

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

**AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE NA EXPLOTAÇÃO DE ÁGUA
SUBTERRÂNEA EM CAXIAS DO SUL**

VINICIUS SILVA MORAES

PORTO ALEGRE

2024

VINICIUS SILVA MORAES

**AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE NA EXPLOTAÇÃO DE ÁGUA
SUBTERRÂNEA EM CAXIAS DO SUL**

Projeto Temático em Geologia III apresentado na forma de monografia, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Tiago de Vargas

PORTO ALEGRE

2024

CIP - Catalogação na Publicação

Moraes, Vinicius Silva
AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE NA EXPLOTAÇÃO DE ÁGUA
SUBTERRÂNEA EM CAXIAS DO SUL / Vinicius Silva Moraes.
-- 2024.
61 f.
Orientador: Tiago de Vargas.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto
de Geociências, Curso de Geologia, Porto Alegre,
BR-RS, 2024.

1. Hidrogeologia. 2. Superexploração. 3. Segurança
hídrica. 4. Sistema Aquífero Serra Geral. 5. Caxias do
Sul. I. de Vargas, Tiago, orient. II. Título.

Resumo

A água é um recurso imprescindível para a sobrevivência humana e os mananciais subterrâneos não apenas representam a maior parte da água potável em estado líquido do planeta, como também sua extração é de rápida e barata implementação, tornando-os fontes valiosas deste recurso. Por mais abundante que sejam, porém, os mananciais subterrâneos são limitados, e à medida que a demanda por água cresce, a demanda por sua gestão sustentável para garantir que ela continue acessível para as gerações futuras se intensifica. Para contribuir para esta gestão, este trabalho estimou limites para vazões e regimes de bombeamento sustentáveis para uma seleção de poços tubulares construídos no município de Caxias do Sul. O município está situado sobre a Formação Serra Geral, caracterizada por rochas vulcânicas hospedeiras do Sistema Aquífero de mesmo nome, caracterizado por aquíferos fraturados em rocha hospedeira cristalina. Aquíferos deste tipo são caracterizados por serem descontínuos, anisotrópicos, heterogêneos e de geometria indefinida, portanto, não é possível estimar suas recargas. Desta forma, através do método da Capacidade Específica, que foi implementado a partir de dados de testes de bombeamento, disponibilizados pelo SAMAE (Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto de Caxias do Sul), realizados em poços tubulares. Estimou-se a vazão sustentável no presente, os regimes de bombeamento e foi simulado um cenário de superexploração, com bombeamento contínuo, por 5 e 10 anos no futuro para cada poço. A simulação mostrou que já nos 5 primeiros anos de superexploração há graves perdas de produtividade nos poços selecionados, com a disponibilidade de água total caindo de 16.026 para 2.202 m³/dia, caracterizando uma queda de 86,26%. Observou-se ainda, que 37 dos 62 poços apresentaram perdas de produtividade superiores a 90%, sendo 6 destes apresentando vazão nula.

Palavras-chave: Hidrogeologia, Sistema Aquífero Serra Geral, Caxias do Sul, segurança hídrica, superexploração.

Resumen

El agua es un recurso imprescindible para la supervivencia humana, y los manantiales subterráneos no solo representan la mayor parte del agua potable en estado líquido del planeta, sino que también su extracción es de rápida y económica implementación, lo que los convierte en fuentes valiosas de este recurso. Por más abundantes que sean, sin embargo, los manantiales subterráneos son limitados, y a medida que la demanda de agua crece, la necesidad de su gestión sostenible para garantizar que siga siendo accesible para las generaciones futuras se intensifica. Para contribuir a esta gestión, este trabajo estimó límites para caudales y regímenes de bombeo sostenibles en una selección de pozos tubulares construidos en el municipio de Caxias do Sul. El municipio está situado sobre la Formación Serra Geral, caracterizada por rocas volcánicas que albergan el Sistema Acuífero del mismo nombre, caracterizado por acuíferos fracturados en roca hospedante cristalina. Los acuíferos de este tipo se caracterizan por ser discontinuos, anisotrópicos, heterogéneos y de geometría indefinida; por lo tanto, no es posible estimar sus recargas. De esta manera, a través del método de la Capacidad Específica, implementado a partir de datos de pruebas de bombeo, proporcionados por SAMAE (Servicio Autónomo Municipal de Agua y Alcantarillado de Caxias do Sul), realizadas en pozos tubulares, se estimó el caudal sostenible en el presente, los regímenes de bombeo y se simuló un escenario de sobreexplotación, con bombeo constante, a 5 y 10 años en el futuro para cada pozo. La simulación mostró que ya en los primeros 5 años de sobreexplotación hay graves pérdidas de productividad en los pozos seleccionados, con la disponibilidad total de agua disminuyendo de 16,026 a 2,202 m³/día, lo que representa una caída del 86.26%. Además, se observó que 37 de los 62 pozos presentaron pérdidas de productividad superiores al 90%, y 6 de ellos presentaron caudal nulo.

Palabras clave: Hidrogeología, Sistema Acuífero Serra Geral, Caxias do Sul, seguridad hídrica, sobreexplotación

Abstract

Water is an essential resource for human survival, and groundwater sources not only represent the majority of the planet's liquid potable water but also have the advantage of being quickly and cheaply extractable, making them valuable sources of this resource. However abundant they may be, groundwater sources are limited, and as the demand for water grows, so does the need for sustainable management to ensure it remains accessible for future generations. To contribute to this management, this study estimated limits for sustainable flow rates and pumping regimes for a selection of tubular wells constructed in the municipality of Caxias do Sul. The municipality is located on the Serra Geral Formation, characterized by volcanic rocks hosting the Aquifer System of the same name, which consists of fractured aquifers in crystalline host rock. Aquifers of this type are characterized as being discontinuous, anisotropic, heterogeneous, and of undefined geometry, making it impossible to estimate their recharge. Thus, using the Specific Capacity method, implemented from pumping test data provided by SAMAE (Autonomous Municipal Water and Sewage Service of Caxias do Sul), conducted on tubular wells, the sustainable flow rate for the present was estimated, pumping regimes were analyzed, and a scenario of overexploitation, with continuous pumping, for 5 and 10 years into the future was simulated for each well. The simulation showed that within the first 5 years of overexploitation, there were severe productivity losses in the selected wells, with total water availability dropping from 16,026 to 2,202 m³/day, representing an 86.26% decrease. Furthermore, it was observed that 37 of the 62 wells experienced productivity losses exceeding 90%, with 6 of these presenting no flow at all.

Keywords: Hidrogeology, Serra Geral Aquifer System, Caxias do Sul, water security, overexploitation.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 — Localização da área de estudo. 13
- Figura 2 — Coluna estratigráfica das litologias que compõem o arcabouço geológico do município de Caxias do Sul (Lisboa, 2003). 16
- Figura 3 – Gráficos de dispersão de referência para (a) correlação positiva, (b) correlação negativa e (c) ausência de correlação (Draper e Smith, 1998). 30
- Figura 4 — Modelos para curvas de rebaixamento (a) sem estabilização, (b) com estabilização, (c) com barreira hidráulica e (d) com entrada de água (Reginato, notas de aula). 32
- Figura 5 – Gráfico correlacionando o número de medições de nível de água do ensaio de bombeamento (n%) e coeficiente de determinação (R^2) da curva de tendência da capacidade específica de cada poço. 37
- Figura 6 — Gráfico correlacionando a variação da vazão ao longo do ensaio de bombeamento (ΔQ) e coeficiente de determinação (R^2) da curva de tendência da capacidade específica de cada poço. 37
- Figura 7 – Mapa da área de estudo mostrando os poços e os lineamentos definidos por Sgorla et al. (2021). 40
- Figura 8 – Número de poços por direção de lineamento. 42
- Figura 9 – Percentagem de poços por faixas de perdas de produção em (a) 2029 e (b) 2034. 43
- Figura 10 – Número de poços por direção de lineamento mais próximo e (a) vazão estimada pelo método da Capacidade Específica e (b) pela capacidade específica. Azul, vermelho, verde e roxo representam, respectivamente, lineamentos de direção NE-SW, NW-SE, E-W e N-S. 43
- Figura 11 – Recuperação e tempo de recuperação dos poços separados pela direção de seus lineamentos mais próximos. 44
- Figura 12 – Número de poços por direção do lineamento mais próximo e faixas da vazão, em m^3/h , ao fim do ensaio de bombeamento. Azul, vermelho, verde, roxo e cinza representam, respectivamente, lineamentos de direção NE-SW, NW-SE, E-W, N-S e o total de poços. 45
- Figura 13 – Gráficos de rebaixamento por tempo para os poços (a) 13, (b) 20, (c) 32, (d) 44, (e) 56 e (f) 58. 48
- Figura 14 – Gráficos de recuperação por tempo para os poços (a) 13, (b) 20, (c) 32, (d) 44, (e) 56 e (f) 58. 49

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 — Frequência de bombeamento (ANBT NBR 12244:2006) | 23 |
| Tabela 2 — Frequência de recuperação (ANBT NBR 12244:2006) | 24 |
| Tabela 3 — Número n' de medições de nível de água exigidas para um ensaio de recuperação de duração t' com base na tabela 2. | 25 |
| Quadro 1 — Resumo da conformidade dos poços com a NBR 12.244 identificado por cores. Em verde, as exigências da norma estão atendidas. Em amarelo e vermelho, as exigências não são atendidas, mas estão, respectivamente, dentro e fora das faixas de tolerância. Em roxo, valores de recuperação maiores que 100% indicam problemas na execução do teste de aquífero. Subitem 6.1.16 não é aplicado para poços com vazão maior que 5 m ³ /h. | 35 |
| Tabela 4 — Coeficientes de determinação de cada poço. | 36 |
| Tabela 5 — Estimativas calculadas por meio do método da Capacidade Específica para vazão, volume diário disponível, regime de bombeamento, projeções de vazões e volumes diários para 2029 e 2034 e suas perdas de produtividade para cada poço. | 39 |
| Tabela 6 — Direção e distância em metros dos lineamentos mais próximos de cada poço. | 41 |
| Tabela 7 — Volume explotável diário estimado por direção de lineamento para o presente, 2029 e 2034, e suas respectivas perdas de produtividade. | 42 |
| Tabela 8 — Poços dentro das faixas de tolerância classificados por direção do lineamento mais próximo e faixas de vazão. Em itálico e sublinhado, os poços selecionados. | 46 |
| Tabela 9 — Dados dos testes de aquífero e estimativas geradas pelo método da Capacidade Específica. | 47 |
| Tabela 10 — Base de dados resumida incluindo identificação preliminar. | 59 |
| Tabela 11 — Tendência retilínea das curvas dilog e coeficientes angular e linear de cada poço. | 60 |

LISTA DE ABREVIATURAS

ND - Nível Dinâmico

NE - Nível Estático

SASG - Sistema Aquífero Serra Geral

SAG - Sistema Aquífero Guarani

SAMAE - Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto de Caxias do Sul

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 11 |
| 1.1. Localização da área de estudo | 13 |
| 1.2. Objetivos | 14 |
| 1.2.1. Objetivos gerais | 14 |
| 1.2.2. Objetivos específicos | 14 |
| 1.3. Justificativa | 14 |
| 2. ESTADO DA ARTE | 16 |
| 2.1. Geologia regional | 16 |
| 2.1.1. Formação Botucatu | 17 |
| 2.1.2. Formação Serra Geral | 17 |
| 2.1.2.1. Fácies Gramado | 18 |
| 2.1.2.2. Fácies Palmas/Caxias | 18 |
| 2.2. Contexto estrutural | 18 |
| 2.3. Hidrogeologia regional | 19 |
| 2.3.1. Sistema Aquífero Serra Geral | 19 |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS | 21 |
| 3.1. Material | 21 |
| 3.2. Métodos | 21 |
| 3.2.1. Seleção preliminar dos poços | 21 |
| 3.2.2. Análise geral | 22 |
| 3.2.2.1. Conformidade normativa | 22 |
| 3.2.2.2. Geração dos gráficos dos testes de aquífero | 27 |
| 3.2.2.3. Capacidade Específica | 27 |
| 3.2.2.4. Influência da qualidade dos dados em modelos de regressão | 29 |
| 3.2.2.5. Lineamentos | 30 |
| 3.2.3. Análise de detalhe | 31 |
| 3.2.3.1. Seleção de testes de aquífero | 31 |
| 3.2.3.2. Interpretação das curvas de rebaixamento e recuperação | 31 |
| 4. Resultados | 33 |

| | |
|---|-----------|
| 4.1. Seleção preliminar | 33 |
| 4.2. Conformidade normativa | 33 |
| 4.3. Vazão, volume e regime de bombeamento | 38 |
| 4.4. Lineamentos | 40 |
| 4.5. Curvas de rebaixamento e recuperação | 44 |
| 5. DISCUSSÃO | 51 |
| 6. CONCLUSÕES | 54 |
| REFERÊNCIAS | 56 |
| APÊNDICE A – SELEÇÃO PRELIMINAR | 59 |
| APÊNDICE B – CURVAS DE TENDÊNCIA | 60 |

1. INTRODUÇÃO

À medida que a população cresce, sua indispensável demanda por água se intensifica. Como todos os recursos no planeta, porém, a água potável é limitada e pode ser exaurida, inviabilizando sua utilização pelas gerações futuras. Para impedir que isto ocorra, é necessária a gestão sustentável deste recurso, ou seja, não retirar mais do sistema do que a recarga por vias naturais.

Os mananciais subterrâneos representam o maior volume de água potável em estado líquido no planeta, de cerca de 10,3 milhões de km³ ante os 104 mil km³ de rios e lagos (Rebouças, 2008). Ainda, a utilização da água subterrânea não demanda grandes obras de infraestrutura, podendo ser implementada em áreas rurais, industriais e urbanas em pouco tempo, ocupando pouca área e sem maiores custos, tornando este um importante recurso para garantir a segurança hídrica da população dada sua acessibilidade.

O Brasil possui instrumentos para a gestão de seus recursos hídricos, os quais se incluem os subterrâneos, conforme descrito pela Política Nacional de Recursos Hídricos, lei N° 9.433/97 (Brasil, 1997), Art. 2°, cujos objetivos incluem assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água e a utilização racional dos recursos hídricos. A Política Estadual de Recursos Hídricos do Estado do Rio Grande do Sul, lei estadual N° 10.350/94 (Rio Grande do Sul, 1994) descreve também, em seu Art. 2°, parágrafo III, promover o aumento da capacidade de suprimento dos corpos de água, superficiais e subterrâneos, a fim de que as atividades humanas se processem em um contexto de desenvolvimento socioeconômico que assegure a disponibilidade dos recursos hídricos aos seus usuários atuais e às gerações futuras, em padrões quantitativa e qualitativamente adequados. O decreto N° 42.047/02 (Rio Grande do Sul, 2002), que regulamenta disposições da lei 10.350/94 relativas ao gerenciamento e conservação das águas subterrâneas e aquíferos no Rio Grande do Sul, inclui em seu Art. 3°, parágrafo I, a avaliação dos recursos hídricos subterrâneos e o planejamento do seu aproveitamento racional como ação de gerenciamento de águas subterrâneas. A aplicação destes instrumentos regulatórios reflete diretamente na sustentabilidade hídrica dos reservatórios de águas subterrâneas.

A extração de água de um aquífero gera o seu rebaixamento e modifica seus fluxos de descarga e recarga. As consequências da superexploração não são imediatamente perceptíveis, podendo levar décadas para serem percebidas pelo usuário ou pelo poder público (ANA, 2022). Desta forma a gestão dos mananciais subterrâneos é necessária a fim de evitar externalidades cuja recuperação pode ser complexa, onerosa e de demorada reversibilidade. O mesmo autor destaca as seguintes consequências da superexploração: redução dos níveis dos aquíferos, redução na contribuição hídrica dos fluxos de base, aumento nos custos de exploração devido ao rebaixamento do nível dinâmico dos poços e/ou readequação das obras de captação, perda de poços de menor profundidade ou nascentes, subsidência de terrenos, infiltração de águas contaminadas ou salinas e intrusões salinas em aquíferos costeiros.

Segundo Filho (2008a) os reservatórios de águas subterrâneas são objetos de grande complexidade geológica e, portanto, sua integral compreensão é difícil; desta forma, calcular com precisão o volume de água em um aquífero é algo pouco realista. Reservatórios fraturados são descontínuos, heterogêneos e anisotrópicos e suas características hidrológicas são, em grande parte, desconhecidas ou inferidas, atribuindo complexidades próprias a este tipo de aquífero (Hausman, 1980; Reginato, 2003). Filho (2008a) descreve que, na prática, o modo de ação consiste em estimar suas propriedades, particularmente, reservas renováveis e permanentes. O mesmo autor define reservas renováveis como águas sujeitas às flutuações sazonais e determina que para estima-las, é necessário simplificar a situação real para uma situação idealizada mensurável através de um modelo conceitual. Abaixo do nível mínimo das reservas renováveis estão as reservas permanentes, que são águas acumuladas ao longo do tempo geológico, em outras palavras, são águas cuja recuperação é imperceptível no tempo de vida humano (Filho, 2008a).

A área de estudo está inserida no Sistema Aquífero Serra Geral, caracterizado por aquíferos fraturados em rochas cristalinas. Aquíferos deste tipo são descontínuos, heterogêneos, anisotrópicos e de geometria indefinida. A estimativa da recarga das reservas renovável e permanente, portanto, são de complexa e difícil avaliação. Desta forma, a alternativa é analisar a saída de água

através de testes de bombeamento e, através do método da capacidade específica, estimar a vazão de exploração adequada para os poços de interesse. Neste estudo foram estimados, para cada poço, vazão sustentável e regimes de bombeamento e simulado um cenário de superexploração, com bombeamento de 24 horas por dia durante 5 e 10 anos, visando avaliar o impacto de uma gestão inadequada dos poços.

1.1. Localização da área de estudo

A área de estudo é o município de Caxias do Sul, que, de acordo com o IBGE (2010) está localizado no nordeste do estado do Rio Grande do Sul, abrangendo uma área de 1.652.308 m², sendo delimitado pela latitude 29°20'00"S — 28°48'00"S e longitude 51°18'00"W — 50°42'00"W conforme ilustra a Figura 1.

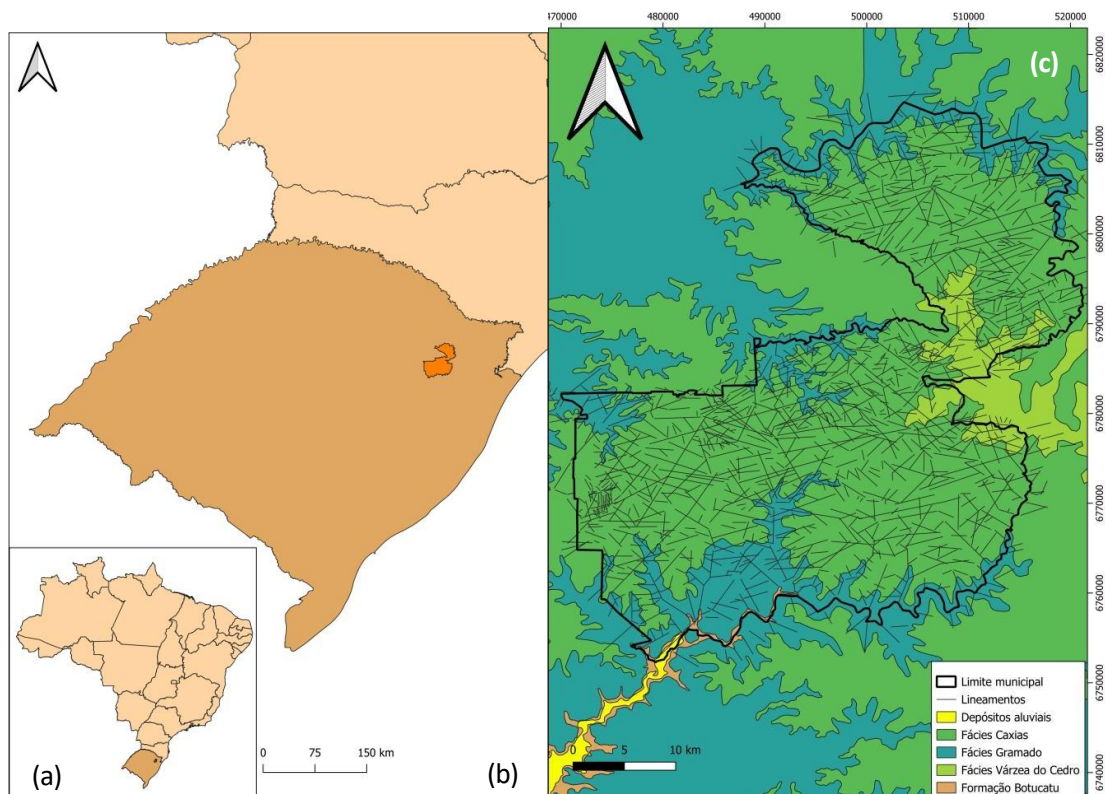


Figura 1: Localização da área de estudo

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivos gerais

O projeto tem como objetivo estimar a capacidade de produção de poços tubulares utilizados na exploração de recursos hídricos subterrâneos, com uso industrial ou uso misto, incluso industrial, no município de Caxias do Sul, identificando a disponibilidade instalada parcial.

1.2.2. Objetivos específicos

Este estudo busca estimar, por meio de métodos matemáticos, o tempo de bombeamento recomendado diário, e o decréscimo da capacidade de produção no alcance de tempo de 5 e 10 anos sob regime de superexploração, com bombeamento de 24 horas diárias, a partir de dados de testes de aquífero em poço único.

A partir da interpretação de gráficos de rebaixamento por tempo e recuperação por tempo, será descrito o comportamento hidrodinâmico de seis poços, representativos da base de dados.

Também comparar os testes de aquífero da base de dados com as exigências da NBR 12.244 (ABNT, 2006) e, através de métodos estatísticos, verificar se existe dependência entre o cumprimento da norma e qualidade dos dados.

1.3. Justificativa

A demanda humana por água em todas as suas atividades, das grandes indústrias à mais básica sobrevivência dispensa introduções, de tal forma seu acesso foi incluído ao Artigo 5º da Constituição Federal (Brasil, 1988) como um dos direitos e garantias fundamentais mediante a PEC 4/2018 (Brasil, 2018). Os recursos hídricos subterrâneos têm relevante contribuição para o atendimento das demandas do município. Desta forma, é de suma importância a gestão sustentável deste recurso a fim de garantir que ele continue disponível no longo prazo. Os dados gerados por este trabalho contribuirão para essa gestão ao estimar o volume de água disponível para a indústria de Caxias do Sul com a infraestrutura atual de poços, contribuindo para a segurança hídrica do município.

A economia de Caxias do Sul é a segunda maior do Rio Grande do Sul,

com Produto Interno Bruto (PIB), em 2019, de R\$ 25,9 bilhões (IBGE, 2022) e possui um banco de dados confiável, disponível para acesso, com testes de vazão completos e em quantidade relevante para realizar este tipo de estudo, que é difícil de obter em outras cidades. Devido à disponibilidade de dados, Caxias do Sul pode ser uma referência para outros municípios na gestão das águas subterrâneas, uma vez que a Política Nacional de Recursos Hídricos atribui às instâncias municipais, estaduais e federais a responsabilidade sobre esse recurso.

2. ESTADO DA ARTE

2.1. Geologia regional

A área de estudo está situada na Bacia do Paraná. A bacia constitui uma sucessão sedimentar-magmática com idades entre o Neordoviciano e o Neocretáceo, incluindo o sul do Brasil, leste do Paraguai, nordeste da Argentina e norte do Uruguai, abrangendo uma área de mais de 1.500.000 km² (Reginato, 2003; Milani, 2004; Frank, 2008). O registro estratigráfico da bacia tem tendência à continentalização dos sistemas deposicionais atuantes (Milani, 2004). Do Neordoviciano ao Carbonífero, a bacia apresenta depósitos oceânicos (Milani, 2004). A partir do Permiano, dominam depósitos de mar interior. No Mesozoico a bacia passa a ser dominada por desertos arenosos até a ruptura do Gondwana (Milani, 2004; Frank, 2008), quando o embasamento da bacia foi fortemente afetado por intrusões de grandes volumes de magma que se instalaram como diques, soleiras ou extravasaram até a superfície (Roisenberg e Viero, 2000 *apud* Lisboa, 2003; Milani, 2004; De Vargas, 2009).

| P E R Í O D O | I D A D E Ma | UNIDADE LITOES- TRATIGRA- FICA | LITOLÓGICAS | | COTA DA ALTITUDE DO TOPO EM METROS DO NÍVEL DO MAR | ESPESSURA APROXIMADA EM METROS |
|--|-----------------------------|---|----------------------------|--|---|--------------------------------------|
| | | | T I P O | | | |
| C R E T Á C E O I N F. | 128 | FORMAÇÃO SERRA GERAL | C A X I A S | VITRÓFIROS PRETOS | 1000 | 80 |
| | | | | VULCÂNICA ÁCIDA CINZA | 920 | 170 |
| | | | | VULCÂNICA ÁCIDA VERMELHA | 750 | 70 |
| | | | | VULCÂNICA ÁCIDA CINZA | 680 | 70 |
| | | | | BASALTOS E ANDESIBASALTOS TIPO GRAMADO | 610 | 450 |
| JURÁS- SICO | 138 | FORMAÇÃO BOTUCATU | | ARENITOS EÓLICOS | 160 | 160 |

Figura 2: Coluna estratigráfica das litologias que compõem o arcabouço geológico do município de Caxias do Sul (Lisboa, 2003).

A área de estudo está situada sobre as rochas do Grupo São Bento (Sgorla, 2022) que tem como ocorrências principais as rochas vulcânicas da Formação Serra Geral, divididas nas rochas básicas, denominadas de Fácies Gramado, ácidas, denominadas Fácies Palmas, e subordinadamente os arenitos

da Formação Botucatu, conforme ilustra a Figura 2 (Roisenberg e Viero, 2000 *apud* Lisboa, 2003; Milani, 2004). As rochas ácidas são a litologia aflorante principal e é localmente denominada de Unidade Caxias (Milani, 2004).

2.1.1. Formação Botucatu

A Formação Botucatu, consiste no pacote arenoso sotoposto e concordante com os derrames vulcânicos da Formação Serra Geral (Reginato, 2003; Scherer et al., 2021). Aflora ao longo da escarpa da Formação Serra Geral, com espessura que varia entre 0 e 120 metros (Scherer et al., 2021). É composta por dunas eólicas, integral ou parcialmente preservadas pelas vulcânicas do Serra Geral que a sobrepõem (Reginato, 2003; Frank, 2008; Scherer et al., 2021). Datações para a Formação Botucatu são relativas. Sabe-se que a sedimentação ainda estava em curso no início dos derrames que gerariam a Formação Serra Geral, e que esta, é dada 134 Ma com base em datações de Ar^{40}/Ar^{39} . Entretanto, a idade do início da sedimentação é incerta (Scherer et al., 2021).

Os arenitos da Formação Botucatu têm granulometria de areia fina e média, de composição quartzo-feldspática com níveis milimétricos de minerais pesados que marcam a estratificação da rocha, cor rosada a amarelada e pouca matriz, resultando em rochas friáveis (Reginato, 2003; Betiollo, 2006). O mesmo autor descreve a presença de estratificação cruzada planar, acanalada e com superfície de truncamento de médio a grande porte (Reginato, 2003).

2.1.2. Formação Serra Geral

A Formação Serra Geral foi formada por um vulcanismo de grandes proporções, com espessura média de 800 metros e área aproximada de 1.200.000 km² (Roisenberg e Viero, 2000; Severghini, 2020), sendo 137.000 km² destes, no estado do Rio Grande do Sul (Reginato, 2003) e idade, baseados em Ar/Ar, entre 137 e 127 milhões de anos (Milani, 2004). Rochas basálticas com andesitos subordinados constituem a base do pacote enquanto a intercalação entre derrames ácidos e básicos é frequente do meio para o topo do pacote (Roisenberg e Viero, 2000; Viero et al., 2021).

É caracterizada por três grandes setores geoquímicos: setentrional, central e meridional, sendo o terceiro, onde a área de estudo está inserida (Roisenberg e

Viero, 2000). Nela, os basaltos são denominados Baixo-TiO₂, a presença de derrames intermediários é frequente e há expressiva ocorrência de derrames ácidos afíricos denominados Tipo Palmas concentrados próximos à borda oriental da escarpa (Roisenberg e Viero, 2000).

2.1.2.1. Fácies Gramado

O perfil anatômico dos derrames básicos da Formação Serra Geral, segundo Roisenberg e Viero (2000), são raros, mas quando ocorrem, apresentam, da base para o topo, uma delgada zona densa e vítrea, uma zona de diáclases horizontais dominantes igualmente delgadas, uma parte central volumosa com disjunções colunares, uma nova camada de diaclases horizontais com topo amigdalar.

2.1.2.2. Fácies Palmas/Caxias

Roisenberg e Viero (2000) descrevem o perfil anatômico dos derrames ácidos, possuem formas tabulares e homogêneas de espessura média de 40 metros, podendo estender-se por dezenas de quilômetros de distância, e podem ser esquematizados em três zonas: basal, central e superior. A zona basal é constituída por vitrófiros e brechas de fluxo, correspondendo de 5 a 10% da espessura da unidade. A zona central é a mais espessa, com aproximadamente 70% da espessura total da unidade, e caracterizada por granófiros com pronunciado e fino diaclasamento tabular na base e topo, podendo alcançar 30 metros de espessura. Na parte intermediária dessa zona, a rocha passa a exibir aspecto maciço e fina cristalinidade, com fraturamento discreto até colunar. A zona superior é a mais delgada e similar à basal, porém se diferencia pela presença de visículas e amígdalas.

2.2. Contexto estrutural

A Bacia do Paraná é influenciada por ciclos orogênicos que afetaram as duas unidades pré-cambrianas do Escudo Sul-Riograndense, o Cráton Rio de La Plata e o Cinturão Dom Feliciano (De Vargas, 2022a). Os sistemas de falha do Escudo Sul-Riograndense incluem a Dorsal de Canguçu (N35-75E), Passo, Passo do Marinheiro (N5W e N15E), Açotéia-Piquiri (N30E) e Noroeste (N65-75W) (Picada, 1972), sendo os dois primeiros falhas transcorrentes e o terceiro um graben (Nummer et al., 2014). Os sistemas de lineamento dominantes na Bacia

do Paraná têm direção N30-70E, N30-60W, NNE e NNW (De Vargas, 2022a).

No nordeste do Rio Grande do Sul, as zonas de fraturas apresentam direção preferencial NE-SW e subordinadamente NW-SE e EW (Reginato e Strieder, 2006; Nummer et al., 2014), com o cenário se repetindo em Caxias do Sul, que possui lineamentos de direção NE-SW em maior quantidade seguido das direções NW-SE e E-W, onde são menos relevantes. Os lineamentos de direção N40E está relacionado com o modelo geológico e os padrões estruturais do Cinturão Dom Feliciano (Nummer et al., 2014; De Vargas, 2022a). A Falha Caxias, de direção N30E e comprimento aproximado de 70 km, é influenciado pelo sistema de falhas Dorsal de Canguçu (De Vargas, 2022a). Os padrões estruturais de direção NE-SW da Bacia do Paraná têm reativações recorrentes.

2.3. Hidrogeologia regional

2.3.1. Sistema Aquífero Serra Geral

O Sistema Aquífero Serra Geral (SASG), de natureza fissural e livre, é uma das principais unidades hidroestratigráficas e a mais explorada do sul do Brasil em função de sua extensão territorial, baixo custo de implementação, boa qualidade da água e boa vazão (Viero et al., 2021). Segundo o mesmo autor, o Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) registra cerca de 13.000 poços tubulares em funcionamento no SASG.

O SASG é subdividido em dois domínios: granular, restrito ao manto de alteração próximo à superfície, de pequenas dimensões, e o fraturado, em profundidade, nas rochas da Formação Serra Geral (Reginato, 2003). O manto de alteração é condicionado pelo tipo e espessura do solo, relevo, litologia (tipo e estrutura primária) e clima (Reginato e Strieder, 2004). A porosidade do aquífero fraturado é oriunda tanto das estruturas dos derrames, que incluem zonas vesiculares á amigdalares, brechas e autobrechas, disjunções horizontais e verticais e de contato entre derrames, quanto fraturas tectônicas, que frequentemente se conectam, amplificando a permeabilidade da rocha (Viero et al., 2021), sendo as estruturas tectônicas os principais condicionantes para a circulação de água e, de maneira secundária, as estruturas primárias das rochas (Reginato e Strieder, 2004).

A recarga do SASG tem origem pluvial (Frank, 2008; Viero et al., 2021), sendo controlada pelas condições geomorfológicas do meio. As maiores recargas estão concentradas em áreas vegetadas, de topografia pouco acidentada e manto de alteração bem desenvolvido. A recarga ocorre em duas etapas, sendo a primeira no manto de alteração e posteriormente para as fraturas e estruturas. Porém nem toda a água que acumula no manto de alteração chega às fraturas.

Pontualmente, em grandes sistemas de falha que cortam as rochas vulcânicas e as sedimentares sotopostas, ocorre a conexão do SASG com o Sistema Aquífero Guarani (SAG), podendo resultar em recarga ascendente do SASG quando as condições hidráulicas permitirem (Reginato, 2003; Frank, 2008, Viero et al., 2021).

As águas do SASG são predominantemente bicarbonatadas cálcicas (Reginato, 2003; Viero et al., 2021), seguido de bicarbonatadas magnesianas com baixa salinidade, em geral inferior a 250 mg/L (Viero et al., 2021). Nos pontos onde o SAG e o SASG se conectam, a mistura das águas, eleva a salinidade e o teor de sódio da água, caracterizando reservatórios bicarbonatados sódicos (Reginato, 2003; Frank, 2008).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Material

Foi utilizado para este estudo um banco de dados com 172 poços de testes de aquífero em poço único. A seguir, serão descritos os programas e bases de dados utilizadas.

- I. Dados digitalizados de testes de aquífero em poço único de poços tubulares fornecidos, mediante requisição, pelo SAMAE (Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto de Caxias do Sul);
- II. Mapa de lineamentos e densidade de lineamentos no município de Caxias do Sul em escala 1:30000 produzido por Sgorla et al. (2021);
- III. Sistema de Informações Geográficas (SIG) QGIS Desktop 3.32.0: para a confecção dos mapas do estudo e medir a distância entre cada poço e seu respectivo lineamento mais próximo;
- IV. Editor de planilhas Microsoft Excel 2010: para a manipulação da base de dados, implementação dos métodos matemáticos e geração de gráficos.

3.2. Métodos

O estudo foi dividido em três etapas: (a) separar poços tubulares de uso industrial e uso múltiplo incluindo industrial dos poços dos demais usos, (b) análise geral de poços de uso industrial e (c) análise de detalhe de seis poços específicos.

3.2.1. Seleção preliminar de poços

A base de dados contém um total de 172 testes de aquífero em poço único, além de planilha auxiliar contendo o uso da água e as coordenadas geográficas dos poços tubulares, onde os testes foram conduzidos. Primeiramente, foram descartados os testes de aquífero cujo o poço não constava na planilha auxiliar, poços presentes na planilha auxiliar, porém com testes de aquífero ausentes da base de dados principal e poços onde os dados da planilha auxiliar são incongruentes com os do teste de aquífero.

A seguir, foram selecionados para o estudo os poços com base em sua aplicação: uso industrial e uso misto incluindo industrial. Os poços para os demais usos foram descartados.

3.2.2. Análise geral

Nesta etapa, os seguintes passos foram executados: análise do nível de conformidade dos testes de produção em poço único com as regulamentações da NBR 12.244 (ABNT, 2006); geração de gráficos de rebaixamento por tempo, recuperação por tempo e capacidade específica por tempo; implementação do método da capacidade específica; geração de gráficos de R^2 por variação de vazão e R^2 por frequência de medição; e relacionar poços e lineamentos. Toda esta etapa foi feita com o uso do Microsoft Excel 2010 exceto a etapa de lineamentos, onde o QGIS Desktop 3.32.0 será utilizado.

3.2.2.1. Conformidade Normativa

O item 6.1 da NBR 12.244 estabelece diretrizes para a execução de testes de aquífero. A base de dados disponível permitiu a análise dos subitens 6.1.10, que define a frequência de medições no ensaio de bombeamento; 6.1.11, que define o tempo mínimo de bombeamento; 6.1.12, que define o mínimo de rebaixamento a ser recuperado e a frequência de medições no ensaio de recuperação; e 6.1.16 que define, para poços cuja vazão é inferior a 5 m³/h, que a vazão ao longo do ensaio de bombeamento deve se manter constante e que o nível dinâmico deve se manter estável por no mínimo 4 horas.

Foram considerados em conformidade com o subitem 6.1.11 todos os ensaios com duração maior ou igual a 1440 minutos (24 horas), conforme definido pela norma.

O subitem 6.1.10 determina que a frequência de medições de nível de água em um ensaio de bombeamento devem seguir a tabela 1.

Tabela 1: Frequência de bombeamento (ANBT NBR 12244:2006)

| Período (min) | Intervalo de leitura (min) |
|---------------|----------------------------|
| < 10 | 1 |
| 10 — 20 | 2 |
| 20 — 60 | 5 |
| 60 — 120 | 10 |
| 120 — 600 | 30 |
| 600 — 900 | 60 |
| > 900 | 120 |

Presumindo um ensaio de bombeamento de 1440 minutos, equivalente às 24 horas mínimas de teste conforme subitem 6.1.11, e com base na tabela 1, são considerados em conformidade com a norma os testes de bombeamento com 55 medições de nível de água. Para ensaios com mais de 24 horas, exige-se uma medida extra para cada 120 minutos de ensaio. Desta forma, com base na tabela 1 e no subitem 6.1.11., o número mínimo de medições exigidos pela norma pode ser descrito pela equação 1.

$$n_m = 55 + \left(\frac{t-1440}{120} \right) \quad (1)$$

Onde t é o tempo de bombeamento e n_m o número mínimo de medições de nível de água exigido pela NBR 12.244 para ensaios de bombeamento de tempo t, sendo este um número inteiro e arredondado para cima em caso de resultado não inteiro. Estão em conformidade com o subitem 6.1.10 ensaios com o número de medições maior ou igual a n_m .

O subitem 6.1.2 determina que a recuperação deve ser superior a 80% do rebaixamento verificado. A recuperação pode ser calculada conforme a equação 2.

$$R = \frac{s-s'}{s} \times 100 \quad (2)$$

Onde R é a recuperação, s o rebaixamento máximo e s' o rebaixamento ao fim do ensaio de recuperação.

O número de medições de nível de água exigido pela NBR 12.244 para um ensaio de recuperação obedece a tabela 2.

Tabela 2: *Frequência de recuperação (ANBT NBR 12244:2006)*

| Período (min) | Intervalo de leitura (min) |
|----------------------|---------------------------------------|
| < 10 | 1 |
| 10 — 20 | 2 |
| 20 — 60 | 5 |
| 60 — 120 | 10 |
| 120 — 240 | 20 |
| 240 — 480 | 30 |
| > 480 | 60 |

Estão em conformidade com a norma os ensaios de recuperação com número mínimo de medições n_m' para um tempo de recuperação t' conforme tabela 3, construída com base na tabela 2.

Tabela 3: Número n' de medições de nível de água exigidas para um ensaio de recuperação de duração t' com base na tabela 2.

| t' (min) | n_m' | t' (min) | n_m' | t' (min) | n_m' | t' (min) | n_m' |
|------------|--------|------------|--------|------------|--------|------------|--------|
| 0 | 0 | 20 | 15 | 140 | 30 | 600 | 45 |
| 1 | 1 | 25 | 16 | 160 | 31 | 660 | 46 |
| 2 | 2 | 30 | 17 | 180 | 32 | 720 | 47 |
| 3 | 3 | 35 | 18 | 200 | 33 | 780 | 48 |
| 4 | 4 | 40 | 19 | 220 | 34 | 840 | 49 |
| 5 | 5 | 45 | 20 | 240 | 35 | 900 | 50 |
| 6 | 6 | 50 | 21 | 270 | 36 | 960 | 51 |
| 7 | 7 | 55 | 22 | 300 | 37 | 1020 | 52 |
| 8 | 8 | 60 | 23 | 330 | 38 | 1080 | 53 |
| 9 | 9 | 70 | 24 | 360 | 39 | 1140 | 54 |
| 10 | 10 | 80 | 25 | 390 | 40 | 1200 | 55 |
| 12 | 11 | 90 | 26 | 420 | 41 | 1260 | 56 |
| 14 | 12 | 100 | 27 | 450 | 42 | 1320 | 57 |
| 16 | 13 | 110 | 28 | 480 | 43 | 1380 | 58 |
| 18 | 14 | 120 | 29 | 540 | 44 | 1440 | 59 |

O subitem 6.1.16 da NBR 12.244 determina que, para poços com vazão inferior a 5 m³/h, a vazão deve ser constante e o nível dinâmico deve se manter estável durante as 4 horas finais do ensaio. O subitem não se aplica para poços com vazão maior ou igual a 5 m³/h.

Não há definição exata para estabilidade, portanto, para efeitos deste estudo, será considerado estável o poço cujo rebaixamento em $t = 1200$ minutos, 4 horas antes do fim do ensaio, seja superior a 99% do rebaixamento máximo, conforme equação 3. Para testes onde não há medição de rebaixamento para $t = 1200$, será utilizada a medida disponível imediatamente anterior.

$$\Delta s = \frac{s_{1200}}{s} \times 100 \quad (3)$$

Onde Δs é a variação percentual do rebaixamento, s_{1200} é o rebaixamento para $t = 1200$ e s é o rebaixamento ao fim do ensaio de bombeamento.

Embora hajam testes de aquífero que não estejam em conformidade com a NBR 12.244, há testes que estão mais próximos da norma que outros de tal forma que a qualidade do dado, embora não ótima, não esteja comprometida. Desta forma, as etapas a seguir foram conduzidas para quantificar o quão próximos da norma estão os poços em não conformidade.

Para verificar o quão próximo da conformidade com o subitem 6.1.10, cada poço está, calculou-se a razão entre o número de medidas de nível de água do teste de bombeamento e o número mínimo demandado pela norma, transformado em percentagem, conforme equação 4.

$$n_{\%} = \frac{n}{n_m} \times 100 \quad (4)$$

Onde $n_{\%}$ é o percentual de medidas de nível de água alcançado pelo teste de bombeamento, n o número de medidas executadas no teste e n_m o mínimo exigido conforme definido pela equação 1.

Para o subitem 6.1.12, além das recuperações abaixo de 80%, já calculadas pela equação 2, também foi calculada a razão entre o número de medidas de nível de água do teste de recuperação e o mínimo exigido, transformado em percentagem, conforme equação 5.

$$n'_{\%} = \frac{n'}{n'_m} \times 100 \quad (5)$$

Onde $n'_{\%}$ é o percentual de medidas de nível de água alcançado pelo teste de recuperação, n' o número de medidas executadas no teste e n'_m o mínimo exigido conforme definido pela tabela 3.

Para o subitem 6.1.16, além dos resultados da equação 3, também serão verificadas as variações de vazão ao longo dos ensaios de bombeamento para aqueles cuja vazão não foi constante e menor que 5 m³/h ao final do teste. Para isso, foi calculado com quantos por cento da vazão inicial o ensaio terminou, conforme descrito pela equação 6.

$$\Delta Q = \frac{Q}{Q_0} \times 100 \quad (6)$$

Onde ΔQ é o percentual da vazão inicial mantida ao final do ensaio de bombeamento, Q sua vazão final e Q_0 sua vazão inicial.

3.2.2.2. Geração dos gráficos dos testes de aquífero

Nesta etapa foram gerados gráficos de dispersão de rebaixamento por tempo, recuperação por tempo e capacidade específica por tempo para cada poço de uso industrial e misto incluso industrial da base de dados. Em todos os gráficos tempo é representado no eixo das abscissas, em minutos, em escala logarítmica.

Os gráficos de rebaixamento por tempo foram gerados com o rebaixamento, em metros, em escala linear. Os gráficos de recuperação por tempo, da mesma forma, têm a recuperação em metros e escala linear.

Os gráficos de capacidade específica por tempo foram gerados com a capacidade específica, em $m^3/h/m$, em escala logarítmica. Adicionalmente, foi adicionado ao gráfico curva de tendência do tipo regressão de potência, além da equação da reta de tendência e do coeficiente de determinação.

A curva de tendência se inicia no ponto $t = 0$, exceto para pontos onde $s = 0$. A capacidade específica é, por definição, a razão entre a vazão e o rebaixamento, portanto, valores capacidade específica para rebaixamentos igual a zero são indeterminados. Para estes casos, a curva de tendência começa no primeiro ponto em t onde $s > 0$.

O coeficiente de determinação, conforme Koether (2012), descreve o quão próxima uma curva de tendência modela os dados. Para regressões não lineares, como a regressão de potência, o coeficiente representado por R^2 varia de 0 a 1, onde quanto mais próximo de 1, mais próximo da realidade está o modelo.

3.2.2.3. Capacidade Específica

O método da Capacidade Específica (Filho, 2008b) permite estimar a vazão explotável, o regime de bombeamento e simular uma situação de bombeamento constante, caracterizando superexploração, as quais neste estudo foram feitas de 5 e 10 anos. O método é uma aproximação que parte das seguintes premissas:

- os reservatórios de água subterrânea em meio fraturado apresentam extensão limitada;
- os efeitos dos limites, a princípio, são imprevisíveis, podendo se manifestar sobre as curvas de rebaixamento a qualquer tempo, dependendo da distância em que se encontram no poço bombeado;
- admite-se que a tendência inicial, retilínea da curva di-log de vazão específica por tempo se ajusta a uma lei do tipo:

$$\log\left(\frac{Q}{s}\right) = -m \log(t) + \log C \quad (7)$$

Onde $\frac{Q}{s}$ é a capacidade específica, t o tempo, m o coeficiente angular da curva de tendência e C seu coeficiente linear.

O método será executado a partir das seguintes etapas:

- Avaliação da vazão em função do tempo usando a equação:

$$Q(t) = RD \cdot C(t)^{-m} \quad (8)$$

- Onde $Q(t)$ é a vazão para um tempo t ;
- m e C são, respectivamente, os coeficientes angular e linear da curva de tendência;
- RD é o rebaixamento disponível, usualmente calculado através da subtração da cota do crivo da bomba pelo nível estático. Entretanto, cota do crivo da bomba não está disponível na base de dados, desta forma, foi utilizado o rebaixamento máximo como substituto;
- Avaliação de duas vazões de exploração: Q_1 e Q_{10} , de 1 e 10 dias, respectivamente;
- A vazão recomendada para exploração é igual a Q_1 , E o regime de bombeamento, em horas por dia, obedece a equação:

$$RB = 24 \cdot \left(\frac{Q_{10}}{Q_1}\right) \quad (9)$$

O regime de bombeamento máximo é de 18 horas, mesmo para os poços onde o regime calculado é acima deste valor.

Para as simulações de superexploração para 5 e 10 anos, aplicou-se o seu equivalente em horas na equação 8. As datas dos testes de aquífero não são conhecidas, portanto, presumiu-se que os ensaios foram feitos em 2024. Desta forma, as simulações foram definidas para os anos de 2029 e 2034.

As estimativas de volume foram calculadas com o produto entre a vazão e o regime de bombeamento conforme a equação:

$$V = Q \cdot RB \quad (10)$$

Onde V é o volume diário disponível, em m^3 , Q a vazão em m^3/h e RB o regime de bombeamento em h .

3.2.2.4. Influência da qualidade dos dados em modelos de regressão

Segundo Koether (2012), o coeficiente de definição (R^2) é uma grandeza matemática que calcula o quão próxima é a tendência de regressão não-linear, neste caso, Regressão de Potência, dos dados que ela modela. O R^2 varia entre 0 e 1, e quanto mais próximo de 1, mais próxima é a curva de tendência dos dados reais, e portanto, mais confiável o modelo.

Presumiu-se que um teste de aquífero executado seguindo as diretrizes da NBR 12.244 tem maior probabilidade de gerar uma curva de tendência mais confiável para modelar o teste.

Segundo a Lei dos Grandes Números (Dekking, 2005) a média dos resultados obtidos de um grande número de amostras convergem para o valor verdadeiro. Com base nessa lei, verificou-se se há relação diretamente proporcional entre testes de aquífero com maior número de medições de nível de água, $n\%$, definido na equação 4, e o coeficiente de definição, obtido nas curvas de tendência dos gráficos de capacidade específica por tempo. Ou seja, se existe dependência positiva entre a proximidade com o subitem 6.1.10 da NBR 12.244 e um bom modelo de regressão.

O rebaixamento é uma variável que sofre interferência da vazão, portanto, espera-se que alterações de vazão durante um ensaio de bombeamento reflitam na taxa de rebaixamento do poço. Partindo dessa premissa e de que a curva de

tendência inclui toda a duração do ensaio, se esperou que os valores de ΔQ , definidos pela equação 6, mais distantes de 100%, para mais ou para menos, resultem em redução do coeficiente de definição. Ou seja, se existe dependência positiva entre a proximidade com o subitem 6.1.16 e um bom modelo de regressão.

Para verificar se estas correlações existem, gerou-se gráficos de dispersão entre $n\%$ por R^2 e ΔQ por R^2 e os comparou com os exemplos ilustrados por Draper e Smith (1998) na figura 3.

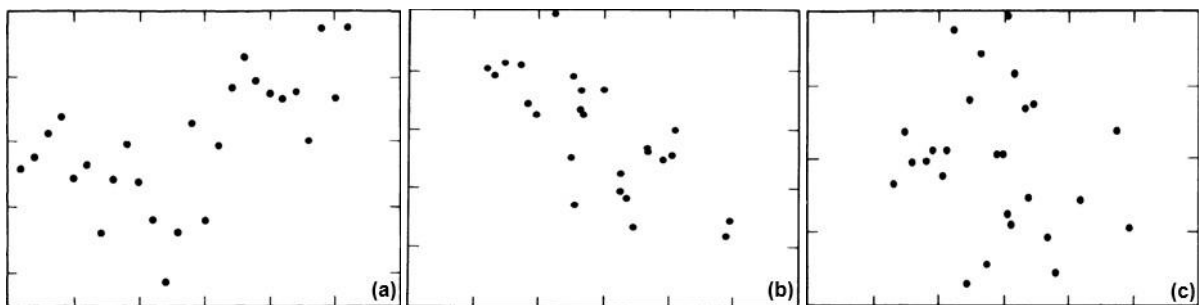


Figura 3: Gráficos de dispersão de referência para (a) correlação positiva, (b) correlação negativa e (c) ausência de correlação (Draper e Smith, 1998).

3.2.2.5. Lineamentos

Utilizando o QGIS Desktop 3.32.0, foram plotados todos os pontos da base de dados junto ao mapa de lineamentos de Sgorla et al. (2021) e cruzando as duas bases de dados as seguintes informações foram extraídas: a direção do lineamento mais próximo de cada poço com base na classificação de De Vargas et al. (2022a) que agrupou os lineamentos nos quadrantes N-S ($337,5^\circ$ - $22,5^\circ$; $157,5^\circ$ - $202,5^\circ$), NE-SW ($22,5^\circ$ - $67,5^\circ$; $202,5^\circ$ - $247,5^\circ$), E-W ($67,5^\circ$ - $112,5^\circ$; $247,5^\circ$ - $292,5^\circ$) e NW-SE ($292,5^\circ$ - $337,5^\circ$; $112,5^\circ$ - $157,5^\circ$), e a distância, em metros, entre cada poço e seu lineamento mais próximo. Presumiu-se que as fraturas que alimentam os poços têm a direção de seu lineamento mais próximo.

Verificou-se a possibilidade de dependência de diferentes direções de lineamento, associadas a estruturas de diferentes origens (De Vargas et al., 2022a; Nummer et al., 2014), a influência na produtividade dos poços. Para isso, foram comparadas as perdas médias de volume de água, o número de poços por faixas de perda, as vazões estimadas no método da Capacidade Específica, as

capacidades específicas, os rebaixamentos recuperados e os tempos de recuperação de cada poço para cada quadrante de lineamentos.

3.2.3. Análise de detalhe

Nesta etapa, foram selecionados testes de aquífero para representar a base de dados e, com base na orientação de seus respectivos lineamentos mais próximos, conformidade dos dados com a NBR 12.244, vazão e capacidade específica, interpretar suas curvas de rebaixamento e recuperação.

3.2.3.1. Seleção dos testes de aquífero

Seis dos poços da base de dados foram selecionados para representarem a base de dados. Para definir esta seleção foram adotados os seguintes critérios:

- Testes em conformidade com a NBR 12.144. Quando esta condição não foi possível por insuficiência de testes, foram tolerados aqueles que possuem valores maiores ou iguais a 50% para $n\%$ e $n'\%$ e entre 50% e 150% para ΔQ ;
- Proporcional a população de poços em cada direção de lineamento;
- Vazão com base em seus valores mais frequentes.

3.2.3.2. Interpretação das curvas de rebaixamento e recuperação

Para interpretar o comportamento das curvas de rebaixamento, verificou-se a estabilização dos poços, observando a declividade da curva de rebaixamento nas últimas horas do teste de bombeamento. Curvas próximas a horizontalidade indicam boa estabilização e situação ótima para exploração, enquanto curvas inclinadas indicam tendência do poço a secar. A aceleração do rebaixamento ao longo do ensaio indica um reservatório descontínuo de volume limitado que tenderá a secar uma vez que a barreira hidráulica for superada. Curvas de rebaixamento com muitas irregularidades podem constituir problemas construtivos, mas devido à área de estudo estar sobre o SASG, o que pressupõe aquíferos fraturados, que conforme Feitosa et al. (2008) e Hausmann (1980), são descontínuos, anisotrópicos e heterogêneos, tais irregularidades serão presumidas entradas de água de uma nova fratura. A figura 4 ilustra os modelos descritos acima.

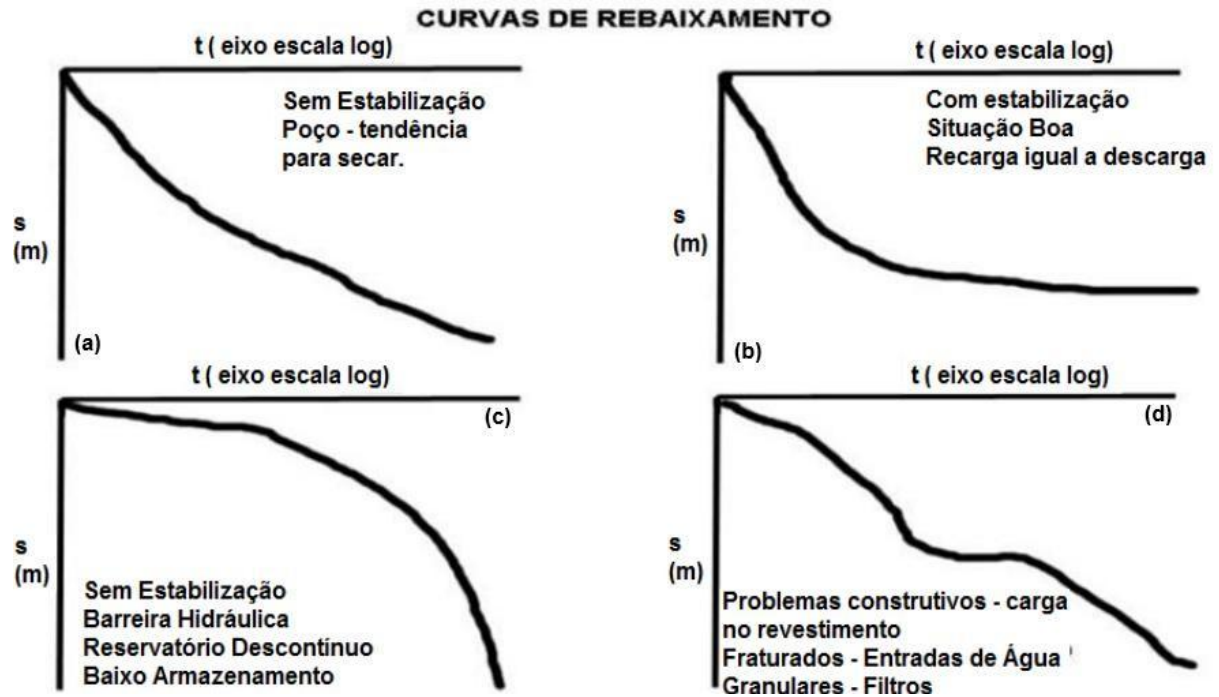


Figura 4: Modelos para curvas de rebaixamento (a) sem estabilização, (b) com estabilização, (c) com barreira hidráulica e (d) com entrada de água (Reginato, notas de aula).

Observou-se possíveis estabilizações forçadas, quando um poço que tende a secar estabiliza de maneira súbita. Isto ocorre quando o responsável pelo teste de aquífero reduz a vazão durante o ensaio de bombeamento e pode ser comprovado se, nos dados do ensaio de bombeamento, for detectada uma queda de vazão.

As curvas de recuperação foram interpretadas com base no quanto do rebaixamento foi recuperado e no tempo de recuperação observando eventuais barreiras hidráulicas ou entradas de água conforme os modelos da figura 4.

4. RESULTADOS

4.1. Seleção preliminar

Para a seleção preliminar, foram levantados todos os poços disponíveis na base de dados, incluindo os testes de aquífero em poço único e uma planilha auxiliar que, além de compilar os poços, possui suas coordenadas geográficas e seu uso, totalizando 172 poços no total. Destes, poços que estão ausentes da planilha auxiliar, ou que estão na planilha, mas não possuem um teste de aquífero, tal qual aqueles poços onde os dados da planilha auxiliar não estão em conformidade com os do teste de aquífero, totalizando 10 poços, foram descartados.

Após o descarte dos poços com problemas de dados, foram selecionados para o prosseguimento do estudo todos os poços com uso industrial ou uso misto incluso industrial, totalizando 62 poços. O Apêndice A resume o processo de seleção dos poços.

4.2. Conformidade normativa

Esta seção foi dedicada a analisar a conformidade dos poços tubulares em relação aos critérios técnicos e normativos estabelecidos pelos subitens 6.1.10, 6.1.11, 6.1.12 e 6.1.16 estabelecidos pela NBR 12.244. Os resultados apresentados destacam o grau de adequação dos poços e identificam suas não-conformidades.

Dos 62 poços, 11 (17,7%) estão de acordo com a frequência de medições de nível de água exigidas pelo subitem 6.1.10.

O subitem 6.1.11 exige um tempo mínimo de ensaio de bombeamento de 24 horas. Dos 62 poços, 61 (98,4%) cumprem essa exigência.

O subitem 6.1.12 exige que 80% do rebaixamento gerado pelo ensaio de bombeamento seja recuperado e exige uma frequência de medições. Dos 62 poços, 46 (74,2%) cumprem a exigência de recuperação, 10 (16,1%) cumprem a exigência de frequência e 9 (14,5%) cumprem ambos, atendendo assim, as exigências do subitem em sua integralidade. Além disso, dois poços possuem recuperação muito maior que 100%, apontando que o teste foi efetuado sem que

o poço estivesse em repouso.

O subitem 6.1.16 não se aplica a testes de aquífero cuja vazão é maior que 5 m³/h, desta forma, ele não será aplicado a 32 poços. As demandas são o rebaixamento nas 4 horas finais do ensaio de bombeamento estabilizado, cumprido por 27 (90%) dos 30 poços e vazão constante ao longo de todo o ensaio, cumprido por 2 (6,7%) poços. Cumprem integralmente as demandas desse subitem 2 (6.7%) poços.

Cumprem integralmente com as exigências da NBR 12.244 verificadas nesse estudo 2 (3,2%) poços, conforme ilustrado pelo quadro 4.1.

Adicionalmente a norma, foram incluídas faixas de tolerância a fim de torná-la menos restritiva para uso posterior neste estudo. Estão dentro da faixa de tolerância do subitem 6.1.10, além dos 11 que estão de acordo com a norma, 49 poços, totalizando 60 (96,8%). Para o subitem 6.1.12, 46 poços estão dentro da faixa de tolerância e somam-se aos 10 que cumprem a norma, totalizando 56 (90,3%) poços. Estão dentro da faixa de tolerância ao mesmo tempo que cumprem os 80% de recuperação 42 (67,4%) poços. A faixa de tolerância para o subitem 6.1.16 inclui 21 poços, totalizando 23 (76,7%) incluindo os poços com vazão constante. Destes, 21 (70%) também possuem rebaixamento constante nas 4 últimas horas do ensaio de bombeamento. Ao todo, 37 (59,7%) dos poços estão ou em conformidade com a NBR 12.244 ou dentro das faixas de tolerância.

Foi avaliada a possibilidade de estabelecer uma dependência entre altos coeficientes de determinação (R^2) obtidos das curvas de tendência dos gráficos de capacidade específica por tempo dos poços e a frequência de medições de nível de água e entre variações de vazão ao longo do ensaio de bombeamento. A hipótese é que maior aderência aos requisitos normativos pode refletir em dados mais confiáveis. Os resultados apresentados visam identificar se existe uma relação estatisticamente significativa entre a conformidade normativa e um modelo de melhor qualidade. A tabela 4 contém os valores de R^2 para cada curva de tendência.

| Poço | 6.1.10 n% | 6.1.11 t (min) | 6.1.12 R | 6.1.12 n'% | 6.1.16 Δs | 6.1.16 ΔQ | Está na norma? | Poço | 6.1.10 n% | 6.1.11 t (min) | 6.1.12 R | 6.1.12 n'% | 6.1.16 Δs | 6.1.16 ΔQ | Está na norma? |
|------|--------------|-------------------|-------------|---------------|----------------------|----------------------|-------------------|------|--------------|-------------------|-------------|---------------|----------------------|----------------------|-------------------|
| 01 | 22% | 1140 | 74,3% | 37% | - | - | Não | 32 | 100% | 1440 | 100,0% | 95% | 100% | 78% | Não |
| 02 | 84% | 1440 | 0,0% | - | 100% | 71% | Não | 33 | 55% | 1800 | 0,0% | - | 100% | 85% | Não |
| 03 | 53% | 1440 | 20,5% | 77% | - | - | Não | 34 | 96% | 1440 | 100,0% | 91% | - | - | Não |
| 04 | 100% | 1440 | 94,4% | 95% | 100% | 42% | Não | 35 | 100% | 1440 | 100,0% | 95% | 100% | 50% | Não |
| 05 | 71% | 1440 | 100,0% | 67% | - | - | Não | 36 | 100% | 1440 | 243,8% | 95% | 100% | 80% | Não |
| 06 | 89% | 1440 | 97,3% | 83% | - | - | Não | 37 | 93% | 1440 | 95,3% | 96% | 100% | 47% | Não |
| 07 | 71% | 1440 | 100,0% | 67% | 100% | 114% | Não | 38 | 85% | 1440 | 90,6% | 78% | 99% | 65% | Não |
| 08 | 85% | 1440 | 38,6% | 79% | - | - | Não | 39 | 93% | 1440 | 91,7% | 96% | - | - | Não |
| 09 | 84% | 1440 | 91,0% | 86% | - | - | Não | 40 | 93% | 1440 | 95,3% | 91% | 100% | 99% | Não |
| 10 | 84% | 1440 | 91,3% | 84% | - | - | Não | 41 | 85% | 1440 | 71,6% | 76% | 94% | 10% | Não |
| 11 | 95% | 1440 | 100,0% | 89% | 101% | 59% | Não | 42 | 93% | 1440 | 78,5% | 89% | 100% | 90% | Não |
| 12 | 95% | 1440 | 175,0% | 47% | - | - | Não | 43 | 93% | 1440 | 90,1% | 89% | 100% | 100% | Não |
| 13 | 67% | 1440 | 86,7% | 72% | - | - | Não | 44 | 96% | 1440 | 93,1% | 86% | - | - | Não |
| 14 | 67% | 1440 | 100,0% | 82% | - | - | Não | 45 | 100% | 1440 | 98,1% | 100% | - | - | Sim |
| 15 | 67% | 1440 | 70,9% | 74% | 101% | 55% | Não | 46 | 100% | 1440 | 100,0% | 100% | 97% | 95% | Não |
| 16 | 51% | 1440 | 91,2% | 83% | 101% | 52% | Não | 47 | 89% | 1440 | 99,7% | 100% | - | - | Não |
| 17 | 85% | 1440 | 89,2% | 78% | - | - | Não | 48 | 100% | 1440 | 100,0% | 97% | - | - | Não |
| 18 | 55% | 1440 | 78,8% | 59% | - | - | Não | 49 | 96% | 1440 | 100,0% | 100% | - | - | Não |
| 19 | 89% | 1440 | 98,3% | 95% | 100% | 27% | Não | 50 | 96% | 1440 | 95,0% | 79% | 93% | 95% | Não |
| 20 | 93% | 1440 | 95,6% | 86% | - | - | Não | 51 | 96% | 1440 | 76,6% | 79% | - | - | Não |
| 21 | 53% | 1440 | 100,0% | 48% | - | - | Não | 52 | 96% | 1440 | 44,0% | 85% | 99% | 95% | Não |
| 22 | 53% | 1440 | 100,0% | 48% | - | - | Não | 53 | 100% | 1440 | 100,0% | 94% | 100% | 91% | Não |
| 23 | 53% | 1440 | 98,7% | 48% | - | - | Não | 54 | 71% | 1440 | 100,1% | 66% | - | - | Não |
| 24 | 44% | 1440 | 86,7% | 44% | 100% | 10% | Não | 55 | 98% | 1440 | 93,4% | 100% | - | - | Não |
| 25 | 76% | 1440 | 95,4% | 79% | 99% | 70% | Não | 56 | 93% | 1440 | 83,9% | 96% | 100% | 89% | Não |
| 26 | 95% | 1440 | 18,8% | 200% | 100% | 29% | Não | 57 | 100% | 1440 | 78,7% | 95% | - | - | Não |
| 27 | 55% | 1440 | 100,0% | 77% | - | - | Não | 58 | 95% | 1440 | 93,8% | 83% | 100% | 57% | Não |
| 28 | 95% | 1440 | 67,9% | 91% | 100% | 30% | Não | 59 | 91% | 1440 | 99,4% | 100% | - | - | Não |
| 29 | 95% | 1440 | 102,7% | 89% | - | - | Não | 60 | 93% | 1440 | 90,2% | 205% | 100% | 100% | Não |
| 30 | 95% | 1440 | 92,7% | 96% | - | - | Não | 61 | 93% | 1440 | 95,4% | 176% | 100% | 54% | Não |
| 31 | 100% | 1440 | 100,0% | 90% | 100% | 57% | Não | 62 | 100% | 1440 | 100,0% | 100% | - | - | Sim |

Quadro 1: Resumo da conformidade dos poços com a NBR 12.244 identificado por cores. Em verde, as exigências da norma estão atendidas. Em amarelo e vermelho, as exigências não são atendidas, mas estão, respectivamente, dentro e fora das faixas de tolerância. Em roxo, valores de recuperação maiores que 100% indicam problemas na execução do teste de aquífero. Subitem 6.1.16 não é aplicado para poços com vazão maior que 5 m³/h.

Tabela 4: Coeficientes de determinação de cada poço.

| Poço | R ² | Poço | R ² | Poço | R ² | Poço | R ² |
|------|----------------|------|----------------|------|----------------|------|----------------|
| 01 | 0,0047 | 17 | 0,8760 | 33 | 0,7306 | 49 | 0,8670 |
| 02 | 0,5212 | 18 | 0,6368 | 34 | 0,8578 | 50 | 0,9581 |
| 03 | 0,9307 | 19 | 0,5848 | 35 | 0,8573 | 51 | 0,8270 |
| 04 | 0,9738 | 20 | 0,7860 | 36 | 0,5657 | 52 | 0,9800 |
| 05 | 0,7895 | 21 | 0,9433 | 37 | 0,6026 | 53 | 0,9000 |
| 06 | 0,5820 | 22 | 0,8970 | 38 | 0,7288 | 54 | 0,7975 |
| 07 | 0,8250 | 23 | 0,8051 | 39 | 0,9746 | 55 | 0,8868 |
| 08 | 0,9871 | 24 | 0,9528 | 40 | 0,8304 | 56 | 0,8613 |
| 09 | 0,8830 | 25 | 0,9470 | 41 | 0,9753 | 57 | 0,9837 |
| 10 | 0,9277 | 26 | 0,9149 | 42 | 0,4488 | 58 | 0,9707 |
| 11 | 0,8319 | 27 | 0,5761 | 43 | 0,7329 | 59 | 0,9408 |
| 12 | 0,5253 | 28 | 0,9787 | 44 | 0,7727 | 60 | 0,8230 |
| 13 | 0,9071 | 29 | 0,8691 | 45 | 0,9850 | 61 | 0,9907 |
| 14 | 0,8868 | 30 | 0,9291 | 46 | 0,8802 | 62 | 0,9723 |
| 15 | 0,9289 | 31 | 0,9598 | 47 | 0,8120 | | |
| 16 | 0,9118 | 32 | 0,8008 | 48 | 0,7356 | | |

Esta base de dados não apresenta dependência entre o número de medições de nível de água e o coeficiente de determinação, conforme ilustrado na figura 5. Embora o ponto que apresente o menor coeficiente de determinação seja também aquele que tenha o menor número de medidas, este claramente se trata de uma exceção.

Há uma possível dependência fraca entre a variação da vazão ao longo do ensaio de bombeamento e o coeficiente de determinação, conforme ilustrado na figura 6. Para variações de vazão maiores que 100%, a dependência é mais visível, embora o número de pontos seja insuficiente. Para as variações menores que 100%, há 10 a 15 pontos que parecem estabelecer uma dependência, onde testes de bombeamento cuja vazão final foi 50% da inicial têm coeficiente de determinação entre 0,83 e 0,88 e, a partir de então, o coeficiente de determinação aumenta a medida que a diferença entre as vazões final e inicial, ficando acima

de 0,97 para testes onde a vazão final é maior que 75% da vazão inicial. A maior parte dos pontos, porém, não obedecem essa tendência, tornando o resultado inconclusivo.

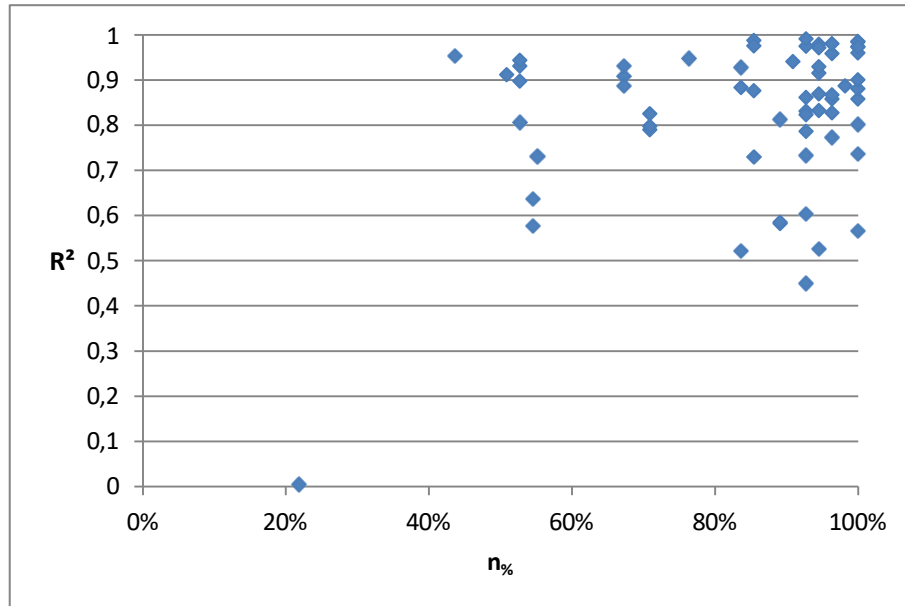


Figura 5. Gráfico correlacionando o número de medições de nível de água do ensaio de bombeamento ($n_{\%}$) e coeficiente de determinação (R^2) da curva de tendência da capacidade específica de cada poço.

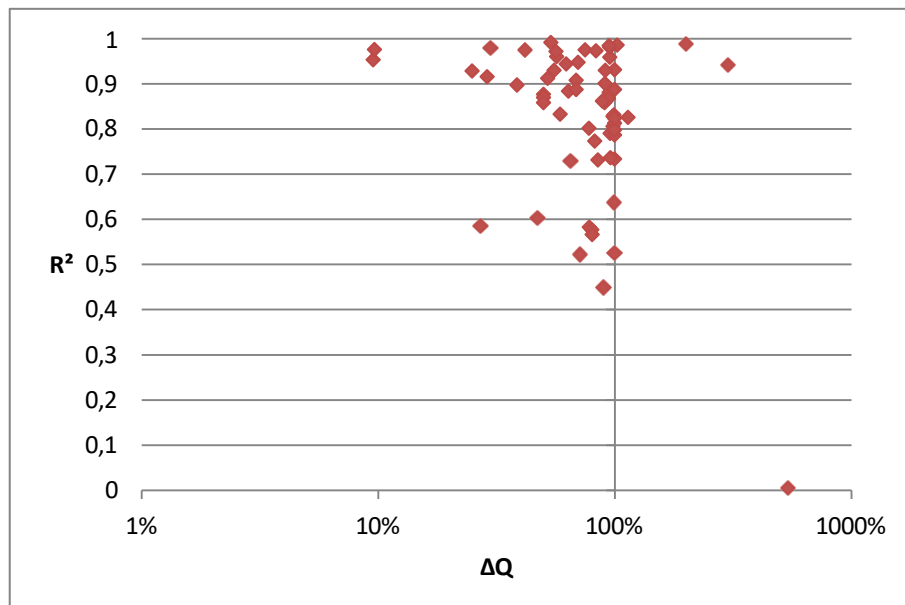


Figura 6: Gráfico correlacionando a variação da vazão ao longo do ensaio de bombeamento (ΔQ) e coeficiente de determinação (R^2) da curva de tendência da capacidade específica de cada poço.

4.3. Vazão, volume e regime de bombeamento

Este tópico apresenta os resultados estimados para vazão, volume e regime de bombeamento de todos os poços avaliados, sendo a vazão e o volume para os anos de 2024, 2029 e 2034, conforme Tabela 5. A vazão estimada atual varia entre 2,5 m³/h e 191,3 m³/h com média de 38,1 m³/h e mediana de 21,6 m³/h. Para 2029, a variação é entre 0,01 m³/h e 19,33 m³/h, com média de 2,38 m³/h e mediana de 0,96 m³/h. Para 2034, entre 0,00 m³/h e 18,9 m³/h com média de 2,09 m³/h e mediana de 0,76 m³/h. O volume diário disponível em 2024 é de 16.026 m³, mas que se espera perder 86,26% da capacidade nos próximos 5 anos, reduzindo o volume diário disponível para 2202 m³ e, em 10 anos, a perda de produtividade será de 87,64%, resultando em um volume diário de 1.981 m³.

As perdas não são igualmente distribuídas, com 37 (59,7%) poços tendo perdas superiores a 90% até 2029, sendo 14 (22,6%) destes superior a 99%. Em 2034, 38 (61,3%) terão perdas superiores a 90% e 17 (27,4%) superiores a 99%. Apenas 5 (8,1%) poços manterão ao menos metade da sua produtividade até 2029, caindo para 4 (6,5%) em 2034.

Em termos de vazão, 32 (58,1%) poços terão vazões inferiores a 1 m³/h, 6 (9,7%) desses inferiores a 0,1 m³/h (vazão nula), em 2029. Em 2034, este número aumenta para 35 (56,6%), sendo desses, 11 (17,7%) inferiores a 0,1 m³/h (vazão nula).

Observou-se um aumento expressivo nas vazões estimadas pelo método da capacidade específica quando comparado com as vazões aplicadas nos testes de aquífero do banco de dados. O aumento médio da vazão do teste de aquífero para a estimativa foi de 813,2% e o mediano de 233,5%, podendo chegar a 14554%. O mínimo registrado foi de 5%, portanto, não há cenário onde a vazão estimada pelo método da capacidade específica foi menor que a vazão utilizada nos testes de aquífero.

4.4. Lineamentos

Este tópico apresenta a classificação dos poços tubulares com base na direção dos lineamentos da área de estudo, conforme ilustrado pela figura 7, e então, procurou-se estabelecer correlações entre comportamento hidrodinâmico e direções de lineamento específicas. Para isso, foram identificados a direção do lineamento mais próximo de cada poço e sua respectiva distância, listadas na tabela 6.

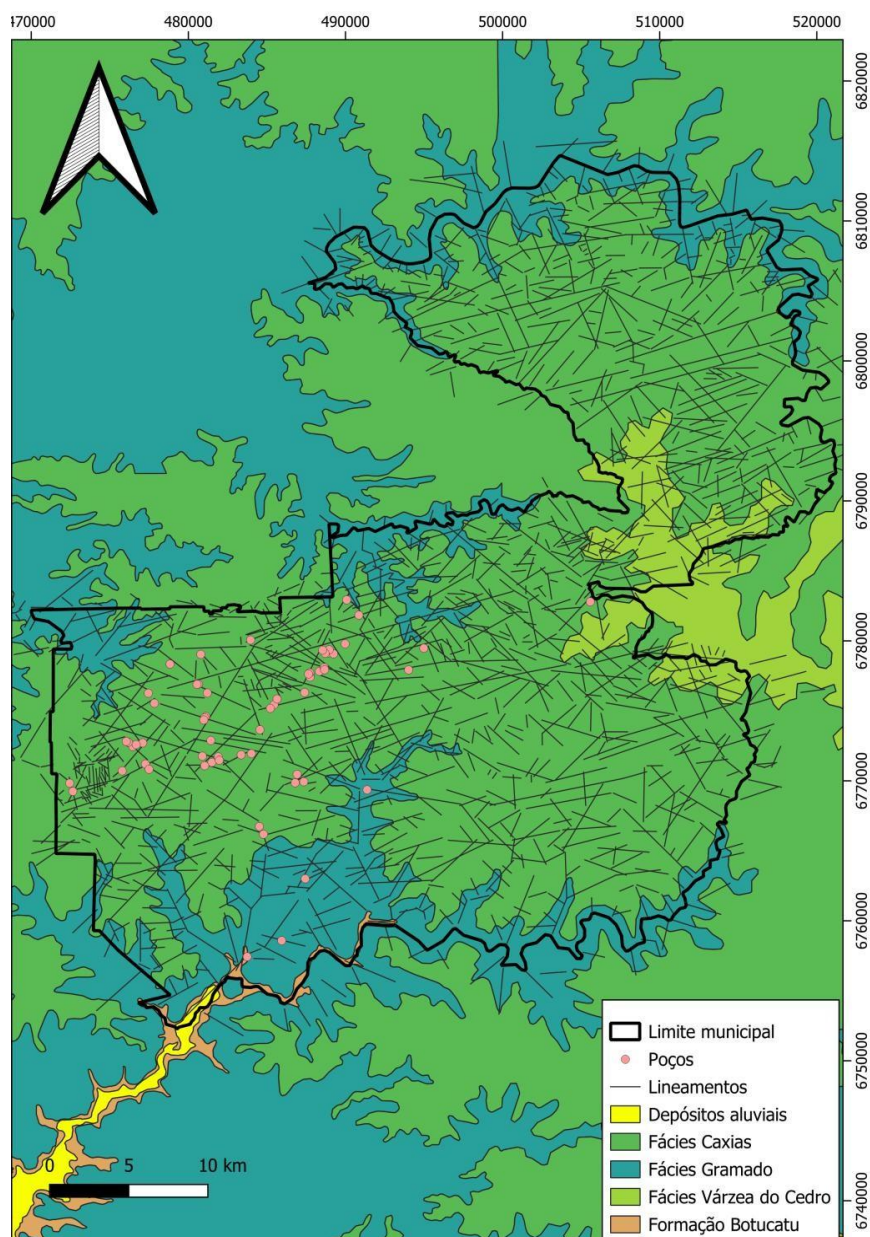


Figura 7. Mapa da área de estudo mostrando os poços e os lineamentos definidos por Sgorla et al. (2021).

Tabela 6: Direção e distância em metros dos lineamentos mais próximos de cada poço.

| Poço | Direção | Distância | Poço | Direção | Distância | Poço | Direção | Distância |
|------|---------|-----------|------|---------|-----------|------|---------|-----------|
| 01 | E-W | 113 | 22 | E-W | 161 | 43 | NE-SW | 274 |
| 02 | NW-SE | 525 | 23 | NW-SE | 24 | 44 | E-W | 149 |
| 03 | NE-SW | 126 | 24 | E-W | 101 | 45 | N-S | 63 |
| 04 | NE-SW | 82 | 25 | NE-SW | 397 | 46 | E-W | 134 |
| 05 | NW-SE | 339 | 26 | NE-SW | 13 | 47 | E-W | 29 |
| 06 | NE-SW | 84 | 27 | NW-SE | 74 | 48 | NW-SE | 22 |
| 07 | NW-SE | 3 | 28 | E-W | 163 | 49 | E-W | 20 |
| 08 | NW-SE | 339 | 29 | NW-SE | 116 | 50 | NE-SW | 46 |
| 09 | NW-SE | 288 | 30 | NW-SE | 78 | 51 | NE-SW | 9 |
| 10 | NW-SE | 387 | 31 | NW-SE | 189 | 52 | E-W | 131 |
| 11 | E-W | 89 | 32 | NE-SW | 139 | 53 | NE-SW | 201 |
| 12 | NE-SW | 35 | 33 | NW-SE | 246 | 54 | E-W | 139 |
| 13 | NE-SW | 151 | 34 | NE-SW | 267 | 55 | NE-SW | 174 |
| 14 | NE-SW | 191 | 35 | NW-SE | 296 | 56 | E-W | 122 |
| 15 | NW-SE | 232 | 36 | E-W | 280 | 57 | NW-SE | 60 |
| 16 | NW-SE | 99 | 37 | E-W | 50 | 58 | NW-SE | 258 |
| 17 | E-W | 275 | 38 | NW-SE | 180 | 59 | E-W | 246 |
| 18 | E-W | 162 | 39 | N-S | 9 | 60 | E-W | 353 |
| 19 | NW-SE | 109 | 40 | E-W | 38 | 61 | E-W | 89 |
| 20 | NW-SE | 198 | 41 | NE-SW | 158 | 62 | NE-SW | 88 |
| 21 | E-W | 24 | 42 | E-W | 366 | | | |

Há 17 poços cujo lineamento mais próximo tem direção NE-SW. 21 para a direção NW-SE, 22 para E-W e 2 para N-S, conforme ilustra a figura 8. As distâncias entre poço e lineamento variam até 525 metros, sendo 88,7% delas, 55 poços, inferiores a 300 metros.

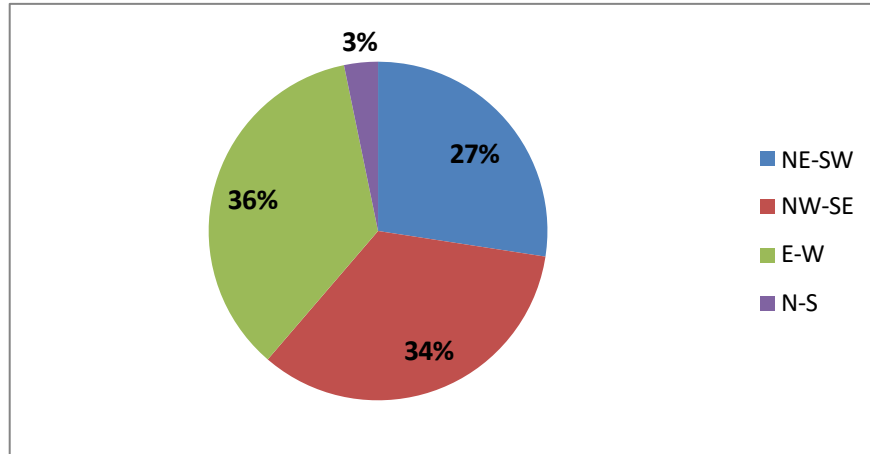


Figura 8: Número de poços por direção de lineamento.

Os poços sob influência das fraturas de direção E-W apresentam, em média, as menores perdas, conforme listado pela tabela 7. Estes poços também são os que menos secam, conforme ilustrado pela figura 9, estas fraturas são as que menos alimentam poços com perdas superiores a 90%. Os poços de direção NE-SW são os que têm maior probabilidade de ter perdas acima de 90%, porém suas perdas médias são menores quando comparadas às dos poços sob influência das fraturas de direção NW-SE. A mais provável causa deste efeito são poços com alta produtividade e baixas perdas influenciados pelas fraturas de direção NE-SW que incidiram na média enquanto os de direção NW-SE têm comportamento mais homogêneo. O número de poços associados aos lineamentos de direção N-S é insuficiente para estabelecer quaisquer padrões.

Tabela 7: Volume explotável diário estimado por direção de lineamento para o presente, 2029 e 2034, e suas respectivas perdas de produtividade.

| Quadrante | V (m ³) | 2029 | | 2034 | |
|--------------|---------------------|---------------------|------------|---------------------|------------|
| | | V (m ³) | Perdas (%) | V (m ³) | Perdas (%) |
| NE-SW | 4682,01 | 579,69 | 87,62% | 530,69 | 88,67% |
| NW-SE | 5806,35 | 620,13 | 89,32% | 539,42 | 90,71% |
| E-W | 4500,74 | 925,68 | 79,43% | 846,92 | 81,18% |
| N-S | 1036,69 | 76,61 | 92,61% | 64,46 | 93,78% |
| Total | 16025,8 | 2202,1 | 86,26% | 1981,5 | 87,64% |

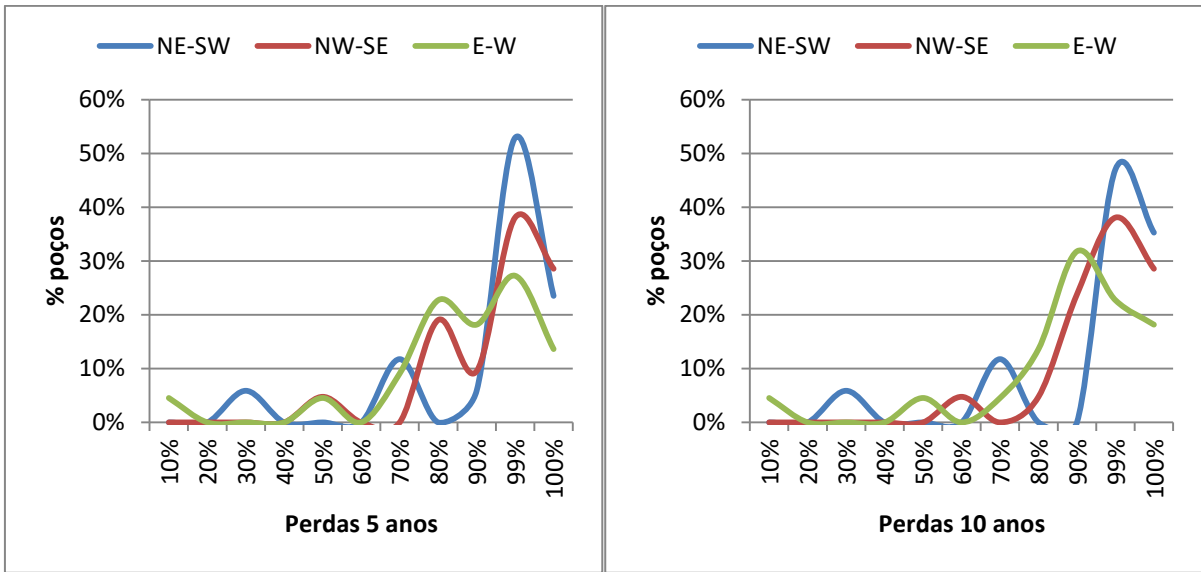


Figura 9. Percentagem de poços por por faixas de perdas de produção em (a) 2029 e (b) 2034.

A direção das fraturas não influencia de maneira relevante na capacidade específica dos poços. A faixa de 0,1 m³/s/m a 1 m³/s/m é a mais populosa para todos os quadrantes, conforme ilustrado pela figura 10b, tendo populações maiores ou iguais a 5 para a faixa de 0,01 m³/s/m a 0,1 m³/s/m e de 3 a 5 para capacidades específicas superiores a 1 m³/s/m.

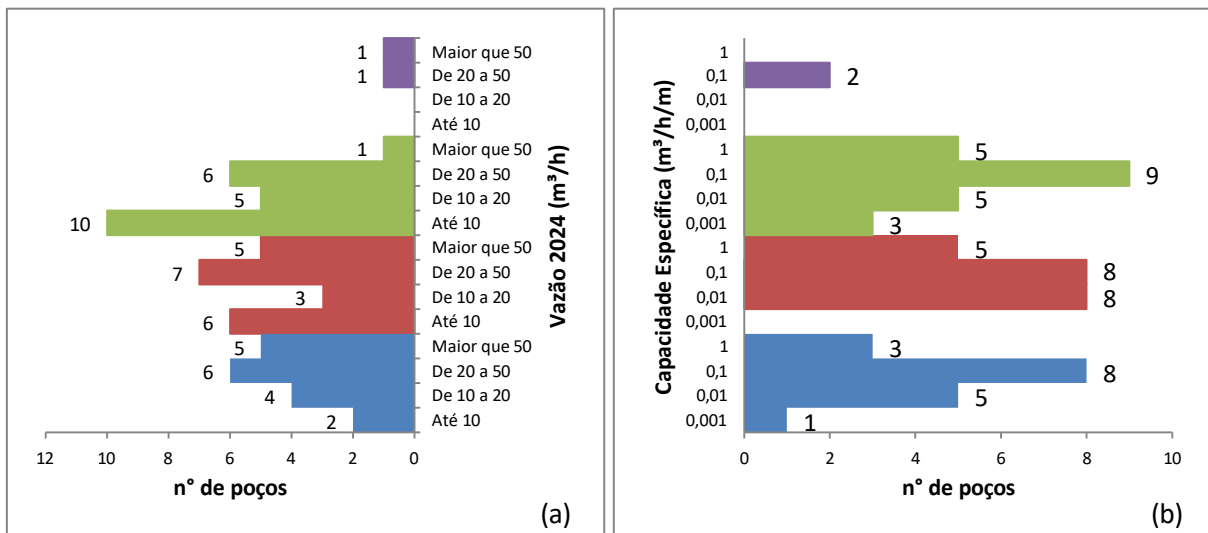


Figura 10: Número de poços por direção de lineamento mais próximo e (a) vazão estimada pelo método da Capacidade Específica e (b) pela capacidade específica. Azul, vermelho, verde e roxo representam, respectivamente, lineamentos de direção NE-SW, NW-SE, E-W e N-S.

Os poços sob influência das fraturas de direção NE-SW e NW-SE

apresentam padrão similar de vazão, possuindo populações relevantes ao longo de todas as faixas. O mesmo não ocorre para os poços próximos aos lineamentos de direção E- W, onde há uma clara tendência em favor de vazões baixas, com 10 poços com vazões menores que 10 m³/h e apenas 1 com vazão maior que 50 m³/h, conforme Figura 10.

De maneira geral, os poços sob influência dos lineamentos NW-SE tendem a ter uma boa recuperação, com apenas 3 poços tendo menos de 90% do rebaixamento recuperado e todos possuindo tempos de recuperação de até 6 horas, sendo 8 destes com até 1 hora e 40 minutos. Os poços sob alimentados pelas fraturas de direção NE-SW, por sua vez, tende a ter uma recuperação mais lenta, com a maior parte de seus poços com recuperação maior que 80% do rebaixamento tendo tempos de recuperação superiores a 3 horas. Os poços sob influência dos lineamentos de direção E-W não possui padrão definido, tendo recuperações rápidas e lentas em número significativo, embora as recuperações rápidas sejam ligeiramente mais comuns. O gráfico da figura 11 ilustra o comportamento das recuperações para cada poço.

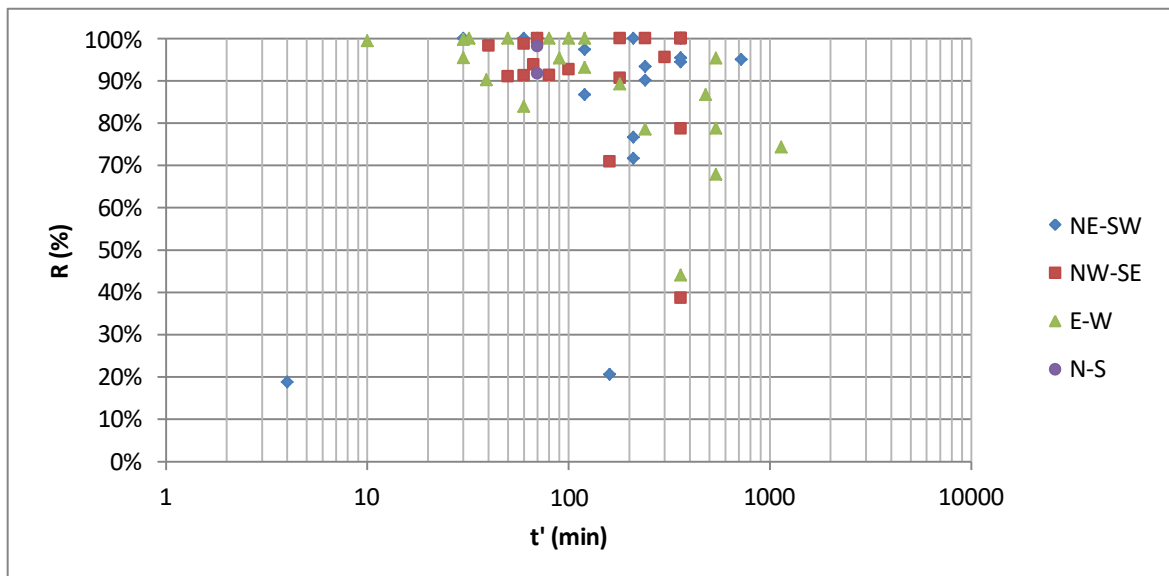


Figura 11. Recuperação e tempo de recuperação dos poços separados pela direção de seus lineamentos mais próximos.

4.5. Curvas de rebaixamento e recuperação

Este tópico apresenta a análise das curvas de rebaixamento e recuperação de seis testes de aquífero em poço único, selecionados com base na qualidade

dos dados e visando representar o conjunto dos poços. São discutidos os padrões observados nas curvas, os parâmetros hidrodinâmicos e a eficiência das recuperações visando compreender o comportamento dos poços.

Considerou-se qualificados para esta etapa os 37 poços que estão em conformidade com as normas da NBR 12.244 ou dentro das faixas de tolerância estabelecidas para este estudo, conforme listado no quadro 4.1.

Afim de que os poços selecionados para esta etapa do estudo sejam representativas do todo, eles foram classificados com base na direção dos lineamentos mais próximos e então das faixas de vazão ao final do ensaio de bombeamento, conforme figura 12.

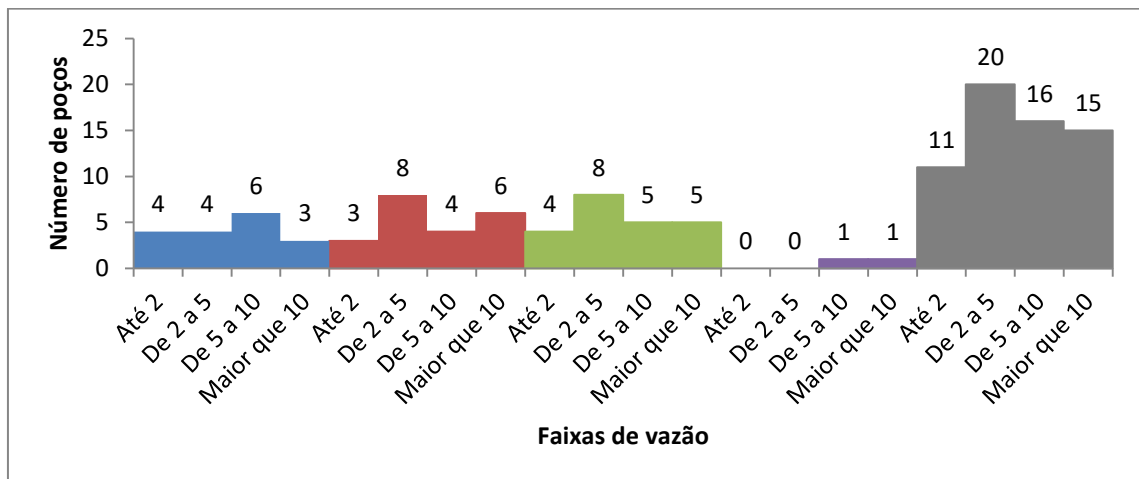


Figura 12: Número de poços por direção do lineamento mais próximo e faixas da vazão, em m^3/h , ao fim do ensaio de bombeamento. Azul, vermelho, verde, roxo e cinza representam, respectivamente, lineamentos de direção NE-SW, NW-SE, E-W, N-S e o total de poços.

Para representar a base de dados foram escolhidos dois poços sob influência de lineamentos de direção NE-SW, dois sob os de direção NW-SE e dois sob os de direção E-W, pois estes grupos de lineamentos influenciam número similar de poços. Por faixas de vazão, foram selecionados um poço de até $2 m^3/h$, dois de $2 a 5 m^3/h$, dois de $5 a 10 m^3/h$ e um de mais de $10 m^3/h$. A partir do cruzamento dos dois critérios, foram escolhidos um poço de vazão de até $2 m^3/h$ e um de $5 a 10 m^3/h$ para os lineamentos de direção NE-SW, um poço de $2 a 5 m^3/h$ e um maior que $10 m^3/h$ para os de direção NW-SE e um de $2 a 5 m^3/h$ e um de $5 a 10 m^3/h$ para os de direção E-W, conforme ilustrado pela tabela 8.

Tabela 8: Poços dentro das faixas de tolerância classificados por direção do lineamento mais próximo e faixas de vazão. Em *itálico e sublinhado*, os poços selecionados.

| Faixa de vazão (m ³ /h) | NE-SW | NW-SE | E-W |
|------------------------------------|-------------------------|----------------------------|-------------------------|
| Até 2 | <u>32</u> ; | 38; | 40; |
| De 2 a 5 | 25, 53; | 7, 10, 16, 31, <u>58</u> ; | 11, <u>56</u> , 60, 61; |
| De 5 a 10 | <u>13</u> , 14, 34, 62; | 09, 29, 30; | <u>44</u> , 47, 59; |
| Maior que 10 | 55; | 05, <u>20</u> ; | 17, 49, 54; |

A curva de rebaixamento do poço 13, Figura 13a, tem duas entradas de água, uma a 11 metros de rebaixamento e outra aos 31 metros. Cada entrada forma uma pequena barreira hidráulica e elas desaceleram o rebaixamento por 10 horas de bombeamento a vazão de 9 m³/h. A recuperação, cuja curva está ilustrada na Figura 14a, também é acelerada em profundidades similares, corroborando com a hipótese que nestes níveis de rebaixamento possuem entradas de água. A partir de então, pelas próximas 6 horas de ensaio, o rebaixamento se acelera. Apesar disso, o poço apresenta tendência de estabilização com 16 horas de ensaio sem mudança de vazão. A estabilização, entretanto, não é total ao final do ensaio. Considerando a baixa capacidade específica, de 0,188 m³/h/m, a rápida recuperação, de apenas duas horas, e a estabilização incompleta pode-se inferir que o poço 13 possui baixo armazenamento.

O poço 20, cuja curva de rebaixamento está disponível na Figura 13b, apresenta uma situação favorável, com vazão de 13,85 m³/h ao longo de todo o ensaio de bombeamento, capacidade específica de 3,063 m³/h/m, rebaixamento máximo de 4,5 m e recuperação de 95,6%. Conforme a curva de recuperação, Figura 14b, o poço recupera 1,9 dos 4,5 metros rebaixados já no primeiro minuto. A partir de então a recuperação desacelera.

A curva de rebaixamento do poço 32, Figura 13c, se aproxima do modelo de reservatório descontínuo, com a taxa de rebaixamento acelerando já nos primeiros 10 minutos do ensaio de bombeamento, indicando o baixo armazenamento da barreira hidráulica presente. Ao longo das três primeiras horas do ensaio de bombeamento, a vazão foi sendo gradualmente reduzida, tendo

iniciado com 2,3 m³/h e encerrado com 1,79 m³/h, caracterizando estabilização forçada do poço. O poço recuperou todo o rebaixamento bombeado em 3 horas, conforme Figura 14c.

Tabela 9. Dados dos testes de aquífero e estimativas geradas pelo método da Capacidade Específica.

| Poço | 13 | 20 | 32 | 44 | 56 | 58 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Dados – Geral | | | | | | |
| Profundidade (m) | 90 | 106 | 200 | 102 | 100 | 250 |
| Dados – Teste de aquífero | | | | | | |
| Duração do teste (h) | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| Q ao final do teste (m ³ /h) | 9,00 | 13,85 | 1,79 | 5,10 | 4,00 | 2,91 |
| NE (m) | 5,9 | 62,3 | 120,0 | 17,4 | 43,1 | 23,0 |
| ND (m) | 53,7 | 66,8 | 160,2 | 49,5 | 49,0 | 225,8 |
| s (m) | 47,8 | 4,5 | 40,2 | 32,1 | 5,9 | 202,8 |
| Q/s (m ³ /h/m) | 0,188 | 3,063 | 0,045 | 0,159 | 0,678 | 0,014 |
| t' (h) | 2 | 5 | 3 | 2 | 1 | 1,1 |
| % rebaixamento recuperado | 86,7% | 95,6% | 100% | 93,1% | 83,9% | 93,8% |
| Dados – Capacidade específica | | | | | | |
| Q ₂₀₂₄ (m ³ /h) | 23,84 | 23,33 | 5,90 | 41,65 | 6,00 | 42,76 |
| Regime bombeamento (h) | 12 | 16 | 9 | 4 | 18 | 4 |
| Q ₂₀₂₉ (m ³ /h) | 2,68 | 6,22 | 0,23 | 0,13 | 2,21 | 0,10 |
| Q ₂₀₃₄ (m ³ /h) | 2,19 | 5,51 | 0,17 | 0,07 | 2,02 | 0,06 |
| V ₂₀₂₄ (m ³) | 292,8 | 373,4 | 52,65 | 168,7 | 106,0 | 159,3 |
| V ₂₀₂₉ (m ³) | 32,92 | 99,56 | 2,08 | 0,51 | 39,1 | 0,37 |
| % de perdas em 2029 | 88,8% | 73,3% | 96,0% | 99,7% | 63,2% | 99,8% |
| V ₂₀₃₄ (m ³) | 26,90 | 88,13 | 1,55 | 0,30 | 35,6 | 0,21 |
| % de perdas em 2034 | 90,8% | 76,4% | 97,1% | 99,8% | 66,4% | 99,9% |

A curva de rebaixamento do poço 44, Figura 13d, segue o modelo de barreira hidráulica e possui estabilização forçada. O rebaixamento acelera a partir dos 10 minutos do ensaio de bombeamento e volta a estabilizar com 1 hora e 20 minutos, junto a última alteração de vazão do ensaio que iniciou com 6,2 m³/h e terminou com 5,1 m³/h. A recuperação, Figura 14d, é rápida, chegando a 93,1% em apenas duas horas.

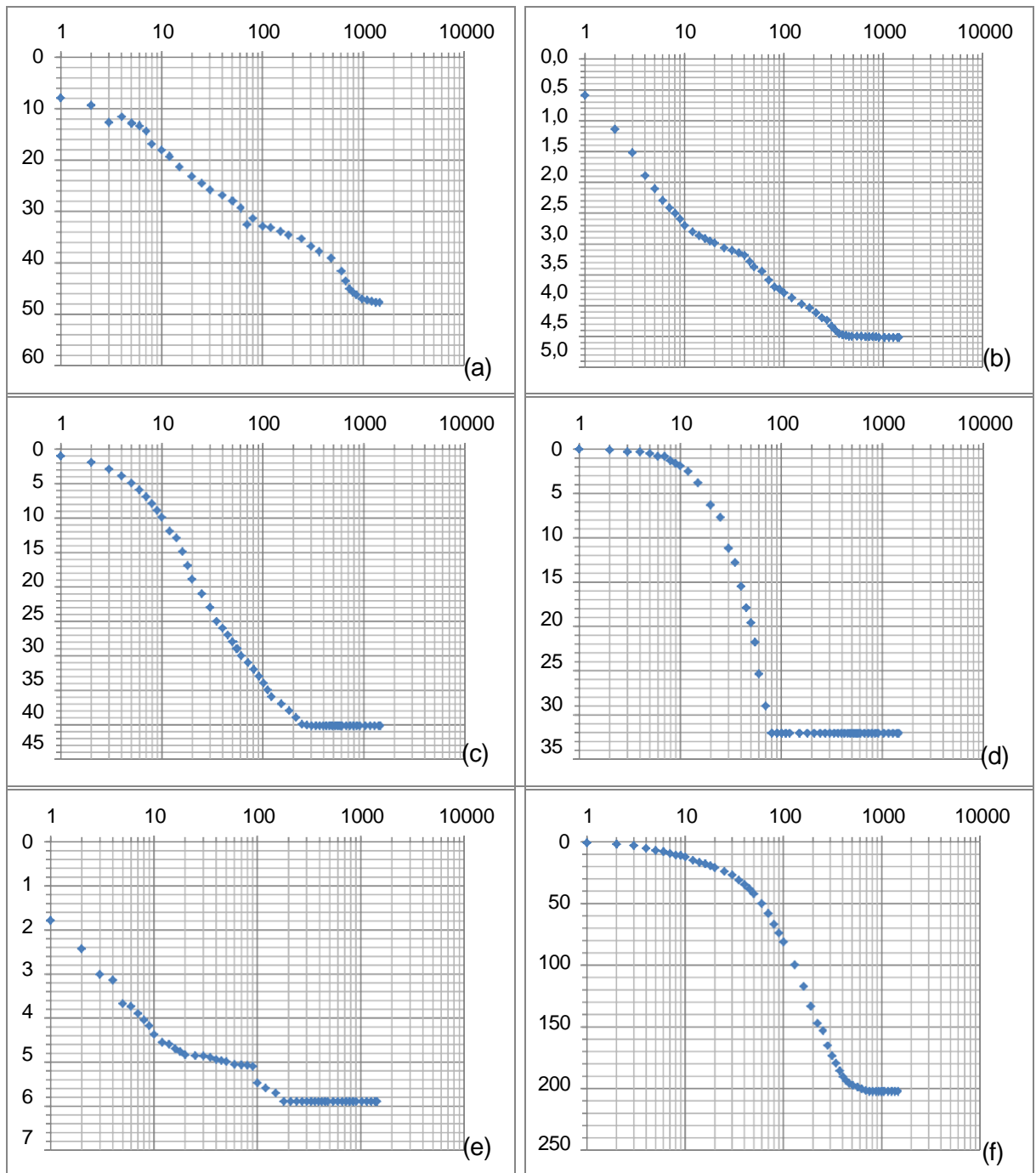


Figura 13. Gráficos de rebaixamento por tempo para os poços (a) 13, (b) 20, (c) 32, (d) 44, (e) 56 e (f) 58.

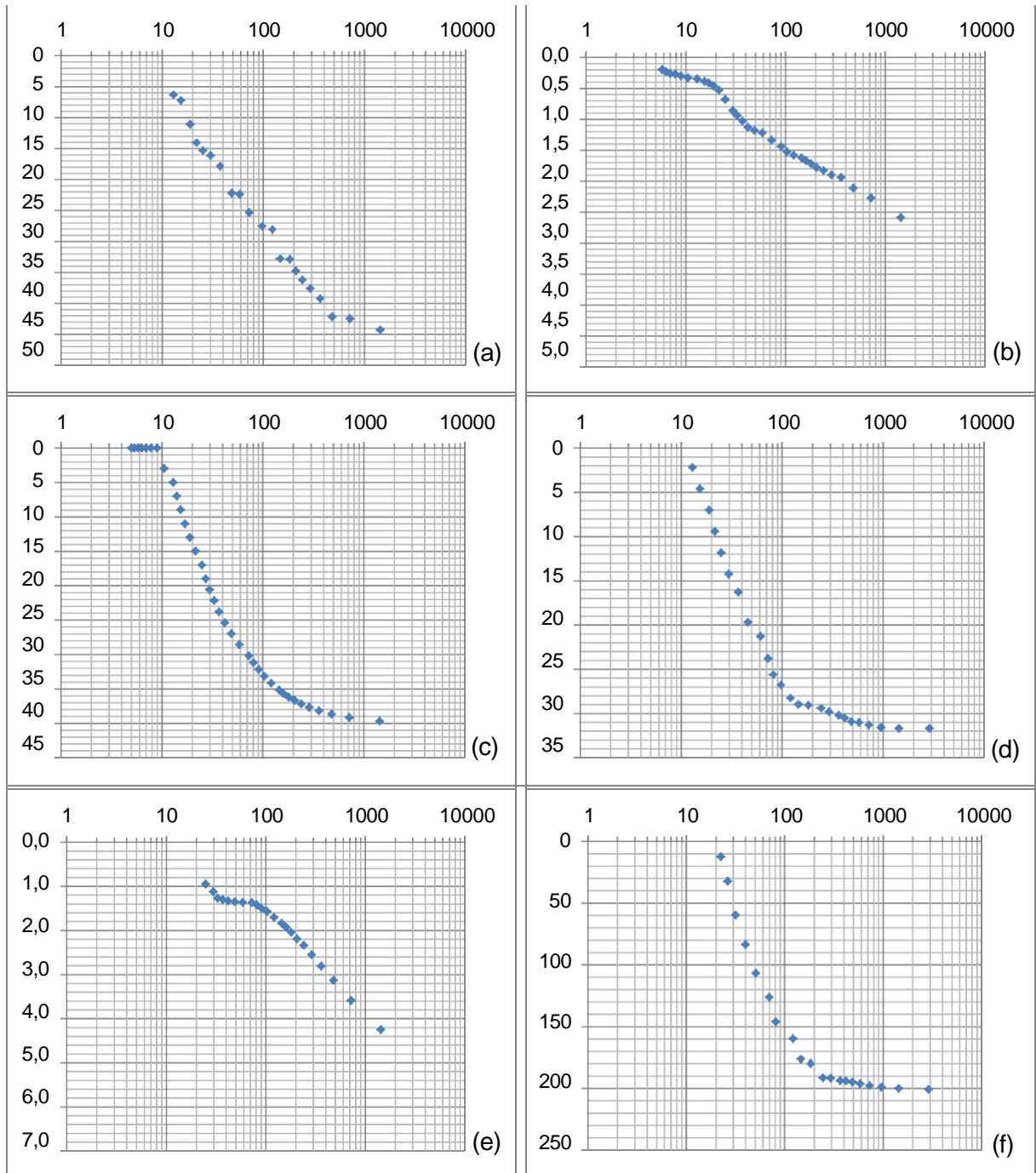


Figura 14: Gráficos de recuperação por tempo para os poços (a) 13, (b) 20, (c) 32, (d) 44, (e) 56 e (f) 58.

O poço 56 contém uma entrada de água a aproximadamente 5 metros de rebaixamento, conforme ilustra a Figura 13e. Embora haja mudança de vazão no meio do ensaio, de $4,5 \text{ m}^3/\text{h}$ para $4,23 \text{ m}^3/\text{h}$, esta mudança não coincide com a estabilização do poço, que ocorrem a, respectivamente, 1 hora e 20 minutos e 3 horas, desta forma, a estabilização do poço não é forçada. A recuperação é de 1 hora, e sua curva, Figura 14e, contém um período de desaceleração que

provavelmente está associado com a entrada de água.

A curva de rebaixamento do poço 58, Figura 13f, se aproxima do modelo de reservatório descontínuo, gerando barreira hidráulica que acarreta numa aceleração do rebaixamento uma vez que a barreira é superada, neste caso, a partir de aproximadamente 20 minutos de bombeamento a 5,14 m³/h. A estabilização é forçada, com a vazão ao longo do ensaio de bombeamento sendo reduzida diversas vezes até chegar em 3,05 m³/h, quando o nível de água começa a estabilizar. A vazão ainda foi reduzida mais uma vez, para 2,91 m³/h, próxima ao fim do ensaio. A recuperação, Figura 14f foi rápida, levando 1 hora e 7 minutos para recuperar 93,8% do rebaixamento.

De maneira geral, o modelo de barreira hidráulica se adequou bem a maior parte dos poços e a estabilização forçada foi uma ação comum para garantir que os poços não sequem durante os testes de aquífero. As recuperações rápidas foram frequentes nestes poços, apenas em um deles a recuperação superou 3 horas. Este comportamento: barreira hidráulica, estabilização forçada e recuperação rápida, resume os aquíferos dos poços 32, 44 e 58 que são os poços com as menores capacidades específicas de, respectivamente, 0,045, 0,159 e 0,014. O poço 13, de capacidade específica 0,188, também possui barreira hidráulica e recuperação rápida, embora ele tenha tendência a estabilização.

5. DISCUSSÕES

Considerando que a NBR 12.244 foi regularizada em 2006, e que a data de execução dos testes de aquífero deste estudo é desconhecida, cogita-se a possibilidade de uma parcela destes testes terem sido feitos antes da norma ter sido estabelecida. Desta forma, não surpreende que a maior parte dos testes não estejam rigorosamente de acordo com a norma.

Embora sempre seja desejável que os testes cumpram com as mesmas diretrizes, algumas exigências impactam o resultado final menos que as outras. O efeito prático de ter algumas medidas de nível de água a menos nos ensaios de bombeamento ou recuperação é suficientemente desprezível a ponto de sequer ser percebido e este foi o tipo mais comum de não conformidade encontrado nos testes de aquífero. Dados como tempo de bombeamento, porcentagem do rebaixamento recuperado e estabilização do rebaixamento, indispensáveis para a interpretação do comportamento dos aquíferos, estão em conformidade com a norma em, respectivamente, 98,4%, 74,2% e 90%.

A exceção é a exigência de vazão constante para ensaios de bombeamento cuja vazão é inferior a 5 m³/h (ABNT:NBR 12.244, 2006). Este foi o caso em apenas 2 dos 30 poços com essas vazões. Uma causa possível é a ausência de pré-teste, que antecede o teste de aquífero para projetar a vazão a ser usada no ensaio de bombeamento (De Vargas, notas de aula), aumentando a probabilidade da vazão precisar ser alterada ao longo do ensaio para que o nível de água possa estabilizar. Entre o pré-teste e o teste de aquífero, são necessárias 24 horas de espera (De Vargas, notas de aula), o que adiciona custos a operação, desencorajando-a.

A hipótese que testes de aquífero com vazão constante e com maior número de medições de nível de água resultam em uma regressão que melhor modela a curva de tendência da capacidade específica não chegou a uma conclusão neste estudo. Uma causa possível para tal fato são o uso de ensaios de bombeamento em aquíferos fraturados que são anisotrópicos, heterogêneos, e descontínuos (Hausmann, 1980; Filho et al., 2008a), tais características tornam estes aquíferos pouco previsíveis, aumentando o ruído nos resultados finais. Outra possibilidade é a insuficiência de pontos. A variação de vazão foi

mensurada com a razão entre as vazões final e inicial, desta forma, não diferenciando quedas bruscas de vazão das quedas graduais, embora o efeito que esta diferença possa ter no resultado final é desconhecido. Talvez com mais poços a dependência, se existir, se torne mais visível. Por fim, talvez existam outras variáveis que influenciem mais sobre o coeficiente de determinação que o número de medições de nível de água ou a variação da vazão, diluindo seus possíveis efeitos de tal forma que eles sequer sejam perceptíveis. Um estudo mais sofisticado será necessário para confirmar, ou não, a existência dessa dependência.

Um dado que o método da Capacidade Específica demanda para sua execução não estava disponível na base de dados. Sem a cota do crivo da bomba, não há como calcular o rebaixamento disponível, utilizado para estimar as vazões sustentáveis e, conseqüentemente, os volumes diários disponíveis. Dadas estas condições, o rebaixamento disponível foi substituído pelo rebaixamento ao fim do ensaio de bombeamento a fim de dar continuidade ao estudo e esta alteração pode ter causado distorções nos resultados.

Por se tratarem de razões, regimes de bombeamento e perdas de produtividade estimadas não foram afetados, pois o rebaixamento disponível multiplica a variável para estimar as vazões, o quociente entre dois números iguais é 1, e o produto entre um número e 1 é igual a ele mesmo.

Perdas de produtividade ao longo do tempo são esperadas, particularmente em aquíferos fraturados devido ao seu baixo armazenamento (Feitosa et al., 2008; Reginato et al., 2018). De Vargas et al. (2022b) e De Vargas et al. (2023) desenvolveram estudos projetando vazões futuras e perdas de produção e a escala das perdas está compatível com os resultados gerados, embora se faça a ressalva que o primeiro foi feito sobre aquíferos granulares e, portanto, utilize um método diferente. De Vargas et al. (2023), inclusive, detecta poços que tendem a tornar-se nulos, algo previsto para 11 dos poços deste estudo.

O estudo buscou estabelecer dependência entre o comportamento dos aquíferos e a direção das fraturas que os alimentam. Reginato e Strieder (2006) definem NE-SW e NW-SE como as direções principais das estruturas que atuam sobre as rochas ácidas da Formação Serra Geral, De Vargas et al. (2022a) e

Nummer et al. (2014) atribuem a NE-SW a direção preferencial das falhas enquanto Betiollo (2006) define os lineamentos de direção NE-SW como dominantes e classificam os lineamentos de direção NW-SE e E-W como menos expressivos. De Vargas et al. (2022a) ainda afirma que os conjuntos de fraturas de direção NE-SW e NW-SE são os mais favoráveis para o fluxo de água subterrânea. Apesar dos autores acima atribuírem papel secundário às fraturas de direção E-W em Caxias do Sul, neste estudo os poços sob influência dos lineamentos de direção E-W são tão relevantes quanto e em alguns parâmetros até superam os de direção NE-SW e NW-SE, com destaque para as perdas, onde os poços sob influência das fraturas de direção E-W têm menor probabilidade de se tornarem nulos e apresentam a menor média de perdas. Para os demais parâmetros, as diferenças, quando presentes, são sutis.

O tamanho dos lineamentos não foram considerados neste estudo, tão pouco foi considerada a possibilidade de um poço estar sob a influência de estruturas de mais de uma direção, tornando estes pontos de partida para o aprofundamento desta etapa do estudo.

As curvas de rebaixamento com barreira hidráulica, sem estabilização ou quando há, esta é forçada, foi uma ocorrência frequente neste estudo, Reginato et al. (2015) e De Vargas et al. (2023) também registraram este comportamento em ensaios de bombeamento no SASG. Outras características destes poços são a recuperação rápida, e a baixa capacidade específica. Os mesmos autores corroboram que aquíferos com estas características têm baixo armazenamento. Os poços com estabilização também são presentes, embora em menor número, e mesmo nesses também é comum a ocorrência de barreiras hidráulicas.

A relação entre os intervalos de vazão é similar aos observados por Reginato e Strieder (2004) na seção de seu estudo no município de Caxias do Sul. Além disso, os autores calcularam uma capacidade específica média de $0,582 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ para os 22 poços, enquanto para os 62 poços deste estudo, a média das capacidades específicas ao final dos testes de bombeamento foi calculada em $0,592 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$. Embora este estudo tenha focado nos poços com uso industrial, tais similaridades com os resultados de Reginato e Strieder (2004) os reforçam.

6. CONCLUSÕES

As vazões estimadas para estes poços apresenta forte tendência de perda de produtividade presumindo bombeamento constante, de tal forma que 10 anos é o suficiente para 11 dos 62 poços se tornarem nulos, reforçando a necessidade de gerir os recursos hídricos subterrâneos a fim de garantir a sua disponibilidade no futuro. Este estudo oferece regimes de bombeamento adequados para maximizar a longevidade dos poços e permitir a exploração do recurso de maneira sustentável.

Embora este estudo estime a capacidade instalada para as indústrias de Caxias do Sul, ele não incluiu qualquer estimativa de demanda, impossibilitando um balanço do uso da água para este fim. Novos estudos com o foco no consumo de água das indústrias são necessários para uma compreensão completa e eventual necessidade de expandir a malha de poços. Ainda assim, o gestor passa a ter acesso a informações importantes que podem servir de base para políticas públicas visando garantir a segurança hídrica do município.

A conformidade normativa não costuma ser rigorosa nos testes de aquífero. Ainda assim, os testes tendem a gerar dados de boa qualidade, com as estabilizações forçadas sendo a única prática problemática que está generalizada nos ensaios de bombeamento. Os experimentos tentando correlacionar conformidade normativa e qualidade de dados foram inconclusivos.

As diferenças entre os poços alimentados por fraturas de direção NE-SW, NW-SE e E-W são, em geral, sutis, mas há parâmetros onde elas se acentuam. Os poços sob influência dos lineamentos de direção NW-SE e E-W tendem a ter capacidades específicas maiores que os de direção NE-SW. Além disso, os poços alimentados por fraturas de direção E-W tendem a ter as menores perdas, tanto na média como no número de poços, tendo a menor probabilidade de um poço tornar-se nulo dentre os outros conjuntos de poços.

Os aquíferos do município de Caxias do Sul são caracterizados pela presença de barreiras hidráulicas, com estabilização do nível de água frequentemente demandando estabilização forçada. Em geral, possuem baixa capacidade de armazenamento e recuperação rápida, particularmente nos

poços de baixa capacidade específica. Há poços com melhor armazenamento, capazes de sustentar vazões maiores, porém estes são menos numerosos.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUA E SANEAMENTO BÁSICO. **Governança das águas subterrâneas: desafios e caminhos**. Brasília, DF: ANA, 2022.

BETIOLLO, Leandro Menezes. **Caracterização estrutural, hidrogeológica e hidroquímica dos sistemas aquíferos Guarani e Serra Geral no nordeste do Rio Grande do Sul, Brasil**. 2006. Tese de Doutorado.

BRASIL. [Constituição (1988)]. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Brasília, DF: Presidência da República.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de Janeiro de 1997. Institui a **Política Nacional de Recursos Hídricos**.

BRASIL. Proposta de emenda à constituição nº 4, de 2018. **Inclui, na Constituição Federal, o acesso à água potável entre os direitos e garantias fundamentais**.

DE VARGAS, Tiago et al. **DIAGNÓSTICO HIDROGEOLÓGICO DA BACIA DE CAPTAÇÃO FAXINAL**. Águas Subterrâneas, 2009.

DE VARGAS, T. *et al.* Influence of geological discontinuities on the groundwater flow of the Serra Geral Fracture Aquifer System. **Groundwater for Sustainable Development**, [S. l.], v. 18, 100780, 2022a.

DE VARGAS, T. *et al.* Capacidade de produção e sustentabilidade de poços tubulares no abastecimento público. *In: XXII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*, 2022b, p. 1-2, São Paulo.

DE VARGAS, T. *et al.* Gestão de poços tubulares: segurança hídrica no abastecimento público. *In: 7º simpósio sobre sistemas sustentáveis, 2023*, p. 417-422, Porto Alegre.

DEKKING, Frederik Michel et al. **A Modern Introduction to Probability and Statistics: Understanding why and how**. Springer Science & Business Media, 2006.

DRAPER, N. R. **Applied regression analysis**. McGraw-Hill. Inc, 1998.

FRANK, H. T. **Gênese e Padrões de Distribuição de Minerais Secundários na Formação Serra Geral (Bacia do Paraná)**. 2008. 324 f. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

HAUSMAN, A. **Avaliação qualitativa de aquíferos Fissurados**. Recife, PE: Anais do 1º congresso brasileiro de águas subterrâneas, 1980.

KOETHER, R. T. **The Coefficient of Determination**. Hampden-Sydney College, 2012. Disponível em: <https://people.hsc.edu/faculty-staff/robbk/Math121/Lectures/Spring%202012/Lecture%2046%20-%20Coefficient%20of%20Determination.pdf>. Acesso em: 15 set. 2024.

MANOEL FILHO, J. *et al.* Capacidade de Produção de Poços. *In*: FEITOSA, F. A. C. *et al.* (org.). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008a. p. 617-644.

MANOEL FILHO, J. *et al.* Avaliação de Vazões de Exploração de Poços Tubulares em Meios Heterogêneos. *In*: FEITOSA, A. C. F. *et al.* (org.). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008b. p. 622-624.

MILANI, E. J. Comentários Sobre a Origem e a Evolução Tectônica da Bacia do Paraná. *In*: MANTESSO-NETO, V. *et al.* (org.). **Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. Rio de Janeiro: Petróleo Brasileiro S. A., Petrobras, 2004. p. 265-279.

NUMMER, Alexis Rosa; *et al.* **Tectônica transcorrente mesozoica/cenozoica na porção leste do Planalto do Rio Grande do Sul, Brasil**. 2014.

PICADA, Rubem Souza. **Ensaio sobre a tectônica do Escudo Sul-Rio-Grandense. Caracterização dos sistemas de falhas**. *In*: Congresso Brasileiro de Geologia. 1971. p. 167-191.

REBOUÇAS, Aldo da Cunha.; AMORE, Luiz. O Sistema Aquífero Guarani — SAG. **Revista Águas Subterrâneas**, [S. l.], v. 16, n. 1, p. 135-143. 2002.

REBOUÇAS, Aldo da Cunha. Importância das águas subterrâneas. *In*: FEITOSA, A. C. F. *et al.* (org.). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. p. 13-30.

REGINATO, P. A. R. **Integração de dados geológicos para prospecção de aquíferos fraturados em trecho da bacia hidrográfica Taquari-Antas (RS)**. 2003. 276 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

REGINATO, Pedro Antônio Roehe; STRIEDER, Adelir José. **Caracterização hidroquímica dos aquíferos fraturados da formação Serra Geral na região nordeste do estado do Rio Grande do Sul**. *Águas Subterrâneas*, 2004.

REGINATO, Pedro Antônio Roehe; STRIEDER, Adelir José. **Caracterização estrutural dos aquíferos fraturados da Formação Serra Geral na região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul**. *Revista Brasileira de Geociências*. São Paulo, SP. Vol. 36, n. 1 (mar. 2006), p. 13-22, 2006.

REGINATO, P. A. R. *et al.* **Circulação da água subterrânea nas rochas vulcânicas da Formação Serra Geral na região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul**. *In*: 15º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental. 2015.

REGINATO, P. A. R. *et al.* Monitoramento e avaliação da capacidade específica de um poço tubular utilizado para abastecimento público. *In: XVII Simpósio Internacional de Estudos Tectônicos*, Bento Gonçalves, RS, Brasil, 26 a 29 de maio de 2019.

RIO GRANDE DO SUL. Lei nº 10.350, de 30 de Dezembro de 1994. **Institui o Sistema Estadual de Recursos Hídricos.**

RIO GRANDE DO SUL. Decreto nº 42.047, de 26 de Dezembro de 2002. **Regulamenta disposições da LEI Nº 10.350, de 30 de dezembro de 1994, com alterações, relativas ao gerenciamento e à conservação das águas subterrâneas e dos aquíferos no Estado do Rio Grande do Sul.**

ROISENBERG, A.; VIERO, A. P. O. Vulcanismo mesozoico da Bacia do Paraná no Rio Grande do Sul. *In: HOLZ, M.; DE ROS, F. (ed.). Geologia do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: CIGO/UFRGS, 2000. p. 355-374.

SCHERER, C. M. S. *et al.* Estratigrafia da sucessão sedimentary mesozoica da Bacia do Paraná no Rio Grande do Sul. *In: JELINEK, A. R.; SOMMER, C. A. Contribuições à Geologia do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina*. Porto Alegre: COPASSO, 2021. p. 289-304.

SEVERGNINI, B. R. **Caracterização hidrogeológica do sistema aquífero serra geral (SASG) através da análise de testes de bombeamento**. 2020. 150 f. Trabalho de Conclusão do Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2020.

SGORLA, V. *et al.* **Elaboração de um mapa de lineamentos estruturais e densidade de lineamentos no município de Caxias do Sul, RS**. *In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental (17.: 2022: Belo Horizonte)*. Anais [..][recurso eletrônico]. São Paulo, SP: ABGE, 2022. 2022.

VIERO, A. P. O.; SILVA, A. C.; SILVA, D. R. A. da (org.). **Geodiversidade do Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: CPRM, 2010. 1 DVD. (Programa Geologia do Brasil - PGB. Levantamento da Geodiversidade).

VIERO, A. P. O. *et al.* O Sistema Aquífero Serra Geral no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina. *In: JELINEK, A. R.; SOMMER, C. A. Contribuições à Geologia do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina*. Porto Alegre: COPASSO, 2021. p. 469-485.

APÊNDICE A – SELEÇÃO PRELIMINAR

Tabela 10: Base de dados resumida incluindo identificação preliminar, .

| Identificação preliminar | Dados estão completos? | Aplicação | Identificação definitiva | Identificação preliminar | Dados estão completos? | Aplicação | Identificação definitiva | Identificação preliminar | Dados estão completos? | Aplicação | Identificação definitiva | Identificação preliminar | Dados estão completos? | Aplicação | Identificação definitiva |
|--------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|----------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|----------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|
| p001 | Sim | Industrial | 01 | p044 | Sim | Geral | - | p087 | Não | Sem identificação | - | p130 | Sim | Sem identificação | - |
| p002 | Sim | Geral | - | p045 | Sim | Industrial | 21 | p088 | Sim | Consumo e limpeza | - | p131 | Sim | Sem identificação | - |
| p003 | Sim | Industrial e irrigação | 02 | p046 | Sim | Industrial | 22 | p089 | Sim | Industrial | 40 | p132 | Sim | Sem identificação | - |
| p004 | Sim | Geral | - | p047 | Sim | Geral | - | p090 | Sim | Consumo e irrigação | - | p133 | Sim | Sem identificação | - |
| p005 | Sim | Geral | - | p048 | Sim | Irrigação | - | p091 | Sim | Consumo | - | p134 | Sim | Sem identificação | - |
| p006 | Sim | Geral | - | p049 | Sim | Industrial | 23 | p092 | Sim | Industrial | 41 | p135 | Sim | Sem identificação | - |
| p007 | Sim | Geral | - | p050 | Sim | Jarginagem | - | p093 | Sim | Jardinagem | - | p136 | Sim | Sem identificação | - |
| p008 | Sim | Geral | - | p051 | Sim | Industrial | 24 | p094 | Sim | Irrigação | - | p137 | Sim | Sem identificação | - |
| p009 | Sim | Geral | - | p052 | Sim | Lavagem | - | p095 | Sim | Sem identificação | - | p138 | Sim | Sem identificação | - |
| p010 | Sim | Industrial | 03 | p053 | Sim | Irrigação | - | p096 | Sim | Consumo | - | p139 | Sim | Sem identificação | - |
| p011 | Sim | Geral | - | p054 | Sim | Geral | - | p097 | Sim | Industrial | 42 | p140 | Sim | Sem identificação | - |
| p012 | Sim | Geral | - | p055 | Sim | Industrial | 25 | p098 | Sim | Geral | - | p141 | Sim | Banheiro | - |
| p013 | Sim | Industrial e comercial | 04 | p056 | Sim | Geral | - | p099 | Sim | Consumo | - | p142 | Sim | Banheiro | - |
| p014 | Sim | Geral | - | p057 | Sim | Lavagem | - | p100 | Não | Sem identificação | - | p143 | Sim | Industrial | 54 |
| p015 | Sim | Industrial e consumo | 05 | p058 | Sim | Jardinagem | - | p101 | Sim | Geral | - | p144 | Sim | Consumo | - |
| p016 | Sim | Industrial | 06 | p059 | Sim | Industrial e consumo | 26 | p102 | Sim | Consumo | - | p145 | Sim | Irrigação | - |
| p017 | Sim | Industrial | 07 | p060 | Sim | Consumo | - | p103 | Sim | Irrigação | - | p146 | Sim | Consumo e irrigação | - |
| p018 | Sim | Industrial | 08 | p061 | Sim | Industrial | 27 | p104 | Sim | Industrial | 43 | p147 | Sim | Irrigação | - |
| p019 | Sim | Industrial | 09 | p062 | Sim | Industrial | 28 | p105 | Sim | Geral | - | p148 | Sim | Outros | - |
| p020 | Sim | Industrial | 10 | p063 | Sim | Industrial | 29 | p106 | Sim | Industrial | 44 | p149 | Sim | Outros | - |
| p021 | Não | Sem identificação | - | p064 | Sim | Industrial | 30 | p107 | Sim | Industrial e consumo | 45 | p150 | Sim | Outros | - |
| p022 | Sim | Geral | - | p065 | Sim | Limpeza | - | p108 | Sim | Industrial | 46 | p151 | Sim | Industrial | 55 |
| p023 | Sim | Industrial | 11 | p066 | Sim | Geral | - | p109 | Sim | Consumo | - | p152 | Sim | Lavagem | - |
| p024 | Sim | Geral | - | p067 | Sim | Jardinagem | - | p110 | Sim | Jardinagem | - | p153 | Sim | Industrial | 56 |
| p025 | Sim | Limpeza e irrigação | - | p068 | Sim | Industrial | 31 | p111 | Sim | Industrial e consumo | 62 | p154 | Sim | Lavagem | - |
| p026 | Sim | Industrial | 12 | p069 | Sim | Geral | - | p112 | Sim | Lavagem de veículos | - | p155 | Sim | Consumo | - |
| p027 | Sim | Industrial | 13 | p070 | Sim | Geral | - | p113 | Sim | Industrial | 47 | p156 | Sim | Industrial | 57 |
| p028 | Sim | Industrial | 14 | p071 | Sim | Lavra mineral | - | p114 | Sim | Industrial | 48 | p157 | Sim | Consumo | - |
| p029 | Sim | Industrial | 15 | p072 | Sim | Jardinagem | - | p115 | Sim | Consumo | - | p158 | Sim | Consumo | - |
| p030 | Sim | Consumo | - | p073 | Sim | Jardinagem | - | p116 | Sim | Industrial | 49 | p159 | Sim | Industrial | 58 |
| p031 | Sim | Limpeza e irrigação | - | p074 | Não | Sem identificação | - | p117 | Sim | Sem identificação | - | p160 | Sim | Limpeza | - |
| p032 | Sim | Industrial | 16 | p075 | Sim | Industrial | 32 | p118 | Sim | Industria | 50 | p161 | Sim | Industrial e sanitário | 59 |
| p033 | Sim | Industrial | 17 | p076 | Sim | Consumo | - | p119 | Sim | Industria | 51 | p162 | Sim | Industrial | 60 |
| p034 | Sim | Geral | - | p077 | Sim | Industrial | 33 | p120 | Sim | Consumo e jardinagem | - | p163 | Sim | Industrial | 61 |
| p035 | Sim | Industrial | 18 | p078 | Sim | Industrial | 34 | p121 | Sim | Industrial e consumo | 52 | p164 | Sim | Jardinagem | - |
| p036 | Sim | Industrial | 19 | p079 | Sim | Industrial | 35 | p122 | Sim | Sem identificação | - | p165 | Sim | Jardinagem | - |
| p037 | Sim | Geral | - | p080 | Sim | Industrial | 36 | p123 | Sim | Sem identificação | - | p166 | Sim | Jardinagem | - |
| p038 | Sim | Geral | - | p081 | Sim | Consumo | - | p124 | Sim | Sem identificação | - | p167 | Não | Sem identificação | - |
| p039 | Sim | Irrigação | - | p082 | Sim | Industrial | 37 | p125 | Sim | Sem identificação | - | p168 | Não | Sem identificação | - |
| p040 | Sim | Geral | - | p083 | Sim | Industrial | 38 | p126 | Sim | Industrial e consumo | 53 | p169 | Não | Sem identificação | - |
| p041 | Sim | Industrial | 20 | p084 | Sim | Industrial e consumo | 39 | p127 | Sim | Sem identificação | - | p170 | Não | Sem identificação | - |
| p042 | Sim | Geral | - | p085 | Sim | Consumo | - | p128 | Sim | Sem identificação | - | p171 | Não | Sem identificação | - |
| p043 | Sim | Geral | - | p086 | Sim | Geral | - | p129 | Sim | Sem identificação | - | p172 | Não | Sem identificação | - |

APÊNDICE B – CURVAS DE TENDÊNCIA

Tabela 11: Tendência retilínea das curvas dilog e coeficientes angular e linear de cada poço.

| Poço | Curva de tendência | m | C | Poço | Curva de tendência | m | C |
|-----------|---|------|--------|-----------|---|------|--------|
| 01 | $\log(Q/s) = -0,01 \log(t) + \log 1,13$ | 0,01 | 1,13 | 32 | $\log(Q/s) = -0,43 \log(t) + \log 0,58$ | 0,43 | 0,58 |
| 02 | $\log(Q/s) = -0,21 \log(t) + \log 1,53$ | 0,21 | 1,53 | 33 | $\log(Q/s) = -0,21 \log(t) + \log 0,68$ | 0,21 | 0,68 |
| 03 | $\log(Q/s) = -0,04 \log(t) + \log 1,95$ | 0,04 | 1,95 | 34 | $\log(Q/s) = -0,74 \log(t) + \log 20,58$ | 0,74 | 20,58 |
| 04 | $\log(Q/s) = -0,66 \log(t) + \log 1,25$ | 0,66 | 1,25 | 35 | $\log(Q/s) = -0,49 \log(t) + \log 0,35$ | 0,49 | 0,35 |
| 05 | $\log(Q/s) = -0,20 \log(t) + \log 2,78$ | 0,20 | 2,78 | 36 | $\log(Q/s) = -0,24 \log(t) + \log 0,23$ | 0,24 | 0,23 |
| 06 | $\log(Q/s) = -0,61 \log(t) + \log 14,91$ | 0,61 | 14,91 | 37 | $\log(Q/s) = -0,26 \log(t) + \log 0,25$ | 0,26 | 0,25 |
| 07 | $\log(Q/s) = -0,73 \log(t) + \log 256,04$ | 0,73 | 256,04 | 38 | $\log(Q/s) = -0,22 \log(t) + \log 0,12$ | 0,22 | 0,12 |
| 08 | $\log(Q/s) = -0,31 \log(t) + \log 13,71$ | 0,31 | 13,71 | 39 | $\log(Q/s) = -0,24 \log(t) + \log 1,41$ | 0,24 | 1,41 |
| 09 | $\log(Q/s) = -0,70 \log(t) + \log 22,64$ | 0,70 | 22,64 | 40 | $\log(Q/s) = -0,41 \log(t) + \log 0,09$ | 0,41 | 0,09 |
| 10 | $\log(Q/s) = -0,80 \log(t) + \log 17,33$ | 0,80 | 17,33 | 41 | $\log(Q/s) = -1,25 \log(t) + \log 128,83$ | 1,25 | 128,83 |
| 11 | $\log(Q/s) = -0,34 \log(t) + \log 0,62$ | 0,34 | 0,62 | 42 | $\log(Q/s) = -0,20 \log(t) + \log 8,68$ | 0,20 | 8,68 |
| 12 | $\log(Q/s) = -0,14 \log(t) + \log 4,61$ | 0,14 | 4,61 | 43 | $\log(Q/s) = -0,14 \log(t) + \log 0,88$ | 0,14 | 0,88 |
| 13 | $\log(Q/s) = -0,29 \log(t) + \log 1,26$ | 0,29 | 1,26 | 44 | $\log(Q/s) = -0,77 \log(t) + \log 15,12$ | 0,77 | 15,12 |
| 14 | $\log(Q/s) = -0,32 \log(t) + \log 11,37$ | 0,32 | 11,37 | 45 | $\log(Q/s) = -0,88 \log(t) + \log 86,75$ | 0,88 | 86,75 |
| 15 | $\log(Q/s) = -0,43 \log(t) + \log 0,73$ | 0,43 | 0,73 | 46 | $\log(Q/s) = -0,43 \log(t) + \log 5,96$ | 0,43 | 5,96 |
| 16 | $\log(Q/s) = -0,33 \log(t) + \log 0,49$ | 0,33 | 0,49 | 47 | $\log(Q/s) = -0,22 \log(t) + \log 14,16$ | 0,22 | 14,16 |
| 17 | $\log(Q/s) = -0,25 \log(t) + \log 1,62$ | 0,25 | 1,62 | 48 | $\log(Q/s) = -0,44 \log(t) + \log 6,51$ | 0,44 | 6,51 |
| 18 | $\log(Q/s) = -0,07 \log(t) + \log 1,26$ | 0,07 | 1,26 | 49 | $\log(Q/s) = -0,61 \log(t) + \log 87,38$ | 0,61 | 87,38 |
| 19 | $\log(Q/s) = -0,43 \log(t) + \log 0,66$ | 0,43 | 0,66 | 50 | $\log(Q/s) = -0,41 \log(t) + \log 1,65$ | 0,41 | 1,65 |
| 20 | $\log(Q/s) = -0,18 \log(t) + \log 9,03$ | 0,18 | 9,03 | 51 | $\log(Q/s) = -0,48 \log(t) + \log 5,12$ | 0,48 | 5,12 |
| 21 | $\log(Q/s) = -0,18 \log(t) + \log 1,02$ | 0,18 | 1,02 | 52 | $\log(Q/s) = -0,16 \log(t) + \log 2,37$ | 0,16 | 2,37 |
| 22 | $\log(Q/s) = -0,67 \log(t) + \log 2,93$ | 0,67 | 2,93 | 53 | $\log(Q/s) = -0,50 \log(t) + \log 5,40$ | 0,50 | 5,40 |
| 23 | $\log(Q/s) = -0,32 \log(t) + \log 8,25$ | 0,32 | 8,25 | 54 | $\log(Q/s) = -0,20 \log(t) + \log 2,60$ | 0,20 | 2,60 |
| 24 | $\log(Q/s) = -0,91 \log(t) + \log 1,00$ | 0,91 | 1,00 | 55 | $\log(Q/s) = -0,32 \log(t) + \log 3,02$ | 0,32 | 3,02 |
| 25 | $\log(Q/s) = -1,15 \log(t) + \log 45,34$ | 1,15 | 45,34 | 56 | $\log(Q/s) = -0,13 \log(t) + \log 1,55$ | 0,13 | 1,55 |
| 26 | $\log(Q/s) = -0,61 \log(t) + \log 1,40$ | 0,61 | 1,40 | 57 | $\log(Q/s) = -0,26 \log(t) + \log 9,85$ | 0,26 | 9,85 |
| 27 | $\log(Q/s) = -0,09 \log(t) + \log 1,41$ | 0,09 | 1,41 | 58 | $\log(Q/s) = -0,81 \log(t) + \log 2,76$ | 0,81 | 2,76 |
| 28 | $\log(Q/s) = -0,51 \log(t) + \log 0,20$ | 0,51 | 0,20 | 59 | $\log(Q/s) = -0,21 \log(t) + \log 7,28$ | 0,21 | 7,28 |
| 29 | $\log(Q/s) = -0,68 \log(t) + \log 3,67$ | 0,68 | 3,67 | 60 | $\log(Q/s) = -0,16 \log(t) + \log 1,79$ | 0,16 | 1,79 |
| 30 | $\log(Q/s) = -0,97 \log(t) + \log 80,71$ | 0,97 | 80,71 | 61 | $\log(Q/s) = -0,51 \log(t) + \log 0,69$ | 0,51 | 0,69 |
| 31 | $\log(Q/s) = -0,42 \log(t) + \log 2,45$ | 0,42 | 2,45 | 62 | $\log(Q/s) = -0,41 \log(t) + \log 3,93$ | 0,41 | 3,93 |