as praias arenosas e as dunas eólicas) e de canal de ligação (unidade onde ocorre o contato entre o subsistema lagunar e o mar) (VILLWOCK; TOMAZELLI, 2005). A relação entre os sistemas pode ser observada na Figura 2, abaixo:

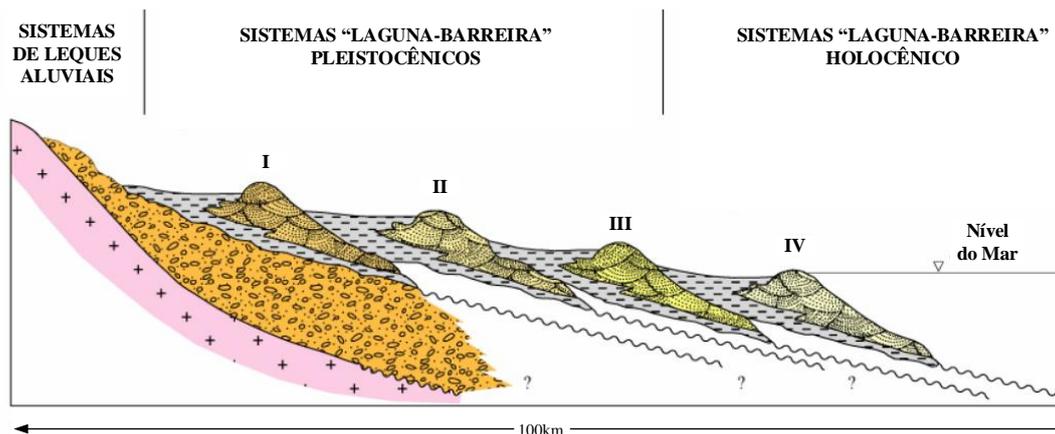


Figura 2 - Seção geológica esquemática transversal da Planície Costeira na latitude aproximada de Porto Alegre.

Fonte: Villwock e Tomazelli (2005).

A partir de Villwock e Tomazelli (2005), Buchmann *et al* (2009) e Delaney (1962), obtém-se que os sistemas deposicionais Laguna-Barreira apresentam características distintas, em geral se encontram em cotas progressivamente mais baixas (de I a IV) e podem ser descritos, em síntese, da seguinte forma:

- Sistema deposicional Laguna-Barreira I: Sistema mais bem preservado na porção noroeste, desenvolvido através da acumulação de sedimentos sobre os altos do embasamento. Os sedimentos caracterizam-se por areias quartzo-feldspáticas avermelhadas, bem arredondadas, de granulometria fina a média, envolvidas por uma matriz siltico-argilosa (que pode ser superior a 15%). As lagunas associadas a este sistema se situam entre a barreira de sedimentos e as rochas mais antigas do embasamento, o que ocorre em parte das bacias dos rios Guaíba e Gravataí;
- Sistema deposicional Laguna-Barreira II: É um sistema bem preservado na região norte da planície costeira, a leste da lagoa dos Barros e ao sul, responsável pelo primeiro isolamento da lagoa Mirim. São características as areias quartzo-feldspáticas, castanho-amareladas, bem arredondadas, também envolvidas em uma matriz siltico-argilosa. Seus sedimentos podem ser localizados a leste da Lagoa dos Barros, na região do Litoral Norte e à margem leste da Lagoa Mirim, ao sul.
- Sistema deposicional Laguna-Barreira III: Esse sistema é citado como bem preservado ao longo de toda a planície costeira, com fácies arenosas de origem praias e marinho raso. Estão presentes sedimentos praias compostos de areias quartzosas claras, de coloração creme, finas e bem selecionadas, com areias eólicas de cobertura com aspecto mais avermelhado e maciço e depósitos na região de retrobarreira com areias finas, siltico-argilosas e mal selecionadas. Cita-se que seu desenvolvimento está associado à origem da Laguna dos Patos, que encontra a Barreira III em sua margem leste.
- Sistema deposicional Laguna-Barreira IV: No pico holocênico, com o acréscimo do nível do mar, formou-se o sistema barreira IV, no qual estão presentes areias praias e eólicas, quartzosas, de granulação fina a muito fina, com baixo teor de argila e há presença de minerais pesados, de origem continental. No espaço de

retrobarreira, entre a barreira IV e a barreira III, o sistema lagunar IV teve sua formação, com a presença de corpos lagunares como a Lagoa Mangueira, Lagoa do Peixe e as lagoas interligadas no Litoral Norte.

Os sistemas deposicionais estão em constante avaliação e aprofundamento, a partir dos avanços em técnicas de campo e dos modelos estratigráficos, em especial a Barreira IV, que contempla sedimentos mais recentes e bem-preservedos, com maior facilidade de visualização dos fatores formadores desse sistema, que pode subsidiar a compreensão sobre a evolução dos demais. Conforme Barboza et al. (2009), observa-se a continuidade dos processos erosivos (de origem natural) relacionados à dinâmica costeira, que formam as barreiras holocênicas, durante os últimos 6.000 AP, através do avanço do uso de métodos com isótopos de carbono. A Figura 3, em sequência, traz um retrato simplificado da distribuição dos sistemas deposicionais na PCRS.

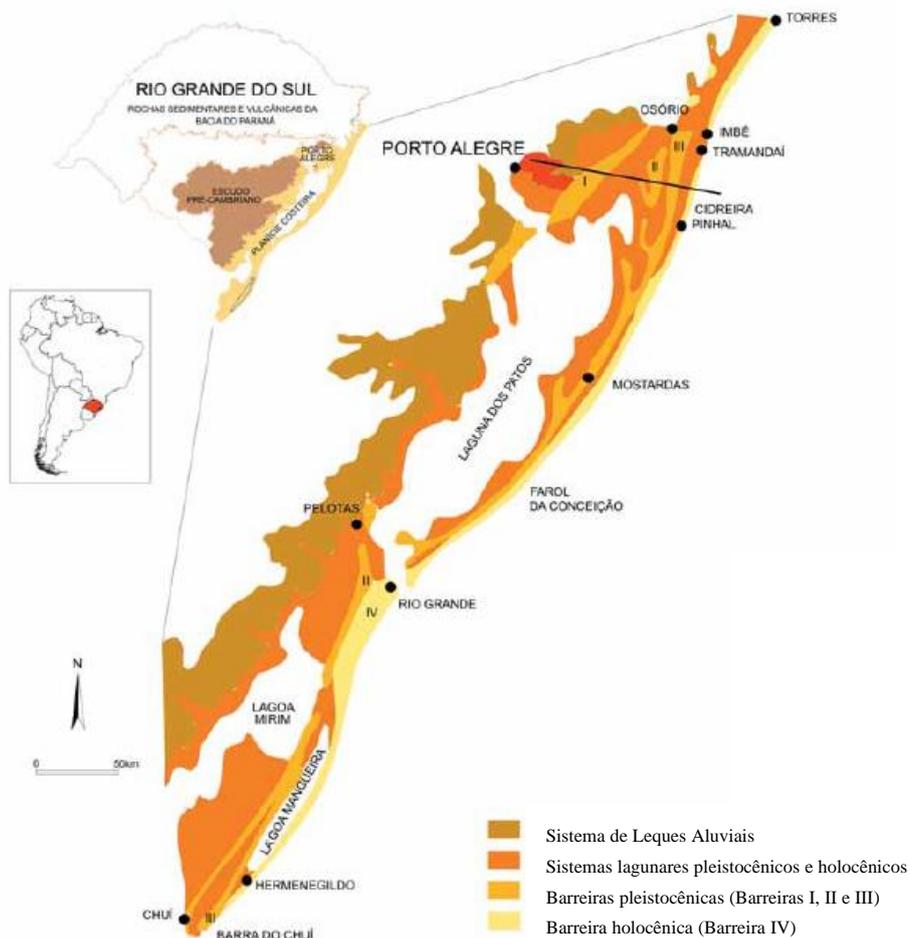


Figura 3 - Mapa geológico simplificado da Planície Costeira do Rio Grande do Sul.

Fonte: Adaptado de Villwock e Tomazelli (2005).

A formação geológica das regiões costeiras é influenciada por diversos fatores, como as já citadas variações do nível do mar, que desempenham papel importante na evolução das áreas costeiras e têm origem nos fenômenos cíclicos e graduais de acréscimo e decréscimo das temperaturas globais (VILLWOCK; TOMAZELLI, 2005). Conforme os autores, esse efeito é denominado de Ciclo de Milankovitch e é associado a: *“mudanças na excentricidade da órbita, na inclinação axial e precessão dos equinócios*

do planeta, que resultam em oscilações marinhas que moldaram as planícies costeiras, principalmente no período Quaternário.”

Os ventos, ondas e correntes também influenciam constantemente o ambiente costeiro e configuram, junto com os demais fenômenos e a natureza dos sedimentos, a morfologia dos depósitos sedimentares, como a declividade e a largura. (BUCHMANN *et al*, 2009). Conforme descrevem Dillenburg e Barboza (2014), no período recente (a partir de 325 ka), as condições citadas contribuem para o desenvolvimento dos sistemas laguna-barreira, devido à deposição anterior de uma grande quantidade de sedimentos, declividades suaves na costa e energia de ondas moderada a alta.

A região do Litoral Norte do Estado do Rio Grande do Sul também contempla essa complexidade de sistemas e subsistemas deposicionais, conforme apontam Tomazelli e Villwock (1991). Nos sistemas laguna-barreira da região, que se desenvolveram há 5000 anos, estão presentes corpos aquosos (lagos e lagunas, corpos hídricos com e sem ligação direta com o mar, respectivamente), sistemas aluviais (rios meandранtes e canais meandранtes inter-lagunares), sistemas deltaicos (deltas flúvio-lagunares e deltas de “maré lagunar”), além de pântanos, alagadiços e turfeiras.

Nesse sentido, o contexto geológico e geomorfológico da planície costeira é descrito, com a predominância de formações sedimentares (de areias finas a médias), que estão configuradas em sistemas deposicionais de leques aluviais e laguna-barreira. Essa contextualização será complementada pelo detalhamento das características pedológicas, climáticas e hidrológicas para a região nos subitens em sequência, o que dará base para a discussão sobre a hidrogeologia da Planície Costeira.

3.1.2. Pedologia

As litologias e formas de relevo associadas às questões meteorológicas locais condicionaram o desenvolvimento dos diferentes tipos de solos na Planície Costeira do Rio Grande do Sul. Segundo Schneider (1977), nessa região ocorrem solos em geral com horizonte A com espessura variável, de textura arenosa a franco arenosa, com transições para horizontes B com maior concentração de argila (solos argilo-arenosos a argilosos).

Os solos no Rio Grande do Sul, a partir do Mapa de Solos da EMBRAPA (Santos, 2018), podem ser observados na Figura 4, abaixo:

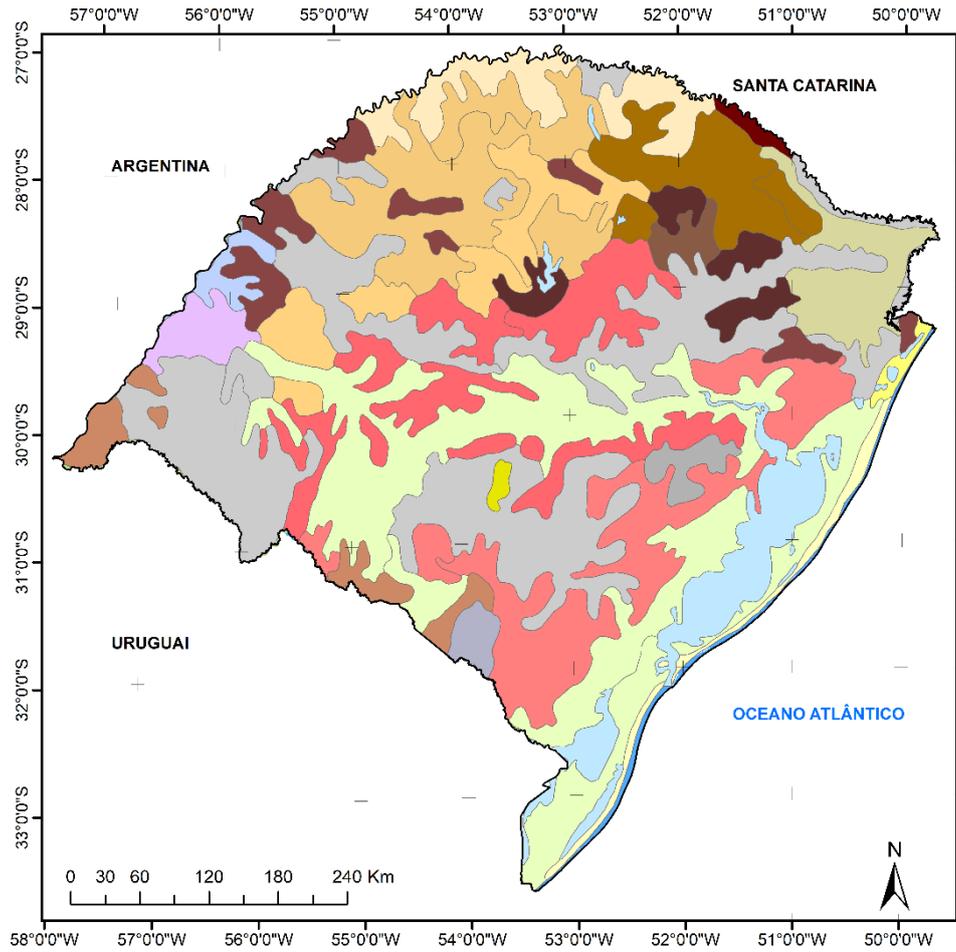


Figura 4 – Mapa de Solos do Brasil na região do Rio Grande do Sul.

Fonte: elaboração própria

A partir do Mapa de Solos do Brasil (SANTOS et al., 2011), observa-se que os solos na cobertura dos sedimentos arenosos da região são predominantemente classificados como Neossolos (em toda a faixa litorânea) e Planossolos. Os Neossolos são caracterizados como solos pouco evoluídos, em vias de formação, com pequena espessura, sem a presença de horizonte característico, devido à característica do material de formação e às condições de formação (clima e relevo), sendo costumeiramente mais permeáveis (SANTOS, 2018).

Os Neossolos apresentam uma série de subordens, como os Neossolos Litólicos, que podem apresentar contato lítico dentro de 50 cm a partir da superfície, com horizonte A assentado diretamente sobre rochas. Há também os Neossolos Regolíticos, que não apresentam contato lítico dentro de 50 cm a partir da superfície e contém minerais primários alteráveis ou fragmentos de rochas semi-interperizadas, saprólitos ou fragmentos formados por restos da estrutura orientada da rocha (pseudomorfos) que originou o solo (SANTOS et al., 2011).

Os Neossolos também contemplam solos derivados de sedimentos aluviais, com horizonte A assentado sobre camada com caráter flúvico dentro de 150cm a partir da superfície (Neossolos Flúvicos). Na região da Planície Costeira predominam os Neossolos Quartzarênicos, com textura arenosa e grande proporção de quartzo, com cores bruno e amareladas e derivados de sedimentos costeiros inconsolidados recentes (SANTOS et al., 2011).

Os Planossolos, por sua vez, são pouco profundos, ocorrendo em regiões de cotas baixas, com reduzidas declividade e ondulação. Apresentam textura pouco argilosa na camada mais superficial e maior argilização no horizonte inferior, o que restringe a permeabilidade geral do solo na subsuperfície (SANTOS, 2018).

Na região do Litoral Norte, há predominância de Neossolos compostos por areias quartzosas, com variabilidade na drenagem e permeabilidade, além da presença de Gleissolos e Planossolos (SANTOS et al., 2011). Conforme Scopel (1977), o material de origem dos solos nessa região inclui areias quartzosas praias e marinhas, médias a finas, silte argila, cimento ferruginoso e resíduos orgânicos lacustres, associado à descrição geológica feita no item anterior.

Os Gleissolos que podem ocorrer no Litoral Norte são solos de origem de sedimentos recentes não consolidados, mal drenados, usualmente com características de umidade associadas a níveis estáticos reduzidos nos Sistemas Aquíferos localizados próximos à superfície (SANTOS, 2018). Os Planossolos começam a ganhar representatividade a partir de latitudes próximas ao município de Osório, entre a Lagoa dos Quadros e a Lagoa dos Patos.

Na faixa litorânea entre os Planossolos, no entorno da Lagoa dos Patos, e os Neossolos, na região de Dunas, podem ocorrer Plintossolos Argilúvicos e Gleissolos Melânicos, que podem apresentar maiores concentrações de argila. A oeste da Lagoa dos Patos, próximo a Pelotas e São Lourenço do Sul, destacam-se Neossolos Flúvicos, derivados de sedimentos aluviais de formação recente, que geram espessuras e granulometrias com boa variabilidade (SANTOS, 2018).

Próximo ao município de Rio Grande, além dos Neossolos e Planossolos, aparecem camadas de Espodossolos, solos ácidos, com presença de matéria orgânica humificada e alumínio, com textura predominantemente arenosa. Ao sul, também se observa algumas seções de Gleissolos Pouco Húmicos e Chernossolos Argilúvicos, que também costumam apresentar maiores concentrações de argilas e minerais que os Neossolos da faixa litorânea.

A análise geral a partir do Mapa de Solos do Brasil (SANTOS et al., 2011) e das classificações do SiBCS (SANTOS, 2018), verifica-se a diversidade de solos presente na região da Planície Costeira. Essa questão revela que diferentes poços podem apresentar condições superficiais distintas para a infiltração, o que pode se refletir em variáveis importantes como a recarga subterrânea e o tempo de resposta de aquíferos, que serão discutidos ao longo da exposição do presente trabalho.

3.1.3. Clima

O clima na região da Planície Costeira do Rio Grande do Sul pode ser caracterizado como subtropical úmido, com classificação de Köppen equivalente a Cfa (ALVARES; STAPE; SENTELHAS, 2013). Assim, o clima é considerado oceânico, sem estação seca bem demarcada e com verões quentes, com temperaturas mínimas anuais menores que 18°C e máximas anuais maiores que 22°C. As temperaturas tendem a ser menores e menos variáveis no Litoral Sul, com maior variabilidade no Litoral Médio e no extremo norte da Planície Costeira (ROSSATO, 2011).

A Figura 5 traz as isoietas do Atlas Pluviométrico do Brasil (PINTO et al., 2011) publicado pelo SGB/CPRM, que consolida médias de dados entre 1977 e 2006:

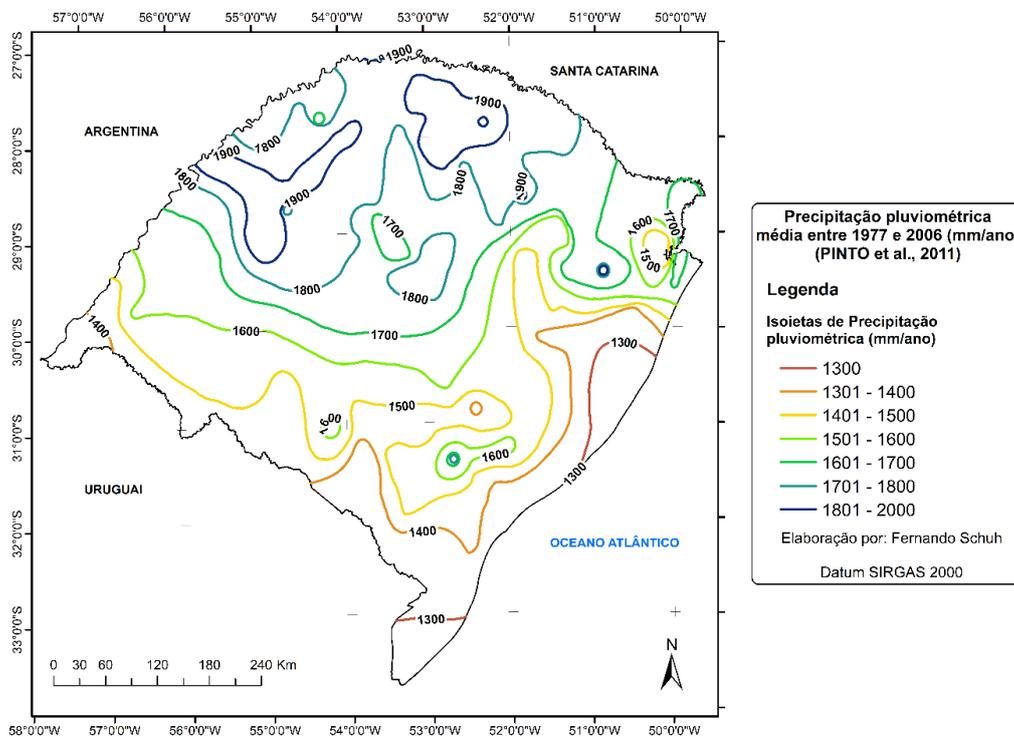


Figura 5 - Variabilidade da precipitação pluviométrica entre 1977 e 2006 (em mm/ano), para o estado do Rio Grande do Sul.

Fonte: Adaptado de Pinto et al. (2011).

Nota-se que a precipitação média anual na Planície Costeira se encontra em torno de 1300 a 1700 mm. A região do Litoral Norte (nos municípios de Arroio do Sal, Capão da Canoa, Terra de Areia, Torres e Xangri-lá) apresenta as maiores precipitações médias anuais da Planície Costeira, entre 1600 e 1700 mm. Ao sul do Litoral Norte, encontra-se uma zona de precipitação média anual em torno de 1300 mm e 1400 mm. os municípios de Osório, Tramandaí, Cidreira e Balneário Pinhal,

Em latitudes menores, observa-se precipitações médias em torno de 1400 a 1500 mm/ano, na seção oeste da Lagoa dos Patos (municípios de Arambaré e Pelotas), enquanto na faixa litorânea, em Tavares e Mostardas e no extremo sul, em Santa Vitória do Palmar e Chuí, as precipitações se encontram na média de 1300 mm/ano.

Além de médias maiores de precipitação anual na região do Litoral Norte, essa seção da Planície Costeira também apresenta uma média de dias de chuva maior do que regiões ao sul (ROSSATO, 2011). Conforme apresenta a Figura 6, no Litoral Norte pode se observar uma média entre 110 e 140 dias de chuva por ano, enquanto no Litoral Médio, a média varia entre 90 e 110 dias até o Litoral Sul, com mínimo de 80 dias de chuva ao ano.

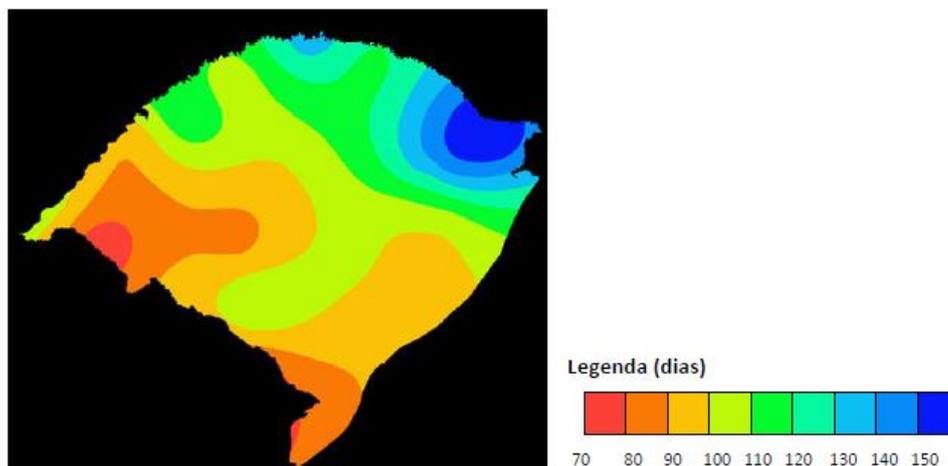


Figura 6 – Variabilidade anual do total de dias de chuva para o período de 1970-2007 no Rio Grande do Sul.

Fonte: INMET, FEPAGRO, DNM, CIM. Organização: ROSSATO (2011).

Destaca-se os elementos meteorológicos relevantes para a região, como a temperatura, precipitação, evaporação, ventos, ondas, correntes litorâneas e eventos extremos, que são responsáveis pelas características geomorfológicas das regiões costeiras, conforme já mencionado. Os ventos são citados como os principais responsáveis pela dinâmica das planícies costeiras, que movimentam as areias depositadas nas praias por saltação ou arraste (VILLWOCK; TOMAZELLI; 2005). O vento predominante é de NE, mais ativo nos meses de verão e primavera, sendo que no outono e inverno também se destaca a presença de ventos W-SW, com reflexo na dinâmica e na migração das dunas durante os anos (TOMAZELLI, 1993).

As ondas são um agente hidrodinâmico associadas aos ventos que dominam a costa oceânica do Rio Grande do Sul. As ondas de tempestade, associadas a eventos climáticos de intensa precipitação pluviométrica, elevação do nível do mar e ventos de alta velocidade, são o tipo de onda que mais causa impactos na costa, resultando em

processos erosivos intensos e amplo transporte de sedimentos na faixa costeira afetada (VILLWOCK; TOMAZELLI; 2005).

As marés se expressam em regime de micromarés (BUCHMANN et al., 2009), que apresentam baixa amplitude (em torno de 0,5 metros) e são secundárias em relação aos demais agentes meteorológicos. Regiões de marés reduzidas têm geomorfologia específica, como ilhas-barreiras alongadas, pequeno número de canais e pouco desenvolvimento de manguezais e marismas, como é o caso da Planície Costeira.

As correntes litorâneas geradas pelas ondas são expressivas para a sedimentação costeira na costa sul do Brasil. O processo de formação das correntes, que têm orientação associada ao padrão de incidência das ondas, é explicado por Villwock e Tomazelli (2005):

“Quando as ondas incidem obliquamente à linha de costa desenvolvem-se as correntes litorâneas através das quais as massas de água se deslocam paralelamente à linha de praia. As correntes litorâneas transportam os sedimentos que foram postos em movimento pela ação das ondas ao longo de amplos trechos de costa. Este movimento de areia é denominado de deriva litorânea e constitui-se num dos processos mais significativos de transporte de sedimentos ao longo das costas arenosas.”

Conforme Tomazelli e Villwock (1992), a deriva litorânea predominante na linha da costa é a de sentido final NE, que afetam as desembocaduras de rios, arroios e lagunas, sendo que a barra do arroio Chuí, a barra de Rio Grande (na Laguna dos Patos), a laguna de Tramandaí e o rio Mampituba apresentam desembocaduras no sentido NE. Os autores ressaltam que a configuração do ambiente costeiro, para além dos fenômenos meteorológicos, é bastante afetada pela atividade humana, citando-se o caso da alteração da circulação costeira e aumento de tendências erosivas através das obras da desembocadura da Lagoa de Tramandaí.

A presença dos corpos hídricos lagunares e lacustres, com evolução associada aos fenômenos descritos e às questões geológicas e geomorfológicas, será apresentada a seguir.

3.1.4. Hidrologia

Os processos geológicos na Planície Costeira, contemplando os sistemas deposicionais Laguna-Barreira, deram forma a uma série de corpos hídricos lagunares e lacustres, conectados por canais em geral de pequeno porte. Os corpos hídricos dessa região apresentam grande importância para os usos múltiplos na região, como o abastecimento público e a irrigação, além de comportarem uma relevante biodiversidade aquática.

Em sua porção norte, a planície é mais estreita e caracterizada por uma série de pequenas lagoas costeiras. Sua porção média é dominada, mais para o interior, pela Lagoa dos Patos, o maior corpo lagunar da América do Sul, ocupando uma área com cerca de 10.000 km². Na porção sul, destaca-se a presença da Lagoa Mirim, de extensão aproximada de 3.770 km², próxima à fronteira com o Uruguai, e, assim como a Lagoa dos Patos, contempla uma grande diversidade de flora e fauna (ALM, 2008)

Em termos de divisões hidrográficas, a região da planície costeira se encontra na Região Hidrográfica das Bacias Litorâneas, conforme expõe a Figura 7. Essa Região é subdividida em 5 Bacias Hidrográficas (BHs), de norte a sul: Mampituba (L – 050), Tramandaí (L – 010), Litoral Médio (L – 020), Camaquã (L – 030) e Lagoa Mirim e Canal São Gonçalo (L – 040), o que está instituído no Decreto Estadual nº 53.885, de 16 de janeiro de 2018. A Tabela 1 traz as principais informações sobre as BHs.

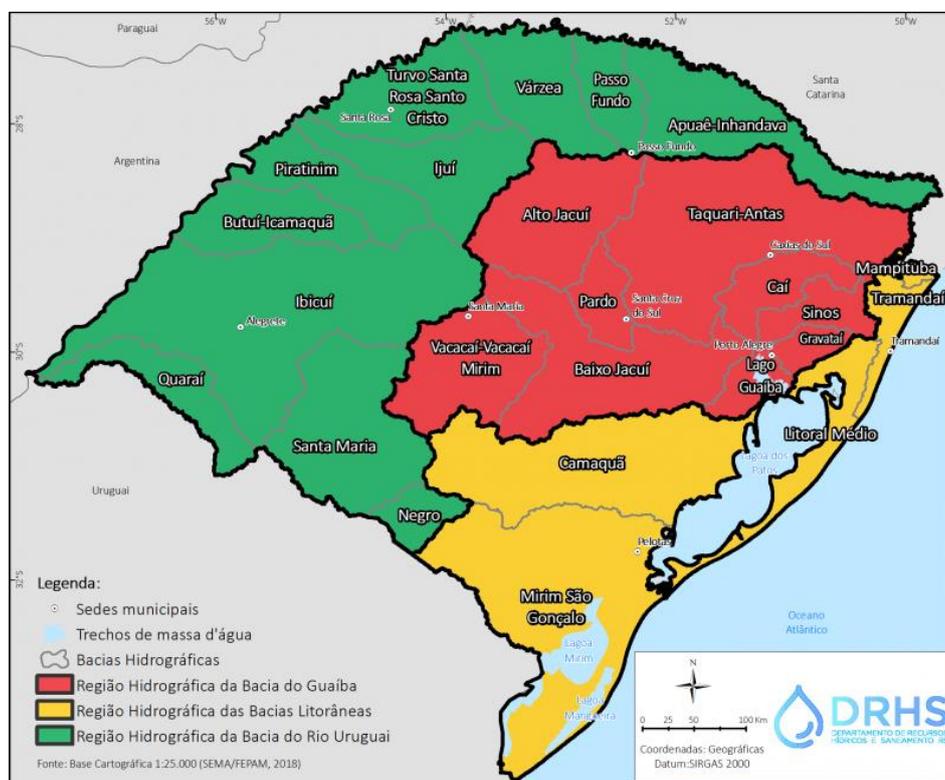


Figura 7 - Bacias Hidrográficas do Rio Grande do Sul.
Fonte: SEMA-RS (2022)

Tabela 1 – Principais informações a respeito das Bacias Hidrográficas na Região Hidrográfica das Bacias Litorâneas.

Bacia Hidrográfica	Área (km ²)	População Total Estimada (2020)	População Urbana Estimada (2020)	População Rural Estimada (2020)	Principais corpos hídricos	Situação do Plano de Recursos Hídricos
Mampituba	709	45.425	37.839	7.587	Rio Mampituba	Fase C (Plano de Ações) aprovada em 2021.
Tramandaí	2.980	261.346	239.873	21.473	Rio Três Forquilhas, Lagoa Itapeva, Rio Maquiné, Lagoa dos Quadros	Fase C (Plano de Ações) aprovada em 2021.
Litoral Médio	6.113	81.986	56.850	25.135	Lagoa dos Patos, Lagoa do Casamento, Lagoa dos Barros	O plano desta Bacia Hidrográfica ainda não foi elaborado.
Camaquã	21.657	245.646	124.740	120.907	Rio Camaquã, Lagoa dos Patos	Fase C (Plano de Ações) aprovada em 2016.

A Bacia Hidrográfica do Litoral Médio (Figura 10) encontra-se ao sul das BHs Tramandaí, Sinos e Gravataí, abrangendo uma série de pequenos corpos hídricos que contribuem para a Lagoa dos Patos, destacando-se também a Lagoa dos Barros, na região sul do Município de Osório, conectada à Lagoa dos Patos através do Canal Terezinhas. Na faixa entre a Lagoa dos Patos e o Oceano Atlântico a densidade de drenagem é reduzida e o corpo hídrico de maior relevância é a Lagoa do Peixe, no município de Tavares.

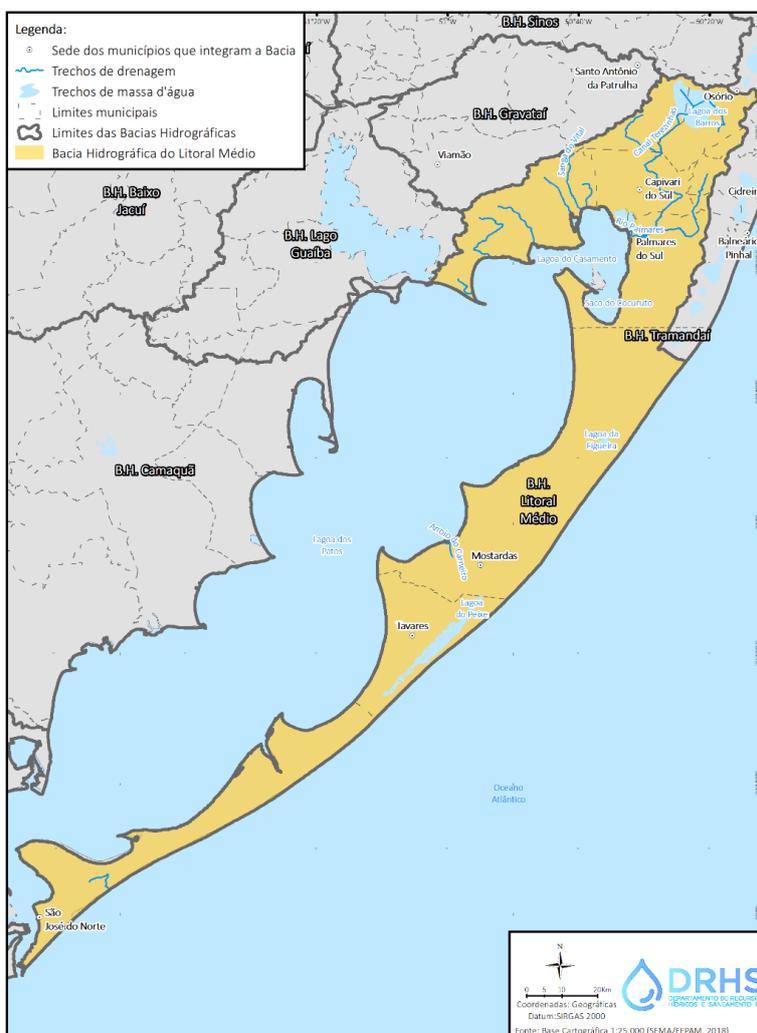


Figura 10 – Mapa da Bacia Hidrográfica do Litoral Médio – L020.

Fonte: SEMA-RS (2022).

A Bacia Hidrográfica do Rio Camaquã (Figura 11) é limitada ao norte pela Bacia Hidrográfica do Lago Guaíba e ao sul pela Bacia Hidrográfica Mirim São Gonçalo, sendo que as três BHs contribuem para a Laguna dos Patos. Diferente da Bacia do Tramandaí, predominam corpos hídricos lóticos na BH Camaquã, que se formam na região de morros e serras baixas do Escudo Sul-Rio Grandense SEMA-RS (2015).

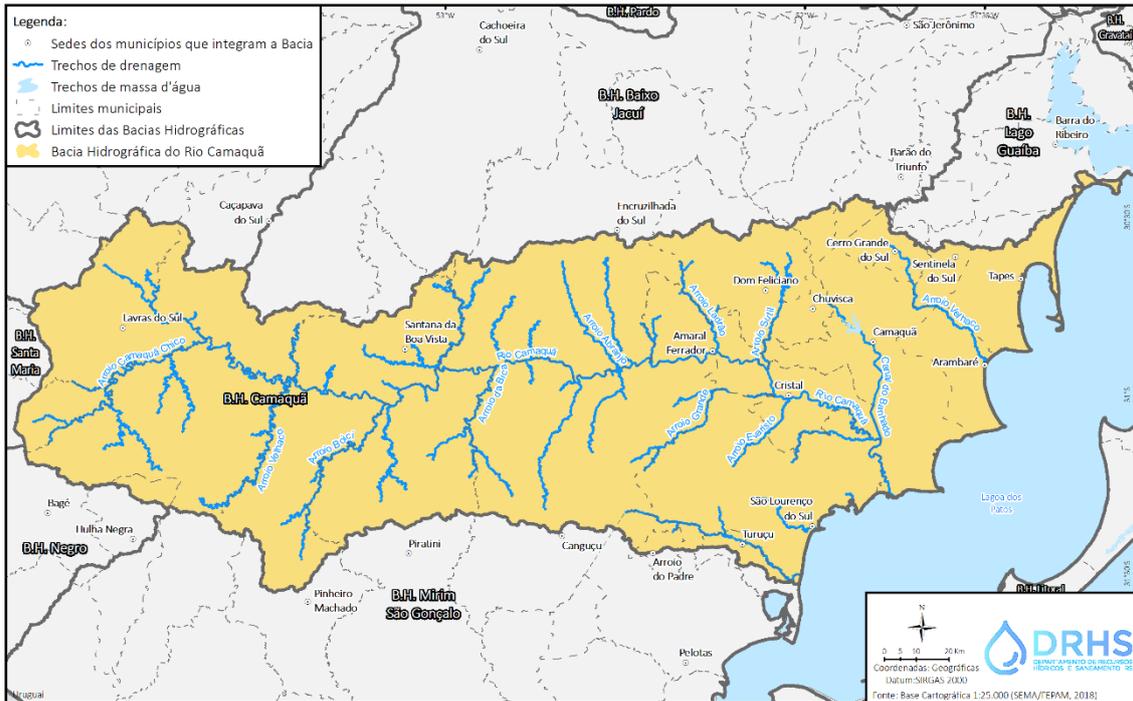


Figura 11 – Mapa da Bacia Hidrográfica do Litoral Médio – L030.

Fonte: SEMA (2022).

A Bacia Hidrográfica Mirim São Gonçalo (Figura 12), no extremo sul do RS, recebe seu nome por contemplar o Canal de São Gonçalo, que conecta a Lagoa Mirim à Lagoa dos Patos. Observa-se a presença de corpos hídricos lóticos formados em unidades da Depressão Central (destaque para o Rio Jaguarão), que escoam para o Uruguai. Também ocorrem corpos hídricos formados em unidades do Escudo Sul-Rio Grandense, que são pequenos arroios que deságuam na Lagoa Mirim e o Rio Piratini e seus afluentes, que afluem para o Canal São Gonçalo. Ao sul, nota-se a presença da Lagoa Mangueira, no município de Santa Vitória do Palmar.

3.2. Hidrogeologia da Planície Costeira do Rio Grande do Sul

Na região da Planície Costeira do Rio Grande do Sul, encontra-se o Sistema Aquífero Costeiro (SAC), que representa uma importante reserva de água subterrânea, com extensão aproximada de 620 km (de Chuí a Torres) e área aflorante de 23.500 km² (TROIAN et al., 2017). Os aquíferos do SAC são compostos pelos depósitos de sedimentos de textura arenosa, detalhados no item anterior, podendo ser intercalados por horizontes argilosos. Desse modo, predominam unidades aquíferas livres, dispostos sobre as camadas ou lentes argilosas, que podem resultar na ocorrência de unidades semiconfinadas e confinadas, em menor grau (TROIAN et al., 2020). A Hidrogeologia do Rio Grande do Sul (MACHADO; FREITAS, 2005), pode ser observada na Figura 13:

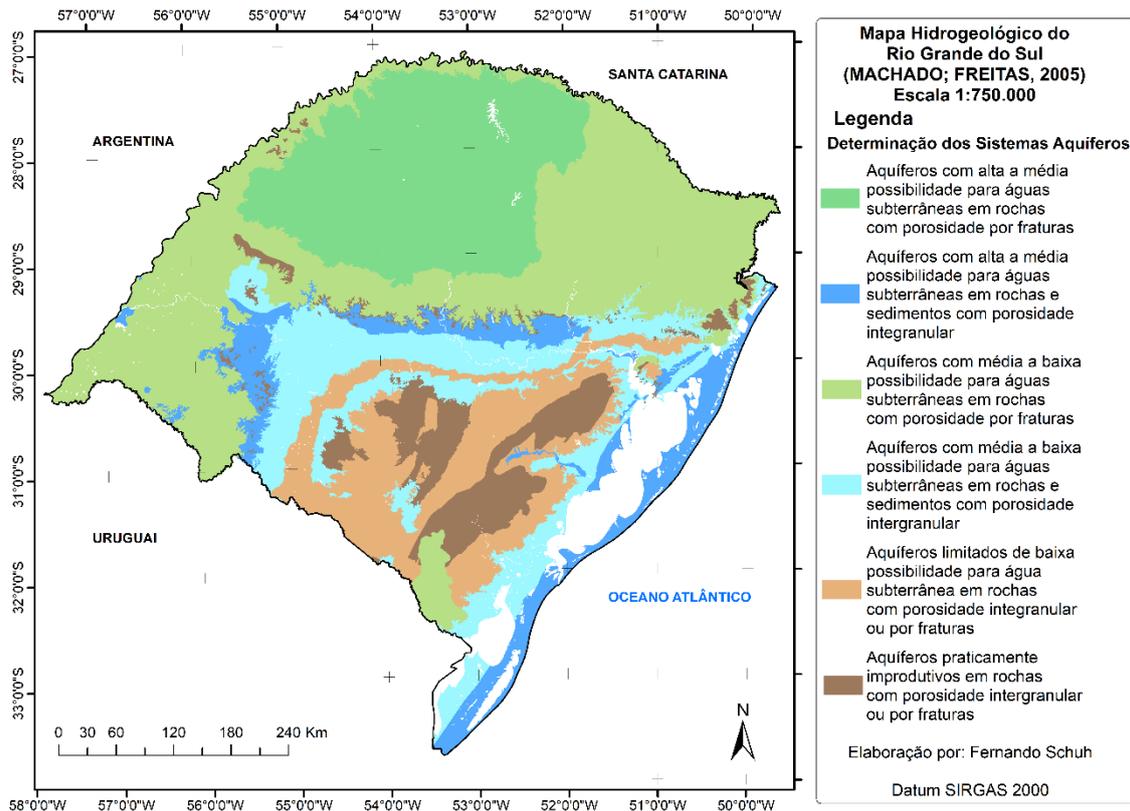


Figura 13 – Hidrogeologia do Rio Grande do Sul.

Fonte: Machado e Freitas (2005).

O Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul (MACHADO; FREITAS, 2005), de escala 1:750.000, caracteriza o SAC em dois sistemas aquíferos – Quaternário Costeiro I e II – de características gerais similares, porém com algumas distinções, como apresenta a Tabela 2. Como se discute em Troian et al. (2020), a denominação desse sistema aquífero como Quaternário Costeiro desconsidera que verticalmente o sistema pode envolver unidades de períodos geológicos anteriores (como o Terciário), que apresentam características distintas e demandam estudos mais refinados para a compreensão de sua influência na hidrogeologia regional. Por isso esse sistema deveria ser denominado somente como Costeiro, não envolvendo o tempo geológico.

Tabela 2 - Características das classes do Sistema Aquífero Quaternário Costeiro, na região da Planície Costeira.

Tipo de SA	Sistema Aquífero Quaternário Costeiro I (qc1)	Sistema Aquífero Quaternário Costeiro II (qc2)
Descrição	Compreende todos os aquíferos associados com os sedimentos da planície costeira do Estado, desenvolvendo-se desde o Chuí até Torres. Compõe-se de uma sucessão de camadas arenosas inconsolidadas de granulometria fina a média, esbranquiçadas, intercaladas com camadas siltico-arenosas e argilosas.	Compreende os aquíferos relacionados com os sedimentos da planície costeira, desenvolvendo-se desde Santa Vitória do Palmar até Torres, predominantemente na região lagunar interna e junto aos contrafortes da Serra Geral. Compõe-se de uma sucessão de areias finas inconsolidadas, esbranquiçadas e argila cinza. No topo, os primeiros metros são pelíticos, bastante cimentados.
Capacidade específica	As capacidades específicas em geral são altas (em relação aos demais sistemas aquíferos do Rio Grande do Sul), ultrapassando 4 m ³ /h/m.	As capacidades específicas variam de baixas a médias (em relação aos demais sistemas aquíferos do Rio Grande do Sul), entre 0,5 e 1,5 m ³ /h/m.
Qualidade	As salinidades são inferiores a 400 mg/L e eventualmente são encontradas águas cloretadas com maior teor salino.	Os sólidos totais dissolvidos variam entre 600 e 2000 mg/L.

Fonte: Adaptado de Machado e Freitas, 2005.

O Mapa Hidrogeológico do Brasil ao Milionésimo (DINIZ et al., 2014) de escala 1:1.000.000, também caracteriza dois sistemas aquíferos granulares na região, em delimitações similares às presentes no Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul: uma Unidade Granular de Produtividade Moderada (em região próxima ao qc1) e uma Unidade Granular de Produtividade Geralmente muito baixa porém localmente baixa (em região próxima ao qc2), descritos na Tabela 3.

Tabela 3 - Características das unidades granulares na região da Planície Costeira.

Unidade/Sistema Aquífero	Unidade Granular de Produtividade Moderada - (3) Gr	Unidade Granular de Produtividade Geralmente muito baixa, porém localmente baixa - (5) Gr
Espessura da unidade estratigráfica aflorante	Média (10 - 100 m)	Média (10 - 100 m)
Condutividade hidráulica da unidade hidroestratigráfica subjacente (m/s)	$10^{-6} < K < 10^{-5}$	$10^{-8} < K < 10^{-7}$
Vazão da unidade hidroestratigráfica subjacente (m³/h)	$25 < Q < 50$	$1 < Q < 10$
Vazão específica da unidade hidroestratigráfica aflorante (m³/h/m)	$1,0 < Q_e < 2,0$	$0,04 < Q_e < 0,4$
Trasmisividade da unidade hidroestratigráfica aflorante (m²/s)	$E-4 < T < E-3$	$E-6 < T < E-5$

Fonte: Adaptado de Diniz et al. (2014).

Desse modo, pode-se esperar uma variabilidade nas características dos aquíferos do SAC, com variações laterais e verticais, de acordo com as diferentes condições de deposição dos sedimentos do grupo Laguna-Barreira, que em geral apresentam considerável potencial aquífero (LISBOA et al., 2004). Conforme SEMA-RS (2019), a recarga nesse Sistema Aquífero, em geral, ocorre diretamente a partir da superfície devido à elevada permeabilidade do solo e dos depósitos sedimentares, além das baixas declividades e do papel reduzido da drenagem superficial na região.

Conforme informações do relatório de Diagnóstico da Bacia Hidrográfica do Rio Mampituba (SEMA-RS, 2020) a seção da bacia onde se encontra o SAC contempla poços

em geral com produtividade moderada, que podem alcançar produtividade muito alta. O relatório também descreve que o pH e o cloreto na água subterrânea geralmente estão presentes em concentrações adequadas para o consumo humano, porém pode haver problemas em relação à concentração de ferro na água e de gás sulfídrico nos poços, gerando mau odor.

No relatório de Diagnóstico da Bacia Hidrográfica do Rio Tramandaí (SEMA-RS, 2019), descreve-se a presença do SAC na região costeira, com levantamentos que resultam em valores de infiltração na ordem de 21 mm/h, transmissividade de 1,86 m²/h, coeficiente de armazenamento de 10⁻³ e condutividade hidráulica em torno de 8.10⁻³ cm/s. Também se aponta que as captações têm profundidade média de 22,01 m, vazões entre 1,9 a 54,5 m³/h e vazões específicas entre 0,11 a 4,6 m³/h/m (média de 2,5 m³/h/m).

O Relatório de Diagnóstico da Bacia Hidrográfica do Rio Camaquã (SEMA-RS, 2015) descreve a seção do SAC inserida na BH, que se encontra na seção oeste da bacia, na planície lagunar interna da Lagoa dos Patos, de modo que se encontra em geral sedimentos finos e com maior teor de argila. O estudo apresenta que as vazões observadas em poços variam entre 0,8 e 60 m³/h (encontrada em Cristal com poço de 41 metros de profundidade) e capacidades específicas entre 0,02 m³/h/m e 8,65 m³/h/m.

Na região da Bacia Hidrográfica Mirim São Gonçalo, o trabalho de Nascimento (2013) investigou uma unidade aquífera holocênica do SAC na região do Balneário Cassino (ao sul da sede urbana de Rio Grande). Através de estudos de campo, com instalação de poços de monitoramento e realização de ensaios de bombeamento, apontou-se uma transmissividade de 7,58 m²/h, coeficiente de armazenamento de 6,51.10⁻⁴ e coeficiente de permeabilidade de 9,2 m/d, com uma tendência de rápida recuperação do aquífero. O estudo identificou uma espessura em torno de 20 metros para a unidade aquífera na região, com fluxo preliminar das águas subterrâneas no sentido continente-oceano.

Sobre a contaminação dos aquíferos que compõem o SAC, o estudo de Reginato et al. (2008), aponta que sua ocorrência pode se dar através da grande quantidade de poços instalados na região, a partir da avaliação de poços nos municípios de Santa Vitória do Palmar, São José do Norte, Tavares e Mostardas. Os autores apontam que a contaminação tem maior potencial de ocorrência em: *“poços do tipo trado e ponteira (...) de pequena profundidade, localizados próximo a fontes de contaminação, o que faz com que a qualidade da água captada por esses pontos seja seriamente comprometida, principalmente, no que se refere a contaminação bacteriológica.”* A variedade de tipos de poços, associados à ausência de cadastramento e regularização das captações, dificulta a estimativa da vazão atualmente extraída do SAC.

O estudo de Troian et al. (2020) apresenta a caracterização do Sistema Aquífero Costeiro na região do Litoral Norte do Rio Grande do Sul, tendo delimitado 4 unidades hidroestratigráficas através de poços, sondagens e métodos geofísicos, visíveis na Figura 14.

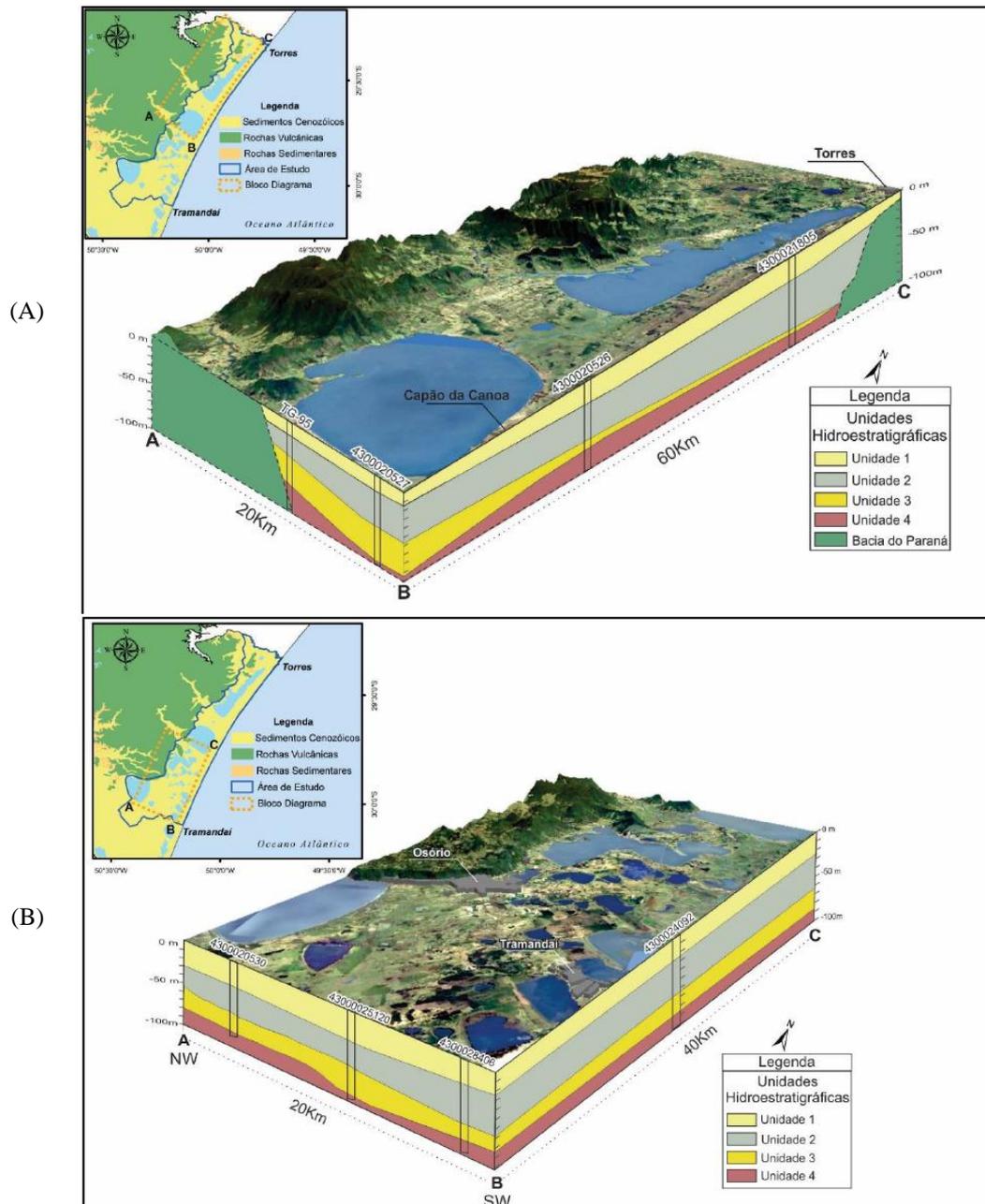


Figura 14 – Unidades Hidroestratigráficas do Sistema Aquífero Costeiro, no Litoral Norte do Rio Grande do Sul. Legenda: (A) Porção norte do Litoral Norte. (B) Porção sul do Litoral Norte.

Fonte: Troian et al. (2020).

A Tabela 4 descreve sinteticamente as unidades hidroestratigráficas caracterizadas em Troian et al. (2020).

Tabela 4 - Características das unidades hidroestratigráficas da Planície Costeira na região do Litoral Norte.

Unidade hidroestratigráfica	Descrição (sedimentos inconsolidados e profundidade)	Resistividade elétrica mediana (Ohm/m)	Concentração de sais totais dissolvidos mediana (ppm)	Porosidade total mediana (%)	Porosidade efetiva mediana (%)
Unidade 1	Relacionada aos sistemas deposicionais laguna-barreira e marinhos, composta por areias médias a finas no topo e areias mais finas, com maior teor de argila na base. Encontra-se em distribuição uniforme com espessuras entre 15 e 30 metros	50	325	39%	35%
Unidade 2	Também é relacionada aos sistemas deposicionais laguna-barreira e marinhos, com maior presença de sedimentos argilosos acompanhados de camadas de areias finas a muito finas. Sua espessura atinge valores máximos de 45m na parte leste, e diminui no sentido oeste.	10	900	40%	30%
Unidade 3	É uma unidade composta predominantemente de sedimentos arenosos de granulometria média a grossa, com espessuras maiores na porção sul e diminuição gradativa em direção a norte, variando entre 5 a 40 metros.	35	600	40%	30%
Unidade 4	Caracterizada em profundidades de até 100 metros, apresenta camadas de sedimentos em maioria argilosos e foi considerado no estudo como o contato inferior do SAC.	3	2000	39%	20%

Fonte: Adaptado de Troian et al. (2020).

Desse modo, observa-se uma diversidade hidrogeológica no Litoral Norte. O estudo analisado mostra uma distinção entre as unidades hidroestratigráficas 1 e 3, com sedimentos arenosos e maiores resistividades elétricas e menores concentrações de sais

totais dissolvidos em relação às demais unidades (2 e 4), onde os sedimentos argilosos são mais representativos.

A unidade hidroestratigráfica 3 abrange a camada conhecida como “Sal Grosso”, devido aos sedimentos arenosos de maior granulometria, que pode ocorrer em profundidades próximas a 70 metros e é favorável para captações, com poços atingindo 300 m³/h (perfuração da CORSAN em Tramandaí), conforme traz Collischonn (2018). A autora descreve, a partir da análise de perfis litológicos e métodos geofísicos em Osório, Tramandaí e Imbé, que a formação dessa camada está associada a um sistema aluvial (paleocanal) de orientação perpendicular à linha costeira, entre os municípios de Osório e Tramandaí.

Sobre o SAC no Litoral Norte, também se encontra o estudo de Caicedo (1998) com medições em piezômetros próximos à Lagoa Itapeva, apontou a presença de aquíferos freáticos com menores níveis estáticos na zona correspondente à faixa de domínio da estrada do mar (RS-389), com a ocorrência de fluxos subterrâneos em direção à lagoa, em menor grau e ao mar, em maior grau. Em pontos próximos à Lagoa, onde se encontram sedimentos com maior teor de argila, o estudo observou valores de recarga muito baixos e alta condutividade hidráulica horizontal, enquanto próximo à RS-389, com maior presença de areias eólicas e praias, estimou-se a ocorrência de altos valores de recarga e condutividade hidráulica horizontal reduzida.

3.2.1. Relação entre Água Subterrânea e Água Superficial na Planície Costeira

A advecção de águas subterrâneas das unidades aquíferas para corpos lagunares, em interação com águas oceânicas, consiste em um fenômeno que é chamado de Descarga de Água Subterrânea, DAS (adaptado do inglês *Submarine Groundwater Discharge - SGD*). Conforme Niencheski et al. (2007) esse fenômeno é observado nas lagoas costeiras do Rio Grande do Sul, e pode contribuir para o volume das lagoas, assim como ser responsável pelo transporte de nutrientes importantes para a manutenção da biota aquática.

A avaliação desse fenômeno em quatro lagoas do Litoral Norte do RS, através do uso de *seepage meters*, apontou uma contribuição entre 13% (Lagoa dos Quadros) a 27% (Lagoa dos Barros) para o aporte de águas anual nos corpos lagunares (ROCHA; ANDRADE; NIENCHESKI, 2015). Esse estudo ressalta a expressividade dessa interação das lagoas costeiras para as unidades dos Sistemas Aquíferos Costeiro e Serra Geral, observando-se maiores contribuições para as lagoas nas margens a oeste (próximas à elevação da Serra Geral) do que nas margens a leste (onde podem se observar relações transgressivas e regressivas com o oceano).

Também pode se observar o fenômeno de recarga dos aquíferos a partir de fluxos das lagoas costeiras, como se observou na Lagoa dos Patos (VON-AHN, 2015), para poços no litoral do município de Rio Grande. Aponta-se que a relação de recarga ou descarga das águas subterrâneas pode variar conforme a localização dos poços, sendo observado até casos de equilíbrio dinâmico entre os dois sistemas em relação à variação frente à precipitação, nas Lagoas Mangueira e Mirim em relação a poços no SAC (CAITANO; ANDRADE, 2020)

Desse modo, verifica-se que pode existir a interrelação entre o Sistema Aquífero Costeiro e os corpos superficiais, de maneira geral, ou as lagoas costeiras, de maneira específica, como retratado nos estudos apresentados. Essa relação pode variar conforme a localização dos poços e a profundidade das camadas filtrantes, devendo ser considerada com atenção na interpretação da variação dos níveis em poços próximos às lagoas costeiras.

3.3. Variações de nível de Água Subterrânea

O nível da água é uma informação relevante sobre os sistemas aquíferos, que é obtida através de medições em poços, e está relacionada com a quantidade de água armazenada no aquífero (HEALY, 2010). A medição de nível da água representa a distância entre a superfície e o topo da coluna da água encontrada no poço de medição em condições estáticas, sem bombeamento (TAYLOR; ALLEY, 2001).

De acordo com a condição do aquífero – livre, semi-confinado ou confinado – como são os aquíferos compostos por sedimentos inconsolidados do Sistema Aquífero Costeiro (TROIAN et al., 2020), o nível da água pode representar diferentes posições em relação ao aquífero. A Figura 15 ilustra poços com filtros em diferentes camadas aquíferas, com diferentes níveis da água.

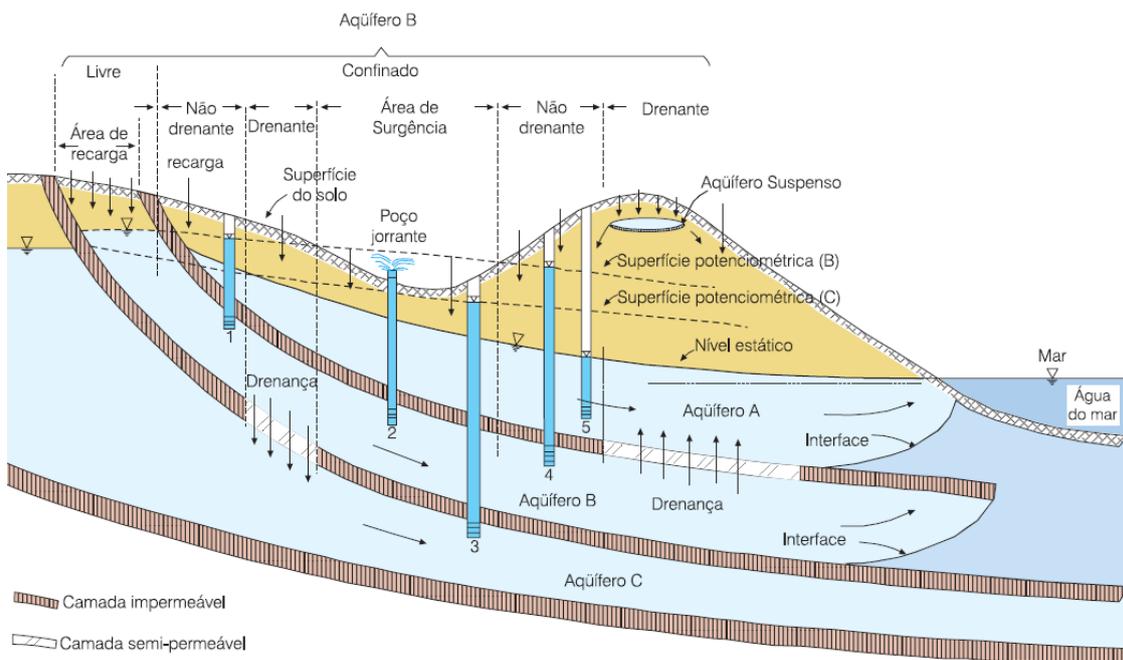


Figura 15 – Representação esquemática dos diferentes tipos de aquíferos, de acordo com o sistema de pressão das águas e com a natureza das camadas que os delimitam no topo e na base.

Fonte: Feitosa (2008).

Em medições de camada aquífera livre (como é o Poço 5 na Figura 15), o nível da água representa a distância entre uma altitude de referência na superfície e o topo da zona saturada. Já em condições de camadas aquíferas sob camadas confinantes (como se encontram as camadas filtrantes dos poços 1, 2, 3 e 4 da Figura 15), o nível d'água representa a altura da superfície potenciométrica, estando acima do topo da camada aquífera livre, devido ao diferencial de pressão disponível a partir do confinamento da água subterrânea.

O monitoramento da água subterrânea e dos níveis de água no Sistema Aquífero Costeiro do Rio Grande do Sul é feito através da Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas (RIMAS) do Serviço Geológico do Brasil/Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (SGB/CPRM). A RIMAS disponibiliza séries históricas consistidas de dados de nível d'água para aproximadamente 400 poços de monitoramento em seu portal (<http://rimasweb.cprm.gov.br/>) e prioriza o monitoramento de aquíferos sedimentares, com importância socioeconômica da água e com uso para abastecimento público, como é o caso do Sistema Aquífero Costeiro (SEMA-RS, 2019).

Os dados de nível nos poços de monitoramento da RIMAS são medidos através de sensores de nível com transdutores de pressão, que relacionam o nível a um diferencial de pressão medido, equipados de um registrador de dados (*datalogger*) que armazena os registros de nível em frequência horária. Posteriormente, os dados são coletados e consistidos pela equipe da CPRM e assim disponibilizados em frequência diária na plataforma “Web RIMAS”.

Na PCRS, a RIMAS conta com 14 poços de monitoramento, detalhados na Tabela 5 e visíveis na Figura 17. Conforme (TROIAN et al., 2015) a localização dos poços de monitoramento instalados levou em consideração as áreas de recarga do SAC e a ausência de interferência pelo bombeamento em poços próximos. Os autores apontam que o monitoramento dos níveis e da qualidade da água no SAC se justifica através da elevada vulnerabilidade à contaminação e pela grande quantidade de poços tipo ponteira instalados na região, o que se corrobora em Reginato et al. (2008).

Tabela 5 – Lista de poços de monitoramento da RIMAS na Planície Costeira do Rio Grande do Sul, com município, local, latitude e longitude.

Cód. Poço	Município	Local	Lat.	Long.
4300009528	Mostardas	RUA BENTO GONCALVES	-31,10	-50,91
4300020526 ³	Arroio do Sal	PRAIA DE CURUMIM ETA CORSAN	-29,62	-49,95
4300020527	Capão da Canoa	ETE São Jorge	-29,75	-50,03
4300020528	Capão da Canoa	ETA II	-29,75	-50,05
4300020529	Xangri-lá	ETE Xangri-Lá	-29,81	-50,06
4300020530	Osório	ETE OSÓRIO	-29,95	-50,33
4300020531	Tavares	PATIO DO POÇO DA CORSAN	-31,29	-51,09
4300020566	Terra de Areia	BARRA DO GUERINO	-29,60	-49,99
4300021248	Balneário Pinhal	AVENIDA CASTELO BRANCO 715 - PINHAL	-30,25	-50,24
4300021782	Rio Grande	PAULO QUARESMA	-32,12	-52,29
4300021786	Rio Grande	POCO 1 - PAULO ABREU	-32,19	-52,21
4300022136	Santa Vitória do Palmar	Sítio Sambaqui acesso ao Ermenegildo	-33,60	-53,34
4300022137	Arambaré	Parque Municipal de Eventos	-30,93	-51,50
4300022639	Rio Grande	Reserva do Taim	-32,55	-52,51

Fonte: Elaboração própria.

³ As coordenadas do Poço RIMAS 4300020526 foram retificadas em relação às informações disponíveis no portal RIMAS e fornecidas de maneira correta pela Geóloga da CPRM Isadora Aumond Kuhn em contato com o Professor Pedro Roehe Reginato em 06/06/2022.

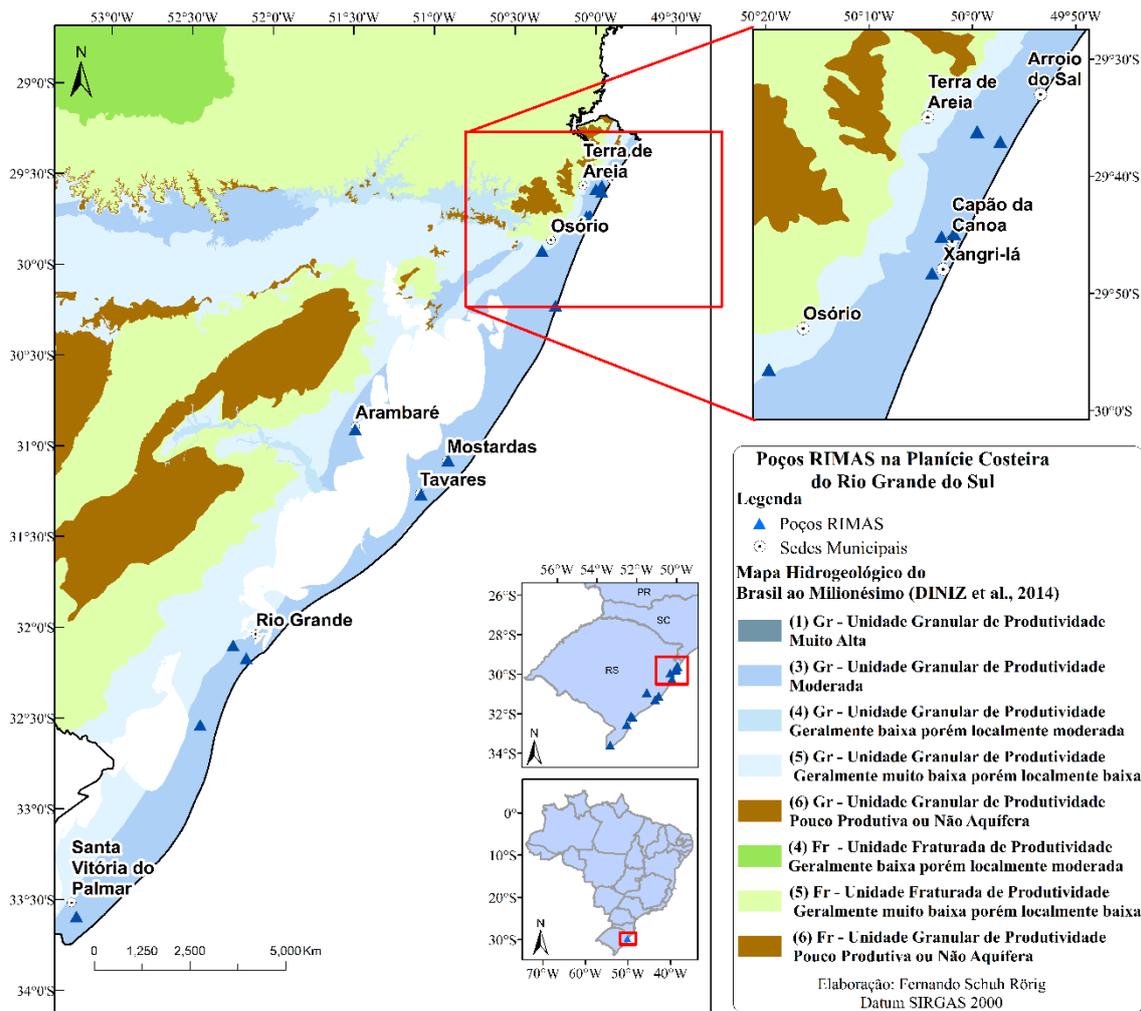


Figura 17 – Localização dos Poços RIMAS na Planície Costeira do Rio Grande do Sul.

Fonte: Elaboração própria.

É importante considerar que as flutuações nos dados de nível podem estar relacionadas a diversos fenômenos não necessariamente associados aos componentes do ciclo hidrológico, como as variações de temperatura e pressão, bombeamentos próximos aos poços, aprisionamento de ar e mudanças de marés (HEALY; COOK, 2002). Levar em consideração existência desses fenômenos no processamento e interpretação das variações de nível é importante para a avaliação da recarga através desses dados, como será discutido no item 3.4.1.

3.3.1. Métodos estatísticos para avaliação das Variações de nível de Água

Uma das ferramentas importantes para avaliar o comportamento dos dados de nível é a utilização de métodos estatísticos, como a autocorrelação e a correlação cruzada. A autocorrelação quantifica a dependência linear de valores sucessivos ao longo de um período do tempo arbitrado (LAROCQUE et al., 1998) e investiga o “efeito memória” (o tempo necessário para um sistema “esquecer” suas condições iniciais) (MANGIN, 1984). A expressão para a função de autocorrelação é a seguinte:

$$C(k) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x}) * (x_{t+k} - \bar{x}), k \geq 0 \quad \text{Equação 1}$$

$$\gamma(k) = \frac{C(k)}{C(0)} \quad \text{Equação 2}$$

Onde $C(k)$ é o correlograma, n é o tamanho da série temporal, k é o tempo de atraso (*lag*), x_t é o valor da variável analisada no tempo t , \bar{x} é o valor médio da série temporal e $\gamma(k)$ = função ou coeficiente de autocorrelação. A Figura 18 contempla um exemplo de gráfico de autocorrelação, com os valores do coeficiente de autocorrelação (eixo y) calculados para diversos tempos de atraso, em dias (eixo x).

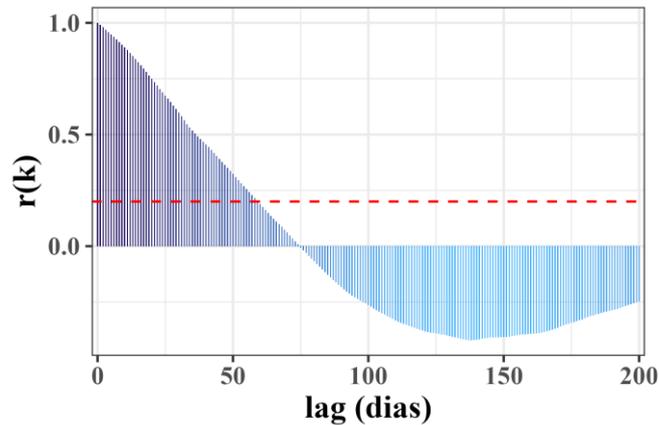


Figura 18 – Exemplo de gráfico de autocorrelação.
Fonte: elaboração própria.

O gráfico com os resultados de autocorrelação permite observar o tempo de atraso máximo em que os valores do coeficiente permanecem relevantes, acima de uma faixa predefinida, usualmente 0,2 (CAI; OFTERDINGER, 2016). Um declínio lento da função de autocorrelação até valores altos de tempos de atraso indica um maior efeito memória, o que pode estar associado às características de armazenamento do solo e da matriz que compõe o sistema aquífero em análise (BORTOLIN, 2018).

A função de correlação cruzada é utilizada para avaliar a relação entre duas séries temporais, uma de entrada (*input*) e uma de saída (*output*) ao longo do tempo, permitindo observar o relacionamento entre as duas variáveis (CAI; OFTERDINGER, 2016). Conforme é visível na Figura 19, o método pode resultar em um valor absoluto máximo para um tempo de atraso positivo do *output* em relação ao *input*, quando o *input* precede o *output*, indicando o tempo de resposta médio entre as duas variáveis.

Para a interpretação de questões hidrogeológicas, a correlação cruzada pode ser aplicada considerando os dados de precipitação pluviométrica como *inputs* e os dados de nível da água como *outputs*. Assim, busca-se obter um tempo de resposta médio para o nível d'água medido nos poços em relação à ocorrência de eventos de precipitação, como foi realizado no trabalho de Bortolin (2018). Uma vez que se espera observar dados de nível menores relacionados a maiores medições de precipitação, atenta-se para os valores negativos da função de correlação cruzada, que é detalhada abaixo:

$$C_{xy}(k) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x}) * (y_{t+k} - \bar{y}) \quad \text{Equação 3}$$

$$\gamma_{xy}(k) = \frac{C_{xy}(k)}{\sigma_x \sigma_y} \quad \text{Equação 4}$$

Onde C_{xy} é o correlograma cruzado, n é o tamanho da série temporal, k é o tempo de atraso entre x e y (*lag*), x_t e y_t são os valores das variáveis de entrada (precipitação) e

saída (nível da água), respectivamente, no tempo t , \bar{x} e \bar{y} são os valores médios da série temporal de entrada e saída, respectivamente, γ_{xy} é a função ou coeficiente de correlação cruzada e σ_x e σ_y são os desvios-padrão das séries temporal de entrada e saída, respectivamente. Conforme Lee et al. (2006), para serem considerados significativos em um intervalo de confiança de 95%, os valores absolutos da função de correlação cruzada devem ser maiores que o erro estimado por $\sim 2/N^{0.5}$, para N igual ao tamanho da série.

A Figura 19 apresenta um exemplo de gráfico que relaciona a função de correlação cruzada (eixo y) ao longo dos tempos de atraso, em dias (eixo x). Nesse exemplo, observa-se que o maior valor absoluto para a função de correlação cruzada (próximo de -0,4) ocorre para o tempo de atraso zero, indicando uma resposta próxima a instantânea do nível em relação à precipitação, que pode estar associado a aquíferos livres, com maior permeabilidade.

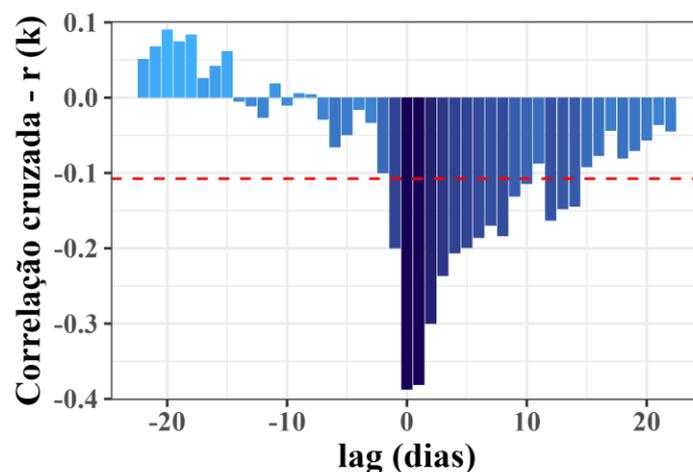


Figura 19– Exemplo de gráfico de correlação cruzada para dados de precipitação e nível de água.
 Fonte: elaboração própria.

O estudo da correlação cruzada também é feito em seções temporais das séries de dados, de maneira a avaliar a variabilidade dos tempos de resposta estimados e investigar efeitos sazonais, como realizado em Cai e Offerdinger (2018). Os autores partiram de uma aplicação proposta em Delbart et al. (2014) que dividiu as séries de dados de nível e precipitação em intervalos de 90 dias, sobrepostos em 45 dias e aplicou a função de correlação cruzada para cada uma dessas divisões, de maneira a observar a variabilidade da resposta, nomeando essa adaptação do método de correlação cruzada *sliding windows*. A Figura 20 ilustra o princípio dessa aplicação.

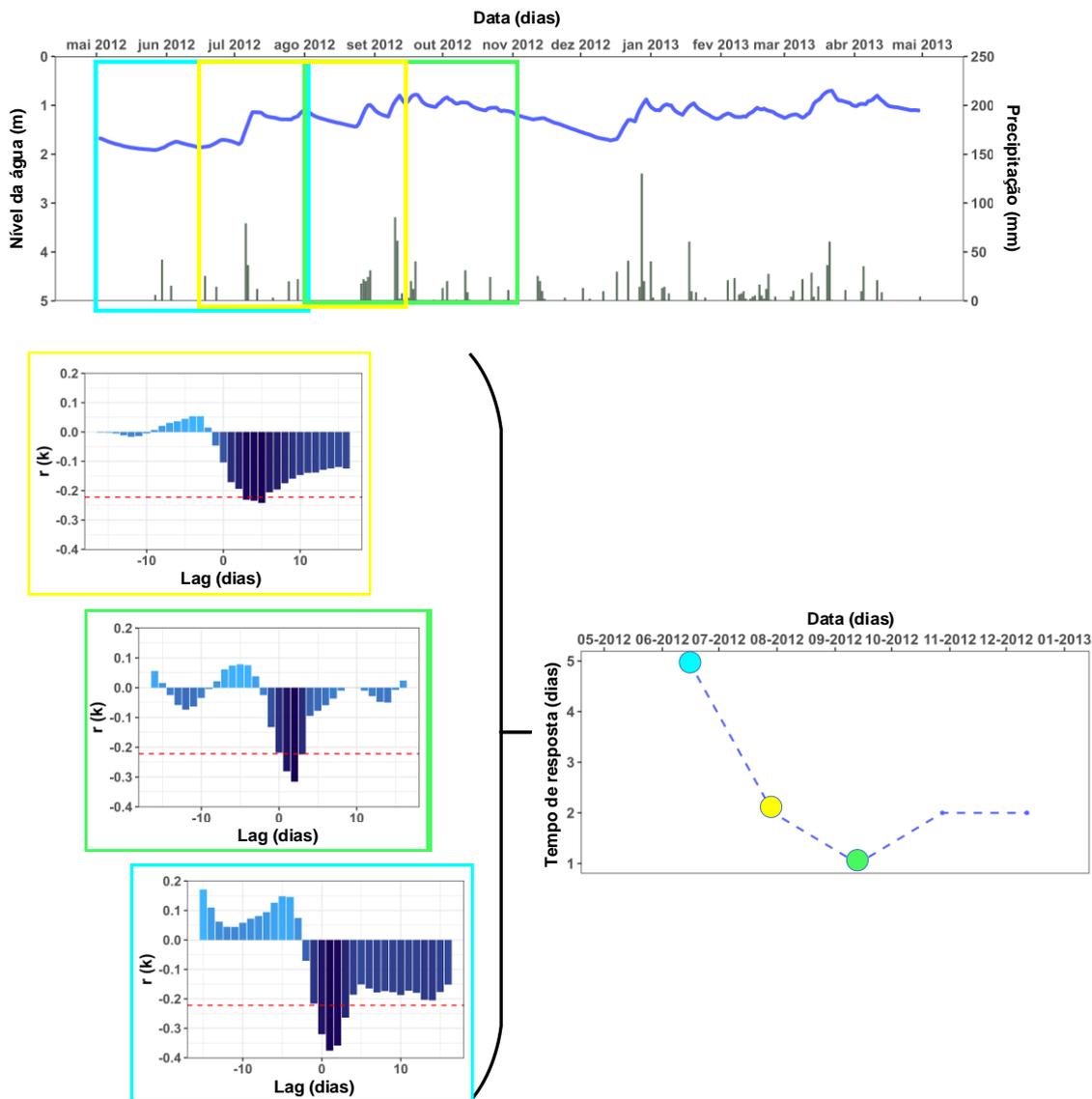


Figura 20 – Representação da aplicação do Correlação Cruzada *sliding windows*.

Fonte: Adaptado de Delbart et al. (2014).

Observa-se que, para cada um dos intervalos de 90 dias, os coeficientes de correlação cruzada são calculados e a *lag* correspondente ao dia de maior relação entre nível e precipitação (tempo de resposta) é selecionado, o que permite comparar a variação desses valores ao longo do tempo. A interpretação das variações dos níveis de água é relevante para a melhor compreensão da dinâmica dos aquíferos e pode servir como complemento para a avaliação da recarga subterrânea, apresentada a seguir.

3.4. Avaliação da Recarga da Água Subterrânea

A recarga subterrânea pode ser definida como “a entrada de água disponível na zona saturada, juntamente com o fluxo da água ao longo do nível freático no interior da zona saturada” (FREEZE; CHERRY, 1979). Há diversos fatores que podem influenciar o ciclo hidrológico em geral e a recarga em particular, como o clima, a topografia, os solos, a geologia, o uso do solo, a relação do aquífero com corpos hídricos superficiais, entre outros (HEALY, 2010). A Figura 21 traz a representação sistemática do ciclo hidrológico, com destaque para a recarga subterrânea.

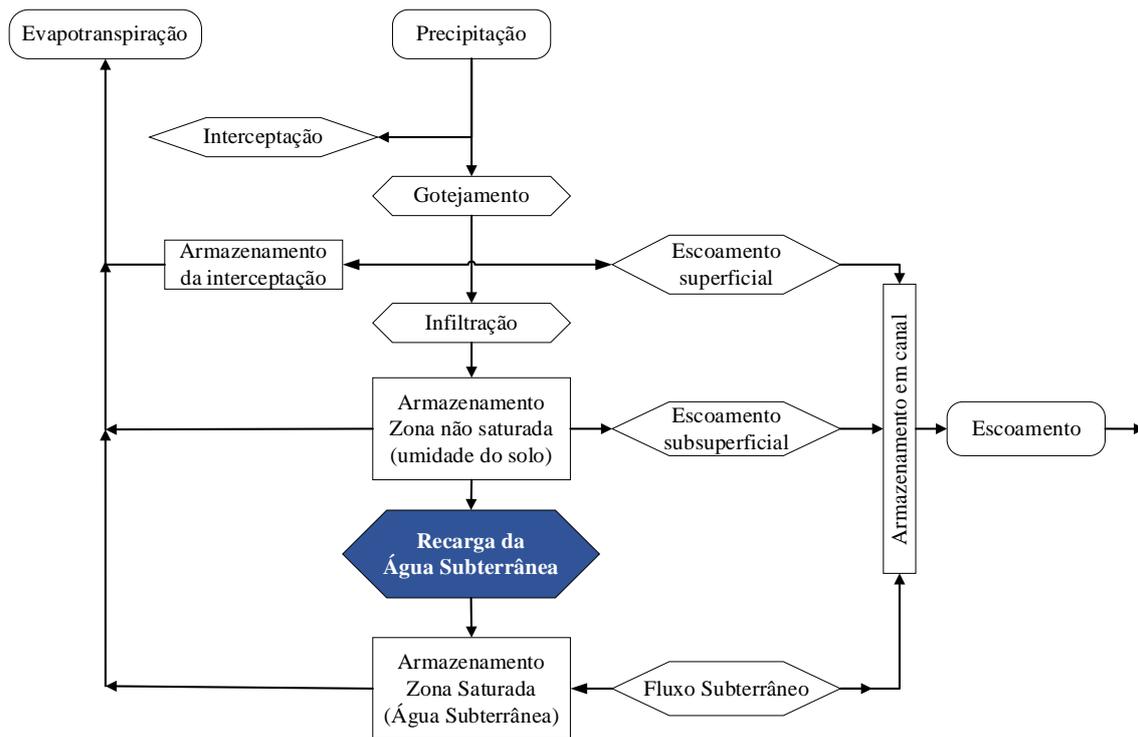


Figura 21 -Representação sistemática do ciclo hidrológico.

Fonte: Adaptado de Freeze e Cherry (1979).

A partir desse fluxo, é importante observar que a recarga será influenciada pelas condições de entrada de água no sistema aquífero, como a intensidade e frequência das precipitações e as condições do solo para a infiltração. O armazenamento de água subterrânea recebe bastante influência do fluxo subterrâneo com os demais corpos hídricos do sistema, como rios, lagos e outros sistemas aquíferos, uma relação que pode ser efluente (saída de água), influente (entrada de água) ou de desconexão hidráulica (BORTOLIN, 2018).

Assim, podem ser observados dois tipos de recarga associados ao ciclo hidrológico: a recarga direta, que tem origem na precipitação, e a recarga indireta, associada à conectividade com cursos da água superficiais ou à uma concentração de água na superfície (LERNER, 1990; MAZIERO; WENDLAND, 2005). Essa diferenciação da recarga foi detalhada em três categorias, de acordo com a distribuição espacial (DE VRIES; SIMMERS, 2002):

- Recarga Direta: água adicionada ao armazenamento na zona saturada através da percolação vertical direta no ponto de recepção da precipitação;
- Recarga Indireta: percolação até a zona saturada através de rios e depressões de superfícies topográficas (como os corpos lacustres e lagunares);
- Recarga Localizada: uma forma de recarga intermediária, através de fluxos laterais curtos até a infiltração (em arroios, riachos e pequenas depressões)

É importante considerar que em zonas urbanas agrega-se uma série de fatores que podem interferir na quantificação e interpretação da recarga. Pode-se citar a impermeabilização do solo, os vazamentos de água em redes enterradas de água e esgoto, a irrigação de jardins, entre outros (WAHNFRIED; HIRATA, 2005). No meio rural, a

presença de agricultura irrigada também pode contribuir para a infiltração e recarga de aquíferos, atentando-se para o transporte conjunto de contaminantes (como agrotóxicos) e a lixiviação de componentes de solo para o aquífero (BLACKBURN et al., 2002)

Obter valores de recarga, que possam representar a entrada de água no sistema aquífero (usualmente em mm/ano, mm/mês, mm/dia etc.), é importante para a gestão dos recursos hídricos, já que traz noção sobre a ordem de grandeza do montante de água subterrânea que pode ser explorada. Porém, o cálculo da recarga é em geral difícil, frente a complexidade geológica e a dificuldade de compreensão da variação espacial das propriedades dos sistemas aquíferos (FEITOSA, 2008), além de possíveis variações temporais, de modo sistemático e aleatório (HEALY, 2010)

Assim, ao invés de calcular um número exato, o correto é realizar a estimativa da taxa de recarga, lançando mão de um ou mais métodos, que possam ser comparados para representar faixas de valores possíveis para a recarga. Existem diversos métodos para a estimativa de recarga, que podem utilizar dados de nível (item 3.4.1), partir da equação do balanço hídrico (3.4.2), utilizar dados de vazão (item 3.4.2), entre outros (item 3.4.4).

No Sistema Aquífero Costeiro, pode-se considerar que a recarga para esse sistema ocorre, para as camadas livres, diretamente a partir da superfície, associado com a alta permeabilidade e a praticamente inexistente drenagem superficial (SEMA-RS, 2019). O estudo de (TROIAN et al., 2017) avaliou a recarga em 5 poços da RIMAS no SAC, na região do Litoral Norte do Rio Grande do Sul, aplicando o método VNA (abordagem gráfica) para médias mensais dos dados de nível da água, que estimou razões de recarga/precipitação entre 21% e 40% e taxas de recarga entre 32 e 60 mm.mês⁻¹, para uma porosidade específica igual a 30%.

O estudo para a Bacia Hidrográfica do Rio Tramandaí (SEMA-RS, 2019) adotou, com base em Troian et al. (2017), uma recarga de 30% da precipitação acumulada anual para o SAC, conforme descrito acima, que foi aplicada à área de unidades aquíferas costeiras na BH (1.227,19 km²), para estimar o volume de reserva reguladora (ou renovável). A avaliação resultou em uma reserva reguladora de 0,6682 km³/ano, que representa 76,4% dos volumes totais da bacia, que também conta com unidades dos Sistemas Aquíferos Serra Geral e Guarani.

3.4.1. Variação dos Níveis de Água (VNA)

Um método adequado para a estimativa de recarga no meio saturado, que se baseia em variações de nível da água medidos nos poços de monitoramento, é chamado de Variação dos Níveis de Água (VNA) ou *Water Table Fluctuation* (WTF). Sua aplicação parte da avaliação do balanço hídrico, para uma seção do sistema aquífero (WALTON; SCHICHT, 1961):

$$\Delta S^{gw} = R - Q^{bf} - ET^{gw} - Q_{off}^{gw} + Q_{on}^{gw} \quad \text{Equação 5}$$

Onde ΔS^{gw} é a variação no armazenamento na zona saturada, R é a recarga, Q^{bf} é o escoamento de base, ET^{gw} é a evapotranspiração da água subterrânea e Q_{off}^{gw} e Q_{on}^{gw} são os escoamentos subsuperficiais entrando ou saindo do sistema. Ou seja, entende-se que a variação no armazenamento na zona saturada depende da recarga e da entrada de água

pelo escoamento subsuperficial, menos o escoamento de base, a evapotranspiração da água subterrânea e o fluxo subsuperficial para fora do sistema, incluindo as captações

Conforme Healy (2010), a aplicação do VNA se baseia nas premissas de que os aumentos em nível da água possam ser atribuídos à recarga do aquífero (e no momento da recarga os demais componentes do balanço hídrico possam ser considerados nulos) e que a água disponível em uma coluna d'água seja equivalente ao rendimento específico multiplicado pela altura da coluna. A partir dessas bases, pode-se estimar a recarga como:

$$\Delta S^{gw} = R = S_y * \frac{dH}{dt} \cong S_y * \frac{\Delta H}{\Delta t} \quad \text{Equação 6}$$

Onde S_y é o rendimento específico e ΔH é a variação na altura da coluna de água ao longo de um intervalo de tempo Δt . A estimativa da recarga total a partir do ΔH deve levar em consideração a recessão antecedente da curva de nível, que é equivalente ao comportamento esperado para o nível da água caso não houvesse evento de recarga, como retrata a Figura 22.

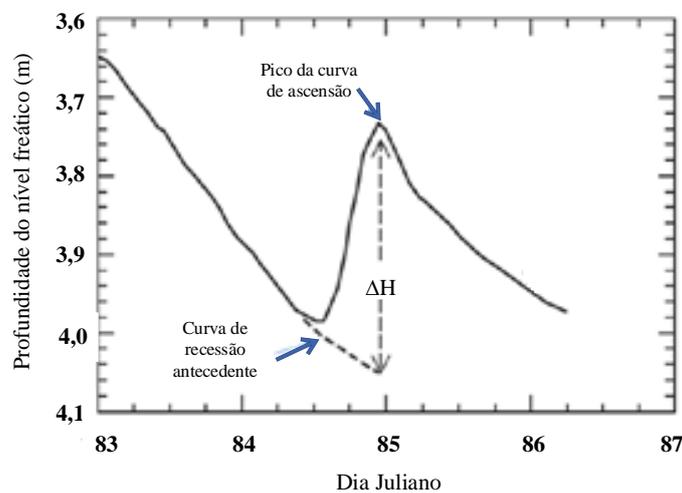


Figura 22 -Representação do ΔH para o método VNA.

Fonte: Adaptado de Bortolin (2018)

As premissas do método são plausíveis para variações rápidas de nível associadas a eventos de precipitação, o que é mais bem observado em aquíferos rasos e livres que estejam localizados em regiões que apresentem altas taxas de precipitação e sejam pouco declivosas (HEALY; COOK, 2002). O método apresenta representatividade espacial que varia em torno de centenas de metros quadrados e apresenta limitações ao não contabilizar fluxos lentos e constantes da camada subsuperficial para os aquíferos, o que geralmente não é um problema em regiões onde a profundidade para os aquíferos seja menor do que 10 metros (DELIN et al., 2007).

É importante que a aplicação do VNA considere a relação das variações positivas no nível d'água com eventos de precipitação, uma vez que, como citado no item 3.3, outros fenômenos podem levar a oscilações bruscas de nível não necessariamente relacionadas com a Recarga (HEALY; COOK, 2002). Desse modo, reforça-se a importância da disponibilidade de dados de precipitação medidos em estações pluviométricas próximas aos poços de monitoramento, de modo que possam ser comparados aos dados de nível.

Uma das aplicações tradicionais do VNA é a estimativa da curva de recessão através de extrapolações gráficas de forma manual pelos usuários do método (HEALY, 2010). Esse método exige tempo e aumenta a subjetividade da aplicação, porém é simples aplicação, incentiva a inspeção visual de toda a série de dados e, quando realizado em conjunto com a observação de dados de precipitação, favorece a identificação e retirada de elevações de nível não relacionadas eventos de chuvas (DELIN *et al.*, 2007).

A abordagem RISE é uma aplicação do VNA que calcula os aumentos diários de nível a partir da diferença simples entre o nível em dois dias sucessivos, desconsiderando valores negativos (RUTLEDGE, 1998). Espera-se que essa abordagem resulte em subestimativas das taxas de recarga porque desconsidera a recessão. Porém, o método apresenta vantagens ao permitir a automatização da estimativa da recarga e não apresenta a necessidade de estimativa ou extrapolação gráfica de curvas de recessão (DELIN *et al.*, 2007).

Já o método MRC (Master Recession Curve) busca estimar os parâmetros para uma curva de recessão que relacione o nível (H) à variação dos níveis na ausência de recarga (NIMMO *et al.*, 2015). O ajuste da curva de recessão assume que há uma relação funcional característica entre o nível d'água e a taxa de recessão na ausência de recarga, que o rendimento específico é conhecido e constante durante as variações de nível e considera que os dados de nível representam variações associadas pela recarga e descarga natural dos aquíferos (HEPPNER; NIMMO, 2005). Comparado com a abordagem RISE e a extrapolação gráfica das curvas de recessão, espera-se que as estimativas de recarga com o MRC resultem em taxas de recarga maiores (DELIN *et al.*, 2007).

O ajuste das curvas de recessão pode ser feito através do programa Master Recession Curve Fitting Program (MRCfit), elaborado na linguagem R (NIMMO *et al.*, 2014). A estimativa dos parâmetros da curva de recessão (H vs. dH/dt) pode adotar ajustes polinomiais, buscando o melhor ajuste através da definição dos parâmetros de entrada do programa. O ajuste polinomial permite a estimativa do valor de dH/dt, conforme a equação:

$$\frac{dH}{dt} = p_0 + p_1H + p_2H^2 + \dots p_nH^n \quad \text{Equação 7}$$

Onde $p_0, p_1, p_2, \dots, p_n$ são os coeficientes da MRC, fornecidos como saídas do programa MRCfit. A Figura 23 sintetiza a diferença entre as aplicações RISE e MRC.

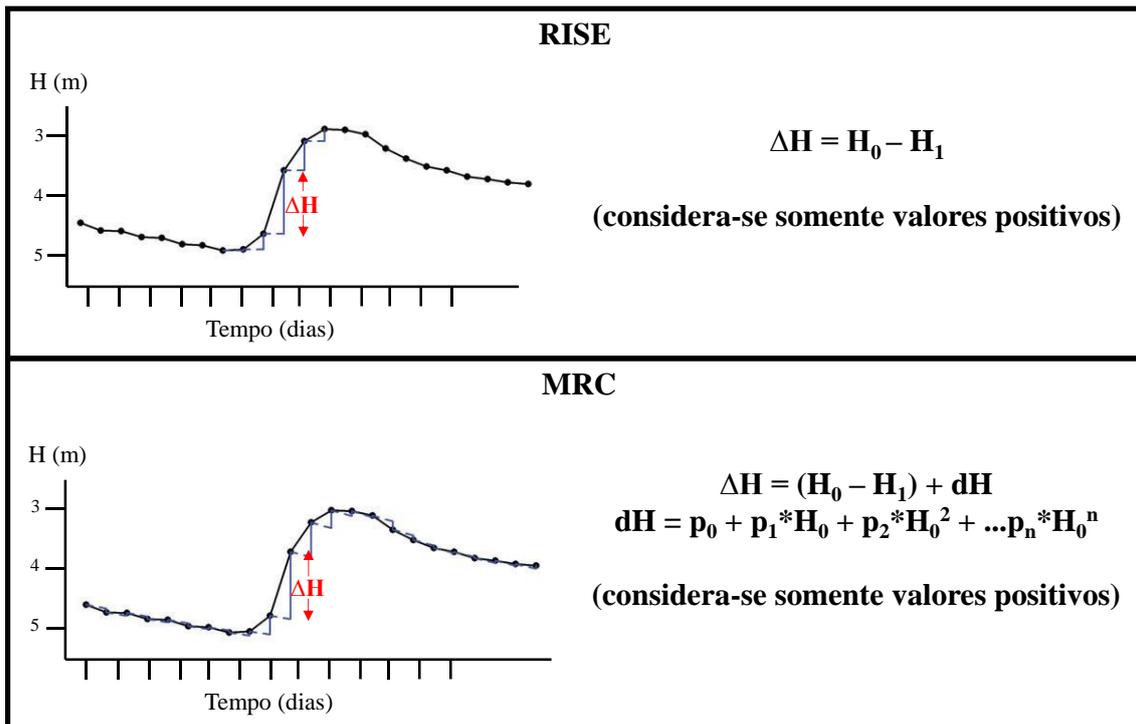


Figura 23 - Comparação entre as aplicações do VNA: RISE e MRC.

Fonte: Adaptado de Delin *et al.* (2007).

Uma aplicação recente que refina a aplicação do MRC, é denominada de Recessão Mestra Episódica (EMR), que busca estimar a recarga através da associação de um evento de precipitação a cada episódio de recarga (NIMMO; PERKINS, 2018). Conforme os autores, um episódio de recarga pode ser definido como um intervalo de tempo no qual a taxa de recarga total excede significativamente sua condição de estado estacionário em resposta a um evento substancial de entrada de água no sistema, como uma grande tempestade.

Para todas as aplicações, é esperado que as estimativas feitas com o VNA apresentem alguma variação conforme a resolução temporal dos dados de nível utilizados (horária, diária, semanal, mensal, etc.), sendo que resoluções maiores (como a semanal e a mensal) tendem a subestimar as taxas de recarga (DELIN *et al.*, 2007). Essa variação foi observada em um poço situado no SAC, com uma série de 5 anos de medições de nível d'água, observando-se taxas de recarga de 94,30% para a resolução diária, 42,06% para a resolução quinzenal e 30,75% para a resolução bimestral, para a aplicação do VNA com extrapolação gráfica da curva de recessão (SENHORINHO *et al.*, 2017).

Em sistemas aquíferos com níveis d'água próximos à superfície e com bastantes oscilações, a aplicação de um modelo de série temporal para a estimativa da recarga a partir de dados diários busca evitar a superestimativa dos valores de recarga. O método filtra eventos de aumento de nível que possam ser associados à ocorrência de eventos de precipitação, sendo proposto por Crosbie *et al.* (2005) e aplicado em Cai e Offerdinger (2016):

$$R_t = \begin{cases} [(h_t - h_{t-1}) + D\Delta t]S_y & \text{se } \begin{cases} [(h_t - h_{t-1}) + D\Delta t] > 0 \\ \sum_{t-tr < t' < t} P_{t'} > 0 \end{cases} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad \text{Equação 8}$$

Onde R_t é a recarga em um tempo t , h_t é o nível d'água em um tempo t , $P_{t'}$ é a soma da precipitação ao longo do tempo de resposta do aquífero, que é o t' (o tempo necessário para observar um aumento no nível d'água após um evento de precipitação). O termo t' pode ser estimado através da correlação cruzada entre as séries de precipitação e nível d'água, sendo igualado ao tempo de atraso equivalente ao máximo absoluto do coeficiente de correlação cruzada.

O termo D é associado à taxa de drenagem ou recessão, que contabiliza quanto o nível da água teria reduzido caso o evento de recarga não tivesse ocorrido. Logo, o termo de recessão pode ser estimado através das aplicações citada, como o método gráfico e o MRC. Em Crosbie *et al.* (2005), foi estimado pelo ajuste linear de curvas para o declínio do nível da água em relação ao nível da água correspondente, para períodos sem precipitação no dia da recessão e no dia antecedente.

3.4.1.1. Rendimento Específico

Um componente importante a ser avaliado para a aplicação do método VNA é o rendimento específico, que pode ser definido como “o volume de água que um aquífero livre descarrega por unidade de área superficial para um decréscimo unitário do nível d'água” (KRUSEMAN; RIDDER, 1994). O rendimento específico representa a capacidade de armazenamento do aquífero, que está associado à água instantaneamente descarregada do aquífero, em processos de recarga e descarga, relacionado às características da camada aquífera (HEALY e COOK, 2002). Sua avaliação pode partir da aplicação da equação abaixo:

$$S_y = n - S_r \quad \text{Equação 9}$$

Onde S_y é o rendimento específico, n é a porosidade e S_r é a retenção específica. A determinação do rendimento específico pode ser feita a partir de diversos métodos, como a realização de testes de bombeamento, que permitem a estimativa do coeficiente de armazenamento, o qual pode ser igualado ao rendimento específico em aquíferos não confinados (MAZIERO; WENDLAND, 2005). O parâmetro também pode ser estimado a partir de ensaios de drenagem de coluna de solo, conforme relata Carvalho *et al.* (2014) que indica a determinação do rendimento específico a partir do cálculo da condutividade hidráulica, através de uma fórmula empírica que relaciona os parâmetros.

A análise do balanço hídrico também pode ser adotada para a estimativa do rendimento específico, conforme Walton (2007) que estimou o S_y em períodos de elevação de nível da água em meses de inverno, quando se observam menores taxas de evapotranspiração e mudança de armazenamento na zona não-saturada. Resultados melhores para essa aplicação são esperados em regiões de fácil determinação de vazão e fluxo subsuperficial (HEALY e COOK, 2002).

Valores de rendimento específico também podem ser derivados a partir de métodos geofísicos, como a perfilagem sônica, que permite a estimativa de propriedades dos aquíferos a partir do registro da forma de ondas acústicas influenciadas pelas

propriedades elásticas da formação (LEAL, 2007; HEALY e COOK, 2002). O método foi adotado em poços da Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN) localizados na PCRS e indicou valores médios de 30% para a porosidade específica nas camadas superficiais do aquífero, de até cinco metros (TROIAN et al., 2017).

Os valores de rendimento específico afetam bastante a estimativa da taxa de recarga, sendo importante considerar que esse parâmetro varia na prática em função do tempo e da profundidade (HEALY e COOK, 2002). Espera-se um aumento do rendimento específico com acréscimos de profundidade (CHILDS, 1960) com valores próximos a zero na superfície, e valores próximos aos obtidos na Equação 9 em profundidades elevadas. Uma resolução analítica para a determinação do S_y é apresentada em Crosbie et al. (2005), que considera uma profundidade inicial e final da coluna da água e parâmetros específicos do solo.

3.4.2. Balanço Hídrico

A estimativa de recarga hídrica através de métodos baseados na avaliação do balanço hídrico é favorável por ser um método universal e adaptável (HEALY, 2010). Essa abordagem considera entradas e saídas de água em um volume de controle (como uma coluna de solo ou uma bacia hidrográfica), assim como a variação no armazenamento, partindo da seguinte equação:

$$P = ET + \Delta S + R_{off} + D \quad \text{Equação 10}$$

Onde P é a precipitação; ET, a evapotranspiração, que inclui a evaporação e a transpiração das plantas; ΔS é a variação de armazenamento no volume de controle; R_{off} é o escoamento superficial direto (precipitação que não infiltra) e D é a drenagem para fora do volume de controle (no fundo da coluna de solo, por exemplo).

Considera-se que todos os componentes do balanço hídrico são taxas por unidade superficial de área, como mm/dia ou mm/ano (HEALY, 2010). Sendo possível medir P, ET, ΔS e R_{off} , pode-se estimar a recarga (R) como equivalente ao termo de drenagem (D) (SCANLON et al., 2002; HEALY, 2010), caso a drenagem no volume de controle atinja o nível freático.

Uma aplicação tradicional do balanço hídrico em bacias hidrográficas foi elaborada por Thornthwaite e Mather (1957), voltada para a avaliação da relação entre precipitação e evapotranspiração:

$$P = ET + \Delta S^{uz} + Q_{off}^{sw} \quad \text{Equação 11}$$

Onde ΔS_{uz} corresponde à variação do armazenamento da água no solo, Q_{off}^{sw} é a soma do escoamento superficial (R_{off}) e do escoamento de base (Q_{bf}). Se a evapotranspiração da água subterrânea e a mudança do armazenamento são desprezíveis, a recarga pode ser considerada igual ao escoamento de base (HEALY, 2010). Reordenando a equação anterior, obtém-se:

$$R = P - ET - \Delta S^{uz} - R_{off} \quad \text{Equação 12}$$

Conforme Bortolin (2018), uma das dificuldades para a aplicação da Equação 12 é a definição precisa da parcela de escoamento superficial. Uma das técnicas tradicionais para a definição desse valor envolve a utilização de dados de precipitação e da

características de uso e ocupação do solo, que é o método CN (*Curve Number*), do *US Soil Conservation Service* (NRCS, 2004) detalhado abaixo:

$$R_{off} = \frac{(P-0,2S)^2}{P+0,8S} \text{ se } P > 0,2S \quad \text{Equação 13}$$

Onde R_{off} é o volume do escoamento superficial (mm), P é a precipitação (mm) e S é o potencial máximo de retenção (mm). O termo $0,2.S$ representa as perdas iniciais da precipitação por interceptação, infiltração e retenção superficial. O valor de S é estimado para um dado número de curva (CN) de escoamento superficial:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad \text{Equação 14}$$

O valor de CN irá variar conforme diferentes tipos de uso do solo e potencial hidrológico de escoamento, de A (baixo potencial de escoamento) até D (muito alto potencial de escoamento), o que irá variar conforme as características do solo. Os números são organizados de forma que os maiores valores de CN ocorram para solos mais expostos, áreas urbanas e culturas de má condição hidrológica, que tendem a gerar maior escoamento superficial (COLLISCHONN; DORNELLES, 2015)

A principal limitação desse método envolve o fato de que a precisão da estimativa da recarga depende da precisão na medição das demais variáveis que compõem a equação do balanço hídrico (SCANLON *et al.*, 2002). Esse problema é acentuado em situações de baixos valores de recarga em relação aos demais componentes do balanço hídrico, especialmente em relação à evapotranspiração, cuja incerteza pode gerar erros de mais de 100% em relação ao valor real esperado para a recarga (HEALY, 2010; SCANLON *et al.*, 2002).

Porém, para a regiões úmidas, como é a PCRS, pode-se considerar que a incerteza da estimativa pelo balanço hídrico é em geral reduzida em relação à taxa total de recarga, sendo um método passível de ser adotado (BORTOLIN, 2018; DE VRIES e SIMMERS 2002), levando em conta as suas limitações. Nesse sentido, uma aplicação adequada do balanço hídrico deve apresentar faixas de ocorrência de recarga, incluindo os termos de incerteza como parte essencial da análise (HEALY, 2010).

3.4.3. Separação do escoamento de base

A utilização de dados de vazão medidos em corpos d'água superficiais para a estimativa de taxas de recarga é uma prática que apresenta ampla aplicação em regiões úmidas e sub-úmidas (HEALY, 2010), o que parte da relação entre os corpos superficiais e subterrâneos apresentada no item 3.4. A Figura 24 apresenta essa relação em um hidrograma, podendo-se identificar o escoamento de base ou escoamento subterrâneo (parcela de água que alcança a zona saturada), o escoamento subsuperficial (com velocidade intermediária, associado a solos de alta permeabilidade) e o escoamento superficial (FREEZE e CHERRY, 1979).

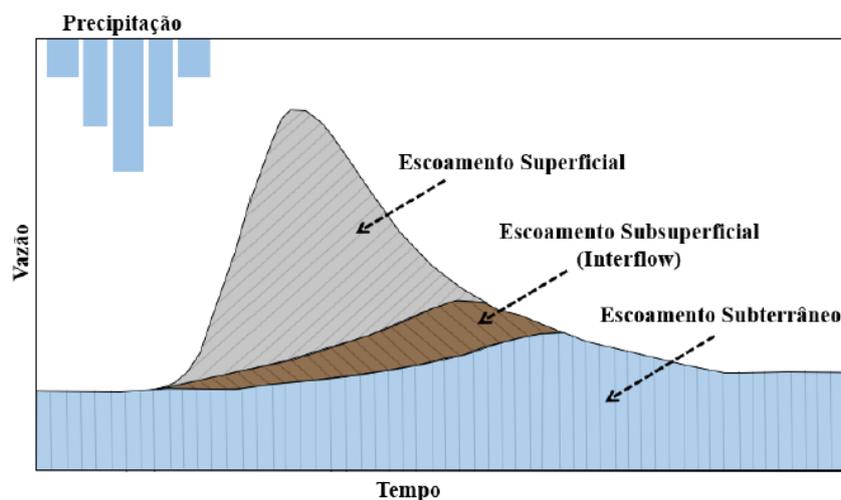


Figura 24 - Composição do escoamento em um hidrograma.

Fonte: Bortolin (2018)

O escoamento de base pode ser entendido, nesse sentido, como uma parcela da vazão que é mantida pela água subterrânea nos aquíferos da bacia, através da descarga (COLLISCHONN e DORNELLES, 2015). Assim, embora o escoamento de base não seja a recarga, a separação desse escoamento em curvas de vazão pode ser utilizada para aproximar a recarga de longo prazo ou “recarga efetiva”, quando perdas de água subterrânea possam ser consideradas mínimas (DANIEL, 1996; BORTOLIN, 2018) e taxas de bombeamento e evapotranspiração não sejam componentes significativos do balanço hídrico (SCANLON et al., 2006).

A separação do escoamento de base partiu da avaliação da recessão em hidrogramas, que consiste na taxa de diminuição da vazão após períodos de precipitação, relacionada com o atraso do armazenamento de água até a descarga (BORTOLIN, 2018; COLLISCHONN e DORNELLES, 2015). A definição das curvas de recessão (usualmente de decrescimento exponencial) pode ser trabalhosa, de acordo com diferentes condições de precipitação e armazenamento de água subterrânea em uma mesma bacia, havendo uma série de métodos para a sua avaliação (WITTENBERG, 1999).

Curvas de permanência também podem ser utilizadas para a estimar a proporção do escoamento subterrâneo em relação ao total, a partir, por exemplo, da relação entre a Q_{90} e a Q_{50} (NELMS; HARLOW; HAYES, 1997). Porém, esses métodos, aplicados de maneira isolada, são mais adequados para estimativas expeditas, com confiabilidade questionável (COLLISCHONN e DORNELLES, 2015).

Já a utilização de filtros digitais é uma prática automatizada com crescente aplicação para a separação do escoamento de base e consiste em separar a vazão total do hidrograma (y_i) em um termo de escoamento superficial (f_i) e um termo de escoamento subterrâneo (b_i), para um dado intervalo de tempo i (COLLISCHONN e DORNELLES, 2015):

$$y_i = f_i + b_i$$

Equação 15

Nos períodos de ausência de recarga, adotando-se uma relação linear entre o armazenamento de água nos aquíferos e vazão, considera-se que:

$$b_{i+1} = b_i \cdot a \quad \text{Equação 16}$$

$$a = e^{-\frac{\Delta t}{k}} \quad \text{Equação 17}$$

Onde Δt é o intervalo de tempo entre i e $i+1$ e k é uma constante de recessão. Uma aplicação adequada para bacias hidrográficas com pouca contribuição do escoamento de base é o filtro de Chapman (ECKHARDT, 2008):

$$b_i = \frac{a}{2-a} \cdot b_{i-1} + \frac{1-a}{2-a} \cdot y_i \quad \text{Equação 18}$$

Onde a está definido na Equação 16 e, se b_i resultar em valores maiores que y_i , b_i é igualado a y_i . Outra aplicação, mais adequada para bacias com maior representatividade do escoamento de base, é o filtro de Eckhardt (ECKHARDT, 2008):

$$b_i = \frac{(1-BFI_{max}) \cdot a \cdot b_{i-1} + (1-a) \cdot BFI_{max} \cdot y_i}{1-a \cdot BFI_{max}} \quad \text{Equação 18}$$

Onde BFI_{max} é o máximo percentual de escoamento subterrâneo adotado para o filtro, que pode variar entre 0,25 para rios perenes e aquíferos impermeáveis até 0,8 para rios perenes e aquíferos porosos (ECKHARDT, 2005). O parâmetro BFI_{max} pode ser estimado conforme as características de cada bacia hidrográfica, como ocorre no trabalho de Collischonn e Fan (2013) que estimou o valor de BFI_{max} a partir da relação entre as vazões Q_{90} e Q_{50} .

Nesse sentido, a separação do escoamento de base é uma prática adequada para a estimativa da recarga em climas úmidos, quando suas premissas possam ser verificadas. A classificação de Kinzelbach et al. (2002) descreve o método como representativo para uma escala média (entre a local e a regional), com incertezas menores em geral menores que a avaliação do balanço hídrico e a variação dos níveis de água.

3.4.4. Demais métodos

Além das práticas descritas acima, outros métodos para a estimativa de recarga vêm sendo utilizados, como as aplicações baseadas em dados obtidos na zona não-saturada, como os Lisímetros, o Plano de Fluxo Nulo ou o Método de Darcy. Os lisímetros consistem em compartimentos preenchidos com solo hidrológicamente isolado do solo no entorno, que pode ou não conter vegetação, e servem como referência para a estimativa de componentes do balanço hídrico, através de medidas da variação do volume ou peso de água (SCANLON et al., 2002).

O Plano de Fluxo Nulo é um método simplificado que iguala a recarga às mudanças no armazenamento de água no solo abaixo do Plano de Fluxo Nulo (ZFP), no qual o gradiente hidráulico vertical é nulo, sendo uma técnica com limitações e que demanda a coleta de muitas informações (SCANLON et al., 2002). Já o método de Darcy parte da lei de Darcy para avaliar a recarga na zona não-saturada, conforme a equação:

$$R = -K(\theta) \frac{\partial h}{\partial z} \quad \text{Equação 19}$$

$$\theta = \theta(\psi) \text{ e } h = \psi + z \quad \text{Equação 20}$$

Onde R é a recarga, K é a condutividade hidráulica, θ é a umidade, h é a carga total, z é a coordenada vertical e ψ é o potencial mátrico. A aplicação desse método demanda medições ou estimativa do gradiente hidráulico vertical e da condutividade hidráulica no perfil do solo, o que pode gerar uma variabilidade de respostas conforme a condição de coleta das amostras de solo (HEALY, 2010).

O uso de traçadores também pode trazer informações relevantes para a avaliação da recarga e compreensão do fluxo de água subterrânea e transporte de contaminantes (HEALY, 2010). Os isótopos podem ser classificados como aplicados (como o brometo, ^3H – trítio e corantes), naturais (como o balanço de cloretos e o uso de isótopos) e históricos (como o ^3H e ^{36}Cl) (SCANLON et al., 2002).

Modelos de simulação de processos hidrológicos também podem ser utilizados para a estimativa da recarga, o que é interessante para avaliar cenários de impacto de algumas pressões sobre as bacias hidrográficas, como as mudanças do clima e de uso do solo (HEALY, 2010). Em geral, os modelos partem de equações de balanço hídrico e demandam a inserção de dados climáticos e de precipitação, de modo que também carregam incertezas e demandam a calibração adequada (BORTOLIN, 2018).

O Modelo Hidrológico de Grandes Bacias (MGB-IPH) é um modelo distribuído, de base conceitual, utilizado para a modelagem de bacias hidrográficas em diversas regiões do Brasil (COLLISCHONN et al., 2007). O modelo foi utilizado para a geração de séries de vazão, para as quais se aplicou a separação de escoamento de base para a estimativa de recarga, com resultados satisfatórios (MELATI; FAN; ATHAYDE, 2017).

Técnicas de Regressão também podem ser utilizadas para estimar a recarga, a partir de características da bacia hidrográfica e características do clima, como precipitação, temperatura e evapotranspiração (HELSEL e HIRSCH, 2002). A utilização dessa técnica demanda a obtenção de valores de recarga com outros métodos, como a Variação dos Níveis de Água, que foi utilizada para o ajuste de modelos de regressão linear, *Multi Layer Perceptron* (MLP) e *Long Short-Term Memory* (LSTM), a partir de variáveis climáticas e de extração de água subterrânea (HUANG et al., 2019).

O uso de satélites e da computação em nuvem vem trazendo avanços para a avaliação da recarga e do armazenamento subterrâneo através de métodos de geoprocessamento. Dentre os satélites adequados para essa análise, cita-se a missão GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) (TAPLEY et al., 2004), que observa anomalias no campo gravitacional terrestre em função das variações de massa que podem ser relacionadas a variações no armazenamento de água subterrânea (RICHEY et al., 2015).

Recentemente, o trabalho de Magnoni (2020) utilizou ferramentas de sensoriamento remoto com computação em nuvem, na plataforma Google Earth Engine (GEE) para estimar a recarga, a partir da equação do balanço hídrico. O autor utilizou séries temporais de três bases de dados hidroclimáticos (FLDAS, GLDAS e TERRACLIMATE), integrando dados de poços em uma adaptação do método Variação dos Níveis da Água (VNA), para avaliar o impacto nos níveis freáticos no Sistema Aquífero Guarani.

Nesse sentido, verifica-se a existência de diferentes métodos para estimativa da recarga, adequados para diferentes escalas, de acordo com diferentes dados disponíveis e particularidades das bacias hidrográficas (KINZELBACH et al., 2002). É importante considerar que a aplicação dos métodos não é excludente, mas sim complementar, no sentido de validar a faixa de grandeza das estimativas de recarga e aprimorar a compreensão da variação no armazenamento subterrâneo.

3.5. Consolidação da Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica apresentou as características da PCRS e do SAC, descrevendo as suas condições de formação a partir dos estudos existentes na região. Esse capítulo também consolidou um panorama sobre os métodos utilizados para a avaliação das variações de nível de água e da recarga da água subterrânea, agregando caminhos possíveis para o estudo da hidrogeologia na Planície Costeira

A revisão indicou a ausência de uma série ampla de estudos de avaliação dos níveis e da recarga no SAC, sendo identificados apenas dois estudos recentes: o de Troian et al. (2017) e o de Senhorinho et al. (2018), que obtiveram estimativas de recarga com o método VNA (abordagem gráfica), para dados entre 2011 e 2016. Nesse sentido, destaca-se a intenção do presente trabalho de contribuir para preencher essa lacuna de estudos, complementando a estimativa da recarga com a aplicação de métodos estatísticos para a avaliação da variação dos níveis e a discussão da recarga a partir da caracterização do entorno dos poços, como será apresentado no capítulo a seguir.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia para a avaliação das variações do nível de água e estimativa da recarga aquífera envolve a consolidação de uma série de dados de diferentes fontes e a aplicação de métodos estatísticos e de rotinas para a estimativa de recarga. A Figura 25 resume os métodos propostos, apresentados a seguir.

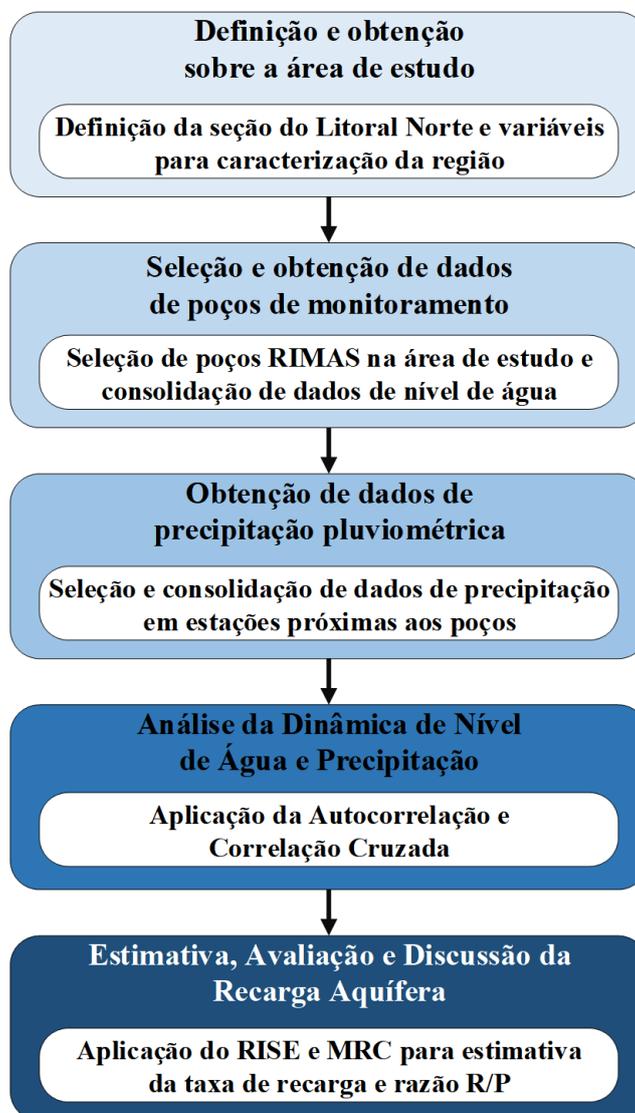


Figura 25 – Fluxograma da metodologia adotada para a elaboração do trabalho.

Fonte: elaboração própria.

4.1. Definição e obtenção de informações sobre a área de estudo

A área de estudo definida para este trabalho se encontra na região do Litoral Norte do Rio Grande do Sul, desde o município de Terra de Areia até o município de Osório. A área estudada se insere na delimitação proposta em avaliação recente do Litoral Norte feita por Troian et al. (2020), que vai de Torres até Tramandaí. A região de interesse, com os seis poços RIMAS identificados para avaliar o Sistema Aquífero Costeiro em sua delimitação, sendo apresentada na Figura 26:

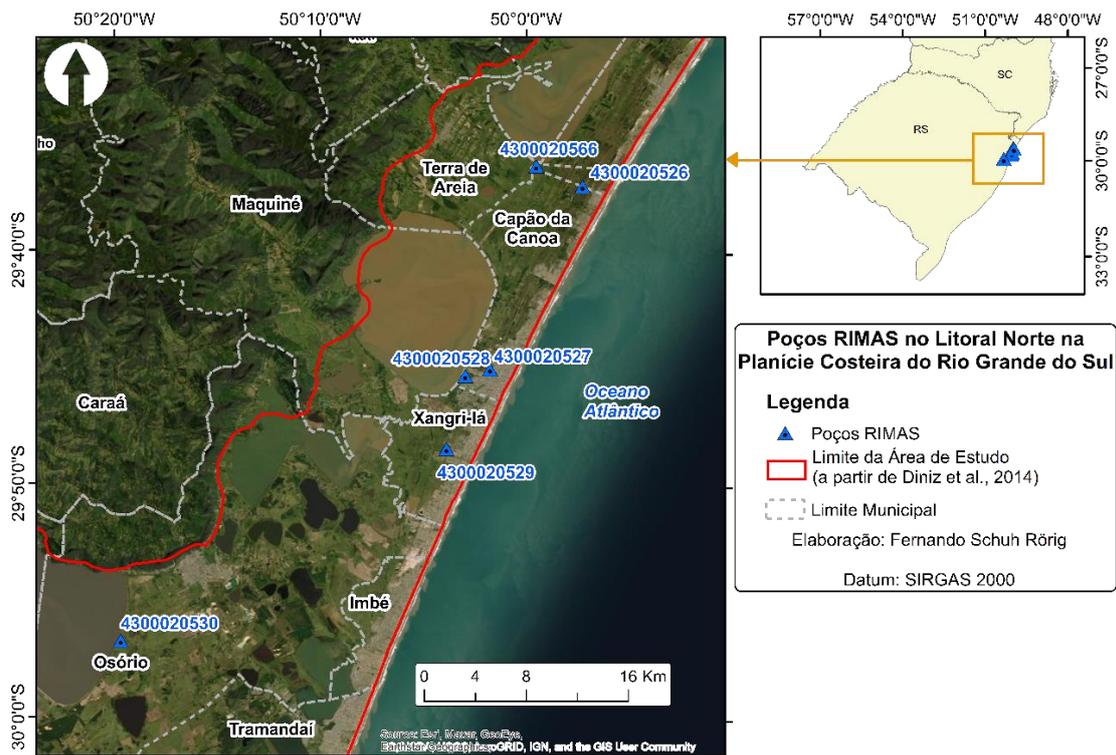


Figura 26 – Área de estudo e localização dos Poços RIMAS no Litoral Norte do Rio Grande do Sul.
 Fonte: elaboração própria.

Informações sobre a área de estudo foram obtidas em diversas bases e foram avaliadas em detalhe para a região de entorno dos seis poços RIMAS, considerada como um buffer de 1km, compatível com a resolução espacial do método WTF, utilizado para a estimativa de recarga, de centenas de metros quadrados (DELIN et al., 2007). Essa consolidação permitiu qualificar as análises de caracterização da dinâmica dos aquíferos e de estimativa da recarga e será apresentada no item 5.4.

Foram selecionadas variáveis capazes de caracterizar a condição de ocupação do entorno do solo e questões de geologia e pedologia. A Tabela 6 apresenta as informações utilizadas, uma breve descrição e a base de dados selecionada.

Tabela 6 – Fontes de informação utilizadas para caracterização a região da área de estudo.

Informação	Descrição	Base de dados
Uso e ocupação do solo	Apresenta a classificação de imagens de satélite de acordo com classes de uso e ocupação do solo.	Coleção 6.0 do Projeto MAPBIOMAS – Ano base 2020 (PROJETO MAPBIOMAS, 2021)
Geologia	Avaliação de unidades geológico-ambientais do estado do Rio Grande do Sul, que apresentam limitações e potencialidades e consideram a constituição litológica da supraestrutura e da infraestrutura geológica.	Geodiversidade do Rio Grande do Sul (VIERO, 2010)
Pedologia	Classificação dos solos no estado do Rio Grande do Sul, de acordo com suas características físicas e hidráulicas.	Mapa de Classificação dos Solos do Estado do Rio Grande do Sul quanto à Resistência a Impactos Ambientais. (KAMPF et al., 2001)
Declividade	Avaliação da declividade a partir de Modelo Digital de Elevação (MDE)	Avaliado a partir de MDE do STRM com resolução de 30 metros (FARR; KOBRICK, 2000)

Fonte: elaboração própria.

4.2. Seleção e Obtenção de dados de Poços de Monitoramento

Para os seis poços de monitoramento selecionados, foi realizada uma coleta de informações através do banco de dados da plataforma RIMAS (<http://rimasweb.cprm.gov.br/>), operada pela CPRM. Nessa consulta, realizada em 20/05/2022, foi possível obter dados de medições de nível de água (em metros), que são consolidados pela equipe da CPRM e obtidos através de transdutores de pressão instalados nos poços, com registro feito através de *dataloggers*. As informações gerais sobre os poços estão presentes na Tabela 7.

Tabela 7 - Informações gerais sobre os poços RIMAS selecionados na área de estudo.

Cód. Poço	Município	Latitude (SIRGAS 2000)	Longitude (SIRGAS 2000)	Prof. (m)	Nível Estático (m)	Data de instalação
4300020526	Arroio do Sal	-29.6189	-49.9535	67	1,71	09/09/2011
4300020527	Capão da Canoa	-29.7500	-50.0272	100	2,55	10/09/2011
4300020528	Capão da Canoa	-29.7547	-50.0472	72	3,47	14/09/2011
4300020529	Xangri-lá	-29.8069	-50.0619	86	2,12	11/09/2011
4300020530	Osório	-29.9453	-50.3253	88	5,38	15/09/2011
4300020566	Terra de Areia	-29.6047	-49.9911	50	2,73	10/09/2011

Fonte: elaboração própria.

Os dados de nível foram consolidados atentando-se para a disponibilidade ao longo de um ano hidrológico, que foi considerado como um período padrão para o estado do Rio Grande do Sul, de 1º de maio a 30 de abril (TUCCI, 1993; SILVA JÚNIOR; CASTRO; TUCCI, 2001). Foram selecionados anos hidrológicos com dados disponíveis entre 98% e 100% dos dias, como detalha a Figura 27:

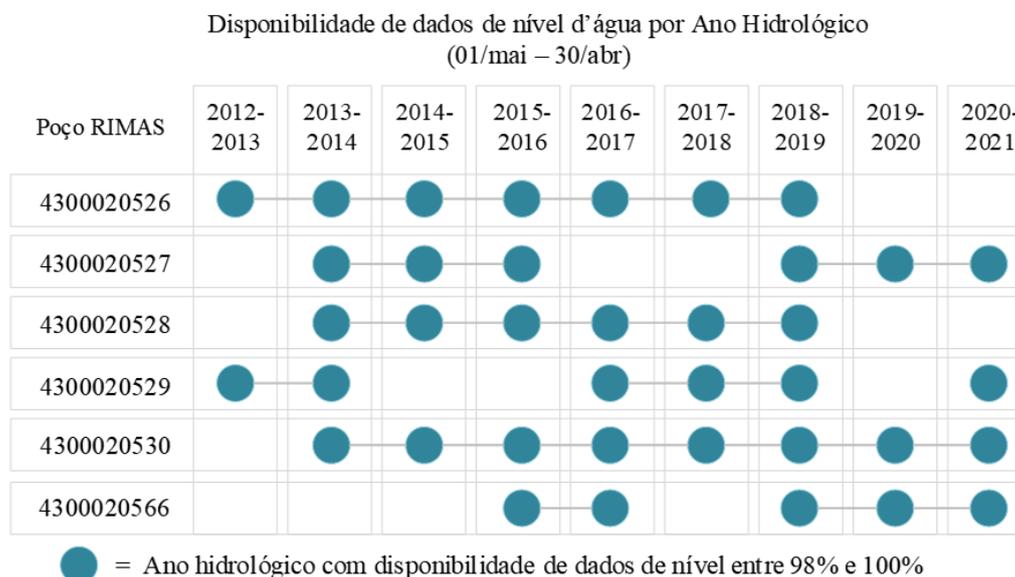


Figura 27 – Disponibilidade de dados de nível de água nos poços RIMAS no Litoral Norte do Rio Grande do Sul.

Fonte: elaboração própria.

Para alguns dias, foram identificados dados ausentes, o que é usualmente associado a problemas nos equipamentos de medição e registro dos níveis. As falhas observadas (todas menores que 5 dias consecutivos) e os *outliers* identificados através de análise exploratória foram substituídos através de interpolação linear (que consiste na aproximação de dados ausentes através do ajuste de uma função linear de primeiro grau,

considerando os dados disponíveis mais próximos antes e após o intervalo de falhas), como realizado no trabalho de Freitas (2018). Essa consolidação possibilitou a aplicação dos métodos estatísticos e dos algoritmos com resolução diária dos dados de nível, descritos nos itens 4.4 e 4.5.

4.3.Obtenção de dados de Precipitação Pluviométrica

Os dados de precipitação pluviométrica, obtidos em frequência diária, são de origem da Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), disponibilizados no Portal HidroWeb (<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>). Foram utilizados dados de estações pluviométricas próximas aos poços operadas pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), distantes entre 1,5 e 26 km dos poços, conforme apresenta a Tabela 8 e a Figura 28.

Tabela 8 – Estações Pluviométricas relacionadas aos poços, operadora das estações pluviométricas e distância entre poço e estação pluviométrica.

Cód. Poço	Código Estação pluviométrica (RHN)	Operador	Distância entre poço e estação pluviométrica (km)
4300020526	2950038	CPRM	10,0
4300020527	2950038	CPRM	19,7
4300020528	2950038	CPRM	20,2
4300020529	2950038	CPRM	26,0
4300020530	3050010	CPRM	12,0
4300020566	2950038	CPRM	7,0

Fonte: elaboração própria.

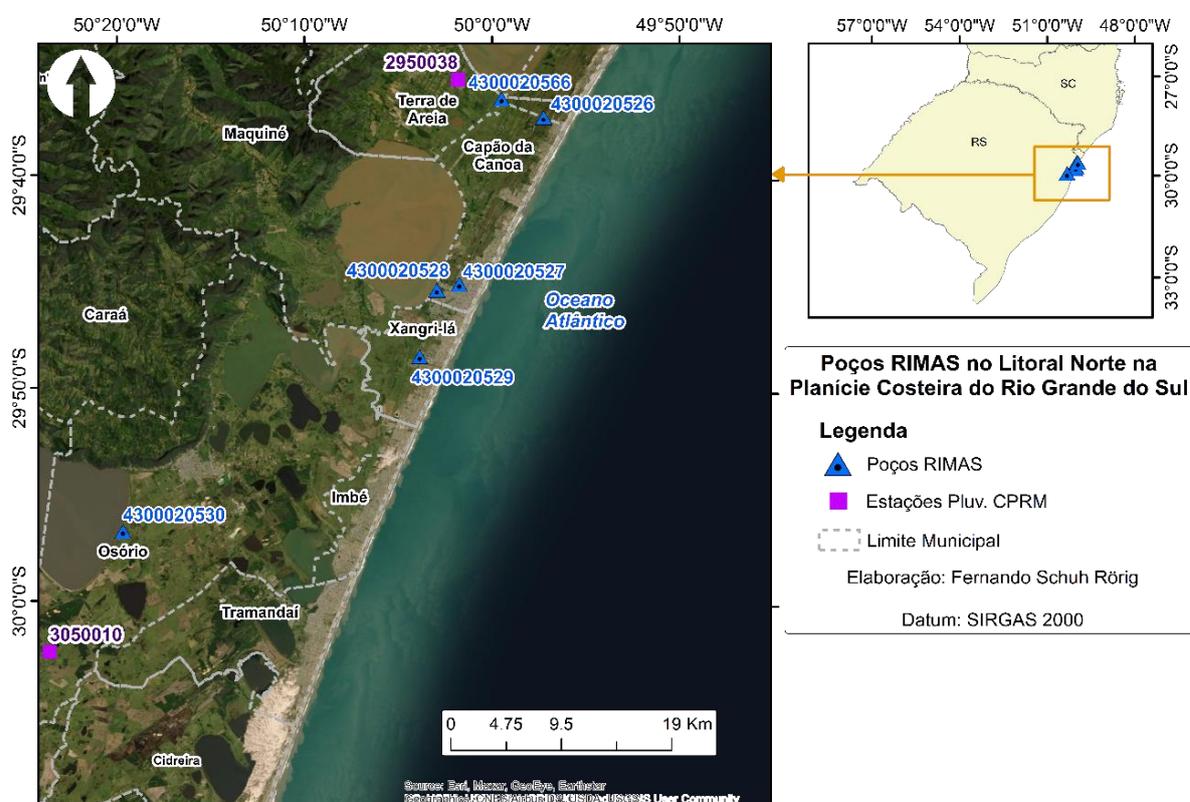


Figura 28 – Localização dos poços RIMAS e Estações Pluviométricas.

Fonte: Elaboração própria.

As mesmas estações foram relacionadas aos poços 4300020526, 4300020527, 4300020528, 4300020529 e 4300020530 no estudo de Troian et al. (2017). Observa-se que o único poço não considerado nesse estudo (4300020566) é o que se encontra mais próximo das estações pluviométricas relacionadas (a 7km da estação 2950038).

As estações próximas aos poços apresentaram disponibilidade de medições diárias de precipitação pluviométrica de 97% ou mais no período considerado. Os intervalos de falhas foram complementados por medições diárias em estações próximas aos poços, operadas pelo CPRM, INMET, Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais CEMADEN)⁴ e pelo Sistema de Monitoramento Agrometeorológico (AGRITEMPO)⁵, através do método do vizinho mais próximo.

As demais falhas, de no máximo 5 dias consecutivos, foram preenchidas com interpolação linear, de maneira a permitir a aplicação dos métodos estatísticos e o filtro de série temporal. Esse método, o mesmo utilizado para o preenchimento de falhas nos níveis, foi utilizado somente para 0,5% ou menos das séries de precipitação associadas a cada poço, considerando a dificuldade de preenchimento de valores diários de precipitação (ANA, 2011). Entende-se que estudos mais detalhados e com maiores períodos de falhas possam avaliar outros métodos para a correção de falhas, considerando outros tipos de interpolação e o uso de sensoriamento remoto.

4.4. Análise da Dinâmica do Nível de Água e Precipitação

Os métodos estatísticos de autocorrelação, correlação cruzada e correlação cruzada *sliding windows* foram utilizados para analisar a dinâmica do nível de água e sua interação com os dados de precipitação pluviométrica. As análises foram realizadas a partir de rotinas elaboradas com a linguagem de programação R (R CORE TEAM, 2022) no sentido de automatizar as análises para os diferentes anos hidrológicos e poços avaliados.

4.5. Estimativa da Recarga Aquífera

A estimativa da recarga aquífera foi realizada a partir das séries consolidadas com dados diários de nível de água, com a aplicação dos algoritmos RISE e MRC, através do programa MRCFit (NIMMO *et al.*, 2015) e de rotinas no Microsoft Excel. Uma vez que a aplicação do RISE tende a subestimar os valores de recarga e a aplicação da MRC tende a superestimar os mesmos valores (DELIN *et al.*, 2007), a aplicação de médias entre as duas metodologias foi utilizada para agregar os resultados finais obtidos, para sintetizar as informações.

Anteriormente à aplicação da estimativa de recarga, foi realizada uma suavização dos dados de nível através de uma média móvel simples de 5 dias (YANG *et al.*, 2018; MELATI *et al.*, 2017; SRH-CE, 2017). Tal aplicação também age no sentido de evitar a superestimativa da recarga através da correção dos “ruídos” ou pequenas oscilações de nível decorrentes de diversos fatores.

Para a estimativa de recarga, considerou-se a importância de que as aplicações do WTF relacionassem as variações positivas no nível d’água com eventos de precipitação, já que outros fenômenos podem levar a oscilações bruscas de nível não necessariamente

4 Disponível em: <http://www2.cemaden.gov.br/mapainterativo/#>

5 Disponível em: https://www.agritempo.gov.br/agritempo/jsp/Estacao/index.jsp?siglaUF=MT&lang=pt_br

relacionadas com a Recarga (HEALY; COOK, 2002). No caso dos poços do SAC, com níveis d'água próximos à superfície e com muitas oscilações, foi utilizado um método de série temporal a partir de dados diários, para considerar eventos de aumento de nível que possam estar associados à ocorrência de eventos de precipitação, a partir da adaptação da abordagem proposta por Crosbie *et al.* (2005):

$$R_t \begin{cases} [(h_t - h_{t-1}) + D]Sy & \text{se } \begin{cases} [(h_t - h_{t-1}) + D] > 0 \\ \sum_{t-tr < t' < t}^e P_{t'} > 0 \end{cases} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \dots\dots\dots \text{Equação 21}$$

Onde R_t é a recarga no tempo t , h_t é o nível d'água no tempo t , $P_{t'}$ é a soma da precipitação ao longo do tempo de resposta do aquífero, que é o t' (o tempo necessário para observar um aumento no nível d'água após um evento de precipitação, que é estimado através da análise da correlação cruzada entre as séries de precipitação e nível). O termo D é associado à recessão da curva de nível d'água e foi adaptado para ser estimado com as abordagens RISE e MRC.

Considerando que as taxas de recarga estimadas através do WTF variam bastante a partir de alterações nos valores de rendimento específico (HEALY, 2010), adotou-se uma análise de sensibilidade com valores de Sy de 20%, 25% e 30% para todos os poços, de maneira a expressar faixas de taxas de recarga mínimas a máximas, como realizado no estudo de Troian *et al.* (2017). Os percentuais são compatíveis com rendimentos específicos observados em camadas de areias finas e médias (JOHNSON, 1967; BATU, 1998).

Desse modo, o fluxo de estimativa de recarga foi consolidado, como apresenta a Figura 29:

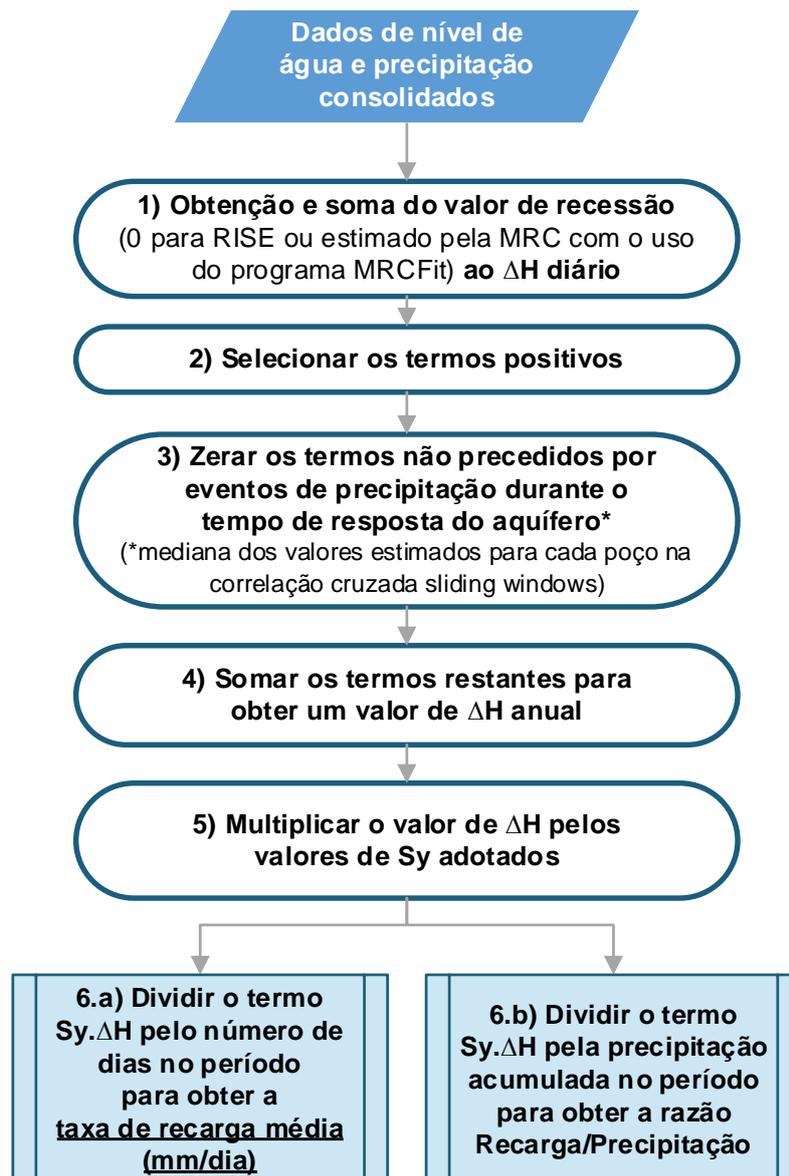


Figura 29 – Etapas adotadas para a estimativa da recarga a partir dos dados de nível de água e precipitação.

Fonte: elaboração própria.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Caracterização Hidrogeológica

Os poços RIMAS no Litoral Norte, inseridos no Sistema Aquífero Costeiro (SAC) podem ser visualizados de acordo com as Unidades do Mapa Hidrogeológico do Brasil ao Milionésimo (DINIZ et al., 2014) na Figura 30.

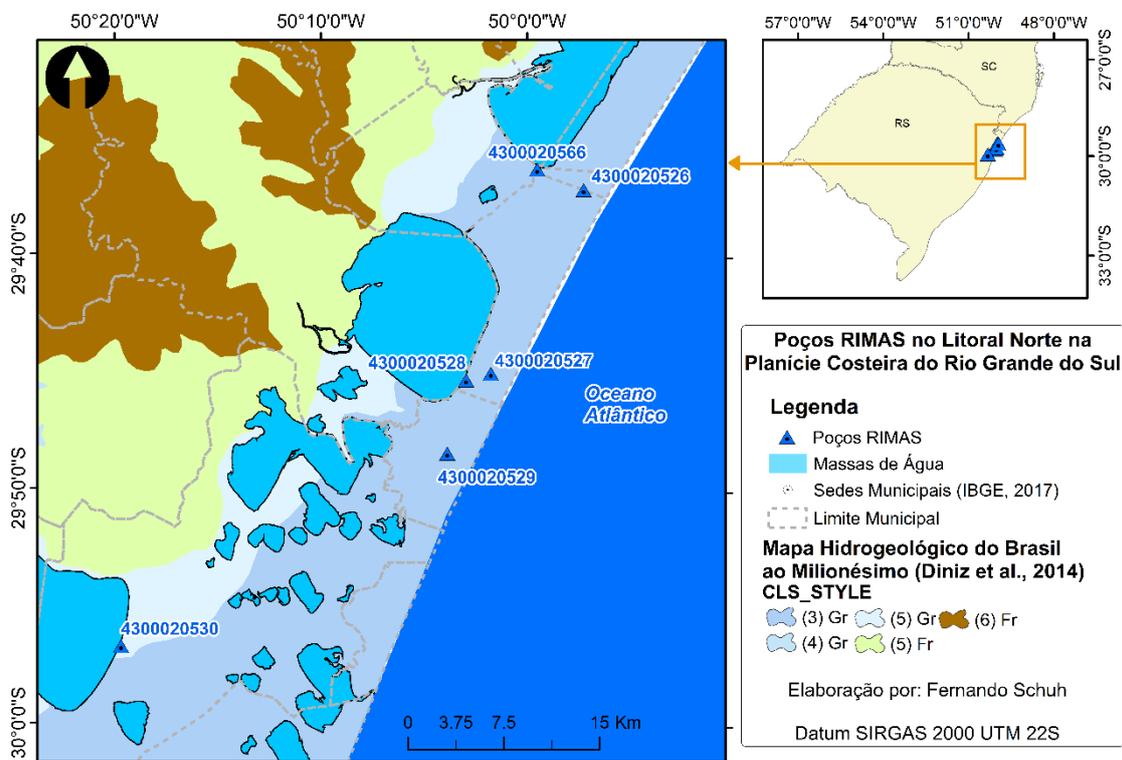


Figura 30 – Unidades Aquíferas do Mapa Hidrogeológico do Brasil ao Milionésimo no entorno dos poços RIMAS no Litoral Norte.

Fonte: DINIZ et al. (2014).

Observa-se que cinco dos seis poços selecionados encontram-se na Unidade Granular de Produtividade Moderada (3 - Gr), com unidades aquíferas de areias finas e médias, esbranquiçadas, intercaladas com camadas siltico-arenosas e argilosas (MACHADO; FREITAS, 2005). O poço de Osório é o único que se encontra em unidade de menor produtividade, caracterizada como Unidade Granular de Produtividade Geralmente muito baixa, porém localmente baixa (5 - Gr), com areias finas inconsolidadas, esbranquiçadas e argilas cinzas, sendo que no topo, os primeiros metros são pelíticos, com sedimentos bastante cimentados (MACHADO; FREITAS, 2005).

A Plataforma RIMAS apresenta algumas informações sobre os poços de monitoramento através de seus perfis construtivos, presentes na Figura 31, Figura 32 e Figura 33, que são detalhados na Tabela 9, que traz informações geológicas e construtivas, com a descrição de cada camada presente no perfil e a posição dos filtros de cada poço da RIMAS.

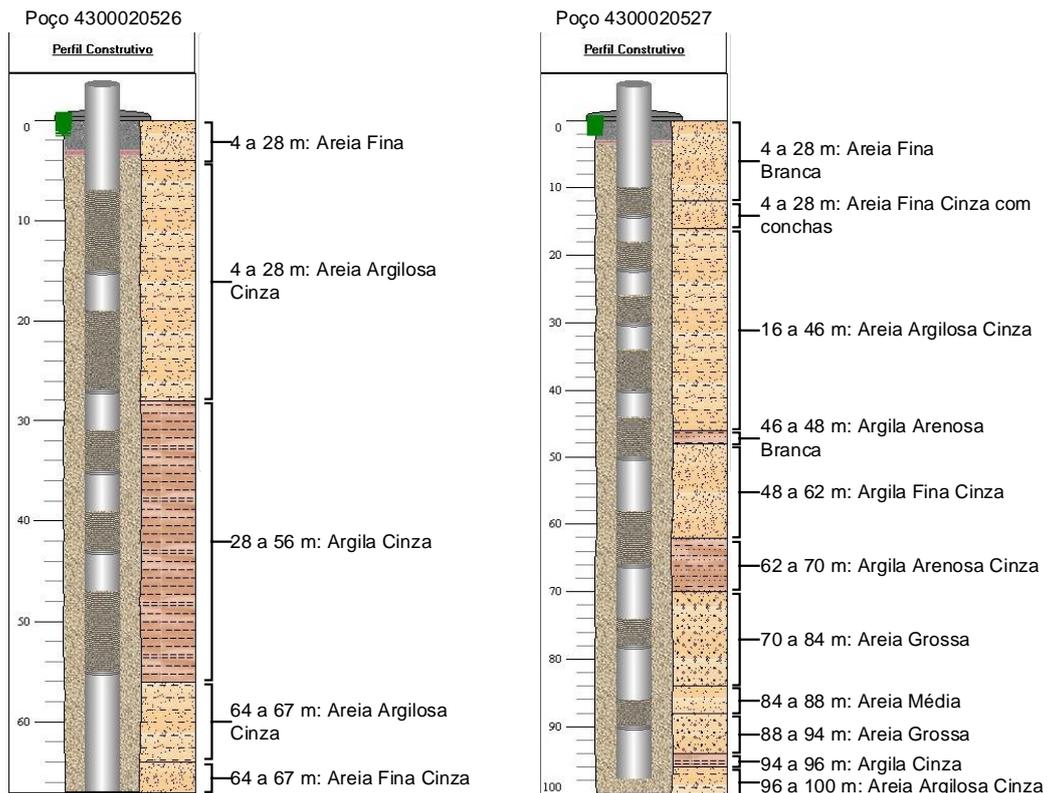


Figura 31 – Perfis construtivos dos poços 4300020526 e 4300020527 da RIMAS/CPRM no Litoral Norte.

Fonte: RIMAS/CPRM (2022).

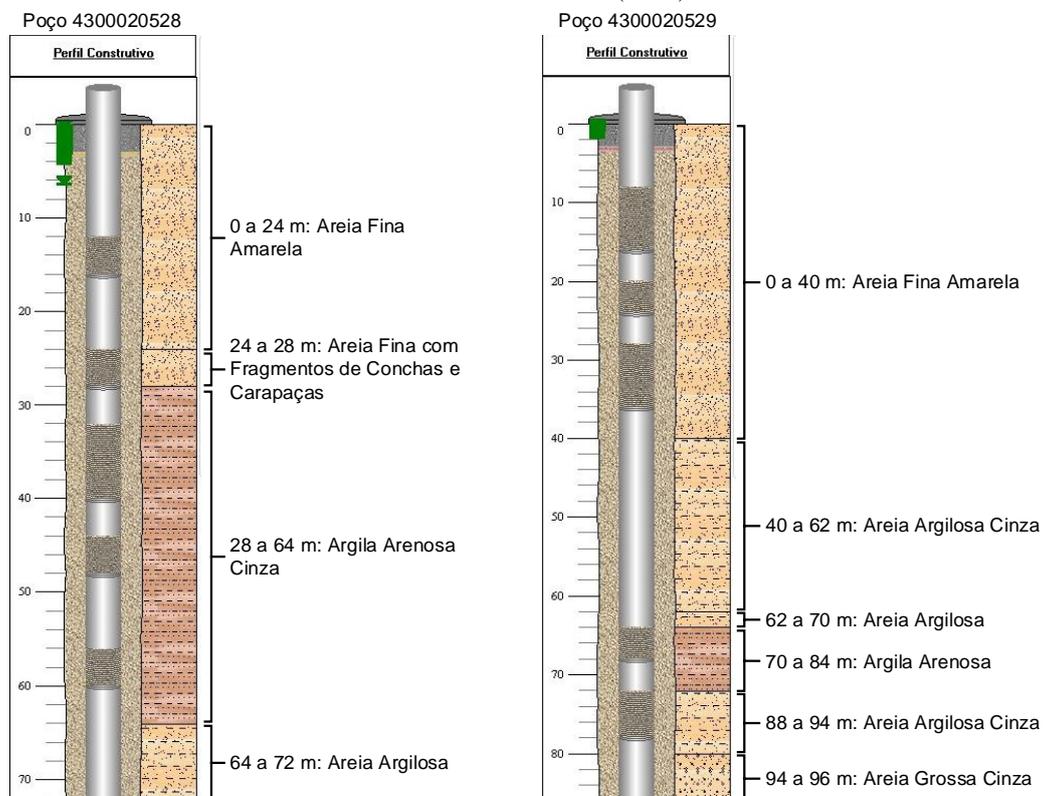


Figura 32– Perfis construtivos dos poços 4300020528 e 4300020529 da RIMAS/CPRM no Litoral Norte.

Fonte: RIMAS/CPRM (2022).

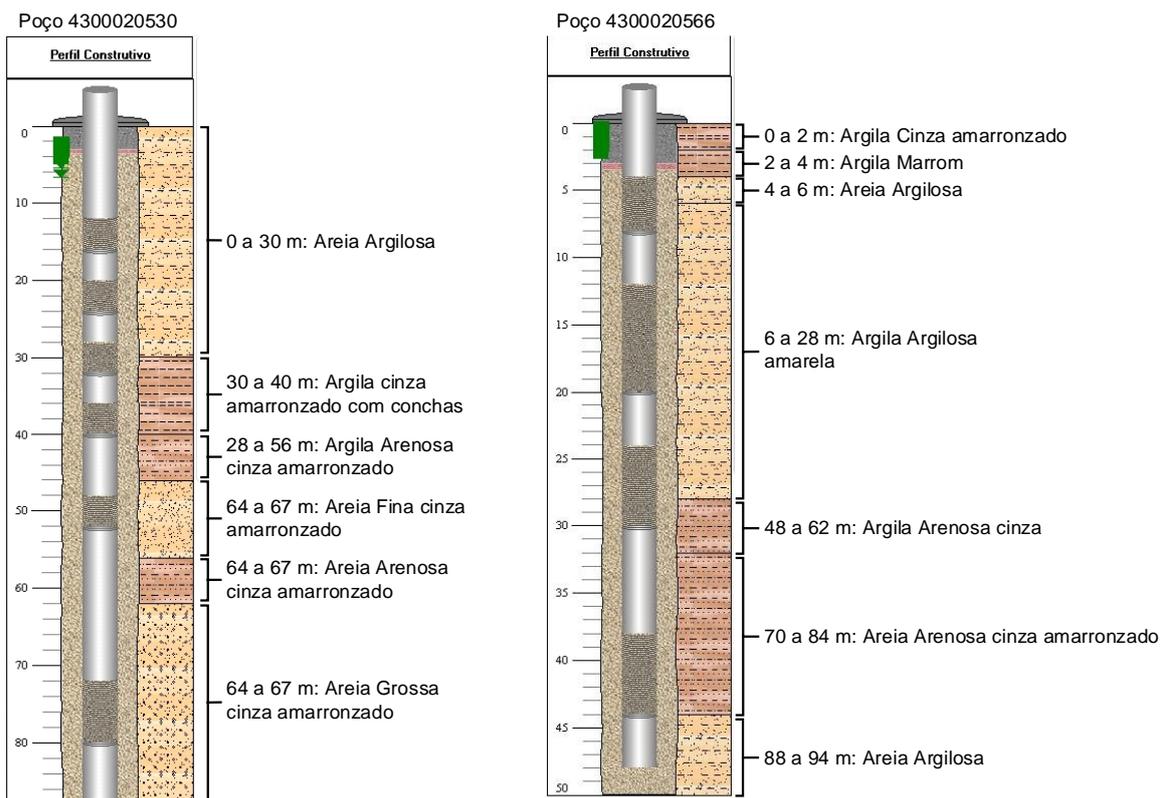


Figura 33– Perfis construtivos dos poços 4300020530 e 4300020566 da RIMAS/CPRM no Litoral Norte.

Fonte: RIMAS/CPRM (2022).

Tabela 9 – Informações Construtivas e Geológicas sobre os poços de monitoramento da RIMAS/CPRM no Litoral Norte.

Poço	Município	Profundidade Final (m)	Litologia	Filtros
4300020526	Capão da Canoa	67	0-4m: Areia fina 4-28m: Areia argilosa 28-56m: Argila 56-64m: Areia argilosa 64-67m: Areia fina	de 7m até 15m; de 19m até 27m; de 31m até 35m; de 39m até 43m; de 47m até 55m
4300020527	Capão da Canoa	100	0-12m: Areia fina 12-16m: Areia fina 16-46m: Areia argilosa 46-48m: Argila arenosa 48-62m: Areia fina 62-70m: Argila arenosa 70-84m: Areia grossa 84-88m: Areia média 88-94m: Areia grossa 94-96m: Argila 96-100m: Areia argilosa	de 10m até 14m; de 18m até 22m; de 26m até 30m; de 34m até 40m; de 44m até 50m; de 58m até 66m; de 74m até 78m; de 86m até 90m
4300020528	Capão da Canoa	72	0-24m: Areia fina 24-28m: Areia fina 28-64m: Argila arenosa 64-72m: Areia argilosa	de 12m até 16m; de 24m até 28m; de 32m até 40m; de 44m até 48m; de 56m até 60m
4300020529	Xangri-lá	86	0-40m: Areia fina 40-62m: Areia argilosa 62-64m: Areia argilosa 64-72m: Argila arenosa	de 8m até 16m; de 20m até 24m; de 28m até 36m; de 64m até 68m;

Poço	Município	Profundidade Final (m)	Litologia	Filtros
			72-80m: Areia argilosa 80-86m: Areia grossa	de 72m até 78m
4300020530	Osório	88	0-30m: Areia argilosa 30-40m: Argila 40-46m: Argila arenosa 46-56m: Areia fina 56-62m: Argila arenosa 62-88m: Areia grossa	de 12m até 16m; de 20m até 24m; de 28m até 32m; de 36m até 40m; de 48m até 52m; de 72m até 80m
4300020566	Terra de Areia	50	0-2m: Argila 2-4m: Argila 4-6m: Areia argilosa 6-28m: Areia argilosa 28-32m: Argila arenosa 32-44m: Argila arenosa 44-50m: Areia argilosa	de 4m até 8m; de 12m até 20m; de 24m até 30m; de 38m até 44m

Fonte: elaborado e adaptado a partir de RIMAS/CPRM (2022).

Nota-se que todos os poços contemplam filtros que captam em camadas aquíferas de areias finas, médias e argilosas, que compõem o SAC. Os poços 4300020530 e 4300020566 apresentam camadas superficiais, respectivamente, de Areia argilosa (0-30m) e Argila (0-4m), de menor permeabilidade em relação às camadas superficiais dos demais poços, compostas por areias finas. É importante observar que os filtros nos seis poços se encontram em mais de uma camada aquífera do SAC, de modo que as variações de nível representam o comportamento geral do Sistema Aquífero, não sendo atribuídas a alguma camada específica.

A plataforma RIMAS também apresenta algumas informações sobre os testes de bombeamento, do tipo rebaixamento com bomba submersa, presentes na Tabela 10. Destaca-se a vazão específica obtida para o poço 4300020529, de 40,25 m³/h/m, que é mais acentuada em relação aos demais valores, que ficam entre 1,74 e 6,15 m³/h/m.

Tabela 10 – Informações sobre os testes de bombeamento dos poços de estudo.

Código Poço	Nível Estático (m)	Nível Dinâmico (m)	Vazão Específica (m ³ /h/m)	Vazão após Estabilização (m ³ /h)	Duração do teste (h)
4300020526	1,71	2,44	3,288	2,4	12
4300020527	2,55	2,94	6,154	2,4	12
4300020528	3,47	4,44	2,433	2,36	12
4300020529	2,12	2,88	40,25	30,59	11
4300020530	5,38	6,47	1,844	2,01	12
4300020566	2,73	4,09	1,743	2,37	12

Fonte: elaborado e adaptado a partir de RIMAS/CPRM (2022).

5.2. Análise da Dinâmica do Nível de Água e Precipitação

A análise da dinâmica do nível de água e precipitação parte dos dados presentes na Figura 34. Nota-se uma variabilidade bastante elevada de níveis de água, com níveis entre 0 e 2 metros, para os poços 4300020526, 4300020527 e 4300020529 e ausência de comportamento sazonal. Nesses três poços, não parece ocorrer uma tendência bem demarcada de aumento ou decréscimo dos níveis ao longo do período completo das medições, havendo leve aumento dos valores (queda do nível) apenas no último ano (2020) para o poço 4300020527.

Nos poços 4300020528 e 43000205666 a variabilidade dos dados de nível é moderada, com variações em intervalos maiores: de 1 a 4 metros e 1 a 3 metros, respectivamente. No poço 4300020528, observa-se uma queda nos níveis entre 2016 e 2017, que pode estar associado a algum problema nas medições ou bombeamentos no entorno dos poços, como será discutido também no item 5.3. No poço 4300020566, observa-se valores menores de nível (em torno de 1 metro) no período inicial apresentado (2015), em relação ao período posterior, com níveis em torno de 1,5 a 2 metros.

Os dados de nível no poço de Osório (4300020530) apresentam menos flutuações, entre 2 e 5 metros, com maior demarcação de sazonalidade (menores níveis de outubro a dezembro e maiores níveis de março a maio). Nesse poço, observam-se valores maiores de nível (queda do nível freático) a partir de 2016, em relação aos anos anteriores, de 2014 e 2015, com possíveis fatores para essa queda como a influência da Lagoa dos Barros e a intensificação dos usos de água no entorno do poço e da Lagoa.

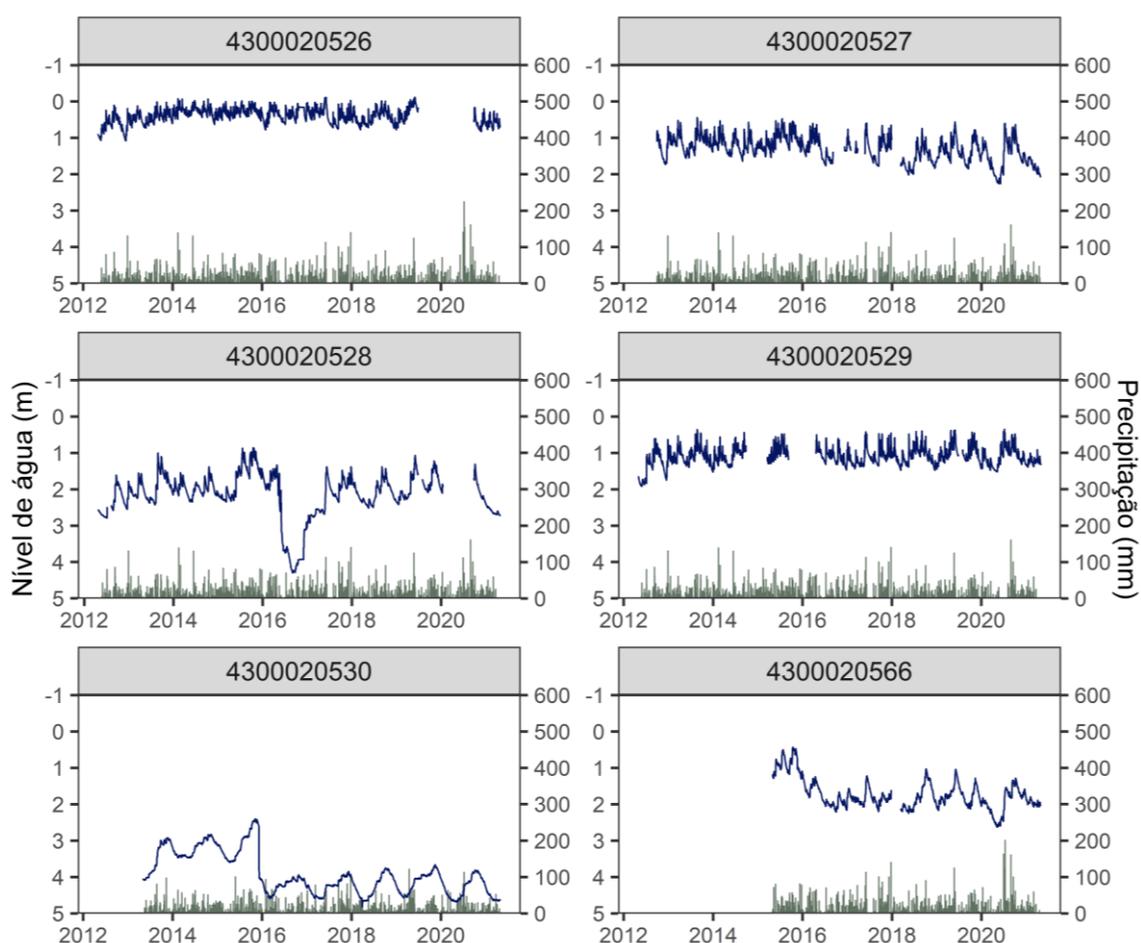


Figura 34 – Dados de nível de água (em azul, gráfico de linha) e precipitação (em cinza, gráfico de coluna) para os poços RIMAS no Litoral Norte do Rio Grande do Sul.
 Fonte: elaboração própria.

Os gráficos de nível e precipitação representados na Figura 34 foram incluídos em tamanho ampliado no Apêndice A, ao final do trabalho.

5.2.1. Autocorrelação

A avaliação da autocorrelação foi feita por ano hidrológico e para os períodos completos, presente na Tabela 11, com os gráficos para os períodos maiores incluídos na Figura 35.

Tabela 11- Resultados da análise de autocorrelação para os dados de nível d'água nos 6 poços da RIMAS/CPRM analisados.

Poço	Ano Hidrológico	r (acf)	1º maior lag até r = 0,2 (dias)	Poço	Ano Hidrológico	r (acf)	1º maior lag até r = 0,2 (dias)
4300020526	2012-2013	0.2048	29	4300020529	2012-2013	0.2038	39
4300020526	2013-2014	0.2095	52	4300020529	2013-2014	0.2037	35
4300020526	2014-2015	0.2207	14	4300020529	2012-2014	0.2078	44
4300020526	2015-2016	0.2204	28	4300020529	2016-2017	0.2343	14
4300020526	2016-2017	0.2205	15	4300020529	2017-2018	0.2352	14
4300020526	2017-2018	0.2023	24	4300020529	2018-2019	0.2036	41
4300020526	2018-2019	0.2088	34	4300020529	2016-2019	0.2087	18
4300020526	2012-2019	0.2001	57	4300020529	2020-2021	0.2065	49
4300020527	2013-2014	0.2052	29	4300020530	2013-2014	0.2077	69
4300020527	2014-2015	0.2122	14	4300020530	2014-2015	0.2038	64
4300020527	2015-2016	0.2119	28	4300020530	2015-2016	0.2050	74
4300020527	2013-2016	0.2002	32	4300020530	2016-2017	0.2063	72
4300020527	2018-2019	0.2065	39	4300020530	2017-2018	0.2004	59
4300020527	2019-2020	0.2252	30	4300020530	2018-2019	0.2092	64
4300020527	2020-2021	0.2034	44	4300020530	2019-2020	0.2119	67
4300020527	2018-2021	0.2088	43	4300020530	2020-2021	0.2082	66
4300020528	2013-2014	0.2038	40	4300020530	2013-2021	0.3292	181
4300020528	2014-2015	0.2022	38	4300020566	2015-2016	0.2078	69
4300020528	2015-2016	0.2003	38	4300020566	2016-2017	0.2111	21
4300020528	2016-2017	0.2079	69	4300020566	2015-2017	0.2012	187
4300020528	2017-2018	0.2221	22	4300020566	2018-2019	0.2198	48
4300020528	2018-2019	0.2042	49	4300020566	2019-2020	0.2063	44
4300020528	2013-2019	0.2032	157	4300020566	2020-2021	0.2032	51
				4300020566	2018-2021	0.2077	61

Legenda

Maior lag até r = 0,2		Menor lag até r = 0,2
-----------------------	--	-----------------------

Fonte: elaboração própria.

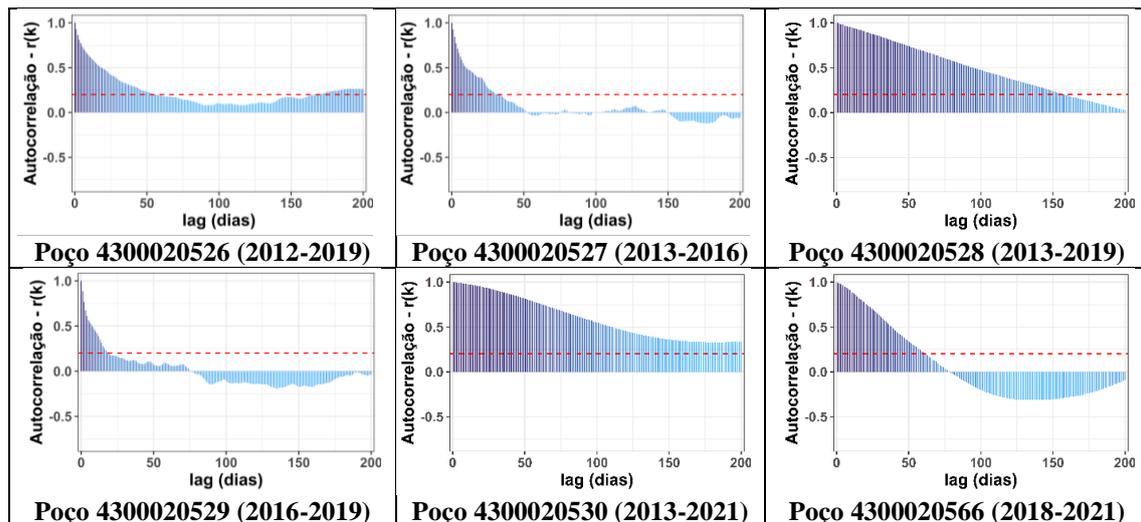


Figura 35 – Coeficientes de autocorrelação obtidos para os dados de nível de água dos Poços RIMAS no Litoral Norte do Rio Grande do Sul.

Fonte: elaboração própria.

Ocorrem valores reduzidos de lags (mínimos de 14 dias) com coeficientes de autocorrelação maiores que 0,2 nos poços 4300020526, 4300020527 e 4300020529. Isso indica menor persistência entre os níveis e maior variabilidade entre os valores.

Valores intermediários são observados nos dados de nível dos poços 4300020528 (entre 22 e 157 dias de 1º maior lag para r maior que 0,2) e 4300020566 (entre 21 e 187 dias de 1º maior lag para r maior que 0,2). O poço de Osório apresenta a maior persistência entre os níveis, que corrobora a menor variabilidade observada e que pode estar associado à presença de sedimentos com maiores teores de argila na região do poço.

Alguns gráficos de autocorrelação apresentam retornos de valores significativos após uma queda de relação entre os níveis, o que ocorre, por exemplo, no gráfico para o Poço 4300020526 (Figura 35). Isso ocorre para os poços 4300020526 (2012-2013, 2013-2014, 2014-2015, 2018-2019 e 2012-2019), 4300020527 (2014-2015 e 2018-2019) e 4300020529 (2012-2013, 2012-2014, 2016-2017, 2020-2021) e está associado a um comportamento de repetição dos valores das medições de nível ao longo do tempo e menor intervalo (diferença entre o máximo e mínimo) de variação dos níveis.

5.2.2. Correlação cruzada

Em sequência, apresenta-se a avaliação da correlação cruzada, com os valores por ano hidrológico na Tabela 12 e com os gráficos para os períodos maiores na Figura 36.

Tabela 12- Resultados da análise de correlação cruzada para os dados de precipitação e nível d'água nos 6 poços da RIMAS/CPRM analisados.

Poço	Ano Hidrológico	r máximo (ccf)	lag com r máximo	Significativo?	Poço	Ano Hidrológico	r máximo (ccf)	lag com r máximo	Significativo?
4300020526	2012-2013	-0.361	0	Sim	4300020529	2012-2013	-0.277	0	Sim
4300020526	2013-2014	-0.371	0	Sim	4300020529	2013-2014	-0.397	0	Sim
4300020526	2014-2015	-0.333	0	Sim	4300020529	2012-2014	-0.330	0	Sim
4300020526	2015-2016	-0.386	0	Sim	4300020529	2016-2017	-0.202	0	Sim
4300020526	2016-2017	-0.297	0	Sim	4300020529	2017-2018	-0.388	0	Sim
4300020526	2017-2018	-0.357	1	Sim	4300020529	2018-2019	-0.344	0	Sim
4300020526	2018-2019	-0.334	0	Sim	4300020529	2016-2019	-0.322	0	Sim
4300020526	2012-2019	-0.316	0	Sim	4300020529	2020-2021	-0.091	10	Não
4300020527	2013-2014	-0.360	0	Sim	4300020530	2013-2014	-0.089	23	Sim
4300020527	2014-2015	-0.288	1	Sim	4300020530	2014-2015	-0.115	11	Sim
4300020527	2015-2016	-0.348	1	Sim	4300020530	2015-2016	-0.089	17	Não
4300020527	2013-2016	-0.333	1	Sim	4300020530	2016-2017	-0.062	6	Não
4300020527	2018-2019	-0.254	1	Sim	4300020530	2017-2018	-0.109	1	Sim
4300020527	2019-2020	-0.293	0	Sim	4300020530	2018-2019	0.102	-17	Sim
4300020527	2020-2021	-0.197	12	Sim	4300020530	2019-2020	-0.097	19	Não
4300020527	2018-2021	-0.207	1	Sim	4300020530	2020-2021	0.096	-21	Não
4300020528	2013-2014	-0.197	2	Sim	4300020530	2013-2021	-0.072	31	Sim
4300020528	2014-2015	-0.113	5	Sim	4300020566	2015-2016	-0.098	7	Não
4300020528	2015-2016	-0.183	2	Sim	4300020566	2016-2017	0.104	-3	Sim
4300020528	2016-2017	0.055	-21	Não	4300020566	2015-2017	-0.142	7	Sim
4300020528	2017-2018	-0.196	6	Sim	4300020566	2018-2019	-0.113	2	Sim
4300020528	2018-2019	-0.163	3	Sim	4300020566	2019-2020	-0.214	13	Sim
4300020528	2013-2019	-0.111	2	Sim	4300020566	2020-2021	-0.147	12	Sim
					4300020566	2018-2021	-0.156	13	Sim



Fonte: elaboração própria.

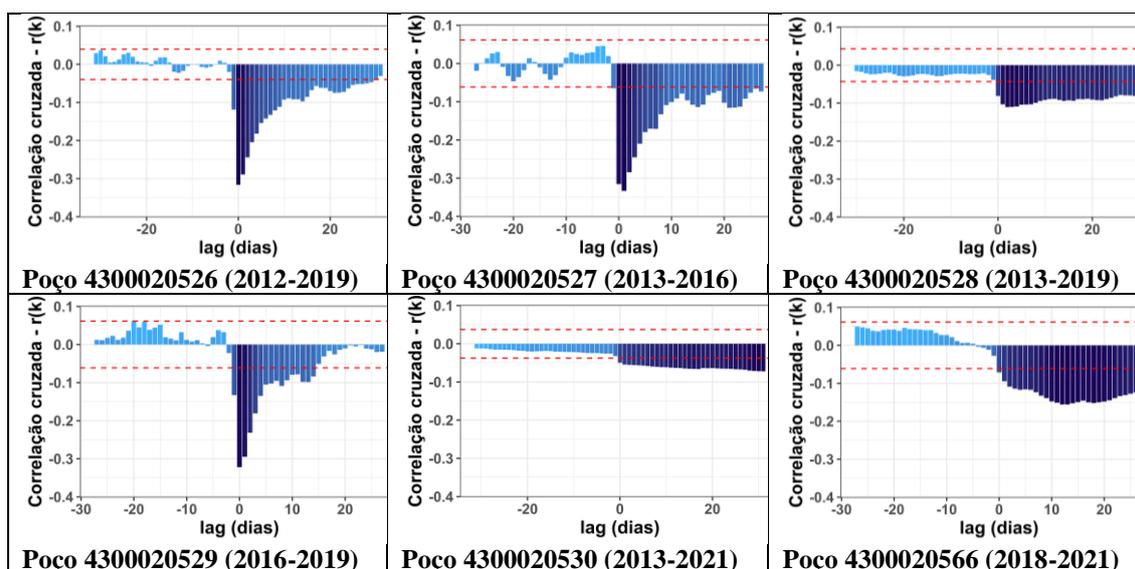


Figura 36– Coeficientes de correlação cruzada obtidos para os dados de nível de água dos Poços RIMAS no Litoral Norte do Rio Grande do Sul.

Fonte: elaboração própria.

Os tempos de resposta estimados (*lags* com *r* absoluto máximo) são menores para os dados dos poços 4300020526, 4300020527 e 4300020529, em geral entre 0 e 1 dias,

com os maiores valores absolutos dos coeficientes de correlação cruzada estimados, que indica maior relação entre os níveis e a precipitação. Nos dias seguintes para esses poços, porém, ocorre uma queda acentuada nos valores absolutos dos coeficientes de correlação cruzada, o que indica uma resposta mais instantânea à precipitação, com rápido ‘esquecimento’ da condição inicial, como apontado na autocorrelação.

A análise para o poço 4300020528 também resulta em estimativas de tempos de resposta reduzidas, entre 2 e 6 dias, porém com menor correlação entre os níveis e a precipitação do que os poços citados. Os resultados para o poço 4300020566 expressam valores intermediários de tempos de resposta estimados (entre 2 e 13 dias). Os menores coeficientes de correlação cruzada e maiores tempos de resposta são observados no poço 4300020530, indicando a menor relação entre os níveis e a precipitação.

É interessante observar que para esses três poços (4300020528, 4300020530 e 4300020566), embora a relação instantânea ($lag = 0$) entre os níveis e a precipitação seja menor do que nos outros poços, ela apresenta um padrão de maior estabilidade, isto é, os coeficientes de correlação cruzada não apresentam quedas acentuadas. Assim, observa-se que nesses poços as respostas à precipitação são mais graduais, com impacto nos níveis ao longo de diversos dias.

Também se destaca que os dados de todos os poços apresentam em algum grau o retorno do aumento do coeficiente de correlação cruzada (em termos absolutos) após uma queda, configurando “picos secundários” como se aponta na Figura 37. Conforme discutido em Cai e Offerdinger (2016), esse comportamento pode estar associado a outros mecanismos que podem contribuir para a elevação dos níveis, além da infiltração direta da precipitação, como a conectividade entre as camadas aquíferas e as lagoas costeiras do Litoral Norte.

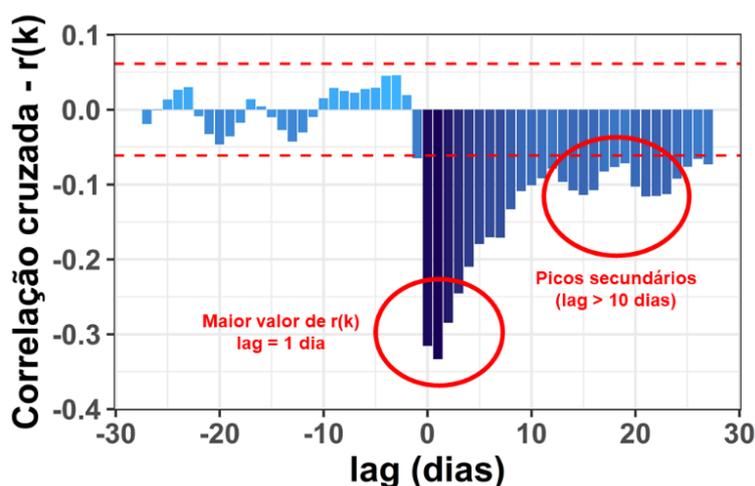


Figura 37 – Exemplo da ocorrência de picos secundários de coeficiente de correlação cruzada, para o poço 4300020526 (2012-2019).

Fonte: elaboração própria.

Em sequência, a Tabela 13 apresenta a consolidação da correlação cruzada *sliding windows*. Para os intervalos de 90 dias, sobrepostos por 45 dias, a aplicação corroborou as conclusões obtidas com a análise por ano hidrológico descrita acima.

Os resultados expressam menores tempos de resposta nos poços 4300020526, 4300020527 e 4300020529, com maior ocorrência de coeficientes de correlação cruzada significativos, representando uma relação maior entre nível e precipitação ao longo do período analisado. Os poços 4300020528, 4300020530 e 4300020566 apresentam maiores tempos de resposta, assim como relação menos intensa e significativa entre os níveis e a precipitação.

Tabela 13 - Resultados da aplicação da correlação cruzada sliding windows entre a precipitação e o nível d'água para os 6 poços da RIMAS/CPRM analisados.

Poços	Núm. Intervalos	Intervalos com picos significativos	% de intervalos com picos significativos	Tempo de resposta mínimo (dias)	Tempo de resposta mediano (dias)	Tempo de resposta máximo (dias)	Menor r (ccf) significativo	Maior r (ccf) significativo
4300020526	56	53	95%	0	0	1	-0.62389	-0.25139
4300020527	48	39	81%	0	1	16	-0.51207	-0.21297
4300020528	48	27	56%	1	3	16	-0.39632	-0.20313
4300020529	48	37	77%	0	0	5	-0.64365	-0.22248
4300020530	64	17	27%	0	3	16	-0.35644	-0.21888
4300020566	40	16	40%	2	5	14	-0.41379	-0.20652

Legenda



Fonte: elaboração própria.

A Figura 38 apresenta os tempos de resposta estimados entre o nível e a precipitação dos poços, com os valores positivos (entre 0 e 16 dias) e significativos.

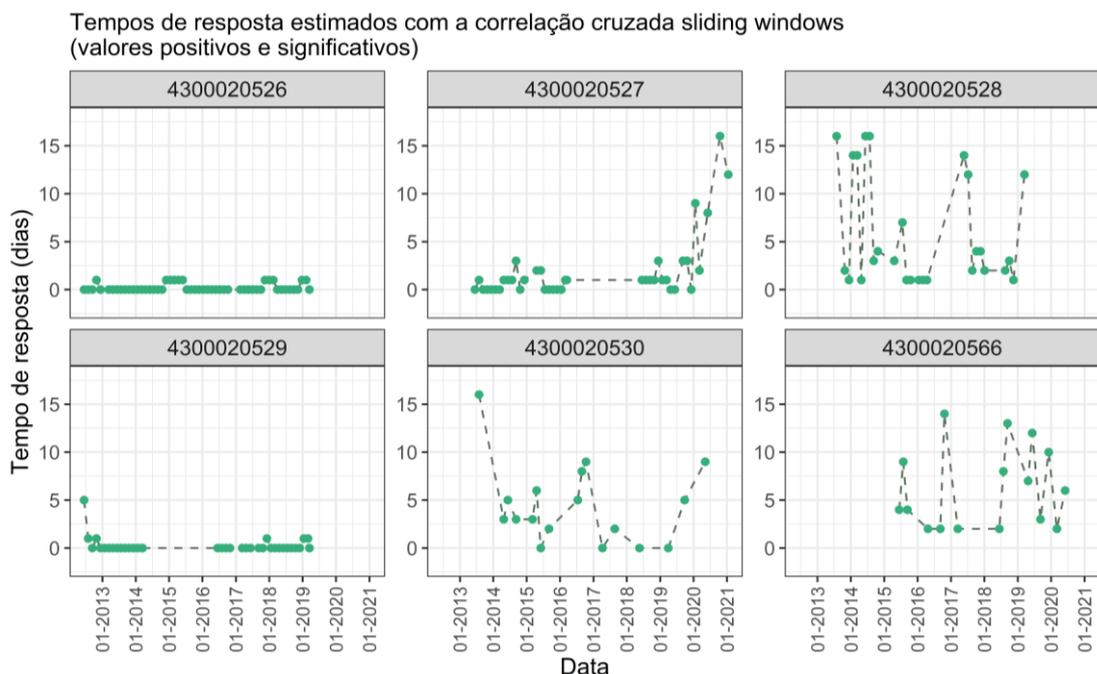


Figura 38 – Tempos de resposta em relação à precipitação ao longo do tempo para os 11 poços da RIMAS/CPRM analisados, para a Correlação Cruzada Sliding Windows.

Fonte: elaboração própria.

Observa-se que não somente a resposta é mais rápida nos poços 4300020526, 4300020527 e 4300020529, mas também com menores variações ao longo dos intervalos. Os demais poços apresentam respostas mais lentas de variação do nível em relação à

precipitação e maior variabilidade das respostas, porém sem um padrão de sazonalidade bem demarcado.

A análise dos dados de nível, complementados pelos dados de precipitação, permite observar diferentes dinâmicas entre os poços RIMAS no Litoral Norte. Enquanto os poços 430020526, 4300020527 e 4300020529 apresentam respostas rápidas e maior variação entre os níveis, o poço 4300020528 apresenta respostas um pouco mais lentas, seguido pelo poço 4300020566. O poço Osório se destaca por flutuações mais graduais nos níveis e menor relação de tal variação com a precipitação. Tais conclusões podem contribuir para a compreensão das análises de recarga, apresentadas em sequência.

5.3. Análise das estimativas de Recarga

As aplicações RISE e MRC resultaram em estimativas de taxas de recarga médias a altas, como representa a Tabela 14, com valores entre 0,56 mm/dia (poço 4300020530, $S_y = 20\%$, aplicação RISE) até 2,93 mm/dia (poço 4300020527, $S_y = 30\%$, aplicação MRC).

Tabela 14 - Resultados da estimativa da Taxa de Recarga nos poços RIMAS no Litoral Norte, para $S_y = 20\%$, 25% e 30% .

Poço	Período	Nº dias	RISE				MRC			
			Soma ΔH (m)	$S_y = 20\%$	$S_y = 25\%$	$S_y = 30\%$	Soma ΔH (m)	$S_y = 20\%$	$S_y = 25\%$	$S_y = 30\%$
				R (mm/dia)	R (mm/dia)	R (mm/dia)		R (mm/dia)	R (mm/dia)	R (mm/dia)
4300020526	2012-2019	2556	17,17	1,34	1,68	2,02	17,88	1,40	1,75	2,10
4300020527	2013-2016 e 2018-2021	2192	20,37	1,86	2,32	2,79	21,39	1,95	2,44	2,93
4300020528	2013-2019	2191	16,62	1,52	1,90	2,28	18,90	1,73	2,16	2,59
4300020529	2012-2014, 2016-2019 e 2020-2021	2190	15,42	1,41	1,76	2,11	16,52	1,51	1,89	2,26
4300020530	2013-2021	2922	8,16	0,56	0,70	0,84	9,91	0,68	0,85	1,02
4300020566	2015-2017 e 2018-2021	1827	11,73	1,28	1,61	1,93	12,52	1,37	1,71	2,06

Fonte: elaboração própria.

Os maiores valores de recarga são observados nos poços 4300020527, 4300020528 e 4300020529, com valores um pouco menores nos poços 4300020526 e 4300020566. Os menores valores são relacionados ao poço 4300020530, entre 1/2 e 1/3 das taxas nos demais poços. A Figura 39 apresenta os valores de acordo com o ano hidrológico (média entre as aplicações RISE e MRC, para o S_y intermediário, de 25%).

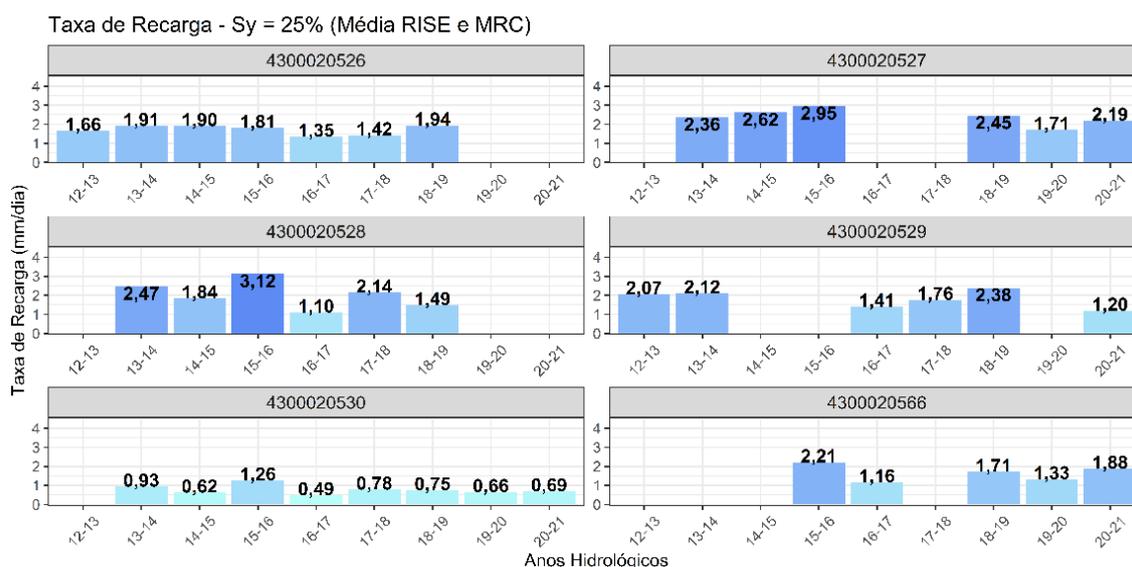


Figura 39 – Resultados da estimativa de Taxa de Recarga nos anos hidrológicos no poços RIMAS no Litoral Norte, para $S_y = 20\%$, 25% e 30% .

Fonte: elaboração própria.

Verifica-se uma considerável variabilidade interanual das taxas de recarga estimadas, com máximos no ano hidrológico de 2015-2016 e mínimos no ano hidrológico posterior, de 2016-2017 (para os poços 4300020527, 4300020528, 4300020530 e 4300020566). Isso pode estar associado à relação entre a recarga e a precipitação, uma vez que, no período de 2015-2016 ocorreu o fenômeno El Niño (LARINI, 2017) observando-se um aumento de precipitação nas estações pluviométricas seguido por decréscimos nos acumulados anuais no ano hidrológico seguinte (associado ao fenômeno La Niña).

A variação acentuada entre as taxas de recarga no poço 4300020528 entre 2015-2016 e 2016-2017 também está relacionada com a queda acentuada dos níveis nesse período (destacado na Figura 34). Essa queda que pode estar associada a algum problema no sensor durante esse período, ao bombeamento para coleta de amostras de água ou até a outro bombeamento no entorno do poço, dentre outras interferências possíveis. De qualquer modo, não é observada uma tendência de acréscimo ou decréscimo das taxas de recarga ao longo do tempo, para qualquer dos poços.

A Tabela 15 apresenta os resultados de estimativa de razão Recarga e Precipitação, com valores entre 14% (poço 4300020530, para $S_y = 20\%$) até 55% (poço 4300020527, para $S_y = 30\%$), considerando a média entre aplicações RISE e MRC. A análise corrobora a diferenciação entre os poços observada nos resultados de taxa de recarga, com valores mais elevados nos poços 4300020527, 4300020528 e 4300020529, valores intermediários nos poços 4300020526 e 4300020566 e menores valores no poço de Osório (4300020530).

Tabela 15 - Resultados da estimativa de razão Recarga/Precipitação nos poços RIMAS no Litoral Norte, para $S_y = 20\%$, 25% e 30% .

Poço	Período	Precip. Média (mm/ano)	Média RISE e MRC		
			$S_y = 20\%$ R/P (%)	$S_y = 25\%$ R/P (%)	$S_y = 30\%$ R/P (%)
4300020526	2012-2019	1877,2	27%	33%	40%
4300020527	2013-2016 e 2018-2021	1907,1	36%	46%	55%
4300020528	2013-2019	1877,2	32%	39%	47%
4300020529	2012-2014, 2016-2019 e 2020-2021	1624,2	33%	41%	49%
4300020530	2013-2021	1583,1	14%	18%	21%
4300020566	2015-2017 e 2018-2021	1833,0	26%	33%	40%

Legenda	Maior valor de R/P	Menor valor de R/P
---------	--------------------	--------------------

Fonte: elaboração própria.

A Figura 40 apresenta a razão R/P para os anos hidrológicos considerados (média entre as aplicações RISE e MRC, para o S_y intermediário, de 25%). É interessante observar que também há variabilidade interanual entre anos hidrológicos, com valores elevados (maiores que 50%, nos poços 4300020527 e 4300020529), e valores mais reduzidos no poço 4300020530.

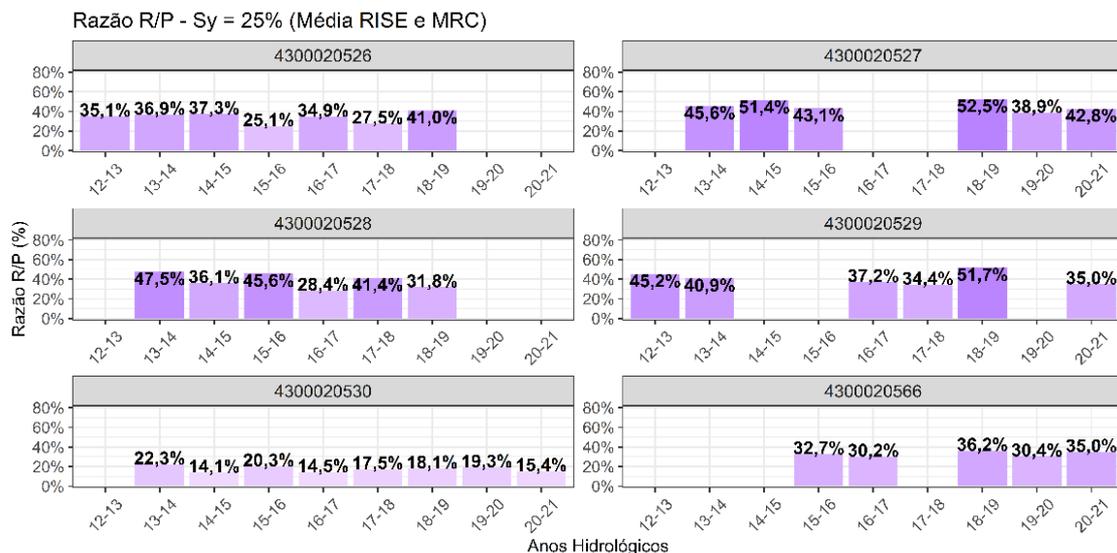


Figura 40 – Resultados da estimativa de razão Recarga/Precipitação nos anos hidrológicos no poços RIMAS no Litoral Norte, para $S_y = 20\%$, 25% e 30% .

Fonte: elaboração própria.

Nota-se que os valores encontrados se encontram em ordem de grandeza compatível com as estimativas realizada por Troian et al. (2017), que encontrou valores entre 19% e 33% nos poços do Litoral Norte, para um S_y de 25%, com o método gráfico em resolução mensal. É esperado que as aplicações do VNA em resolução diária, como realizado neste estudo, resultem em valores um pouco maiores que resoluções temporais maiores, como a quinzenal e a mensal como se aponta em Delin et al. (2007) e Senhorinho et al. (2018).

A utilização de diferentes valores de rendimento específico para a estimativa de recarga demonstrou a sensibilidade do método VNA a este parâmetro. Desse modo, entende-se que o estudo apresenta uma faixa de estimativas de recarga, com análises que

podem ser refinadas posteriormente, o que pode aumentar ou diminuir a diferenciação das estimativas entre os poços.

A análise da aplicação dos filtros (de série temporal e média móvel) também se mostrou importante para evitar a superestimativa da recarga, verificando-se, na ausência dessa aplicação, valores muito próximos ou superiores a 100%, que são pouco plausíveis, conforme apresenta a Figura 41. Observa-se que mesmo com a aplicação de somente um filtro (série temporal ou média móvel), os resultados permanecem bastante elevados, reforçando o uso combinado dos métodos propostos.

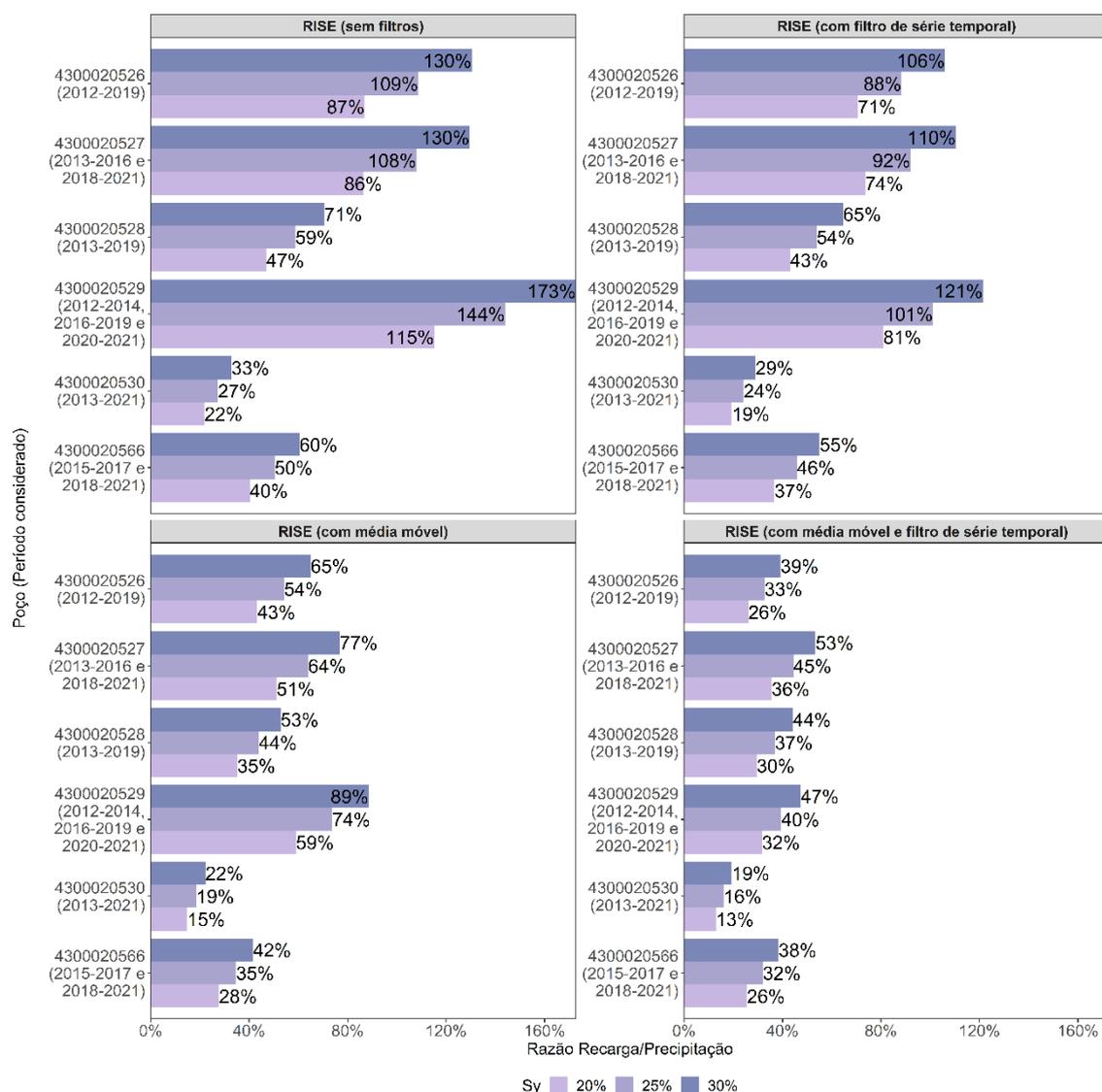


Figura 41 – Comparação entre resultados de estimativa da razão Recarga/Precipitação para os poços RIMAS no Litoral Norte do Rio Grande do Sul, de acordo com a aplicação dos filtros (Método RISE e $S_y = 20\%$).

Fonte: elaboração própria.

Isso reforça o que foi observado no trabalho de Senhorinho et al. (2017), que obteve estimativas de recarga elevadas na ausência da aplicação de filtros para o poço 4300020528, com razão R/P estimada em 94,3% (método gráfico, com resolução diária e S_y de 30%), valorizando a importância de avaliar as variações de nível com maior detalhe.

As aplicações utilizadas conseguiram diferenciar os poços RIMAS do Litoral Norte em relação a sua recarga, com resultados que apresentam dois comportamentos distintos:

- (i) Maiores valores de recarga nos poços com respostas mais rápidas à precipitação, maior relação entre os níveis e a precipitação e menor persistência entre os dados de nível (principalmente nos poços 4300020527 e 4300020529);
- (ii) Menores valores de recarga nos poços com respostas mais lentas e graduais, menor relação entre os níveis e a precipitação e maior persistência entre os dados de nível (principalmente no poço 4300020530).

Entende-se que esse comportamento não segue uma lógica binária, mas sim que alguns poços, como o 4300020526, 4300020528 e 4300020566, podem apresentar características intermediárias de resposta e recarga, devido aos diversos fatores relacionados à variação dos níveis e ocorrência da recarga. Tais análises serão discutidas a partir da consolidação de fatores no entorno dos poços, a seguir.

5.4. Discussão sobre a Recarga

À luz dos resultados apresentados nos itens anteriores, este item se propõe a avaliar as condições de entorno dos poços, para qualificar os diferentes comportamentos de variação de nível e recarga observados.

5.4.1. Uso e Ocupação do Solo

A avaliação das classes de uso de solo foi realizada no entorno dos poços (*buffer* de 1km), no sentido de avaliar os remanescentes de vegetação e a presença de atividades antrópicas na região. Os dados de uso do solo do Projeto MAPBIOMAS foram extraídos a partir de seu repositório na plataforma Google Earth Engine, através do API disponível para a linguagem de programação Python (VAN ROSSUM; DRAKE, 2009).

A partir da Coleção 6.0 do Projeto MAPBIOMAS, para o ano base de 2020 (MAPBIOMAS, 2022), foram identificadas 10 classes distintas de uso do solo na área avaliada, descritas na Tabela 16. Algumas classes apresentam descrições diferentes por bioma, sendo que todos os poços se encontram nos limites do bioma Mata Atlântica, exceto o poço 4300020530, que se encontra no bioma Pampa, de acordo com o Mapa de Biomas e Sistema Costeiro-Marinheiro – 1:250.000 (IBGE, 2019).

Tabela 16 – Descrição das classes de uso e ocupação do solo no entorno dos poços RIMAS no Litoral Norte do Rio Grande do Sul.

Classe	Descrição
Formação Florestal	Mata Atlântica: Floresta Ombrófila Densa, Aberta e Mista e Floresta Estacional Semi-Decidual, Floresta Estacional Decidual e Formação Pioneira Arbórea. Pampa: Vegetação lenhosa com espécies arbóreas ou arbóreo-arbustivas, com predomínio de dossel contínuo. Inclui as tipologias florestais: ombrófila, decidual e semidecidual e parte das formações pioneiras.
Silvicultura	Espécies arbóreas plantadas para fins comerciais (ex. pinus, eucalipto, araucária).
Campo Alagado e Área Pantanosa	Mata Atlântica: Vegetação com influência fluvial e/ou lacustre Pampa: Áreas pantanosas, denominadas regionalmente de banhados ou marismas (influência salina). Vegetação tipicamente higrófila, com plantas aquáticas emergentes, submersas ou flutuantes. Ocupam planícies e depressões do terreno com solo encharcado e também as margens rasas de lagoas ou reservatórios de água.
Formação Campestre	Mata Atlântica: Savanas e Savanas-Estépicas Parque e Gramíneo-Lenhosa, Estepe e Pioneiras Arbustivas e Herbáceas. Pampa: Vegetação com predomínio de estrato herbáceo graminóide, com presença de dicotiledôneas herbáceas e subarbustivas. A composição botânica é influenciada pelos gradientes edáficos e topográficos e pelo manejo pastoril (pecuária). Ocorrem em solos profundos até solos rasos, incluindo terrenos rochosos (campos rupestres) e arenosos (campos arenosos ou psamófilos). Ocupam desde solos bem drenados (campos méricos), até solos com maior teor de umidade (campos úmidos - com presença marcante de ciperáceas). Na maioria dos casos corresponde à vegetação nativa, mas podem estar presentes manchas de vegetação exótica invasora ou de uso forrageiro (pastagem plantada).
Pastagem	Área de pastagem, predominantemente plantadas, vinculadas a atividade agropecuária. As áreas de pastagem natural são predominantemente classificadas como formação campestre que podem ou não ser pastejadas.
Mosaico de Agricultura e Pastagem	Mata Atlântica: Áreas de uso agropecuário onde não foi possível distinguir entre pastagem e agricultura. Pampa: Áreas de uso agropecuário, onde não foi possível distinguir entre pastagem e agricultura. Pode incluir áreas de cultivos, pastagens de inverno ou de verão e de horticultura. Inclui as áreas de descanso entre safras agrícolas (pousio).
Área Urbanizada	Áreas urbanizadas com predomínio de superfícies não vegetadas, incluindo estradas, vias e edificações.
Rio, Lago e Oceano	Rios, lagos, represas, reservatórios e outros corpos d'água
Outras Lavouras Temporárias	Áreas ocupadas com cultivos agrícolas de curta ou média duração, geralmente com ciclo vegetativo inferior a um ano, que após a colheita necessitam de novo plantio para produzir.
Restinga Arborizada	Formações florestais que se estabelecem sobre solos arenosos na região da planície costeira

Fonte: Adaptado de MAPBIOMAS (2021).

A Figura 42 até a Figura 47 apresentam a classificação do uso e cobertura do solo no entorno dos poços. Em sequência, a Figura 48 resume o percentual de área que cada classe ocupa no buffer de 1km.

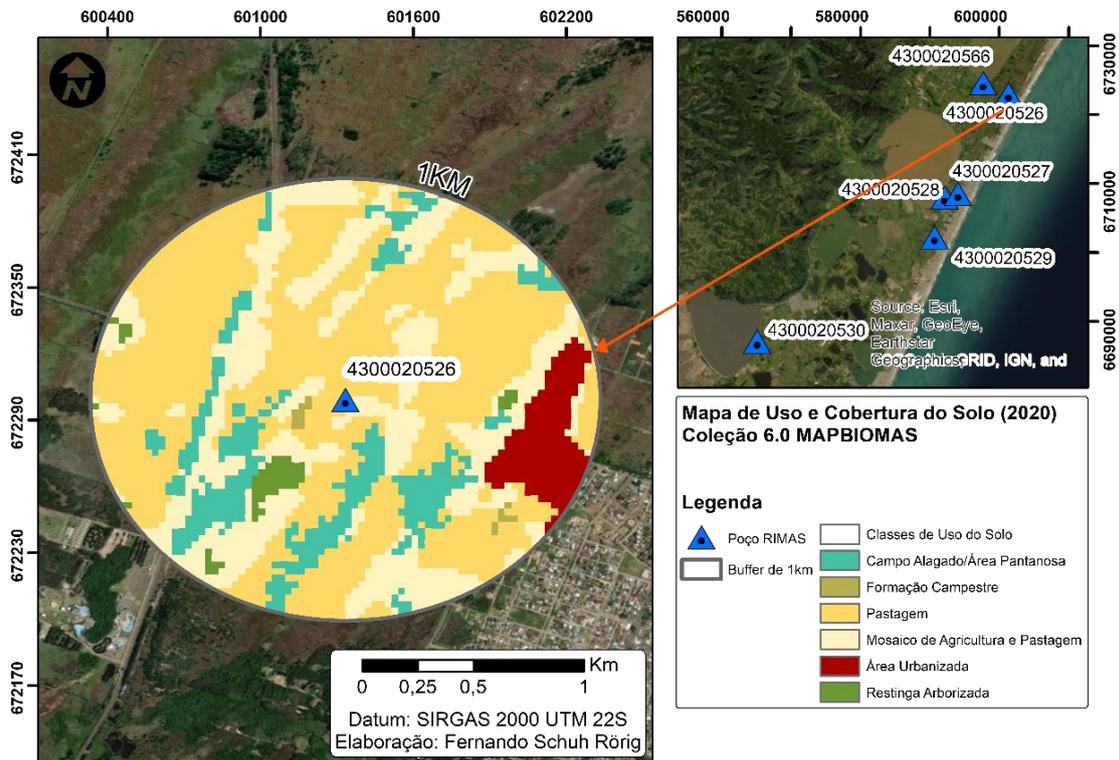


Figura 42– Classes de uso e cobertura do solo no entorno do Poço RIMAS 4300020526 (buffer de 1km).

Fonte: Elaborado a partir de MAPBIOMAS (2021).

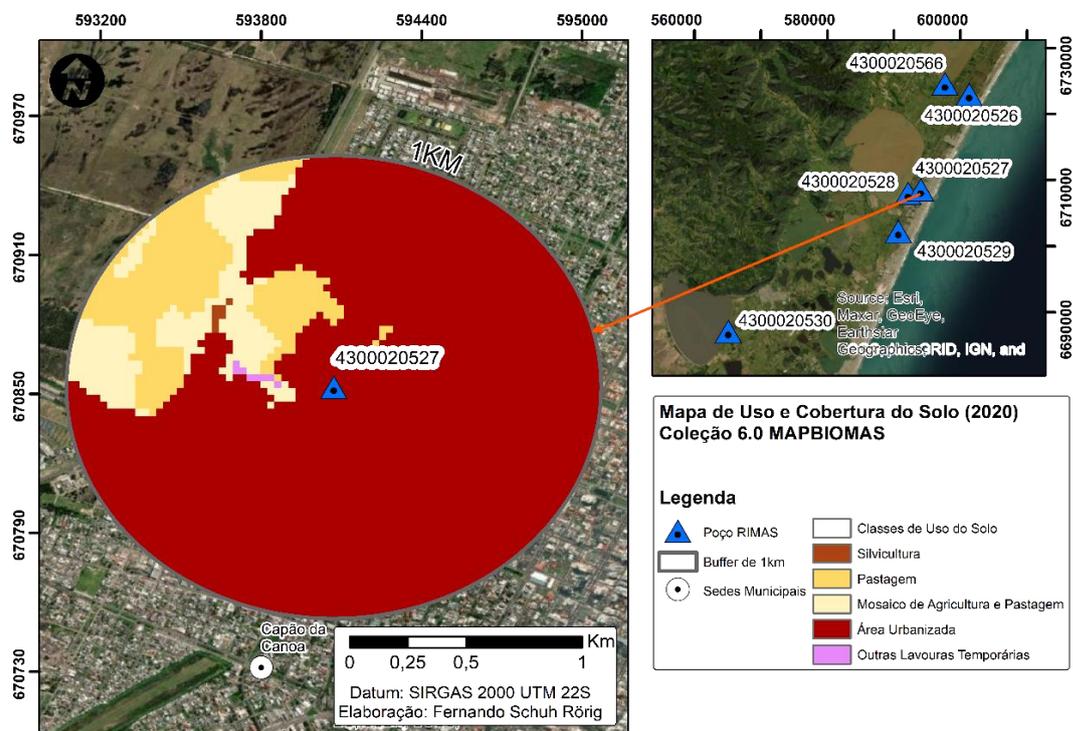


Figura 43 – Classes de uso e cobertura do solo no entorno do Poço RIMAS 4300020527 (buffer de 1km).

Fonte: Elaborado a partir de MAPBIOMAS (2021).

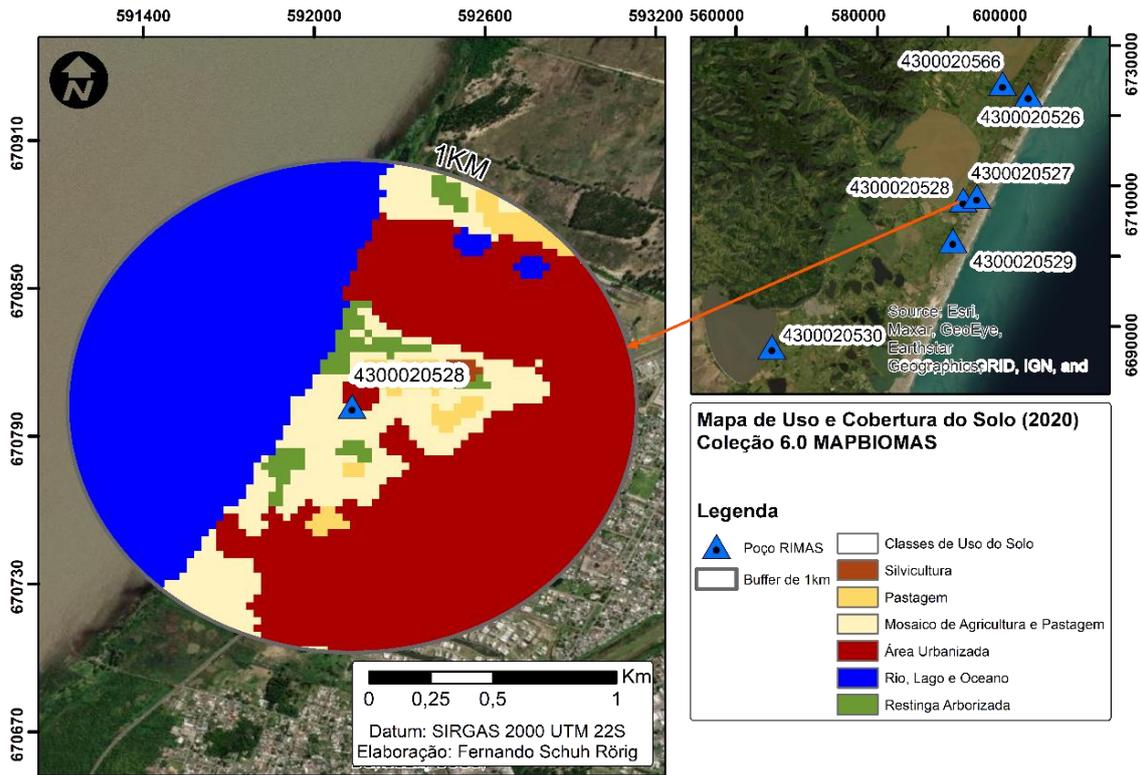


Figura 44 – Classes de uso e cobertura do solo no entorno do Poço RIMAS 4300020528 (buffer de 1km).

Fonte: Elaborado a partir de MAPBIOMAS (2021).

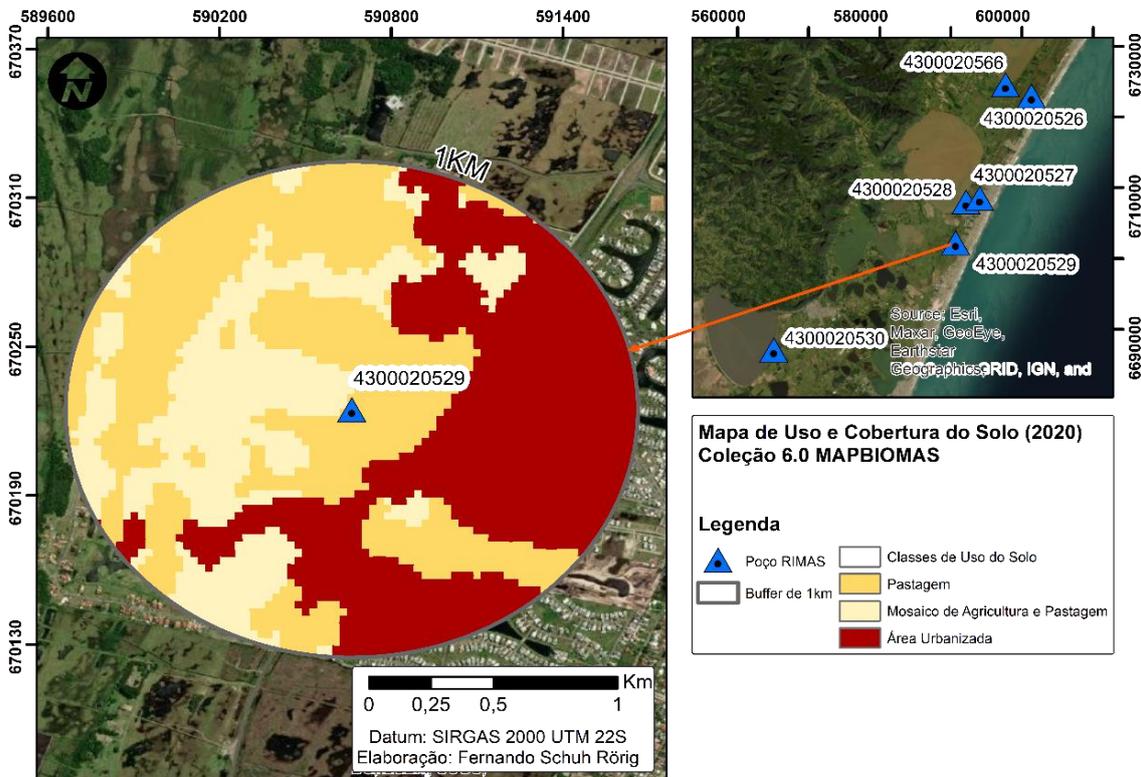


Figura 45– Classes de uso e cobertura do solo no entorno do Poço RIMAS 4300020529 (buffer de 1km).

Fonte: Elaborado a partir de MAPBIOMAS (2021).

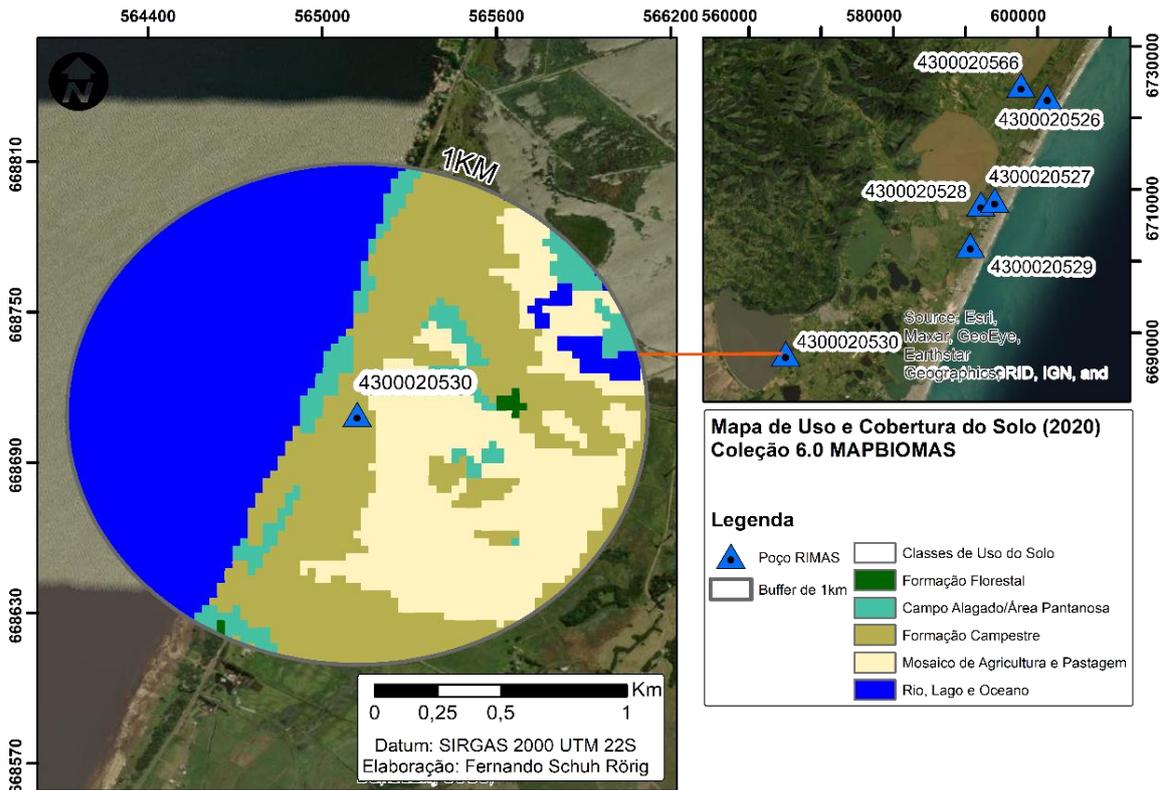


Figura 46– Classes de uso e cobertura do solo no entorno do Poço RIMAS 4300020530 (buffer de 1km).

Fonte: Elaborado a partir de MAPBIOMAS (2021).

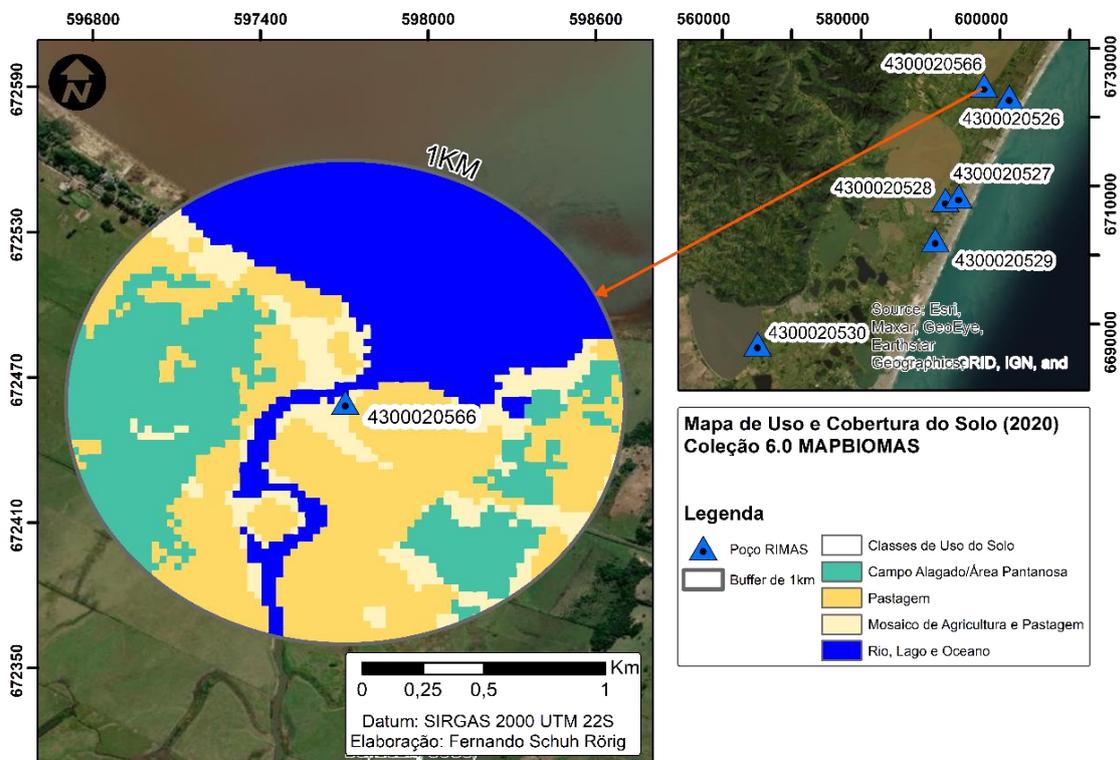


Figura 47 – Classes de uso e cobertura do solo no entorno do Poço RIMAS 4300020566 (buffer de 1km).

Fonte: Elaborado a partir de MAPBIOMAS (2021).

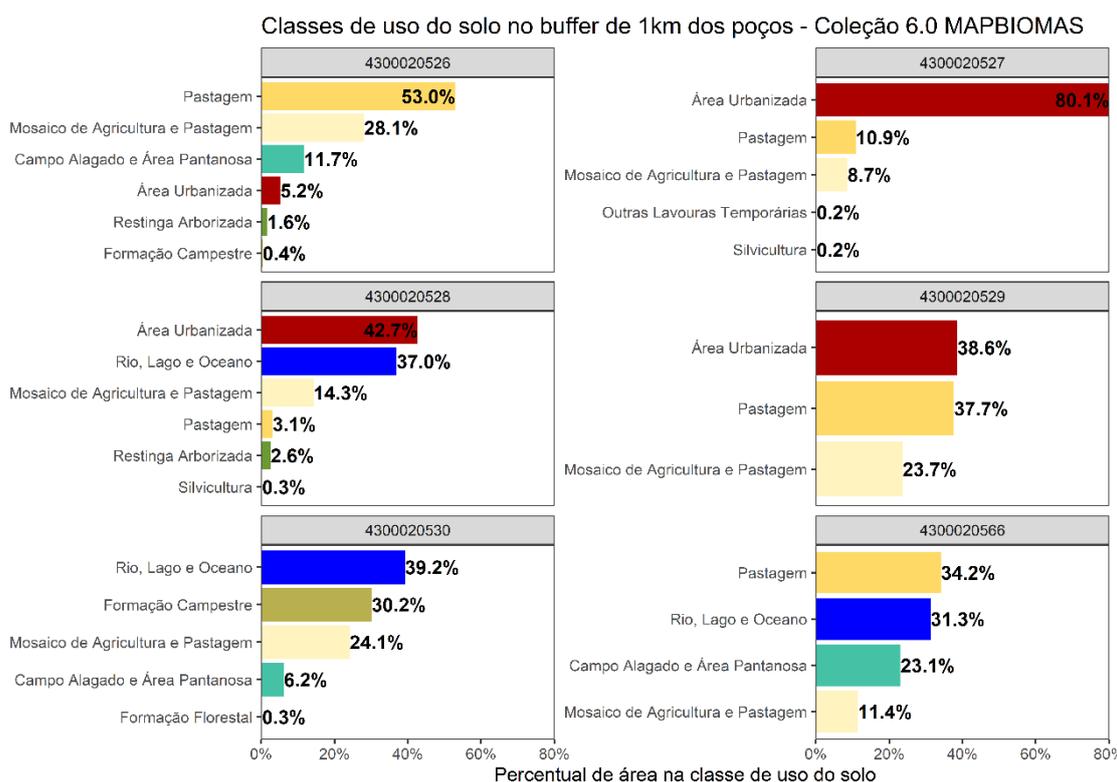


Figura 48 – Percentual de área do entorno dos poços (buffer de 1km) conforme as classes de uso e ocupação do solo.

Fonte: Elaborado a partir de MAPBIOMAS (2021).

A condição de uso e ocupação do solo no entorno dos poços pode ser resumida como:

- **4300020526:** No entorno do poço predominam áreas de Pastagem e de Mosaico de Agricultura e Pastagem, sendo que o poço se encontra aproximadamente 600 metros a leste da zona urbana de Capão da Canoa e Arroio do Sal. O poço se encontra a aproximadamente 1,9 km da linha da costa;
- **4300020527:** O poço se encontra no limite entre a área urbana de Capão da Canoa (que ocupa 80,1% do buffer de 1km), com parcela menor, a leste do poço, ocupada por Pastagem e Mosaico de Agricultura e Pastagem (total de 19,6%). O poço se encontra a aproximadamente 1,8 km da linha da costa;
- **4300020528:** O poço se encontra a 2km do poço 4300020527, a leste da área urbana de Capão da Canoa, que abrange a maior parcela do entorno do poço, de 42,7%. O poço se encontra bastante próximo da Lagoa dos Quadros (aproximadamente 250 metros) e no seu entorno próximo, encontram-se áreas de Mosaico de Agricultura e Pastagem, Pastagem e Restinga Arborizada. O poço se encontra a aproximadamente 3,3 km da linha da costa;
- **4300020529:** O poço se encontra a leste da área urbana do município de Xangrilá (que ocupa 38,6% do buffer de 1km do poço). O restante do entorno é classificado como Pastagem e Mosaico de Agricultura e Pastagem. O poço se encontra a aproximadamente 2,1 km da linha da costa;
- **4300020530:** O poço se encontra na zona rural do município de Osório, bastante próximo à Lagoa dos Barros (aproximadamente 200 metros), que ocupa 39,2% do

seu entorno (buffer de 1km). O restante do entorno é classificado em maior parte como formações naturais - Formação Campestre, Campo Alagado e Área Pantanosa e Formação Florestal – e de Mosaico de Agricultura e Pastagem. O poço se encontra a aproximadamente 20 km da linha da costa;

- **4300020566:** O poço se encontra muito próximo ao Rio Cornélios (aproximadamente 30 metros), que faz a ligação entre a Lagoa dos Quadros e a Lagoa Itapeva (que tem margem próxima a 500 metros do poço). O restante do entorno do poço é classificado como Pastagem e Mosaico de Agricultura e Pastagem (total de 45,6% da área do buffer de 1km) e Campo Alagado e Área Pantanosa (23,1%). O poço se encontra a aproximadamente 5,8 km da linha da costa;

Os poços 4300020527, 4300020528 e 4300020529 apresentam entornos em condições de baixa cobertura vegetal nativa e grande extensão urbanizada. Essa situação pode ser um fator de contribuição para os maiores valores de recarga observados, através das contribuições de esgoto e vazamentos nas redes de abastecimento de água, potenciais fontes de contaminação para o SAC, especialmente considerando os reduzidos níveis de água nos poços. Tal questão é potencializada pela falta de esgotamento sanitário adequado e adoção de soluções individuais do tipo fossas sépticas ou rudimentares nas áreas costeiras, como é típico para os balneários do Litoral Norte (SEMA-RS, 2019).

Também é interessante observar que os poços 4300020528, 4300020530 e 4300020566 estão bastante próximos de lagoas costeiras e apresentam maiores distâncias das linhas das costas, que podem ser fatores associados às variações mais graduais em suas medições de nível de água. Os três poços também apresentaram relações menos fortes entre o nível e a precipitação, que pode estar relacionado com as camadas superficiais de solos mais argilosos, e também à conectividade das camadas aquíferas do SAC e os corpos superficiais, como se levantou para todos os poços, na análise do item 5.2.2.

5.4.2. Geologia

A avaliação do contexto geológico em que os poços RIMAS no Litoral Norte estão inseridos foi realizada a partir das unidades geológico-ambientais do Rio Grande do Sul, consolidadas no Mapa de Geodiversidade (VIERO, 2010). A Figura 49 apresenta tais unidades para a região de estudo.

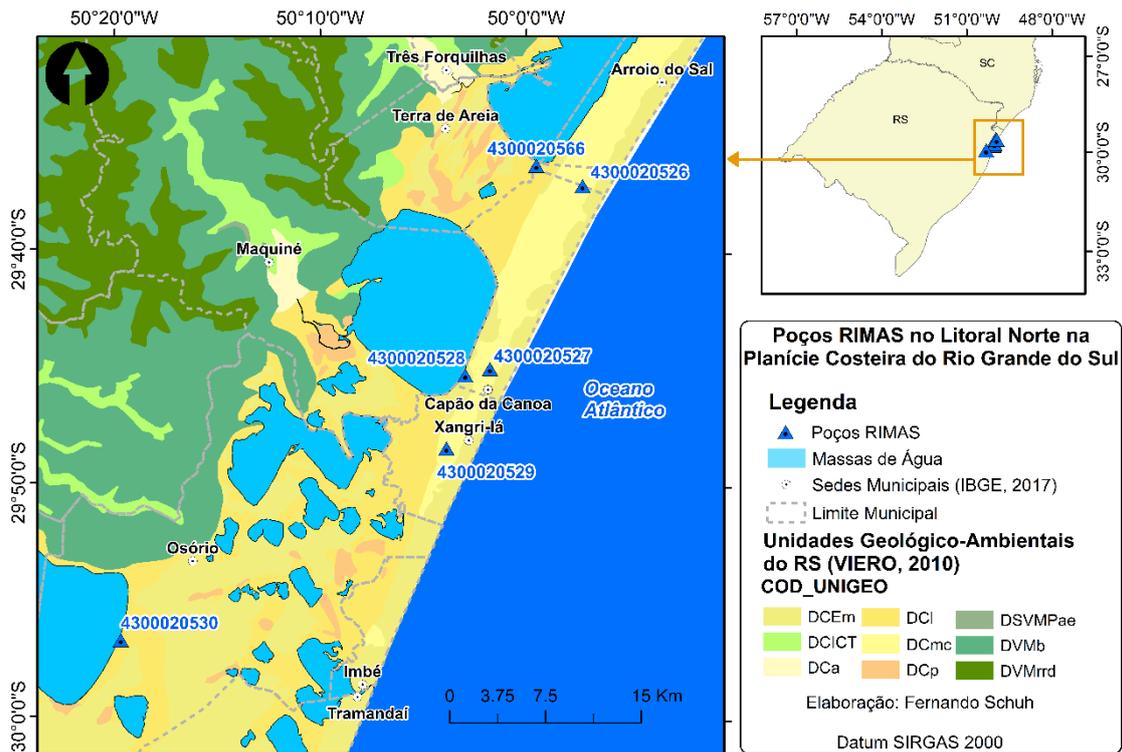


Figura 49 – Unidades Geológico-Ambientais do Rio Grande do Sul no entorno dos poços RIMAS no Litoral Norte.

Fonte: Elaborado a partir de Viero (2010).

A descrição das unidades geológico-ambientais encontradas no entorno dos poços RIMAS foi incluída na Tabela 17, seguida pela Tabela 18, que avalia o percentual de área ocupado por cada unidade no entorno dos poços. Todas as feições apresentam aspecto anisotrópico estratificado e são compostas por sedimentos, com porosidade primária alta (> 30%).

Tabela 17 – Descrição das Unidades Geológico-Ambientais encontradas no entorno dos poços RIMAS no Litoral Norte.

COD_UNIGEO ¹	SIGLA_UNID ²	NOME_UNIDA ³	LITOTIPO ⁴	DOMINIO ⁵	UNIGEO ⁶
DCI	Q1PL3	Depósitos de barreira pleistocênica 3 - Depósitos de planície lagunar	Areia	Domínio dos sedimentos Cenozóicos inconsolidados ou pouco consolidados, depositados em meio aquoso.	Ambiente lagunar- Predomínio de sedimentos argilosos.
DCmc	Q2P	Depósitos de barreira holocênica - depósitos praias	Areia	Domínio dos sedimentos Cenozóicos inconsolidados ou pouco consolidados, depositados em meio aquoso.	Ambiente marinho costeiro – Predomínio de sedimentos arenosos.
DCEm	Q2E	Depósitos de barreira holocênica - Depósitos eólicos	Areia	Domínio dos Sedimentos Cenozóicos Eólicos.	Dunas móveis – material arenoso inconsolidado.
DCI	Q2PC	Depósitos de barreira holocênica -	Areia	Domínio dos sedimentos Cenozóicos inconsolidados ou pouco consolidados,	Ambiente lagunar- Predomínio de

COD_UNIGEO ₁	SIGLA_UNID ₂	NOME_UNIDA ₃	LITOTIPO ₄	DOMINIO ₅	UNIGEO ₆
		Depósitos praias e cristas lagunares		depositados em meio aquoso.	sedimentos argilosos.
DCEm	Q1PE2	Depósitos de barreira pleistocênica 2 - Depósitos praias e eólicos	Depósitos de areia	Domínio dos Sedimentos Cenozóicos Eólicos.	Dunas móveis – material arenoso inconsolidado.
DCI	N4PI	Depósitos de planície de inundação	Areia, Silte, Argila	Domínio dos sedimentos Cenozóicos inconsolidados ou pouco consolidados, depositados em meio aquoso.	Ambiente lagunar- Predomínio de sedimentos argilosos.
DCI	N3PL2	Depósitos de planície lagunar	Areia, Silte, Argila	Domínio dos sedimentos Cenozóicos inconsolidados ou pouco consolidados, depositados em meio aquoso.	Ambiente lagunar- Predomínio de sedimentos argilosos.

Fonte: Viero (2010).

¹Sigla da unidade geológico-ambiental., ²Identidade única da unidade litoestratigráfica., ³Denominação formal ou informação da unidade litoestratigráfica., ⁴Litotipos que representam mais de 10% da unidade litoestratigráfica, ou com representatividade não determinada., ⁵Descrição do domínio geológico-ambiental. Reclassificação da geologia pelos grandes domínios geológicos., ⁶Descrição da unidade geológico-ambiental: As unidades geológico-ambientais foram agrupadas com características semelhantes do ponto de vista da resposta ambiental, a partir da subdivisão dos domínios geológico-ambientais.

Tabela 18 - Percentual de área do entorno dos Poços RIMAS no Litoral Norte (buffer de 1km) conforme as Unidades Geológico-Ambientais do Mapa de Geodiversidade do Rio Grande do Sul

Poço RIMAS	Q1PL3	Q2P	Q2E	Q2PC	Q1PE2	N4PI	N3PL2
4300020526	0,0%	94,2%	5,8%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
4300020527	0,0%	90,4%	9,6%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
4300020528	0,0%	27,3%	72,7%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
4300020529	0,0%	91,6%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	8,4%
4300020530	58,3%	0,0%	0,0%	40,2%	1,5%	0,0%	0,0%
4300020566	0,0%	0,0%	0,0%	5,8%	0,0%	94,2%	0,0%

Fonte: Elaborado a partir de Viero (2010).

No entorno dos poços 4300020526, 4300020527 e 4300020529 predominam depósitos de barreira holocênica - depósitos praias (Q2P), com sedimentos arenosos. O entorno do poço 4300020528 também contempla depósitos praias, mas os depósitos de barreira holocênica - depósitos eólicos (Q2E) abrangem a maior parte do entorno, com materiais arenosos inconsolidados. Esses poços apresentaram respostas mais rápidas de nível em relação à precipitação e recargas mais elevadas, o que pode estar associado ao fluxo de água facilitado nas unidades compostas por sedimentos mais permeáveis.

Em contraste, o entorno do poço 4300020530 abrange principalmente depósitos de barreira pleistocênica - depósitos de planície lagunar (Q1PL3) e depósitos de barreira holocênica - depósitos praias e cristas lagunares (Q2PC), associado ao ambiente lagunar. Esses depósitos têm predomínio de sedimentos argilosos, que podem contribuir para o fluxo menos acelerado da água subterrânea e a recarga menos intensa nesse poço. Condição similar pode ser observada para o poço 4300020566, com predomínio de depósitos de planície de inundação (N4PI) em seu entorno, que apresentam sedimentos com maior teor de argila.

5.4.3. Pedologia

A avaliação do contexto pedológico onde se encontram os poços RIMAS no Litoral Norte partiu da avaliação de Solos do Rio Grande do Sul de Kampf et al. (2001). A Figura 50 apresenta as classes de solo para a região de estudo.

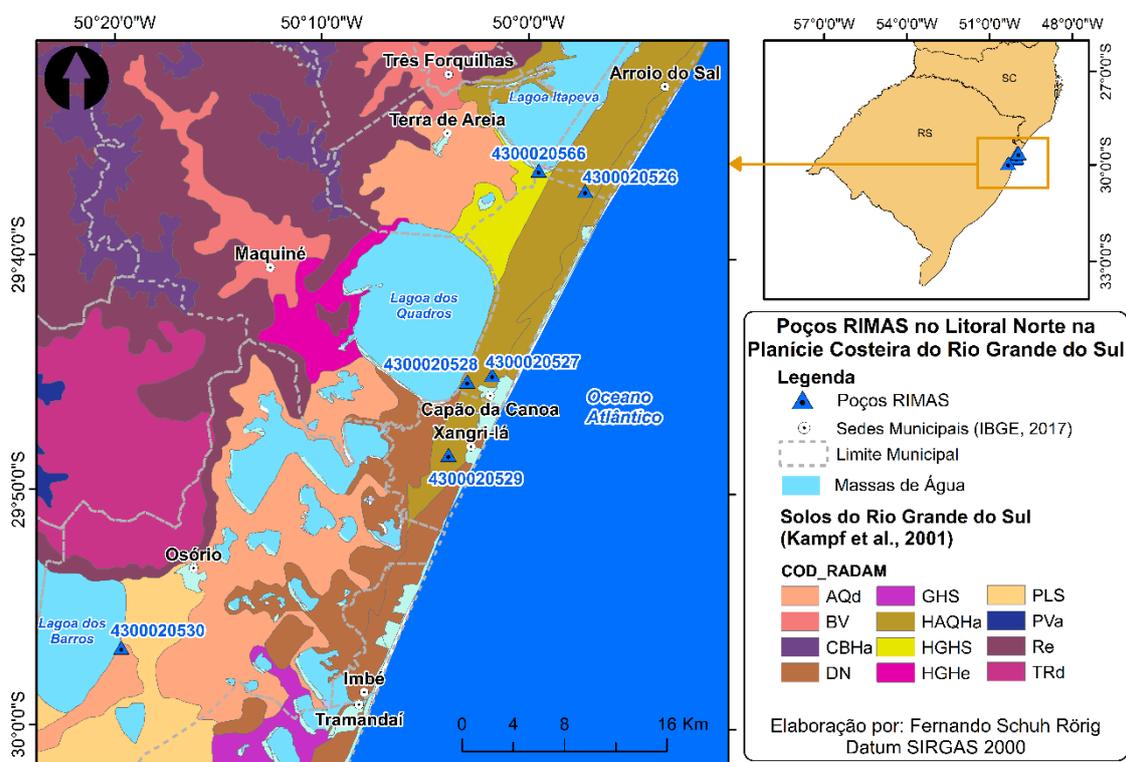


Figura 50 – Classes de Solo do Rio Grande do Sul no entorno dos poços RIMAS no Litoral Norte.
Fonte: Elaborado a partir de Kampf et al. (2001).

A descrição das classes de solo do Rio Grande do Sul encontradas no entorno dos poços RIMAS foi incluída na Tabela 19, seguida pela Tabela 20, que avalia o percentual de área ocupada por cada unidade no entorno dos poços.

Tabela 19 – Informações sobre as Classes de Solo do Rio Grande do Sul no entorno dos poços RIMAS no Litoral Norte.

CLASSE_ RAD ¹	COD_ RADAM ²	SOLO_ EMBRAPA ³	MAT_ ORIGEM ⁴	EROSAO ⁵	DRENAGEM ⁶	GRADIE_ TEX ⁷	TEXTURA ⁸	PROFUND_ SO ⁹
Areias Quartzosas distróficas	AQD	Neossolo Quartzarênico órtico típico	sedimentos arenosos	F	excessiva	sem	areia	>100
Dunas	DN	Neossolo Quartzarênico órtico típico	areia	F	excessiva	sem	areia	>150
Areias Quartzosas Hidromórficas Húmicas álicas	HAQHA	Neossolo Quartzarênico hidromórfico típico	sedimentos arenosos	L	imper- feita	sem	areia	<100

CLASSE_ RAD ¹	COD_ RADAM ²	SOLO_ EMBRAPA ³	MAT_ ORIGEM ⁴	EROSAO ⁵	DRENAGEM ⁶	GRADIE_ TEX ⁷	TEXTURA ⁸	PROFUND_ SO ⁹
Gleissolo Húmico Solódico	HGHS	Gleissolo Mélnico Tb eutrófico típico	sedimentos lacustres	N	mal	sem	argila	>100
Planossolo Solódico	PLS	Planossolo Háptico eutrófico solódico	sedimentos de granito	N	imperfeita	abrupto	média/ argila	<150

Fonte: Adaptado de Kampf et al. (2001).

¹Classe RADAM, ²Cód. RADAM, ³Classe de solo EMBRAPA, ⁴Material de Origem, ⁵Erodibilidade (F = Forte, L = Ligeira a moderada, N = Nula), ⁶Drenagem, ⁷Gradiente textural, ⁸Textura, ⁹Profundidade (centímetros)

Tabela 20 - Percentual de área do entorno dos Poços RIMAS no Litoral Norte (buffer de 1km) conforme as Classes de Solo do Rio Grande do Sul (COD_RADAM).

Poço RIMAS	AQD	DN	HAQHA	HGHS	PLS
4300020526	0%	0%	100%	0%	0%
4300020527	0%	0%	100%	0%	0%
4300020528	0%	2%	98%	0%	0%
4300020529	0%	0%	100%	0%	0%
4300020530	65%	0%	0%	0%	35%
4300020566	0%	0%	0%	100%	0%

Fonte: Elaborado a partir de Kampf et al. (2001).

No entorno dos poços 4300020526, 4300020527, 4300020528 e 4300020529, predominam Neossolos Quartzarênicos hidromórficos típicos (HAQHA), compostos de sedimento arenosos, com drenagem imperfeita e baixa profundidade (menos de 100 centímetros). Nesses poços, a recarga é mais acelerada, o que se pode relacionar com a maior facilidade de infiltração e fluxo da água retida no solo até a camada aquífera.

Já no entorno do poço 4300020530, encontram-se Neossolos Quartzarênico órtico típico (AQD), com características similares ao solo HAQHA, assim como Planossolos Hápticos eutróficos solódicos (PLS), que apresentam maiores profundidades (podem ser maiores que 150 centímetros) e textura média/argilosa, o que pode contribuir para uma recarga mais lenta e gradual, como observado. O entorno do poço 4300020566 abrange Gleissolos Mélnicos eutróficos solódicos (HGHS), também com maior presença de argila, o que já aponta o perfil construtivo da RIMAS para esse poço.

5.4.4. Declividade

Esse item apresenta uma breve avaliação da declividade da Planície Costeira, na região do Litoral Norte, a partir do Modelo Digital de Elevação do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), de resolução de 30 metros (FARR; KOBRICK, 2000). Como discutido no item 3.1.1, a planície costeira, composta de sistemas deposicionais de leques aluviais e laguna-barreira, apresenta em geral elevações baixas, com variações pouco acentuadas.

A Figura 51 apresenta a declividade estimada para a Planície Costeira, na região do Litoral Norte. A declividade é dada pelo ângulo de inclinação da superfície do terreno

em relação à horizontal (de 0 a 90%), que foram expressos em percentuais (0 a 100%) a partir da aplicação realizada com o software ArcMap 10.8.

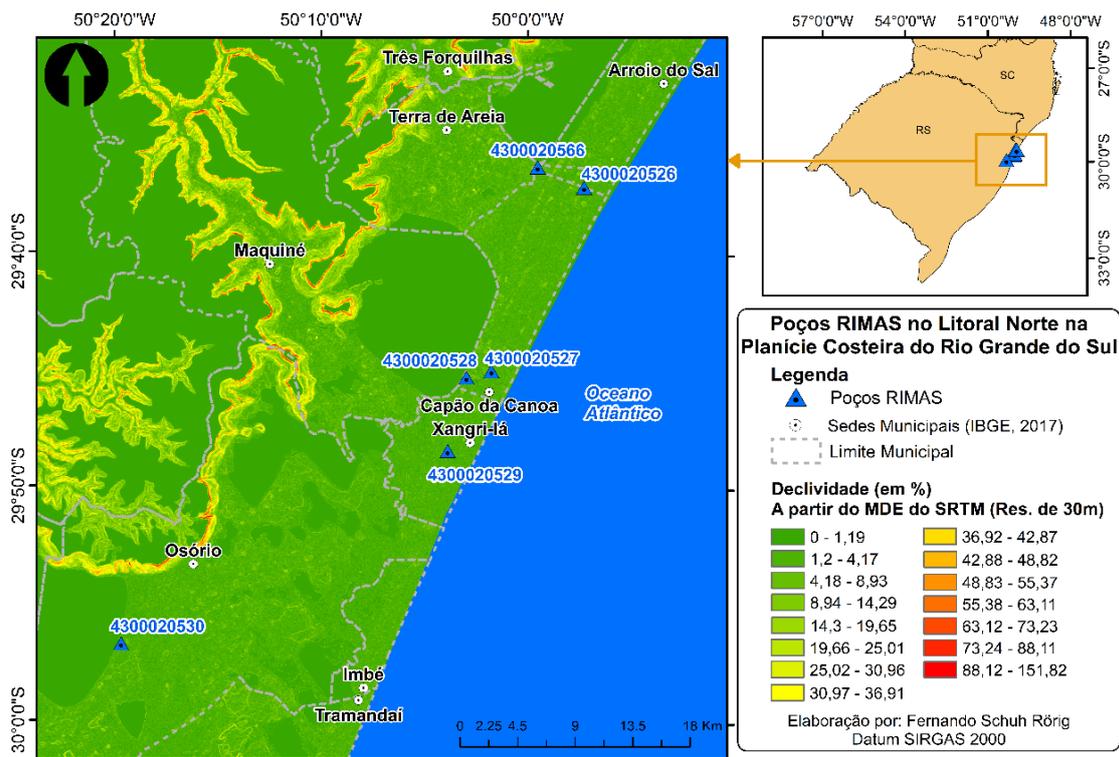


Figura 51 – Declividade (em %) na região do Litoral Norte do Rio Grande do Sul, calculada a partir de MDE do SRTM, com resolução de 30 metros (FARR; KOBRICK, 2000).

Fonte: elaboração própria.

Nota-se que a região da Planície Costeira, em especial do entorno dos poços, apresenta baixas declividades (em geral, menores que 10%), especialmente quando comparadas à região à leste, formada pelas escarpas da Formação Serra Geral. A Tabela 21, em sequência, apresenta algumas estatísticas para a declividade calculada no entorno dos poços RIMAS avaliados.

Tabela 21 – Estatísticas para a declividade (em %) calculada no entorno dos poços RIMAS no Litoral Norte (buffer de 1km).

Cód. Poço	Declividade mínima (%)	Declividade máxima (%)	Declividade média (%)	Desvio padrão (%)
4300020526	0	28,21	3,24	2,73
4300020527	0	15,60	2,77	1,77
4300020528	0	19,77	2,37	2,71
4300020529	0	13,24	2,53	1,47
4300020530	0	15,08	1,78	1,94
4300020566	0	12,26	2,83	2,19

Fonte: elaboração própria.

Verifica-se que as declividades em geral são bastante baixas, com médias entre 1,78% (poço 4300020530) e 3,24% (poço 4300020526) e desvios-padrão também reduzidos. Assim, pode-se considerar que a declividade é um fator que caracteriza a região do Litoral Norte da Planície Costeira em relação a outras regiões do estado, mas contribui pouco para a discussão sobre a variabilidade das respostas observadas nos poços RIMAS.

5.4.5. Consolidação da discussão sobre a Recarga

A análise de diferentes mapas temáticos para a caracterização das regiões de entorno dos poços foi capaz de apontar condições heterogêneas e contribuir para a avaliação dos resultados obtidos nos itens anteriores. O uso do buffer de 1km, dentro da escala de representatividade do método WTF (DELIN et al., 2007), mostrou-se adequado para diferenciar os poços mesmo com o uso de mapas regionais, como os de geologia e pedologia.

A avaliação do uso do solo indicou condições distintas para o entorno dos poços, com três grupos principais:

- **Entorno dos poços 4300020527, 4300020528 e 4300020529:** Áreas com maior presença de concentrações urbanas e de pastagens;
- **Entorno dos poços 4300020526 e 4300020566:** Áreas sem presença urbana, ocupadas por pastagens, campos alagados e áreas pantanosas; e
- **Entorno do poço 4300020530:** Área com maior preservação do ambiente natural, com predomínio de formações campestres.

Nota-se a alta proximidade de alguns poços (4300020528, 4300020530 e 4300020566) do sistema lagunar costeiro, que pode apresentar interações de descarga e recarga com o SAC, como apontado no item 3.2.1. Todos os poços apresentaram considerável proximidade à linha da costa, especialmente os poços 4300020526, 4300020527 e 4300020529, o que pode contribuir com maiores oscilações nos níveis (devido aos regimes de micromarés) e menor efeito memória, como identificado no item 5.2.1.

A localização relativa dos poços, situados entre o sistema lagunar costeiro e a linha da costa, está associada com as características geológicas e pedológicas do seu entorno. Os poços mais próximos ao oceano apresentam um contexto de depósitos praias (poços 4300020526, 4300020527 e 4300020529) e depósitos eólicos (4300020528), estando todos em região de Neossolos Quartzarênicos Hidromórficos Rasos.

O poço 4300020530, à margem da Lagoa dos Barros, está inserido em região de sedimentos de planície lagunar e de neossolos quartzarênicos e planossolos solódicos (com maior teor de argila). Já o poço 4300020566 (próximo ao Rio Cornélio e à Lagoa Itapeva), está em região de sedimentos lacustres, que formam gleissolos eutróficos, com textura argilosa. O entorno desses dois poços tem características de infiltração e recarga diferenciadas, como visto em seus perfis construtivos, que apresentam camadas superficiais de solos mais argilosos, que podem retardar a resposta do nível à precipitação.

Desse modo, verifica-se que a aplicação dos métodos estatísticos aos dados de nível e as estimativas de recarga através do método WTF encontram associações com as características de entorno dos poços avaliados. Os poços com áreas mais antropizadas (com pastagens ou ocupações urbanas) e em regiões de sedimentos mais arenosos apresentaram maiores estimativas de recarga, menores níveis estáticos e respostas mais rápidas, principalmente nos poços 4300020527 e 4300020529.

Os poços com uso do solo predominante de pastagens, campos alagados e áreas pantanosas (4300020526 e 4300020566) apresentaram estimativas de recarga intermediárias, embora o poço 4300020566 apresente maior proximidade ao sistema

lagunar costeiro. Por sua vez, o poço 4300020530, com as menores estimativas de recarga e respostas mais lentas, apresentou características diferenciadas, em região de maior uso natural do solo e de sedimentos de origem lagunar.

Observar que os poços se encontram próximos de corpos hídricos superficiais, da linha da costa, de áreas de uso agropecuário e de áreas urbanas, indica a presença de diversos fatores que podem contribuir para ruídos e flutuações de nível medidas nos poços que não necessariamente estejam associadas à recarga. Assim, essa análise reforça a necessidade de avaliação detalhada dos dados de nível e da avaliação do uso de filtros para evitar a superestimativa da recarga através do método WTF.

Assim, a discussão feita nesse capítulo complementa os resultados dos itens 5.2 e 5.3, qualificando as diferentes dinâmicas observadas nas camadas aquíferas do SAC, na região do Litoral Norte do Rio Grande do Sul. Em sequência, as conclusões gerais do trabalho e as recomendações para estudos futuros são apresentadas.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da revisão bibliográfica e da aplicação das metodologias para avaliação dos níveis de água e estimativa de recarga, apresenta-se as principais conclusões obtidas (item 6.1) e algumas recomendações para estudos futuros (item 6.2).

6.1. Conclusões

Este trabalho avaliou as variações de nível de água em seis poços RIMAS no Sistema Aquífero Costeiro no Litoral Norte do Rio Grande do Sul e observou os diferentes comportamentos das variações de nível de água, das respostas do nível em relação à precipitação e das estimativas de recarga obtidas através do método WTF. Tais resultados foram discutidos à luz das condições de ocupação do solo, de geologia, de pedologia e declividade no entorno nos poços RIMAS, o que permitiu refinar as diferenciações verificadas.

O estudo buscou abordar avanços metodológicos necessários para aplicações do VNA com dados diários de nível de água em aquíferos costeiros. A discussão sobre o uso de filtros para evitar a superestimativa da recarga foi uma questão relevante no desenvolvimento deste trabalho, que salienta a importância de considerar a suavização dos dados através da média móvel e da utilização do filtro de série temporal para a correção de ruídos nas medições de níveis d'água em poços do Sistema Aquífero Costeiro.

Nesse tipo de aquífero, destaca-se a elevada permeabilidade, o baixo nível estático, a proximidade de lagoas e do oceano, as captações e as ocupações urbanas (que podem influenciar na recarga a partir de fossas sépticas ou rudimentares e vazamentos em tubulações de água e esgoto). Tais fatores podem levar a oscilações de nível não necessariamente relacionadas à recarga, ressaltando a importância das metodologias avaliadas e aplicadas.

Com base na aplicação dos métodos estatísticos, os dados dos poços apresentaram respostas em geral rápidas à precipitação, com tempos de resposta medianos entre 0 e 5 dias (correlação cruzada *sliding windows*). Tal dinâmica se dá perante os aquíferos rasos e em geral livres, com a presença apenas de finas camadas de argila, havendo respostas mais lentas e maior “efeito memória” nos poços associados a sedimentos e camadas superficiais de solo com maior teor de argila (poços 4300020530 e 4300020566). A avaliação da correlação cruzada também aponta indícios para a conectividade entre os corpos hídricos superficiais no entorno dos poços (Lagoas Costeiras), que podem contribuir para variações nos níveis.

As estimativas de recarga resultaram em taxas de recarga médias a altas, entre 0,78 e 2,38 mm/dia, e razões Recarga/Precipitação entre 18% e 46% (média entre RISE e MRC, $S_y = 25\%$). Os maiores valores foram observados em poços com níveis estáticos menores, em camadas de areias médias a finas e com uso do solo no entorno predominantemente antrópico (4300020527, 4300020528 e 4300020529), devendo-se considerar a possibilidade de contribuições urbanas para a recarga em camadas aquíferas do SAC, que também apresentam potencial de contaminação da água subterrânea.

As menores recargas, assim como as respostas mais lentas, foram observadas em poços em regiões com menor presença de urbanização, maior proximidade a corpos

hídricos e presença de sedimentos mais argilosos. Isso foi observado no poço 4300020566 (Terra de Areia), mas principalmente no poço 4300020530 (Osório).

Tais informações buscam contribuir para a adequada gestão de recursos hídricos subterrâneos na Planície Costeira do Rio Grande do Sul, a partir da compreensão de que as variações de nível e a recarga no SAC apresentam complexidades e diferenças, que estão associadas a fatores diversos, mesmo para a avaliação em uma escala mais detalhada, como ocorreu para o Litoral Norte do estado.

6.2. Recomendações para estudos futuros

O trabalho apresenta diversos caminhos para a expansão do conhecimento sobre a hidrogeologia do Sistema Aquífero Costeiro, como:

- A replicação e validação dos métodos adotados a partir de dados de nível de água obtidos em outros poços de monitoramento localizados no Sistema Aquífero Costeiro;
- A utilização de séries temporais mais extensas para os poços RIMAS já estudados também podem ser avaliadas no futuro, de maneira a verificar a variação das respostas observadas e a robustez dos métodos adotados;
- A aplicação de diferentes métodos para a estimativa da recarga na região, no sentido de comparação e validação das faixas de valores de taxa de recarga e razão Recarga/Precipitação obtidas. Os métodos também podem contribuir para validar a necessidade de utilização dos filtros para correção dos ruídos;
- Em aplicações do VNA, a avaliação mais detalhada dos valores de rendimento específico, a partir de dados de campo, é importante para o refinamento da diferenciação de resposta entre os poços;
- A utilização de dados de precipitação de diferentes origens e bases de dados, como as estações pluviométricas e dados obtidos através de satélites, pode ser outra maneira de avaliar a robustez dos métodos aplicados para a avaliação das variações de nível;
- Comparação de dados de nível com registros de marés, para avaliar o impacto desse fenômeno na variação dos níveis;
- A avaliação da relação de descarga e recarga no entorno dos poços RIMAS com as Lagoas Costeiras, através de investigações em campo, com o uso, por exemplo, de *seepage meter* e da comparação de dados de nível de água em poços e dados de níveis medidos nas lagoas.

Todas as propostas podem contribuir para avançar na compreensão da dinâmica hidrogeológica no Sistema Aquífero Costeiro e, ao fim, fornecer maiores subsídios à gestão das águas subterrâneas. As propostas também valorizam a manutenção e a expansão da atividade da Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas (RIMAS/CPRM), que tornou possível a realização desse trabalho.

7. REFERÊNCIAS

ALM, Agência de Desenvolvimento da Bacia da Lagoa Mirim. **Bacia Hidrográfica da Lagoa Mirim**. Universidade Federal de Pelotas., 2008. Disponível em: <https://wp.ufpel.edu.br/alm/?page_id=2103>

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C. **Köppen's climate classification map for Brazil**. Meteorol. Z., p. 18, 2013.

ANA, Agência Nacional de Águas. **Diretrizes e análises recomendadas para a consistência de dados pluviométricos**. Superintendência de Gestão da Rede Hidrometeorológica. Brasília (DF), 2011. Disponível em: <<https://arquivos.ana.gov.br/infohidrologicas/cadastro/DiretrizesEAnalisesRecomendadasParaConsistenciaDeDadosPluviometricos-VersaoJan12.pdf>>

ANA, Agência Nacional de Águas. **Plano Nacional de Segurança Hídrica**. Brasília, DF: 2019. Disponível em: <<https://pnsh.ana.gov.br/>>

ANA, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Conjuntura de Recursos Hídricos do Brasil**. Brasília, DF: 2020. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conjuntura-2020>>

ANA, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Atlas águas: segurança hídrica do abastecimento urbano**. Brasília, DF: 2021. Disponível em: <<https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/d77a2d01-0578-4c71-a57e-87f5c565aacf>>

ARIAS, P. A. et al. **Technical Summary. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Sixth Assessment Report (AR6)**. Working Group I Contribution., p. 112, 2021. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>>

BARBOZA, E. G.; TOMAZELLI, L. J.; DILLENBURG, S. R. **Planície Costeira do Rio Grande do Sul**. Erosão em Longo Período. Revista SUG No 15, 94-97, Sociedad Uruguaya de Geología. p. 5, 2009.

BATU, B. J. O. L. **Aquifer hydraulics: a comprehensive guide to hydrogeologic data analysis**. Eos, Transactions American Geophysical Union, v. 79, n. 52, p. 635–635, 1998.

BLACKBURN, D. M.; MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G. Recarga de **Aquífero Aluvial a partir da Agricultura Irrigada e suas Implicações na qualidade da Água Subterrânea em Pesqueira - PE**. XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, p. 9, 2002.

BORTOLIN, T. A. **Estudo da Recarga do Sistema Aquífero Serra Geral na Bacia Hidrográfica Taquari-Antas**. Tese (Doutorado)—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, 2018.

BRASIL. Lei no 9433/1997, de 8 de janeiro de 1997. **Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1o da**

Lei no 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei no 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Brasília, DF: 1997.

BUCHMANN, F. S.; CARON, F.; LOPES, R. P. **Panorama geológico da planície costeira do Rio Grande do Sul.** Em: Quaternário do Rio Grande do Sul - Integrando Conhecimentos. Sociedade Brasileira de Paleontologia. p. 35–56. 2009.

CAI, Z.; OFTERDINGER, U. **Analysis of groundwater-level response to rainfall and estimation of annual recharge in fractured hard rock aquifers, NW Ireland.** Journal of Hydrology, v. 535, p. 71–84, abr. 2016.

CAICEDO, N. L. **Hidrogeologia do Litoral Norte do Rio Grande do Sul.** X Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, p. 7, 1998.

CAITANO, C. DE O.; ANDRADE, C. F. F. DE. **Interação entre os aquíferos superficiais com os níveis das lagoas Mangueira e Mirim no Rio Grande do Sul, Brasil.** Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, v. 11, n. 1, p. 251–259, 6 jan. 2020.

CARVALHO, V. et al. **Estimativa da Recarga em uma Sub-bacia Hidrográfica Rural Através do Método da Variação do Nível D-Água (VNA).** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 19, n. 1, p. 271–280, 2014.

CHILDS, E. C. **The nonsteady state of the water table in drained land.** Journal of Geophysical Research, v. 65, n. 2, p. 780–782, fev. 1960.

COLLISCHONN, L. **Gênese e Ocorrência da Camada Aquífera “Sal Grosso” no Litoral Norte do Rio Grande do Sul.** Trabalho de Conclusão de Curso.—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Curso de Geologia., 2018.

COLLISCHONN, W. et al. **The MGB-IPH model for large-scale rainfall—runoff modelling.** Hydrological Sciences Journal, v. 52, n. 5, p. 878–895, out. 2007.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais.** 2a ed. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2015.

COLLISCHONN, W.; FAN, F. M. **Defining parameters for Eckhardt’s digital baseflow filter.** Hydrological Processes, v. 27, n. 18, p. 2614–2622, 30 ago. 2013.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. **SIAGAS: Sistema de Informações de Águas Subterrâneas.** 2018. Disponível em: <<http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/>>

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. **Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas - RIMAS.** 2022. Disponível em: <<https://rimasweb.cprm.gov.br/layout>>

CROSBIE, R. S.; BINNING, P.; KALMA, J. D. **A time series approach to inferring groundwater recharge using the water table fluctuation method.** Water Resources Research, Vol. 41, W01008, 2005.

DANIEL, C. C. **Ground-water recharge to the regolith-fractured crystalline rock aquifer system, Orange County, North Carolina.** [s.l.] U. S. Geological Survey, 1996.

- D'AQUINO, C. DE A. et al. **Caracterização oceanográfica e do transporte de sedimentos em suspensão no estuário do Rio Mampituba, SC.** Revista Brasileira de Geofísica, v. 29, n. 2, p. 217–230, jun. 2011.
- DE VRIES, J. J.; SIMMERS, I. **Groundwater recharge: an overview of processes and challenges.** Hydrogeology Journal, v. 10, n. 1, p. 5–17, fev. 2002.
- DELANEY, P. J. V. **Fisiografia e Geologia de Superfície da Planície Costeira do Rio Grande do Sul.** Tese (Doutorado)—[s.l.] Universidade de São Paulo. Instituto de Geociências., 1962.
- DELBART, C. et al. **Temporal variability of karst aquifer response time established by the sliding-windows cross-correlation method.** Journal of Hydrology, v. 511, p. 580–588, abr. 2014.
- DELIN, G. N. et al. **Comparison of local- to regional-scale estimates of ground-water recharge in Minnesota, USA.** Journal of Hydrology, v. 334, n. 1–2, p. 231–249, fev. 2007.
- DILLENBURG, S. R.; BARBOZA, E. G. **The strike-fed sandy coast of Southern Brazil.** Geological Society, London, Special Publications, v. 388, n. 1, p. 333–352, 2014.
- DINIZ, J. A. O. et al. **Mapa Hidrogeológico do Brasil ao Milionésimo - 1:1.000.000.** p. 48, 2014.
- ECKHARDT, K. **A comparison of baseflow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods.** Journal of Hydrology, v. 352, n. 1–2, p. 168–173, abr. 2008.
- FARR, T. G.; KOBRICK, M. **Shuttle radar topography mission produces a wealth of data.** Eos, Transactions American Geophysical Union, v. 81, n. 48, p. 583, 2000.
- FEITOSA, F. A. C. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações.** Rio de Janeiro: CPRM, 2008. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/bitstream/doc/14818/3/livro_hidrogeologia_conceitos.pdf>
- FERNANDES, L. A. D. et al. **Evolução Tectônica do Cinturão Dom Feliciano no Escudo Sul-Rio-Grandense: parte II - uma contribuição a partir das assinaturas geofísicas.** Revista Brasileira de Geociências, v. 25, n. 4, p. 375–384, 1 dez. 1995.
- FONTANA, R. L. **Desenvolvimento termomecânico da Bacia de Pelotas e parte sul da Plataforma de Florianópolis.** Dissertação (Mestrado)—Ouro Preto/MG. Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de Geociências., 1987.
- FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. **Groundwater.** Englewood Cliffs, N.J: Prentice-Hall, 1979.
- FREITAS, L. V. DE. **Avaliação da Recarga do Sistema Aquífero Caiuá pelo método de Variação dos Níveis de Água (VNA) na Bacia Hidrográfica do Paraná (MS). Trabalho de Conclusão de Curso.** Porto Alegre/RS. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Escola de Engenharia e Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Curso de Engenharia Ambiental., 2018.

FULTON, A.; DUDLEY, T.; STATON, K. **Groundwater Level Monitoring: What is it? How is it done? Why do it?** County of Colusa, p. 4, 2003. Disponível em: <<https://www.countyofcolusa.org/DocumentCenter/View/4260/Series1Article4-GroundwaterLevelMonitoring?bidId=>>

HEALY, R. W. **Estimating Groundwater Recharge**. Lakewood, Colorado: U.S. Geological Survey. Cambridge University Press., 2010.

HEALY, R. W.; COOK, P. G. **Using groundwater levels to estimate recharge**. Hydrogeology Journal, v. 10, n. 1, p. 91–109, fev. 2002.

HEPPNER, C. S.; NIMMO, J. R. **A Computer Program for Predicting Recharge with a Master Recession Curve**. Scientific Investigations Report. 2005-5172. U. S. Geological Survey, 2005. Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/sir/2005/5172/pdf/BookSIR5172.pdf>>

HIRATA, R. et al. **As águas subterrâneas e sua importância ambiental e socioeconômica para o Brasil**. São Paulo: Universidade de São Paulo.: Instituto de Geociências., 2019. Disponível em: <https://igc.usp.br/igc_downloads/Hirata%20et%20al%202019%20Agua%20subterranea%20e%20sua%20importancia.pdf>

HUANG, X. et al. **Groundwater Recharge Prediction Using Linear Regression, Multi-Layer Perception Network, and Deep Learning**. Water, v. 11, n. 9, p. 1879, 10 set. 2019.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa de Biomas e Sistema Costeiro-Marinho - 1:250.000**. Brasília/DF, 2019. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=2101676>>

JAYAKUMAR, R. Groundwater level monitoring-importance global groundwater monitoring network. Journal of Groundwater Science and Engineering, v. 3, n. 4, p. 11, 2015.

JOHNSON, A. I. **Specific yield: compilation of specific yields for various materials: Geological Survey Water Supply Paper 1662-D**. Washington: 1967. Disponível em: <<https://pubs.er.usgs.gov/publication/wsp1662D>>. Acesso em: 24 jul. 2022.

KAMPF, N. et al. **Mapa de Classificação dos Solos do Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: FEPAM. Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler, 2001. Disponível em: <http://www.fepam.rs.gov.br/biblioteca/mapa_solos.pdf>

KINZELBACH, W. et al. **A survey of methods for analysing groundwater recharge in arid and semi-arid regions**. Nairobi, Kenya: Division of Early Warning and Assessment, United Nations Environment Programme, 2002. Disponível em: <<https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/8195>>

KRUSEMAN, G. P.; RIDDER, N. A. DE. **Analysis and evaluation of pumping test data**. 2. ed. (completely rev.), reprint ed. Wageningen: Internat. Inst. for Land Reclamation and Improvement, 1994.

LARINI, N. J. **Análise das Influências do Fenômeno El Niño 2015-16 sobre a Região Sul do Brasil**. Trabalho de Conclusão de Curso.—Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina. Centro de Física e Matemática. Graduação em Meteorologia., 2017.

LAROCQUE, M. et al. **Contribution of correlation and spectral analyses to the regional study of a large karst aquifer (Charente, France)**. Journal of Hydrology, v. 205, n. 3–4, p. 217–231, mar. 1998.

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**. Dissertação (Mestrado)—Fortaleza/CE: Universidade Federal do Ceará. Instituto de Ciências do Mar. Programa de Pós-Graduação em Ciências Marinhas e Tropicais, 2007.

LEE, L. J. E.; LAWRENCE, D. S. L.; PRICE, M. **Analysis of water-level response to rainfall and implications for recharge pathways in the Chalk aquifer, SE England**. Journal of Hydrology, v. 330, n. 3–4, p. 604–620, nov. 2006.

LERNER, D. N. **Groundwater recharge in urban areas**. Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere, v. 24, n. 1, p. 29–33, jan. 1990.

LISBOA, N. A. et al. **Síntese da ocorrência geológica das águas subterrâneas do Rio Grande do Sul**. XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, p. 25, 2004.

MACHADO, J. L. F.; FREITAS, M. A. **Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul**. Escala 1:750.000. Brasília, DF: CPRM, 2005. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Sobre/Equipe-e-Enderecos/SUREG%7CPA---Mapa-Hidrogeologico-do-Rio-Grande-do-Sul---Escala-1%3A750.000-114.html>>

MAGNONI, P. H. J. **Estimativa de Recarga de Águas Subterrâneas por Sensoriamento Remoto e Computação em Nuvem**. Dissertação (Mestrado)—Faculdade de Ciências Agrônomicas da Unesp Câmpus de Botucatu. Botucatu: 2020.

MANGIN, A. **Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatore et spectrale**. Journal of Hydrology, 67 25-43. p. 19, 1984.

MAZIERO, T. A.; WENDLAND, E. **Avaliação da Recarga Subterrânea de Bacias Urbanas no Município de São Carlos, SP**. XIV Encontro Nacional de Perfuradores de Poços, p. 18, 2005.

MELATI, M. D.; FAN, F. M.; ATHAYDE, G. B. **Estudo das interações entre as águas superficiais e subterrâneas na bacia do Paraná 3 utilizando modelagem hidrológica e separação do escoamento de base**. XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Florianópolis/SC., p. 8, 2017.

MELATI, M. D., KICH, E. M., TEIXEIRA, Z. A., ATHAYDE, G. B. **Aplicação do método Water Table Flutuaction usando a Master Recession Curve (MRC) para um poço localizado na Bacia Sedimentar do Araripe**. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Florianópolis (SC), 2017.

MMA, Ministério do Meio Ambiente. **Águas Subterrâneas - Um recurso a ser conhecido e protegido**. Brasília, DF: 2007.

NASCIMENTO, E. A. **Caracterização Hidrogeológica da Unidade Aquífera Barreira Holocênica na Região de Cassino, Rio Grande (RS)**. Trabalho de Conclusão de Curso.—Porto Alegre: Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul., 2013.

NELMS, D. L.; HARLOW, G. E.; HAYES, D. C. **Base-flow characteristics of streams in the Valley and Ridge, the Blue Ridge, and the Piedmont physiographic provinces of Virginia.** Denver, CO: 1997. Disponível em: <<http://pubs.er.usgs.gov/publication/wsp2457>>.

NIENCHESKI, L. F. H. et al. **Submarine groundwater discharge of nutrients to the ocean along a coastal lagoon barrier, Southern Brazil.** Marine Chemistry, v. 106, n. 3–4, p. 546–561, ago. 2007.

NIMMO, J. R.; HOROWITZ, C.; MITCHELL, L. **Discrete-Storm Water-Table Fluctuation Method to Estimate Episodic Recharge.** Groundwater, v. 53, n. 2, p. 282–292, mar. 2015.

NIMMO, J. R.; PERKINS, K. S. **Episodic Master Recession Evaluation of Groundwater and Streamflow Hydrographs for Water-Resource Estimation.** Vadose Zone Journal, v. 17, n. 1, p. 180050, 2018.

NRCS, N. R. C. S. **Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall.** v. 210-VI-NEH, 2004.

PINTO, E. J. DE A. et al. **Atlas pluviométrico do Brasil: isoietas mensais, isoietas trimestrais, isoietas anuais, meses mais secos, meses mais chuvosos, trimestres mais secos, trimestres mais chuvosos.** 1 DVD. Escala 1.5:000.000. Brasília, DF: CPRM, 2011. Disponível em: < <http://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/Mapas-e-Publicacoes/Atlas-Pluviometrico-do-Brasil-1351.html>>

PROJETO MAPBIOMAS. **Coleção 6.0 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil**, 2021. Disponível em: <<https://mapbiomas.org/download>>. Acesso em: 1 maio. 2022

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing.** R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. 2022.

REGINATO, P. A. R. et al. **Poços como vetores de contaminação: o caso dos aquíferos da Planície Costeira do Rio Grande do Sul.** XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2008.

RICHEY, A. S. et al. **Quantifying renewable groundwater stress with GRACE.** Water Resources Research, v. 51, n. 7, p. 5217–5238, jul. 2015.

ROCHA, C. M.; ANDRADE, C. F. F.; NIENCHESKI, L. F. H. **Descarga de Água Subterrânea para as Lagoas Costeiras do Litoral Norte do Rio Grande do Sul, Brasil.** Braz. J. Aquat. Sci. Technol. v. 19 (2), 2015.

ROSSATO, M. S. **Os climas do Rio Grande do Sul: Variabilidade, Tendências e Tipologia.** Tese de Doutorado—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geografia, 2011.

- RUTLEDGE, A. T. **Computer programs for describing the recession of ground-water discharge and for estimating mean ground-water recharge and discharge from streamflow records-update**. U. S. Geological Survey, 1998. Disponível em: <<http://pubs.er.usgs.gov/publication/wri984148>>. Acesso em: 9 ago. 2021.
- SANTOS, H. G. DOS et al. **O Novo Mapa de Solos do Brasil**. Legenda Atualizada escala 1:5.000.000. Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos, 2011.
- SANTOS, H. G. DOS. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5ª edição revista e ampliada ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018.
- SCANLON, B. R. et al. **Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions**. Hydrological Processes, v. 20, n. 15, p. 3335–3370, 15 out. 2006.
- SCANLON, B. R.; HEALY, R. W.; COOK, P. G. **Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge**. Hydrogeology Journal, v. 10:18-39, 2002.
- SCHAFFER, A. E.; LANZER, R. M.; SCUR, L. **Atlas Socioambiental do Município de Osório**. Caxias do Sul/RS: 2017. Disponível em: <<https://www.ucs.br/educs/livro/atlas-socioambiental-do-municipio-de-osorio/>>
- SCHNEIDER, P. **Gênese e Classificação de alguns solos da Planície Costeira - RS**. Dissertação de Mestrado—Porto Alegre: Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1977.
- SCOPEL, I. **Características Físicas de solos da Região Litoral Norte do Rio Grande do Sul**. Dissertação de Mestrado—Porto Alegre: Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1977.
- SEMA-RS. **Diagnóstico da Bacia. Serviços de Consultoria Relativo ao Processo de Planejamento da Bacia Hidrográfica do Camaquã Fases A, B e C**. Porto Alegre: 2015. Disponível em: <<https://sema.rs.gov.br/1030-bh-rio-camaqua>>
- SEMA-RS. Secretaria do Ambiente e Desenvolvimento Sustentável do Estado do Rio Grande do Sul. **Diagnóstico Consolidado da Bacia Hidrográfica do Rio Tramandaí**. Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Tramandaí. Porto Alegre: 2019. Disponível em: <<https://sema.rs.gov.br/1010-bh-tramandai>>
- SEMA-RS, Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura do Estado do Rio Grande do Sul. **Fase A - Diagnóstico. Diagnóstico do Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Mampituba**. Porto Alegre: 2020. Disponível em: <<https://sema.rs.gov.br/1050-bh-mampituba>>
- SEMA-RS, Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura do Estado do Rio Grande do Sul. **Bacias Hidrográficas do Rio Grande do Sul**. 2022. Disponível em: <<https://sema.rs.gov.br/bacias-hidrograficas>>
- SENHORINHO, E. M.; TROIAN, G. C.; KUHN, I. A. **Estimativa de recarga pelo Método WTF (Water Table Fluctuation) para um poço (RIMAS) monitorado por 5 Anos em Capão da Canoa - RS**. XX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, p. 4, 2017.

SILVA JÚNIOR, O. B.; CASTRO, N. M. DOS R.; TUCCI, C. E. M. **Análise Espacial e Temporal das precipitações na bacia do Rio Potiribu**. Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2001.

SIMA-SP. **Pesquisas comprovam a importância da vegetação na produção de água**. 6 ago. 2015. Disponível em: <<https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/2015/08/pesquisas-comprovam-a-importancia-da-vegetacao-na-producao-de-agua-com-qualidade/>>

SPGG. Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão do Estado do Rio Grande do Sul. **Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul**. 6ª Edição – Departamento de Planejamento Governamental. Porto Alegre/RS: 2021. Disponível em: <<https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/inicial>>

SRH-CE. SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DE CEARÁ. **Relatório final da avaliação da recarga do Sistema Aquífero Médio e Mauriti, com base no monitoramento das variações sazonais dos níveis estáticos dos poços monitorados**. Contratação dos Serviços de Consultoria Especializada em Aspectos Qualiquantitativos de Águas Subterrâneas, para realizar Estudos das Águas Subterrâneas da Bacia do Araripe, no Estado do Ceará. Consórcio Água e Solo/Quanta/Engelplus. Fortaleza (CE), Brasil. 2017. Disponível em: <<http://portal.cogerh.com.br/wp-content/uploads/pdf/estudodeprojetos/Relatorio%20Final%20da%20Avaliacao%20da%20Recarga%20do%20Sistema%20Aquifero%20Medio%20e%20Mauriti.pdf>>

TAPLEY, B. D. et al. **The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results: GRACE MISSION OVERVIEW AND EARLY RESULTS**. Geophysical Research Letters, v. 31, n. 9, 16 maio 2004.

TAYLOR, C. J.; ALLEY, W. M. **Ground-Water-Level Monitoring and the Importance of Long-Term Water-Level Data**: U.S. Geological Survey Circular 1217. 2001. Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/circ/circ1217/pdf/circular1217.pdf>>

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance**. 1957.

TOMAZELLI, L. **O Regime dos Ventos e a Taxa de Migração das Dunas Eólicas Costeiras do Rio Grande do Sul, Brasil**. Pesquisas em Geociências, v. 20, n. 1, p. 18, 30 jun. 1993.

TOMAZELLI, L.; VILLWOCK, J. **Geologia do Sistema Lagunar Holocênico do Litoral Norte do Rio Grande do Sul, Brasil**. Pesquisas em Geociências, v. 18, n. 1, p. 13, 30 jun. 1991.

TOMAZELLI, L.; VILLWOCK, J. **Considerações Sobre o Ambiente Praial e a Deriva Litorânea de Sedimentos ao Longo do Litoral Norte do Rio Grande do Sul, Brasil**. Pesquisas em Geociências, v. 19, n. 1, p. 3, 30 jun. 1992.

TROIAN, G. 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. p. 8, Florianópolis/SC: 2017.

- TROIAN, G. C. et al. **Modelo conceitual hidroestratigráfico do sistema aquífero costeiro no litoral norte do Estado do Rio Grande do Sul**. *Águas Subterrâneas*, v. 34, n. 3, p. 264–274, 8 set. 2020.
- TROIAN, G. C.; GOFFERMANN, M.; DE FREITAS, M. A. **Monitoramento Qualiquantitativo do Aquífero Costeiro no Litoral Norte do Rio Grande do Sul**. XVIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, p. 10, 2015.
- TUCCI, C. E. M. **Hidrologia ciência e aplicação**. 2a ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1993.
- VAN ROSSUM, G.; DRAKE, F. L. **Python 3 Reference Manual**. Scotts Valley, CA: Create Space,, 2009.
- VIERO, A. C. **Geodiversidade do Estado do Rio Grande do Sul**. Programa Geologia do Brasil - Levantamento da Geodiversidade. Porto Alegre: CPRM, 2010. Disponível em: <<https://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/16774>>
- VILLWOCK, J. A.; TOMAZELLI, L. J. **Planície Costeira do Rio Grande do Sul: gênese e paisagem atual**. *Gravel*, v. 3, n. 1678–5975, p. 109–105, 2005.
- VON-AHN, C. M. E. **A Lagoa dos Patos como Recarga dos Aquíferos Costeiros adjacentes**. Rio Grande: Universidade Federal do Rio Grande – FURG. Programa de Pós Graduação em Engenharia Oceânica, 2015.
- WAHNFRIED, I.; HIRATA, R. **Comparação de Métodos de Estimativa de Recarga de Aquíferos em Uma Planície Aluvionar na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (São Paulo)**. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 10, n. 2, p. 15–25, 2005.
- WALTON, W. C. **Groundwater resource evaluation**. New York: McGraw-Hill, 2007.
- WALTON, W. C.; SCHICHT, R. J. **Hydrologic Budgets for Three Small Watersheds in Illinois**. Em: *Hydrologic Budgets for Three Small Watersheds in Illinois*. Volume 40 of Illinois State Water Survey report of investigation, Illinois State Water Survey. University of California: p. 40. 1961.
- WITTENBERG, H. **Baseflow recession and recharge as nonlinear storage processes**. *Hydrological Processes*, v. 13, n. 5, p. 715–726, 15 abr. 1999.
- YANG, L. et al. **A Modified Water-Table Fluctuation Method to Characterize Regional Groundwater Discharge**. *Water* 2018, 10, 503; doi:10.3390/w10040503. 2018.

APÊNDICES

APÊNDICE A – GRÁFICOS DE NÍVEL E PRECIPITAÇÃO

Nível e precipitação para o poço 4300020526 (Curumim)

Nível - linha em azul e Precipitação - colunas em cinza

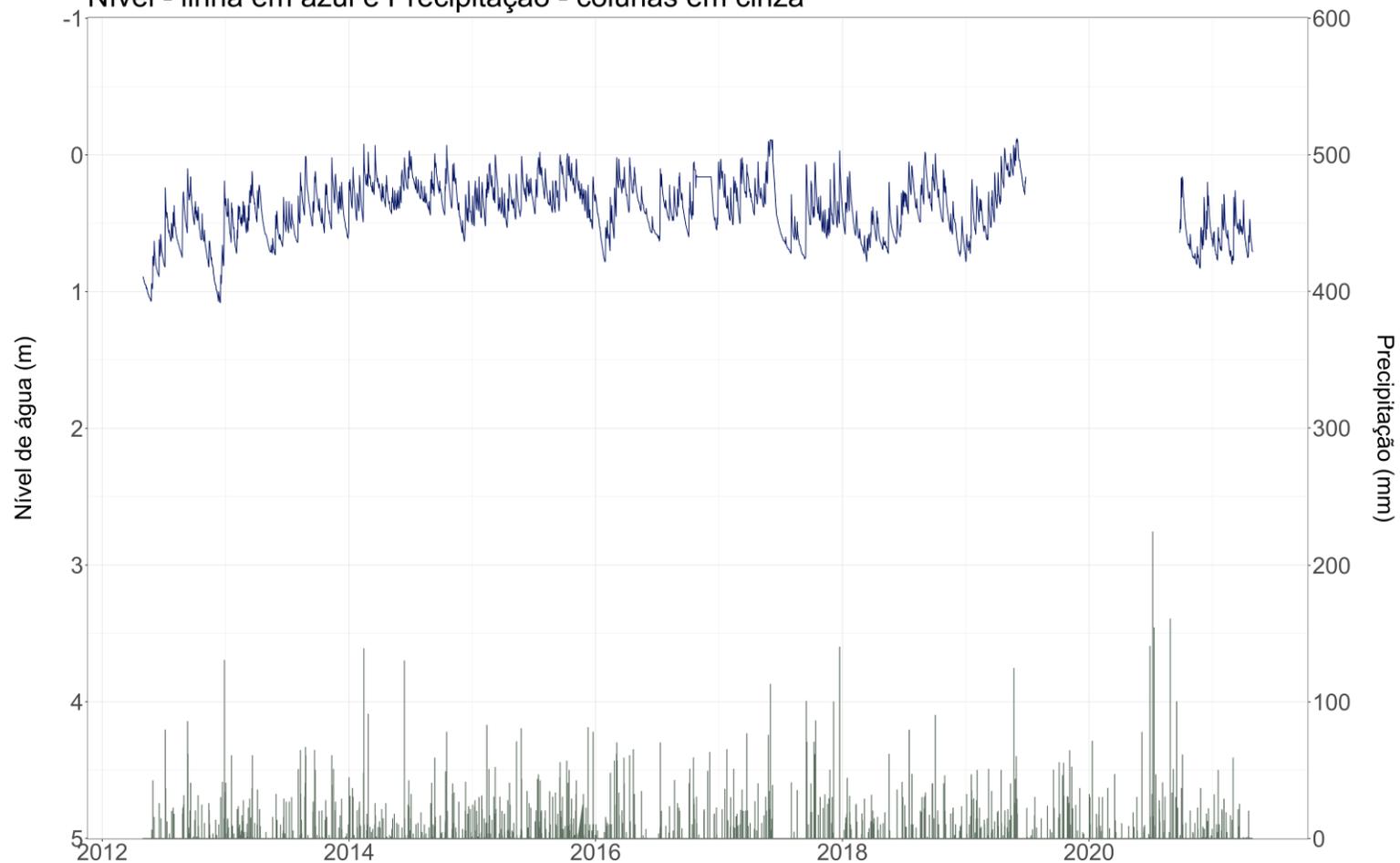


Figura – Gráfico de nível e precipitação para o poço 4300020526.

Fonte: Elaboração própria.

Nível e precipitação para o poço 4300020527 (Capão da Canoa - São Jorge)

Nível - linha em azul e Precipitação - colunas em cinza

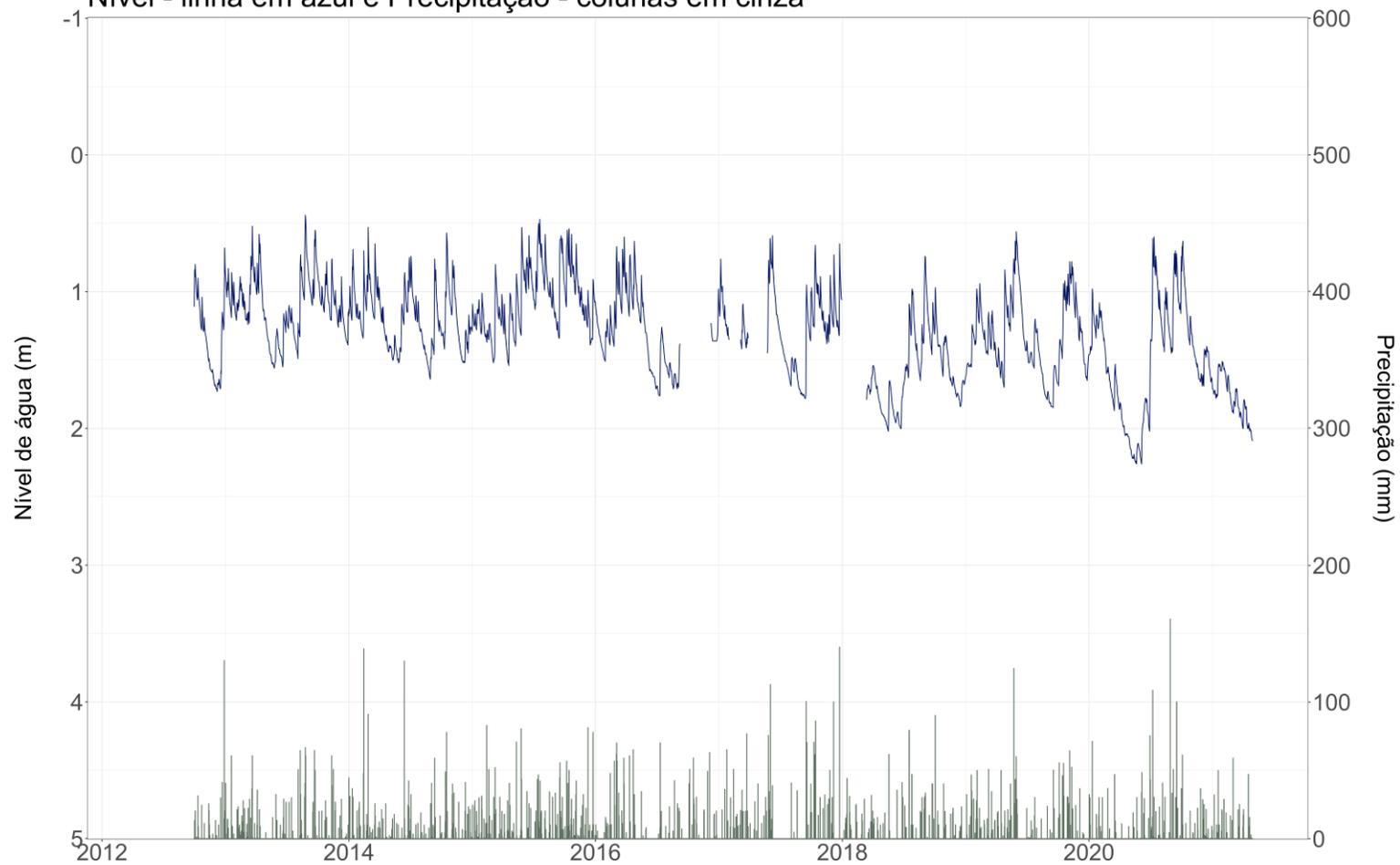


Figura – Gráfico de nível e precipitação para o poço 4300020527.

Fonte: Elaboração própria.

Nível e precipitação para o poço 4300020528 (Capão da Canoa)

Nível - linha em azul e Precipitação - colunas em cinza



Figura – Gráfico de nível e precipitação para o poço 4300020528.

Fonte: Elaboração própria.

Nível e precipitação para o poço 4300020529 (Xangri-lá)

Nível - linha em azul e Precipitação - colunas em cinza

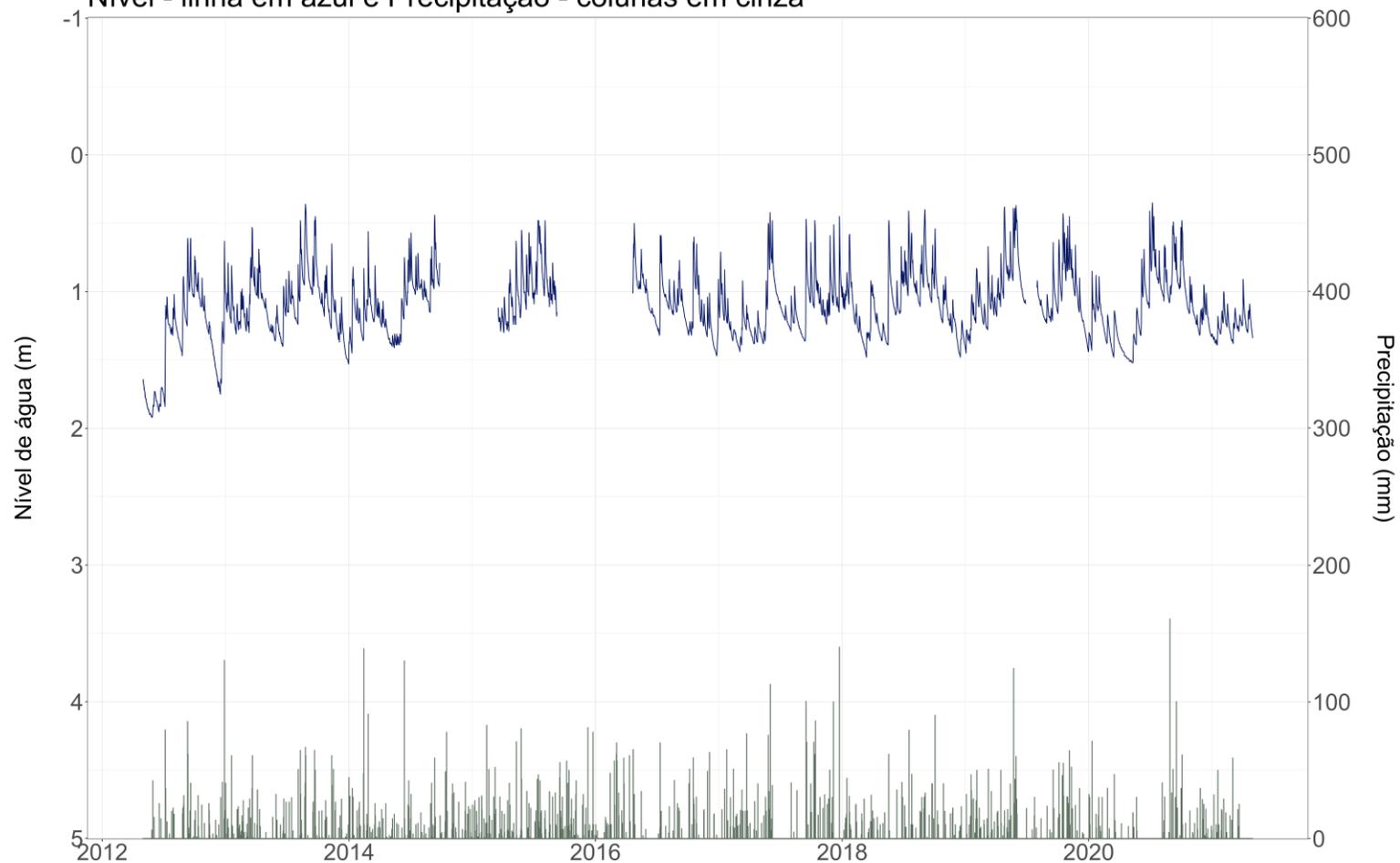


Figura – Gráfico de nível e precipitação para o poço 4300020529.

Fonte: Elaboração própria.

Nível e precipitação para o poço 4300020530 (Osório)

Nível - linha em azul e Precipitação - colunas em cinza

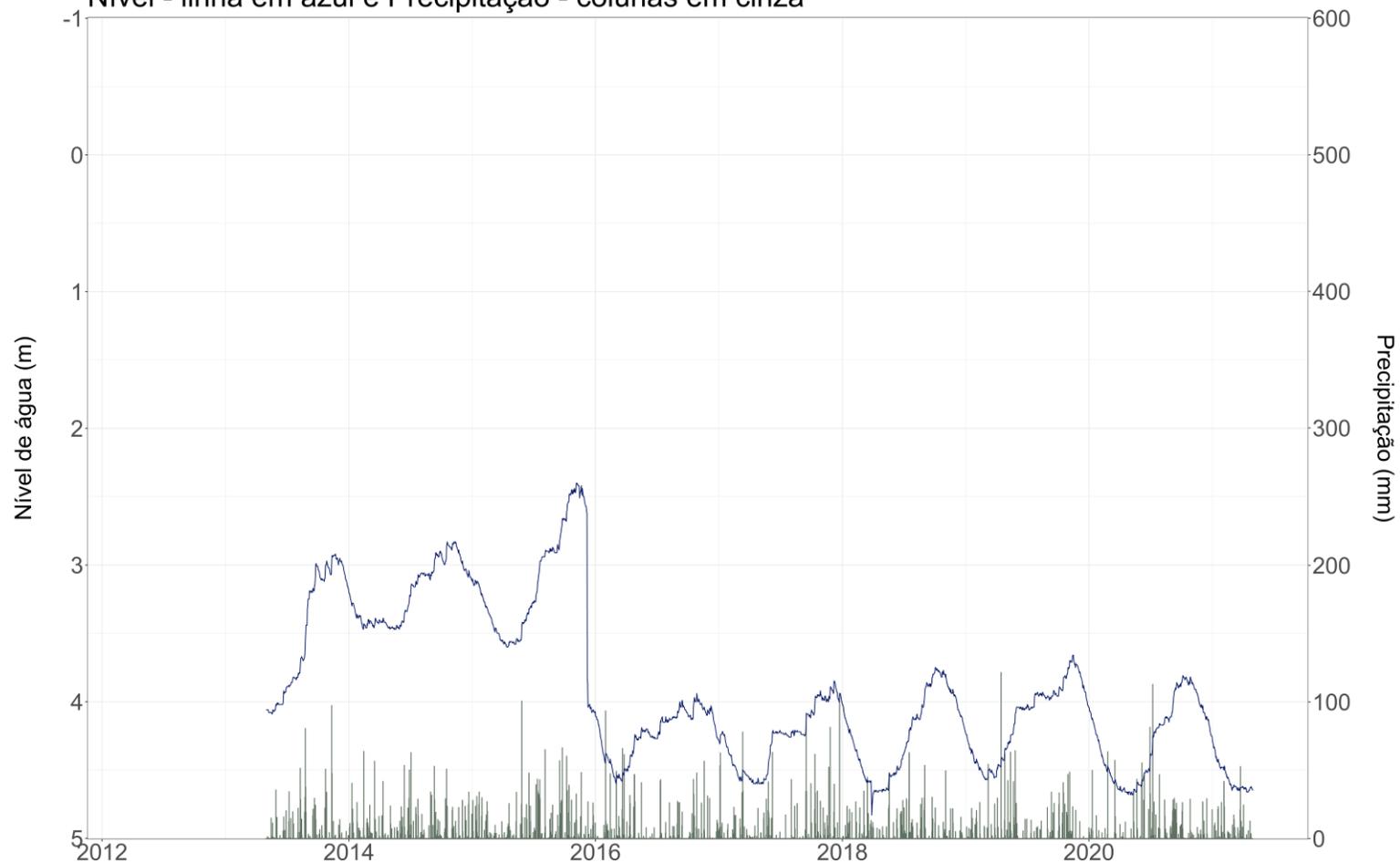


Figura – Gráfico de nível e precipitação para o poço 4300020530.

Fonte: Elaboração própria.

Nível e precipitação para o poço 4300020566 (Terra de Areia)

Nível - linha em azul e Precipitação - colunas em cinza



Figura – Gráfico de nível e precipitação para o poço 4300020566.

Fonte: Elaboração própria.