



Relação entre as Estruturas Rúpteis e a Produtividade de Poços Tubulares na Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos, RS
The Relationship between Brittle Structures and Wells Productivity in Rio dos Sinos Basin, Rio Grande do Sul State

Matheus Beretta Duarte; Ari Roisenberg & Matheus Rossi Santos

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Avenida Bento Gonçalves, 9500, Prédio 43126, Sala 103, 91501-970, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil
E-mails: matheus.beretta@ufrgs.br; ari.roisenberg@ufrgs.br; matheus.rossi@ufrgs.br

Recebido em: 20/03/2020 Aprovado em: 20/07/2020

DOI: http://doi.org/10.11137/2020_3_203_214

Resumo

A Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos tem nos últimos anos apresentado um grande aumento da necessidade do uso de águas subterrâneas, acelerado principalmente pela degradação dos seus mananciais superficiais. Todavia, seus aquíferos têm sido descritos como péssimos produtores, com baixíssima capacidade específica. Esse estudo busca compreender a atuação das estruturas rúpteis no condicionamento da hidráulica dos poços tubulares. A metodologia envolve um banco de dados de 624 poços, onde foram definidas classes de produtividade, e o mapeamento em imagens de satélite de lineamentos morfotectônicos com subsequente filtragem pelos seus comprimentos e direções. As estruturas foram interpretadas a partir de 815 lineamentos, com uma tendência dos seus comprimentos aumentarem na região leste da área de estudo. Entretanto, diferentes tamanhos, direções e densidades podem ser encontrados em qualquer região. Quando relacionados à hidráulica, foi identificada a contribuição dos lineamentos na produtividade dos poços tanto no tamanho quanto no sentido preferencial. As altas vazões estão relacionadas a uma maior tendência de estarem em zonas com grandes estruturas, enquanto capacidades específicas mais baixas estão associadas a estruturas de porte pequeno. Por fim, poços alocados em zonas com maior densidade de lineamentos de direção N-NE e NE-E tendem a ser mais produtivos quando comparados a poços com maior contribuição da direção N-NW.

Palavras-chave: *Hidráulica; Lineamentos; Tectônica*

Abstract

Over the last decades, the Rio dos Sinos Basin has been demonstrating a great increase in the need for the usage of groundwater resources, mainly hastened by the degradation of its surface water bodies. Nevertheless, its aquifers have been described as poor producers, having low specific capacity. This article aims to understand the role of brittle structures over the hydraulic conditioning of tubular wells. Using the database of 624 wells, where productivity classes were defined, morphotectonic lineaments were mapped on satellite and subsequently filtered by length and direction. The structures were interpreted from 815 lineaments, with a tendency for their lengths to increase in the east region of the studied area. However, different sizes, directions and densities correspond to any region. When related to hydraulics, the contribution of lineaments to well productivity was identified both in size and direction of those structures. High flow rate wells share a tendency to be in zones of larger structures, while low specific capacities are associated with small structures. Lastly, wells located in areas with higher density lineaments in the N-NE and NE-E direction tend to be more productive in comparison to wells with a greater contribution from the N-NW direction.

Keywords: *Hydraulic; Lineaments; Tectonics*

1. Introdução

As águas subterrâneas representam uma importante fonte hídrica para a manutenção da população e economia da maioria dos municípios que integram a Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos (Plano Sinos, 2011), impondo uma necessidade crescente de exploração. Os estudos hidrogeológicos indicam que nenhum dos aquíferos que compõem a área de estudo apresentam altos valores de produtividade (CPRM, 2005), sendo necessária a realização de trabalhos complementares que subsidiem o entendimento dos fatores que controlam a vazão das águas.

Inúmeras variáveis atuam na dinâmica das águas subterrâneas do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) e do Sistema Aquífero Guarani (SAG), que são os principais mananciais hídricos subterrâneos da região. Dentre essas variáveis, estruturas rúpteis exercem um controle fundamental para o aquífero vulcânico fraturado (Cunha, 2016; Tomasi & Roisenberg, 2019). O fluxo da água subterrânea em um aquífero fraturado dá-se ao longo de descontinuidades físicas primárias (juntas de contração, vesículas e contatos entre derrames) ou secundárias (fraturas tectônicas), que são de fundamental importância para a produtividade de poços. Mesmo aquíferos porosos, como o SAG, em muitos casos comportam-se como aquíferos mistos, pela presença de fraturamentos em locais onde a porosidade é reduzida. Estudos demonstram que em áreas heterogêneas, compostas por diferentes tipos de aquíferos, a produtividade regional é altamente dependente de diversos fatores, incluindo o grau de fraturamento tectônico (Lee *et al.*, 2012).

Uma ferramenta na interpretação do fraturamento em aquíferos é a análise de lineamentos em imagens de satélite, que são estruturas lineares, retas ou levemente curvadas, que refletem um processo de subsuperfície (O'Leary *et al.*, 1976). Basicamente, os lineamentos incluem cristas, vales, ravinas, contatos de áreas elevadas com áreas de baixa altitude, drenagens, contatos geológicos e zonas de falhas e brechas.

O presente estudo tem como principal objetivo o entendimento dos fatores geológicos que influenciam na produtividade de poços na Bacia do Rio dos Sinos e, em particular, a influência das estruturas rúpteis, a partir de um expressivo conjunto de dados. Esse conhecimento pode auxiliar na gestão dos recursos hídricos da bacia, atuando na escolha de áreas mais propícias para a perfuração de poços.

A área de estudo é localizada na região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul, entre as coordenadas 29°54' e 29°20'S e 51°17' e 50°15'O, sendo composta por 32 municípios, total ou parcialmente inseridos, abrangendo uma área de 3693 km². O seu rio principal, com nascente em Caraá e foz em Canoas percorre em torno de 190 km

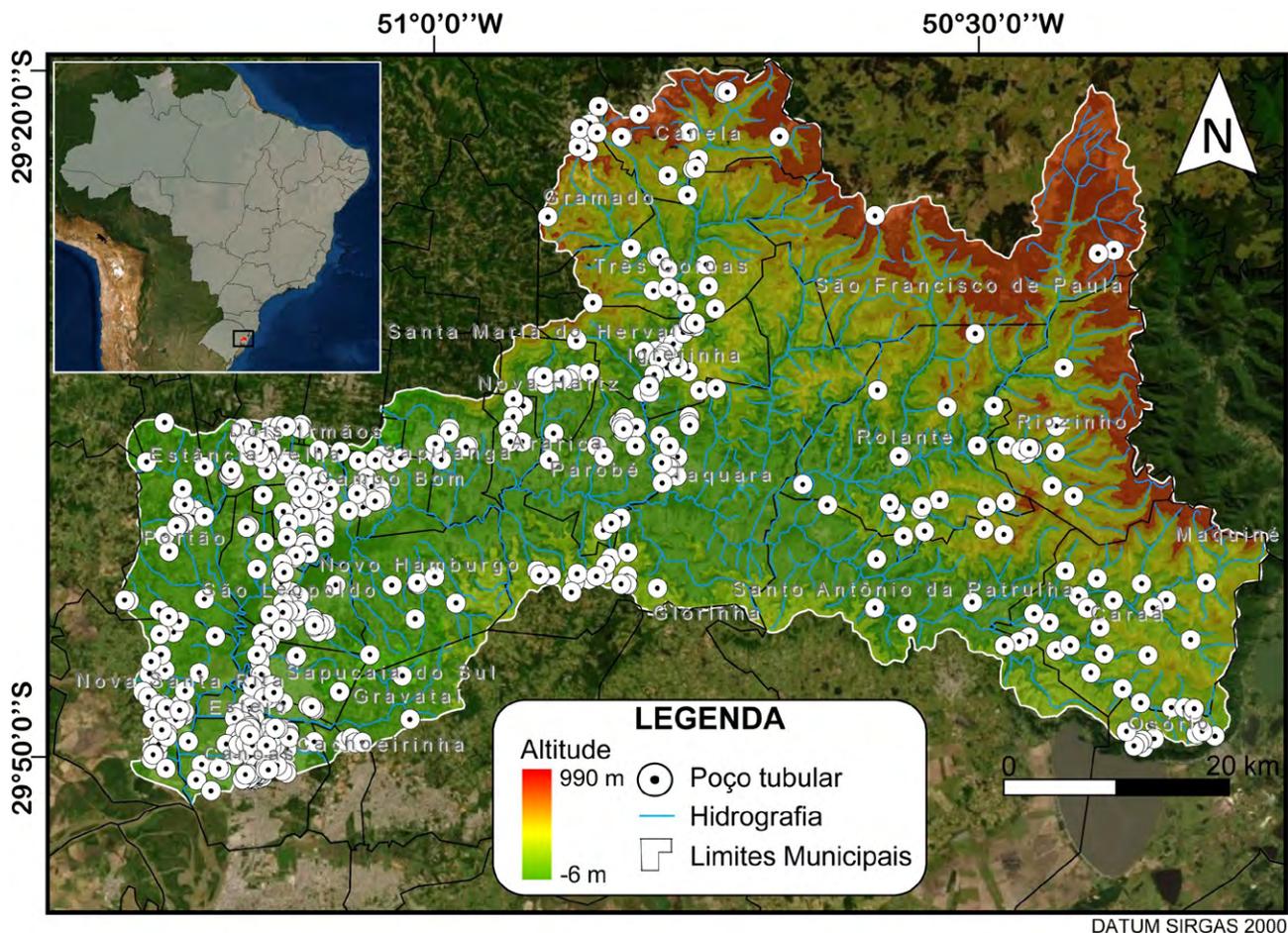
até desaguar no Delta do Jacuí. A bacia é marcada por uma significativa variação de altitude, com valores em torno de 1000 m no nordeste, próximo à São Francisco de Paula, passando a cotas no nível do mar em sua região sudoeste (COMITESINOS, 2019; Figura 1). Na região de menor declividade topográfica e vazão do rio principal, suas águas superficiais sofrem de um intenso processo de degradação pelo despejo de efluentes domésticos e industriais sem tratamento, principalmente por ser uma região densamente povoada (IBGE, 2012). Essa é a região em que a maioria dos poços tubulares cadastrados no Banco de Dados do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas do Serviço Geológico do Brasil são encontrados, demonstrando a necessidade dos recursos subterrâneos para a manutenção da população (SIAGAS, 2019).

2 Contexto Geológico e Hidrogeológico

A Bacia do Rio dos Sinos é localizada sobre o arcabouço geológico da Bacia do Paraná, que consiste em uma bacia intracratônica de idade Ordoviciano a Neocretácea (Milani *et al.*, 2007). As principais unidades geológicas em condições de superfície e subsuperfície na área em estudo são representadas pelas formações sedimentares Rio Bonito, Irati, Rio do Rasto, Piramboia, Botucatu, pelo vulcanismo da Formação Serra Geral e subordinadamente sedimentos inconsolidados recentes (Plano Sinos, 2011; CPRM, 2006; Figura 2). As principais unidades hidrogeológicas (Figura 3) foram mapeadas pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2005), sendo relacionadas aos Sistema Aquífero Serra Geral, Sistema Aquífero Guarani e aquíferos sedimentares de idade permiana. Todavia, informações também podem ser encontradas sobre os aquíferos da região no Plano de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos (Plano Sinos, 2011).

A Formação Rio Bonito (Permiano) consiste em arenitos quartzosos e arcóseos, de granulometria fina a média intercalados com camadas de siltitos argilosos e carbonosos ou carvão em camadas com espessura no máximo centimétrica (Holz *et al.*, 2010). Holz (2003) e Maahs *et al.* (2019) descrevem esta unidade como depositada em um ambiente estuariano misto, com sistemas fluviais, leques aluviais, lagunas e *shoreface*. As capacidades específicas do Aquífero Rio Bonito são em geral inferiores a 0,5 m³/h/m, contudo, é possível encontrar de forma local poços com capacidades específicas maiores que 2 m³/h/m, principalmente quando o aquífero está em condição aflorante (CPRM, 2005; Goffermann *et al.*, 2015). Todavia, essa unidade hidrogeológica só é encontrada em condições de subsuperfície na área em estudo.

A Formação Irati (Permiano) no Rio Grande do Sul é composta em sua base por siltitos, argilitos e folhelhos



DATUM SIRGAS 2000

Figura 1 Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos, altimetria e poços tubulares estudados. Mapa elaborado com os dados de altitude disponibilizado pelo Shuttle Radar Topography Mission do United States Geologic Survey (USGS, 2019).

pirobetuminosos e margas que progridem para o norte da Bacia do Paraná para uma maior presença de ritmitos, carbonatos e evaporitos (Milani *et al.*, 2006). Sua deposição ocorreu em um ambiente marinho calmo, com a presença de lagoas (Schneider *et al.*, 1974). Enquanto o ambiente de deposição da Formação Rio do Rasto (Neo-Permiano) é mais complexo, sendo sedimentos depositados principalmente em lagos rasos influenciados por ondas de tempestades ou incursões fluviais que progridem para ambientes com sistemas fluviais meandrandes, lacustrinos, deltaicos e eólicos (Holz *et al.*, 2010; Warren *et al.*, 2008). Essa unidade é constituída por uma deposição inicial de sedimentos finos que gradou para arenitos finos a médios. Quando a Formação Irati, geralmente não aflorante, e Rio do Rasto estão associadas elas formam a unidade hidrogeológica conhecida como Aquitardos Permianos com capacidades específicas inferiores a 0,1 m³/h/m, mas valores maiores podem ser obtidos quando os lutitos estão intensamente fraturados (CPRM, 2005; Plano Sinos, 2011).

O Sistema Aquífero Guarani na Bacia do Rio dos Sinos envolve as unidades geológicas da Formação Piramboia e Botucatu (Machado, 2005). A Formação Piramboia (Triássico) é constituída em geral por arenitos finos a médios depositados em ambiente flúvio-eólico (Côrtes & Perinotto, 2015), onde eventos de infiltração de argilominerais e processos diagenéticos reduziram a porosidade primária (Caetano-Chang & Tai, 2003). A Formação Botucatu (Jurássico), de ambiente desértico, compreende arenitos bem selecionados de granulometria média, alta porosidade e estratificação cruzada de grande porte (Scherer *et al.*, 2007). Na área em estudo, predominam poços com capacidade específica menor que 0,5 m³/h/m, podendo ocorrer poços improdutivos quando em condições de topos estruturais com forte cimentação, onde o armazenamento de águas não é favorecido (CPRM, 2005).

A Formação Serra Geral (Juro-Cretáceo) é a única unidade vulcânica na Bacia do Rio dos Sinos, consistindo em espesso pacote de derrames basálticos e subordinadamente

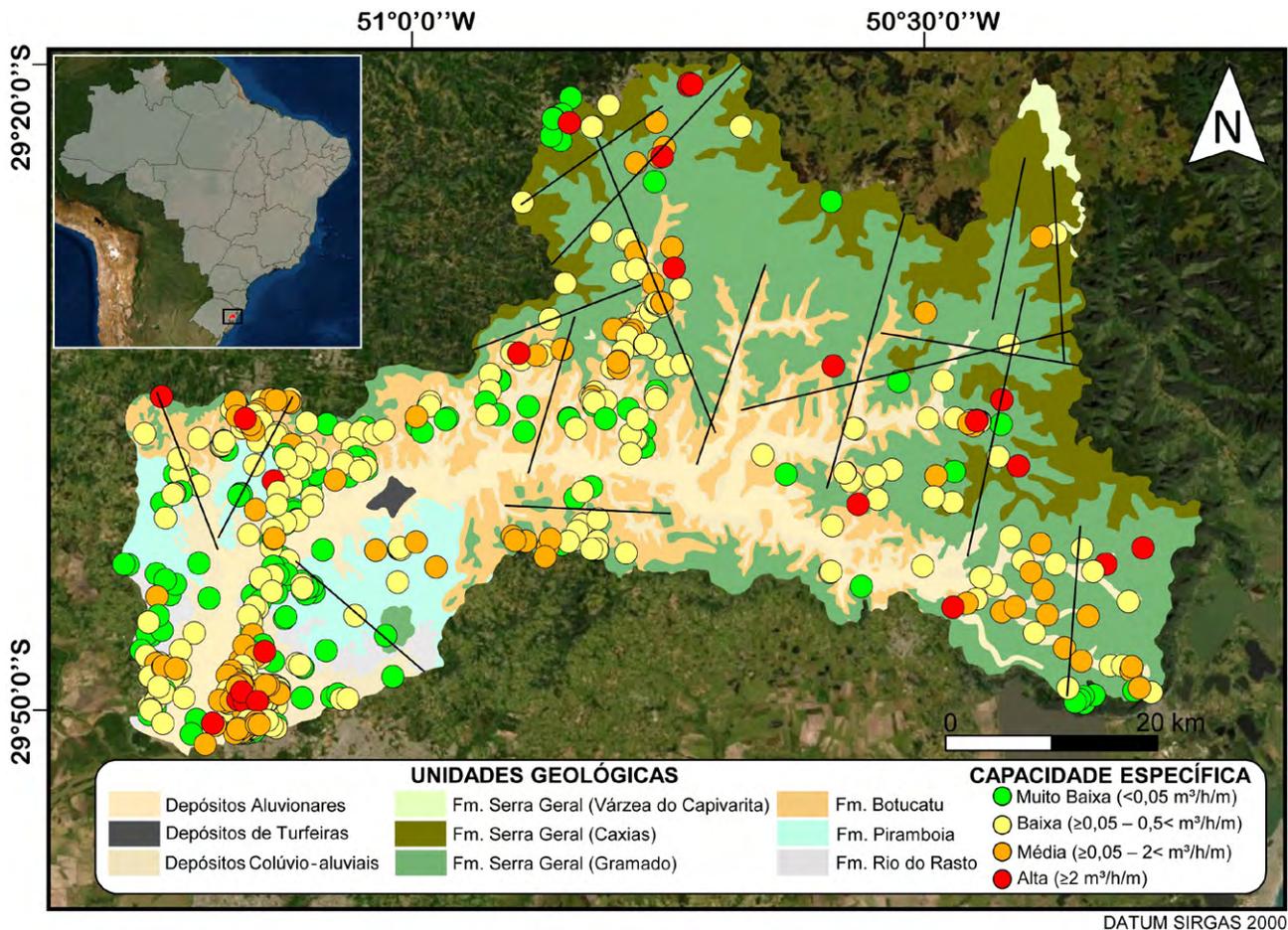


Figura 2 Mapa geológico da área de estudo com as classes de capacidade específica dos poços tubulares analisados e os lineamentos de maior porte (>15 km). Modificado de CPRM (2006).

riolitos e riocacitos, estes localizados na parte mais setentrional da Bacia do Rio dos Sinos e encimando os derrames básicos (Roisenberg & Viero, 2000). O Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) foi subdividido pela Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2005) em diferentes unidades baseadas no potencial de produtividade, compreendendo na área de estudo os Sistemas Aquíferos Serra Geral II e III.

O Sistema Aquífero Serra Geral II é composto por riolitos e riocacitos, com basaltos subordinados. As capacidades específicas são geralmente inferiores a 0,5 m³/h/m, embora possa alcançar vazões superiores a 2 m³/h/m quando em condições favoráveis de fraturamento. O Sistema Aquífero Serra Geral III tem basaltos como seu principal arcabouço, termos ácidos como riolitos e riocacitos são restritos localmente. Essa unidade hidrogeológica é caracterizada por relevos mais dissecados e com fraturas descontínuas, que resultam em baixas capacidades específicas. Aflorando em áreas isoladas limitadas às cotas mais baixas do pacote vulcânico ocorre

outra subdivisão hidrogeológica do SASG associado ao SAG, que compreende perfis de morros de basalto sobre arenito, apresentando baixas vazões ou poços secos, sendo esta unidade denominada como Sistema Aquífero Basalto-Botucatu, de pouca ocorrência na área em estudo (CPRM, 2005).

As unidades mais recentes consistem principalmente em sedimentos não consolidados, associados a depósitos aluvionares, eluviais e colúviais, planícies costeiras, além de turfeiras (CPRM, 2005, 2006). Sua principal unidade hidrogeológica consiste no Sistema Aquífero Quaternário Costeiro II, onde os poços tubulares perfurados apresentam capacidade específica que variam de 0,5 a 1,5 m³/h/m. Todavia, devido a péssima qualidade das suas águas subterrâneas e a pouca espessura, a maioria dos poços extraem águas somente das unidades consolidadas sotopostas (CPRM, 2005).

Zalán *et al.* (1987) definem três principais padrões de falhas para a Bacia do Paraná, com direções NW-SE,

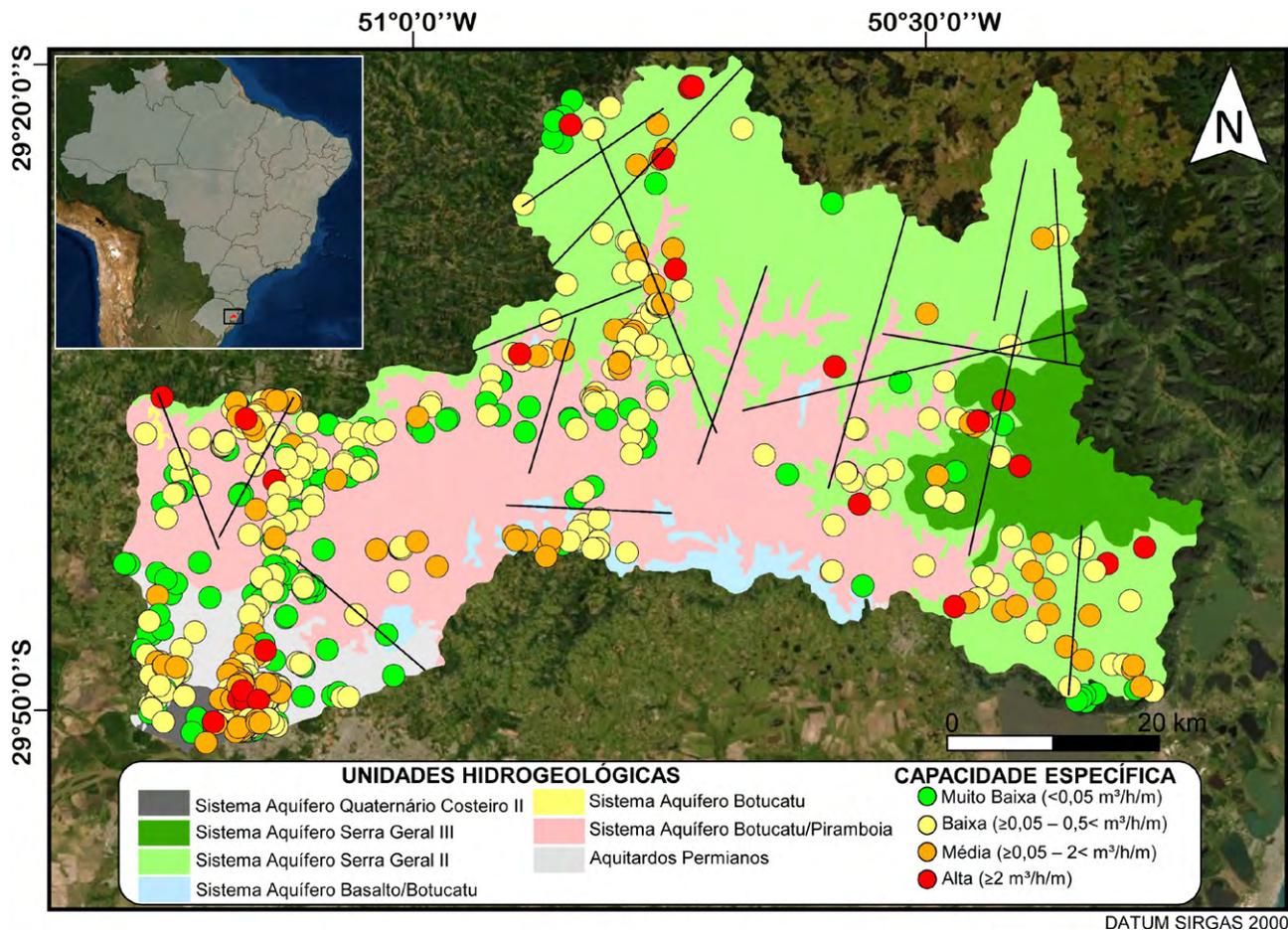


Figura 3 Mapa hidrogeológico da área de estudo com as classes de capacidade específica dos poços tubulares analisados e os lineamentos de maior porte (>15km). Modificado de CPRM (2005).

NE-SW e E-W, com as duas primeiras de maior importância. As falhas NW e NE são associadas geralmente a zonas de fraqueza preexistentes do embasamento cristalino que foram reativadas em inúmeros episódios posteriores de formação e deposição da bacia. As falhas NW geralmente são preenchidas por intrusões de diabásio, feição geológica semelhante não é observada para as de direção NE. Soares *et al.* (2007) associaram falhas de direção NW à segmentação da Formação Irati (Permiano) e desenvolvimento de blocos tectônicos.

Em relação às estruturas rúpteis interpretadas em imagens de satélite, Tomasi & Roisenberg (2019) para o SASG no noroeste do Rio Grande do Sul encontraram as maiores capacidades específicas para poços tubulares alocados em zonas com alta densidade de lineamentos e preferencialmente de grande porte. Freitas *et al.* (2012), para o mesmo aquífero e em região próxima, obtiveram resultado semelhante e acrescentaram uma associação positiva com as direções NE e NW. Cunha (2014) encontrou

para o SASG na Região do Alto Uruguai, Rio Grande do Sul, correlação positiva da produtividade hidráulica com a densidade de lineamentos de direções NE-E e NW-W, todavia, principalmente de pequeno porte.

3 Materiais e Métodos

Foram compilados todos os poços tubulares disponíveis no banco de dados do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas do Serviço Geológico do Brasil (SIAGAS, 2019) dentro do polígono da Bacia do Rio dos Sinos, obtendo-se um conjunto de 932 poços. Na etapa seguinte foram excluídos os poços que não possuíam perfil geológico e parâmetros como entrada d'água, nível estático, nível dinâmico, capacidade específica e vazão após estabilização e perfil geológico, restando 624 poços com cadastro georreferenciado. Na etapa seguinte o conjunto de dados foi submetido à análise estatística descritiva no *software SPSS Statistics 21* com o objetivo de determinar a

média, valor mínimo, máximo e desvio padrão, separando-se os poços pelo tipo de aquífero e geologia.

Os lineamentos foram identificados em Modelo Digital de Terreno (MDT), disponibilizado pelo *Shuttle Radar Topography Mission* do *United States Geologic Survey* (USGS, 2019), que posteriormente foi convertido para uma imagem do tipo *Raster* para ser tratada no software *ArcGIS*. Para a detecção dos lineamentos foram gerados mapas de relevo sombreado com a ferramenta *Hillshade* com iluminação posicionada nos azimutes 00°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270° e 315° e interpretados por dois observadores. Os lineamentos tiveram seus azimutes determinados e separados pelas principais direções com a extensão *ArcSDM* (Sawatzky *et al.*, 2009), seguida da elaboração de diagramas de roseta com o *Polar Plots* (Jenness, 2014), tanto pela frequência absoluta, que consiste no número total de lineamentos, como impondo pesos aos lineamentos, proporcionais ao seu tamanho. Por fim, mapas temáticos de densidade de lineamentos foram criados pela ferramenta *Line Density* inclusa no *ArcGIS*, tanto a partir da densidade obtida por todos os lineamentos, como a obtida pela filtragem das direções e comprimentos dos lineamentos. Esta última propriedade foi classificada em lineamentos de pequeno porte (< 2,5 km), médio (2,5 km a 5,0 km) e grande porte (> 5,0 km). A densidade de lineamentos, para facilitar a interpretação, foi separada em baixa, média e alta a partir da obtenção de três diferentes classes estatísticas pelo método das quebras naturais (Jenks), que procura minimizar a soma da variância dentro das classes e ampliar entre elas (Sallun *et al.*, 2007). Por fim, os valores de densidade foram extraídos para os diferentes poços tubulares com a ferramenta *Extract Value to Point* do *ArcGIS*, e classificados pelas classes estatísticas definidas na etapa anterior.

4 Resultados e Discussões

4.1 Análise das Estruturas Rúpteis

A interpretação das imagens de relevo sombreado por meio da delimitação de lineamentos morfotectônicos permitiu identificar a distribuição de fraturas ao longo da Bacia do Rio dos Sinos. Foi observado intenso fraturamento em toda a área de estudo, exceto em uma estreita região no eixo médio onde percorre o rio principal e próximo da foz, onde possivelmente sedimentos recentes recobrem a área e dificultam a visualização de estruturas.

No total foram obtidos 815 lineamentos, que foram filtrados segundo seus azimutes principais, N-NE (0° - 45° e 180° - 225°), NE-E (45° - 90° e 225° - 270°), NW-W (90° - 135° e 270° - 315°) e N-NW (135° - 180° e 315° - 360°) e pelos comprimentos. Estatisticamente não foi encontrado predomínio em frequência de nenhuma direção principal (Figura 4A), não obstante, as fraturas não se distribuem de forma homogênea. O trecho de maior altitude apresenta em geral lineamentos de maior porte e direção preferencial N-NE e NE-E, enquanto o trecho de menor altitude está relacionado a lineamentos de menor tamanho e direções NW-W e N-NW. Quando analisado o comprimento médio, observa-se que as direções NE-E e N-NE tendem a uma maior extensão (Figura 4B).

A região de São Francisco de Paula foi a mais densamente fraturada, encontrada integralmente sobre o SASG, enquanto, como indicado anteriormente, regiões em torno da foz do Rio dos Sinos, próximo a cidades populosas como Sapucaia do Sul, são encontradas as menores frequências de lineamentos e elevada presença de estruturas de pequeno porte. Já os maiores lineamentos, com comprimentos superiores a 20 km, estão concentrados principalmente nas regiões entre os municípios de Riozinho, Rolante e Três Coroas, onde ocorre o contato em planta da Formação Serra Geral com a Formação Botucatu.

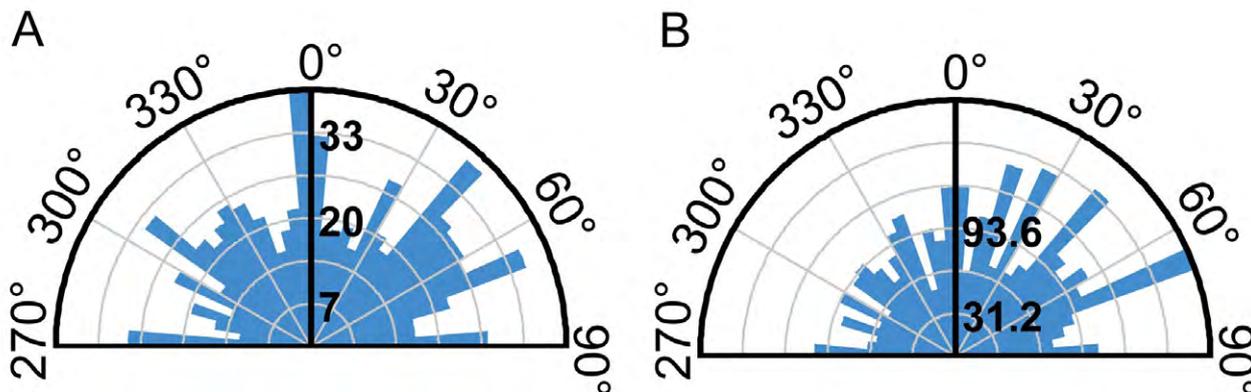


Figura 4 Representação em diagrama de roseta da frequência (815 x 2 lineamentos) das direções de lineamentos; A. Frequência absoluta por quantidade de lineamentos; B. Frequência de lineamentos ponderada pelo comprimento médio das estruturas.

Entretanto, todas as direções e tamanhos foram visualizados independentemente da altitude ou contexto geológico, evidenciando o caráter frágil da Bacia do Rio dos Sinos.

4.2 Estatística da Produtividade de Poços da Bacia do Rio dos Sinos

A Tabela 1 mostra a estatística descritiva dos principais aspectos de produtividade para os 624 poços estudados, que consistem no nível estático, nível dinâmico, vazão estabilizada e capacidade específica. Os níveis estáticos se distribuem principalmente entre o intervalo de 0 e 40 m, com uma média de 22,66 m, ocorrendo poços com profundidade de nível estático superior a 80 m, o que é incomum na área de estudo. Os níveis dinâmicos têm média de 78,14 m, sendo os níveis mais profundos associados às regiões mais densamente povoadas, como São Leopoldo. A vazão estabilizada média resultou em 8,12 m³/h, com os maiores valores registrados em poços perfurados no SASG. A capacidade específica, principal padrão hidráulico de interesse para o estudo da vazão e sua relação com o fraturamento, possui valores muito baixos, com uma média de 0,39 m³/h/m. Não foi observada relação espacial entre as vazões dos poços, sendo encontrados valores mais elevados associados lateralmente com poços

de baixíssimas vazões. Por consequência, torna-se evidente que existe uma heterogeneidade complexa nos parâmetros que afetam a produtividade, como a influência das fraturas e a qualidade técnica da perfuração.

Quando analisados os perfis geológicos dos poços, existe um predomínio de águas extraídas unicamente no SAG e/ou outros aquíferos porosos, correspondendo a 473 poços, cerca de 75,7% do total. Outros 87 poços (13,9%), são poços locados no SASG e abastecidos unicamente com águas do aquífero fissural. Por fim, 65 poços (10,4%) têm perfis geológicos tanto no SASG quanto no SAG. Todos os três tipos de perfis apresentam capacidade específica média inferior a 0,72 m³/h/m.

Estatisticamente, para valores de capacidade específica superiores ou iguais a 2 m³/h/m foram identificados apenas 29 poços cadastrados, não sendo encontrada uma diferença expressiva no número poços que extraem águas em perfis de poços alocados em aquíferos porosos como o SAG (37,9%), fissurais como SASG (31%) ou em perfis compostos por ambos (31%). Todavia, sem analisar a proporcionalidade da quantidade total de poços perfurados nos diferentes aquíferos. Os três poços com as mais altas capacidades específicas, maiores que 4 m³/h/m, são encontrados próximos de Canela, Nova Hartz e Carará, distantes geograficamente.

| | n | Média | Mediana | σ | Mín | Max |
|---|-----|-------|---------|----------|--------|------|
| Capacidade Específica (m ³ /h/m) | 624 | 0,39 | 0,13 | 0,77 | 0,002 | 9,55 |
| Vazão Estabilizada (m ³ /h) | 624 | 8,12 | 4,9 | 9,38 | 0,0141 | 60 |
| Nível Estático (m) | 624 | 22,66 | 16,8 | 26,5 | 0 | 190 |
| Nível Dinâmico (m) | 624 | 78,14 | 66,82 | 52,39 | 3,82 | 300 |

Tabela 1 Estatística descritiva dos poços da Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos

4.3 Integração das Estruturas Rúpteis com a Produtividade de Poços

Os dados de lineamentos e de capacidades específicas foram integrados com a finalidade de identificar a contribuição das estruturas rúpteis em uma bacia hidrográfica altamente fraturada, obtendo-se a densidade dessas estruturas lineares, filtradas tanto em direção como tamanho (Figuras 5 e 6). Para facilitar a interpretação dos dados, as capacidades específicas foram subdivididas em diferentes classes: muito baixa (< 0,05 m³/h/m), baixa ($\geq 0,05$ e $\geq 0,5$ m³/h/m), média ($\geq 0,5$ e < 2 m³/h/m) e alta (≥ 2 m³/h/m).

Em relação à densidade total de lineamentos (Figura 5A), considerando todas as direções e tamanhos, foi observado que aproximadamente 90,2% dos poços estão

alocados em zonas de média e alta densidade. Quando discriminados pela capacidade específica, aparentemente a densidade total de lineamentos não afeta a capacidade específica (Tabela 2).

Quando considerado o porte dos lineamentos (Tabela 3), ocorre uma leve tendência de poços de menores vazões estarem associados a maiores densidades de lineamentos de pequeno porte (Figura 5B), enquanto a ausência de lineamentos de menor porte atua em sentido positivo com a vazão, demonstrando uma relação inversamente proporcional. Para lineamentos de médio porte (Figura 5C), observou-se expressiva proporção de poços de altas vazões associados às zonas de densidade média, entretanto a relação da densidade de lineamentos de médio porte não é bem definida com os poços de vazão muito baixa, baixa e média, indicando forte heterogeneidade e falta

Relação entre as Estruturas Rúpteis e a Produtividade de Poços Tubulares na Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos, RS
 Matheus Beretta Duarte; Ari Roisenberg & Matheus Rossi Santos

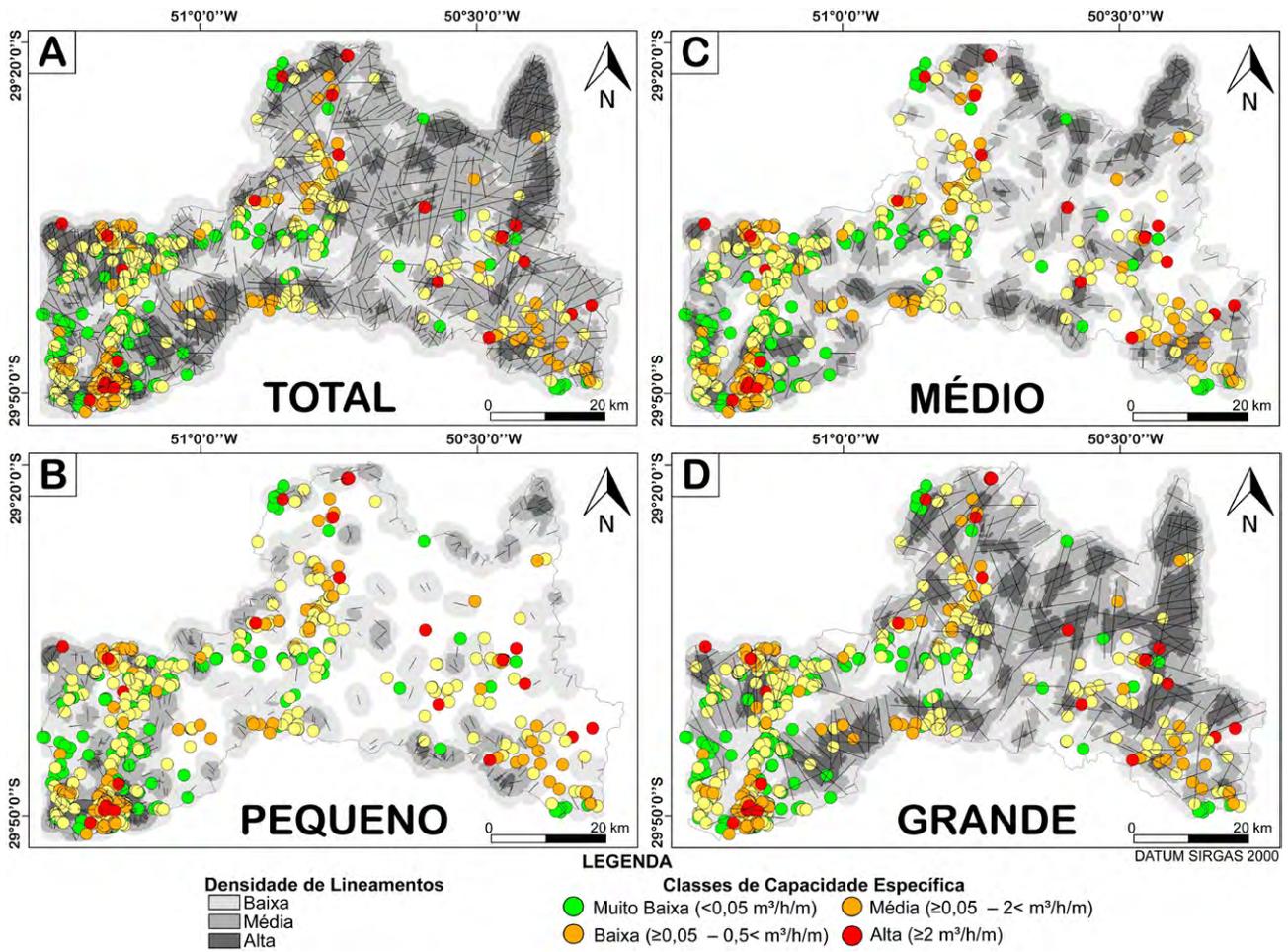


Figura 5 A. Distribuição da densidade de lineamentos pela totalidade e pelos portes de comprimento; B. Pequeno; C. Médio; D. Grande, e sua relação com as diferentes classes de capacidade específica.

| | | DENSIDADE TOTAL | | |
|----------------|---|-----------------|-------|-------|
| | | Baixa | Media | Alta |
| Todos os poços | n | 61 | 253 | 310 |
| | % | 9,78 | 40,54 | 49,68 |
| Muito baixa | n | 24 | 64 | 86 |
| | % | 13,79 | 36,78 | 49,43 |
| Baixa | n | 29 | 131 | 159 |
| | % | 9,09 | 41,07 | 49,84 |
| Media | n | 7 | 45 | 50 |
| | % | 6,86 | 44,12 | 49,02 |
| Alta | n | 1 | 13 | 15 |
| | % | 3,45 | 44,83 | 51,72 |

Tabela 2 Integração entre a densidade total de lineamentos e as classes de capacidade específica.

Relação entre as Estruturas Rúpteis e a Produtividade de Poços Tubulares na Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos, RS
 Matheus Beretta Duarte; Ari Roisenberg & Matheus Rossi Santos

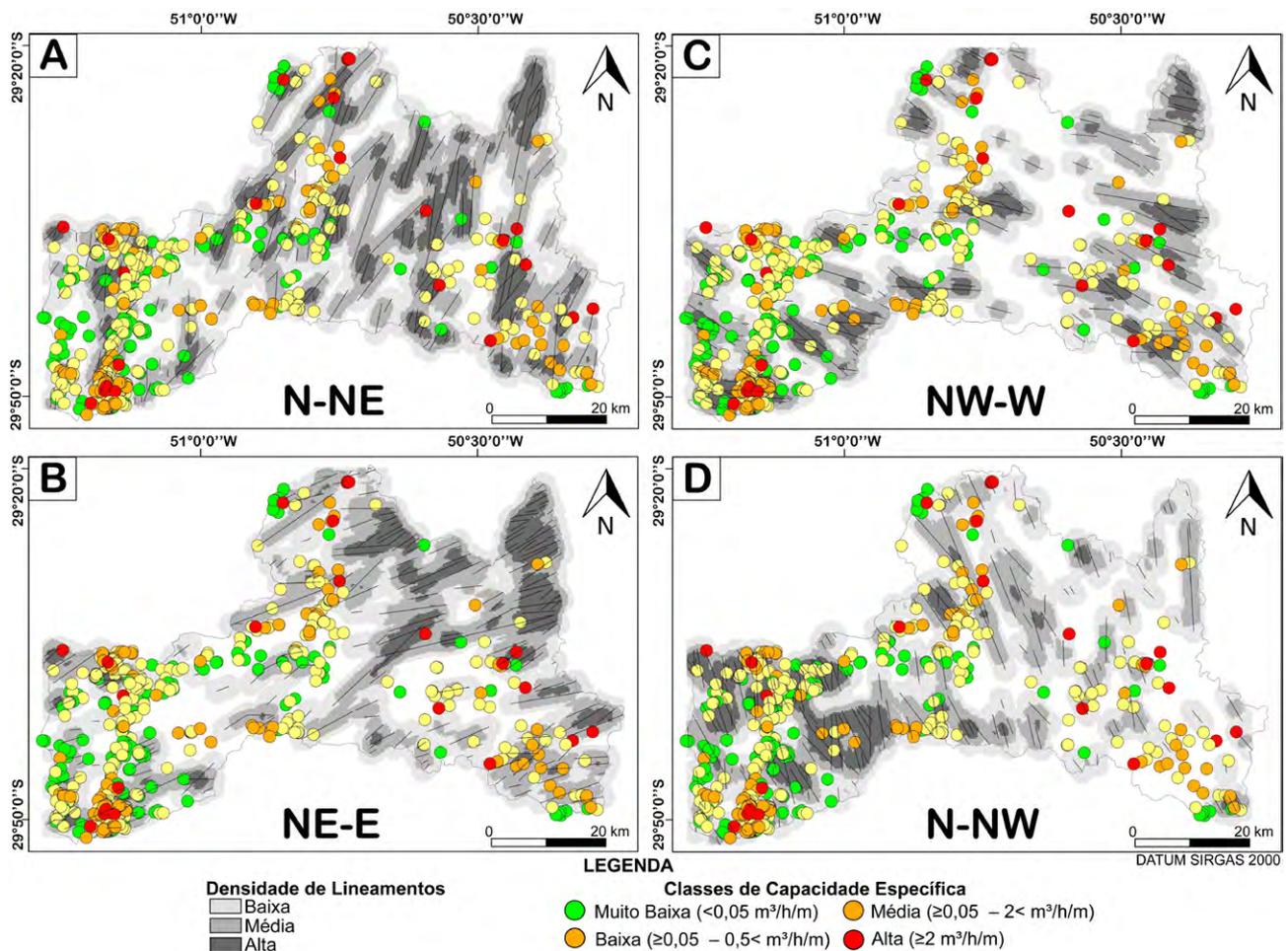


Figura 6 Distribuição da densidade de lineamentos pelas principais direções geográficas e sua relação com as diferentes classes de capacidade específica; A. N-NE; B. NE-E; C. NW-W; D. N-NW.

de linearidade. Por fim, os lineamentos de grande porte aparentam atuar positivamente na capacidade específica (Figura 5D), onde 41,37% dos poços de alta vazão foram perfurados em zonas de alta densidade, enquanto é maior a frequência de poços de baixa vazão em zonas com menor densidade de grandes estruturas.

Quando combinados dados de capacidade específica com as principais direções de lineamentos (Tabela 4), os resultados obtidos entre diferentes vazões e densidades são menos variáveis, comparados com os resultados obtidos com a integração da densidade total e de diferentes portes. Os poços de alta vazão estão perfurados principalmente

em áreas com média densidade nas direções N-NE e NE-E (Figuras 6A e B), acompanhada de uma significativa redução em zonas de baixa densidade quando comparados aos poços de menores vazões.

A direção NW-W não aparenta ter interferência na capacidade específica (Figura 6C), onde não existe uma relação entre o aumento da vazão com o aumento ou redução da presença desta direção. Na direção N-NW observa-se que existe evidente tendência à redução da vazão com o aumento na densidade dos lineamentos (Figura 6D), indicando que pode ser uma variável inversamente proporcional à produtividade.

Relação entre as Estruturas Rúpteis e a Produtividade de Poços Tubulares na Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos, RS
Matheus Beretta Duarte; Ari Roisenberg & Matheus Rossi Santos

| | | PORTE E DENSIDADE DOS LINEAMENTOS | | | | | | | | |
|-------------|-------|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|
| | | Pequeno | | | Médio | | | Grande | | |
| Vazão | Poços | Baixa | Media | Alta | Baixa | Media | Alta | Baixa | Media | Alta |
| Muito baixa | n | 68 | 57 | 49 | 38 | 85 | 51 | 72 | 72 | 30 |
| | % | 39,08 | 32,76 | 28,16 | 21,84 | 48,85 | 29,31 | 41,38 | 41,38 | 17,24 |
| Baixa | n | 135 | 107 | 77 | 72 | 64 | 183 | 89 | 173 | 57 |
| | % | 42,99 | 34,08 | 24,52 | 22,93 | 20,38 | 58,28 | 28,34 | 55,10 | 18,15 |
| Media | n | 45 | 29 | 28 | 26 | 43 | 33 | 26 | 58 | 18 |
| | % | 44,12 | 28,43 | 27,45 | 25,49 | 42,16 | 32,35 | 25,49 | 56,86 | 17,65 |
| Alta | n | 14 | 12 | 3 | 3 | 22 | 4 | 9 | 8 | 12 |
| | % | 48,28 | 41,38 | 10,34 | 10,34 | 75,86 | 13,79 | 31,03 | 27,59 | 41,38 |

Tabela 3 Integração entre as densidades de lineamentos por portes de comprimentos e as classes de capacidade específica.

| | | DIREÇÕES E DENSIDADE DE LINEAMENTOS | | | | | | | | | | | |
|-------------|-------|-------------------------------------|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|------|
| | | N-NE | | | NE-E | | | NW-W | | | N-NW | | |
| Vazão | Poços | Baixa | Media | Alta | Baixa | Media | Alta | Baixa | Media | Alta | Baixa | Media | Alta |
| Muito baixa | n | 75 | 68 | 31 | 79 | 84 | 11 | 70 | 55 | 49 | 78 | 54 | 42 |
| | % | 43,1 | 39,1 | 17,8 | 45,4 | 48,3 | 6,3 | 40,2 | 31,6 | 28,2 | 44,8 | 31,0 | 24,1 |
| Baixa | n | 116 | 142 | 61 | 121 | 173 | 25 | 132 | 83 | 104 | 148 | 101 | 70 |
| | % | 36,4 | 44,5 | 19,1 | 37,9 | 54,2 | 7,8 | 41,4 | 26,0 | 32,6 | 46,4 | 31,7 | 21,9 |
| Media | n | 36 | 42 | 24 | 35 | 58 | 9 | 39 | 29 | 34 | 53 | 28 | 21 |
| | % | 35,3 | 41,2 | 23,5 | 34,3 | 56,9 | 8,8 | 38,2 | 28,4 | 33,3 | 52,0 | 27,5 | 20,6 |
| Alta | n | 8 | 15 | 6 | 7 | 17 | 5 | 13 | 9 | 7 | 15 | 12 | 2 |
| | % | 27,6 | 51,7 | 20,7 | 24,1 | 58,6 | 17,2 | 44,8 | 31,0 | 24,1 | 51,7 | 41,4 | 6,9 |

Tabela 4 Integração entre as densidades de lineamentos filtrados pelas principais direções geográficas e as classes de capacidade específica.

5 Conclusões

A Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos apresenta um alto fraturamento, presente em quase toda sua área de cobertura. A frequência dos lineamentos pelas suas direções é ligeiramente uniforme, com uma certa ausência de predomínio de alguma direção. Especialmente, a região leste da área em estudo é caracterizada pelos maiores comprimentos das fraturas. Ainda assim, é possível encontrar lineamentos extensos na região oeste. A capacidade específica média dos poços é baixa, tanto para os poços tubulares localizados no SASG, quanto no SAG e em outros aquíferos sedimentares. A maior parte dos poços estão alocados em zonas de média e alta densidade

total de lineamentos, indicando que não é uma variável que condiciona a produtividade.

Verificou-se que as mais altas vazões estão associadas a uma maior presença de lineamentos de grande porte, indicando que essas estruturas contribuem positivamente com a hidráulica. As direções de lineamentos N-NE e NE-E estão relacionadas com a capacidade específica, onde quanto menor a influência de zonas de baixa densidade dessa estrutura, maior a vazão. Lineamentos de pequeno porte e de direção N-NW tendem a estar mais presentes em poços com baixa vazão ou quase improdutivos, sendo interpretada como uma variável inversamente proporcional à produtividade.

6 Referências

- Caetano-Chang, M.R. & Tai, W.F. 2003. Diagenese de Arenitos da Formação Piramboia no Centro-Leste Paulista. *Revista Geociências - UNESP*, 22(esp.): 33-40.
- COMITESINOS. 2019. Comitê de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos. Caracterização da Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos. Disponível em: < <http://www.comitesinos.com.br/bacia-hidrografica-do-rio-dos-sinos>>. Acesso em: 05. dez. 2019.
- Côrtes, A.R.P. & Perinotto, J.A.J. 2015. Facies and facies association of Piramboia Formation in the region of Descalvado (SP). *Geologia – USP*, 15(3-4): 23-40.
- CPRM. 2005. Serviço Geológico do Brasil. Projeto Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul. Disponível em < <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/5249?show=full>>. Acesso em: 05. mar. 2019.
- CPRM. 2006. Serviço Geológico do Brasil. Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul - Projeto Geologia do Brasil ao Milionésimo – Programa Geologia do Brasil, escala: 1:750.000. Disponível em: < http://www.cprm.gov.br/publique/media/geologia_basica/cartografia_regional/mapa_rio_grande_sul.pdf>. Acesso em: 05. mar. 2019.
- Cunha, G.G. 2016. *Relação espacial da tectônica rúptil com a hidrogeoquímica e o potencial hidrogeológico do Sistema Aquífero Serra Geral na região do Alto Rio Uruguai, noroeste do Rio Grande do Sul*. Programa de pós-graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Dissertação de Mestrado, 105p.
- Freitas, M.A.; Binotto, R.B.; Nanni, A.S.; Rodrigues, A.L.M. & Bortoli, C.R. 2012. Avaliação do Potencial Hidrogeológico, Vulnerabilidade Intrínseca e Hidroquímica do Sistema Aquífero Serra Geral no Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. *Recursos Hídricos*, 17(2): 31-41.
- Holz, M. 2003. Sequence stratigraphy of a lagoonal estuarine system - an example from the lower Permian Rio Bonito Formation, Paraná Basin, Brazil. *Sedimentary Geology*, 162(3-4): 305-331.
- Holz, M.; França, A.B.; Souza, P.A.; Iannuzzi, R. & Rohn, R. 2010. A stratigraphic chart of the Late Carboniferous/Permian succession of the eastern border of the Paraná Basin, Brazil, South America. *Journal of South American Earth Sciences*, 29(2): 381-399.
- IBGE. 2012. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Indicadores de Desenvolvimento Sustentável. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv59908.pdf>>. Acesso em: 05. dez. 2019.
- Jenness, J. 2014. Polar plots for ArcGIS. Jenness Enterprises. Disponível em: <http://www.jennessent.com/arcgis/polar_plots.htm>. Acesso em: 05. mar. 2019.
- Lee, S.; Kyo-Young, S. & Youngsung, K. 2012. Regional groundwater productivity potential mapping using a geographic information system (GIS) based artificial neural network model. *Hydrogeology Journal*, 20(1): 1511-1527.
- Maahs, R.; Küchle, J.; Scherer, C.M.S. & Alvarenga, R.S. 2019. Sequence stratigraphy of fluvial to shallow-marine deposits: The case of the early Permian Rio Bonito Formation, Paraná Basin, southernmost Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, 49(4): 1-21.
- Machado, J.L.F. 2005. *Compartimentação espacial e arcabouço hidroestratigráfico do Sistema Aquífero Guarani no Rio Grande do Sul*. Programa de pós-graduação em Geologia, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Tese de doutorado, 237 p.
- Milani, E.J.; França, A.B. & Medeiros, R.A. 2006. Rochas geradoras e rochas reservatório da Bacia do Paraná, faixa oriental de afloramentos, Estado do Paraná. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 15(1): 135-162.
- Milani, E.J.; Melo, J.H.G.; Souza, P.A.; Fernandes, L.A. & França, A.B. 2007. Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 15(2): 265-287.
- O’Leary, D.W.; Friedman, J.D. & Pohn, H.A. 1976. Lineament, linear, lineation; some proposed new standards for old terms. *Geological Society of America Bulletin*, 87(1): 1463-1469.
- Plano Sinos. 2011. Plano de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos. Meta 3, Atividade 3.3- Síntese da Situação Atual dos Recursos Hídricos. Disponível em: <www.prosinos.rs.gov.br/downloads>. Acesso: 01. mar. 2019.
- Roisenberg, A. & Viero, A.P. 2000. O vulcanismo Mesozóico da Bacia do Paraná no Rio Grande do Sul. In: HOLZ, M.; DE ROS, L.F. (ed.). *Geologia do Rio Grande do Sul*. Editora CIGO/UFRGS, p. 355-374.
- Sallun, A.E.M.; Suguio, K. & Sallun-Filho, W. 2007. Geoprocessamento para cartografia do alogrupo Alto Rio Paraná (SP, PR e MS). *Revista Brasileira de Cartografia*, 59(3): 289-299.
- Sawatzky, D.L.; Raines, G.L.; Bonham-Carter, G.F. & Looney, C.G. 2009. Spatial Data Modeller (SDM): ArcMAP 9.2 geoprocessing tools for spatial data modelling using weights of evidence, logistic regression, fuzzy logic and neural networks. Disponível em: <<http://www.ige.unicamp.br/sdm/ArcSDM10/>>. Acesso em: 15. mar. 2019.
- Scherer, C.M.S.; Tomazelli, L.J. & Goldberg, K. 2007. Construção, acumulação e preservação do Paleoeerg Botucatu. In: IANUZZI, R., FRANTZ, J. C. (ed.). *50 Anos de Geologia: Instituto de Geociências*. Editora Comunicação e Identidade, p. 283-298.
- Schneider, R.L.; Mühlmann, H.; Tommasi, I.E.; Medeiros, R.S.; Daemon, R.F. & Nogueira, A.A. 1974. Revisão Estratigráfica da Bacia do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28, Porto Alegre, 1974. Anais... Porto Alegre, SBG, v.1, p. 41-66.
- SIAGAS. 2019. Sistema de Informações de Águas Subterrâneas. Serviço Geológico do Brasil – Banco de dados de poços cadastrados. Disponível em: <<http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/>>. Acesso em: 01. mar. 2019.

Relação entre as Estruturas Rúpteis e a Produtividade de Poços Tubulares na Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos, RS

Matheus Beretta Duarte; Ari Roisenberg & Matheus Rossi Santos

- Soares, A.P.; Soares, P.C.; Bettú, D.F. & Holz, M. 2007. Compartimentação estrutural da Bacia do Paraná: A questão dos lineamentos e sua influência na distribuição do Sistema Aquífero Guarani. *Revista Geociências - UNESP*, 26(4): 297-311.
- Tomasi, L.C. & Roisenberg, A. 2019. Contexto Hidrogeológico e sua relação com a Tectônica do Sistema Aquífero Serra Geral na Bacia Hidrográfica do Rio Ijuí, RS. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ*, 42(2): 40-49.
- USGS.2019. United States Geological Survey. Shuttle Radar Topography Mission. Disponível em: <<https://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 05. mar. 2019.
- Warren, L.V.; Almeida, R.P.; Hachiro, J.; Machado, R.; Roldan, L.F.; Steiner, S.S. & Chamani, M.A.C. 2008. Evolução sedimentar da Formação Rio do Rasto (Permo-Triássico da Bacia do Paraná) na porção centro sul do estado de Santa Catarina, Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, 38(2): 213-277.
- Zalán, P.V.; Wolff, S.; Conceição, J.C.J.; Astolfi, M.A.M.; Vieira, I.S.; Appi, V.T. & Zanotto, O.A. 1987. Tectônica e sedimentação da Bacia do Paraná. In: SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 3, Curitiba, 1987. Atas do III Simpósio Sul-brasileiro de Geologia, Curitiba, SBG, v. 1, p. 441-477.