

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

ANDRÉ GUSTAVO DA CUNHA RAMALHO

**O POTENCIAL HIDROGEOLÓGICO DA FOLHA DE FREDERICO WESTPHALEN,
REGIÃO DO ALTO URUGUAI - RS**

CAÇAPAVA DO SUL

2021

ANDRÉ GUSTAVO DA CUNHA RAMALHO

**O POTENCIAL HIDROGEOLÓGICO DA FOLHA DE FREDERICO WESTPHALEN,
REGIÃO DO ALTO URUGUAI - RS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Geologia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Maximilian Fries
Coorientador: Msc. Vitor Hugo Rosa Biffi

CAÇAPAVA DO SUL

2021

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

R165p Ramalho, André Gustavo da Cunha
O POTENCIAL HIDROGEOLÓGICO DA FOLHA DE FREDERICO
WESTPHALEN, REGIÃO DO ALTO URUGUAI - RS / André Gustavo da
Cunha Ramalho.

62 p.

Tese(Doutorado)-- Universidade Federal do Pampa, GEOLOGIA,
2021.

"Orientação: Maximilian Fries".

1. hidrogeologia. 2. potencial produtivo. 3. exploração
hidrogeológica. 4. aquífero fraturado. 5. sistema aquífero
serra geral. I. Título.

ANDRÉ GUSTAVO DA CUNHA RAMALHO

**POTENCIAL HIDROGEOLÓGICO - FOLHA DE FREDERICO WESTPHALEN - REGIÃO DO ALTO
URUGUAI - RS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Geologia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Geologia.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 01 de outubro e 2021.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Maximilian Fries
Orientador
Universidade Federal do Pampa

Msc. Vitor Hugo Rosa Biffi
Coorientador
Universidade Estadual de Maringá

Msc. Cássio de Almeida Pires
Banca examinadora
Universidade Federal do Paraná

Prof. Dr. Igor Magalhães Clemente

Banca examinadora

Universidade Federal do Pampa



Assinado eletronicamente por **MAXIMILIAN FRIES, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 07/10/2021, às 10:33, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **IGOR MAGALHAES CLEMENTE, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 07/10/2021, às 11:28, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Cássio de Almeida Pires, Usuário Externo**, em 08/10/2021, às 12:52, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0632850** e o código CRC **B61A7DF5**.

Universidade Federal do Pampa, Campus Caçapava do Sul

AGRADECIMENTOS

Gostaria de pontuar que em 2019 colapsou a maior pandemia viral dos últimos 100 anos no mundo. As racionalizações e sentimentos de agradecimentos foram potencializados ao ver empatia, colaboração e paciência das pessoas ao meu redor, nesses últimos 2 anos.

Primeiramente, agradeço aos meus familiares, “de casa”, que idealizaram esse sonho comigo e, em momento algum, mediram esforços no apoio, suporte e paciência. A grande referência do Tio Zé Edézio e Tia Tereza de Nóbrega, que sempre tiveram um papel fundamental na minha permanência nos estudos. Aos meus primos amigos Felipe Fugimoto (Fê), Tatiane Fugimoto (Tati), Amanda e Nickolas Ramalho que participaram dessa trajetória, à distância, comigo.

Às políticas públicas de ensino superior, sobretudo na idealização da Unipampa que desde sua criação, foi inovadora ao interiorizar o ensino superior. Somente nessa condição pude ter acesso ao ensino federalizado, gratuito e de qualidade, em geologia. Aos meus professores que me ensinaram pra além das teorias e técnicas, hoje meus colegas de profissão, levo vocês comigo.

Ao meu orientador Maximilian Fries (Max), que permaneceu firme e consistente na colaboração com o trabalho.

Ao meu coorientador e amigo, Vitor Biffi (Vitin), um grande profissional e colega dos descompassos geográficos.

À minha segunda família, Geoloki, que nos últimos anos pude desfrutar do convívio, conversas e apoio da vida: Gabriel Sperandio (Biel), Renê Coutinho (Renildo) e Issacar Barroso (Pai).

À Juliana Gomides (Ju), minha parceira da vida, motivadora e companheira de coisas boas e ruins dos últimos anos.

Ao Gabriel Smith (Wil), Jean Taglieber (Salaminho) e Na1, que até o último dia me apoiaram e me ajudaram no que podiam na parceria, conversas e técnicas.

Ao Gigi, grande amizade que Caçapava proporcionou, com sua inventividade fez eu ter ótimos momentos culturais e artísticos.

Aos Amigos da Palha, a maior banda colaborativa que já se ouviu falar, e seus integrantes, meus grandes amigos Fly, Romulin, Costinha e Guinha.

RESUMO

O Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) tem grande importância pelo fato da maioria dos municípios situados no Grupo Serra Geral utilizarem da sua água subterrânea para o consumo público e privado. A demanda, aliada às ferramentas acessíveis e de baixo custo disponíveis, fez com que os estudos do SASG aumentassem consideravelmente nos últimos anos. A área de estudo está situada na Folha Frederico Westphalen, a noroeste do Rio Grande do Sul e sudoeste de Santa Catarina, na região do Alto Uruguai, com escala 1:100.000. A demanda da água subterrânea nessa região encontra-se, principalmente, na dessedentação de animais, indústria, agricultura e o turismo das águas de características geotermiais. Geologicamente, o quadrante estudado posiciona-se no Grupo Serra Geral, com predominante presença de basaltos e com forte estruturação de tectônica rúptil. O objetivo do trabalho é determinar as características hidrogeológicas na Folha de Frederico Westphalen. O método utilizado consiste na criação e ajuste do banco de dados dos poços tubulares profundos georreferenciados da região, sobretudo quanto à capacidade específica, complementação das feições lineares estruturais (lineamentos) por meio de imagens de satélite e processamentos em Sistema de Informações Geográficas (SIG), geração de mapas temáticos e análise estatística dos dados obtidos. Foram identificados 922 lineamentos fotogeológicos com quatro principais tendências, a N050-070W, N350-NS, N320-340W e E-W. A partir dos três domínios estruturais espacializados, observou-se que a densidade de lineamento tem uma forte correlação com o relevo (Planalto Dissecado do Uruguai), e que as maiores densidades estão presentes a sul e oeste da Folha, representados pelos Domínio 3 e 2. De maneira geral, a produtividade de água subterrânea da área estudada é baixa. Nos 223 poços tubulares analisados, apresentam-se com média de 0,7 m³/h/m. A partir do *boxplot* das classes de densidade em relação à capacidade específica, observou-se que o Domínio 3 apresentou maior potencial hídrico subterrâneo, seguido do Domínio 1. O Domínio 2 apresentou-se com menor produtividade. Entretanto, foi verificado que as relações não são tão claras, possivelmente pela ocorrência regional de processos hidrotermais e tectônicos que preencheram esses espaços vazios por diques, *sills* e mineralizações, aumentando a heterogeneidade da área estudada.

Palavras-chave: Exploração Hidrogeológica; Aquífero Fraturado; Sistema Aquífero Serra Geral.

ABSTRACT

The Serra Geral Aquifer System (SASG) is of great importance due to the fact that most municipalities located in the Serra Geral Group use their underground water for public and private consumption. The demand, combined with the conquest and low cost tools available, nowadays has increasing the studies of the SASG. The study area is located at Frederico Westphalen's Chart, northwest of Rio Grande do Sul and southwest of Santa Catarina, in the Alto Uruguai region, with a scale of 1:100,000. The demand for groundwater in this region is mainly in the watering of animals, industry, agriculture and tourism of waters with geothermal characteristics. Geologically, the studied quadrant is located in the Serra Geral Group, with a predominant presence of basalts and strong structuring of brittle tectonics. Thereby, the objective of this work is to determine the hydrogeological characteristics of Folha de Frederico Westphalen. The methodology used consist of create and adjuste the database of georeferenced wells in the region, using the specific capacity, complementation of linear structures (lineaments) made by means of satellite images and processing in Geographic Information System (GIS), generation of thematic maps and statistical analysis of the collected data. 922 photogeological lineaments were identified with four main trends, the N050-070W, N350-NS, N320-340W and E-W. From the three spatialized domains, it was observed that the lineament density has a strong correlation with the relief, and that the highest densities are present south of the Chart, represented by Domain 3 and 2. In general, the water productivity underground in the studied area is low. In the 223 wells, they present an average of 0.7 m³/h/m. From the boxplot of density classes in relation to specific capacity, it is observed that Domain 3 had the highest groundwater potential, followed by Domain 1. Domain 2 had lower productivity. However, it was verified that the relationships are not so clear, possibly due to the regional occurrence of hydrothermal and tectonic processes that filled these empty spaces by dikes, sills and mineralizations, increasing the heterogeneity of the studied area.

Keywords: Hydrogeological Exploration; Fractured Groundwater; Serra Geral Aquifer System.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Mapa de localização da área de estudo, principais cidades, rodovias e poços hídricos da área de estudo. Projeção UTM 22J; Datum: WGS 84.....	13
Figura 2	Mapa regional com abrangência da Bacia Sedimentar do Paraná. Percebe-se, em cinza escuro, sedimentos pós vulcânicos, da Formação Bauru e outras unidades. Em cinza claro, vê-se o Grupo Serra Geral.	15
Figura 3	Mapa de Domínios dos relevos na área de estudo: O domínio mais representativo é o Planalto Dissecado do Rio Uruguai.	20
Figura 4	Mapa topográfico da área de estudo, em porcentagem, observa-se que as classes presentes estão, principalmente, acima de 8% de declividade.	21
Figura 5	Padrões de disjunção dos derrames na Formação Serra Geral A) disjunções verticais geram encostas convexas e de maior declividade; B) disjunções horizontais e geram encostas côncavas.	22
Figura 6	Condições de produtividade de água subterrânea e as drenagens da Folha Frederico Westphalen.	23
Figura 7	Esquema do ciclo hidrológico.....	24
Figura 8	Seção esquemática dos aquíferos confinados e não confinados.....	25
Figura 9	Esquema de um boxplot e seu significado.	31
Figura 10	Fluxograma das atividades realizadas.	36
Figura 11	Domínios estruturais da região: Domínio 1, Domínio 2 e Domínio 3.....	37
Figura 12	Mapa dos domínios estruturais, densidade de lineamento (áreas mais representativas com destaque pelas elipses).....	38
Figura 13	Diagramas estatístico de roseta absoluto dos lineamentos nos três domínios estruturais	39
Figura 14	Boxplot com os dados referentes aos domínios estruturais <i>versus</i> capacidade específica.....	42
Figura 15	Boxplot com os dados referentes as classes de densidade de lineamento (baixa, média e alta) em relação a vazão específica.....	43
Figura 16	Mapa das capacidades específicas, densidade de lineamento a partir dos domínios estruturais.	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Parâmetros e descrições de descontinuidades estruturais.	27
Tabela 2 Dados gerais e de medidas centrais da capacidade específica dos poços tubulares profundos.....	41
Tabela 3 Dados de parâmetros estatísticos quanto a capacidade específica (m ³ /h/m) e as classes de densidade de lineamento.....	42

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	OBJETIVOS	11
1.2	JUSTIFICATIVA.....	11
2	ÁREA DE ESTUDO.....	13
2.1	Contexto geológico	14
2.2	Geologia Estrutural	17
2.3	Geomorfologia e topografia	19
2.4	Características Hidrogeológicas	22
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
3.1	Conceitos importantes da hidrogeologia em aquíferos fraturados	24
3.2	Descontinuidades geológicas	26
3.3	Métodos Indiretos de Investigação Hidrogeológica	28
3.3.1	Sensoriamento Remoto	28
3.4	Estatística univariada	29
3.5	Trabalhos Aplicados à Hidrogeologia	31
4	MATERIAL E MÉTODO	33
4.1	Base Cartográfica.....	33
4.1.1	Coleta e geração da base de dados.....	33
4.1.2	Manipulação dos dados.....	34
4.1.2.1	Tabulação.....	34
4.1.2.2	Geoprocessamento.....	34
4.1.3	Análise Estatística.....	35
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
5.1	Contexto estrutural da Folha Frederico Westphalen	37
5.2	Produtividade dos poços tubulares na Folha Frederico Westphalen	40
6	CONCLUSÕES	46
	REFERÊNCIAS.....	48
	ANEXOS	52

1 INTRODUÇÃO

O Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) é referido por Athayde (2013), Severgnini; Bortolin; Reginato (2021) e Licht; Arioli (2021) como aquíferos fraturados de origem vulcânica com sistema hídrico heterogêneo, anisotrópico e com propriedades petrofísicas do Grupo Serra Geral. Licht; Arioli (2021) ainda salienta que as fraturas do Grupo Serra Geral são provocadas por mecanismos de resfriamento (fraturas, entablamento e disjunções colunares) e/ou por deformações tectônicas rúpteis, como falhas e fraturas. O estudo dos recursos hídricos subterrâneos no SASG tem aumentado por ser uma alternativa segura quanto à potabilidade e disponibilidade para o abastecimento público e privado no ambiente urbano e rural, comparado às águas superficiais que, muitas vezes, sofrem estiagem (HIRATA *et al.*, 2019).

Na denominada Região do Alto Uruguai, localizada à noroeste do Rio Grande do Sul e sudoeste de Santa Catarina, com águas subterrâneas inseridas no SASG. A região enquadra-se no SASG I, com baixa produtividade, chegando a 2 m³/h/m de sua capacidade específica e o SASG II, com produtividade muito baixa, com no máximo 0,5 m³/h/m (CPRM, 2007). Esta região encontra-se inclusa na folha SG.22-Y-C-II (Frederico Westphalen), com escala de 1:100.000 conforme Dias; Parisi (2007).

Uma fonte importante de informações para estudos e caracterização de aquíferos consiste no denominado acervo do Sistema de Informação de Águas Subterrâneas (SIAGAS). A Folha Frederico Westphalen dispõe de um total de 345 poços registrados. Através desses poços, isentando-se os clandestinos, somam cerca de 80% de consumo hídrico da região utilizadas em diversos setores, principalmente para o abastecimento público, dessedentação de animais, indústria, agricultura e o turismo das águas de características geotermiais (FREDERICO WESTPHALEN, 2011).

A circulação e armazenamento das águas subterrâneas em rochas fissuradas se dão pelos interstícios (descontinuidades), como informa Cunha (2014) e a exploração das reservas de água para uso humano (doméstico e industrial) levam a uma crescente demanda quanto à necessidade de se utilizar tentativas de racionalizar a forma mais eficiente de locação de poços. Desta maneira, o conhecimento científico do âmbito do “potencial” de um determinado aquífero faz-se primordial nos dias de hoje.

O uso de informações oriundas de poços (Rede SIAGAS) e bases de dados digitais cartográficas, bibliográficas de domínio público, podem ser manipuladas e processadas por meio de softwares de código aberto (gratuitos). Consistem em importantes aliados para pesquisadores e estudantes das diferentes áreas das Ciências da Terra.

A utilização de dados como características do terreno (topografia), o arcabouço estrutural, as litologias e suas espessuras, consistem em importantes informações diretas na análise do potencial aquífero da região. Como complemento importante, a integração dessas informações, por meio de uma base de dados consistente, aliada a dados indiretos como imagens de satélite oferecem significantes resultados em estudos do potencial hidrogeológico.

1.1 OBJETIVOS

Determinar as características hidrogeológicas do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) na Folha Frederico Westphalen no Alto do Rio Uruguai.

Os objetivos específicos são:

- Identificar feições lineares (lineamentos) estruturais, direções preferenciais (*trend*) e densidades dos principais lineamentos existentes da região;
- Identificar e especializar os domínios estruturais;
- Correlacionar a relação espacial e direcional dos lineamentos da Folha de Frederico Westphalen;
- Identificar estatisticamente a capacidade específica dos poços por domínios estruturais e correlacionar com a densidade de lineamentos.

1.2 JUSTIFICATIVA

A região oeste dos estados do Paraná e Santa Catarina e porção norte do Rio Grande do Sul têm como principal fonte de águas subterrâneas o SASG. A utilização das águas subterrâneas desse aquífero tem crescido exponencialmente. Um fator de grande importância nos estudos do SASG é a conectividade com o Aquífero Guarani, onde o último é considerado um dos mais aquíferos com maior potencial produtivo do mundo (SCHEIBE; HIRATA, 2008).

A área de estudo é compreendida pela microrregião de Frederico Westphalen e sua economia é baseada principalmente pelas atividades agrícolas (principalmente soja, trigo e milho), pecuária, avicultura e suinocultura, onde 53,8% da população está ocupada neste nicho. Além disso, destacam-se também as atividades de mineração e de serviços, conforme Arns; Piovezana (2009). Além do uso comercial, a água subterrânea tem grande importância no abastecimento público, sobretudo por saber que em Frederico Westphalen esse recurso abastece no mínimo 959 famílias (FREDERICO WESTPHALEN, 2011). Por isso, existe uma alta demanda de recursos hídricos para o setor público e privado.

A crescente demanda e interesse pela exploração das águas subterrâneas devem-se aos baixos custos de tratamento comparado às águas superficiais (que estão mais suscetíveis à contaminação) e pelas técnicas de exploração atualmente acessíveis (HIRATA *et al.*, 2019).

Consequentemente, estes elementos proporcionam qualitativa e quantitativamente compreender-se a realidade geológica e sua influência e dinâmicas no armazenamento das águas subterrâneas.

O contexto socioeconômico aliado a uma análise exploratória no auxílio a classificação das áreas mais favoráveis à exploração da água subterrânea no Alto Uruguai.

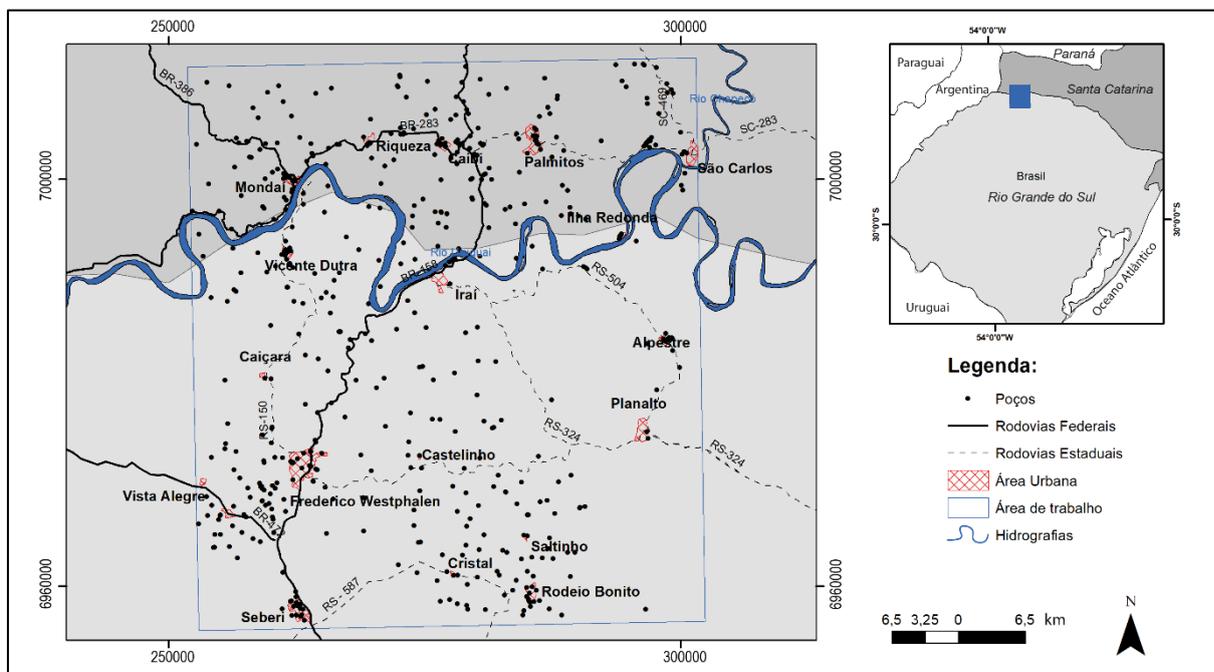
2 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo localiza-se na porção sul da Bacia do Paraná, reconhecida como uma bacia intracratônica sul-americana, preenchida por rochas sedimentares e vulcânicas, com idades que variam entre o Siluriano e o Cretáceo, compreendendo uma área de 1.400.000 km² (ZALÁN *et al.*, 1990). No contexto da Bacia do Paraná, a área de trabalho situa-se na porção denominada de Alto Uruguai.

Os limites da região são representados pela Folha SG.22-Y-C-II (Frederico Westphalen) na escala 1:100.000 e área total de 2746 km², situada a noroeste do Rio Grande do Sul e a sudoeste de Santa Catarina (DIAS; PARISI, 2007), como vê-se na Figura 1.

O acesso a área se dá por rodovias federais, como BR-386, BR 472 e BR-283 e vias estaduais, como as RS-587, RS-591, RS-150, RS-504, RS-406 e a SC-469 (Figura 1). Os municípios que estão presentes são: Alpestre, Iraí, Castelinho, Rodeio Bonito, Planalto, Castelinho, Palmitos, São Carlos, Ilha Redonda, Seberi, Frederico Westphalen, Vista Alegre, Caiçara, Vicente Dutra, Mondai e Riqueza.

Figura 1. Mapa de localização da área de estudo, principais cidades, rodovias e poços hídricos da área de estudo. Projeção UTM 22J; Datum: WGS 84.



Fonte: Autor.

2.1 Contexto geológico

No contexto regional, a área de estudo está situada na Bacia do Paraná, tendo como principal representante litológico a Formação Serra Geral (DIAS; PARISI, 2007). É também denominada como Província Magmática do Paraná (PMP), que consiste em uma feição gerada pelo evento magmático de abertura do Atlântico Sul. De forma similar, a Província Etendeka (situado, atualmente, nos territórios da Namíbia e Angola) corresponde a mesma ocorrência magmática e, juntos, representam o segundo maior magmatismo continental do planeta (ZALÁN *et al.*, 1990). No território sul-americano o PMP recobre cerca de 60% da Bacia Sedimentar do Paraná (LICHT, 2014; ZALÁN *et al.*, 1990).

A área proposta para uso neste trabalho está inserida no platô das rochas vulcânicas básicas do Grupo Serra Geral, onde ocorrem estratos com sucessão de derrames de lavas basálticas com espessura aflorante de cerca de 300 a 350m. (DIAS; PARISI, 2007). Comumente, na região, há intercalações de arenitos e/ou siltitos avermelhados e raramente esverdeados. Também há associações de brechas vulcânicas com espessura irregular, variando de 30-50 cm até 7 m (DIAS; PARISI, 2007).

Na região de Vista Alegre – RS (a leste da área de estudo), Gomes (1996) e Pinto; Hartmann (2011) identificaram treze níveis de derrames, que apresentam características tipicamente de fluxos pahoehoe infladas, associadas a fluxos maciços, com espessura de 10 a 70 m. Esses derrames podem ser diferenciados em duas categorias quanto aos aspectos estruturais: i) Tipo I, com espessura variando de 15 a 30 metros, topo e base amigdaloidal e setor central maciço e ii) Tipo II, com espessura de 30 a 70 m, topo e base amigdaloidal e setor central colunado e estruturas de entablamento vertical (GOMES, 1996). Entre as unidades de derrame, frequentemente há a ocorrência de “brechas hidrotermais”, com espessura média de 50 cm (PINTO; HARTMANN, 2011).

Após a identificação dos derrames, Hartmann *et al.*, (2012) detalhou a evolução dos processos magmáticos e hidrotermais relacionadas à abertura e preenchimento de cavidades (geodos), associados à formação de depósitos de ametista.

Na Figura 2 é especializado o Grupo Serra Geral que encontra-se no Brasil, Uruguai, leste Paraguai e nordeste da Argentina, com um volume 800.000 km³, há

uma exposição aproximada de 917.000 km² (ROSENSTEGEL; HARTMANN, 2012).

Figura 2 Mapa regional com abrangência da Bacia Sedimentar do Paraná. Percebe-se, em cinza escuro, sedimentos pós vulcânicos, da Formação Bauru e outras unidades. Em cinza claro, vê-se o Grupo Serra Geral.



Autor: Rosenstegel; Hartmann (2012).

O primeiro evento hidrotermal, com cerca de 1150° C, corresponde aos fluxos de lava que sobrepõem os arenitos da Formação Botucatu. Durante o resfriamento do magma, ocorreu a perda de gases e formação de vesículas nas porções superiores e inferiores do derrame. É nesse período que gera 30% da porosidade do derrame (HARTMANN *et al.*, 2012).

Posterior a isso, ocorreram sucessões hidrotermais, o primeiro, caracterizado por fases de impermeabilização e abertura da porosidade, onde ocorre a interação entre fluido aquoso (possivelmente do Aquífero Guarani) e formam argilominerais, zeólitas e cobre nativo, indicando temperaturas aproximadas de 150 °C (HARTMANN *et al.*, 2012).

O aprisionamento do vapor d'água promoveu aumento da pressão, o que

culminou em um evento explosivo, dessa maneira, promoveu a abertura de novos poros e fraturas, que, posteriormente, foi preenchido por brechas e/ou arenitos silicificados (HARTMANN; ARENA; DUARTE, 2012); esses últimos materiais citados, disponibilizou sílica no sistema que, a *posteriori*, foi precipitado por dissolução e cristalizado em forma de quartzo e calcedônia preenchendo os poros. (HARTMANN; ARENA; DUARTE, 2012). Essa impermeabilização dos poros promoveu outro aumento de pressão e gerou o último processo hidrotermal, nesse evento de alta intensidade, formou a celadonita e a esmectita. Parte das zeólitas formadas nos eventos anteriores foram dissolvidas e substituídas por sílica. No momento em que o vapor d'água ascendeu a profundidade média de 15 m abaixo da superfície, o topo do fluxo foi elevado e o vapor explodiu lateralmente gerando fraturas. As fraturas permaneceram abertas para serem preenchidas com os mesmos minerais hidrotermais presentes nos geodos. As fraturas e geodos são preenchidos principalmente com minerais de sílica, incluindo calcedônia ao longo da borda, seguida por quartzo fino, quartzo grosso e ametista.

Com o término do evento hidrotermal, falhamentos subverticais e transcorrentes foram interpretados em imagens de satélite e marcam o último evento, mas de caráter tectônico (HARTMANN et al., 2012). As falhas exibem, em campo, aspecto quebradiço em blocos de 1 a 50 cm, em zonas de aproximadamente 20 m de largura. A ausência de mineral de origem hidrotermal nos planos de falha indica o cessamento desse processo, marcando o início da formação de perfis de intemperismo (HARTMANN et al., 2012).

Petrograficamente, esses basaltos do Grupo Serra Geral da região foram descritos por Dias; Parisi (2007) e têm tonalidades que variam de cinza-escuro a preto, localmente vê-se uma coloração castanha e esverdeada. A alteração presente é esferoidal, associado a padrões densos e regulares de faturamento. Predominam texturas holocristalinas em relação as hipocristalinas. Já as rochas porfíricas ocorrem em menor proporção com fenocristais de plagioclásio e clinopiroxênio de 0,5 a 3 mm, ou ainda como glomeroporfírico. A composição modal, em média constitui 56 a 65% de plagioclásio, 25 a 38% de clinopiroxênio, 4 a 8% de olivina, 1 a 2% de opacos e traços de argilominerais e apatita (DIAS; PARISI, 2007).

Conforme Dias; Parisi (2007), em toda a porção do derrame basáltico tem-se a ocorrência isolada de tufos riolíticos aflorando em diques de 15 a 20 cm, como

preenchimento de fraturas (DIAS; PARISI, 2007).

Sotopostos ao Serra Geral, encontram-se rochas areníticas da Formação Botucatu, as duas compõem o Grupo São Bento, de idade Juro-Cretácea. Os mapeamentos geológicos da região estudada evidenciam que não há afloramentos do Botucatu (FREITAS *et al.*, 2002; DIAS; PARISI, 2007).

A evolução dos estudos geoquímicos classifica o Grupo Serra Geral a partir da quantidade, razão de óxidos e razões dos elementos-traços, criando magmas-tipos e fácies geoquímicas. Com isso, é possível afirmar que cerca de 97% do Grupo é constituída por rochas vulcânicas básicas representadas por basaltos e andesi-basaltos com afinidade toleítica, além dos diques e *sills* (PEATE; HAWKESWORTH; MANTOVANI, 1992). Somente 3% do vulcanismo Serra Geral ocorrem litotipos de natureza ácida, desses, 2,5% correspondem às rochas Ácidas do Tipo Palmas (ATP), enquanto 0,5%, rochas Ácidas Tipo Chapecó (ATC) (PEATE; HAWKESWORTH; MANTOVANI, 1992).

A partir dessa classificação, Roisenberg; Viero (2000) identificaram que a região Noroeste do estado do Rio Grande do Sul apresenta basaltos tipo alto-TiO₂, que ocorrem intercalados com basalto tipo baixo-TiO₂, havendo pouco registro das rochas ácidas do tipo Chapecó.

2.2 Geologia Estrutural

O estudo de Zalán *et al.*, (1990) discorre que um dos eventos tectônicos de grande expressão na Bacia do Paraná foi desenvolvido no período Juro-Cretáceo, na separação do Gondwana e teve como resposta arcos e flexuras estruturais, assim sendo desenvolvido o Arco de Ponta Grossa e o Arco de Rio Grande, ambos com direção NW. Possivelmente, esses arcos são respostas de antigas falhas profundas, detectados de forma expressiva em estudos a partir de dados aeromagnetométricos. Estes, indicam feições associadas a espessos diques de diabásio derivados do manto e que podem ter atuado como dutos alimentadores do derrame do Grupo Serra Geral (ZALAN *et al.* (1990).

Como resposta a essas distensões na crosta, entre os dois arcos, há a Sinclinal de Torres, também situada em uma direção a NW, representada principalmente pelo lineamento Torres-Posadas, por isso, geneticamente, houve-se milhares de lineamentos paralelos a NW em toda a Bacia. (ZALAN *et al.*,1990).

Em contexto regional, Gomes (1996) sugere ter pelo menos dois tipos de derrames pelas características estruturais: Tipo I e Tipo II. Os derrames tipo I são menos espessos (15 a 35 m) com nível vesicular basal (50 cm), nível maciço pouco fraturado (10 a 25 m), nível com fraturas horizontais (2 a 4 m) e nível superior (topo) com vesículas/amígdalas milimétricas (1 a 2 m). Já os derrames tipo II são mais espessos (30 a 50 m), exibindo um nível vesicular basal, ocasionalmente vesículas do tipo pipe (40 a 100 cm), um nível maciço constituído por três setores, sendo o primeiro nível colunado, apresentando fraturas verticais e ortogonais, com prismas regulares de 0,5 a $\frac{1}{3}$ do derrame, o segundo nível apresentando entablamento irregular, contendo de 25 a 30 m de espessura e o terceiro nível, apresentando disjunção colunar (espessura média de 10 m). O topo é constituído do nível vesicular, com espessura que atinge até 10 m (GOMES, 1996).

O contexto estrutural local sofre influência das direções N300 – N310 e N30 – N40, relacionando-se ao lineamento Torres-Posadas, que se apresentam como um sistema e, ao serem escalonados, geram rupturas para a colocação de enxames de diques e *sills* na bacia, assim essa estruturação evidencia a justaposição lateral e vertical pelas falhas normais (DIAS, PARISI, 2007). A movimentação de escalonamento se dá pelas falhas transformantes desempenhadas pelo *trend* N30 - N40 (DIAS, PARISI, 2007).

O segundo evento, ocorre nas direções N340 – NS - N60 - N80 e EW. De origem pré e sin-deriva continental, ocorrem transversalmente aos grandes arqueamentos, neles também há a ocorrência de enxames de diques. As transições da direção N340 para NS, N60 - N70 para EW podem significar uma mudança na direção dos campos de tensões com tectonismo tardio. O último *trend* apresenta falhas transferentes (DIAS, PARISI, 2007). A malha composta por esses dois sistemas estruturais possivelmente favoreceu a ocorrência de blocos falhados. (DIAS; PARISI, 2007).

Dias; Parisi (2007) descrevem, a partir das características estruturais da região, três domínios estruturais: Planalto-Ametista do Sul, Frederico Westphalen – Seberi e Palmitos – Mondai, entretanto esses domínios carecem espacialização no mapeamento da região.

O bloco Planalto – Ametista do Sul ocorre na porção centro-sudeste da área, a partir da foz do rio Várzea. É representado por um alto topográfico segmentado por blocos falhados principalmente em N300 - N310. Na porção Sul desse bloco

possivelmente ocorre movimentação sinclinal, pois há evidências de falhas no sentido S-SW chegando a E-W e N-S. Na porção Norte do bloco ocorre o domínio N300 - N310 marcado fortemente pelas estruturas N60 - N70 e N340 – NS (DIAS; PARISI, 2007).

No Domínio Frederico Westphalen – Seberi, situado de SW a NE, ocorrem como braquianticlinal (domos alongados) e é marcado por lineamentos com direção N340. O flanco da porção Leste da braquianticlinal apresenta caimento para sudoeste. A relação de contato entre os outros dois domínios é expressa por baixos topográficos, nas redondezas da foz do rio da Várzea (DIAS; PARISI, 2007).

O Domínio Palmitos – Mondaí situa-se principalmente na porção Norte da Folha, em Santa Catarina, onde ocorre a interação dos trends 300-310, 340-NS, EW, 080-070 e em menor escala o 030-040. Os autores definem que este planalto pode representar uma estrutura homoclinal, na parte mais a Sul, no rio Uruguai se justapõe com uma anticlinal de direção 060-070 e com o domínio Planalto – Ametista do Sul (DIAS; PARISI, 2007).

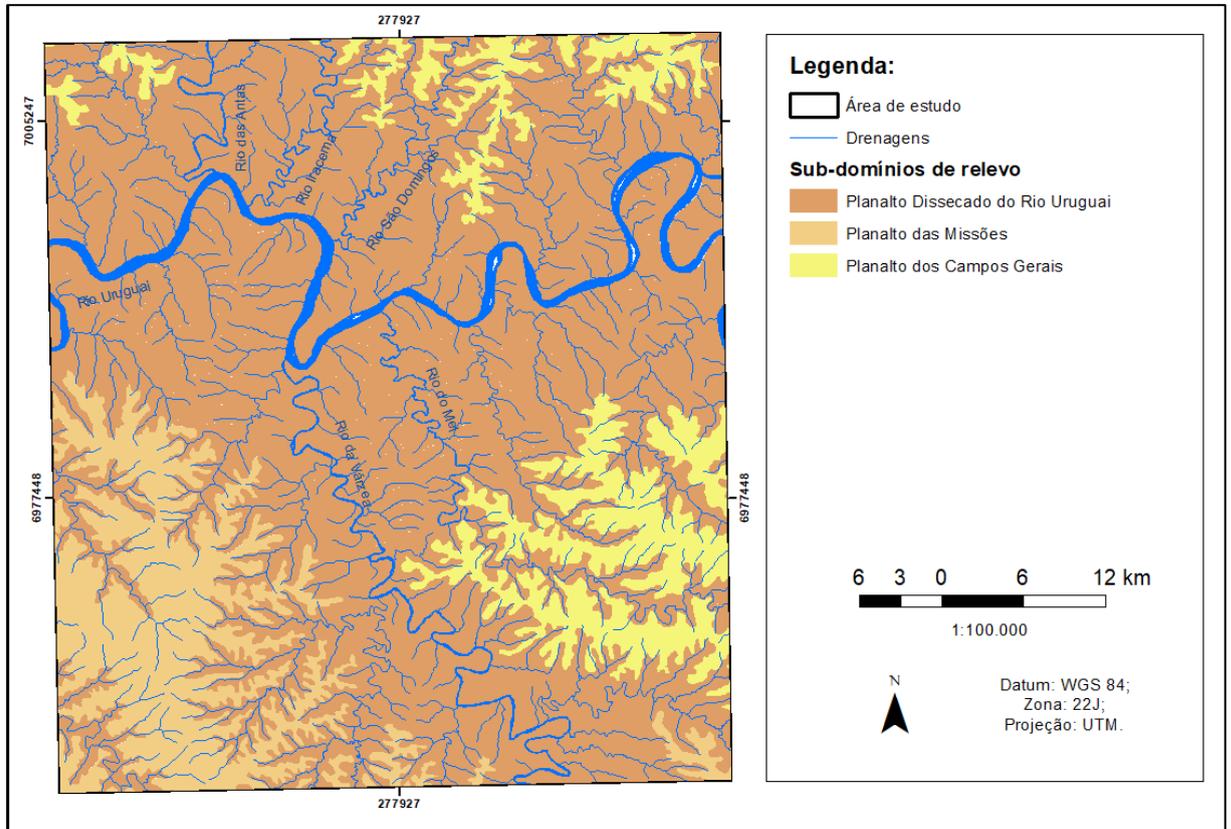
2.3 Geomorfologia e topografia

A evolução geomorfológica se dá pela interação de fatores endógenos, representados principalmente pelas atividades tectônicas pretéritas, neotectônicas e a diversidade e distribuição das litologias, com as ações exógenas: clima, vegetação e tipo de solo (CHRISTOFOLETTI, 1982).

A região de estudo encontra-se, principalmente, na Unidade Geomorfológica Planalto Dissecado do Rio Iguaçu-Uruguai (Figura 3) que é caracterizado por modelados resultantes dos processos de dissecação, sobretudo fluviais, associados a fatores estruturais. É por isso que o rio Uruguai apresenta-se encaixado e sinuoso (com meandros). Além disso, também há presença do Planalto Campos Gerais. Estas classes de relevo são pertencentes à Região Geomorfológica Planalto das Araucárias (IBGE, 2003). As características dessa Unidade são relevo dissecado, com vales profundos e encostas escalonadas em patamares que são resultados da interação litoestrutural e processos denudacionais. O grau de dissecação está diretamente relacionado com a sequência de derrames, a morfologia e a heterogênea estrutura da

litologia (COSTA; BUSS; ROSA, 2018; IBGE, 2003).

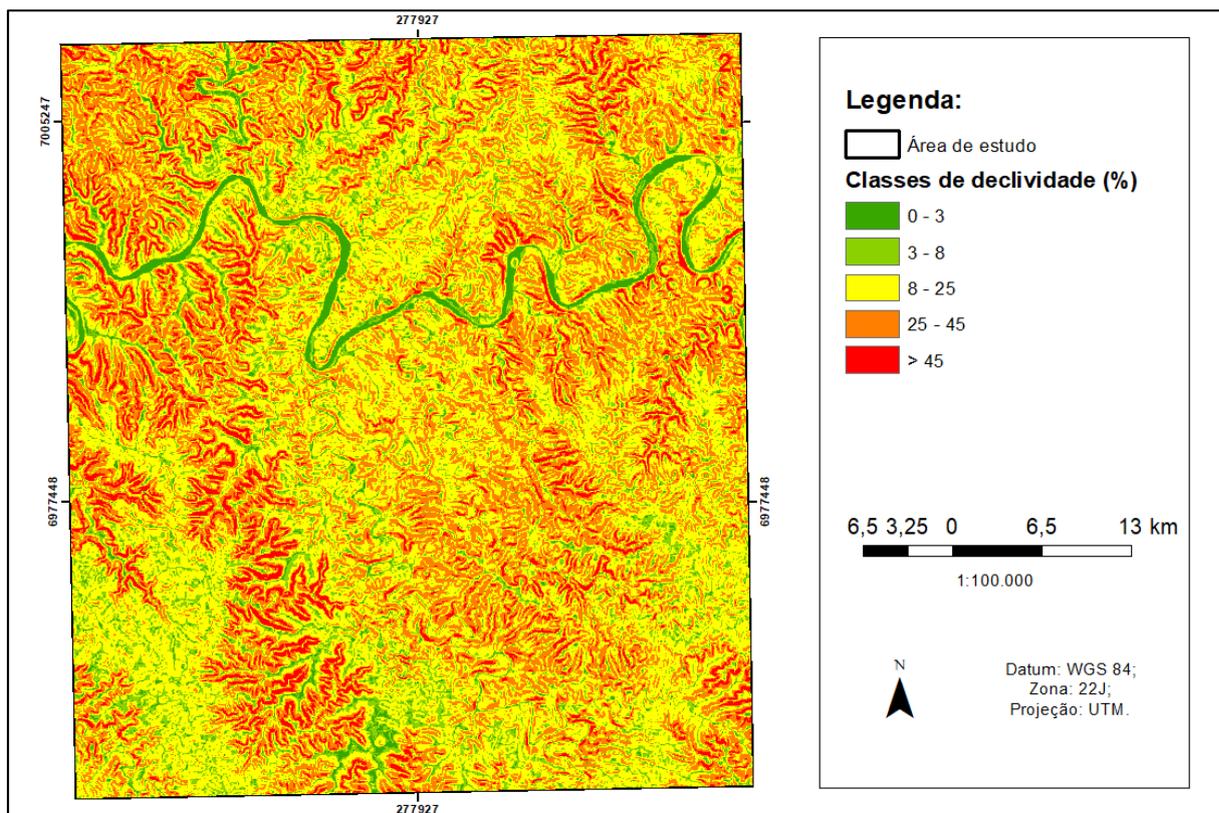
Figura 3 Mapa de Domínios dos relevos na área de estudo: O domínio mais representativo é o Planalto Dissecado do Rio Uruguai.



Fonte: Adaptado de CPRM (2007).

A topografia responde diretamente nessas dissecções, como pode-se ver na Figura 4, as classes de declividade mais representativas na área de estudo são (em ordem decrescente): 8 - 25%, 25 - 45% e 3 - 8%, que corresponde, respectivamente a 53%, 19,4% e 19,1% do quadrante. As áreas centrais e a norte representam áreas de maior declividade.

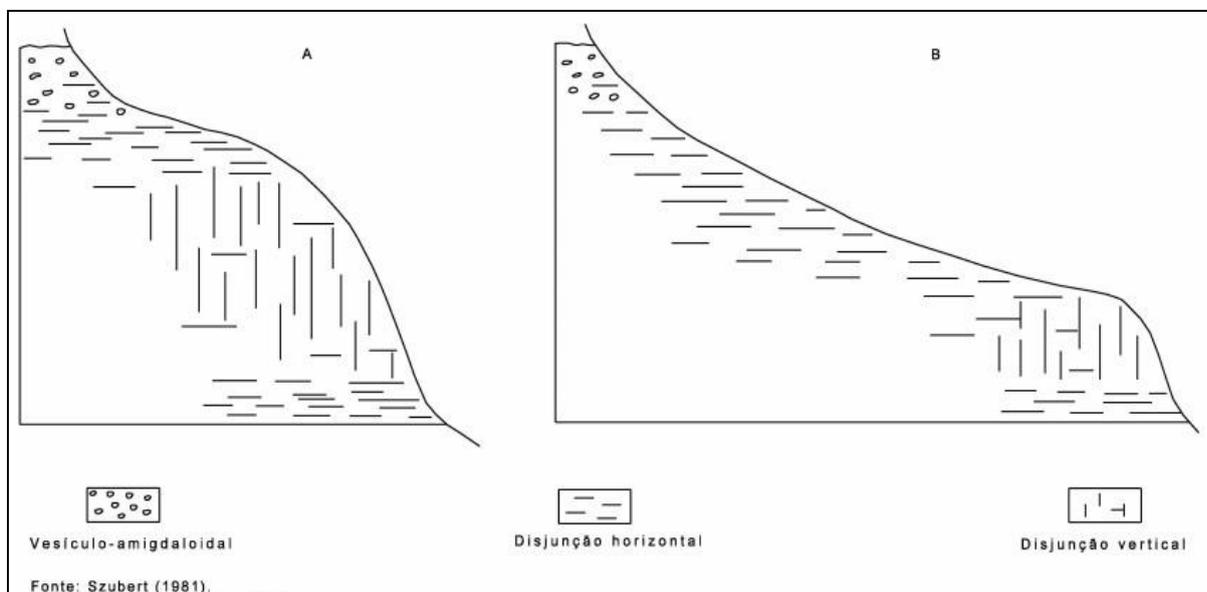
Figura 4 Mapa topográfico da área de estudo, em porcentagem, observa-se que as classes presentes estão, principalmente, acima de 8% de declividade.



Fonte: Adaptado de CPRM (2007).

Há feições morfológicas caracterizadas por interflúvios em “V” estreitos com topos planos ou levemente convexos e com encostas com alta declividade, onde configura-se escalonamento em patamares. Esses patamares são decorrentes do padrão das disjunções dos derrames. As variações nesses patamares estruturais ocorrem em maior ou menor espessura em relação às zonas do derrame, e/ou presença da interação vulcano-sedimentar. Acredita-se que um derrame onde as zonas de disjunção horizontal sejam mais espessas que a vertical resulta em patamares mais largos e com menor declividade, como pode ser observado na Figura 5 (COSTA; BUSS; ROSA, 2018).

Figura 5 Padrões de disjunção dos derrames na Formação Serra Geral A) disjunções verticais geram encostas convexas e de maior declividade; B) disjunções horizontais e geram encostas côncavas.



Fonte: Costa; Buss; Rosa (2018).

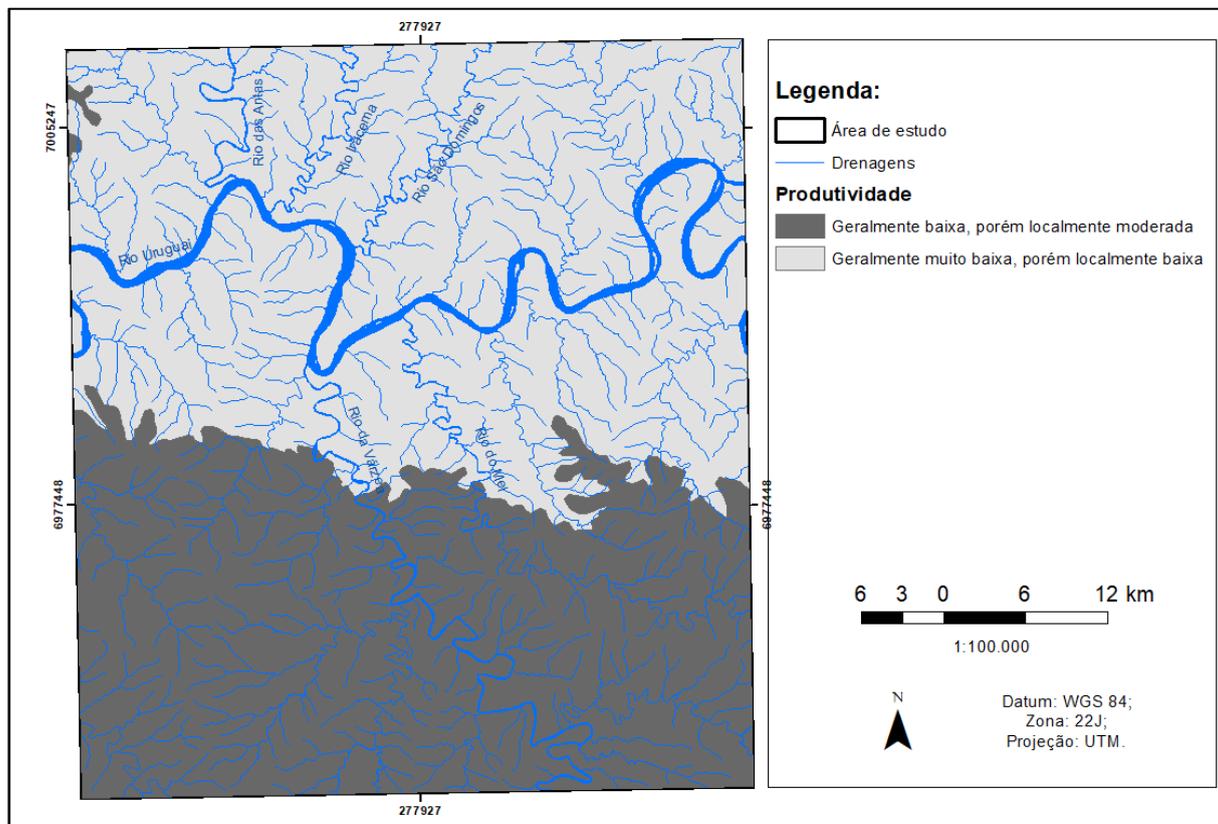
2.4 Características Hidrogeológicas

Na área de estudo, a captação de água subterrânea se dá pelos aquíferos porosos e confinados. Os aquíferos porosos armazenam água principalmente pela porosidade da rocha. Na área, esse tipo de aquífero é representado pelo Aquífero Guarani, que ocorre em profundidades maiores que 800m e estão sotopostos pelos derrames basálticos do Serra Geral (DIAS; PARISI, 2007).

Os aquíferos fraturados e confinados são caracterizados pelo armazenamento e circulação de água nas juntas e fraturas a partir da interligação das mesmas (FREITAS *et al.*, 2002; SINGHAL; GUPTA, 2010). Na região, esse sistema de aquífero é o mais representativo, com ocorrência no Grupo Serra Geral.

A Figura 6 representa a produtividade quanto a hidroestratigrafia aflorante, ou seja, o Sistema Aquífero Serra Geral. A classe a norte, geralmente muito baixa, porém localmente baixa consiste em capacidade específica entre 0,04 a 0,4 m³/h/m. Já a classe a sul: geralmente baixa, porém localmente moderada tem uma capacidade específica entre 0,4 chegando até 1 m³/h/m (DINIZ *et al.*, 2014).

Figura 6 Condições de produtividade de água subterrânea e as drenagens da Folha Frederico Westphalen.



Fonte: Autor.

A presença da água no Aquífero Serra Geral está condicionada à permeabilidade horizontal e vertical, que se comunicam nas descontinuidades interderrames (FREITAS *et al.*, 2002). Entretanto, apresentam características hidrogeológicas anisotrópicas e heterogêneas, podendo haver aquíferos livres e, também confinados, conforme Freitas *et al.*, (2002) que exemplificam por meio da presença de poços jorrantes com dezenas de metros de distância dos poços livres.

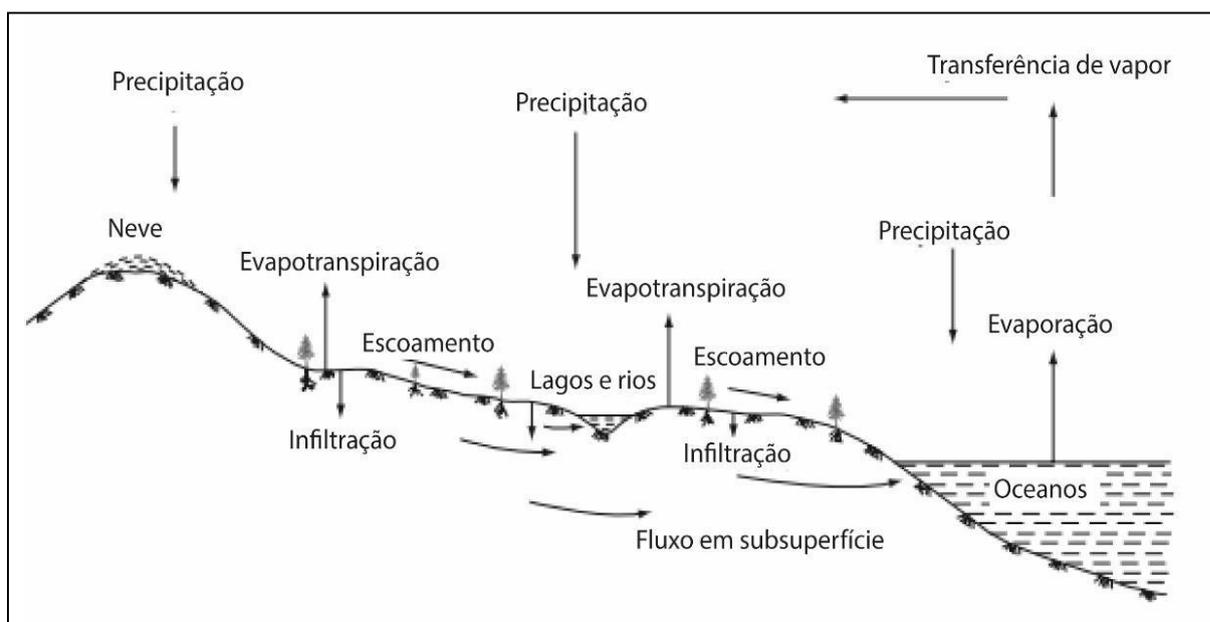
Os fatores geológicos que colaboram com o armazenamento e circulação da água subterrânea no basalto do SASG na área de estudo são diversos, como: i) zonas vítreas com disjunções colunares (diaclasamento) que podem ter aberturas de alguns centímetros; ii) nos topos dos derrames comumente há estruturas de desgaseificação dos fluidos magmáticos (vesículas e amígdalas de até vários centímetros) associados com mistura de fluidos, fragmentos de rocha resfriada, paleosolos e sedimentos arenosos, ocorrendo as autobrechas; iii) a presença dessas estruturas interligadas com falhamentos e/ou fraturamentos. (FREITAS *et al.*, 2002).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Conceitos importantes da hidrogeologia em aquíferos fraturados

O ciclo hidrológico (visto na Figura 7), pode ser definido como a circulação da água sob os estados gasosos, líquidos e sólidos entre a atmosfera, oceanos, superfície e subsuperfície (SINGHAL; GUPTA, 2010; FREITAS *et al.*, 2002). Em setores da atmosfera, pode-se ter a água gasosa condensada resultando na precipitação de chuva e/ou neve. Quando a precipitação atinge a superfície pode escoar como fluxo superficial e parte ser infiltrado no solo. Uma porção dessa infiltração flui para reservatórios de águas subterrâneas, enquanto outra parte, de profundidades rasas, retorna à atmosfera pela evapotranspiração (SINGHAL; GUPTA, 2010).

Figura 7 Esquema do ciclo hidrológico.



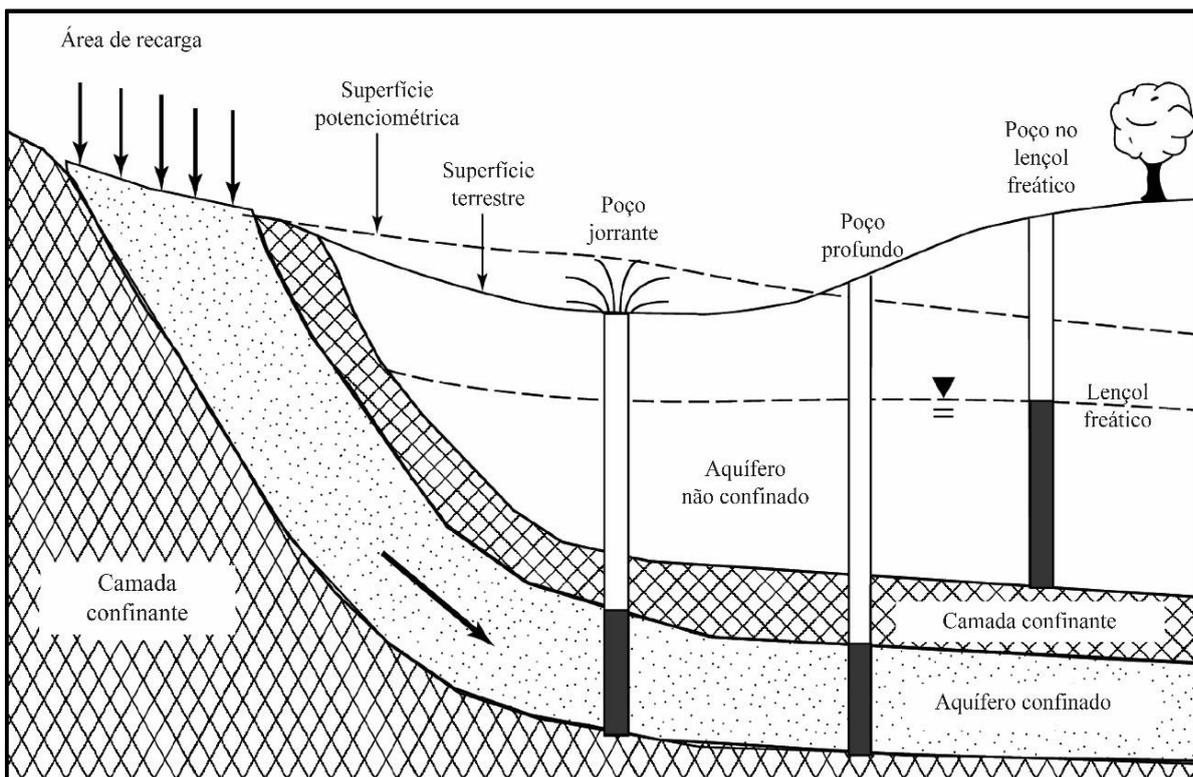
Fonte: Modificado de Singhal; Gupta (2010).

O processo de infiltração em rochas fraturadas ocorre superficialmente pelos solos, discontinuidades e estruturas geológicas, sua recarga ocorre principalmente em áreas de afloramentos. Com recarga contínua, um aumento da infiltração nessas rochas pode ser observado devido à remoção dos materiais de preenchimentos da fratura, conforme salienta Singhal e Gupta (2010, *apud* SALVE *et al.* 2008).

Os aquíferos confinados, conhecidos também como aquíferos artesianos, estão cercados de camadas confinantes. A água nesses aquíferos é submetida a pressões

maiores que pressões atmosféricas. Como parâmetro exclusivo desse tipo de aquífero, a superfície potenciométrica é um plano imaginário na qual a água subirá até ele nos poços drenantes, essa superfície deve estar acima da base da camada confinante superior, como é visto na Figura 8 (SINGHAL; GUPTA, 2010).

Figura 8 Seção esquemática dos aquíferos confinados e não confinados.



Fonte: Modificado de Singhal; Gupta (2010).

De acordo com Singhal; Gupta (2010), os aquíferos fraturados podem ter três condições geológicas: i) formação estratiforme de múltipla camada que ocorrem com monoclinais ou sinclinais e formam sistema de alta pressão, como exemplo a *Great Artesian Basin* na Austrália, *Dakota Sandstones* nos Estados Unidos da América (EUA); ii) fraturas ocorrem em aquíferos de rochas ígneas e metamórficas e são confinadas em juntas e fraturas. Singhal; Gupta (2010) ainda informam que podem ser confinados em alguns horizontes vesiculares e entre estruturas primárias da rocha, como fluxos magmáticos, que ocorre nos basaltos de Deccan, na Índia; iii) cavidades de solução: aquíferos em rochas solúveis, como o calcário e podem ocorrer entre condições confinadas, como a bacia Roswell no Novo México, EUA. Comumente ocorrem os aquíferos semi-confinados que podem estar cercados de aquitardos (camadas semipermeáveis) (SINGHAL; GUPTA, 2010).

A distinção entre os tipos de aquíferos não são triviais, para isso é necessário dados litológicos de subsuperfície, nível de água, parâmetros hidráulicos e conhecimento sobre as camadas confinantes (SINGHAL; GUPTA, 2010).

Para compreender a circulação e armazenamento de água na rocha é imprescindível o reconhecimento de fraturas e descontinuidades, em contrapartida, descontinuidades como falhas e diques podem dificultar a percolação do fluxo hídrico. A porosidade, permeabilidade e as características de fluxo em aquíferos confinados são de difícil mensuração por serem sistema complexos. Os fatores que dificultam essa mensuração do fluxo hídrico são diversos, como a abertura da fratura, rugosidade, geometria, tipo de intersecção e tensões litológicas (SINGHAL; GUPTA, 2010).

A partir da utilização desses parâmetros, pode-se avaliar o potencial hidrogeológico, o que Diniz *et al.* (2014) entende como algo de difícil avaliação pela complexidade dos parâmetros, mesmo assim Freitas *et al.*, (2007) interpreta o potencial hidrogeológico como a disponibilidade produtiva hídrica de determinada região, ela pode ser dada pela capacidade específica [$L^3T^{-1} \cdot m^{-1}$] que significa a vazão (Q) obtida de cada poço por metro de rebaixamento. Freitas *et al.*, (2007) salienta ainda que os potenciais hidrogeológicos brasileiros são muito variados, com capacidades específicas dos poços entre 5 e 10 e superiores a 10 $m^3/h/m$, nessas áreas mais produtivas, pode-se ter vazão por poço superior a 500 m^3/h , com rebaixamento de 50 metros do respectivo nível estático. Freitas *et al.*, (2007) exemplifica um poço nessas condições, em 16 horas de operação diária pode abastecer entre 20 a 50 mil pessoas, considerando uma taxa *per capita* de 200 L/dia.

3.2 Descontinuidades geológicas

O estudo das descontinuidades das rochas fornece subsídios para a compreensão do fluxo d'água subterrâneo. De acordo com Singhal; Gupta (2010) as descontinuidades utilizadas para o estudo do fluxo hídrico subterrâneo podem ser classificadas como:

Leitos planos: são camadas primárias originadas a partir da sedimentação da rocha sedimentar e entre as camadas tem um bom potencial de percolação e armazenamento de água, embora com dobras e metamorfismos pode-se modificar o

local e a forma de armazenamento.

Clivagem da rocha: tem como sinônimo a foliação, pois são planos de origem secundária onde a rocha tem a tendência de quebrar em superfícies paralelas. As fraturas de clivagem são produzidas por juntas muito próximas.

Fraturas: são planos originados pela tensão pela perda de coesão parcial da rocha. Fraturas e juntas não apresentam qualquer tipo de movimentação tectônica, essa é a forma de diferenciá-las das falhas. Algumas fraturas apresentam pequena abertura e ocorrem em ângulos com falhas. As fissuras apresentam maiores aberturas e quando preenchidas são chamadas de veios. Áreas com grande interconectividade de fraturas conduzem a grande condutividade hidráulica.

As fraturas são geradas por tensões de diversas origens, como: tensões tectônicas e residuais que geram deformações na rocha, contração devido ao esfriamento de magma, grandes deslizamentos de terra e o intemperismo que pode alargar cavidades ou rachaduras por dilatação (SINGHAL; GUPTA, 2010).

Singhal; Gupta (2010) enfatiza que uma única fratura é caracterizada por sua orientação, natureza genética, persistência e abertura, por exemplo. Vários planos de fratura do mesmo tipo criam um conjunto de fraturas, apresentam certo espaçamento (frequência), muitas vezes podem estar interconectadas, formando redes que facilitam o fluxo hídrico. Os fatores que influenciam na percolação da água subterrânea são demonstrados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros e descrições de descontinuidades estruturais.

Parâmetros	Descrição
1. Conjunto de números	Conjunto de números de descontinuidades presentes na rede
2. Orientação	Atitude de descontinuidade presente na rede
3. Espaçamento	Distância perpendicular entre descontinuidades adjacentes da mesma rede
4. Persistência	Comprimento do traço (lineamento) observada
5. Densidade	
– linear	Número de fraturas por unidade de comprimento
– por área	Comprimento de fraturas concentradas em uma área observada
– volumétrico	Fraturadas concentradas em uma área por unidade de volume de rocha

6. Área da fratura e forma	Área superficial com fraturas e sua forma
7. Soma de fratura por volume	Número de fraturas por metro cúbico de rocha
8. Matriz de unidade de bloco	Tamanho e forma do bloco resultante da rede de fratura
9. Conectividade	Características da intersecção e terminação das fraturas
10. Abertura	Distância perpendicular entre as paredes da rocha em uma descontinuidade
11. Rugosidade	Rugosidade da parede de rocha ao longo da superfície de descontinuidade
12. Revestimentos e preenchimentos	Materiais sólidos que revestem a parede e preenchimento ao longo da descontinuidade

Fonte: Modificado de Singhal; Gupta (2010).

3.3 Métodos Indiretos de Investigação Hidrogeológica

Os métodos indiretos de exploração hidrogeológica demonstram-se como alternativas rápidas e de baixo custo para a compreensão de diversas dinâmicas hidrogeológicas, sobretudo aliada aos dados de poços (CUNHA, 2014; SINGHAL; GUPTA, 2010). A aplicação conjunta do sensoriamento remoto com estatística dos dados de vazão dos poços são ferramentas eficazes quanto a tendências e identificação de padrões, especialmente nos parâmetros tectono-estruturais, geomorfológicos e dinâmicas hídricas a fim de reconhecer melhores locais para locação de poços, áreas produtivas, regiões de recarga e descarga e indícios de contaminação (CUNHA, 2014; SINGHAL; GUPTA, 2010).

3.3.1 Sensoriamento Remoto

A partir de informações indiretas como o Sensoriamento Remoto aliado ao relevo é possível se analisar algumas características do aquífero (CUNHA, 2014). Uma abordagem eficiente compreende o uso do Modelo Digital de Terreno (MDT) que representa as variações e características do terreno (CUNHA, 2014). Consiste em uma representação matemática da Terra (em superfície) e é obtido através de sensores de satélites como o *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM) e o *Advanced Land Observing Satellite* (ALOS), com o sensor Palsar da *Alaska Satellite Facility* (ASF) .

Os dados SRTM possuem uma cobertura global disponível com 3 arc-segundos (cerca de 30m de resolução) com a precisão absoluta da altura de cerca de 15m e a relativa <10m. O sensor Palsar oferece dados topográficos com variações de 30 a

12,5m (MACÊDO; SURYA, 2018).

Com essas informações, feições como lineamentos, quebras de relevo e fraturas podem ser aferidas em regiões de escasso mapeamento geológico de detalhe. Tais elementos consistem em importantes fatores de investigação e caracterização de aquíferos (FEITOSA *et al.*, 2008).

Para O'leary; Friedman; Pohn (1976) os lineamentos são feições que são mapeáveis, demonstram características lineares de uma superfície e podem se manifestar de maneira retilínea ou ligeiramente curvilínea. Os autores O'leary; Friedman; Pohn (1976) esclarecem que a identificação dos lineamentos pode ser através de características: i) fisiográfica: quando é expressa pelo relevo em acidentes geográficos ou em limites de áreas com morfologias distintas, mas também ii) tonal: quando distingue-se através de contraste, essa evidência está relacionada com descontinuidades, discernidas tanto na superfície do solo ou em uma imagem da superfície do solo. Além disso, integração das duas características de identificação devem cumprir com a condição de qualidade linear (O'LEARY; FRIEDMAN; POHN, 1976). A importância dos lineamentos é ampla, além de ser um parâmetro que reflete fenômenos em subsuperfície (O'LEARY; FRIEDMAN; POHN, 1976). Comumente, os lineamentos estão relacionados com sistemas de fraturas (FEITOSA *et al.*, 2008).

Algumas diferenciações do tipo de lineamentos podem ser definidas a partir de imagens de sensoriamento remoto, como: i) movimento relativo ao longo de cada descontinuidade e ii) distribuição e estatística dos lineamentos. O movimento relativo do lineamento pode indicar falhas e zonas de cisalhamento que, eventualmente, pode não demonstrar nenhum movimento. Em ambientes com poucas deformações, pode-se distinguir entre fraturas de origem cisalhante ou de tensão. O método de identificação dos lineamentos consiste em interpretação visual através das diferenças nas topologias como cores, texturas, sombra e por diferenciação (SINGHAL; GUPTA, 2010).

3.4 Estatística univariada

Compreende a análise estatística de uma variável através de medidas de posição, medidas de dispersão e medidas de forma. Dentre os atributos estatísticos utilizados neste trabalho são: média, mediana, máxima e mínima (medidas de

posição) e desvio padrão (medida de dispersão) (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989).

Segundo Isaaks; Srivastava (1989) essas medidas de posição e de dispersão são descritas como:

Média: a medida aritmética compreende o somatório dos valores dividido pelo número de dados, sendo altamente influenciada pelos valores extremos e outliers;

Mediana: representa o ponto exatamente a metade dos valores (50% dos dados), na qual, metade dos valores estão acima e metade abaixo da mediana. Não é influenciada por valores extremos e outliers porque depende apenas dos valores que estão acima e abaixo;

Mínimo: compreende o menor valor do banco de dados;

Máximo: compreende o maior valor do banco de dados;

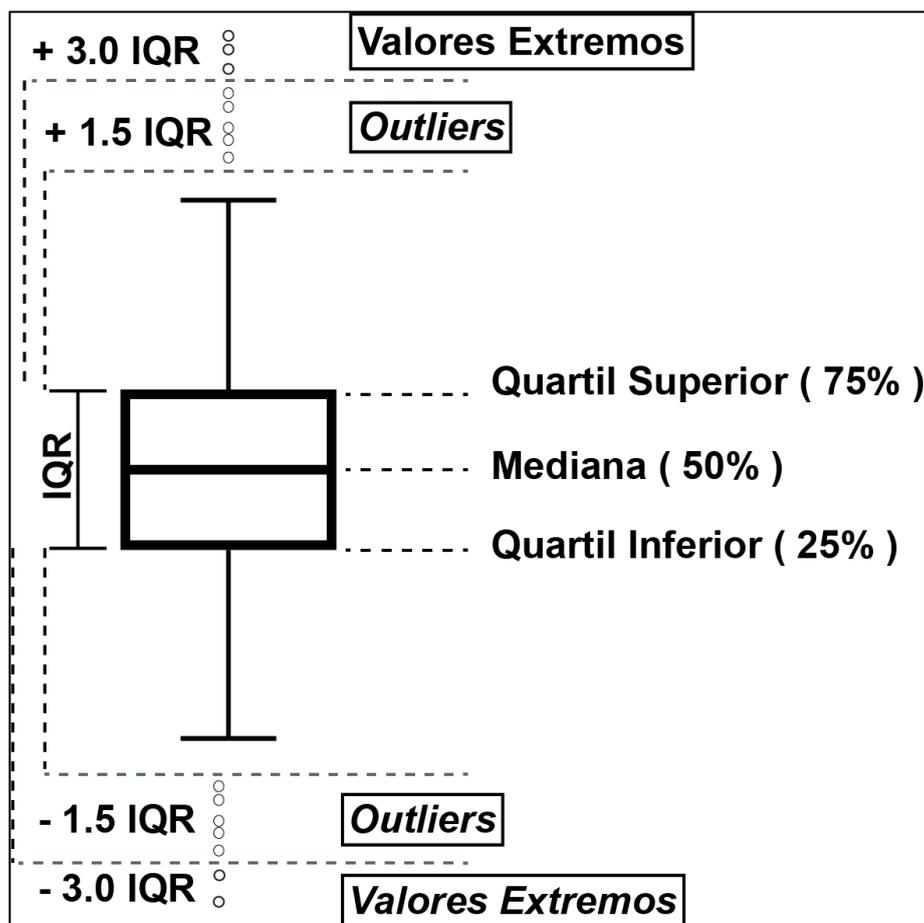
Desvio Padrão: compreende uma medida de dispersão dos dados com relação a média, sendo calculada através da fórmula:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x - \text{média})^2}{n}}$$

σ = desvio padrão; x = valor do banco de dados; n = número de dados

Outliers e Valores Extremos: representam valores que são tão diferentes dos demais valores que necessitam um tratamento especial por se tratarem por vezes de erros óbvios ou anomalias que merecem uma atenção e estudos de maior detalhe. Afetam principalmente medidas como média, medidas de dispersão e correlações entre valores (ANDRIOTTI, 2010). Como forma de tratamento desses valores, pode-se utilizar a soma ou subtração do Intervalo Inter-Quartil (IQR) partir do primeiro quartil (Q1), que representa 25% da distribuição dos dados e o terceiro quartil (Q3), que representa 75% da distribuição (ANDRIOTTI, 2010). A forma de tratamento de outliers e valores extremos é demonstrada no fluxograma da Figura 9.

Figura 9 Esquema de um boxplot e seu significado.



Fonte: Adaptado de Andriotti (2010).

3.5 Trabalhos Aplicados à Hidrogeologia

Filho *et al.*, (2002) estudaram a região centro-norte do estado do Paraná com objetivo de avaliar as dinâmicas de fluxo das águas subterrâneas a partir da trama estrutural dos dados aeromanométricos e hidroquímicos. A partir da malha reduzida ao pólo foram gerados os mapas de amplitude do sinal analítico, fase do sinal analítico e gradiente horizontal. Filho *et al.*, (2002) reconheceram os lineamentos de doleritos na direção preferencial de NW-SE, seguida das NE-SW, E- W e N-S, nesta ordem.

Os alinhamentos reconhecidos foram comparados com a distribuição espacial de parâmetros hidrogeológicos (potenciometria, vazão, capacidade específica e sólidos totais dissolvidos) de 625 poços no basalto da Formação Serra Geral. As conclusões que os autores chegaram quanto aos dados aeromagnetométricos e hídricos são: i) o Arco de Ponta Grossa está em conformidade com a topografia, o que denota um comportamento de aquífero livre, influenciando na superfície

potenciométrica ; ii) nos mapas de vazões e capacidade específica observou-se áreas de alta produtividade confinadas entre as estruturas NW-SE e NE-SW que estão controladas pelo Alinhamento São Jerônimo-Curiúva e pelo eixo do Arco de Ponta Grossa; e iii) Entre o eixo do Arco de Ponta Grossa e Alinhamento de Maringá há grande estruturação dos lineamentos e com altas capacidades específicas, mas com baixas vazões, isso indica uma circulação confinada complexa.

Um exemplo da aplicação de dados geofísicos integrados ao sensoriamento remoto é apresentado por Algaydi *et al.* (2019) para a identificação e estimativa das formações portadoras de água no oeste da Arábia Saudita. Utilizaram cinco fatores: tipo de rocha, chuva, lineamentos, densidade de drenagem e relevo. Para cada componente foi gerado uma camada no SIG colocando proporções de peso pelo nível de influência na água (tipo de rocha: 25, chuva: 16,6, lineamentos: 16,6, relevo: 25, drenagem: 16,6). A sobreposição e integração das camadas temáticas foi utilizada para gerar um mapa potencial das águas subterrâneas que classifica os potenciais em baixo, médio ou alto. Sabe-se que as classes médias ou altas representam 17-25% da área total de estudo e consistem em sedimentos quaternários e rochas fraturadas.

4 MATERIAL E MÉTODO

Para analisar as características hidrogeológicas do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) na Folha Frederico Westphalen no Alto do Rio Uruguai foi preciso conferir a bibliografia para a compreensão e utilização dos recursos disponíveis gratuitos e as técnicas adequadas quanto a: base cartográfica, coleta e geração da base de dados, manipulação de dados estatísticos e cartográficos.

4.1 Base Cartográfica

As bases cartográficas utilizadas foram: i) shapes; ii) Modelo Digital de Elevação; iii) poços tubulares.

4.1.1 Coleta e geração da base de dados

Foram coletadas informações vetoriais (shapes) topográficas, estruturais, hidrográficas e das manchas urbanas da Folha Frederico Westphalen – SG.22-Y-C-II em uma escala de 1:100.000 a partir da plataforma do GeoSGB, da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) (<https://geosgb.cprm.gov.br/geosgb>) (DIAS; PARISI, 2007). Além disso, foi coletado dados estruturais regionais na mesma plataforma com escala 1:250.000 (WILDNER *et al.*, 2008).

Os arquivos raster foram obtidos pela plataforma gratuita *EarthData*, gerido pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). Foi coletada a imagem NASADEM, com resolução de 1-arcsegundo (~30m), que é uma atualização, com correções e calibrações sobre o *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) (BUCKLEY, 2016).

Os dados dos poços tubulares foram coletados a partir da plataforma do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) através do sítio (<http://siagasweb.cprm.gov.br/>), com o recorte espacial da área de trabalho. Assim, foram obtidos 345 poços com os dados de coordenadas X e Y e capacidade específica.

4.1.2 Manipulação dos dados

Os dados obtidos foram organizados e classificados em um banco de dados direcionados à área de trabalho.

4.1.2.1 Tabulação

A partir do *software Excel 2020*, foi ajustado o banco de dados dos poços tubulares. Primeiramente, foram retirados os poços de aquíferos livres do Aquífero Guarani (em profundidades superiores a 800 m). Posteriormente, na coluna da capacidade específica, foram retiradas as informações nulas (*NULL*) com valores zerados (0).

Ainda na coluna da capacidade específica, foi utilizada a metodologia de tratamento dos *outliers* de Andriotti (2010) para tratar dados que representam erros óbvios ou anomalias que merecem um estudo de maior detalhe, com isso totalizaram 223 poços.

4.1.2.2 Geoprocessamento

Foi gerado com o *software Arcgis 10.6*:

- i) o sombreamento através do raster NASADEM com o auxílio da ferramenta do *Arctoolbox, Hillshade*, com iluminação a 45° de elevação e azimute em 315°;
- ii) lineamentos complementares aos dados coletados;
- iii) delimitação especializada dos três (3) Domínios Estruturais: Frederico Westphalen – Seberi (Domínio 1), Planalto – Ametista do Sul (Domínio 2), Palmitos – Mondaí (Domínio 3) baseado nas descrições de Dias; Parisi (2007), na morfologia vista pelo sombreamento e nos lineamentos;
- iv) a densidade de lineamento para cada Domínio Estrutural, com ajuda da ferramenta *Kernel*, com intervalos iguais e classificado em três classes (Baixa, Média e Alta).
- v) a espacialização dos poços tratados.

Com o arquivo shape dos lineamentos, foi utilizado o AzimuthFinder, desenvolvido por Queiroz; Salamuni; Nascimento (2014) (disponível em <http://www.neotectonica.ufpr.br/>) para a geração da tabela de dados azimutais. Feito isso, foi utilizado o aplicativo gratuito GeoRose (acessível em: <http://www.yongtechnology.com/>), para a geração dos diagramas de frequência de roseta para cada Domínio Estrutural. Esses diagramas foram construídos em uma semi circunferência com distanciamento de 15 graus, a saber que o espaçamento das pétalas é de 5 graus.

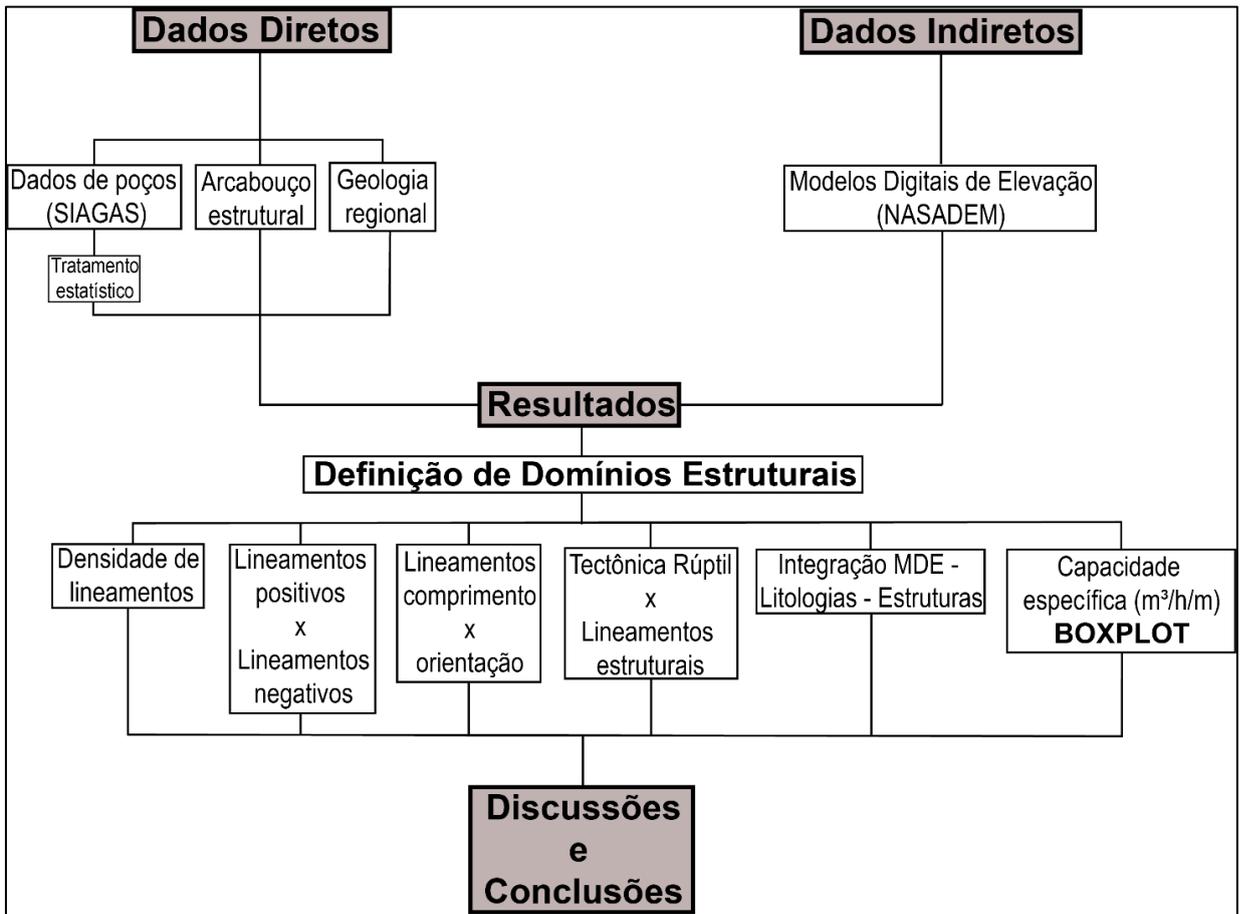
4.1.3 Análise Estatística

Foram realizadas análises estatísticas univariadas no *Excel* 2020 para compreender o comportamento de alguns padrões estruturais e da produtividade. Para isso, foram utilizadas medidas de posição, como média, mediana, máxima e mínima e medida de dispersão, como o desvio padrão.

Para direcionar essas análises em uma melhor representação, foi usado o teste, denominado Tukey, no *software livre R*, e gerado dois *boxplots*: i) da relação dos domínios estruturais com a capacidade específica e ii) das classes de densidade de lineamento em relação às classes de vazão específica.

Na Figura 10 há o fluxograma de trabalho, onde é relacionado os dados diretos, os dados indiretos, os materiais utilizados para o cumprimento do objetivo e assim, chegar aos resultados. Após isso, a discussão e a conclusão do trabalho proposto.

Figura 10 Fluxograma das atividades realizadas.



Fonte: Autor.

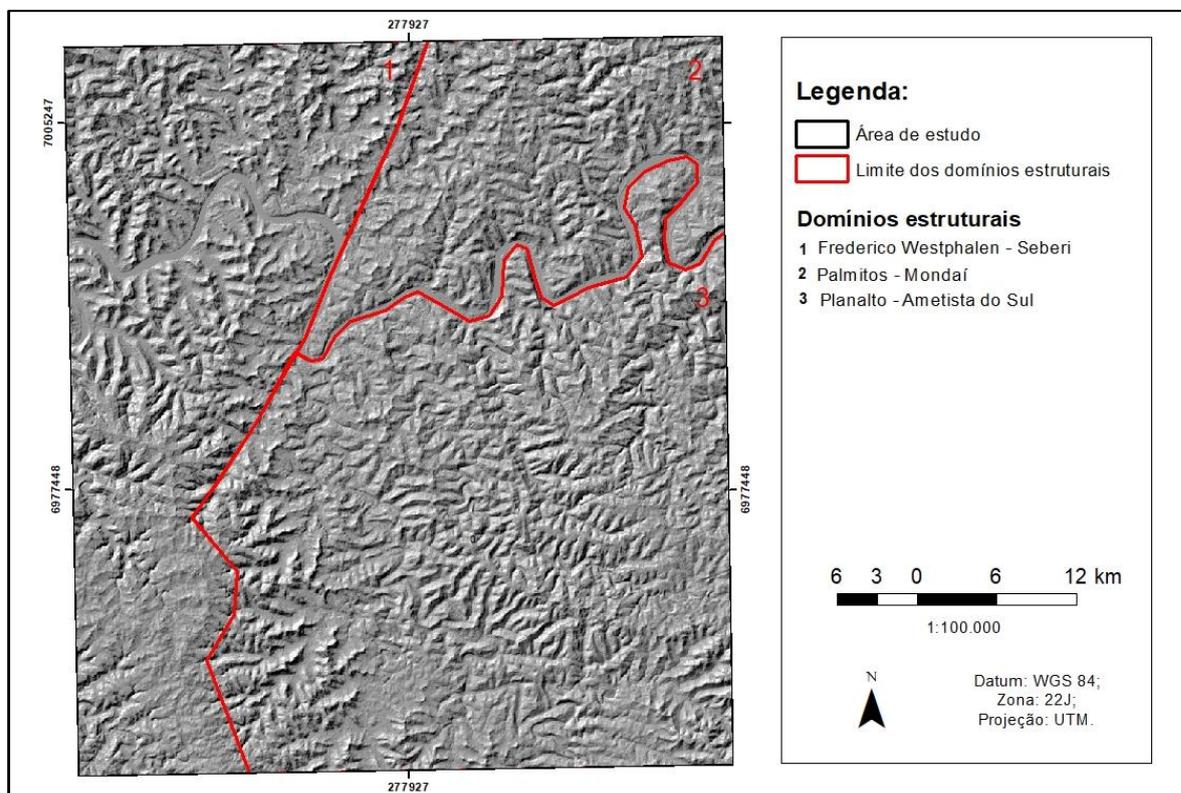
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Contexto estrutural da Folha Frederico Westphalen

Para melhor apresentação e discussão dos resultados foi realizada a espacialização dos domínios estruturais da Folha de Frederico Westphalen, visto na Figura 11:

- i) O Domínio Frederico Westphalen – Seberi (Domínio 1), representa todo o oeste e representa 34% da área de estudo. Os municípios que o englobam são: Seberi, Frederico Westphalen, Vista Alegre, Caiçara, Vicente Dutra, Mondaí e Riqueza.
- ii) O Domínio Planalto – Ametista do Sul (Domínio 2), situa-se no setor centro-leste, correspondendo a 49% da Folha. Os municípios de Palmitos, São Carlos, Ilha Redonda e Caibi encontram-se nesse domínio.
- iii) Domínio Palmitos – Mondaí (Domínio 3), que corresponde a 17% da área. Os municípios que fazem parte desse domínio são: Alpestre, Iraí, Castelinho, Rodeio Bonito, Planalto e Castelinho.

Figura 11 Domínios estruturais da região: Domínio 1, Domínio 2 e Domínio 3.

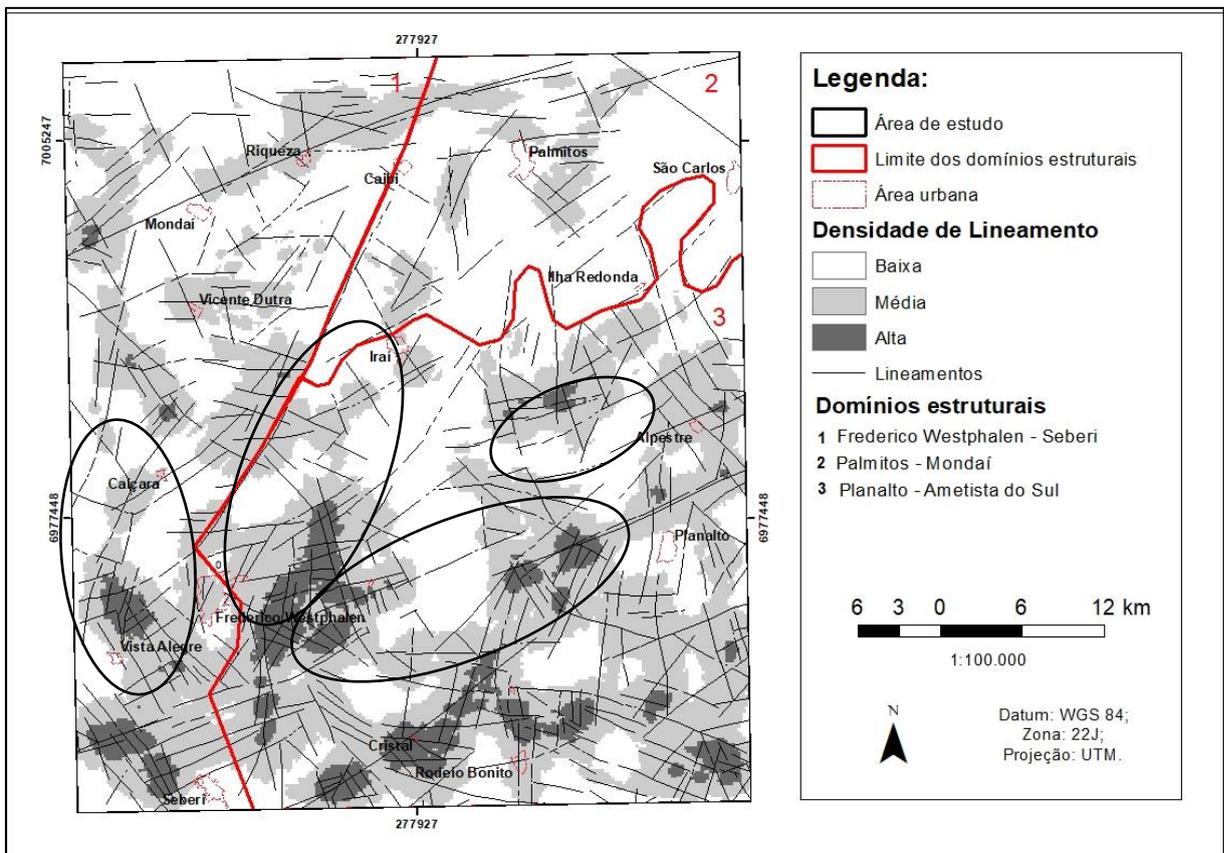


Fonte: Adaptado de Dias; Parisi (2007).

Ao longo do quadrante de estudo, foram identificados 922 lineamentos fotogeológicos. A maior densidade está situada na porção Sul da Folha, tanto no domínio 3 quanto no domínio 2. Já o Domínio 2, a norte do Rio Uruguai, apresenta as menores densidades (Figura 12). Foram identificadas quatro tendências principais para as direções de lineamento em toda a Folha, sendo elas: N050-070W, N350-NS, N320-340W e E-W (Figura 12 e 13).

As maiores densidades dos lineamentos apresentam uma relação direta com a geomorfologia regional. Os maiores índices de dissecação do relevo encontram-se na região oeste da Folha com menor presença das feições lineares, onde encontra-se o Planalto Dissecado do rio Uruguai e do Planalto de Santo Ângelo. Esses planaltos são caracterizados por um evidente controle lito-estrutural, com ocorrência de relevos muito dissecados, organizados em patamares estruturais controlados pelas litofácies dos derrames do Grupo Serra Geral.

Figura 12 Mapa dos domínios estruturais, densidade de lineamento (áreas mais representativas com destaque pelas elipses).

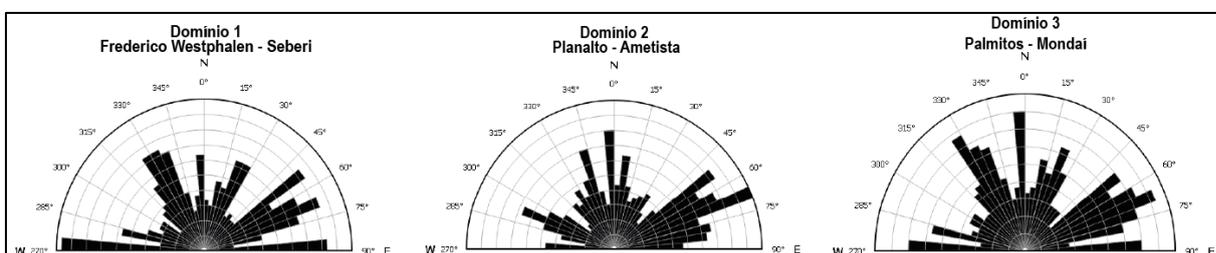


Fonte: Adaptado de Dias; Parisi (2007).

Em relação as direções dos lineamentos por domínio, o Domínio 1 apresentou

297 feições com direções preferenciais (*trend*) predominante em N050-N070, e secundariamente em E-W. Já no Domínio 2, foi encontrado 102 lineamentos com tendência às direções N050-N070, N350-N e N320-N340. O Domínio 3, apresentou 523 lineamentos, com maiores tendências a N050-N070 e, secundariamente, em N320-N340W e em N350-N. A espacialização das estruturas encontra-se na Figura 10 e as direções preferenciais e respectivas frequências no diagrama de roseta na Figura 13.

Figura 13 Diagramas estatístico de roseta absoluto dos lineamentos nos três domínios estruturais



Fonte: Autor.

O grupo de lineamentos de direção N050-070W, N320-340W e E-W é correlacionado a reativação de zona de falha na área de estudo (zona de falha Lancinha/Cubatão), reativadas sin e pós-ruptura do Gondwana e abertura do oceano Atlântico Sul (ZALÁN, 1990). O grupo de direções N350-360N e W-E é associado a estruturas neoformadas, recentemente relacionada a uma flexura crustal do Cenozóico da Placa Sul-americana, associada à subducção oceânica a oeste, embora também se reconheça que possa estar associada ao rifteamento cretáceo ocorrido durante a abertura do Atlântico Sul (Freitas et al., 2005). Lineamentos em direções NW e 330–340 foram associadas a eventos pós-hidrotermalismo na região de ametista, gerando falhas e fratura (ROSENSTENGEL; HARTMANN, 2012).

A partir das feições estruturais, arcabouço estrutural e respectivos domínios estruturais delimitados, no caso da área de estudo as evidências apresentadas apontam que os lineamentos expressam importância para águas subterrâneas são os sistemas 030-040 e 300-310 de falhas normais com acomodação de diques e *sills*, corroborados, também, por Dias; Parisi (2007). Complementarmente, Filho *et al.*, (2002) salienta que nas mesmas direções, também no SASG no estado do Paraná, há estruturas complexas de confinamento de aquífero que resultaram em grande produtividade dos poços

Adicionalmente, (Hartmann; Rosenstengel, 2012; Dias e Parisi, 2007) sugerem que essas estruturas distensivas que ocorrem na região favoreceram o controle (preenchimento) vertical por geodos de ametista e diques de arenito, além de outras feições de interação vulcano-sedimentares. Os eventos hidrotermais responsáveis pela formação de ametista foram acompanhados pela formação de uma série de processos diagenéticos sobre as litologias da área, incluindo a formação de diques de arenito, brechas de topo e preenchimento de vesículas (Hartmann; Rosenstengel, 2012; Dias e Parisi, 2007). Tais elementos contribuem de forma secundária ao estudo do potencial aquífero.

Além do contexto litológico particular da área, as condições pouco favoráveis desenvolvem-se nas espessas zonas centrais de derrames, localizadas em terrenos muito dissecados e com topografia bastante acidentada, que mesmo interceptadas por fraturas (geralmente preenchidas), demonstram baixíssima potencialidade (Freitas *et al.*, 2002). Além disso, é possível observar que o limite da área de estudo encontra-se principalmente no Planalto Dissecado do Rio Uruguai. Tal unidade geomorfológica é caracterizada por relevos muito dissecados, com declividades acentuadas, provocando rápido escoamento superficial das águas, dificultando a infiltração para o aquífero.

5.2 Produtividade dos poços tubulares na Folha Frederico Westphalen

A capacidade específica dos 223 poços tubulares analisados tem mediana de 0,235 m³/h/m, com o menor valor situado no Domínio 2 com 0,0002 m³/h/m, enquanto o maior valor (4,904 m³/h/m) encontra-se no Domínio 3. Os dados estatísticos de medidas centrais da capacidade específica de cada domínio estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2. Dados gerais e de medidas centrais da capacidade específica dos poços tubulares profundos.

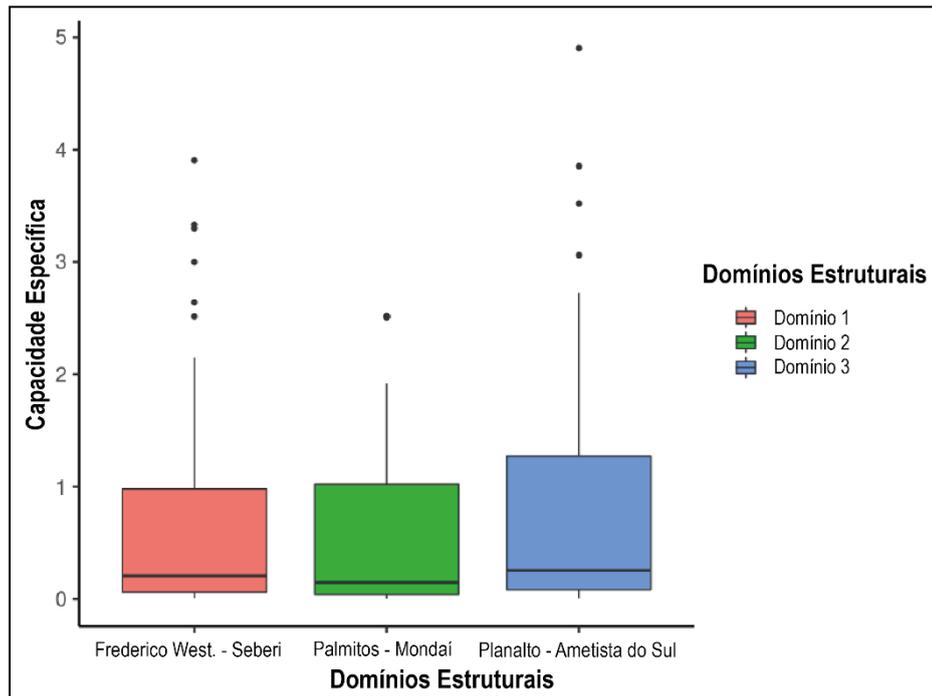
Parâmetros Estatísticos	Frederico Westphalen – Seberi (Domínio 1)	Palmitos – Mondaí (Domínio 2)	Planalto - Ametista do Sul (Domínio 3)
<i>n</i>	103	38	82
mínimo	0,007	0,002	0,006
máximo	3,905	2,515	4,904
média	0,661	0,673	0,788
desvio padrão	0,883	0,867	1,037
mediana	0,207	0,146	0,255

Fonte: Autor.

De maneira geral, o desvio padrão dos Domínios apresenta-se alto, com valores de 0,867 a 1,037, sendo que, o Domínio 3 representa o maior valor e discrepância quanto aos outros grupos. Tal característica reflete na maior heterogeneidade dos dados dos poços. Essa heterogeneidade da capacidade específica pode ser vista nos valores de outliers dos dados, representados pelos pontos no gráfico apresentado na Figura 14. O Domínio 3 apresenta o maior outlier (4,904 m³/h/m) no poço 85, seguido de três poços (84, 82, 81). Sucessivamente, o do Domínio 1, apresenta maior volume do outlier (6), com o maior valor de 3,905 m³/h/m no poço 110, seguido dos poços 109, 108, 107, 106 e 105.

A capacidade específica do Domínio 3 apresenta um valor maior da mediana (0,255), maior desvio padrão (1,037) e maiores outliers, com a maior máxima (4,904), o que indica uma tendência de maiores valores (produção). O Domínio 1 representa o segundo valor mais produtivo quanto aos dados de medidas centrais. Em contrapartida, o Domínio 2 apresentou os valores com menor produtividade (Figura 14).

Figura 14 Boxplot com os dados referentes aos domínios estruturais *versus* capacidade específica.



Fonte: Autor.

Na Tabela 3 observa-se a relação das medidas de tendência central quanto os parâmetros estatísticos que são as capacidades específicas em relação às classes de densidade de lineamento.

Tabela 3. Dados de parâmetros estatísticos quanto a capacidade específica ($m^3/h/m$) e as classes de densidade de lineamento.

Parâmetros Estatísticos	Densidade Baixa	Densidade Média	Densidade Alta
<i>n</i>	71	79	73
mínimo	0,002	0,012	0,006
máximo	3,3	3,905	4,904
média	0,7386	0,75	0,6317
desvio padrão	0,8823	1,0744	0,832
mediana	0,2045	0,187	0,264

Fonte: Autor.

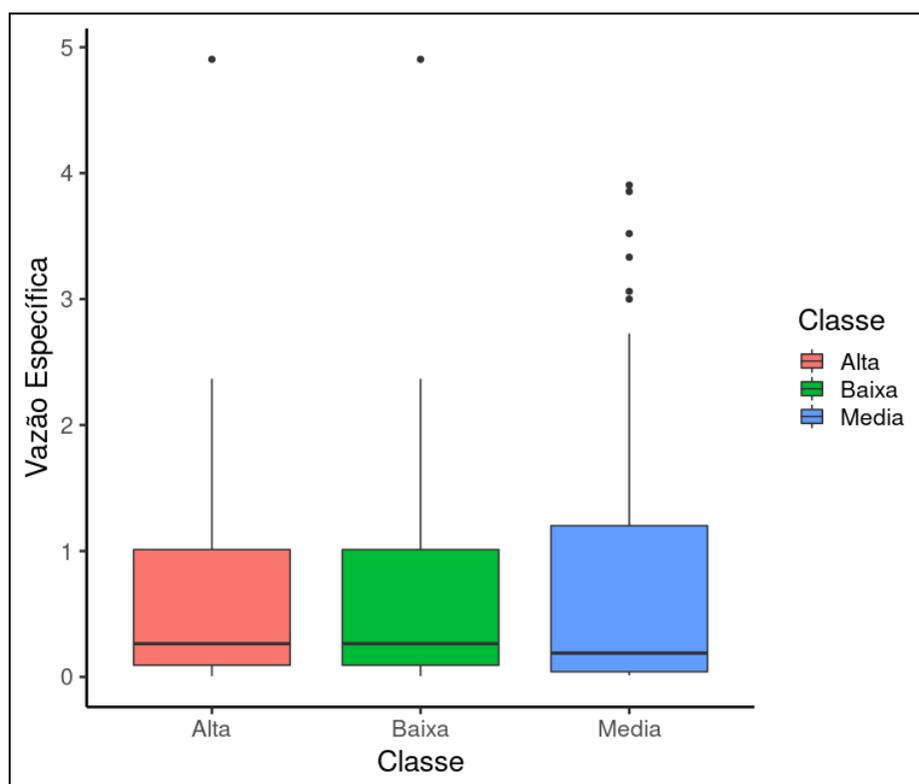
O boxplot da Figura 15 relaciona as classes de densidade de lineamento com as vazões específicas. A relação da vazão específica e classe de baixa densidade de lineamento (verde) tem um comportamento estatístico muito semelhante com a classe

de alta densidade (vermelha) no que diz respeito a seus altos valores de outliers, porém somente são representados por uma amostra por classe, no valor de 4,904 m³/h/m. O comportamento interquartil entre essas classes também é muito semelhante.

A classe de média densidade (em azul) apresenta-se com seis valores de outliers (3,905; 3,854; 3,52; 3,33; 3,06 e 3 m³/h/m). Estes, são menores que as outras classes, porém, com maior representatividade. Seus valores interquartis são mais dispersos, indicando um maior desvio padrão. Mesmo assim, é a classe de densidade de lineamento que manifesta as maiores capacidades específicas.

As classes de densidade de lineamento estão presentes como Baixa, Média e Alta. As classes de capacidade específica podem ser observadas na Figura 15, são classificadas como baixa (0,002 a 0,625 m³/h/m), média (0,625 a 1,673 m³/h/m) e alta (1,673 a 4,904 m³/h/m).

Figura 15 Boxplot com os dados referentes as classes de densidade de lineamento (baixa, média e alta) em relação a vazão específica.

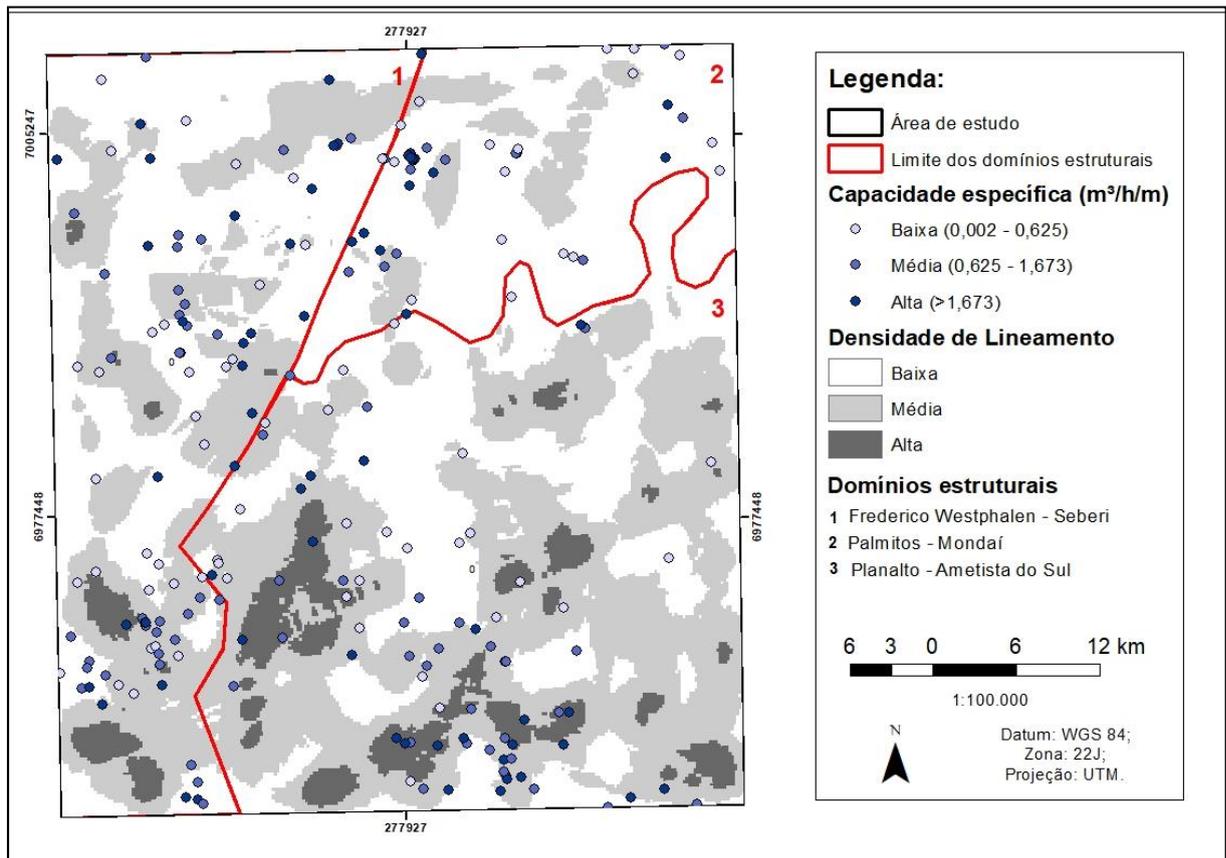


Fonte: Autor.

Na Figura 16 são apresentados os dados de forma especializada e integrada dos resultados obtidos quanto aos poços tubulares amostrados e sua posição nas

classes de densidade de lineamento. Ali pode-se ver, ao atribuir as informações discutidas que o Domínio 3 é o responsável pelas maiores produtividades, tendo, em seguida o Domínio 1.

Figura 16 Mapa das capacidades específicas, densidade de lineamento a partir dos domínios estruturais.



Fonte: Autor.

Analisando o conjunto de dados da produtividade dos poços tubulares na Folha Frederico Westphalen aos dados morfoestruturais e morfotectônicos da literatura, foi verificado que as médias da capacidade específica são maiores nos domínios estruturais 2 e 3. Esses domínios exibem as maiores densidades de lineamentos, o que pode indicar a maior presença de fraturas.

Por outro lado, quando analisadas as vazões por classes de densidade de lineamentos, essa relação não é tão clara. As maiores vazões médias ocorrem nas classes alta e baixa, enquanto o maior número de outliers ocorrem nas áreas de média densidade de lineamento.

Os dados geológicos locais, vinculados às pesquisas de mineração na região

de Ametista do Sul, registram importantes eventos geológicos sin- e pós-deposicionais. Atividades hidrotermais e eventos tectônicos que provocaram o surgimento de falhas, fraturas, entablamentos e disjunções sobre as rochas. Porém, várias estruturas foram preenchidas por minérios (ametista, cobre, etc), além de minerais secundários (celadonita, esmectita, etc) e outras rochas encaixantes (diques e sills de arenito, brechas de topo e outras feições vulcano-sedimentares) (HARTMANN; ROSENSTENGEL, 2012; DIAS E PARISI, 2007). Essas feições não são contínuas, tanto verticalmente quanto horizontalmente, dificultando a compreensão da conectividade do aquífero

Embora houve uma relação sutil entre a densidade de lineamento e a produtividade do SASG na área de estudo, Pires; Athayde; Offerdinger (2021) analisam ainda a distância das áreas mais produtivas (vistas pelos poços tubulares) em relação às densidades de lineamento. Isso indica uma variabilidade dos lineamentos vistos em superfície em relação com a dinâmica estrutural em subsuperfície.

6 CONCLUSÕES

As análises realizadas, por meio dos materiais e métodos propostos neste estudo para a a Folha de Frederico Westphalen, permitiram a definição de 3 Domínios Estruturais: Domínio 1: Frederico Westphalen; Domínio 2: Palmitos – Mondaí; Domínio 3: Planalto – Ametista do Sul. O mapa gerado com as densidades de lineamento apresentam altos valores no Domínio 2 e 3 e baixos valores no Domínio 1 e 2.

Quanto as direções predominantes dos lineamentos quatro direções principais, associadas a eventos tectônicos regionais, foram detectadas:

- N050-070W;
- N350-NS;
- N230-340W;
- E-W

É reconhecido que estes eventos tectônicos, de caráter sin e pós derrame são acompanhados de atividades hidrotermais na região, provocando a ocorrência de paragênese de rochas e minerais nas fraturas e entre os derrames e, como consequência, um significativo número de descontinuidade hidráulicas que pode justificar uma baixa capacidade específica.

Consequentemente, os fenômenos rúpteis que afetam o conjunto basáltico do Sistema Aquífero Serra Geral são reconhecidos por desenvolverem boas capacidades de estabelecerem conexões hídricas, aumentando, desta maneira, sua produtividade. Tais fatores são sutilmente observados nas densidades de lineamento das quatro direções observadas na Folha de Frederico Westphalen. Algumas características devem ser consideradas na área de estudo:

- i) O preenchimento dos espaços por rochas encaixantes (diques e sils) e horizontes vulcano-sedimentares (brechas, arenitos silificados, etc), além de minerais como ametista, quartzo, ágata, etc. Estes possuem uma direção N300-310W e N030-050E;
- ii) O preenchimento hidrotermal vertical por geodos na direção principal N330-340W observada também nas direções predominantes (*trend*) NW;
- iii) O relevo da área apresenta altos graus de dissecações, sendo a Classe 1 de 8 a 25%, compondo 53% da área, seguido da Classe 2 de 25 a 45%, com 19,4 % da área e em terceiro, a Classe 3 de 3 a 8%. Esta última abrange 19,1% da área de

estudo.

A análise e integração destes fatores, anteriormente elencados, oferecem suporte e corroboram a complexidade e heterogeneidade do SASG na região. Metodologias adicionais, como a relação da distância entre as densidades de lineamento com as áreas mais produtivas, a relação da produtividade com as direções e comprimento dos lineamentos, a aeromagnetometria, e a geofísica de detalhe, por meio do método de eletrorresistividade aplicando os arranjos denominados de Sondagens Elétricas Verticais Profundas (SEV's), caminhamento elétrico (CE) proporcionariam significantes evidências acerca das estruturas e, também, as potencialidades dos aquíferos fraturados na região.

Neste trabalho careceu de informações estruturais da região, justamente pela falta de campo, assim há possibilidade de conhecer alguns parâmetros imprescindíveis para o estudo de produtividade.

Ao integrar os dados diretos de poços, aliado a informações indiretas oferece importantes resultados à caracterização geral do sistema aquífero da Folha Frederico Westphalen. O uso de informações de domínio público, dados especializados e a geração em uma base de dados robusta em software apropriado por meio de um SIG oportunizou a visualização ampla de um conjunto de informações disponíveis ao aluno/pesquisador.

Assim, permite formular hipóteses e teorias quanto ao potencial hidrogeológico nesta área. Além disso, oferece a aplicação de uma abordagem eficaz e de baixo custo na análise preliminar, que pode ser utilizada e, também determinada para regiões e estudos análogos.

REFERÊNCIAS

- ALGAYDI, Bander A.M, SUBYANI, Ali M., MOHAMED, Hamza .M.M. Investigation of Groundwater Potential Zones in Hard Rock Terrain, Wadi Na'manm Saudi Arabia. **Groundwater** [S.l.], v. 57 p. 940-950, 2019. Disponível em: <https://ngwa.onlinelibrary.wiley.com>. Acesso em: 15 fev 2021.
- ANDRIOTTI, J.L.S. Intepretação de Dados de Prospecção Geoquímica com o Auxílio de Estatística. CPRM, Superintendência de Porto Alegre. 2010.
- ARNS, C.; PIOVEZANA, L. Desenvolvimento econômico na micro-região de Frederico Westphalen (RS). **Revista Grifos**, Chapecó, v. 17, p. 61-74, 2008. Disponível em: <https://bell.unochapeco.edu.br/revistas/index.php/grifos/article/view/244>. Acesso em: 13 fev 2021.
- ATHAYDE G. B. 2013. Compartimentação Hidroestrutural do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) no Estado do Paraná, Brasil. Tese de Doutorado. Pós-Graduação em Geologia. Universidade Federal do Paraná, 155p.
- BUCKLEY, S.; AGRAM, P.S., BELZ, J.E., GURROLA, E.M.M, HENSLEY, S., KOBRICK, M., LAVALLE, M., MARTIN, J.M., NEUMANN, M., NGUYEN, Q., ROSEN, P.A., SHIMADA, J., SIMARD, M., TUNG, W. Initial Production Processing Results: Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Reprocessing with Improvements. In: **AGU Fall Meeting Abstracts**. p. G43A-1042. 2016.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Edgard Blucher, Universidade de São Paulo, p.188, 1974.
- COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS – CPRM. GeoSGB: Dados, informações e produtos do Serviço Geológico do Brasil. 2021.
- COMPANHIA DE PESQUISA EM RECURSOS MINEIRAS – CPRM. **Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul, escala 1:750.000**. 1:750.000. Serviço Geológico Brasileiro, 2007. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle?show=full>. Acesso em: 07 mar 2021.
- COSTA, R. C. R. D.; BUSS, M. D.; ROSA, R. O. Geomorfologia. In: **Folha SG. 22 Curitiba, parte da folha SG. 21 Asunción e Folha SG. 23 Iguapé: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra**. 2 ed. Rio de Janeiro: IBGE. p. 351–442, 2018. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/bibliotecacatalogo?view=detalhes&id=2101617>. Acesso em: 15 fev 2021.
- CUNHA, G.G. **Relação espacial da tectônica rúptil com a hidroggeoquímica 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, UFRGS, Dissertação, 105p. 2016.
- DIAS, A. A.; PARISI, Giovani N. Programa Geologia do Brasil, Projeto Geologia para Apoio aos Arranjos Produtivos de Gemas do Rio Grande do Sul, RS; Frederico

Westphalen, folha SG.22-Y-C-II. 1. ed. Porto Alegre: CPRM, 2007. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/18130?show=full>. Acesso em: 03 fev 2021.

DINIZ, J. A. O., MONTEIRO, A.B., SILVA, R. C., PAULA, T., L. F. **Mapa hidrogeológico do Brasil ao milionésimo: nota técnica**. CPRM, 2014.

FEITOSA, F. A. C., FILHO, J. M., FEITOSA, E. C., DEMETRIO J. G. A. **Hidrogeologia** : Conceitos e Aplicações. 3 ed. Rio de Janeiro: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2008.

FILHO C.V.P., FERREIRA, F.J.F., FILHO, E.F.R., FILHO, A.C.B., ROSTIROLLA, S.P. Estudo Preliminar Da Conexão Entre Os Aquíferos Serra Geral E Guarani Com Base Em Dados Aeromagnetométricos E Hidroquímicos. **Águas Subterrâneas**, [S.l.], ed. 1, 2002. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/>>. Acesso em: 11 fev 2021.

FREDERICO WESTPHALEN (Município). Secretaria Municipal do Meio Ambiente. **Plano Municipal De Saneamento Básico De Frederico Westphalen / RS**. Frederico Westphalen: Prefeitura Municipal de Frederico Westphalen. 139 p., 2011. Disponível em: https://www.fredericowestphalen-rs.com.br/arquivos/saneamentobasico/5_1.PDF. Acesso em: 13 fev 2021.

FREITAS, M. A.; CAYE, B. R.; MACHADO, J. L. F. Projeto Oeste de Santa Catarina (PROESC): diagnóstico dos recursos hídricos subterrâneos do oeste do Estado de Santa Catarina. 1. ed. Florianópolis: CPRM/SDM-SC/SDA-SC/EPAGRI, 2002. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/4957>. Acesso em: 03 fev 2021.

GOMES, M. E. B. **Mecanismos de resfriamento, estruturação e processos pós-magmáticos em basaltos da Bacia do Paraná – Região de Frederico Westphalen (RS)**. 1996. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1996.

HARTMANN, L., DUARTE, L.C., MASSONE, H.J., MICHELIN, C., ROSENSTENGEL, L. M., BERGMANN, M. Sequential opening and filling of cavities forming vesicles, amygdalae and giant amethyst geodes in lavas from the southern Paraná volcanic province, Brazil and Uruguay. **International Geology Review**, 2012. V. 54, 2012.

HARTMANN, L.A.; ARENA, K.R. ; DUARTE, S.K. . Geological relationships of basalts, andesites and sand injectites at the base of the Paraná volcanic province, Torres, Brazil. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 237-238, p. 97-111, 2012.

HIRATA, R., SUHOGUSOFF, A., VILLAR, P.C., MARCELLINI, L. As águas subterrâneas e sua importância Ambiental e socioeconômica para o Brasil. São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Instituto Trata Brasil, CEPAS/USP, 2019. 64 p.

IBGE. Geomorfologia. Folha Chapecó SG-22-Y-C. Escala 1:250.000. 2003.

ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R..M. **Applied Geostatistics**. Editora Oxford University, pág.18-20, 1989.

KEAREY, P., BROOKS, M., HILL, I. **Geofísica de Exploração**. São Paulo: Oficina de Textos, 429 p., 2009.

LICHT, O. A. B., ARIOLI, E. E. A photographic atlas of the architecture, low geometry and morphology, and facies of the Serra Geral Group (Paraná Igneous Province) in the state of Paraná, Brazil. *Boletim paranense de geociências*. V. 76 p.1-68, 2020
LICHT, O. A. B. A evolução do conhecimento sobre a Província Ígneada Paraná dos Primórdios Até 1950. *Revista do Instituto Geológico*, [S. l.], v. 35, n. 2, p. 71–106, 2014.

LICHT, O.A.B. A evolução do conhecimento sobre a Província Ígnea do Paraná - dos Primórdios Até 1950. **Revista do Instituto Geológico**, [S. l.], v. 35, n. 2, p. 71–106, 2014. DOI: 10.5935/0100-929x.20140010.

MACÊDO R.J.A., SURYA, L. Comparação entre modelos digitais de elevação dos sensores SRTM e ALOS PALSAR para a análise digital de terreno. **Contexto Geográfico**. Maceió: Universidade Federal de Alagoas, v. 3, n.6, p. 47-55, 2018. Disponível em: <https://www.seer.ufal.br/index.php/contextogeografico/article/view/6968>. Acesso em: 23 abr 2021.

O'LEARY, D. W., FRIEDMAN, J. D., & POHN, H. A. Lineament, linear, lineation: *Some proposed new standards for old terms*. **Geological Society of America Bulletin**, 87(10), 1463, 1976.

PEATE, D. W.; HAWKESWORTH, C. J.; MANTOVANI, M. S. M. Chemical stratigraphy of the Paraná lavas (South America): classification of magma types and their spatial distribution. **Bulletin of Volcanology**, v. 55, n. 1–2, p. 119–139, 1992.

PINTO, V. M.; HARTMANN, L. A. Flow-by-flow chemical stratigraphy and evolution of thirteen Serra Geral Group basalt flows from Vista Alegre, southernmost Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 83, n. 2, p. 425–440, 2011.

QUEIROZ, G. L., SALAMUNI, E., NASCIMENTO, E. R. AzimuthFinder: ferramenta para a extração de dados e apoio na análise estrutural. **Geologia USP. Série Científica**, v. 14, n. 1, p. 69-80, 2014.

ROISENBERG, A.; VIERO, A. P. O vulcanismo Mesozóico da Bacia do Paraná no Rio Grande do Sul. In: Holz, M.; De Ros, L. F. **Geologia do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: CIGO / UFRGS, 2000, p. 355-374.

SCHEIBE, L. F.; HIRATA, R. O contexto tectônico dos sistemas aquíferos Guarani e Serra Geral em Santa Catarina: uma revisão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 15., 2008. Anais. Natal: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, V,1. 2008.

SEVERGNINI, B. R., BORTOLIN, T. A., REGINATO, P. A. R. Avaliação do Sistema Aquífero Serra Geral com um modelo de dupla porosidade baseado na análise de testes de bombeamento. **Águas subterrâneas**. v. 35, n. 1, p. 103-119. 2021. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/30010>>. Acesso em: 13 set 2021.

SINGHAL, B.B.S, GUPTA R. P. **Applied Hydrogeology of Fractured Rocks**, ed 2, Berlim: Springer. 429p., Berlim, 2010.

WILDNER, W., RAMGRAB. G. E., LOPES, R.C., IGLESIAS, C. M. F. Geologia e recursos minerais do estado do Rio Grande do Sul. 2008.

ZALÁN, P.V.; WOLFF, S.; CONCEIÇÃO, J.C.; MARQUES, A.; ASTOLFI, M.A.M; VIEIRA, I.S.; APPI, V.T. Bacia do Paraná. In: **Origem e evolução de Bacias Sedimentares**. Petrobrás, Rio de Janeiro, p. 135-164, 1990.

ANEXOS

Informações dos poços tubulares com dados de coordenadas X e Y e a capacidade específica (m³/h/m).

ID	utme	utmN	capacidade específica
1	262175	6970417	0,57
2	295065	6945754	0,512
3	296111	6945395	0,389
4	295634	6945343	1,512
5	295377	6945569	1,456
6	285175	6958682	3,52
7	262931	6956978	0,865
8	313227	6993395	0,097
9	296794	7007413	1,309
10	297674	7010971	0,008
11	300036	7004615	0,008
12	300584	7002589	0,071
13	294421	7011484	0,002
14	296613	7011805	0,139
15	313285	6994533	0,191
16	302462	6997535	0,016
17	308036	7013069	2,615
18	303014	7003132	0,009
19	302931	7003338	0,005
20	302823	7003339	0,007
21	312380	7015810	0,023
22	312263	7014417	0,027
23	293755	7013935	0,15
24	292545	7014795	0,097
25	291849	7014566	0,277
26	273960	7004952	0,134
27	274034	6997397	3,905
28	278522	7003501	0,777
29	278590	7003450	2,515
30	278451	7003339	1,841
31	279475	7004255	0,457
32	278855	7007625	0,032
33	277071	7003214	0,04
34	276410	7003481	0,5
35	284813	6997563	0,022
36	278173	7001495	1,865
37	280790	7003399	0,266
38	279887	7002472	0,846
39	284011	7004490	0,023

40	273800	6995250	0,132
41	272969	6993720	15,005
42	276655	6996725	9,091
43	276350	6995650	0,145
44	277210	6996550	0,148
45	274886	6998053	1,081
46	285915	7003842	0,099
47	285049	7002564	0,027
48	285841	7003828	0,422
49	285982	7004203	0,023
50	290750	6996079	0,19
51	265666	7003057	0,007
52	259475	7003491	0,861
53	253946	6999510	0,406
54	312891	7008478	0,047
55	310136	7000052	3,857
56	296633	7003527	1,92
57	310940	7015650	0,076
58	256167	6995108	0,34
59	259347	6997140	0,977
60	256663	7004044	0,07
61	261446	6997027	0,255
62	262029	7006200	0,026
63	258777	7006009	3,333
64	278252	7002667	0,117
65	280375	7015791	0,011
66	277587	7005887	0,012
67	243057	7000028	0,749
68	244923	7006901	0,295
69	245662	6996622	0,059
70	247826	7012860	2,596
71	246803	7011699	0,03
72	250755	7007952	2,323
73	251699	7012007	0,01
74	259168	7010833	0,114
75	245024	6992037	0,003
76	296616	6957716	1,582
77	298897	6956601	0,247
78	302912	6946564	0,043
79	299703	6945209	0,078
80	294136	6957119	1,582
81	292551	6956374	0,11
82	290663	6953840	1,974
83	293324	6948383	3,429

84	314623	6945700	0,357
85	306647	7006194	0,013
86	277030	7003534	5,694
87	271168	7001301	1
88	279026	7011067	0,72
89	272939	7004415	0,115
90	273007	7004577	1,905
91	276234	7003469	0,013
92	276719	7004016	9
93	310532	6953936	0,036
94	306423	6952371	1,291
95	300309	6954540	0,361
96	304474	6956003	1,391
97	302937	6958512	0,243
98	309716	6959267	11,216
99	313649	6959155	2,667
100	311882	6957694	0,083
101	312772	6954034	2,646
102	313088	6954688	0,191
103	312007	6955031	1,123
104	272692	7004405	3,3
105	272362	7009169	0,931
106	272332	7015457	1,063
107	268409	7014008	0,069
108	269091	7004123	0,274
109	269841	7002062	0,018
110	264404	7008448	40
111	261530	6997942	0,133
112	312190	7002502	0,007
113	314460	7009417	0,012
114	278360	6993173	0,037
115	276058	6996795	2,507
116	283626	7015936	0,178
117	290044	6996377	0,06
118	312047	6992345	0,144
119	292416	7011465	0,017
120	294291	7009636	0,035
121	304190	7012581	0,042
122	297911	7006430	0,61
123	306292	6960777	850
124	313644	6962733	600
125	315060	6961248	11,192
126	252753	7003397	1,36
127	255925	7009182	0,024

128	280279	6967888	0,158
129	279470	6966632	0,167
130	279150	6965886	0,012
131	278237	6958269	0,006
132	289332	6970896	0,036
133	284052	6968056	0,264
134	284484	6970192	0,089
135	281775	6975607	0,014
136	278009	6975197	0,015
137	282005	6982079	0,029
138	277973	6980958	10,849
139	276550	6976364	0,075
140	275883	6980263	11,627
141	274859	6981571	2,63
142	275150	6985426	0,46
143	272308	6985244	0,099
144	290225	6967733	0,13
145	241350	6994582	0,124
146	290778	6991281	2,5
147	290882	6991180	0,625
148	282662	6963513	0,4
149	283983	6960561	0,16
150	289288	6996612	0,055
151	314098	7016499	0,058
152	302069	7009807	0,138
153	314408	6998690	12,5
154	310982	7015496	0,092
155	309271	7012783	0,094
156	262074	6957104	1,641
157	243650	6952020	1,985
158	255994	6963872	2,15
159	263170	6997557	0,256
160	262260	6987975	0,103
161	261665	6989400	0,097
162	261601	6989378	0,224
163	260476	6991434	0,058
164	259652	6990846	0,007
165	261464	6993912	0,147
166	265609	6999305	0,993
167	270673	6997166	0,064
168	269568	6997299	1,176
169	267382	6994336	0,017
170	264301	6990740	0,12
171	266224	6990075	0,888

172	270557	6992014	1,934
173	269558	6987764	0,142
174	264939	6988316	0,018
175	266107	6988438	1,32
176	260029	6980353	3
177	255531	6980233	0,018
178	251655	6983636	2,563
179	251518	6984350	1,5
180	256615	6988994	0,2
181	250719	6987886	0,082
182	247286	6987973	0,013
183	247457	6987745	0,153
184	262159	6991320	0,449
185	261962	6992926	0,484
186	261578	6992113	0,207
187	261815	6991652	1,226
188	285639	6960968	1,825
189	284984	6959863	1,098
190	312040	6954731	0,186
191	259512	6967933	0,04
192	258914	6970076	0,289
193	259040	6969790	2,046
194	259360	6969430	7,096
195	264337	6974359	0,039
196	260079	6974054	0,037
197	259234	6974840	0,013
198	259357	6972143	0,071
199	259975	6969050	0,235
200	261287	6968513	0,17
201	261472	6967334	0,058
202	259136	6969585	0,187
203	263945	6971766	22,016
204	263230	6973046	0,038
205	264404	6974122	0,022
206	264992	6973030	0,081
207	273404	6972857	0,123
208	266090	6968547	4,904
209	260169	6969874	0,119
210	265458	6965167	0,575
211	260300	6965240	1,851
212	260260	6966530	344,2
213	260163	6966771	0,158
214	259847	6968097	0,042
215	268820	6972872	0,131

216	261164	6972631	0,022
217	270357	6979490	3,061
218	271072	6980430	2,582
219	268355	6980200	19,796
220	263958	6973228	2,321
221	265940	6977982	0,028
222	263060	6971588	0,376
223	274582	6969368	0,019
224	267755	6984253	0,026
225	267613	6983403	0,337
226	265586	6981143	2,134
227	271204	6975685	1,673
228	273638	6977003	0,054
229	273680	6971639	0,049
230	274551	6972816	0,057
231	269038	6968688	0,122
232	265436	6988865	0,103
233	254529	6965049	0,219
234	252979	6966120	0,105
235	257778	6969634	0,713
236	263938	6944727	3,023
237	262773	6984770	0,024
238	255069	6966946	0,122
239	258290	6964659	0,03
240	254913	6966485	0,699
241	250737	6965403	0,01
242	255100	6965066	2,64
243	285074	6961426	0,295
244	286517	6962759	0,797
245	289714	6963296	1,011
246	289007	6963326	0,158
247	285060	6966996	1,357
248	282297	6961056	0,462
249	279226	6957714	0,123
250	280979	6957674	1,668
251	289272	6960928	2,367
252	287212	6957732	0,225
253	286241	6958559	0,916
254	285241	6958475	2,727
255	285532	6959912	0,667
256	285004	6958953	0,606
257	278265	6961066	0,503
258	277852	6961030	1,063
259	277216	6961414	0,997

260	277796	6969787	0,293
261	280378	6963568	0,093
262	273995	6967459	1,573
263	278910	6971568	0,137
264	282542	6976302	0,043
265	285180	6966980	0,106
266	286137	6972759	0,046
267	282931	6969284	1,573
268	281765	6969765	0,507
269	280861	6947179	0,516
270	283442	6951932	0,202
271	282932	6946058	15,715
272	288113	6950546	0,452
273	247503	6965615	1,772
274	280208	6960845	1,275
275	266723	6990811	0,983
276	291764	6952586	2
277	255560	6973500	0,065
278	241167	6989484	0,009
279	285537	6993409	0,053
280	247073	6981572	0,08
281	248987	6973777	2,725
282	241103	6988165	4,949
283	244559	6987543	0,065
284	257200	6965253	0,054
285	305703	6989389	0,5
286	248525	6976464	1,372
287	253748	6968798	0,228
288	278540	7003472	0,787
289	278252	7003554	2,515
290	278085	7003674	1,841
291	259091	6969776	2,046
292	259340	6969440	7,096
293	260300	6965212	1,851
294	290549	6991385	1,264
295	254210	6972656	0,023
296	312935	6954000	10,938
297	262438	6959427	0,424
298	263273	6956610	0,121
299	256268	6965917	0,187
300	262913	6958210	0,132
301	264472	6971453	0,189
302	240685	6988534	3,363
303	296865	6974483	0,081

304	277984	6992188	3,854
305	277069	6991519	0,096
306	278200	6967339	0,168
307	282104	6961437	1,648
308	284437	6948871	5,592
309	284723	6957568	1,826
310	281762	6947925	0,491
311	292344	6950025	0,075
312	297852	6951918	1,142
313	293230	6945020	0,015
314	298488	6949028	0,124
315	300689	6949191	0,357
316	297307	6947316	0,291
317	291178	6946331	23,825
318	303353	6947763	0,049
319	300448	6944035	0,073
320	293747	6955833	0,057
321	305448	6944035	0,331
322	298936	6954648	0,475
323	301985	6945476	0,029
324	278247	7003862	2,515
325	278400	7003494	1,841
326	259040	6969760	2,046
327	278252	7003554	2,515
328	278085	7003674	1,841
329	259118	6969786	2,046
330	288411	6957143	12,449
331	299140	6941904	0,044
332	291457	6945448	0,039
333	292836	6952820	0,048
334	273384	6988080	0,047
335	311342	6962118	0,077
336	312434	6955137	0,191
337	266808	6984976	1,302
338	255799	6987968	0,095
339	254183	6988363	0,035
340	263416	6982708	0,031
341	260124	6967547	0,509
342	271493	6942784	1,315
343	289220	6950644	0,63
344	299940	6981489	0,008
345	249688	6968125	0,018