

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS FEIÇÕES ESTRUTURAIS DO GRUPO SERRA GERAL NA DISPONIBILIDADE HÍDRICA SUBTERRÂNEA DO SISTEMA AQUÍFERO SERRA GERAL

THE INFLUENCE OF STRUCTURAL FEATURES OF SERRA GERAL FORMATION ON GROUNDWATER AVAILABILITY OF SERRA GERAL AQUIFER SYSTEM

ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LAS CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES DE LA FORMACIÓN SERRA GERAL SOBRE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA SUBTERRÂNEA EN EL SISTEMA ACUÍFERO SERRA GERAL

RESUMO

O mapeamento de áreas visando o potencial de produção hídrica subterrânea pode subsidiar políticas públicas que atendem o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 6 proposto pela ONU: disponibilidade e gestão sustentável da água para todos. Atendendo ao objetivo, este estudo buscou definir áreas hídricas potenciais de abastecimento subterrâneo, no âmbito da Bacia Hidrográfica do Rio da Várzea, noroeste do Estado do Rio Grande do Sul/ Brasil, avaliando a produtividade dos poços (capacidade específica) e a sua relação com os elementos geológico-estruturais do Grupo Serra Geral: tipo de rocha; tipo de aquífero; espessura de solo; direção de lineamentos; intersecção entre lineamentos; e densidade de lineamentos. Os resultados indicam maior capacidade específica em poços sob as Fácies Parapanema, sob o Sistema Aquífero Serra Geral I e sob solos com espessura intermediária. Lineamentos nas direções SE-SSE e E-ESE apresentaram correlação proporcional entre a maior capacidade específica e a maior densidade de lineamentos. A análise de intersecções de lineamentos não apresentou significância, com exceção da maior classe de densidade ($>0,1/\text{km}^2$). As direções de lineamentos com poços a menos de 1 km de distância, com maior capacidade específica, foram: ESE-SE e NE- ENE.

Palavras-chave: Aquífero fraturado; análise estrutural; águas subterrâneas; produtividade hídrica; ODS 6.

ABSTRACT

Mapping areas aimed at the potential for underground water production, subsidizes public policies that meet Sustainable Development Goal 6 proposed by the UN: availability and sustainable management of water for all. In view of the objective, this study sought to define potential water areas for underground supply, within the scope of the Várzea River Basin, evaluating the productivity of the wells (specific capacity) and their relationship with the geological-structural elements of the Serra Geral Group: type of rock; type of aquifer; soil thickness; lineament direction; intersection between lineaments; and density of lineaments. The results indicate a higher specific capacity in wells in the Fácies Parapanema, in the Serra Geral I Aquifer System and in soils with intermediate thickness. Lineaments in the SE-SSE and E-ESE directions showed a proportional correlation between the highest specific capacity and the highest density of lineaments. The analysis of lineament intersections did not show significance, with the exception of the highest density class ($>0.1/\text{km}^2$). The directions of lineaments with wells less than 1 km away, with higher specific capacity, were: ESE-SE and NE-ENE.

Keywords: Fractured aquifer; structural analysis; groundwater; water productivity; SDG 6.

 Bianca Johann Nery ^a
 Malva Andrea Mancuso ^b
 Caroline Emiliano Santos ^c

^a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil.

^b Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil.

^c Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil.

DOI: 10.12957/geouerj.2024.72521

Correspondência:
biancajohannery@gmail.com

Recebido em: 14 jan. 2023

Revisado em: 30 abr. 2024

Aceito em: 18 out. 2024



RESUMEN

Mapeo de áreas orientadas al potencial de producción de agua subterránea, subsidia políticas públicas que cumplan con el Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 propuesto por la ONU: disponibilidad y manejo sostenible del agua para todos. En vista del objetivo, este estudio buscó definir áreas de agua potenciales para abastecimiento subterráneo, en el ámbito de la cuenca del río Várzea, evaluando la productividad de los pozos (capacidad específica) y su relación con los elementos geológico-estructurales de la Serra Geral. Grupo: tipo de roca; tipo de acuífero; espesor del suelo; dirección del lineamiento; intersección entre lineamientos; y densidad de lineamientos. Los resultados indican mayor capacidad específica en pozos en el Fácies Paranapanema, en el Sistema Acuífero Serra Geral I y en suelos con espesor intermedio. Los lineamientos en las direcciones SE-SSE y E-ESE mostraron una correlación proporcional entre la mayor capacidad específica y la mayor densidad de lineamientos. El análisis de las intersecciones de lineamientos no mostró significancia, con excepción de la clase de mayor densidad ($>0.1/\text{km}^2$). Las direcciones de lineamientos con pozos a menos de 1 km de distancia, con mayor capacidad específica, fueron: ESE-SE y NE-ENE.

Palabras-clave: Acuífero fracturado; análisis estructural; agua subterránea; productividad del agua; ODS 6.



INTRODUÇÃO

A Bacia do Paraná é uma das bacias sedimentares do Brasil com capacidade para o armazenamento de água subterrânea e constitui uma das maiores reservas hídricas do país, em decorrência da espessura de seus sedimentos e da porosidade de grande parte das litologias que conformam o seu arcabouço hidrogeológico (FEITOSA et al., 2008).

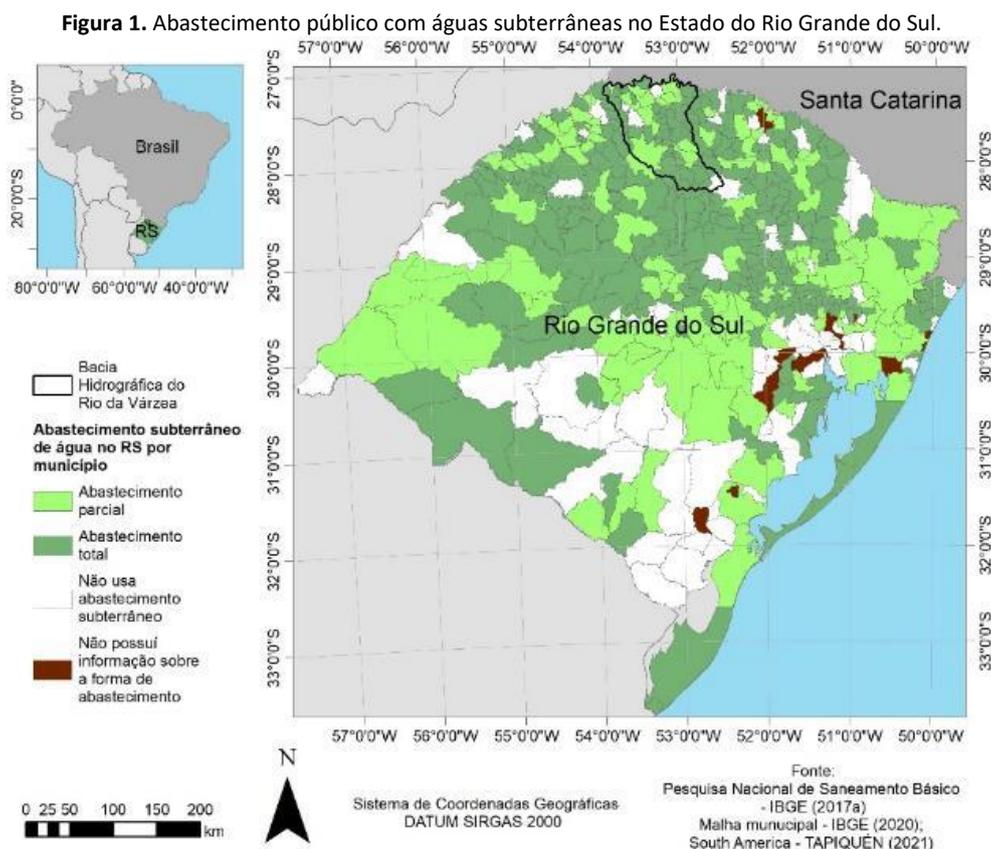
A Província Paraná, pertencente à Bacia Sedimentar do Paraná, conta com aquíferos de ótima produtividade, como o Sistema Aquífero Serra Geral (SASG), com características de fraturado e transfronteiriço, amplamente explotado no Brasil, na Argentina, Paraguai e Uruguai, sendo também um dos mais importantes aquíferos do Rio Grande do Sul, com área de afloramento em mais da metade (54%) do território do Estado (FEITOSA et al., 2008; DINIZ et. al., 2014). Conforme a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, as fontes subterrâneas de água têm um papel importante no abastecimento do Estado do Rio Grande do Sul. 52% dos domicílios em área rural são abastecidos por poços ou nascentes. Dos 484 municípios riograndenses, 91% possuem algum tipo de abastecimento de água por fontes subterrâneas (poços rasos e/ou profundos) (Figura 1), enquanto as fontes superficiais são utilizadas em 39% dos municípios (IBGE, 2017a). Além disso, a demanda para o abastecimento de água é crescente nos núcleos urbanos situados sobre o SASG, com dependência exclusiva de recursos hídricos subterrâneos para o abastecimento público em 71% deles e 13% de recursos hídricos subterrâneos em conjunto com superficiais (ANA, 2021).

A região hidrográfica do Rio Uruguai faz parte da Bacia Hidrográfica do Paraná e está localizada entre os Estados de Santa Catarina (SC) e Rio Grande do Sul (RS), onde se insere a região do Médio Alto Uruguai (Noroeste do RS). Observa-se a necessidade de ampliação do sistema de abastecimento de água em onze das vinte e duas sedes municipais da região (RIO GRANDE DO SUL, 2015), sendo o suprimento de água potável em quantidade adequada, uma das principais preocupações dos órgãos públicos.

Tratando-se da qualidade das águas distribuídas, constata-se que 18% das captações superficiais se encontram poluídas ou contaminadas, enquanto em captações subterrâneas esse índice é de apenas 6% (IBGE, 2017b), o que torna o recurso hídrico subterrâneo atrativo para o abastecimento.

A precariedade de atendimento de serviços públicos na distribuição de água potável em zonas rurais e afastadas dos centros urbanos, a qualidade da água subterrânea, a deterioração da qualidade dos recursos hídricos superficiais e a vulnerabilidade das reservas superficiais nos períodos de estiagem, são alguns dos motivos que contribuem para a utilização majoritária de água subterrânea como fonte de abastecimento dos municípios interioranos (ECOPLAN, 2008; SCHROEDER, 2014; FORMENTINI, MANCUSO E FILHO, 2016; SANTOS et al., 2020).

No entanto, entre os fatores que diminuem a disponibilidade hídrica subterrânea do SASG no Rio Grande do Sul, destaca-se a presença de fluoreto em água de abastecimento (MANCUSO et al., 2013). Em municípios do noroeste do Estado a presença de fluoreto chega a comprometer o uso das águas subterrâneas para consumo em até 56% dos poços (MANCUSO et al., 2013, 2014). Em termos regionais, Formentini, Mancuso e Filho (2016) verificaram que cerca de 12% dos poços amostrados na Bacia Hidrográfica do Rio da Várzea (BHRV) apresentaram desconformidade em um ou mais parâmetros de potabilidade.



Fonte: os autores

A BHRV é uma sub-bacia da bacia Hidrográfica do Rio Uruguai, nela afloram os basaltos da Formação Serra Geral. A demanda hídrica na Bacia está direcionada principalmente ao abastecimento humano (abastecimento doméstico 26,8% e abastecimento urbano 23,4%, somatizando aproximadamente 50% dos casos) conforme estudo realizado por Formentini (2015).

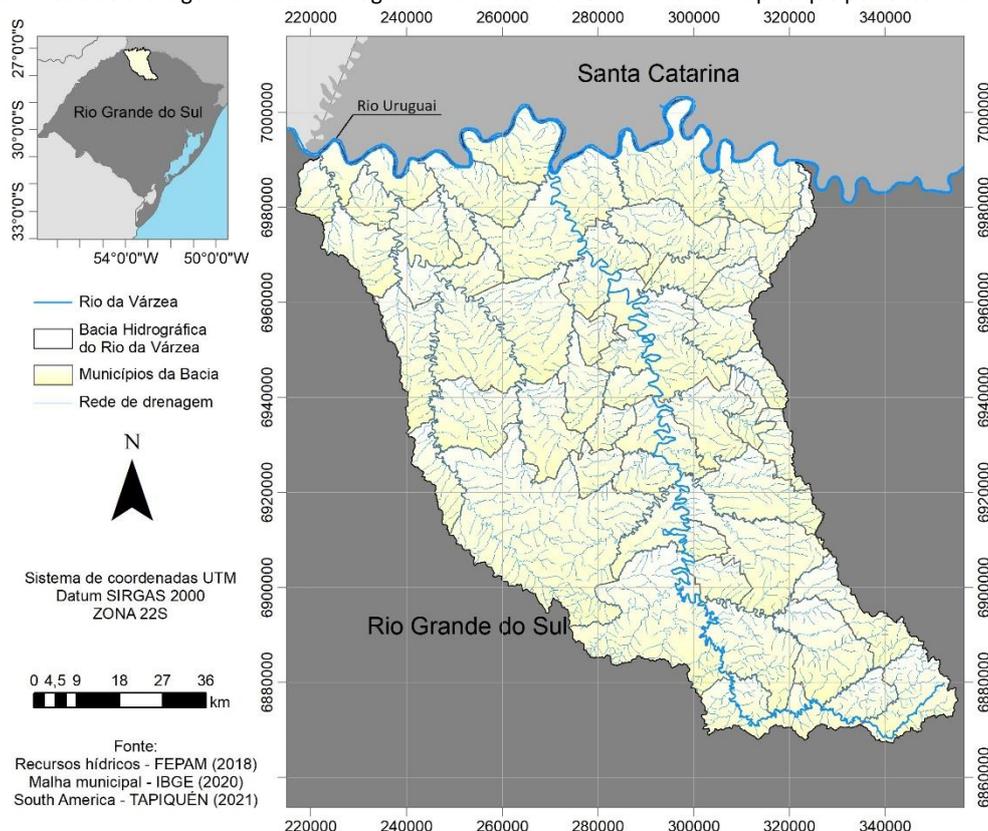
A região apresenta uma elevada dependência hídrica do SASG (aproximadamente 94% dos municípios) e, pela sua importância no abastecimento domiciliar dos municípios que conformam a bacia, este estudo buscou identificar áreas com maior potencialidade hídrica quantitativa do Sistema Aquífero Serra Geral na BHRV, com vista a avaliar a capacidade do sistema em suprir demandas atuais (1.376 l/s no ano de 2020) e futuras (1.304 l/s em 2035) de abastecimento público (ANA, 2021). Assim, este estudo pretende contribuir

com uma análise hidrogeológica de potencialidade hídrica de aquífero fraturado, que permita definir diretrizes regionais de uso sustentável do recurso hídrico subterrâneo no âmbito da BHRV.

Caracterização da área de estudo

A Bacia Hidrográfica do Rio da Várzea (BHRV) (U100) (Figura 2) está localizada a noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, possui uma área de 9.479 km², que se constitui como parte da bacia hidrográfica do Rio Uruguai. Tem como rio principal o Rio da Várzea, que é afluente do Rio Uruguai e nasce no município de Passo Fundo. Compõem a BHRV 56 municípios, 41 (73,2%) deles totalmente inseridos na bacia e 15 (26,8%) parcialmente inseridos. A população residente é de aproximadamente 305.619 habitantes, sendo que cerca de 60% dela residem em áreas urbanas (SEMA, 2021; CPRM, 2022). A principal atividade econômica na bacia é agrícola, destacando-se o cultivo de soja, trigo e milho, assim como a avicultura e a suinocultura (FEPAM, 2021; SANTOS et al., 2020).

Figura 2. Rede de drenagem da Bacia Hidrográfica do Rio da Várzea BHRV e municípios que pertencem a mesma.



Fonte: os autores

A BHRV tem vazão média anual de 276,51 m³/s e, além do Rio da Várzea, destacam-se outros cursos d'água com elevada contribuição hídrica, tais como os arroios Sarandi e Gozinho e os rios Porã, Barrada, do

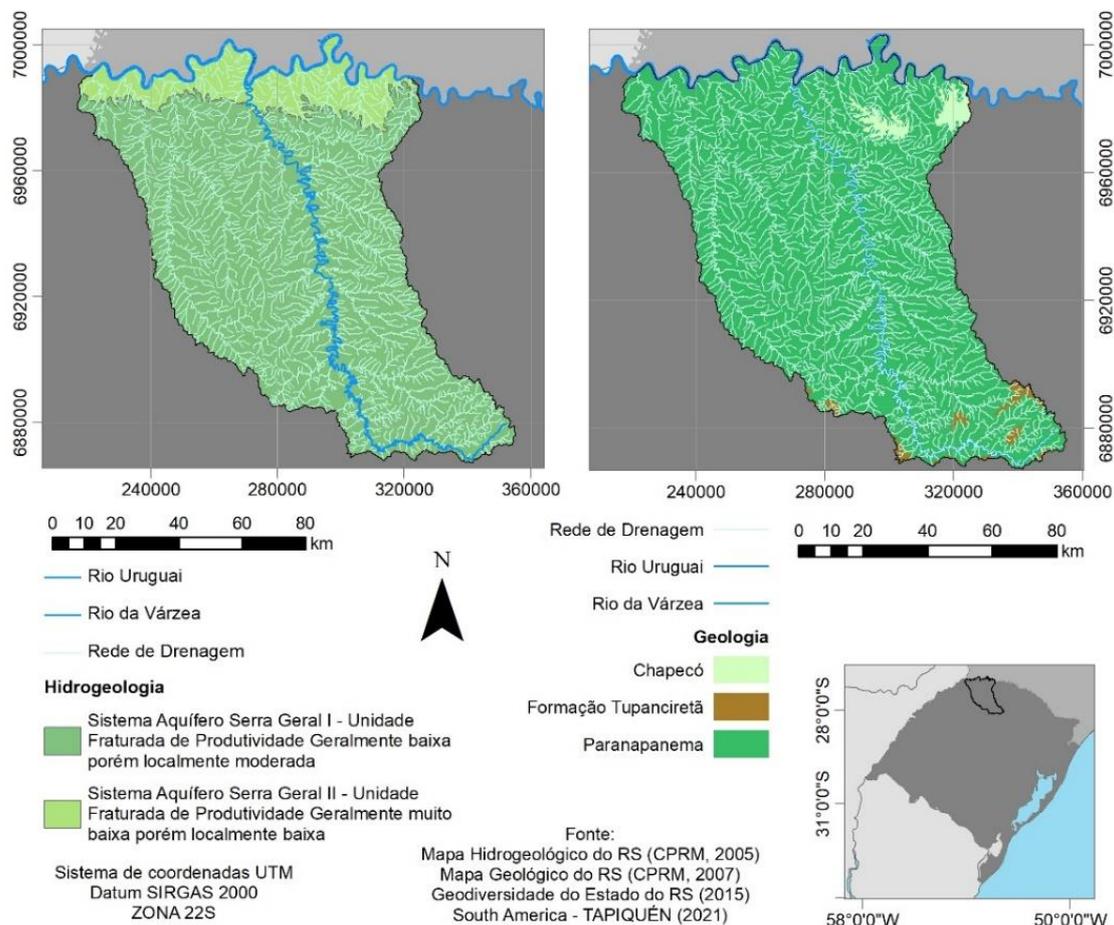


Mel, Guarita e Ogaratim (ECOPLAN, 2008). O clima predominante (97% da área) é do tipo mesotérmico, úmido, com precipitação em todos os meses do ano, inexistência de estação seca definida e com verão quente (Cfa); sendo a região Sudeste (3%) marcada por áreas com clima Cfb (KÖPPEN, 1931; FOREST-GIS, 2015). Os meses que marcam o verão, contam com uma temperatura máxima média de 30°C e média das mínimas de 18°C, enquanto os meses de inverno, têm temperaturas máximas média de 22°C e mínimas de 11°C, de acordo com as temperaturas médias mensais registradas pelas estações meteorológicas localizadas nos municípios de Iraí e de Passo Fundo, ambos pertencentes à BHRV (INMET, 2022).

Geologia e Hidrogeologia da BHRV

A Bacia do Rio da Várzea, localiza-se em área de ocorrência da Formação Serra Geral, Fácies Paranapanema, com manchas esparsas da Fácies Chapecó a nordeste e porções da Formação Tupanciretã a sul (Figura 3) (CPRM, 2007). Sob o aspecto hidrogeológico a BHRV se encontra, principalmente, sob o Sistema Aquífero Serra Geral I (87% da área) e, secundariamente, sob o Sistema Aquífero Serra Geral II (13% da área) (Figura 3).

Figura 3. Geologia e hidrogeologia da Bacia Hidrográfica do Rio da Várzea (Rio Grande do Sul).



Fonte: os autores

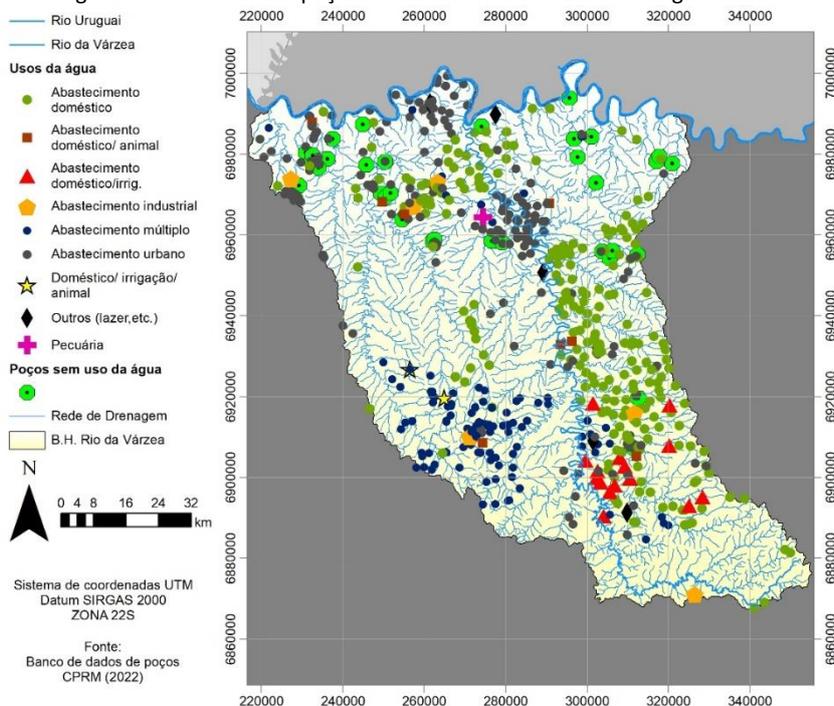


A litologia do SASG é configurada como basáltica e diabásica, com aquíferos de profundidade entre 100 e 150 metros e poços com vazão entre 10 e 100 m³/h. O SASG I é constituído por litologias basálticas, amigdalóides e fraturadas encobertas por solo avermelhado espesso e o SASG II conta com litologias riolitos, riolacitos e, em menor proporção, basaltos fraturados (CPRM, 2005).

Uso das águas subterrâneas na BHRV

Quanto aos tipos de mananciais utilizados na área urbana da BHRV para o abastecimento público, o Atlas Águas 2021 da ANA (ANA, 2021) indica que 70% dos municípios que fazem parte da Bacia fazem uso exclusivo de águas subterrâneas e 7% uso de águas subterrâneas em conjunto com mananciais superficiais. Somente 23% dos municípios utilizam unicamente mananciais superficiais para o abastecimento público de água. A Bacia conta com 1.045 poços perfurados e entre eles 331 (32%) não contam com informações a respeito do uso dado às águas subterrâneas. Entre os poços com informações (714 ao todo), destacam-se o uso para abastecimento doméstico em 36% das instalações (260 poços), seguido pelo abastecimento urbano em 36% (256 poços) e pelo abastecimento múltiplo em 16% (116 poços) (Figura 4) (CPRM, 2022).

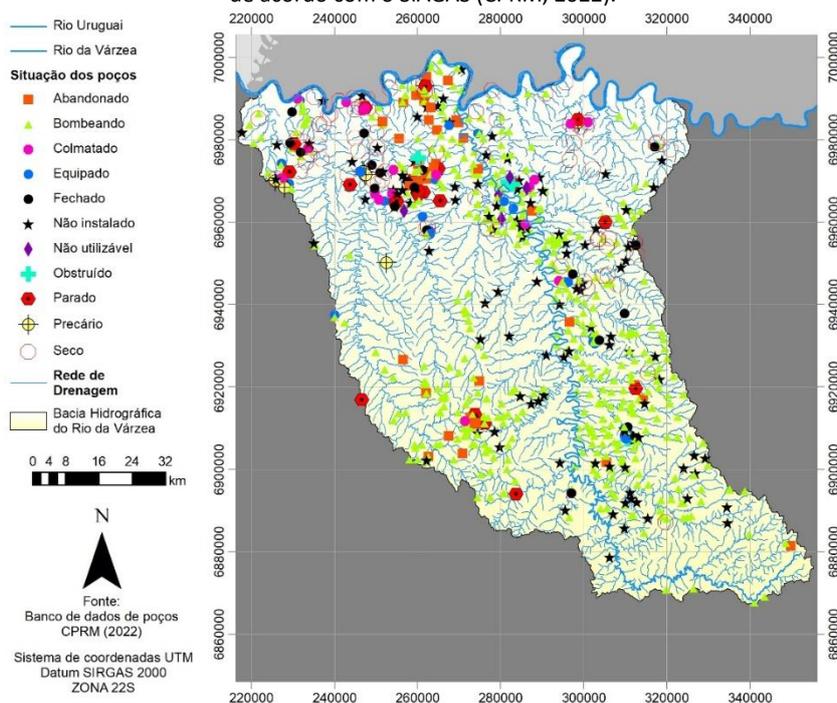
Figura 4. Usos das águas subterrâneas dos poços instalados no SASG. Bacia hidrográfica do Rio da Várzea (RS).



Fonte: os autores

Em relação à situação de funcionamento dos 1.045 poços, 169 (16%) não contam com informações. Entre os poços que contém informação (876), 56% (494 poços) estão bombeando; e entre os restantes, destacam-se 13% (117 poços) que constam como não instalados e 9% (78 poços) secos (CPRM 2022) (Figura 5).

Figura 5. Espacialização da situação referente a 876 poços instalados no SASG, na Bacia Hidrográfica do Rio da Várzea – BHRV (RS), de acordo com o SIAGAS (CPRM, 2022).



Fonte: os autores

É possível constatar que a maioria dos poços (36%) na BHRV são destinados ao abastecimento doméstico e estão distribuídos, principalmente, na parte leste e norte, enquanto o abastecimento urbano se concentra a norte com alguma distribuição também na zona central. Se destacam os poços que não fazem uso de águas subterrâneas (40 poços) concentrados principalmente na zona norte. Observa-se que a maioria dos poços existentes estão bombeando (56%), concentrando-se na parte central e leste da bacia. Nota-se um número significativo de poços não instalados, colmatados, secos e abandonados, principalmente na porção norte.

METODOLOGIA

Para a definição de áreas potenciais para o abastecimento por águas subterrâneas do Sistema Aquífero Serra Geral, na BHRV, foram desenvolvidas as seguintes atividades: constituição de uma base de dados de poços da BHRV (CPRM, 2022); análise quantitativa dos dados hidrogeológicos (capacidade específica);



elaboração da base vetorial com informações hidrogeológicas e estruturais (lineamentos); e esses analisados quanto sua produtividade ($m^3/h/m$) em relação aos fatores tipo de rocha, tipo de aquífero, profundidade do solo, densidade de lineamentos por direção, densidade de intersecção de lineamentos e direção de lineamentos; elaboração de gráficos para gerar as curvas de distribuição acumuladas e cálculo das medianas das capacidades específicas para cada classe pertencente aos fatores elencados. A seguir, são detalhadas as atividades desenvolvidas.

Base de dados dos poços da BHRV e bases vetoriais

Foi construída uma base de dados de poços a partir de informações coletadas no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) (CPRM, 2022), sobre os poços perfurados na área de abrangência da BHRV. Também, foram incorporados dados obtidos a partir da consulta bibliográfica em sítios eletrônicos (tais como o site da ANA, o IBGE e a HIDROWEB - SNIRH).

O resultado dessa consulta permitiu a construção de uma tabela em Excel com informações qualitativas dos poços instalados na BHRV. A partir dessa base de dados, as informações hidrogeológicas relevantes foram espacializadas em SIG (arquivos tipo *shapefile*), com auxílio dos *softwares* ArcGis (ESRI, 2014) e QGIS (OSGEO, 2021), constituindo a base de dados vetoriais utilizada neste estudo (Tabela 1).

Tabela 1. Especificações e fontes dos dados cartográficos utilizados para constituir a base de dados vetoriais da BHRV.

Base	Escala	Formato	Fonte
Mapa geológico do RS	1:750.000	Polígono (.shp)	CPRM (2007)
Mapa hidrogeológico do RS	1:750.000	Polígono (.shp)	CPRM (2005)
Mapa de poços da BHRV	1:50.000	Pontos (.shp)	CPRM (2022)
Modelo Digital de Elevação (MDE)	1:500.000	Raster	USGS (2021)
Profundidade do solo	1:750.000	Polígono (.shp)	CPRM (2015)
Municípios do RS	1:250.000	Polígono (.shp)	IBGE (2020) (Malha municipal digital)
Recursos Hídricos (hidrografia)	1:50.000	Linha (.shp)	FEPAM (2005b)
Estruturas do RS	1:750.000	Linha (.shp)	CPRM (2015) (Geodiversidades do RS)
Limite Estadual do RS	1:250.000	Polígono (.shp)	FEPAM (2005a)

Fonte: elaboração própria.

Análise quantitativa dos dados hidrogeológicos

Com o intuito de identificar a potencialidade hídrica quantitativa do SASG na BHRV, foi realizada a avaliação da produtividade dos poços (capacidade específica), em relação aos seguintes fatores: tipo de rocha; tipo de aquífero; profundidade do solo; densidade de lineamentos por direção; densidade de intersecções de



lineamentos; e direção de lineamentos (Tabela 2). Para o estudo de caso da BHRV, adaptou-se a metodologia de DAEE/IG/PT/CPRM (2005), proposta para a análise de potencialidade hídrica de aquíferos fraturados do Estado de São Paulo.

Tabela 2. Base de dados cartográfica e fator/es analisado para a avaliação da potencialidade do aquífero fraturado SASG na Bacia Hidrográfica do Rio da Várzea.

Base de dados cartográfica	Fonte	Escala	Fator analisado
Base de dados de poços	CPRM (2022)		Capacidade específica (m ³ /h/m) e vazão (m ³ /h)
Mapa de lineamentos	Autores ¹	1:100.000	Densidade, intersecção e direção dos lineamentos
Mapa geológico do Estado	CPRM (2007)	1:750.000	Tipo de rocha
Mapa hidrogeológico do Estado	CPRM (2005)	1:750.000	Tipo de aquífero
Profundidade dos solos do Estado	Solos do Rio Grande do Sul CPRM (2015)	1:750.000	Profundidade do solo

¹Lineamentos traçados com base no MDE (ver respectivas fontes na Tabela 1). Elaboração própria.

A variação da capacidade específica (vazão de exploração por metro de rebaixamento) foi estatisticamente correlacionada aos seguintes fatores: tipo de rocha (Formação Tupanciretã, Fácies Chapecó, Fácies Paranapanema); tipo de aquífero (SASG I e SASG II); profundidade do solo (entre 0 e >2,5 m); e lineamentos (traçados no âmbito deste estudo) (Tabela 3). Foram agrupadas as capacidades específicas correspondentes a cada uma das classes analisadas e foram calculadas as respectivas medianas. Além disso, foram construídas curvas de distribuição acumulada das capacidades específicas visando avaliar e comparar seu comportamento em cada uma das classes (Tabela 3).

Tabela 3. Fatores e classes utilizados para a análise estatística das capacidades específicas e da sua distribuição acumulada por classe.

Fator Analisado	Classe			
Tipo de rocha ¹	<i>Unidade</i> Formação Tupanciretã	<i>Sigla</i> ENTp	<i>Descrição</i> Arenito fino, quartzoso, paraconglomerado e arenito conglomerático, ambiente continental.	
	Fácies Chapecó	K1_al fa_ch	Derrames ácidos variando entre riodacitos a riolitos, matriz vitrofírica contendo pórfiros 132,1±0,19 Ar-Ar.	
	Fácies Paranapanema	K1_b eta_p r	quartzo (ametista), zeolitas, carbonatos, seladonita, Cu nativo e barita, compreende a maior concentração das jazidas de ametista do Estado, 136,2±2 Ar-Ar.	
	Tipo de aquíferos ²	Sistema Aquífero Serra Geral I (SASG I)		
		Sistema Aquífero Serra Geral II (SASG II)		
Profundidade do solo ³	Pouco espesso ou ausente (<1,5 m)			
	Espessura intermediária (1,5 m a 2 m)			
	Espesso (>2 m a 2,5 m)			
Lineamentos ⁴	Muito espesso (>2,5 m)			
	• Densidade de lineamentos por direção (comprimento dos lineamentos em metros) por quadrante de 5 km ² (resultado apresentado em m/km ²)			



-
- Densidade de intersecção de lineamentos (todas intersecções entre as diversas direções contabilizadas por quadrante de 5 km²), (resultado apresentado em número de intersecções por km²):
 - 1) 0
 - 2) Entre 0 e 0,02
 - 3) Entre 0,02 e 0,05
 - 4) Entre 0,05 e 0,1
 - 5) >0,1
 - Direção de lineamentos:
 - 1) SE – SSE; 2) SSW –SW; 3) S – SSW; 4) E – ESSE; 5) ENE – E; 6) SSE – S;
 - 7) ESE – SE; 8) SW – WSW; 9) NW – NNW; 10) WNW – NW; 11) WSW – W;
 - 12) N – NNE; 13) W – WNW; 14) NNW – N; 15) NE – ENE; 16) NNE – NE
-

Fonte: os autores

Lineamentos estruturais

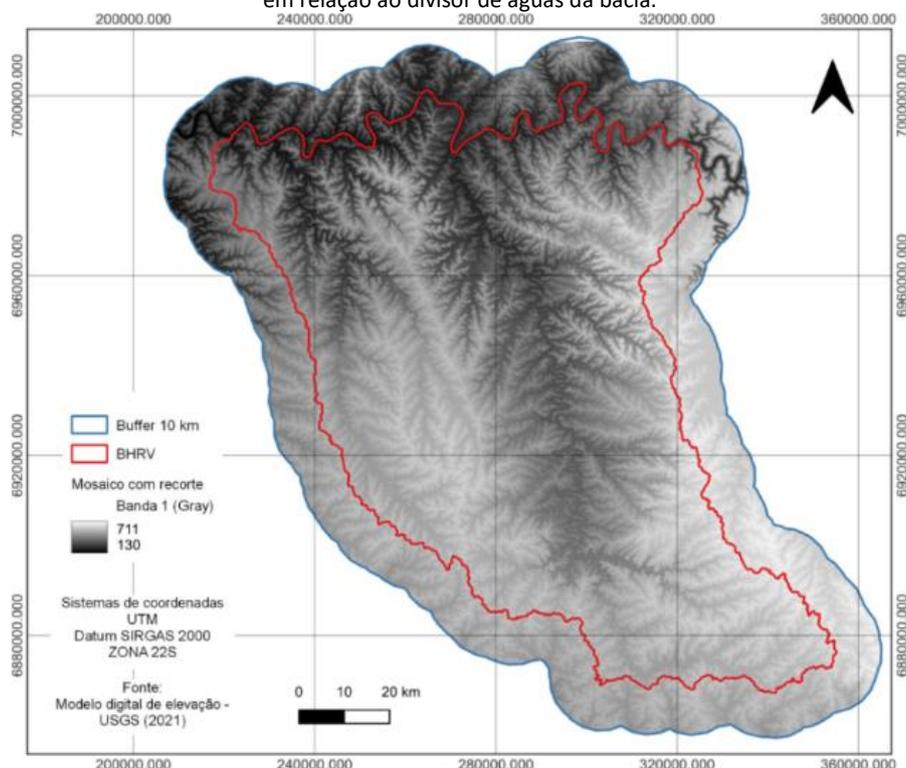
Para definir os lineamentos na BHRV, foi utilizado o modelo digital de elevação (MDE), com resolução de 1 segundo de arco (30 metros), obtido a partir do projeto Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) (USGS, 2021). As imagens utilizadas foram:

- s28_w053_1arc_v3;
- s28_w054_1arc_v3;
- s29_w053_1arc_v3;
- s29_w054_1arc_v3.

A partir da união das quatro imagens *raster* em formato geotiff, realizou-se um mosaico único MDE com auxílio do *software* QGIS versão 3.20, a fim de elaborar a base da bacia em estudo. A imagem MDE composta foi recortada com um buffer de 10 km em relação ao divisor de águas da BHRV, para auxiliar na identificação dos lineamentos próximos ao divisor (Figura 6).

As imagens foram reprojctadas para SIRGAS 2000/ UTM 22S, a fim de dar seguimento aos procedimentos para a obtenção de lineamentos utilizando o sistema métrico. A partir do mosaico (MDE) foram geradas imagens sombreadas, para facilitar a percepção visual dos lineamentos. Foram geradas 5 imagens sombreadas que diferem entre si a nível de altitude da insolação e azimute de insolação (Tabela 4), a partir delas foi selecionado o sombreamento (azimute de insolação e altitude da insolação) mais favorável à identificação dos lineamentos da bacia.

Figura 6. Mosaico do Modelo Digital de Elevação - MDE da Bacia Hidrográfica do Rio da Várzea, com extrapolação (*Buffer*) de 10 km em relação ao divisor de águas da bacia.



Fonte: os autores

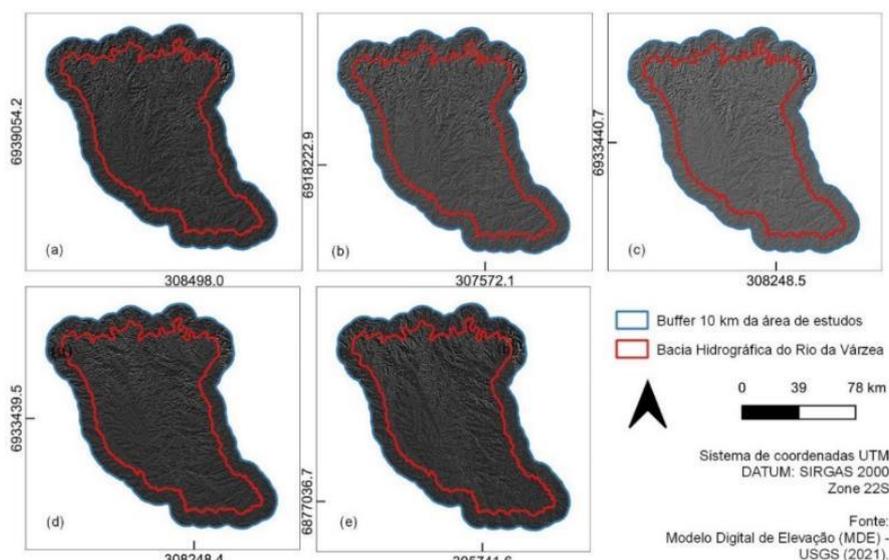
Tabela 4. Sombreamentos (azimute de insolação e altitude da insolação) gerados a partir do MDE para testar a favorabilidade para a identificação de lineamentos da Bacia Hidrográfica do Rio da Várzea.

Azimute de insolação	Altitude da insolação
0° ou 360°	10°
315°	10°
	15°
	20°
45°	10°

Fonte: os autores

No processo, inicialmente foi testado o azimute de insolação de 315° com altitude de insolação de 10°. Num segundo momento, com esse mesmo azimute de insolação, testou-se a altitude da insolação de 15° e, posteriormente, a altitude da insolação de 20°. Nessa análise, constatou-se que o azimute de insolação de 315° com a altitude da insolação a 10° possibilitou melhor visibilidade para a identificação dos lineamentos. Dessa forma, para os demais azimutes de insolação testados (0° e 45°), manteve-se o ângulo de altitude da insolação a 10°. Os testes com os diferentes azimutes de insolação e altitudes da insolação se encontram ilustrados na Figura 7.

Figura 7. Imagens da BHRV geradas a partir do mosaico do Modelo de Elevação, sombreadas com base na combinação de azimutes de insolação e altitudes da insolação. (a) Azimute de insolação de 315° e altitude da insolação a 10°; (b) azimute de insolação a 315° e altitude da insolação a 15°; (c) azimute de insolação a 315° e altitude da insolação a 20°; (d) azimute de insolação a 0° e altitude da insolação a 10°; (e) azimute de insolação a 45° e altitude da insolação a 10°.



Fonte: os autores

O sombreamento que permitiu melhor visualização das feições do relevo para a identificação dos lineamentos da bacia foi o sombreamento com azimute de insolação a 315° e altitude da insolação a 10°. Com a definição do azimute de insolação e altitude da insolação, foram então definidas as seguintes escalas utilizadas para interpretação e vetorização dos lineamentos no MDE: 1:50.000 e 1:100.000. O *buffer* de 10 km foi mantido a fim de facilitar a percepção do comportamento dos lineamentos no entorno próximo ao divisor de águas superficiais da bacia. Ainda, foi utilizada a base vetorial de Estruturas do Estado do Rio Grande do Sul, na escala 1:750.000 (CPRM, 2015) a fim de contribuir com a identificação de lineamentos próximos. Foram definidas as direções preferenciais dos lineamentos utilizando a calculadora de campo do QGIS (QGIS Brasil, 2017) e gerado um diagrama de rosetas com oito classes, utilizando o complemento *Line Direction Histogram* do programa, atribuindo peso de acordo com o comprimento dos lineamentos, ou seja, quanto maior o comprimento (m) de um lineamento, maior a probabilidade de sua direção se sobressair no diagrama de rosetas em relação às outras.

Densidade de lineamentos, densidade de intersecção e direção de lineamentos

A partir do mapeamento dos lineamentos foram gerados mapas de densidade de lineamentos para cada uma das seguintes direções de lineamentos: SE – SSE; SSW –SW; S – SSW; E – ESSE; ENE – E; SSE – S; ESE – SE; SW – WSW; NW – NNW; WNW – NW; WSW – W; N – NNE; W – WNW; NNW – N; NE – ENE; e NNE – NE. Para isso, a área da bacia foi dividida em quadrículas de 5 x 5 km e cada lineamento foi segmentado na respectiva



quadrícula. A soma dos comprimentos dos lineamentos do interior de cada quadrícula foi dividida pela área da quadrícula (25 km^2) o que, considerando o conjunto de células que recobrem a BHRV, resultou nos mapas densidades de lineamentos. Utilizando a ferramenta *Line Density* do *software* ArcGIS, foi realizada a análise dos dados de cada uma das direções de lineamentos. Foram, assim, obtidos 16 mapas de densidade de lineamentos (um para cada direção). As densidades obtidas para cada direção de lineamentos (metros por km^2) tiveram seus valores correlacionados com a capacidade específica dos poços localizados sob a zona de abrangência da respectiva quadrícula, por meio da ferramenta *Extract multi values to point* do ArcGIS, que possibilitou a união de ambas as informações numa única tabela. A suposição de que há uma relação diretamente proporcional com a capacidade específica dos poços e a densidade de lineamentos (m/km^2) foi testada através da análise de correlação de Pearson. Aplicou-se o cálculo da mediana e curvas de distribuição acumuladas aos valores de capacidade específica por direção de lineamentos somente nas direções cujo resultado de correlação foi positivo. Adotou-se o intervalo de Dancey e Reidy (2019) para a intensidade da correlação de Pearson em que: $r = 0$ (zero); $r = 0,10$ até $0,30$ (fraco); $r = 0,40$ até $0,6$ (moderado); $r = 0,70$ até 1 (forte).

Para a realização da densidade de intersecções entre lineamentos, foi utilizada a malha de quadriculas com $5 \times 5 \text{ km}$ e projetado sobre as células as diferentes combinações de direções. Com o auxílio da ferramenta *Kernel Density* do *software* ArcGIS foi calculada a densidade de intersecções por quadrícula (número total de intersecções entre os lineamentos por km^2). Cada densidade de intersecções (n° de intersecções por km^2) teve seu valor correlacionado com valores de capacidade específica dos poços localizados sob sua zona de abrangência, com auxílio da ferramenta *Extract multi values to point*, que permitiu a união dessas informações em uma única tabela, possibilitando o cálculo da mediana e a construção das curvas de distribuição acumuladas.

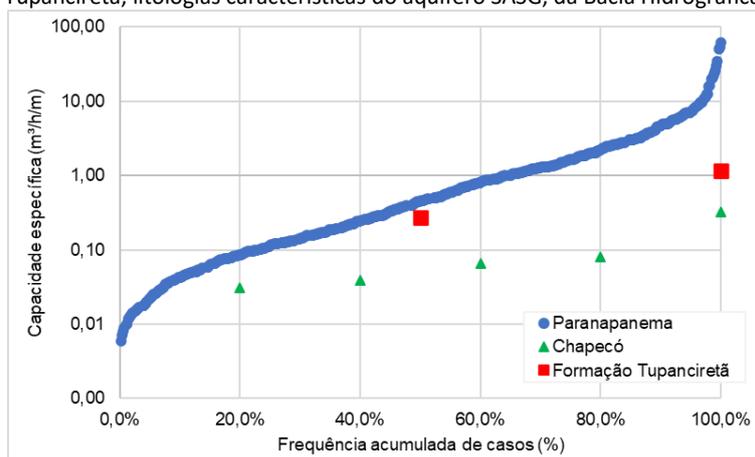
Para determinar a influência que as direções dos lineamentos possuem na capacidade específica dos poços próximos, utilizou-se a ferramenta *Select By Location*, para selecionar poços distantes a no máximo um raio de 1 km^2 dos lineamentos que foram agrupados de acordo com a direção do lineamento. Cada direção, portanto, contou com uma determinada quantidade de poços e seus respectivos valores de capacidade específica agrupados, a partir do qual foram calculadas as medianas e elaboradas as curvas de distribuição acumuladas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No que concerne à influência do tipo de rocha na capacidade específica dos poços, as Fácies Paranapanema, com capacidade específica mediana de $0,461 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$, apresentaram uma distribuição de frequência acumulada com valores superiores (598% maior) ao observados nas Fácies Chapecó (Figura 8), cuja

capacidade específica mediana é de $0,066 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$. Em relação à Formação Tupanciretã, os resultados não são conclusivos devido à escassa amostra de poços instalados na sua área de abrangência.

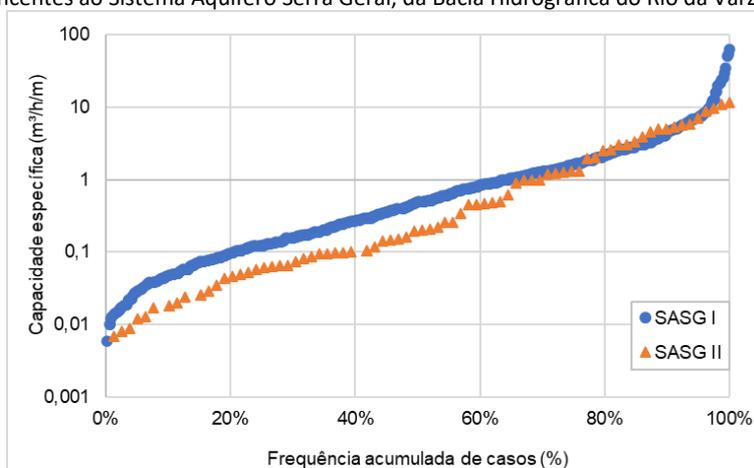
Figura 8. Distribuição da frequência acumulada da capacidade específica de poços instalados em rochas das Fácies Parapanema, Chapecó e Formação Tupanciretã, litologias características do aquífero SASG, da Bacia Hidrográfica do Rio da Várzea (RS).



Fonte: os autores

Analisando a distribuição de frequência acumulada da capacidade específica nos diferentes tipos de aquíferos, é possível verificar que o SASG I (constituído por litologias basálticas, amigdalóides e fraturadas encobertas por solo avermelhado espesso) apresentou maior produção (146% maior) comparado ao SASG II (conta com litologias riolitos, riodacitos e, em menor proporção, basaltos fraturados) (Figura 9), com uma mediana de $0,492 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ no SASG I. Mancuso e Santos (2021), também verificaram maior produtividade em poços localizados no SASG I (com capacidade específica variando de $0,6$ a $22 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$) comparado ao SASG II (inferior a $0,4 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$), em poços instalados no município de Frederico Westphalen (noroeste da BHRV). Esses resultados corroboram a descrição da capacidade produtiva dos aquíferos SASG I e SASG II indicada pelo mapa hidrogeológico do Rio Grande do Sul (CPRM, 2005), onde o SASG I conta com capacidades específicas entre 1 e $4 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$, eventualmente superior a $4 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$, e o SASG II conta com capacidades específicas inferiores a $0,5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$, eventualmente superiores a $2 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$.

Figura 9. Distribuição da frequência acumulada da capacidade específica de poços instalados nos aquífero SASG I e SASG II, pertencentes ao Sistema Aquífero Serra Geral, da Bacia Hidrográfica do Rio da Várzea (RS).



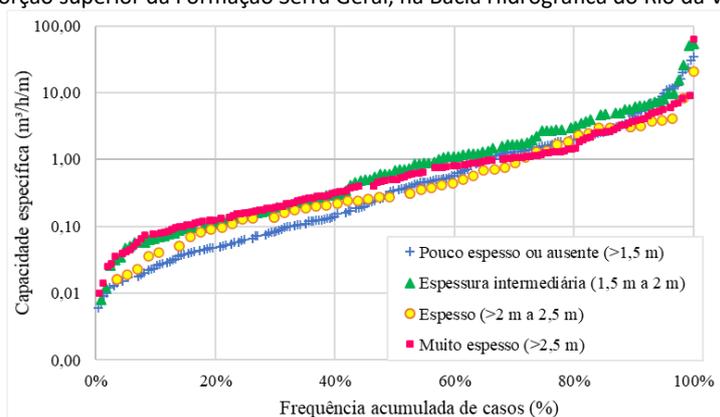
Fonte: os autores

A distribuição da frequência acumulada da capacidade específica dos poços considerando a profundidade do solo (Figura 10) indicou diferenças no comportamento quando comparadas as baixas e altas capacidades específicas, principalmente em zonas com maior espessura de solo. Poços instalados em zonas com espessuras intermediárias (entre 1,5 m e 2 m), indicam, em geral, maior capacidade específica, com mediana de 0,692 m³/h/m, destacando-se por apresentarem os valores mais elevados em 57% dos poços. Alguns poços (9%) instalados em zonas de pouca espessura de solo (até 1,5 m), também apresentaram capacidade específica elevada (maior que 5 m³/h/m), indicando a possibilidade de interseção entre as águas subterrâneas e águas superficiais. As classes pouco espesso ou ausente (>1 m a 1,5 m), espesso (>2 m a 2,5 m) e muito espesso (>2,5 m) obtiveram medianas de 0,357, 0,312 e 0,509 m³/h/m, respectivamente. Solos com espessuras intermediárias podem auxiliar na produtividade hídrica de rochas fraturadas em decorrência da capacidade em captar água precipitada, reduzir perdas de escoamento superficial e minimizar a evaporação. Em contrapartida, quando há um aumento significativo dessa espessura, o solo pode retardar a infiltração da água para atingir as fraturas, o que pode desencadear uma recarga aquífera mais lenta. Além de favorecer a retenção da água de precipitação nas camadas superficiais do solo (COSTA, 2008), que favorece a perda por evapotranspiração e por escoamento subsuperficial. No geral, os poços com solos de espessura intermediária têm produtividade 76% maior que a média da produtividade nas demais espessuras.

Peterlini, Pinese e Celligoi (2020) que avaliaram a influência da espessura do solo na produtividade hídrica (vazão e capacidade específica) do SASG na região Norte do Paraná, verificaram que, quanto maior a espessura de solo, menor é a vazão e a capacidade específica dos poços, apesar da relação encontrada (coeficiente r calculado) ter sido baixa para a vazão (-0,37) e muito baixa para a capacidade específica (-0,18).

Concluíram, portanto, que a análise de correlação linear e a MANOVA aplicadas no estudo constataram a influência da espessura sobre a vazão dos poços, mas não foi possível observar a mesma conclusão sobre a vazão específica.

Figura 10. Distribuição da frequência acumulada da capacidade específica de poços discretizados de acordo com as profundidades de solo da porção superior da Formação Serra Geral, na Bacia Hidrográfica do Rio da Várzea (RS).



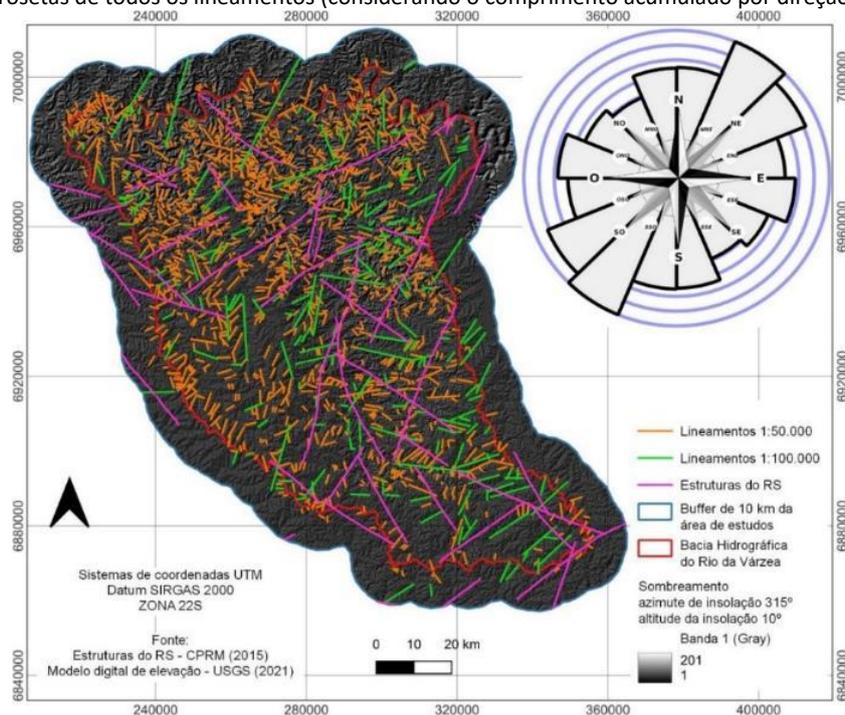
Fonte: os autores

Para analisar o fator *fraturas*, que representa os caminhos preferenciais por onde a água circula e fica armazenada em aquíferos fraturados, foi utilizado o mapa de lineamentos gerado para a BHRV (Figura 11), a partir do qual foram identificados 1.554 lineamentos. A análise de lineamentos e a sua influência nas características hidrogeológicas do SASG já tinha sido objeto de estudo por autores como: Mancuso e Santos (2021), que analisaram 148 lineamentos no município de Frederico Westphalen e identificaram maior frequência na direção N-N30°W; Nanni (2008) que mapeou 5.200 lineamentos na região do SASG no Estado do RS, indicando que as principais direções eram NNE, E-W e NW; e Cunha et. al (2016) que identificaram 1.981 lineamentos na região do Alto Uruguai, sendo as principais direções mapeadas NE-E e NW-W.

Neste estudo, por meio do diagrama de rosetas destacam-se duas direções principais nos lineamentos, levando em consideração o peso dos seus comprimentos: NNE – SSW, NE-SW e ENE-WSW.

Foi realizada a relação entre a produtividade dos poços e: a densidades de lineamentos, a densidade de intersecções entre os lineamentos e a direção dos lineamentos. Descreve-se, a seguir, os resultados obtidos em cada uma dessas três análises.

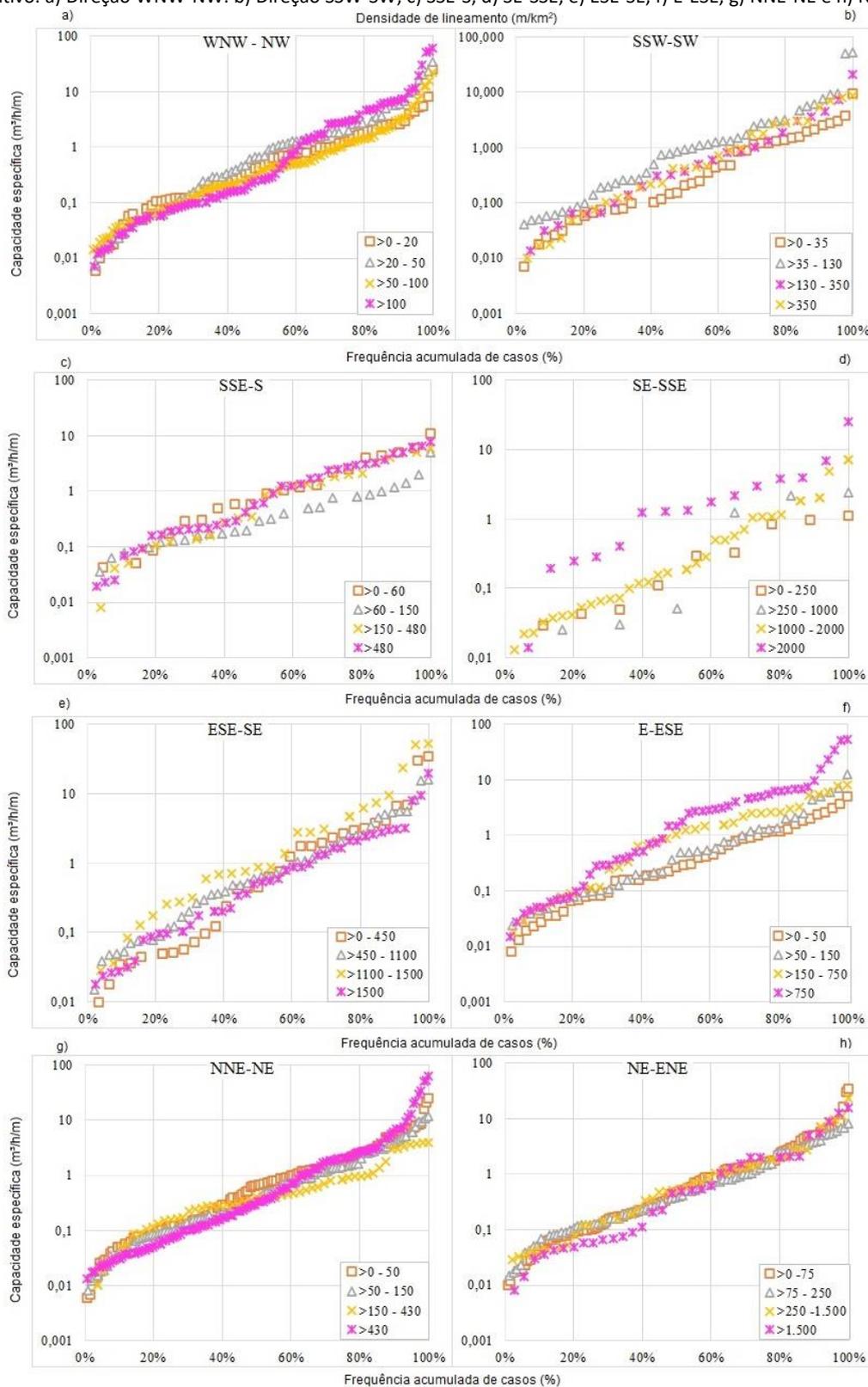
Figura 11. Mapa de lineamentos das rochas da Formação Serra Geral na Bacia Hidrográfica do Rio da Várzea (RS) e diagrama de rosetas de todos os lineamentos (considerando o comprimento acumulado por direção).



Fonte: os autores

Quanto à densidade de lineamentos (m/km^2) por direção, calculada por quadrante de $5 km^2$, foi avaliado se este fator teria uma relação diretamente proporcional com a capacidade específica dos poços instalados. Apesar de terem sido encontradas somente correlações pequenas ou fracas, foram constatados coeficientes de correlação de Pearson positivas entre a capacidade específica dos poços e a densidade de lineamentos na quadrícula para as direções: WNW-NW (0,1227 fraco), SSW-SW (0,0065 zero), SSE-S (0,0003 zero), SE-SSE (0,0076 zero), ESE-SE (0,0943 zero), E-ESE (0,1667 fraco), NNE-NE (0,0972 zero) e NE-ENE (0,0050 zero). Estas direções de lineamentos foram selecionadas para análise da curva de distribuição acumulada da capacidade específica, sendo que para cada uma dessas direções foram avaliadas sub-classes, definidas em função da densidade de lineamentos (m/km^2), da seguinte forma: WNW-NW (354 poços agrupados nas classes >0-20, >20-50, >50-100, >100); SSW-SW (142 poços agrupados nas classes >0-35, >35-130, >130-350, >350 respectivamente); SSE-S (111 poços agrupados nas classes >0-60, >60-150, >150-480, >480); SE-SSE (66 poços agrupados nas classes >0-250, >250-1000, >1000-2000, >2000); ESE-SE (148 poços agrupados nas classes >0-450, >450-1100, >1100,1500, >1500); E-ESE (173 poços agrupados nas classes >0-50, >50-150, >150-750, >750); NNE-NE (436 poços agrupados nas classes >0-50, >50-150, >150-430, >430); e NE-ENE (291 poços agrupados nas classes >0-75, >75-250, >250-1500, >1500) (Figura 12).

Figura 12. Distribuição da frequência acumulada da capacidade específica de poços da Bacia Hidrográfica do Rio da Várzea, discretizados de acordo com as densidades dos lineamentos (metros por km²) para as direções cujo resultado de correlação foi positivo. a) Direção WNW-NW. b) Direção SSW-SW, c) SSE-S, d) SE-SSE, e) ESE-SE, f) E-ESE, g) NNE-NE e h) NE-ENE.

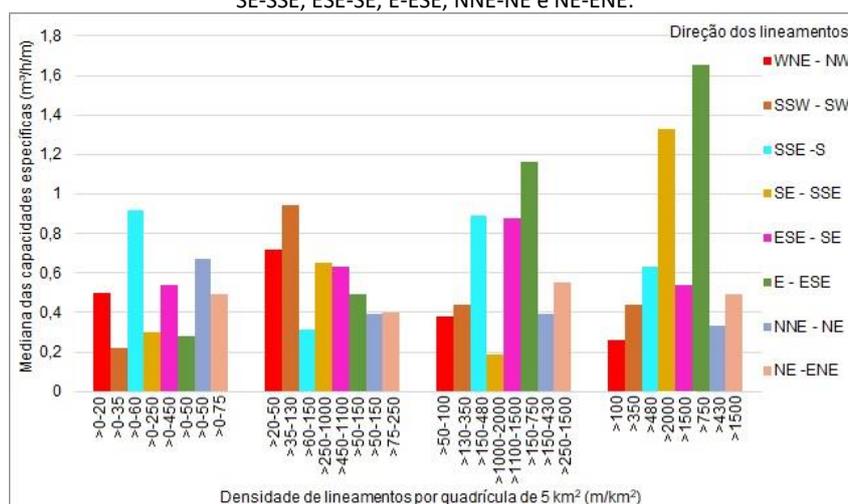


Fonte: os autores



A direção WNW-NW teve maior capacidade específica mediana para a densidade >20-50 (0,72 m³/h/m), a direção SSW-SW para a densidade de >35-130 (0,94 m³/h/m), direção SSE-S para >0-35 (0,92 m³/h/m), SE-SSE para >250-1000 (0,65 m³/h/m), ESE-SE para >130-350 (0,88 m³/h/m), E-ESE para >350 (1,65 m³/h/m), NNE-NE para >0-50 (0,67 m³/h/m) e direção NE-ENE com maior mediana (0,55 m³/h/m) para densidade de >150-430 (Figura 13). A densidade 0 (quadrículas sem lineamentos identificados) não foi incluída nas representações gráficas, mas se destaca por contar com capacidades específicas medianas semelhantes (entre 0,39 e 0,52 m³/h/m). No caso dos lineamentos com direção E-ESE, observa-se um evidente aumento das capacidades específicas com aumento da densidade, atingindo a mediana máxima de 1,65 m³/h/m com densidades superiores a 750 m/km². Com a direção SE-SSE se observa maiores capacidades específicas em densidades superiores a 2.000 m/km², chegando a atingir 1,33 m³/h/m de mediana.

Figura 13. Medianas das capacidades específicas de poços instalados na Bacia Hidrográfica do Rio da Várzea, discretizados por quadrícula de 5 km², de acordo com as densidades dos lineamentos (metros por km²) para as direções WNW-NW, SSW-SW, SSE-S, SE-SSE, ESE-SE, E-ESE, NNE-NE e NE-ENE.

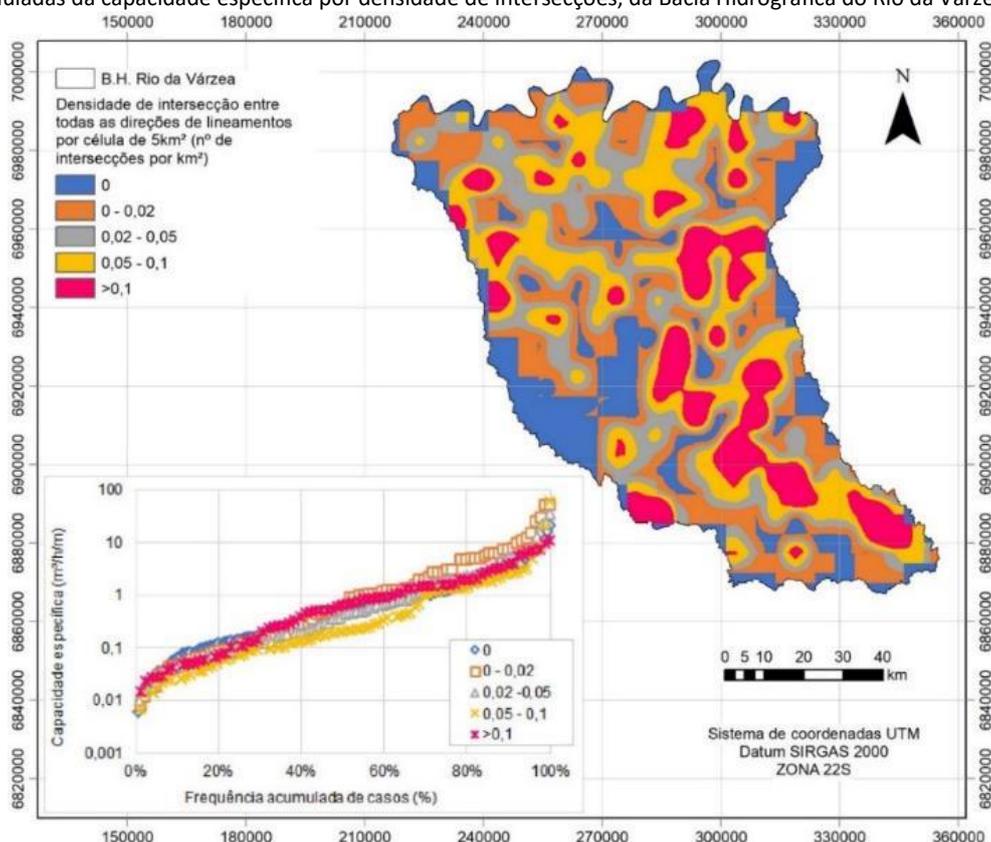


Fonte: os autores

Em relação à influência do número de interseções entre lineamentos (densidade de intersecção entre lineamentos de todas as direções, por célula de 5 km²) na capacidade específica dos poços, constata-se sobreposição entre as curvas de distribuição acumulada (Figura 14), destacando-se a densidade de <0,02 (nº de intersecções/km²), com as maiores capacidades específicas no intervalo de 52% a 100% dos casos acumulados. Isso influencia as medianas das capacidades específicas dos poços instalados nessas áreas, que apresentam o segundo maior valor (de 0,6 m³/h/m) entre as classes analisadas. Poços mais produtivos (considerando a mediana de 0,67 m³/h/m da capacidade específica) se localizam em áreas com densidades de intersecções >0,1/km². Enquanto poços instalados em áreas com densidades de intersecções variáveis, entre <0,02, 0,02–0,05 e >0,05-0,1 apresentam capacidades específicas medianas de 0,44, 0,43 e 0,21 m³/h/m, respectivamente. A dificuldade de definir uma correlação eficiente entre a capacidade específica dos poços e

a densidade de intersecções na Formação Serra Geral, também foi constatada por Fernandes et al. (2005), que no estudo realizado no SASG no estado de São Paulo, não verificaram correlações significativas entre a análise de densidade de lineamentos e de intersecções de lineamentos, e a produções dos poços. Os autores, concluem que há probabilidade de ocorrer uma maior permeabilidade em fraturas horizontais, que não podem ser identificadas por meio de imagens de satélite, ficando encobertas na escala de trabalho praticada, ao contrário das fraturas verticais (utilizadas neste trabalho) de menor permeabilidade.

Figura 14. Densidade de intersecções entre todas as direções de lineamentos (n° de intersecções por km^2) e distribuições acumuladas da capacidade específica por densidade de intersecções, da Bacia Hidrográfica do Rio da Várzea (RS).



Fonte: os autores

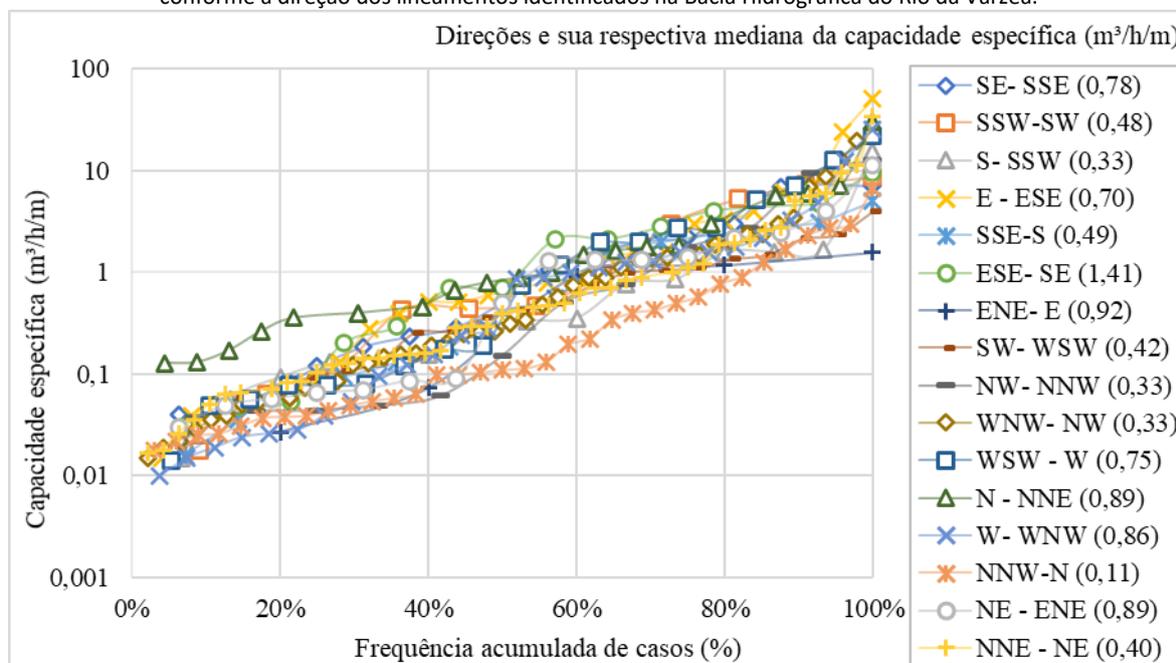
No entanto, estudos desenvolvidos por Lisboa e Reginato (2021) indicam que, no Estado do RS, a produtividade do SASG é mais favorável e está associada à ocorrência de intersecção entre lineamentos, destacando o caso dos lineamentos de orientação noroeste. Athayde e Athayde (2016) também verificaram que poços próximos a lineamentos contam com maiores produtividades, o que condiz com os estudos realizados por Duarte, Roisenberg e Santos (2020), que observaram uma tendência a maiores vazões em poços localizados em zonas com grandes estruturas.



Frenzel e Reginato (2018) identificaram que, lineamentos associados a poços de melhor produção, localizados na região de Garibaldi sobre o SASG, se encontravam nos intervalos de orientação N60-90E e N60-90W seguidos pelos intervalos de N30- 60W e N30-60E. Athayde e Athayde (2016), que analisaram a hidrogeologia do SASG no Estado do Paraná, verificaram que poços em regiões com fraturamento nas direções Norte-Sul e Leste-Oeste, tendem a ser mais produtivos.

Neste estudo, a avaliação da produtividade aquífera em poços localizados próximos (até 1 km de distância) dos lineamentos na BHRV indica que poços localizados próximos aos lineamentos de direção ESE-SE e ENE-E apresentaram maior capacidade específica mediana (1,41 e 0,92 m³/h/m), seguidos pelas direções NE-ENE e N-NNE (ambos com mediana de 0,89 m³/h/m), e W-WNW (0,86 m³/h/m) (Figura 15). O comprimento médio (13.269,05 metros) dos lineamentos na direção ESE-SE tomou maior destaque diante das demais direções, ou seja, esta direção, da qual pertence a maior mediana de capacidade específica, também coincidiu com os lineamentos de maior magnitude. O terceiro maior valor de mediana também coincidiu com o terceiro maior comprimento médio de lineamentos (direção NE-ENE com 10640,67 m). Já a direção ENE-E, com o segundo maior valor de capacidade específica, ficou com o oitavo maior comprimento médio de lineamentos (2891,02 m).

Figura 15. Distribuições acumuladas da capacidade específica para as direções de lineamentos e suas respectivas medianas das capacidades específicas (m³/h/m) de poços distantes até 1 km dos lineamentos na análise realizada por grupo de poços unidos conforme a direção dos lineamentos identificados na Bacia Hidrográfica do Rio da Várzea.



Fonte: os autores



CONCLUSÕES

Analisando a produtividade dos poços da Bacia Hidrográfica do Rio da várzea em relação ao tipo de rocha, constata-se que os poços instalados sob a classe Fácies Paranapanema têm sua produtividade 598% maior, se comparadas aos poços instalados sobre a Formação Chapecó. Em relação à Formação Tupanciretã, há poucos poços instalados com informação de capacidade específica, o que dificulta uma análise hidrogeológica fidedigna. Quanto ao Sistema Aquífero Serra Geral, os poços instalados no SASG I apresentam a potencialidade hídrica 146% maior que poços instalados no SASG II (norte da Bacia). A espessura do solo também influencia na produtividade, sendo 76% maior em poços com solos de espessura intermediária (de 1,5 m a 2 m) que a média da produtividade nas demais espessuras.

Com o auxílio de imagens de satélite, foram traçados 1.554 lineamentos na Bacia Hidrográfica do Rio da várzea. Destacam-se as direções principais NNE – NE e NE – ENE, considerando o peso em função do somatório dos comprimentos por direção.

Na análise de densidade de lineamentos (assumindo existência de correlação entre os lineamentos e as fraturas do aquífero) se observam correlações positivas com a capacidade específica para 8 direções, com maior relevância (correlação mais próxima de 1) para: WNW-NW e E-ESSE. As direções SE-SSE e E-ESE apresentaram correlação diretamente proporcional entre a maior mediana da capacidade específica dos poços e a maior densidade de lineamentos.

A análise de densidade de intersecções de lineamentos (correlação com a capacidade específica dos poços) não apresentou significância, a exceção da classe de maior densidade ($>0,1/\text{km}^2$) que resultou no maior valor mediano da capacidade específica ($0,67 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$). As direções de lineamentos que apresentaram poços próximos (a menos de 1 km de distância) com maiores capacidade específica mediana foram a ESE-SE e a NE-ENE.

Nota-se maior produtividade na região centro-leste da bacia, onde se observa uma maior concentração de poços em situação de bombeamento, e menor produtividade em zonas localizadas a oeste e norte, que coincidem com uma maior concentração de poços abandonados ou secos. A região norte da bacia também concentra a maior parte dos poços utilizados para abastecimento urbano.

A análise da concentração da situação de bombeamento dos poços, aliada às informações sobre direções promissoras para capacidade específica e densidade de lineamentos, pode revelar áreas potencialmente ricas quanto à potencialidade hídrica subterrânea na BHRV. Estes dados podem orientar o mapeamento visando a localização estratégica para perfuração de novos poços futuros.



Esta metodologia busca auxiliar na identificação de zonas com potencial para exploração hídrica subterrânea no SASG na Bacia Hidrográfica do Rio da Várzea, por meio de feições geológicas identificadas em superfície.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES pela bolsa de mestrado de demanda social, ao PPGEAMB-Universidade Federal de Santa Maria pelo suporte oferecido e à Mariana Muniz Blank por suas contribuições.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Mananciais e Sistemas por Município – Planilha. 2021. Disponível em: <<https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/d77a2d01-0578-4c71-a57e-87f5c565aacf>>. Acesso em: 10 out. 2024.

ATHAYDE, Gustavo. Barbosa.; ATHAYDE, C. DE V. M. Hidrogeologia do Sistema Aquífero Serra Geral no Estado do Paraná. Águas Subterrâneas, [S.L.], v. 29, n. 3, p. 315. 2016. Lepidus Tecnologia. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28406/18549>. Acesso em: 10 out. 2024.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul. Escala 1:750.000. Brasília: CPRM: SIAGAS, 2005. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/bitstream/doc/5249/2/mapa_hidro_RS_final.pdf>. Acesso em: 10 out. 2024.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). Mapa Geológico do Rio Grande do Sul. Escala 1:750.000. Brasília: CPRM: SIAGAS, 2007. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/bitstream/doc/10301/2/Geologico_MDT.pdf>. Acesso em: 10 out. 2024.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). Geodiversidade do Estado do Rio Grande do Sul. Brasília: CPRM: GEOSGB. SIG (vetores). Escala 1:750.000. 2015. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/bitstream/doc/16774/1/Geodiversidade_RS.pdf>. Acesso em: 10 out. 2024.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). Banco de dados de poços (SGB/CPRM). Serviço Geológico do Brasil / CPRM. 2022. Disponível em: <<http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/pesquisacomplexa.php>>. Acesso em: 17 out. 2024.

COSTA, Waldir. Duarte. Hidrogeologia de meios fissurados. In: FEITOSA, Fernando. A. C. et. al. Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. 3.ed. Rio de Janeiro: CPRM/REFO, LABHID-UFPE, 2008. 812 p.

CUNHA, Gustavo. G et al. Hidrogeoquímica do Sistema Aquífero Serra Geral na região do Alto Rio Uruguai, Noroeste do Rio Grande do Sul e sua relação espacial com a tectônica rúptil. Pesquisas em Geociências, 43(1), 55-67. 2016. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.78192>

DANCEY, Christin; REIDY, John. Estatística sem matemática para psicologia: Métodos de pesquisa. Grupo A. E-book. ISBN 9788584291434. 2019. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788584291434/>. Acesso em: 17 out. 2024.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA; INSTITUTO GEOLÓGICO; INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO; COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (DAEE/IG/PT/CPRM). Mapa das águas subterrâneas do Estado de São Paulo. São Paulo, 1 mapa. Escala 1:1.000.000. 2005.

DINIZ, João Alberto Oliveira. et al. Mapa hidrogeológico do Brasil ao milionésimo: Nota técnica. Escala 1:5.000.000. Recife: CPRM - Serviço Geológico do Brasil. 45p. 2014



DUARTE, Matheus Beretta., ROISENBERG, Ari.; SANTOS, Matheus Rossi. Relação entre as estruturas rúpteis e a produtividade de poços tubulares na Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos, RS. Anuário do Instituto de Geociências- UFRJ, Porto Alegre: UFRGS, v.43, p.203-214. 2020.

ECOPLAN. Plano de Desenvolvimento Sustentável da Região da Bacia do Rio Uruguai: Relatório Final. Florianópolis/ SC- Porto Alegre/RS. 2008. 550 p.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE (ESRI). ArcGIS for Desktop Advanced. Release 10.2.2. Redlands: ESRI. 2014.

FEITOSA, Fernando A. C. et al. Hidrogeologia: conceitos e aplicações. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, 2008. 812 p.

FERNANDES, Amélia. João. et. al. Aquíferos Fraturados. In: Departamento de Águas e Energia; Instituto Geológico; Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo; Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (DAEE/IG/PT/CPRM), Mapa das águas subterrâneas do Estado de São Paulo. São Paulo, 1 mapa. Escala 1:1.000.000. 2005.

FOREST-GIS. Classificação climática de köppen-geiger em shapefile. 2021. Disponível em: <<https://forest-gis.com/2015/10/classificacao-climatica-de-koppen-geiger-em-shapefile.html/>>. Acesso em: 17 out. 2024.

FORMENTINI, Jessica. Estruturação de base de dados quali – quantitativos das águas subterrâneas da Bacia do Rio Da Várzea. 2015. 98 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal de Santa Maria, 2015.

FORMENTINI, Jéssica.; MANCUSO, Malva Andrea.; ALBUQUERQUE FILHO, José Luiz. Estruturação de base de dados de qualidade das águas subterrâneas voltada para a gestão da Bacia do Rio da Várzea, Rio Grande do Sul, Brasil. Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (RBGEA), v.6, p.88–97. 2016.

FRENZEL, Matheus. Gorniski.; REGINATO, Pedro Antonio Roehe. Caracterização Hidrogeológica do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) na Região de Garibaldi, RS. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIAS PARA O MEIO AMBIENTE, 6, Bento Gonçalves. 2018. p. 1-8.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUIZ ROESSLER (FEPAM). U100 – Várzea. Porto Alegre: FEPAM. 2021. Disponível em: <http://www.fepam.rs.gov.br/qualidade/bacia_uru_varzea.asp>. Acesso em: 20 abr. 2021>. Acesso em: 20 abr. 2021.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUIZ ROESSLER (FEPAM). Limite Estadual do RS. Escala 1: 250.000. Porto Alegre: FEPAM. 2005a. Disponível em: <http://www.fepam.rs.gov.br/biblioteca/geo/bases_geo.asp>. Acesso em: 20 abr. 2021.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUIZ ROESSLER (FEPAM). Recursos hídricos. Escala 1: 250.000. Porto Alegre: FEPAM. 2005b. Disponível em: <http://www.fepam.rs.gov.br/biblioteca/geo/bases_geo.asp>. Acesso em: 20 abr. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Pesquisa Nacional de Saneamento Básico. Tabela 7465 - Municípios com serviço de abastecimento de água por rede geral de distribuição em funcionamento com captação de água doce, número de pontos de captação de água doce e volume de água doce captada por dia, por tipo de ponto de captação. Brasil: IBGE. 2017a. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/7465>>. Acesso em: 17 out. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Pesquisa Nacional de Saneamento Básico. Tabela 7468 - Municípios com serviço de abastecimento de água por rede geral de distribuição em funcionamento com captação de água doce em ponto superficial, em poço raso ou em poço profundo, por existência e tipo de proteção e de poluição ou contaminação na captação. Brasil: IBGE. 2017b. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/7468>>. Acesso em: 17 out. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE) Malha Municipal. Rio Grande do Sul, Municípios, Brasil: IBGE. 2020. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html?=&t=downloads>>. Acesso em: 17 out. 2024.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Banco de Dados Meteorológicos do INMET. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 2022. Disponível em: <<https://bdmep.inmet.gov.br/>>. Acesso em: 17 out. 2024.

KÖPPEN, W. Grundriss der Klimakunde. Berlim: Walter de Gruyter. 1931.



LISBOA, Nelson Amoretti, REGINATO, Pedro Antonio Roehe. Avaliação de locais para perfuração de poços tubulares no Sistema Aquífero Serra Geral no estado do Rio Grande do Sul por meio da análise dos fatores condicionantes e uso de técnicas de sensoriamento remoto. *Águas Subterrâneas*, [S.L.], v. 35, n. 1, p. 1-19. 2021 Lepidus Tecnologia.
<http://dx.doi.org/10.14295/ras.v35i1.30001>.

MANCUSO, Malva Andrea et al. Análise dos teores de flúor nas águas de abastecimento público em municípios localizados sobre o aquífero Serra Geral, RS. In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. 20, 2013, Bento Gonçalves: ABRH. Disponível em: <<https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=3&ID=155&SUMARIO=3973>>. Acesso em: 17 out. 2024.

MANCUSO, Malva. Andrea. et al. Hidrogeologia do SASG no município de Frederico Westphalen (RS). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 18, 2014. Belo Horizonte: Abas. 2014 p.1 - 9.

MANCUSO, Malva Andrea.; SANTOS, Caroline Emiliano. Avaliação hidrogeológica quali-quantitativa do aquífero fraturado Serra Geral, localizado no noroeste do Rio Grande do Sul. *Geologia USP*, São Paulo.v. 21, p. 1-88. 2021.

NANNI, Arthur Schmidt. O flúor em águas do Sistema Aquífero Serra Geral no Rio Grande do Sul: origem e condicionamento geológico. 2008. 127f. Tese (Doutorado em Ciências). Porto Alegre: Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.

OPEN SOURCE GEOSPATIAL FOUNDATION (OSGEO). QGIS for Desktop Windows. Versão 3.20.0. 2021.

PETERLINI, Giselly; PINESE, José Paulo Peccinini; CELLIGOI, André. Fatores geológicos e pedológicos que influenciam na produtividade hídrica do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) na região Norte do estado do Paraná. *Caminhos de geografia, Uberlândia*. v. 21, n. 78, p 173-191. 2020.

QGIS BRASIL. Filtragem de lineamentos geológicos por quadrantes no QGIS. 2017. Disponível em: <<https://qgisbrasil.org/2017/01/30/filtragem-de-lineamentos-geologicos-por-quadrantes-no-qgis/>> Acesso em: 17 out. 2024.

RIO GRANDE DO SUL. Perfis Regionais 2015 - Médio Alto Uruguai. Porto Alegre. 2015. Disponível em: <<https://planejamento.rs.gov.br/upload/arquivos/201512/15134133-20151117102639perfis-regionais-2015-medio-alto-uruguai.pdf>>. Acesso em: 17 out. 2024.

SANTOS, Caroline. Emiliano et. al. Água Subterrânea dos Poços da Área Rural de Frederico Westphalen-RS: Qualidade, Aspectos Ambientais e Conformidade Legal. *Anuário do Instituto de Geociências, Rio de Janeiro*. v. 43, p. 330-340. 2020.

SCHROEDER, Joseane Kölzer. Avaliação da ocorrência do íon fluoreto em águas do Aquífero Serra Geral utilizadas para o abastecimento público na região noroeste do Rio Grande do Sul. 2014. 77f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária). Universidade Federal de Santa Maria, 2014.

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE E INFRAESTRUTURA (SEMA). (2021). U100 – Bacia Hidrográfica do Rio da Várzea. Brasil: SEMA. Disponível em: < <https://www.sema.rs.gov.br/u100-bh-varzea>>. Acesso em: 17 out. 2024.

TAPIQUÉN, Carlos. Efraín. Porto. Shape South America Countries. Disponível em:<<https://tapiquen-sig.jimdofree.com/english-version/free-downloads/south-america/>>. Acesso em: 17 out. 2024.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). Earth Explorer. SRTM – Shuttle Radar Topography Mission. Washington, NASA-USGS. 2000. Disponível em: < <http://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 17 out. 2024.