

Artigos

Avaliação da capacidade exploratória de aquíferos fraturados: um estudo de caso para os sistemas aquíferos da porção sul do Rio Grande do Sul, Brasil

Exploratory analysis of fractured aquifers: a case study for aquifer systems in southern Rio Grande do Sul, Brazil

Mauren Gaspar¹; Christie Helouise Engelmann de Oliveira¹; Francisco Manoel Wohnrath Tognoli²¹ Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, RS, Brasil² Universidade Estadual Paulista (UNESP), Centro de Ciências Naturais Aplicadas (Unespetro), Rio Claro, SP, Brasil.✉ maurengaspar96@gmail.com, chelouise@unisinors.br, francisco.tognoli@unesp.br**Palavras-chave:**Aquíferos;
Hidrogeologia;
Python;
GeoPandas;
Aerogeofísica.**Resumo**

Para realizar estudos hidrogeológicos é necessário caracterizar sistemas aquíferos por meio através de dados qualitativos e quantitativos como análises litológicas e análises hidroquímicas, capacidades específicas dos poços, vazão, salinidade, e pH. O presente estudo apresenta uma avaliação hidrogeológica da porção sul do Escudo Sul Rio-Grandense (ESRG) englobando 39 municípios do estado do Rio Grande do Sul, Brasil. Foram utilizados dados de lineamentos extraídos de imagens SRTM, dados aeromagnetométricos, dados hidrogeológicos de 885 poços tubulares e dados GIS foram integrados para caracterização hidrogeológica. Para avaliação estrutural, foram traçados lineamentos baseados na morfologia do terreno nas imagens SRTM, em diferentes escalas (1:400.000; 1:250.000). Além do mais, foram usados dados aeromagnetométricos para como a compartimentação estrutural. A avaliação estrutural foi utilizada para identificar a correlação morfoestrutural com a radiação magnética e a capacidade específica dos poços. Os resultados indicaram a ocorrência de três domínios geofísicos para cada tratamento de dado aeromagnetométrico (Amplitude do Sinal Analítico e Primeira Derivada Vertical). O domínio PDVD1, baseado no processamento de primeira derivada vertical, foi identificado como núcleos de falha por não coincidir com poços produtores, seguindo tendências NW-SE e, subordinadamente, SW-SE. O domínio PDVD2 apresenta menor persistência dos lineamentos com direção preferencial SW-NE e, subordinadamente, NW-SE, identificado como zona de dano por coincidir com áreas cristalinas com poços de maior capacidade específica. Esses resultados estruturais reforçam as tendências NE-SW e NW-SE do ESRG, seguindo trends dentro dos domínios geofísicos. Para a avaliação e classificação dos sistemas aquíferos dos poços foram utilizados dados de 1495 poços tubulares, analisado e processado a partir de scripts escritos em linguagem Python. Dos 885 poços filtrados, 211 poços fizeram intersecção com lineamentos na escala 1:400.000, e 588 poços intersectaram-se com lineamentos na escala 1:250.000. Assim, o estudo corrobora a eficiência para análises com escala 1:250.000 para estudos regionais, bem como a eficiência de linguagem de programação aplicada para estudos e avaliação hidrogeológica.

Abstract

Hydrogeological studies need characterization of the aquifer systems using qualitative and quantitative data such as lithological and hydrogeochemical analysis, specific capacities, flow rate, salinity and pH. This paper presents a hydrogeological assessment of the southern portion of the Sulriograndense Shield (ESRG), covering 39 municipalities in the Rio Grande do Sul state, southern Brazil. Thus, lineament data extracted from SRTM images, aeromagnetometric data, hydrogeological data from 885 tubular wells and GIS data were integrated for the hydrogeological characterization. The structural evaluation used lineament demarcated after terrain morphology analysis in the SRTM images at the scales of 1:400,000 and 1:250,000. Furthermore, we used structural subdivisions based on aeromagnetometric data. This integrated approach helped to identify the morphostructural correlation with the magnetic characteristics and the specific capacity of the wells. The results indicated the occurrence of three geophysical domains for each aeromagnetometric treatment (ASA and 1DV). The PDVD1 domain, based on vertical first derivative processing, was identified as a fault core because it does not coincide with producing wells, following NW-SE and, subordinately, SW-SE trends. The PDVD2 domain presents lineaments less persistent with preferential SW-NE orientation and, subordinately, NW-SE, identified as a damage zone for coinciding with crystalline areas bearing wells of higher specific capacity. These structural results reinforce the ESRG's NE-SW and NW-SE trends, following trends within geophysical domains. For the evaluation and classification of the wells, data from 1,495 tubular wells were processed using Python scripts written in the Jupyter notebook platform (format .ipynb). From the 885 filtered wells, 211 wells intersected with 1:400,000 scale lineaments, and 588 wells intersected with 1:250,000 scale lineaments. Therefore, this study corroborates the efficiency with a 1:250,000 scale for regional studies and demonstrates how a programming language is a powerful tool for hydrogeological studies and assessment.

KeywordsFractured Aquifers;
Hydrogeology;
Python;
GeoPandas;
Aerogeophysics.Revisão por pares.
Recebido em: 18/10/2022.
Aprovado em: 21/12/2022.DOI: <http://doi.org/10.14295/ras.v37i1.30188>

1. INTRODUÇÃO

A superfície terrestre é resultado de complexos processos tectônicos e erosivos que moldam paisagens e produzem informações dos diferentes estágios evolutivos (CARDOSO JR. et al., 2021). A evolução das tensões tectônicas dita características de estilo tectônico que interferem no comportamento hidrogeológico. As grandes estruturas são reflexo das tensões atuantes na parte externa da crosta que, por sua vez, determinam características regionais (FOSSEN; CAVALCANTE, 2017). Dentre os diversos estilos tectônicos, a tectônica de placas (PERLT; HEINERT, 2006) e a neotectônica são os que influenciam diretamente na hidrogeologia. A tectônica de placas ocorre em grande escala e envolve o movimento de interação de placas litosféricas, enquanto a neotectônica aborda movimentos crustais recentes e ativos, e os campos de esforços presentes (FOSSEN; CAVALCANTE, 2017).

A permeabilidade das rochas em aquíferos fraturados é diretamente ligada aos fatores controladores relacionados a descontinuidades e à matriz da rocha, que definem o fluxo da água (SINGHAL; GUPTA, 2010; NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING AND MEDICINE, 2020). Para estudos hidrogeológicos, estruturas como juntas, fraturas, zonas de cisalhamento, falhas e descontinuidades ditam a permeabilidade das rochas e são fundamentais para compreender o fluxo subterrâneo, pois estas facilitam a percolação e armazenamento dos fluidos (SINGHAL; GUPTA, 2010; BENSE et al. 2013; COOK et al. 2003; NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING AND MEDICINE, 2020). A formação de brechas favorece o fluxo subterrâneo, principalmente se ocorrer na parte superior e inferior da camada e/ou a rocha estiver em contato com depósitos piroclásticos. Em alguns casos, as estruturas deformacionais diminuem a porosidade e a permeabilidade, atuando como barreiras no fluxo da água (SINGHAL; GUPTA, 2010), como os cataclastos.

Em rochas sedimentares e siliciclásticas que não foram completamente litificadas, estruturas criadas em zona de falha e/ou cisalhamento como bandas de dilatação, bandas de segregação e *sand smear* aumentam a permeabilidade das rochas. Já a diminuição da permeabilidade se dá com a formação de bandas filossilicáticas, *clay smear*, bandas cataclásticas, bandas de dissolução e cimentação. Em profundidades inferiores a 100 metros, sedimentos não litificados podem formar brechas e aumentar a permeabilidade pelo processo de fraturamento dos grãos (cataclase) (BENSE et al., 2013).

O processo de expansão das paredes das fraturas é chamado de bandas de dilatação em rochas sedimentares e fraturas extensionais em rochas ígneas, sendo este o fator determinante para o aumento da permeabilidade e a conectividade entre as fraturas. Comumente, durante o processo de expansão ocorre a abertura das paredes das fraturas, propiciando o aumento da percolação e vazão d'água. Uma apropriada análise da densidade, orientação e comprimento das fraturas em uma região

possibilita a exploração de aquíferos fraturados. A análise de fraturas pode ser feita pela observação sistemática de lineamentos com sensoriamento remoto, utilizando imagens SRTM e medindo as variações na elevação, e com dados de aeromagnetometria, observando estruturas maiores e em subsuperfície, resultantes dos processos ligados à tectônica de placas (PEREIRA; BARBOSA; SCUDINO, 2014).

A avaliação hidrogeológica requer a quantificação e análise de uma grande quantidade e variedade de dados, o que muitas vezes impossibilita encontrar padrões ou tendências sem a automatização da construção de modelos analíticos. Algoritmos de *machine-learning* estão sendo muito usados para facilitar e automatizar processos dentro das geociências, principalmente para: petrofísica (MARTIN; MEYER; JOBE, 2021); geoprocessamento (NAGHIBI; HASHEMI; PRADHAN, 2021); depósitos minerais (MEREMBAYEV; YUNUSOV; YEDILKHAN, 2019); classificação litológica (SCHMITT et al., 2013) e proveniência de sedimentos (SCHARF et al., 2022). Recentemente também se avaliou os desafios da utilização de ferramentas de *machine-learning* para a modelagem hidrogeológica (VINCENT; ADOMBI, 2021). Existe um leque de linguagens de programação que podem ser aplicadas nas geociências, sendo a python atualmente a mais utilizada. Uma das vantagens de utilizar a linguagem python é a não necessidade de especificar o tipo de dado durante o processo de programação. Isso torna-se fundamental dentro da quantificação de dados nas geociências, quando desconhecemos os dados por completo e desejamos, além de automatizar processos, utilizar a linguagem como uma ferramenta para conhecer o banco de dados.

Atualmente, o estado do Rio Grande do Sul passa por uma crise hídrica devido aos períodos de estiagem persistentes e contaminação das águas (ANA, 2022) (IBGE, 2022). A necessidade de exploração e exploração de água potável torna-se essencial no estado, seja por meio de perfuração de poços tubulares em áreas rurais e urbanas, ou pela captação de água da chuva e nascentes (DESSART et al., 2020). Assim, rochas fraturadas que antes não eram consideradas bons aquíferos devido à baixa permeabilidade e dificuldade de locação de poços (SINGHAL; GUPTA, 2010) passam a ser estudadas de forma a viabilizar e otimizar futuras explorações (PIRES et al., 2021) (DESSART et al., 2020) (AYER; GAROFALO; PEREIRA, 2017) (SILVA; MENEZES, 2016) (MAPURUNGA SARAIVA; DIKSON ARAUJO DA SILVA; DIAS LISBOA, 2017).

Neste contexto, o presente estudo tem como principal objetivo avaliar a hidrogeologia da porção sul do Rio Grande do Sul, utilizando dados de poços existentes de acordo com suas capacidades específicas, litologias e lineamentos, com o uso de *machine-learning*. Como objetivo secundário, propõem-se identificar compartimentos estruturais e correlacionar os resultados com os lineamentos identificados para futuras locações de poços.

2. LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O Escudo Sul-RioGrandense (ESRG) é formado a partir de estágios pré, sin e pós-colisionais entre os crátons Rio de la Plata e Kalahary (FERNANDES *et al.*, 1995; HARTMANN *et al.*, 2000; SAALMANN; HARTMANN; REMUS, 2007; PHILIPP; PIMENTEL; CHEMALE, 2016; PHILIPP; PIMENTEL; BASEI, 2018). De acordo com Hartmann *et al.* (2007), dois ciclos orogênicos contribuíram para a formação do ESRG através de eventos ígneos, sedimentares e metamórficos: Transamazônico, no Paleoproterozóico, e Brasileiro (CHEMALE, 1995), do Neoproterozóico ao Cambriano. Estes ciclos compartimentaram o ESRG em grandes associações litoestruturais ditadas por falhas regionais com direções NE-SW, NW-SE e N-S.

As principais estruturas do ESRG são a Zona de Cisalhamento Dorsal do Canguçu (HARTMANN *et al.*, 2007; HARTMANN; LOPES; SAVIAN, 2016) e a Zona de Cisalhamento Passo do Marinheiro (HARTMANN *et al.*, 2007), que foram caracterizadas e delimitadas mais recentemente utilizando o método magnetotérmico para modelagem de resistividade elétrica bidimensional (MENEZES *et al.* 2021). O ESRG é compartimentado em 5 unidades tectono-estratigráficas: Terreno Taquarembó, Terreno São Gabriel, Terreno Tijuca, Batólito Pelotas e Terreno Jaguarão (CRUZ, 2019). A área de estudo está inserida no Terreno Tijuca, Batólito Pelotas e Terreno Jaguarão.

O Terreno Tijuca é constituído por rochas metavulcanossedimentares de baixo a médio grau e ortognaisses de médio a alto grau (CPRM, 2017). A principal unidade do Terreno Tijuca é conhecida como Complexo Encantadas, que possui idades de 2.2 Ga, com metamorfismo fácies anfíbolito de um possível evento orogênico colisional (CHEMALE, 2000; SAALMANN; REMUS; HARTMANN, 2006). A Zona de Cisalhamento Passo do Marinheiro, com direção N-S, é a estrutura tectônica mais relevante do Terreno Tijuca (HARTMANN *et al.*, 2007).

O Batólito Pelotas é formado por granitos sin e pós-colisionais com megaxenólitos de orto e paragnaisses de alto grau, anortosito e megaxenólitos de metamórficas de baixo a médio grau (CPRM, 2017). Esses granitos são resultado do processo de ascensão de magmatismo da série cálcico-alcalina alto K, e

subordinadamente, magmas shoshoníticos, alcalinos, peralcalinos e toleíticos (PHILLIPP *et al.*, 2007). A ascensão desses magmas é associada, principalmente, ao movimento da Zona de Cisalhamento Transcorrente Dorsal de Canguçu, que possui direção NE-SW e movimento sinistral (HARTMANN; LOPES; SAVIAN, 2016), e, subordinadamente, outras estruturas reativadas.

O Terreno Jaguarão é formado por unidades geológicas Proterozóicas/Eopaleozóicas. As unidades são uma trama de rochas constituída por granitos, metagranitoides, rochas metassedimentares de baixo e médio grau (máficas e ultramáficas), metassedimentos e ortognaisses de médio grau (CRUZ, 2019). Essa unidade é associada às zonas de Cisalhamento Ayrosa Galvão e Arroio Grande (CRUZ, 2019).

Os padrões de relevo do ESRG são controlados por grandes zonas de cisalhamento, caracterizados como superfícies irregulares e retrabalhadas (CARDOSO JR. *et al.*, 2021). A área de estudo engloba 39 municípios (Fig. 1b), compreendendo municípios da região litorânea e central do estado do Rio Grande do Sul., cobrindo aproximadamente 41.051 km². No geral, a área é formada por rochas antigas neoproterozóicas, correspondentes a um planalto, e coberta por planícies com depósitos quaternários nas bordas a leste e a norte.

A área de estudo possui uma variação de altitude de 0 a 582 metros em relação ao nível do mar (Fig. 1d). Na porção oeste da área estão as maiores altitudes, que diminuem conforme progredem a leste em direção à planície no litoral. A taxa de precipitação anual varia de 1400 a 1800 mm (Fig. 1c).

O modelo hidrogeológico da área de estudo é composto por 10 sistemas aquíferos. Dois sistemas aquíferos de rochas cristalinas fraturadas estão presentes: ec1, Sistema Aquífero Embasamento Cristalino I, e ec3, Sistema Aquífero Embasamento Cristalino III. Os aquíferos granulares são subdivididos em alta a média possibilidade para águas subterrâneas (qc1, bm, sd), média a baixa possibilidade para águas subterrâneas (sp, qc2, pr) e aquíferos limitados de baixa possibilidade para águas subterrâneas (ap). A Tabela 1 mostra as principais diferenças entre eles.

Figura 1 - Localização da área de estudo (a) Localização do estado do Rio Grande do Sul. (b) Mapa hidrogeológico do estado do Rio Grande do Sul em escala 1:100:000 (MACHADO; FREITAS, 2005). (c) Bacias hidrográficas e precipitação média anual no estado do Rio Grande do Sul (IBGE, 2022). (d) Mapa hipsométrico da área de estudo (Shuttle Radar Topography Mission). (e) Mapa hidrogeológico da área de estudo com a localização dos poços cadastrados no SIAGAS e suas respectivas capacidades específicas (MACHADO; FREITAS, 2005)

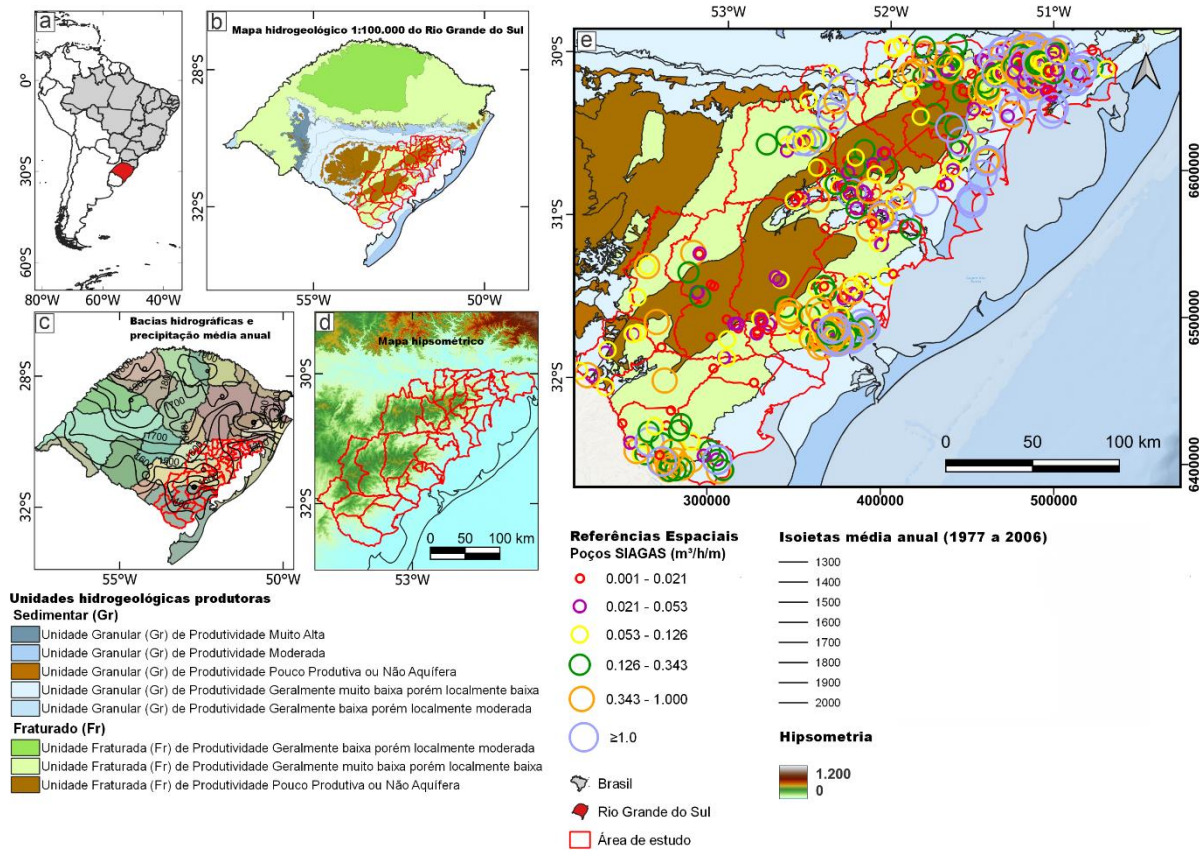


Tabela 1 - Sistemas aquíferos presentes na área de estudo e suas características

| Sistema aquífero | Nome | Tipo de aquífero | Características |
|--|---|------------------|--|
| <i>Aquíferos com alta a média possibilidade para águas subterrâneas</i> | | | |
| qc1 | Sistema Aquífero Quaternário Costeiro I | Granular | Camadas arenosas inconsolidadas fina a média, intercaladas com camadas siltico-arenosas e argilosas. Capacidades específicas ultrapassam 4 m ³ /h/m. Eventualmente cloretadas com maior teor salino |
| Bm | Sistema Aquífero Quaternário Barreira Marinha | Granular | Areias inconsolidadas, fina a média, com pouca matriz argilosa. Capacidades específicas ultrapassam 4 m ³ /h/m. Baixo teor salino. |
| Sd | Sistema Aquífero Sedimentitos Deltaicos | Granular | Arenitos médios a grossos, inconsolidados, intercalados com camadas argilosas. Capacidades específicas por volta de 3 m ³ /h/m. Baixa qualidade de água. |
| <i>Aquíferos com média a baixa possibilidade para águas subterrâneas</i> | | | |
| Sp | Sistema Aquífero Sanga do Cabral/Pirambóia | Granular | Camadas siltico-arenosas com matriz argilosa e arenitos finos a muito finos. Capacidades específicas entre 0,5 a 1,5 m ³ /h/m. Salinidade varia de 100 a 5000 mg/L. |
| ec1 | Sistema Aquífero Embasamento Cristalino I | Fraturado | Rochas graníticas e basálticas muito fraturadas. Capacidades específicas inferiores a 0,5 m ³ /h/m. Salinidades muito baixas. |
| qc2 | Sistema Aquífero Quaternário Costeiro II | Granular | Areias inconsolidadas finas e argila. Capacidades variam entre 0,5 a 1,5 m ³ /h/m. Sólidos totais dissolvidos variam de 600 a 2000 mg/L |
| Pr | Sistema Aquífero Palermo/Rio Bonito | Granular | Arenitos finos a médio, intercalados com siltitos argilosos e carbonosos. Capacidades específicas inferiores a 0,5 m ³ /h/m. |
| <i>Aquíferos com baixa possibilidade para água subterrânea</i> | | | |
| Ap | Aquitardos Permianos | Granular | Siltitos argilosos, argilitos, folhelhos e pequenas camadas de margas e arenitos. Capacidades específicas inferiores a 0,1 m ³ /h/m. |
| <i>Aquíferos praticamente improdutivos</i> | | | |
| ec3 | Sistema Aquífero Embasamento Cristalino III | Fraturado | Rochas graníticas maciças, gnaisses, riolitos e andesitos pouco alterados. Ausência de fraturas interconectadas. |

Fonte: Modificado de Machado e Freitas (2005).

3. MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo foi baseado no tratamento de dados de poços, modelos digitais de elevação (MDEs), dados aeromagnéticos e mapa hidrogeológico. A metodologia foi desenvolvida e testada para produzir mapas e gráficos e avaliar a produtividade dos sistemas aquíferos da porção sul do estado do Rio Grande do Sul, Brasil. Para as análises de Sistema de Informação Geográfica (SIG) foi utilizado o *software* QGIS 3.22.7. Os produtos foram georreferenciados com datum SIRGAS 2000.

3.1. Mapa Hidrogeológico

A caracterização hidrogeológica da área de estudo foi feita a partir dos vetores e mapa hidrogeológico do estado do Rio Grande do Sul, gerados a partir do Projeto Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul (MACHADO; FREITAS, 2005). Os dados foram processados em ambiente SIG utilizando o *software* QGIS versão 3.22.7 com GRASS 7.8.7

3.2. Sensoriamento remoto multi-escala de lineamentos

Foliações de rochas metamórficas, camadas sedimentares e descontinuidades representam lineamentos que, por definição, tratam-se de expressões lineares alinhadas (retas ou curvas), em imagens de satélite (TIRÉN, 2010) (O'LEARY; FRIEDMAN, 1978 apud EPUH *et al.* 2020). Segundo PIRES *et al.* (2021) e DA SILVA *et al.* (2021) os produtos de sensoriamento remoto são utilizados para traçar lineamentos nas escalas 1:400.000 (grandes estruturas regionais) e 1:100.000 (estruturas locais) com finalidade hidrogeológica. Nesse estudo os lineamentos foram traçados em ambas as escalas, utilizando imagens do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) de Modelo Digital de Elevação (MDE), realizada pelo *United States Geological Survey* (USGS) e disponibilizadas pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), com uma resolução de 30 metros. Foram utilizadas pseudo-iluminações com ângulos de 45°, 135°, 225° e 315° para destacar diferentes estruturas geomorfológicas dentro da mesma escala. Os diagramas de roseta foram elaborados utilizando o complemento Line Direction Histogram, do *software* QGIS versão 3.22.7 com GRASS 7.8.7.

3.3. Dados aeromagnéticos

Dados aeromagnéticos são utilizados para entender as estruturas em subsuperfície, sendo elas voltadas para geotectônica (BETIOLLO *et al.*, 2019), mineração (PORRAS *et al.*, 2021), hidrogeologia (DESSART *et al.*, 2020; PEREIRA; BARBOSA; SCUDINO, 2014), etc. Sendo assim, esse método geofísico pode ser utilizado na área de hidrogeologia para traçar novas estruturas exploráveis. As análises aerogeofísicas foram feitas com os dados do Projeto Aerogeofísico Estudo do Rio Grande do Sul (CPRM, 2010). O projeto consistiu em 633 linhas de voo (N-S) e 34 linhas de controle leste-oeste, cobrindo uma área de 75.000 km². Os lineamentos foram traçados a partir da base de dados

no formato Geosoft Database, já corrigidos e ajustados, disponibilizados pela CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Foram utilizados os mapas de anomalias magnéticas de realce de Amplitude do Sinal Analítico (ASA) e Derivada Vertical (DV).

3.4. Dados de poços

Inicialmente foram coletados dados de 1.495 poços cadastrados no CPRM – SIAGAS (Sistema de Informação de Águas Subterrâneas), abrangendo um total de 39 municípios do estado do Rio Grande do Sul. Estes poços foram analisados utilizando a plataforma Jupyter Notebook, a partir de *scripts* escritos em linguagem python. Para os 1495 dados de poços, coletados no banco de dados SIAGAS, agrupou-se e criou-se colunas para melhor visualização dos dados, sendo elas: profundidade total do poço (subtraindo a cota da profundidade final da cota da boca do poço); carga hidráulica, (subtraindo a cota do terreno da cota do nível estático); capacidade específica, (sendo ela igual a vazão específica). Para a classificação dos sistemas aquíferos dos poços analisados até o momento, os dados foram exportados para uma planilha Excel, de forma a substituir os dados categóricos dos tipos de formação por dados numéricos. Assim, implementou-se a metodologia de substituir sedimentos pelo número 1; unidades granulares pelo número 2; e unidades cristalinas pelo número 3. A lógica de programação para definição das categorias (disponível no anexo) foi baseada nas capacidades específicas e tipos de formação do mapa hidrogeológico do Rio Grande do Sul. Após a análise do banco de dados, notou-se valores exorbitantes para capacidades específicas dos poços, sendo assim adotado como nomenclatura “≥1 m³/h/m/” para a classe de poços representativos das maiores capacidades específicas na confecção dos mapas. No total, foram filtrados 885 poços do banco de dados SIAGAS, os quais continham sincronicamente as informações de capacidade específica e litologia.

Utilizando o pacote GeoPandas, foram importados arquivos shapefile (shp) da área de estudo, entre eles, os lineamentos traçados em diferentes escalas (1:400.000 e 1:250.000). Os arquivos shp foram georreferenciados dentro da plataforma para as coordenadas geográficas SIRGAS 2000 / UTM zona 22s. Para analisar quais poços tinham influências diretas pelos lineamentos traçados, nas diferentes escalas, foi determinado um raio de 0.01 graus (0°0'36"), estipulado como aceitável para influência hidrogeológica. O raio foi definido como forma de obter um número mais representativo nas intersecções, uma vez que os lineamentos foram traçados de forma manual e estão sujeitos a erros. Foram descartados valores com coordenadas repetidas, devido aos raios de influência acabarem cruzando mais de um lineamento.

O processamento foi feito para avaliar o banco de dados e classificar os poços de acordo com os seus sistemas aquíferos e identificar quantos poços estão sobre influência dos lineamen-

tos traçados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Análise de lineamentos

4.1.1. Sensoriamento remoto

Os lineamentos foram traçados a partir do relevo sombreado do modelo digital de elevação (Fig.2a). Na escala 1:400.000, foram identificados 311 lineamentos (Fig.2b) com direções preferencias NW-SE e, subordinadamente, NE-SW. Na escala 1:250.000, foram traçados 6.183 lineamentos (Fig. 2c), com direções preferenciais NE-SW e, subordinadamente, NW-SE.

4.1.2. Correlação produtividade dos poços com gradiente de orientação magnética

Foram utilizados os mapas de realce de dados aeromagnéticos, Amplitude do Sinal Analítico e Primeira Derivada Vertical, para identificar domínios geofísicos e correlacionar com a produtividade dos poços. Dos 1496 poços, 623 poços estão dentro do limite do levantamento geofísico, sendo assim, as porcentagens foram normalizadas. A relação dos poços com os dados de porcentagem real e normalizadas, para cada domínio geofísico de ASA, estão apresentados na Tabela 2. O mapa de Amplitude do Sinal Analítico (Fig. 3a), foi compartimentado em três domínios geofísicos essenciais, buscando relacioná-los com a produtividade dos poços (Fig. 3b).

Figura 2 - (a) Localização espacial dos poços em relação ao modelo digital de elevação, mapa base para os lineamentos traçados em (b) escala 1:400.000 e (c) 1:250.000. Nos diagramas de roseta foram quantificados os azimutes proporcionalmente ao número de lineamentos desenhados

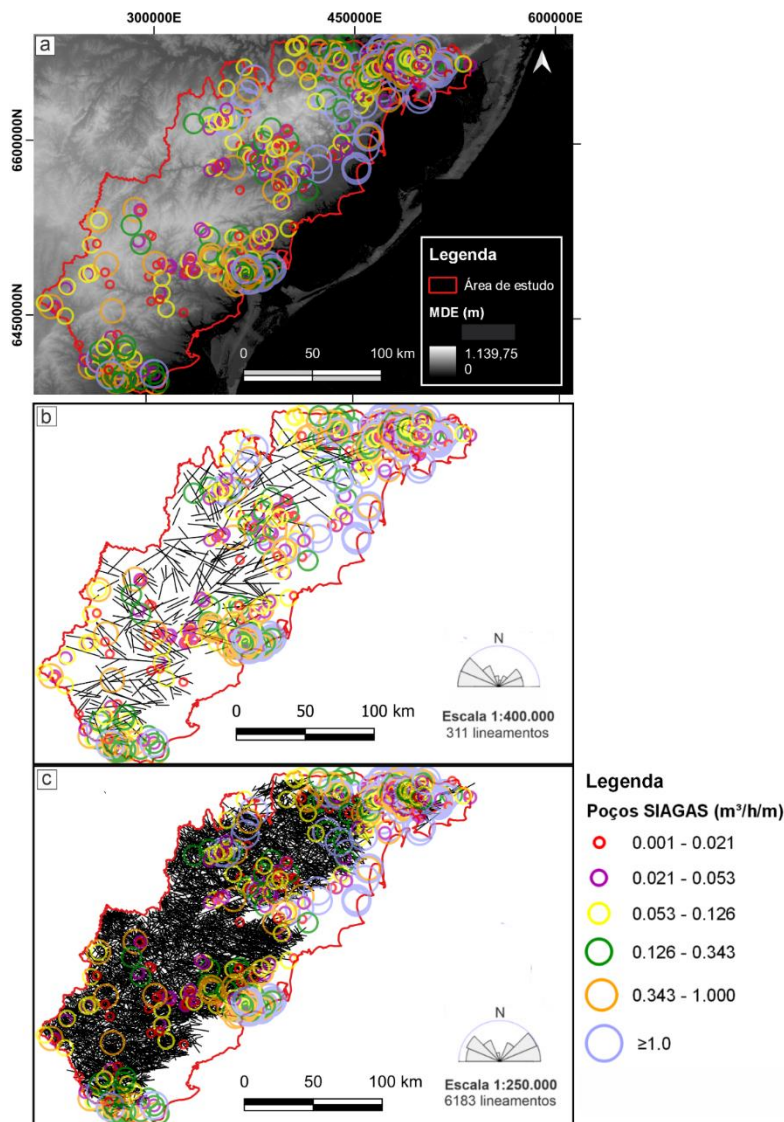
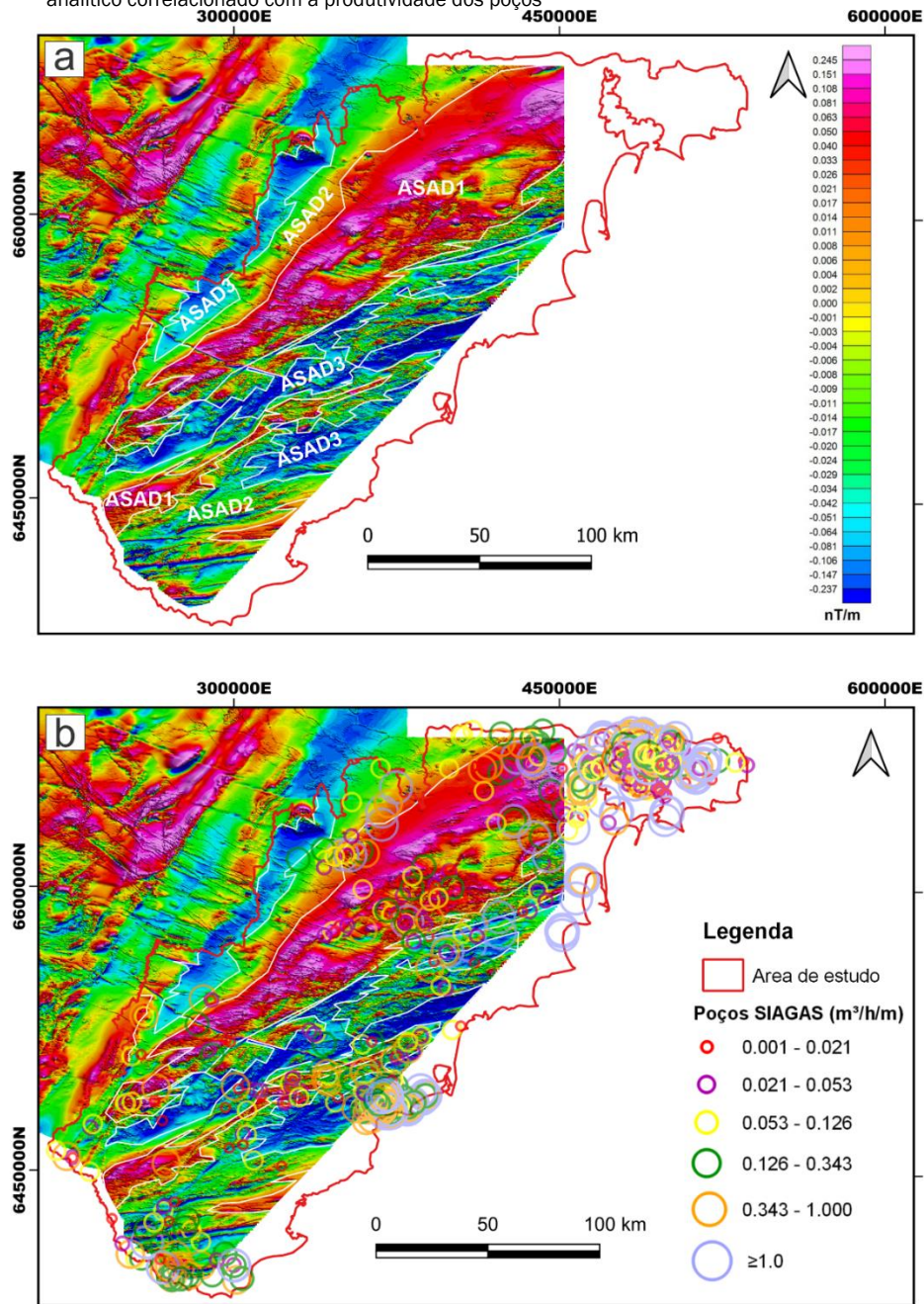


Figura 3 - Mapas de correlação geofísica e produtividade dos poços. (a) Amplitude do Sinal Analítico. (b) Amplitude do sinal analítico correlacionado com a produtividade dos poços



O mapa possui uma variação dentro da janela de radiação magnética de -0,237 a 0,245 nT/m. A análise dos domínios permitiu a identificação das seguintes características:

1. Domínio 1 (ASAD1): As anomalias desse domínio geofísico são positivas e variam de 0,245 a 0,026 nT/m. Dentro desse domínio, as capacidades específicas dos poços são satisfatórias, variando de 0,001 a 1 m³/h/m. Dos 643 poços presentes dentro da área do levantamento aerogeofísico, aproximadamente, 40,44% dos poços estão
2. Domínio 2 (ASAD2): O domínio é caracterizado por anomalias intermediárias e variam de 0,021 a -0,029 nT/m. Dentro desse domínio, as capacidades específicas dos poços são satisfatórias, variando de 0,053 a 1 m³/h/m. Dos 643 poços presentes dentro da área do levantamento aerogeofísico, aproximadamente, 43,03% dos

poços estão nesse domínio geofísico. Os poços com capacidades específicas mais satisfatórias nesse domínio, por volta de $1 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$, encontram-se na janela de radiação magnética de $-0,024 \text{ nT}/\text{m}$.

3. Domínio 3 (ASAD3): O domínio é caracterizado por anomalias negativas que variam de $-0,034$ a $-0,237$. Dos 1496 poços presentes na área de estudo, aproximadamente, 16,53% dos poços estão nesse domínio geofísico.

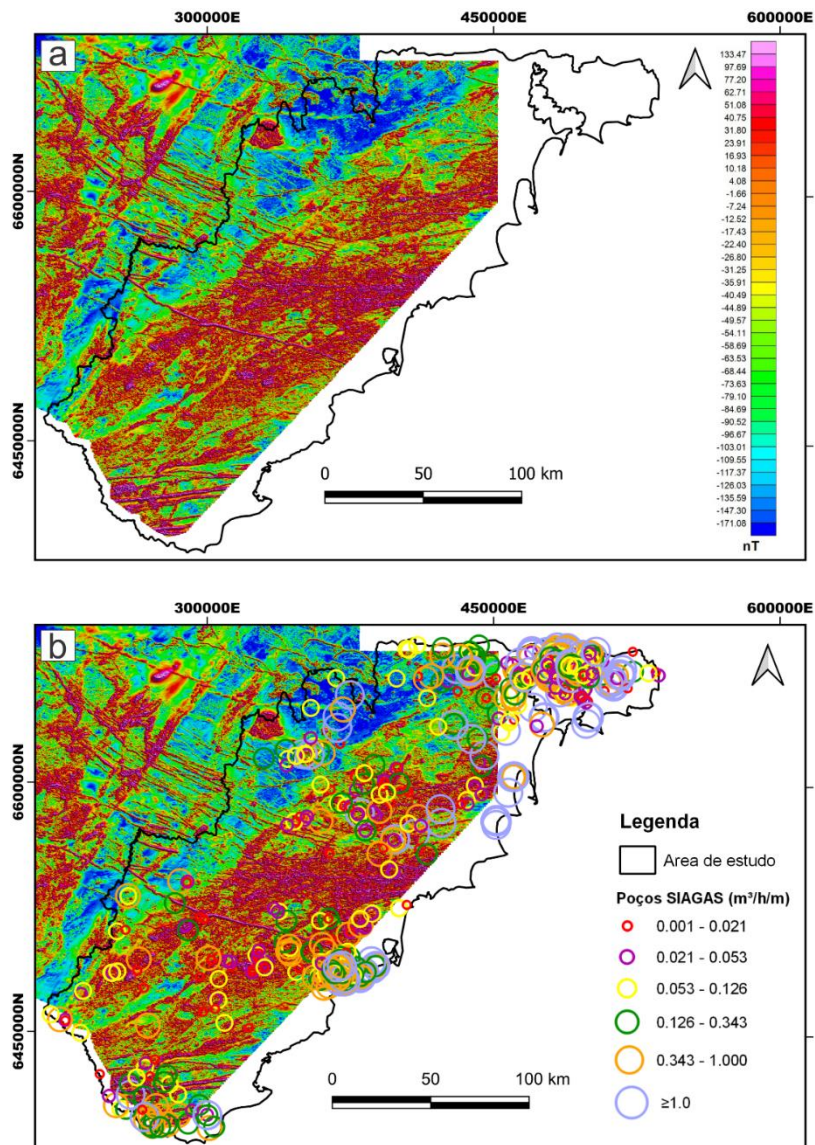
Esse domínio carece de poços e, os poucos que se localizam nele, estão associados a produção do domínio D2.

Nesse trabalho, o mapa de Primeira Derivada Vertical (Fig. 4a), foi interpretado conforme a orientação aparente dos lineamentos, buscando relacionar a susceptibilidade magnética com a produtividade dos poços (Fig. 4b).

Tabela 2 - Relação quantitativa de correlação dos domínios geofísicos com os poços cadastrados

| Domínio geofísico | Número de poços | Porcentagem geral (%) | Porcentagem normalizada (%) |
|------------------------|-----------------|-----------------------|-----------------------------|
| ASAD1 | 252 | 16,8 | 40,44 |
| ASAD2 | 268 | 17,9 | 43,03 |
| ASAD3 | 103 | 6,9 | 16,53 |
| Fora do levantamento | 872 | 58,4 | - |
| Total de poços na área | 1495 | | |

Figura 4 - Mapas de correlação geofísica e produtividade dos poços. (a) Primeira Derivada Vertical. (b) Primeira Derivada Vertical correlacionada com a produtividade dos poços



O mapa possui uma variação dentro da janela de radiação magnética de -171,08 a 133,47 nT. Assim, os domínios geofísicos foram divididos conforme a radiação magnética, sendo subdivididos em PDVD1, PDVD2 e PDVD3:

1. Domínio PDVD1: formado por lineamentos com as maiores anomalias positivas, de grandes extensões, que cortam toda a área de estudo na direção NW-SE e, subordinadamente, NE-SW. Possuem uma variação de radiação magnética de 133,47 a 77,20 nT. Os poços com maiores capacidades específicas estão próximos a essas anomalias, mas não sobre elas.
2. Domínio PDVD2: formado por lineamentos com anomalias positivas expressivas, com direção NE-SW e, subordinadamente, NW-SE. Possuem uma variação de radiação magnética de 62,71 a -35,91 nT. O maior volume de poços com capacidades específicas satisfatórias está dentro desse domínio, que variam de 0,001 a 1 m³/h/m.
3. Domínio PDVD3: formado por lineamentos com anomalias negativas, com direções NW-SE e, subordinadamente, NE-SW. Possuem uma variação de radiação magnética de -40,49 a -171,08 nT. Localmente, esse domínio apresenta poços com capacidades específicas satisfatórias, associadas a influência das estruturas do domínio PDV2.

4.2. Classificação dos poços em sistemas aquíferos e identificação de poços

Foi realizado o levantamento de dados dos poços cadastrados nos 39 municípios (Fig. 5a) para classificação conforme a Tabela 1. Mapas finais com os lineamentos contendo intersecção

com poços, para as diferentes escalas, foram plotados utilizando a biblioteca GeoPandas. Dos 885 poços (Fig. 5b) analisados foram identificadas 211 intersecções de poços com lineamentos, com escala 1:400.000 (Fig. 5c), e 588 intersecções (Fig. 5f) e, com escala 1:250.000 (Fig. 5e).

4.3. Influência dos lineamentos, sistemas aquíferos e geofísicos na capacidade específica dos poços

As anomalias magnetométricas de Amplitude do Sinal Analítico, acompanham as direções dos grandes lineamentos regionais NE-SW. O Domínio ASAD1 é indicado como o mais produtor, variando na janela de radiação magnética de 0,026 a 0,040 nT/m. As anomalias magnetométricas indicadas no mapa de Primeira Derivada Vertical, corroboram as orientações dos lineamentos traçados em superfície na escala 1:400.000, com uma orientação preferencial NE-SW e, subordinadamente, NW-SE. Os lineamentos com anomalias positivas, representados pelo domínio PDVD1, com direção preferencial NW-SE e, subordinadamente, SW-NE, não são produtores dentro dos sistemas aquíferos fraturados. Visto isso, infere-se que estes lineamentos de alta persistência do domínio PDVD1, podem representar as regiões de Núcleo de Falha (Fig. 6). Estas regiões são definidas em falhas bem desenvolvidas, onde apresentam alta deformação, grande densidade de fraturas e baixa permeabilidade (BENSE *et al.*, 2013; FOSSEN; CAVALCANTE, 2017).

Figura 5 – (a) Área de estudo com (b) localização dos poços cadastrados no SIAGAS. (c) Lineamentos com escala 1:400.000 e (d) resultado final da intersecção com os 211 poços. (e) Lineamentos com escala 1:250.000 e (f) resultado final da intersecção com os 885 poços

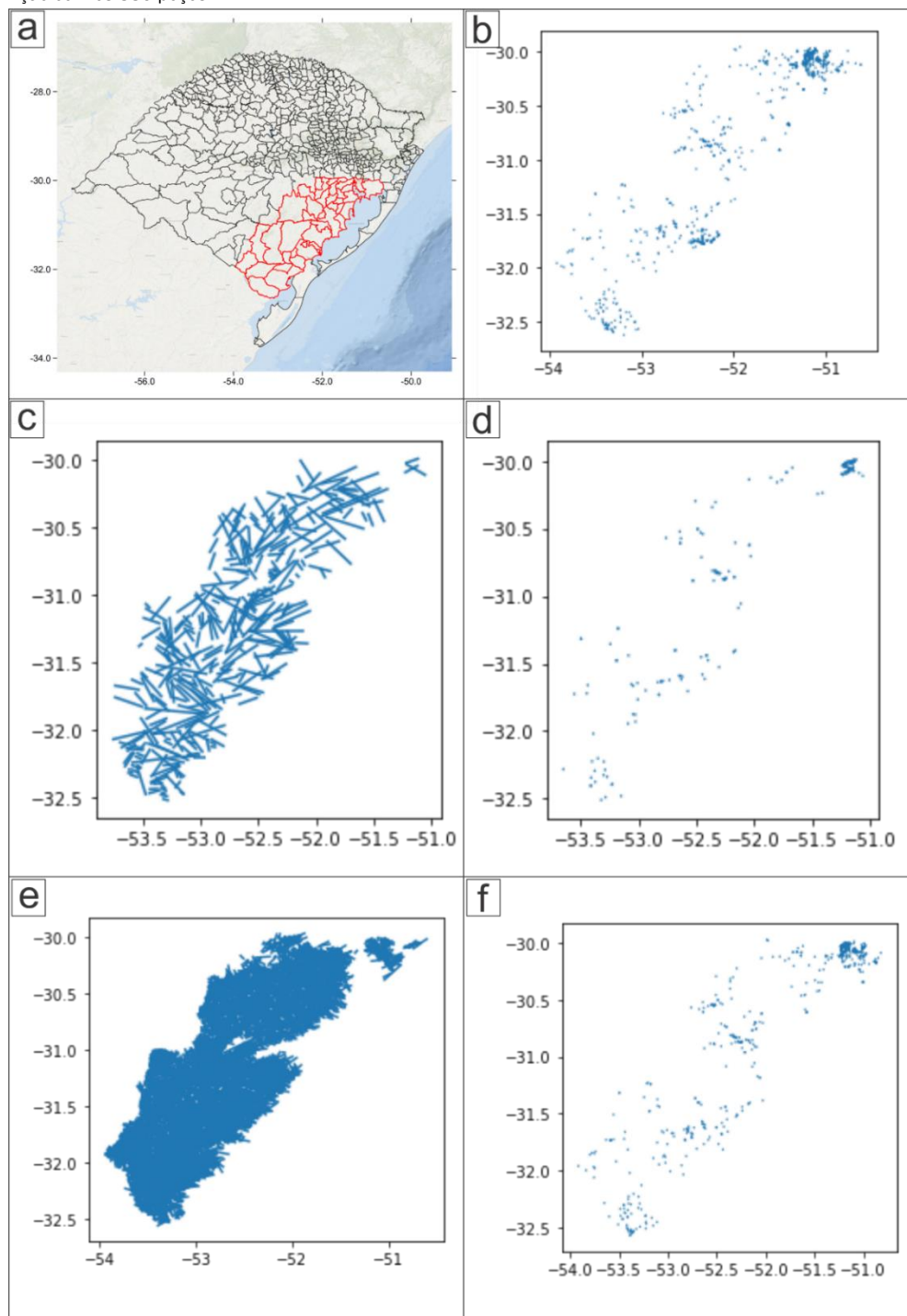
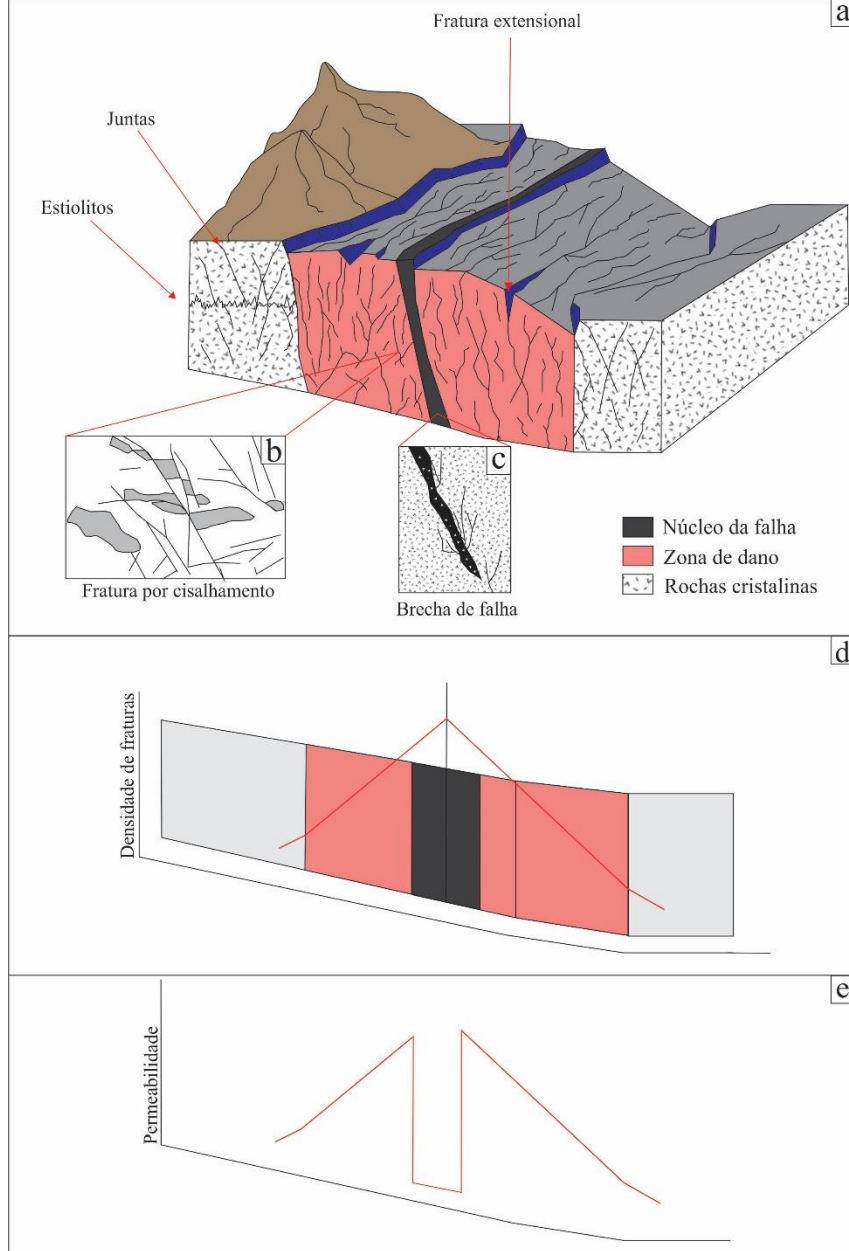


Figura 6 - (a) Estruturas encontradas em zona de falha em rochas cristalinas (Modificado de CHESTER, 1987). (b) Fraturas por cisalhamento (Modificado de CHESTER, 1987). (c) Brechas de falha. (d) Gráfico da distribuição da densidade e (e) permeabilidade das fraturas na zona de dano e núcleo da falha em ambiente cristalino

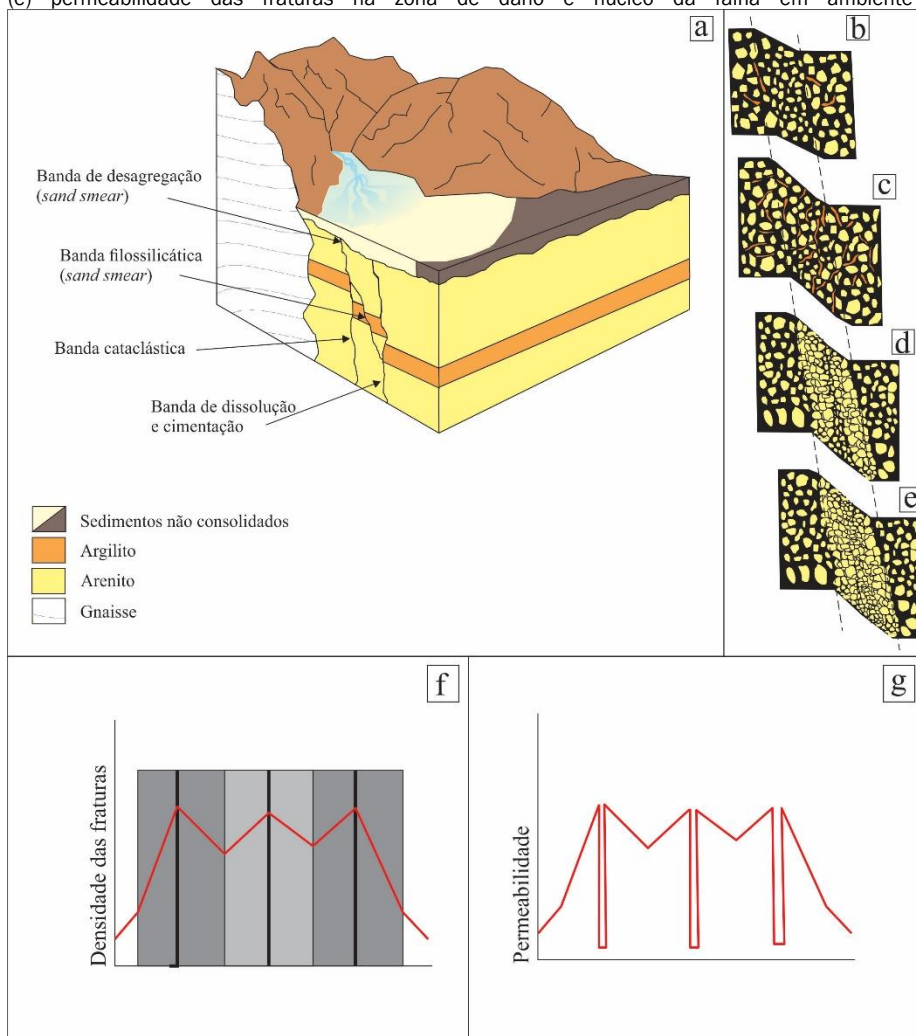


Fonte: Modificado de Bense et al. (2013).

O domínio geofísico PDVD2, com direção preferencial dos lineamentos SW-NE e, subordinadamente, NW-SE, apresenta uma persistência menor de lineamentos e é o sistema aquífero cristalino com capacidade de produção. Assim, conclui-se que a região do domínio PDVD2 contenha grau de deformação menor, portanto corresponde à Zona de Dano (Fig. 5).

As regiões recobertas por sistemas aquíferos de unidades granulares aumentam, expressivamente, as capacidades específicas dos poços por toda a área de estudo. Isto acontece devido à alta permeabilidade e a alta da densidade de fraturas em aquíferos granulares, em zonas de cisalhamento (Fig. 7), desde que não estejam sobre o Núcleo de Falha.

Figura 7 - (a) Estruturas encontradas em zona de falha em rochas sedimentares (Modificado de Bense et al., 2013). Estruturas formadas em zona de falha sedimentar: (b) banda de desagregação, (c) banda filossilicática, (d) banda cataclástica e (e) banda de dissolução e cimentação (Modificado de FOSSEN, 2017). (d) Gráfico da distribuição da densidade e (e) permeabilidade das fraturas na zona de dano e núcleo da falha em ambiente sedimentar



Fonte: Modificado de Bense et al. (2013).

5. CONCLUSÕES

Os métodos avaliados nesse trabalho, análises de lineamentos, a partir de produtos de sensoriamento remoto, mapas aerogeofísicos, e análise de dados em Python, permitiram avaliar poços cadastrados no sistema de dados SIAGAS do Serviço Geológico do Brasil e a hidrogeologia da porção sul do Rio Grande do Sul. A metodologia se mostrou eficaz para avaliar a correlação de lineamentos com poços cadastrados. A lógica de programação desenvolvida em Python como código foi revisada e aplicada a um conjunto de poços, visando prover uma solução para análise de dados rápida. O código mostrou-se eficiente para uma análise de banco de dados hidrogeológico extenso, escrita nos padrões coletados conforme a bibliografia.

A análise de lineamentos compartimentou a área de estudo em três domínios subsuperficiais hidrogeológicos. A

integração de dados aerogeofísicos do campo magnético anômalo (ASA e DV) com dados superficiais (SRTM) apresentou boa correlação para as escalas 1:400.000 e 1:250.000. Desta forma, os resultados obtidos no trabalho colaboraram para indicações de *trends* dentro dos domínios geofísicos que, por sua vez, corroboram as tendências NE-SW e NW-SE do ESRG.

Com base na análise de dados dos poços foi possível caracterizar quantos poços fazem intersecção com lineamentos e concluir que o sensoriamento remoto em escala 1:250.000 é eficiente para traçar lineamentos produtores, uma vez que na escala 1:250.000 foram intersectados 588 poços.

Contudo, ainda se reconhece a necessidade de mapeamento em escala de detalhe, para a locação de poços, com resultados mais assertivos utilizando-se em conjunto a investigação por métodos geofísicos adequados, como a

eletrorresistividade. Apenas com uma avaliação de detalhe é possível caracterizar estruturas locais que influenciam a produtividade dos poços. Ainda assim, a metodologia implementada nesse trabalho mostra-se eficiente para uma avaliação regional ou local. Para futuros trabalhos sugere-se: (a) explorar mais a biblioteca GeoPandas com os dados raster, de forma a automatizar e agilizar o processo de avaliação dos dados; (b) traçar lineamentos de magnetometria no filtro de 1DV, a fim de quantificar os poços que intersectam os lineamentos utilizando esse filtro; e (c) comparar os lineamentos traçados pelos métodos de sensoriamento remoto e 1DV de maneira quantitativa, utilizando e aperfeiçoando o código desenvolvido no presente trabalho.

REFERÊNCIAS

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. *Monitoramento e eventos críticos*. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/monitoramento-e-eventos-criticos>. Acesso em: 4 dez. 2022.

ADOMBI, Adoubi Vincent De Paul; CHESNAUX, Romain; BOUCHER, Marie-Amélie. Theory-guided machine learning applied to hydrogeology—state of the art, opportunities and future challenges. *Hydrogeology Journal*, v. 29, n. 8, p. 2671-2683, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10040-021-02403-2>

AYER, Joaquim Ernesto Bernardes; GAROFALO, Danilo Francisco Trovo; PEREIRA, Sueli Yoshinaga. Uso de geotecnologias na avaliação da favorabilidade hidrogeológica em aquíferos fraturados. *Águas Subterrâneas*, v. 31, n. 3, p. 154-167, 2017. <https://doi.org/10.14295/ras.v31i3.28773>

BENSE, V. F. et al. Fault zone hydrogeology. *Earth-Science Reviews*, v. 127, p. 171-192, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.09.008>

CARDOSO JR, Marcio et al. Geomorphic expression of shear zones in Southern Brazilian and Uruguayan Shields. *Geomorphology*, v. 382, p. 107678, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107678>

CHEMALE JR, F.; HARTMANN, L. A.; SILVA, LC da. Stratigraphy and tectonism of the Brasiliano Cycle in southern Brazil. *Communications of the Geological Survey of Namibia*, v. 10, p. 151-166, 1995.

AYER, J. E. B.; GAROFALO, D. F. T.; PEREIRA, S. Y. Uso de geotecnologias na avaliação da favorabilidade hidrogeológica em aquíferos fraturados. *Águas Subterrâneas*, v. 31, n. 3, p. 154, 30 maio 2017. <https://doi.org/10.14295/ras.v31i3.28773>

BENSE, V. F. et al. Fault zone hydrogeology. *Earth-Science Reviews*, v. 127, p. 171-192, dez. 2013.

<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.09.008>

CARDOSO JR., M. et al. Geomorphic expression of shear zones in Southern Brazilian and Uruguayan Shields. *Geomorphology*, v. 382, p. 107678, jun. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107678>

COOK, P. G.; LAND, C.; OSMOND, G. *A guide to regional flow in fractured rock aquifers*. [s.l: s.n.].

DA CUNHA MENEZES, A. M. et al. Structure and geometry of the Neoproterozoic Dom Feliciano Belt and Phanerozoic basins, southern Brazil, from magnetotelluric imaging. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 111, n. June, p. 103407, nov. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103407>

DA SILVA, R. C. et al. Hydrogeological compartmentalization and connection of the Guarani (GAS) and Serra Geral (SGAS) aquifer systems from a multiscale perspective: A case study in southern Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, v. 51, n. 3, 2021. <https://doi.org/10.1590/2317-4889202120200056>

DESSART, R. L. et al. Analysis of the structural compartment of the crystalline basement aquifer system in the municipality of bagé (Rs) based on the use of lineaments (srtm and magnetic) and hydrogeological data. *Águas Subterrâneas*, v. 34, n. 1, p. 1-13, 2020. <https://doi.org/10.14295/ras.v34i1.29557>

EPUH, E. E. et al. An integrated lineament extraction from satellite imagery and gravity anomaly maps for groundwater exploration in the Gongola Basin. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, v. 20, n. October 2019, p. 100346, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100346>

FERNANDES, L. A. D. et al. Evolução tectônica do cinturão dom feliciano no escudo sul-rio-grandense: parte I - uma contribuição a partir do registro geológico. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 25, n. 4, p. 351-374, 1995. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.1995351374>

FOSSEN, H.; CAVALCANTE, G. C. G. Shear zones – A review. *Earth-Science Reviews*, v. 171, n. January, p. 434-455, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.05.002>

HARTMANN, L. A. et al. The impact of the SHRIMP geochronology on understanding the tectonic and metallogenetic evolution of southern Brazil. *2nd South American Symposium on Isotope Geology*, p. 829-844, 2000. <https://doi.org/10.1046/j.1440-0952.2000.00815.x>

- HARTMANN, L. A.; LOPES, W. R.; SAVIAN, J. F. Integrated evaluation of the geology, aerogammaspectrometry and aeromagnetometry of the Sul-Riograndense Shield, Southernmost Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 88, n. 1, p. 75–92, 2016. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201520140495>
- BETIOLLO, L. M.; AFRANEO, L.; HARTMANN, J. F. S. *The Pomerode dome in the Luis Alves craton: geophysics, geology, geometry and tectonic evolution*. 2019.
- MAPURUNGA SARAIVA, R.; DIKSON ARAUJO DA SILVA, C.; DIAS LISBOA, L. H. Locações de poços em ambiente cristalino: da análise estrutural aos dados de eletroresistividade. estudo de caso nos municípios de São Gonçalo Do Amarante E Aratuba, Ceará. *Águas Subterrâneas*, 2017. <https://doi.org/10.14295/ras.v0i0.28788>
- MARTIN, T.; MEYER, R.; JOBE, Z. Centimeter-Scale Lithology and Facies Prediction in Cored Wells Using Machine Learning. *Frontiers in Earth Science*, v. 9, n. June, p. 1–18, 2021. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.659611>
- MEREMBAYEV, T.; YUNUSSOV, R.; YEDILKHAN, A. Machine learning algorithms for stratigraphy classification on uranium deposits. *Procedia Computer Science*, v. 150, p. 46–52, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.02.010>
- NAGHIBI, S. A.; HASHEMI, H.; PRADHAN, B. APG: A novel python-based ArcGIS toolbox to generate absence-datasets for geospatial studies. *Geoscience Frontiers*, v. 12, n. 6, p. 101232, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101232>
- PEREIRA, L.; BARBOSA, M. S. C.; SCUDINO, P. C. B. Magnetometria E Sensoriamento remoto aplicados ao mapeamento regional de lineamentos de fraturas , no domínio do aquífero fissural associado à fm . serra geral , Bacia Do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 18., 2014. [Anais...]. n. 31, p. 1–16, 2014.
- PERLT, J.; HEINERT, M. Kinematic model of the South Icelandic tectonic system. *Geophysical Journal International*, v. 164, n. 1, p. 168–175, 2006. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2005.02795.x>
- PHILIPP, R. P.; PIMENTEL, M. M.; BASEI, M. A. S. *The tectonic evolution of the são gabriel terrane, dom feliciano belt, southern brazil: the closure of the charrua ocean*. [s.l.] Springer International Publishing, 2018. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68920-3_10
- PHILIPP, R. P.; PIMENTEL, M. M.; CHEMALE, F. Tectonic evolution of the Dom Feliciano Belt in Southern Brazil: Geological relationships and U-Pb geochronology. *Brazilian Journal of Geology*, v. 46, n. June, p. 83–104, 2016. <https://doi.org/10.1590/2317-4889201620150016>
- PIRES, C. A. et al. Litho-structural conditioning in the exploration of fractured aquifers: a case study in the Crystalline Basement Aquifer System of Brazil. *Hydrogeology Journal*, v. 29, n. 4, p. 1657–1678, 25 jun. 2021. <https://doi.org/10.1007/s10040-021-02312-4>
- PORRAS, D. et al. Drone Magnetometry in Mining Research. An Application in the Study of Triassic Cu–Co–Ni Mineralizations in the Estancias Mountain Range, Almería (Spain). *Drones*, v. 5, n. 4, 2021. <https://doi.org/10.3390/drones5040151>
- RODRIGO FABIANO DA CRUZ, R. F. DA. *Levantamento geológico e do potencial mineral de novas fronteiras: projeto Sudeste do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: [s.n.].
- SAALMANN, K.; HARTMANN, L. A.; REMUS, M. V.D. The assembly of West Gondwana - The view from the Rio de la Plata craton. *Geological Society of America*, v. 423, n. 01, p. 1–26, 2007. [https://doi.org/10.1130/2007.2423\(01\)](https://doi.org/10.1130/2007.2423(01))
- SAALMANN, K.; REMUS, M. V.D.; HARTMANN, L. A. Structural evolution and tectonic setting of the Porongos belt, southern Brazil. *Geological Magazine*, v. 143, n. 1, p. 59–88, 2006. <https://doi.org/10.1017/S0016756805001433>
- SCHARF, T. et al. AnalyZr: A Python application for zircon grain image segmentation and shape analysis. *Computers and Geosciences*, v. 162, n. February, p. 105057, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2022.105057>
- SILVA, G. C. DA; MENEZES, D. B. Caracterização de unidades aquíferas apartir de dados do cadastro de poços de exploração subterrânea. ensaio de aplicação: área urbana de São Carlos-Sp. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 19., 2016. [Anais...]. p. 1–13, 2016.
- SINGHAL, B. B. S.; GUPTA, R. P. *Applied hydrogeology of fractured rocks*. Second edition. [s.l.: s.n.].
- TIRÉN, S. *Lineament interpretation Short review and methodology*. p. 1–42, 2010.
- VINCENT, A.; ADOMBI, D. P. Review : Theory-guided machine learning applied to hydrogeology — state of the art, opportunities and future challenges. p. 2671–2683, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10040-021-02403-2>