

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

HERNANES FIRMO SILVA

**MAPEAMENTO DE ZONAS POTENCIAIS À OCORRÊNCIA DE ÁGUAS
SUBTERRÂNEAS NA PORÇÃO NORDESTE DO MUNICÍPIO DE CAÇAPAVA DO
SUL: UMA INTEGRAÇÃO DE SIG, SENSORIAMENTO REMOTO E ANÁLISE
MULTICRITÉRIO**

Caçapava do Sul

2019

HERNANES FIRMO SILVA

**MAPEAMENTO DE ZONAS POTENCIAIS À OCORRÊNCIA DE ÁGUAS
SUBTERRÂNEAS NA PORÇÃO NORDESTE DO MUNICÍPIO DE CAÇAPAVA DO
SUL: UMA INTEGRAÇÃO DE SIG, SENSORIAMENTO REMOTO E ANÁLISE
MULTICRITÉRIO**

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: Aharon Israel Barreiro Saldanha.

Caçapava do Sul

2019

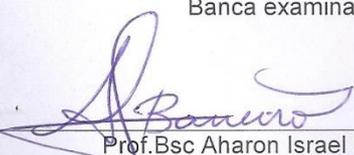
HERNANES FIRMO SILVA

**MAPEAMENTO DE ZONAS POTENCIAIS Á OCORRÊNCIA DE ÁGUAS
SUBTERRÂNEAS NA PORÇÃO NORDESTE DO MUNICÍPIO DE CAÇAPAVA DO
SUL: UMA INTEGRAÇÃO DE GIS, SENSORIAMENTO REMOTO E ANÁLISE
MULTICRITÉRIO**

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: 19 de Junho de 2019.

Banca examinadora:



Prof. Bsc Aharon Israel Barreiro Saldanha

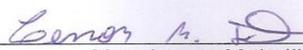
Orientador

UNIPAMPA



Prof. Msc. Rui Sergio Saraiva Duarte Junior

UNIPAMPA



Msc. Lenon Melo Ilha

UNIPAMPA

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) .

S586m Silva, Hernanes Firmo Silva

Mapeamento de zonas potenciais à ocorrência de águas
subterrâneas na porção nordeste do município de caçapava do
sul: uma integração de sig, sensoriamento remoto e análise
multicritério / Hernanes Firmo Silva Silva.

70 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade
Federal do Pampa, GEOLOGIA, 2019.

"Orientação: Aharon Israel Barreiro Saldanha Saldanha".

1. Águas subterrâneas . 2. Processo analítico hierárquico
. 3. Sensoriamento remoto. I. Título.

Dedico esse trabalho ao Pai Celestial, por ser sempre tão presente e essencial em minha vida e também dedico à minha mãezinha e meu pai, por nunca me deixar faltar nada em minha vida, principalmente nesses anos de estudos.

AGRADECIMENTO

Agradeço à todos que participaram dessa jornada comigo. Quero agradecer aos meus amigos, em especial Jorge (Tico), Everton (Índio), Saulo (Charles), Francisco (Dom Pedrito) Roni (Stones), Débora (Mano) e Ricardo (G-zus), por se fazerem tão importantes desde o início da caminhada.

Nada mais justo em agradecer com todo meu carinho a Ordem DeMolay por ser tão essencial para minha formação como ser humano nesses anos, me mostrando que posso sempre contar com pessoas de um caráter irrefutável, como foi Marcos Túlio e os demais irmãos do Capítulo Macaé nº 453 e aos Tios Josino Paz e Emerson Machado, do capítulo Paz & Prosperidade nº 715, no qual tive a honra de conhecer irmãos como Juno Nogueira.

Serei eternamente grato pelas pessoas dessa grande cidade acolhedora que é Caçapava do Sul. O que seria do Village sem a vó Olga, que sempre achava um jeito de me fazer sentir-se em casa. Agradeço aos grandes amigos que aqui fiz aqui e que sempre levarei em minhas memórias. A família Morales, meus eternos agradecimentos por todos os momentos incríveis que passei com vocês, os considero os chilenos mais camaradas que conheci.

Nada seria possível sem os professores que me ajudaram a galgar esse degrau. Agradeço ao meu amigo e orientador Aharon Saldanha, pela disponibilidade e calma para me ajudar na conclusão deste trabalho e também pela minha amiga Paula Hernandez Leal (Paulinha) por mesmo não tendo compromisso algum comigo, me ajudou e motivou neste trabalho.

Nada disso seria possível sem o apoio que minha família me deu em todos esses anos. Muitas vezes a lembrança e a saudade de casa era lancinante ao ponto de me fazer pensar em desistir, porém os amores e os cuidados de meus pais, me confortaram e me ampararam. Agradeço a minha irmã e meus sobrinhos, que pelo compromisso assumido, não me pude fazer presente nos crescimentos de Gui e Zinho.

Ao meu cachorrinho Billy Joe, eterno companheiro, amigo indiscutível, agradeço por todo seu amor que me destes nesses anos. Fostes sempre leal, nunca me abandonando em meio turbilhões cíclicos em minha vida.

Quando mais perto me aproximo do fim eminente da “melhor fase” da minha vida, mais perto da lucidez me encontro. São tempos em que o questionamento de um futuro incerto e simultaneamente desafiador, se alastra como a fome que é fatal na Seara Vermelha de Jorge Amado. Essa incerteza da qual paira sobre meus ombros cansados, cansados de insistir em algo que já se finda o brilho nos olhos, que me trouxera até aqui um dia. Como os flagelos da esquecida Caatinga, estou frente ao desafio de migrar para terras prometidas, onde toda essa angustia se reduzira a meras lembranças de um ano onde a chuva não veio e a terra não frutificou, onde a alma encontrara agora somente o regozijo. Bastara somente a aceitação desse desafio de embarcar nessa jornada, onde o mistério do que possa acontecer, é apenas a fagulha de um lampião, que faz com que o povo sofrido de terras deixadas para sofrer, sonhe com um futuro onde a liberdade é para todos e a fome de viver é a única que os alegra. É tempo de colheita!

- Hernanes Firmo Silva

RESUMO

A crescente demanda atual por recursos hídricos pressiona a sociedade brasileira em conflitos setoriais entre população, indústria e agroindústria, entre regiões urbanas e interioranas. Uma solução comum às regiões rurais, voltada ao atendimento de demanda hídrica local, é a locação de poços tabulares, que por vezes podem se tornar onerosos caso haja um desconhecimento das condicionantes geológicas e hidrogeológicas locais. Inspirado nesta problemática, este trabalho de conclusão possui por objetivo fornecer uma contribuição para minimizar este cenário de incertezas, possuindo por área de estudo uma porção territorial localizada a nordeste do município de Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul, onde há a ocorrência de poços tabulares como principal meio de dessedentação humana e animal. Utilizando-se de dados multiespectrais de sensores Landsat, geológicos, hidrogeológicos e pedológicos da Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais – CPRM, associados à metodologia de Análise Multicritério, delimitou-se áreas de maiores e menores potenciais à ocorrência de águas subterrâneas. Esta metodologia, permitiu a confecção de mapas com potenciais probabilísticos, determinando desta maneira, quais áreas seriam mais propensas ou não à locação de poços tabulares. Doravante, este trabalho contribuiu de maneira exitosa em delimitar zonas de potenciais ocorrências de águas subterrâneas, podendo gerar economia de tempo e recursos financeiros a futuras locações de poços na região em questão.

PALAVRAS CHAVES: Águas subterrâneas, Processo Analítico Hierárquico, Sensoriamento Remoto.

ABSTRACT

The increasing demands for hidric resources, presses the brazilian society in sectoral conflicts between population, industry and agroindustry, as well between urban and interior regions. A commom solution in rural areas, aimed at meeting local water demands, is the usage of tabular wells, which can sometimes become burdensome if there is an ignorance of local geological and hydrogeological constraints. Inspired by this problem, this monography aims to provide a contribution towards the minimization of a scenario of uncertainties, having by area of study a territorial portion located northeast of the city of Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul, where there are the occurrences of tabular wells as the main means of human and animal watering. Using multispectral data from Landsat satellite, geological, hydrogeological and pedological sensors of the Research Company and Mineral Resources - CPRM, associated to the Multicriteria Analysis methodology, areas of higher and lower potentials were delimited in respect to the occurrence of groundwater. This methodology allowed the creation of maps with probabilistic potentials, determining which areas would be more prone or not to the placement of tabular wells. Therefore, this work has successfully contributed to delineate areas of groundwater potential occurrences, which can save time and financial resources to future wellsbuild-ups in the region.

KEYWORDS: Groundwwater, Analytic Hierarchy Process, Remote Sensing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Mapa de localização da área de estudo.....	15
Figura 2- Mapa de compartimentação do Escudo Sul-rio-grandense, focalizando o Terreno São Gabriel, local da área de estudo.....	16
Figura 3- A) Contexto geomorfológico do Brasil, b) divisão geomorfológica do Rio Grande do Sul focalizando Caçapava do Sul.....	21
Figura 4- Representação esquemática dos diferentes tipos de aquífero, de acordo com o sistema de pressão de águas e com a natureza das camadas que as delimitam no topo e na base.....	25
Figura 5- Mapa de Domínios Hidrogeológicos da área de estudo.....	28
Figura 6- Onda eletromagnética.....	32
Figura 7- Interação da radiação eletromagnética com o alvo. A radiação incidente (RI) pode ser refletida (RR), transmitida (RT) ou absorvida (RA).....	33
Figura 8- Espectro Eletromagnético.	33
Figura 9- Origem das coordenadas em uma imagem digital, pixels e níveis de cinza ou DN. DN 0 (zero), cor preta, DN 25, cor branca. Os valores de DN exemplificados correspondem ao nível de cinza verdadeiro no espaço RGB.....	35
Figura 10- Modelo holístico de um SIG.	37
Figura 11- Principais componentes de um SIG.	38
Figura 12- Representação de pontos, linhas e polígonos nos modelos vetorial e matricial.	39
Figura 13- Estrutura de armazenamento de dados geográficos em um SIG. Observe-se a relação entre o objeto geográfico (poço) e um registro da tabela de atributos. .	41
Figura 14- Fluxograma para delinear zonas potenciais de águas subterrâneas utilizando técnicas de Sensoriamento Remoto, SIG e metodologia AHP.....	47
Figura 15- Mapa de litologias com pesos reclassificados segundo os domínios hidrogeológicos.	50
Figura 16- Mapa de declividade com pesos reclassificados.	51
Figura 17 - Mapa de solos reclassificados pelo seu potencial hidrogeológico.	52
Figura 18- Mapa de classificação supervisionada de uso de solos.....	53
Figura 19 - Mapa de densidade de lineamentos reclassificado em base de potencial hidrogeológico.	54

Figura 20 - Mapa de densidade de drenagens reclassificado em base de potencial hidrogeológico.....	55
Figura 21- Áreas potencias para a ocorrência de água subterrânea na porção nordeste do município de Caçapava do Sul.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Matriz de comparações pareadas.	56
Tabela 2- Pesos dos mapas temáticos após aplicação da matriz de comparação pareada.	57
Tabela 3- Classificação da produtividade dos poços em relação a vazão específica.	Erro! Indicador não definido.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Classificação dos níveis de amplitude hidrogeológicas, exemplificando o Sistema Aquífero Guarani.	27
Quadro 2- Principais características dos modelos vetorial e matricial.....	40
Quadro 3- Comparações do AHP.....	44

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
2. OBJETIVOS	13
2.1. Objetivo geral	13
2.2. Objetivos específicos	13
3. JUSTIFICATIVA	14
4. ÁREA DE ESTUDO	14
4.1. Localização e acessos.....	14
4.2. Contexto geológico regional.....	15
4.3. Contexto geológico local	17
4.3.1. Complexo Metamórfico Passo Feio	17
4.3.2. Complexo Granítico Caçapava do Sul.....	18
4.3.3. Bacia do Camaquã	18
4.4. Contexto geomorfológico	20
5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
5.1. Histórico da hidrogeologia.....	22
5.2. Ocorrências de água subterrânea	23
5.3. Contexto Hidrogeológico de Caçapava do Sul	26
5.4. Sensoriamento Remoto.....	31
5.5. Sistema de Informações Geográficas (SIGs).....	36
5.6. Processo Analítico Hierárquico	42
6. MATERIAIS E MÉTODOS.....	44
6.1. Preparação das camadas	44
6.2. Processo de análise hierárquica	47
7. RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
7.1. Mapas temáticos	49
7.2. Processo Analítico Hierárquico	55
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	60
9. REFERÊNCIAS	61

1. INTRODUÇÃO

O crescente aumento populacional, combinado ao desenvolvimento agrícola e industrial, pressionam os serviços públicos de saneamento e distribuição hídricas através de suas crescentes demandas. Com o descompasso entre crescimento demográfico e iniciativas que supram as necessidades setoriais, há uma emergente demanda não atendida de abastecimento hídrico, principalmente em locais remotos, gerando conflitos de centros urbanos sobre regiões interioranas. Uma opção concreta e viável que vai ao encontro à solução deste conflito social é o abastecimento a partir de águas subterrâneas na forma poços tubulares profundos (RAZANDI; POURGHASEMI; NEISANI, 2015).

Filho (2008) definiu água subterrânea sendo aquela que corre abaixo do nível freático, presente nas formações geológicas aflorantes e parcialmente saturadas, e nas formações profundas totalmente saturadas. O armazenamento e a circulação das águas subterrâneas estão intrinsecamente relacionados com os corpos rochosos denominados aquíferos, estes ambientes são de dimensões, extensões e características das mais variadas (REBOUÇAS, 2006). A área de estudo, possui tanto aquíferos porosos quanto fissurais, de acordo com CPRM (2009).

O Sistema de Informação Geográfica (SIG) oferece subsídios que maximiza o manuseio de grandes quantidades de dados complexos espaciais na gestão destes recursos (BURROUGH, 1986). Prasad *et al.*, (2018) ainda menciona que uma integração entre SIG e Sensoriamento Remoto (SR), pode ser uma ferramenta eficaz, rápida e rentável que, produz de forma confiável aspectos fundamentais em relação as águas subterrâneas como: geologia; lineamentos; declividade e utilização de solos. Além disso, uma abordagem SR-SIG, permite extração de informação de áreas extensas e inacessíveis (SINGH *et al.*, 2013).

O Processo de Hierarquia Analítica (AHP), é um padrão internacionalmente aceito quando o estudo em questão necessita de uma análise de decisão multicritério, como no caso da avaliação de zonas de potenciais recursos hídricos subterrâneos. Senso assim, o trabalho apresentado utiliza das ferramentas de SIG, SR, AHP para delimitação do potencial hídrico na porção NE do município de Caçapava do Sul.

Desenvolvendo um guia prospectivo para exploração de águas subterrâneas, de modo a garantir um desenvolvimento sustentável deste recurso vital.

Desta maneira, esta pesquisa visa mapear zonas com potencial de ocorrências de águas subterrâneas, na porção SW da Bacia Hidrográfica do Baixo Jacuí, situada à NE do município de Caçapava do Sul. Especificamente, hierarquizar e estipular a probabilidade de ocorrências hídricas subterrâneas na localização citada.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral, mapear as zonas com potencial a ocorrência de águas subterrâneas na porção NW da Bacia Hidrográfica Baixo Jacuí, que está inserida dentro do município de Caçapava do Sul, buscando estipular a probabilidade de ocorrência de água no local.

2.2. Objetivos específicos

- Identificar quais são as condicionantes que caracterizam zonas em maior ou menor potencial de ocorrência de águas subterrâneas;
- Produzir os mapas temáticos construídos em ambiente SIG, baseando-se nos parâmetros identificados como de maior relevância para ocorrência deste recurso hídrico;
- Normalizar os pesos dos mapas seguindo o AHP e Classificar as zonas de potencial de águas subterrâneas, representando-as através de mapas de potenciais hidrogeológicos;
- Validar o método com informações físicas dos poços tubulares existentes dentro da área de estudo.

3. JUSTIFICATIVA

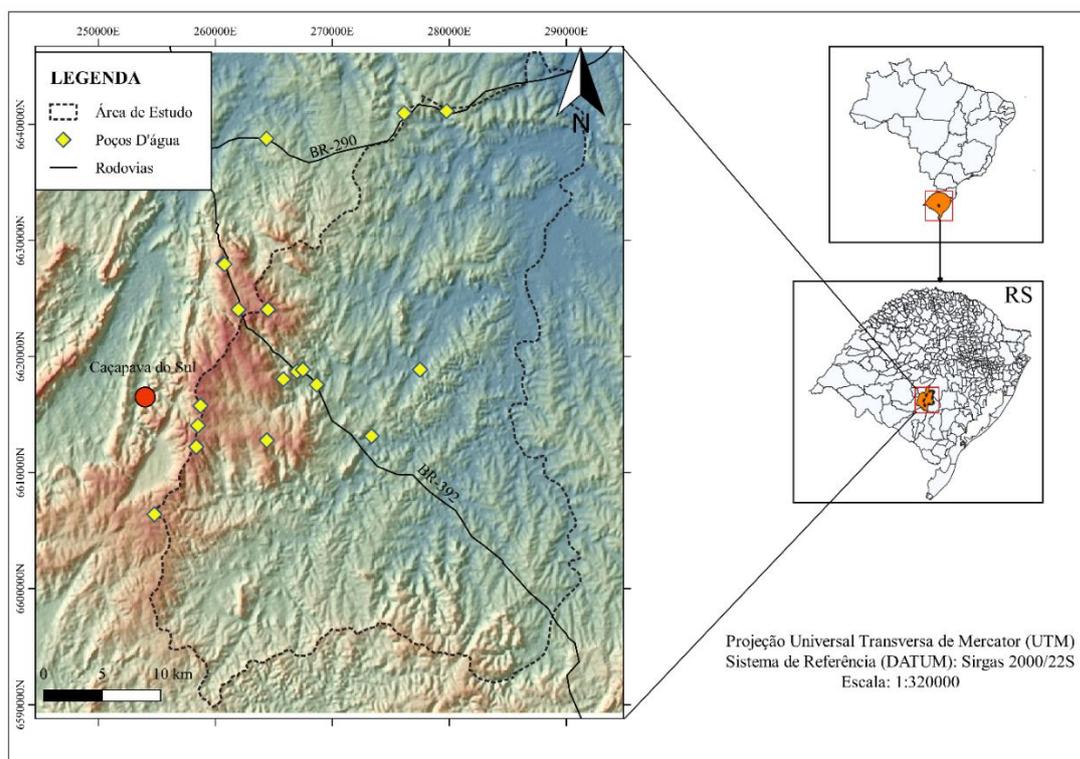
Este trabalho justifica-se pela relevância que os estudos sobre águas subterrâneas possuem dentro do contexto hídrico brasileiro, em especial para a região da campanha gaúcha, cuja fonte de água, por muitas vezes dá-se de forma tubular. Além de fornecer um estudo prévio para a prospecção de águas subterrâneas, sendo assim um diferencial de tempo e dinheiro para em projetos com futuros com essa temática.

4. ÁREA DE ESTUDO

4.1. Localização e acessos

A área de estudo está situada na porção central do estado do Rio Grande do Sul, inserida dentro do município de Caçapava do Sul, por vez, compreendendo a porção sudoeste da Bacia Hidrográfica Baixo Jacuí, que integra uma das grandes unidades hidrográficas do município. As principais vias que dão acesso à área são a BR-290, que conecta a capital Porto Alegre a área (Figura 1), BR-392, BR-153 e RS-357. As vias principais, dão conexão para as estradas vicinais que permitem acesso à área de estudo.

Figura 1- Mapa de localização da área de estudo.



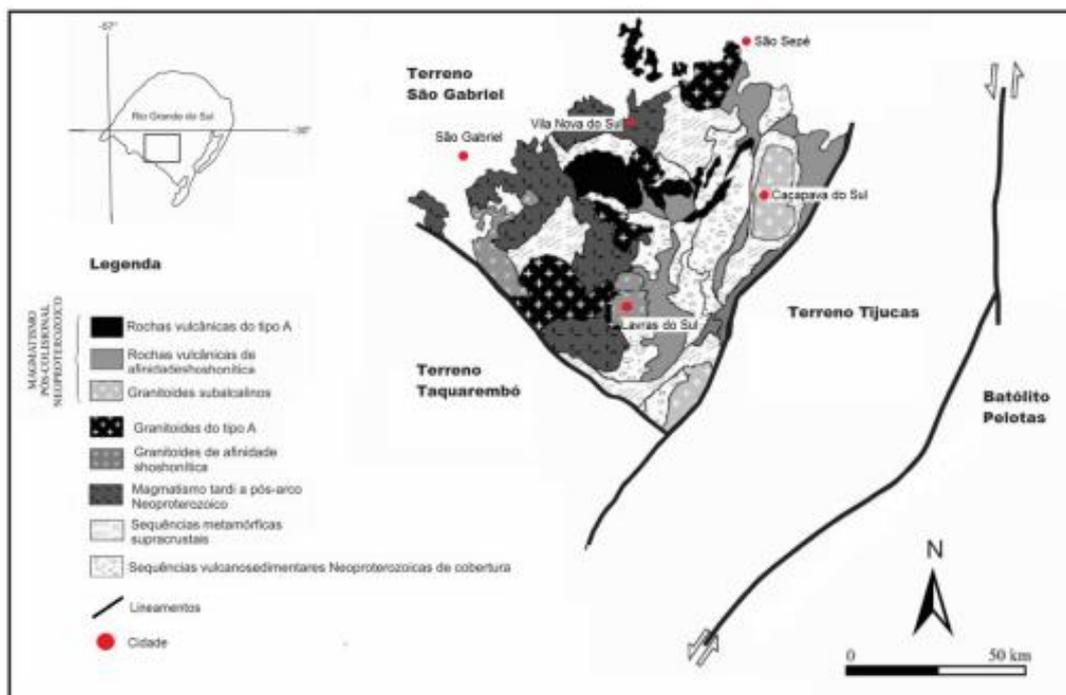
Fonte: Autor.

4.2. Contexto geológico regional

A área de estudo situa-se dentro do contexto geotectônico do Escudo Sul-riograndense (Figura 2) (Esr), em sua porção meridional, nomeada como Província Mantiqueira (ALMEIDA et al., 1981). O Esr abrange uma área de aproximadamente 65.000km² (HARTMANM et al., 2007) e está localizado no centro-sul do estado do Rio Grande do Sul, constituindo terrenos arqueanos a paleoproterozoicos e unidades neoproterozoicas. O Esr é o resultado de geração e deformação da crosta continental e de fontes mantélicas, caracterizado por rochas pré-cambrianas e associações petroectônicas, que estão ligadas a dois ciclos orogênicos citados na literatura como: Transamazônico e Brasileiro/Pan-Africano (HARTMANM.CHEMALE JR, PHILIPP, 2007; FRAGOSO CESAR, 1980). As rochas do Esr estão relacionadas aos estágios pré, sin e pós colisional da orogênese Brasileira, que segundo Chemale Jr (2000), pode ser dividido em quatro unidades geotectônicas pertencentes ao Cratón Rio de La Plata e ao Cinturão Dom Feliciano (segmento sul da Província Mantiqueira). A porção representada pelo Cratón Rio de La Plata é o Bloco Taquarembó e as

porções representadas pelo Cinturão Dom Feliciano são os terrenos São Gabriel, Tijucas e o Baótilo Pelotas.

Figura 2- Mapa de compartimentação do Escudo Sul-rio-grandense, focalizando o Terreno São Gabriel, local da área de estudo.



Fonte: Modificado de Nardi & Biteencourt, 2007

Os lineamentos regionais com direções NW-SW e NW-SE, subsidiaram inicialmente como um critério para a compartimentação do ESR (e.g PICADA 1971; RIBEIRO & FANTINEL,1978) e até atualmente são utilizados como critério bases para a compartimentação deste, não abstando a evolução do conhecimento e outros parâmetros postulados para o entendimento das associações petrotectônicas e a cronologia dos eventos durante os estágios evolutivos do ESRG, na literatura ainda é uma temática de bastante divergência entre os geocientistas(e. g. FRAGOSO-CESAR, 1980, 1991; FERNANDES et al., 1995; CHEMALE JR, 2000; HARTMANN; CHEMALE JR., PHILIPP, 2007; PHILLIP, PIMENTEL, CHEMALE JR., 2016).

A área de estudo se encontra inserida no Terreno São Gabriel, conhecido também como Terreno Rio Vacacaí (FRAGOSO-CESAR,1991), Cinturão Vila Nova (CHEMALE; HARTAMNN; SILVA, 1995), Zona Oeste (RIBEIRO & FANTINEL,1978) ou como a porção ocidental do Cinturão Dom Feliciano (FERNANDES et al.,1995) cujo limites são seccionadas pelos lineamentos Ibaré (ao sul), pelo lineamento

magnético Caçapava (a leste), e por coberturas fanerozoicas da Bacia do Paraná (noroeste e norte)

As ocorrências de rochas dentro do Terreno São Gabriel possuem uma grande exposição, extendendo-se na direção W-L desde São Gabriel à Caçapava do Sul, e também na direção N-S, que estende-se de São Sepé à Lavras do Sul. Tais ocorrências são registradas na literatura como rochas básicas e ultrabásicas, associadas com mármores e depósitos terrígenos de uma paleobacia oceânica, com registros de associações do tipo tonalito-trondhjemitó-granodiorito (TTG) e rochas cálcio alcalinas proveniente de arco magmático caracteriza essa associação petrotectônica dentro desse compartimento geotectônico (HARTMANN;CHEMALE JR.;PHILLIP, 2007; e.g FRAGOSO-CESAR,1980;BABINSKY et al.,1996).

4.3. Contexto geológico local

4.3.1. Complexo Metamórfico Passo Feio

O termo Complexo Metamórfico Passo Feio (CMPF) foi introduzido por Bittencourt (1983) onde a mesma reinterpreto a classificação proposta por Goñi et al. (1962) (RIBEIRO et al.,1966) que propunham a nomenclatura das rochas circundantes do granito Caçapava como “Formação Vacacaí”.

As rochas do CMPF foram inicialmente estudadas e descritas por Carvalho (1932), das quais foram atribuídas um caráter alóctone sugerido por Leinz, Barbosa e Teixeira (1941), que depois foram atribuídas como fragmentos de crosta oceânica obductada durante o fechamento do oceano Charrua na Orogênese Brasileira (FRAGOSO-CESAR,1991).

Essas rochas do CMPF representam uma espessa sequência metavulcanossedimentar neoproterozoica em estrutura antiformal, com caimento para noroeste, sendo constituída principalmente por anfibolitos, xistos, filitos, rochas metavulcânicas e metavulcanoclásticas (BITENCOURT, 1983; NARDIR & BITENCOURT, 1989.), com ocorrências em menores escalas de gnaisses quartzofeldspáticos, meta-arenitos feldspáticos, metagrauvascas, mármores e quartzitos.

Bittencourt (1983) defende que as rochas pertencentes ao mesmo, estão conectadas a dois eventos metamórficos regionais representados como M1 e M2, acompanhados por duas fases de deformação D1 e D2.

4.3.2. Complexo Granítico Caçapava do Sul

Segundo Bittencourt (1983) o Complexo Granítico Caçapava do Sul é apresentado como um corpo intrusivo em meio a unidade do Complexo Metamórfico Passo Feio, representado por dois corpos graníticos (PORCHER 2000). O corpo maior com aproximadamente 25 km de extensão, chamado de Granito Caçapava (CG) possui uma estrutura dômica assimétrica, com direção do eixo maior em N-S, com predominância de granodioritos, sienogranitos e monzogranitos, com a presença em menor escala de tonalitos e quartzito dioritos, intrusivos dentro do CMPF (RIBEIRO et al., 1966). Compreendem dentro desse corpo três fácies principais, sendo elas: biotita granitoide; leucogranitóides e granitóides transicionais (BITTENCOURT, 1983; NARDIR & BITTENCOURT, 1989).

O corpo menor com aproximadamente 10 km.de extensão, é chamado de Granito Santo Ferreira (GSF). Foi inicialmente cartografado por Leinz, Barbosa & Teixeira (1941), considerando com sendo uma apófise do GC. O GSF é caracterizado por sienogranitos e monzogranitos com afinidade alcalina, com idades próximas 552 Ma, inferidas através de datação pelo método Rb-Sr em rocha total (SARTORI & KAWASHITA, 1989). Os dois corpos apresentados possuem características estruturais e químicas semelhantes, assim então foram agrupados em uma só unidade (NARDI & BITTENCOURT, 1989)

A intrusão do GC e GSF foram originadas em zonas de cisalhamento tardias do Ciclo Brasileiro, representando os últimos estágios tectônicos do Ciclo Brasileiro Na região Sul do Brasil (NARDIR & BITTENCOURT, 1989).

4.3.3. Bacia do Camaquã

Paim (2000); Chemale Jr. *et al.*, (1995); Fragoso Cesar (1984) e Hartmann *et al.*, 2008, correlacionam a formação da Bacia do Camaquã (BC) com os estágios finais do ciclo Brasileiro, onde ocorreram espessos depósitos sedimentares no Esr, associados a grandes volumes de rochas vulcânicas, caracterizados por bacias tardi

a pós colisionais. Sua formação data entre 620 e 540 Ma (PAIM *et al.*,2000) com sucessões vulcânicas e sedimentares que totalizam mais de 10.000 m de espessura, delimitada por falhas de alto ângulo e direção NNE-SSW que compartimentam a BC em 3 sub-bacias – Camaquã Ocidental, Central e Oriental. (ALMEIDA 2005).

É mantida a ideia em que a BC configura um *locus* deposicionais que se assemelham a quatro pulsos tectono-vulcano-sedimentares consecutivos (PAIM *et al.* 2000), os quais são vinculados a diferentes ambientes tectônicos com diferentes assinaturas vulcânicas, onde seus registros são limitados por discordâncias angulares, nomeados como alogrupos. O termo bacia é usado para designar uma depressão onde se acumulou o registro de um depósito tectônico (PAIM *et al.*, 2014), assim a BC armazena a sobreposição parcial ou total do registro das bacias(1) de antepaís de retroarco Maricá (alogrupo Maricá- AM); (2) transcorrentes (strike-slipe) Bom Jardim Oeste e Leste (Alogrupo Bom Jardim- ABJ); (3) riftes Santa Bárbara Oeste e Leste (Alogrupo Santa Bárbara- ASB) e (4) Rifte Guaritas (Alogrupo Guaritas- AG).

Seguindo da base para o topo, o alogrupo Maricá corresponde a Série (Malcher & Mau,1960), Sequência Sedimentar do Grupo Maricá (Göni *et al.*, 1962), a Formação Maricá Robertson, 1966; Ribeiro *et al.*, 1966; e Ribeiro & Fantinel,1978) com espessura aproximada de 3000 m, depositados entre 620 e 580Ma compreendendo 3 sistemas deposicionais: Aluvial Inferior, marinho raso e aluvial superior (PAIM *et al.*, 1995). O AM é unidade que tem maior deformação dentro da BC, apresentando estruturas dúcteis suaves a moderadas relacionadas a falhas transcorrentes, inversas e de empurrão. Limitadas por uma superfície de não conformidade em sua base e uma discordância angular de baixo grau no topo (PAIM *et al.*, 2000).

O alogrupo Bom Jardim (ABJ) é correspondente ao Andesito Hilário de Robertson (1966) bem como as Formações Vargas e Hilário de Ribeiro & Fantinel (1978). Esta unidade possui aproximadamente 2000 m de espessura, onde há predominâncias de rochas piroclásticas e lavas de composição intermediária na porção oeste da BC. Rumo ao depocentro da BC, essas sucessões vulcânicas interdigitam-se e são gradativamente substituídas por conglomerados de origem aluviais com clastos de origem vulcânica intermediária e mais distante, são encontrados depósitos arenosos e lamosos, que compreendem a fluxos de fundo e

sistemas deltaicos (Paim et al., 2000). Essa sucessão Vulcano-sedimentar é limitada por discordâncias angulares suaves na base e acentuada no topo (PAIM et al., 2000).

O alogrupo Santa Bárbara (ASB) abrange as formações Acampamento Velho (Ribeiro & Fantinel, 1978) e Santa Bárbara (Robertson 1966). Essa unidade possui aproximadamente 2000 m de espessura, onde é subdivida em: aloformação Acampamento Velho (dominantemente vulcânica); aloformação Santa Fé (conglomerado aluviais) e aloformação Lanceiros e Segredo (progradação de diferentes sistemas deltaicos), compreendendo mais uma sucessão vulcano-sedimentar (Paim et al., 1995).

O Alogrupo Guaritas corresponde à Formação Guaritas (Goñi et al., 1962; Ribeiro & Fantinel, 1978) também como Formação Gruaritas e Conglomerado Coxilha (Ribeiro et al., 1966; Robertson, 1966). Esta unidade tem aproximadamente 600 m de espessura e corresponde ao último estágio deposicional preservado dentro da BC. Esta unidade pode ser subdividida em duas aloformações: aloformação Pedra Pintada e Varzinha, limitadas entre si por uma desconformidade (Paim et al., 1995). A primeira aloformação apresentada, sendo a mais inferior, é caracterizada por fácies desérticas e por rochas vulcânicas de composição intermediária, próxima à sua base. Já na aloformação Varzinha (superior) é caracterizada por fácies aluviais, eólicas, substituídas ambas por uma sucessão deltaica (PAIM et al., 2000).

4.4. Contexto geomorfológico

As primeiras classificações geomorfológicas do Brasil remota o século XIX, onde essas classificações eram baseadas nos conhecimentos que possuíam na época. Os trabalhos mais antigos que mostram essas classificações podem ser encontrados em Aires de Casal (1817) e Orville Derby (1884).

Azevedo (1949) diferente das classificações anteriores onde era comum o emprego de denominações de termos geológicos junto com geomorfológicos (ex: Planalto Cristalino), decidiu optar por uma classificação onde era abordado uma nomenclatura mais geomorfológica, empregando-se a geológica apenas como complementação da primeira. Sendo assim, uma vez que a compartimentação do Planalto Brasileiro era em Planalto Atlântico, Meridional e Central, foram acrescentadas

novas denominações como Planalto Arenítico-Basáltico, Planalto Sul Amazônico entre outros (ROSS, 2011).

Ab'Saber (1964,1969) também propôs classificações que visavam homogeneizar as grandes unidades do Planalto Brasileiro em relação a critérios puramente morfoestruturais ou então morfoclimáticos, onde Caçapava do Sul se encaixaria dentro dessas classificações em Planalto Meridional ou Gondwânico Sul Brasileiro (morfoestrutural) e no domínio das coxilhas subtropicais uruguaio-sul rio-grandense recobertas por pradarias mistas.

Segundo a subdivisão geomorfológica do Rio Grande do Sul proposta por Justus et al., (1986) e adaptada por Ross (2011), a classificação geomorfológica do Estado é dita como: Planalto Meridional (PM), Depressão Periférica (DP), Planície Costeira (PC) e Planalto Sul-rio-grandense (PSR). Caçapava do Sul está inserida na região geomorfológica do PSR (Figura 3), caracterizada por conterem unidades de relevo Planaltos Rebaixados 'Canguçu-Caçapava', que é identificada por configurar um relevo dissecado em colinas, encostas íngremes, áreas de topo e plano, cornijas e cristas (BORBA et al., 2013).

Figura 3- A) Contexto geomorfológico do Brasil, b) divisão geomorfológica do Rio Grande do Sul focalizando Caçapava do Sul.



Fonte: adaptado de Ross, Jurandy L.S (2011).

5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

5.1. Histórico da hidrogeologia

Há relatos que o uso da água subterrânea remonta a idades de 800 a.C nas regiões do Egito e Pérsia (Toman,1937). Sendo assim, sua utilização ocorre muito antes da compreensão de sua origem, ocorrência e movimento. Antigos filósofos gregos como Homero, Platão e Tales propuseram que as nascentes eram formadas pela água do mar que era canalizada por vias subterrâneas sob as montanhas, onde posteriormente ascendiam depois que filtradas. Anaxágoras (500-428 A.C) admite que a água da chuva possui um papel importante para fonte de água dos rios e para o armazenamento de água subterrânea, sendo que ainda não compreendia a natureza desse armazenamento (WALTON, 1970).

Aristóteles (384-322 A.C) teve um papel importante para evolução do conhecimento sobre água subterrâneas na sua época, postulando que os oceanos constituíam a base da Terra, e a partir da sua evaporação forma-se as nuvens, que a série condensação do ar, dava origem a chuva que abastecia os oceanos, e parte dessa precipitação penetra na terra e reaparece nas nascentes dos rios (BISWAS, 1972). Essa base teórica simples proposta por Aristóteles deu cunho para o entendimento do atual ciclo hidrológico. A importância da evaporação, precipitação e da infiltração só foram melhores entendidas na idade cristã pelo arquiteto Vitruvius e francês Bernad Palissy (1510-1590). O trabalho de Pallissy passou despercebido dentre as ideias dos filósofos gregos, pois foi escrito em francês e a língua científica da época era o latim (FETTER Jr., 2001).

Na idade média havia o entendimento de que terra “digeria o sal da água do mar e excretava água nos rios mananciais” (Johannes Kleper, 1571-1630), e que o escoamento total era proporcional as taxas de precipitações. No final do século XVII, acreditavam-se que somente a chuva não era suficiente para explicar a água que flui nos grandes rios (MANOEL FILHO, 1997).

O francês Pierre Perrault (1608-1680) foi o que deu o primeiro passo rumo ao esclarecimento da questão, onde foi pioneiro em quantificar a precipitação pluviométrica dentro de uma bacia hidrográfica e seu volume de água decorrente do

escoamento o superficial correspondente. Edmé Mariotté também francês (1620-1684) seguindo o trabalho de Perrault, deu o segundo passo dentro do entendimento da questão, Edmé realizou medidas sistemáticas no rio de Siena em Paris, onde a partir dos resultados obtidos comprovou o trabalho anterior realizado por Perrault. Pierre Perrault era advogado de formação, sendo assim, não era reconhecido muito bem dentro dos círculos científicos, ficando assim com o título de fundador da hidrologia de águas subterrâneas. Contudo, há quem acredite que a hidrogeologia assim nomeada posteriormente surgiu com o trabalho de Perrault (UOP- JOHNSON DIVISION, 1972). O astrônomo inglês Edmond Halley (1656-1742) foi que deu o último passo, quando o mesmo através de medições sistemáticas conseguiu comprovar que as taxas de evaporação do mar eram suficientes para suprir toda as demandas de nascentes e todo ciclo hidrológico continental (MANOEL FILHO, 1997).

Durante o século XVIII começa a ser imposto critérios geológicos como fundamentos da compreensão da ocorrência e movimentação das águas subterrâneas. Em 1715, Vallessière levanta a questão da importância de um substrato impermeável na questão do armazenamento de um sistema de água subterrânea sob pressão (CUSTODIO & LLAMAS, 1983).

5.2. Ocorrências de água subterrânea

Monoel Filho (1997) define como água subterrânea aquela que ocorre abaixo do nível de saturação ou nível freático, presente nas formações geológicas profundas totalmente saturada. Sendo assim, o estudo dessas águas além de dedicar-se ao fluxo em formações saturadas, engloba a circulação da água em zona não saturadas onde a distribuição da umidade exerce um papel fundamental no ciclo hidrológico e em diversos outros processos geológicos.

A maior porção de água subterrânea encontrada na terra tem sua origem no ciclo hidrológico, ou seja, no sistema onde a água sai dos oceanos para a atmosfera que precipita nos continentes, de lá retorna por vias subterrâneas ou superficialmente aos oceanos (FEITOSA, 2000).

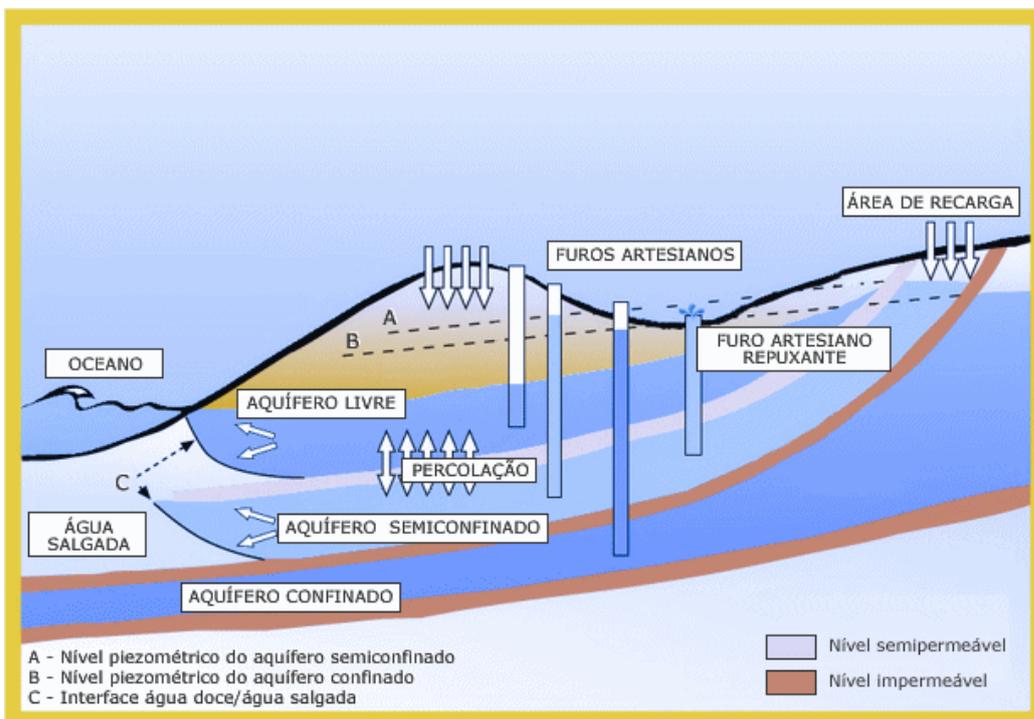
As unidades geológicas que controlam a movimentação dessas águas sob condições naturais são chamadas de aquíferos (FEITOSA; MANOEL FILHO, 2000), Lohaman *et al.*, (1972) dizem ainda a respeito sobre os aquíferos, que estes são

correspondentes a uma formação, grupo de formações ou parte de uma formação que contém material suficiente permeável para ceder significantes quantidades de água para poços e fontes. Fetter (1994) infere que para ser reconhecido como aquífero, uma unidade rochosa deve apresentar uma permeabilidade intrínseca mínima de 0,01 Darcy e também uma conectividade hidráulica aproximada de 0,03 pés por dia. Entretanto, para definir aquíferos é necessário o entendimento do conceito equitardo, onde Poland *et al.*, (1972) estabeleceu como:

Uma camada saturada, mas pouco permeável, que impede que as águas subterrâneas se movimentem e não produz água livre para poços, mas que pode transmitir água apreciável para/de aquíferos adjacentes e, onde suficientemente espessa, pode constituir uma importante unidade de armazenamento de águas subterrâneas. Aquitardos são caracterizados por valores de vazão que podem variar de relativamente baixos a relativamente altos. Em geral, aquitardos extensos, de vazão relativamente baixa podem funcionar regionalmente como limites de fluxo de sistemas aquíferos (POLAND; LOFGREN; RILEY, 1972).

Ainda, os aquíferos podem ser classificados por intermédio da pressão exercida sobre água na superfície que os limitam, seja ela no topo do aquífero ou em sua base e também pode ser classificado de acordo com a conectividade das mesmas camadas limítrofes, ilustrado na Figura 4 (FEITOSA, 2000).

Figura 4- Representação esquemática dos diferentes tipos de aquífero, de acordo com o sistema de pressão de águas e com a natureza das camadas que as delimitam no topo e na base.



Fonte: modificado de Bear & Verrujit,(1987).

Desta maneira, os aquíferos são separados em:

- **Aquíferos Confinados:** onde a pressão da água é superior à pressão vinda da atmosfera, podendo ainda estes serem separados de acordo com as camadas limítrofes em: confinado não drenantes e confinados drenantes (MONOEL FILHO, 1994)
- **Aquíferos Livres:** também chamados de aquíferos não confinados, são aqueles cujo a camada limítrofe superior corresponde a superfície de saturação, a qual se encontra sob pressões iguais as da base da atmosfera. Esses aquíferos também podem ser subdivididos em aquíferos livre não drenantes e drenantes (MANOE FILHO, 1994).

Dentro de um sistema geológico a distribuição espacial e origem aquíferos e equitardos são governados por variáveis estratigráficas e estruturais específicas de cada local. Onde na primeira variável, trata-se da familiaridade geométrica e cronológica entre aspectos diversos dentro do sistema geológico, por exemplo: camadas, lentes e formações sedimentares. As estruturas determinam os tributos

geométricos formados dentro de um sistema geológico por deformação, tais como juntas, fraturas, falhas e dobras (FEITOSA; MANOEL FILHO, 2000).

5.3. Contexto Hidrogeológico de Caçapava do Sul

Unidades hidrogeológicas operam como estratos condutores de água ou também com retardadores do escoamento para as camadas seguintes (MACHADO, 2005). Tóth (1978) hierarquiza essas unidades baseado em critérios de conectividade hidráulica, extensão regional ou litoestratigráfica. Uma formação hidroestratigráfica representa os limites das unidades estratigráficas estabelecidos. A combinação de duas formações forma um complexo, que pode aumentar ou reduzir os fluxos de água, formando assim um grupo hidrogeológico. Unidades de terceira ordem correspondem a sistemas hidrogeológicos, onde são mais extensos e diferencia-se da unidade anterior devido a ter maior correlação de fluxo e sistema de pressão, em vez de parâmetros litológicos (MACHADO, 2005).

Peit *et al.*, (2003) divide em três níveis (Quadro 1) para a identificação das unidades hidrogeológicas, levando em consideração as escalas representadas, sendo elas – NV1 que representa unidades de caráter nacional, compostas por grandes conjuntos hidrogeológicos (sistemas e domínios), levando coerências entre a conectividade hidráulica, fluxo e superfícies; NV2 corresponde a representação em escala regionais de unidades hidrogeológicas (sistemas e domínios) seguindo como base as estradas quantitativas e qualitativas das entidades hidrogeológicas; NV3 corresponde a área proporcional ou menor que o estado do Rio Grande do Sul (MACHADO, 2005).

Machado (2005) define como um domínio hidrogeológico uma entidade hidrogeológica equivalente a uma menor área dentro de um grande domínio hidrogeológico ou um sistema de aquífero, levando em consideração pelo menos um parâmetro como: litologia, estrutura, estratigrafia, potencimetria, geoquímica e hidráulica. No quadro 1 o domínio hidrogeológico está inserido dentro do nível 2.

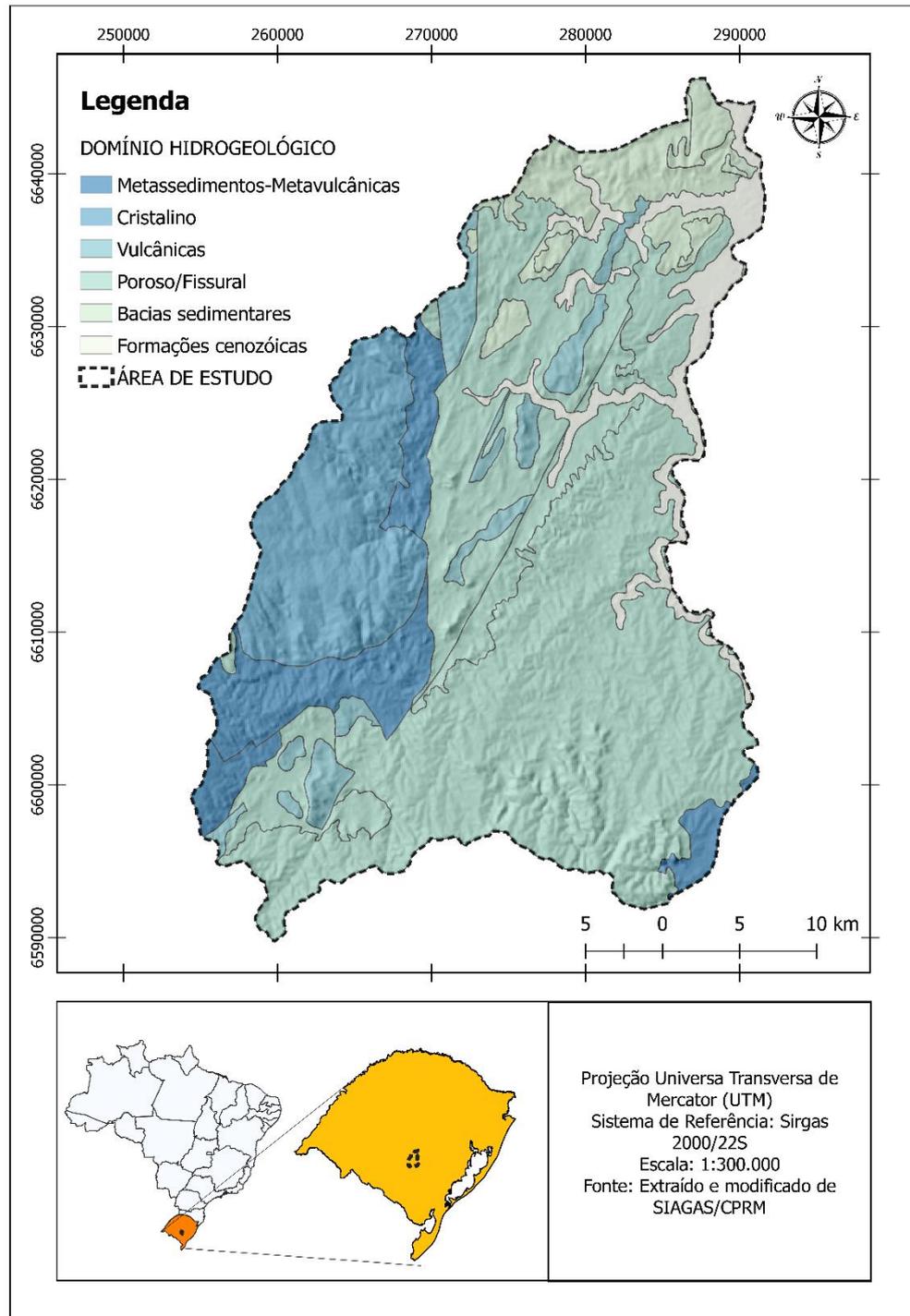
Quadro 1- Classificação dos níveis de amplitude hidrogeológicas, exemplificando o Sistema Aquífero Guarani.

Nível NV1 ou nível nacional Exemplo de Entidade	Nível NV2 ou nível regional Exemplo de Entidade	Nível NV3 ou nível local Exemplo de Entidade
Grande Sistema Aquífero Guarani	Sistema Aquífero Botucatu/ <u>Pirambóia</u>	Unidade Aquífera Guará
		Unidade semipermeável Sanga do Cabral
Grande domínio hidrogeológico Planalto Basáltico	Domínio Hidrogeológico <u>Cuesta Basáltica</u>	Unidade Impermeável <u>Alemoa</u>

Fonte: Modificado de Petit et al., (2003).

Dentro da área de estudo, são identificados seis dos sete domínios hidrogeológicos segundo Bomfim (2010), através do Mapa de Domínios e Subdomínios Hidrogeológicos do Brasil, confeccionado pela CPRM em 2007. Os domínios identificados são: Domínio Formações Cenozóicas, Domínio Bacias Sedimentares, Domínio Pororo/Fissural, Domínio Metassedimentos/Metavulcânicas, Domínio Vulcânicas e Domínio Cristalino (Figura 5).

Figura 5- Mapa de Domínios Hidrogeológicos da área de estudo.



Fonte: Modificado de CPRM.

Bomfim (2010), define o Domínio Formações Cenozóicas sendo aquele, formado por rochas sedimentares, de naturezas diversas, com espessuras variadas, que cobrem as rochas mais antigas. Dentro da hidrogeologia, este tipo de domínio

está correlacionado com os aquíferos porosos, que é caracterizado, principalmente, por conter uma porosidade primária alta. Deste modo, é classificado com alto potencial para permeabilidade de fluídos. Este domínio é associado a depósitos Quaternários e Terciários (aluviões, coluviões, depósitos eólicos, areis litorâneas, arenitos de praia, leques aluviais, coberturas detriticas e diversas coberturas residuais) (TELLES, 2016).

O Domínio Bacias Sedimentares possui um comportamento de aquífero poroso, que engloba sequências de rochas sedimentares que são associadas muitas vezes a vulcanismos e que fazem parte de entidades geotectônicas distintas (bacias sedimentares) (TELLES, 2016). Estas bacias apresentam um elevado potencial hidrogeológico, constituindo importantes reservatórios em virtude de sua grande espessura, e boa seleção granulométrica, parâmetros estes que influenciam diretamente a porosidade e a permeabilidade de um aquífero (BOMFIM, 2010).

O Domínio Poroso Fissural, engloba pacote sedimentares com ausência de metamorfismo ou apresentando metamorfismo de baixo grau, representado por litologias que apresentam uma litificação acentuada, forte compactação e faturamento. Os aquíferos deste domínio são classificados como do tipo “misto”, visto seu comportamento granular com porosidade primária que varia entre baixa e média e também pelo comportamento fissural, representado pela porosidade secundária, oriunda do fraturamento evidente (BOMFIM, 2010).

O Domínio Metassedimentos/Metavulcânicas, tem o comportamento unicamente fissural. Os litotipos associados reúnem xistos, filitos, meta-arenitos, metasiltitos, anfibolitos, quartzitos, ardósias, metagrauvascas e metavulcânicas diversas, onde em ambos os litotipos, a porosidade primária é inexistente, ocorrendo o fluxo de água por esse domínio através da porosidade secundária, onde a circulação fluídica acontece nas fraturas e fendas abertas tectonicamente (TELLES, 2016). Apesar deste domínio ter comportamento similar ao do Cristalino tradicional (granitos, migmatitos etc), uma separação entre eles é necessária, uma vez que suas rochas apresentam comportamento reológico distinto; isto é, como elas tem estruturação e competência diferente, vão reagir também diferentemente aos esforços causadores das fendas e fraturas, parâmetros fundamentais no acúmulo e fornecimento de água (TELLES, 2016). Deve ser esperada, portanto, uma maior potencialidade

hidrogeológica neste domínio do que o esperado para o Cristalino tradicional (BOMFIM, 2010).

O Domínio Vulcânicas, engloba rochas vulcânicas e metavulcânicas de baixo grau metamórfico, com um comportamento de aquífero fissural, dado pela porosidade secundária. Neste domínio ainda é comum a presença de estruturas do tipo foliação em seus litotipos, que ajudam na formação da porosidade secundária. No potencial hidrogeológico, espera-se que estas áreas apresentem um maior potencial à ocorrência de águas subterrâneas em relação ao Domínio Metassedimentos/Metavulcânicas (BOMFIM,2010).

O Domínio Cristalino é caracterizado como aquífero fissural com porosidade secundária (TELLES, 2016). A litologia deste domínio é constituída por granitoides, gnaisses, granulitos, migmatitos e rochas básicas e ultrabásicas. A ocorrência da água subterrânea está condicionada a presença de fraturas e fendas. (O domínio apresenta reservatórios aleatórios e descontínuos de pequena extensão com baixo potencial hidrogeológico, de pequenas vazões e geralmente salinizados (BOMFIM, 2010).

Os sistemas aquíferos são citados por Roisenberg et al. (2007) como em número de 21. No município de Caçapava do Sul são observados somente quatro:

Sistema Aquífero Embasamento Cristalino II – Compõe aquíferos limitados de baixa possibilidade para água subterrânea em rochas com porosidade intergranular ou por fraturas. Relacionados às rochas graníticas, gnáissicas, andesitos, xistos, filitos e calcários metamorfizados, que estão localmente afetados por fraturas e falhas. Apresentam capacidades específicas inferiores a 0,5 m³/h/m (BOMFIM, 2010).

Sistema Aquífero Aquicludo Eo-Paleozóico – Corresponde a aquíferos praticamente improdutivos em rochas com porosidade intergranular ou por fraturas. Representam os piores reservatórios de águas subterrâneas. São constituídos por arenitos finos a médios, bastante endurecidos por cimentação ferruginosa, calcítica e silicosa que conferem a este sistema porosidade muito baixa (TELLES, 2016).

Sistema Aquífero Palermo/Rio Bonito – São aquíferos de média a baixa possibilidade para águas. Localiza-se em rochas e sedimentos com porosidade intergranular. Representados por arenitos finos a médios e intercalados com camadas

de siltitos argilosos e carbonosos. As capacidades específicas desse aquífero são inferiores a 0,5 m³/h/m (TELLES, 2016)

Sistema Aquífero Aquitardo Permiano – Aquíferos de baixa possibilidade para água subterrânea em rochas com porosidade intergranular ou por fraturas. Tratam-se de siltitos argilosos, argilitos, folhelhos pirobetuminosos e pequenas camadas de margas e arenitos (TELLES, 2016).

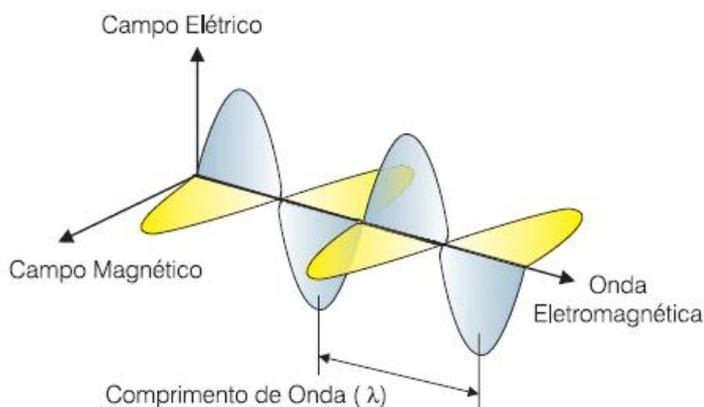
5.4. Sensoriamento Remoto

O sensoriamento Remoto foi definido por Freitas (1998), como sendo a técnica de obtenção de informações sobre um objeto ou sobre um fenômeno através de análise de dados recolhidos por um equipamento ou sensor sem contato direto com aquele objeto ou fenômeno.

Uma necessidade básica para a existência do sensoriamento remoto é que se tenha uma fonte de energia que ilumine ou forneça energia eletromagnética (luz, calor, ondas de rádio) ao alvo de interesse (a menos que esse alvo emita sua própria energia) (LEITE, 2008). Sendo assim, uma definição com maior rigor para o sensoriamento remoto pode ser de uma medida de troca energética de interação da radiação eletromagnética de um determinado comprimento de onda com os objetos da superfície terrestre (MENEZES & FERREIRA JÚNIOR, 1995).

A radiação eletromagnética consiste de um campo elétrico que varia em proporção na direção ortogonal à direção de propagação da radiação e de um campo magnético perpendicular ao anterior (LILLESAND *et al.*, 2015) (Figura 6).

Figura 6- Onda eletromagnética



Fonte: FEITOSA (2008).

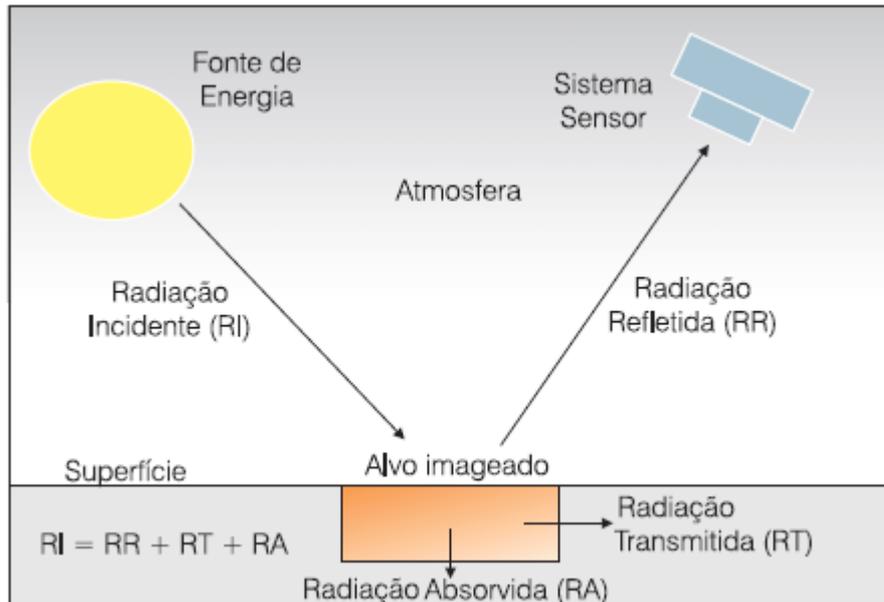
As principais características da radiação eletromagnética são o comprimento de onda e a frequência (Leite, 2003). O comprimento de onda (λ) é definido como sendo a distância entre dois picos sucessivos de ondas e é medido em metros (m). A frequência (f) é definido como sendo o número de ondas que passa por um ponto conhecido em um determinado tempo, usualmente é medida em hertz (Hz). A frequência e o comprimento de onda assumem uma relação pela equação 1:

$$c = \lambda \cdot f \quad (1)$$

onde c é a velocidade da luz ($c= 3 \times 10^8$ m/s), λ o comprimento de onda medido em metros (m) e f a frequência em hertz (Hz) (MENEZES & FERREIRA JÚNIOR, 1995).

A energia eletromagnética incidente ao atingir a superfície terrestre, após sofrer modificações devido a estratificação atmosférica, interagirá com o alvo por meios de troca energética, ocasionado uma absorção pelo alvo, reflexão e transmissão pela superfície atingida (Figura 7). O entendimento das interações das radiações com o alvo e a relação entre as frações de absorção, reflexão e transmissão são essenciais para o entendimento e pesquisas de alvos através de sensoriamento remoto, uma vez que essas diferentes refletem tipos de materiais distintos, assim, podendo ser utilizada para distinguir feições na superfície terrestre (FREITAS, 1998).

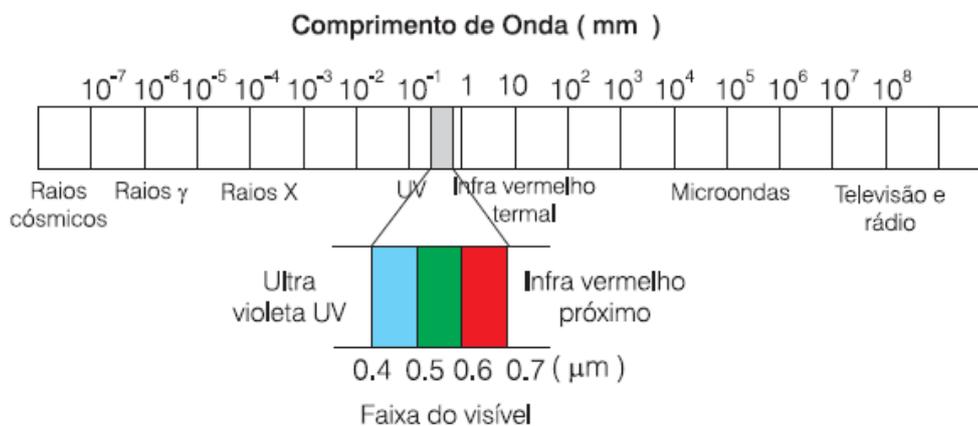
Figura 7- Interação da radiação eletromagnética com o alvo. A radiação incidente (RI) pode ser refletida (RR), transmitida (RT) ou absorvida (RA).



Fonte: Extraído de Feitosa (2018).

O registro da energia eletromagnética refletida é feito por sistemas de sensores, que Leite (2003) define como sendo qualquer tipo de equipamento capaz de transformar a energia refletida pelo alvo em sinais passíveis de serem convertidos em informações sobre o mesmo. Os sistemas de sensores são divididos pela relação à região do espectro que operam (figura 8) e pela fonte de energia utilizada.

Figura 8- Espectro Eletromagnético.



Fonte: Extraído de Feitosa (2018).

Em relação a fonte de energia, os sensores podem ser divididos em passivos e ativos. Os sensores passivos (câmera fotográfica, satélites) detectam radiação solar refletida pelos objetos da superfície terrestre, já nos sensores ativos, há a própria fonte de radiação eletromagnética, como, por exemplo os radares (FREITAS, 1998). Quanto ao espectro de operação dos sensores, estes podem ser divididos entre os que operam na faixa ótica e na faixa de micro-ondas (CROSTA, 1992). Aqueles utilizam componentes óticos, como espelhos, primas e lentes, operando na faixa do visível a infra-vermelho distante. Já os sensores que operam no espectro onde são observadas ondas com o comprimento entre 1 mm e 1 m, são intitulados como sensores de micro-ondas, ou ativos (FREITAS, 1998).

Após a captação da energia eletromagnética pelos sensores a bordo dos satélites, ocorre uma conversão para uma imagem digital (FREITAS, 1998).. Genericamente, Freitas (1998) define também que uma imagem digital produto desta conversão, é uma função bidimensional da intensidade radiante $f(x,y)$, onde x e y representam as coordenadas espaciais de um objeto, e o valor de f é de acordo à energia radiante refletida ou emitida naquela posição. Sendo assim, a imagem digital é uma correspondência quantizada dos valores de radiância representante a cada área unitária imageada na superfície (FREITAS, 1998). Esses valores são referidos como níveis de cinza ou como número digital DN (digital number) (FREITAS, 1998) (MENEZES *et al.*,1995).

Os elementos de área de um terreno, que define os níveis de cinza de uma imagem são chamados de *pixels* (picture x element). Para cada *pixels* é atribuído um valor inteiro que reflete a radiância dos diferentes objetos localizados dentro da área unitária do imageamento (FREITAS, 1998).

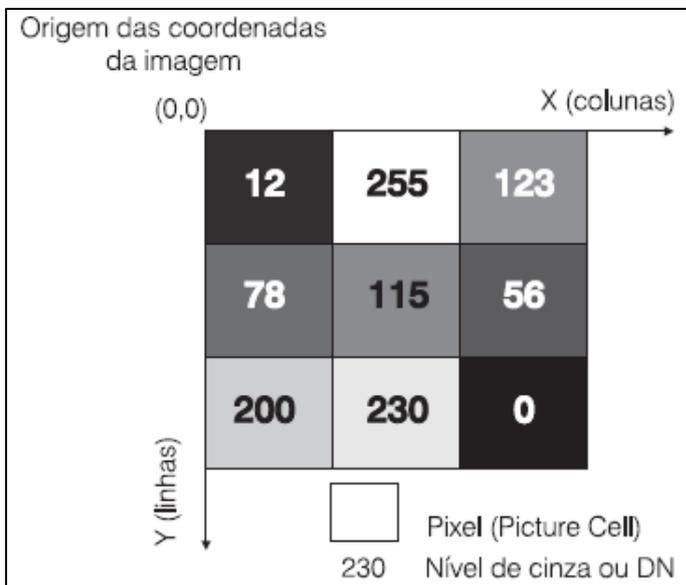
Como essa imagem digital é representa de forma numérica, a mesma pode ser construída na forma de uma matriz bidimensional de x colunas e y linhas, sendo que para cada ponto da matriz é associado um valor (nível de cinza) que representa a radiância definida como o fluxo de energia radiante de uma fonte, numa determinada direção, por unidade de área. A radiância de um *pixel* na imagem, caracteriza, verdadeiramente, uma média das radiâncias de todos os elementos que compõem *pixel* (LEITE,2003).

Cada sistema de sensor possui especificações próprias com relação à largura e número de faixas espectrais que podem captar (CROSTA, 1992). Essa capacidade define sua resolução espacial (Menezes et al.,1995). Em um dos sensores mais utilizados, o TM LANDSAT, a distribuição de níveis de cinza, associadas às intensidades das radiâncias observadas, são representadas por:

- 0 – Nível mínimo de energia = cor preta obtida pelo sensor.
- 255 - Nível máximo de energia = cor branca obtida pelo sensor.

A Figura 9 mostra a origem de um sistema de coordenadas em uma imagem digital. O tamanho do *pixel* determina a resolução espacial da imagem e o mesmo é determinado pela capacidade do campo instantâneo de visada do sensor, que se trata de uma representação exagerada da área no terreno pelo sensor em um determinado instante (LEITE, 2003).

Figura 9- Origem das coordenadas em uma imagem digital, pixels e níveis de cinza ou DN. DN 0 (zero), cor preta, DN 255, cor branca. Os valores de DN exemplificados correspondem ao nível de cinza verdadeiro no espaço RGB.



Fonte: Extraído de Feitosa (2003)

Antes das imagens digitais obtidas por sensoriamento remoto gerarem produtos cartográficos, ou para os diversos temas onde são exaustivamente utilizadas, as imagens passam por processos que as tornam úteis para seus devidos fins. Tais

procedimentos podem ser na etapa pré-processamento e na etapa pós-processamento (LEITE, 2003).

No pré-processamento são realizadas manobras técnicas que corrigem os efeitos indesejados na hora da aquisição da imagem. As correções mais comuns são a correção radiométrica e correção geométrica (NOVO, 1989). A primeira é referente a interferência na iluminação da cena e nas condições climáticas entre o alvo e o sensor (Engman, E.T.; Gurney, R.J., 1991). Quando a energia eletromagnética interage com as partículas e gases presentes na atmosfera, estes causam efeitos de espalhamentos naquela (Ricci & Petri, 1965). Tal fenômeno pode ocasionar uma redução ou atenuação na iluminação do local de interesse na superfície da terra. (Leite, 2003) A atmosfera pode proporcionar um aumento de propagação de energia entre o alvo e o sensor (Crosta, 1992). Já na correção geométrica, são realizados procedimentos que visam associar a imagem adquirida a um sistema de coordenadas, para que esta possa ser trabalhada em conjunto com outros produtos. Um método comum para esse tipo de correção, é a partir de pontos de controle obtidos pelo GPS (*Global Positioning System*) em campo ou em mapas e que estão presentes na imagem (LEITE, 2003).

A etapa pós-processamento é caracterizada pelas técnicas utilizadas para permitir uma melhor interpretação visual nas imagens digitais (LEITE, 2003). Nesta etapa, tem-se como objetivo intensificar contrastes presentes na imagem, através de procedimentos de filtragens, operações matemáticas de bandas que, possibilitam o operador identificar feições de interesse que distingui do seu entorno (SCHOWENGERD, 1983).

5.5. Sistema de Informações Geográficas (SIGs)

Câmara & Davis Jr. (2001) define como sendo um SIG um conjunto de ferramentas computacionais para geoprocessamento, que permitem realizar análises complexas, quando incorporadas distintas fontes de dados e ao criar banco de dados georreferenciados, tornando possível a automatização de produção de produtos cartográficos. Tomlisson (2007) ressalta que um SIG possui uma vasta aplicação, em diversos setores industrial e acadêmico, resistindo a uma definição simplista. Sendo assim, em vez de uma definição, um SIG apresenta um modelo holístico (Figura 10)

no qual dados são analisados e transformados em alguma informação útil (BOMFIM, 2002).

Figura 10- Modelo holístico de um SIG.



Fonte: Extraído de Feitosa (2003).

A palavra sistema dentro do SIG é referente aos vários componentes interligados com distintas finalidades, como manipulação de dados preexistentes, aquisição de novos dados, transformações, combinações, análises, modelamento e exportação de dados (FREITAS, 1998).

Já o termo informação implica que os dados de um SIG são arquitetados para alimentar o conhecimento do operador através de mapas, gráficos, tabelas, etc. (TOMLINSON, 2007).

A termo geográfica implica indispensavelmente que, todos dados dentro de uma plataforma de SIG, devem ter seus pontos conhecidos em um sistema de coordenadas geográficas ou qualquer sistema de projeção (TOMLINSON, 2007).

Um SIG é composto por cinco componentes que interagem entre si: operador, dados, métodos, programas de computador (*softwares*) e equipamentos de informática (Figura 11) (BRANDÃO & GOMES, 2003).

Figura 11- Principais componentes de um SIG.



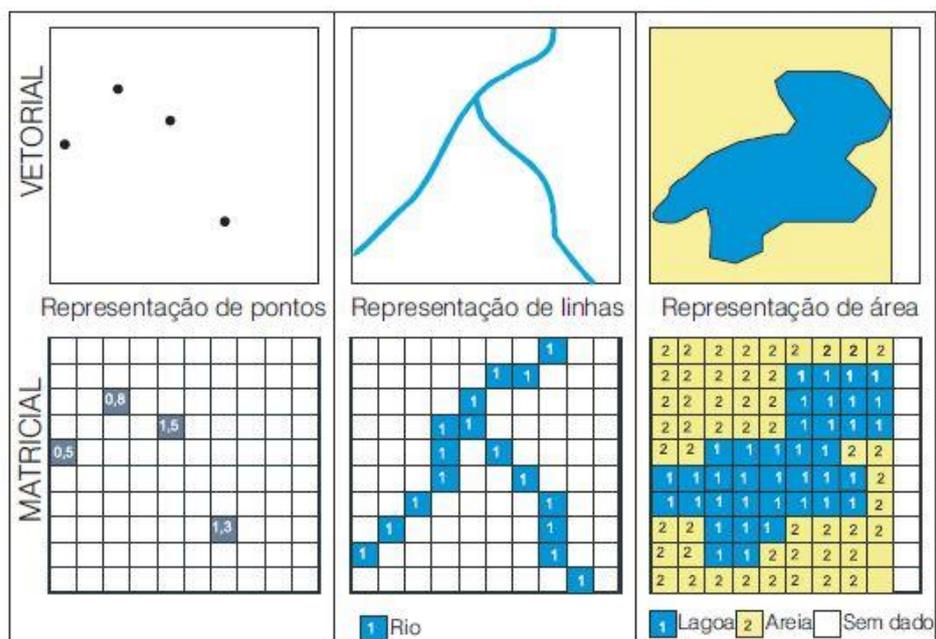
Fonte: Autor.

O Operador desempenha as funções mais importantes em um ambiente de SIG, a experiência e qualificação do operador determina, no sucesso ou fracasso de um projeto em andamento. Desta maneira, é de suma importância o envolvimento de profissionais sobre o tema estudado, e de especialistas nas áreas de geoprocessamento e sensoriamento remoto para que possa se garantir uma qualidade nos produtos finais realidade dentro da plataforma SIG (BORGES *et al.*, 2005).

O banco de dados espaciais a ser montado em um SIG, é a etapa mais onerosa e demorada no desenvolvimento de um projeto. A inserção de dados em uma plataforma de SIG, podem ser pela digitalização de mapas analógicos, digitação de dados pontuais em do tipo xyz, importação de produtos de sensoriamento remoto, inserção de dados frutos de levantamentos topográficos, geofísicos e por diferentes dispositivos de importação e transformação de arquivos digitais de conteúdo gráfico, textual e gráfico (CÂMARA, 2005).

Os tipos de dados geográficos podem ser agrupados em duas componentes fundamentais e estritamente inter-relacionadas: a componente espacial ou cartográfica, com suas localizações e geometrias e as componentes atributos. Na componente espacial os dados podem ser divididos em dois modelos de dados para representar a geometria do fenômeno estudado o modelo vetorial e o modelo matricial ou comumente chamado *Raster*. No primeiro, os elementos gráficos são linhas, pontos e polígonos (Figura 12). No segundo, as células de uma matriz são as unidades básicas de representação. A Figura 12 mostra como é a representação de ambos e no Quadro 1 mostra as principais diferenças entre os mesmos (CÂMARA, 2005).

Figura 12- Representação de pontos, linhas e polígonos nos modelos vetorial e matricial.



Fonte: Extraído de Feitosa (2003).

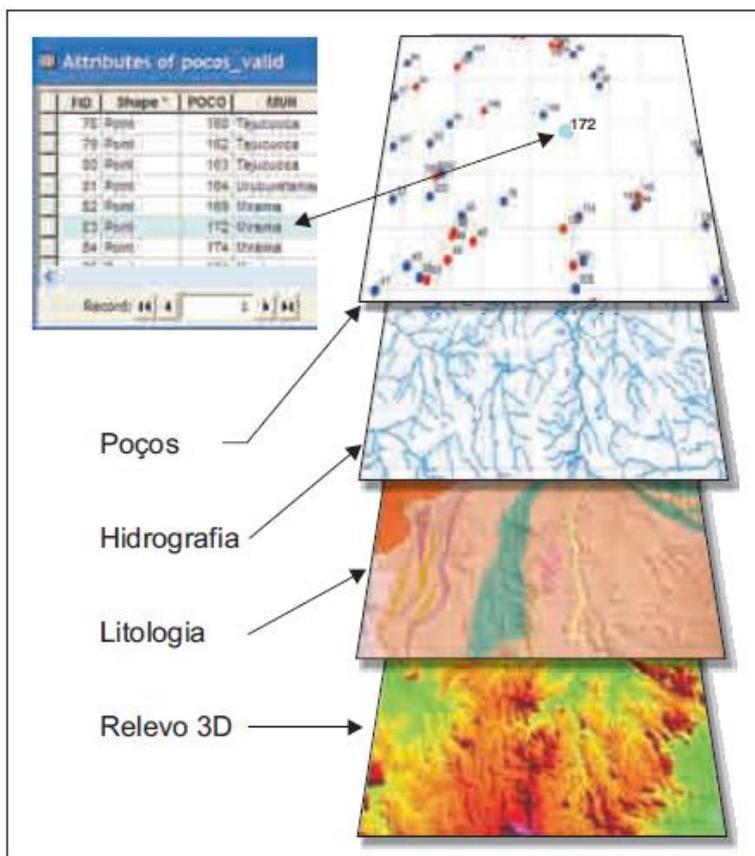
Quadro 2- Principais características dos modelos vetorial e matricial.

MODELO VETORIAL	MODELO MATRICIAL
Melhor indicados para descrever fenômenos discretos	Adequado para representar fenômenos que são alterados com o tempo
Permite relacionamentos topológicos, operações estatísticas e de consultas	Modelagem e simulação mais fáceis
Estrutura de dados complexa	Estruturação simples em seus dados
Inadequado para álgebra de mapas	Adequado par álgebra de mapas
Não perde qualidade quando se altera a escala	Indicado para representar objetos em pequenas escalas
Definição gráfica nítida dos limites dos objetos	Os limites entre as regiões do espaço têm aparência serrilhada

Fonte: Adaptado de Feitosa (2003).

A componente “atributos” corresponde à descrição dos dados geográficos e são armazenados, comumente em tabelas. Nessas tabelas, os tributos que descrevem as propriedades de um projeto ou fenômeno podem ser classificados de acordo com Stevens (1969) em quatro níveis de escala de medição: escala nominal, escala ordinal, escala intervalar e escala de razão. A Figura 13 mostra como é o funcionamento de um SIG, onde cada camada ou *Layer* temático, tomado como individualmente, corresponde a um nível de informação que representa diferentes aspectos e propriedades de um objeto ou fenômeno da realidade (BORGES, 2005).

Figura 13- Estrutura de armazenamento de dados geográficos em um SIG. Observe-se a relação entre o objeto geográfico (poço) e um registro da tabela de atributos.



Fonte: Extraído de Feitosa (2003).

O método empregado em um projeto em SIG segue os demais projetos em outras áreas. Sendo assim, é aconselhável o exercício de práticas de controle em todas as etapas de trabalho, assim como a verificação dos resultados e, se for necessário a correção da metodologia empregada inicialmente a fim de objetivar um melhor resultado com maior confiabilidade (BRANDÃO & GOMES, 2003).

Existem uma ampla disponibilidade de programas computacionais tanto gratuitos como pagos para manipular e integrar dados georreferenciados (FREITAS, 1998). Tais programas apresentam e incorporam centenas de propriedades funcionais que, auxiliam com agilidade na produção cartográfica, modelamentos, gerenciamento de dados etc. Hoje mais que nunca são incrementadas novas ferramentas aos programas computacionais votados para SIG, visto diferente de décadas anteriores, onde os *softwares* eram essencialmente corporativos, agora são amplamente

difundidos no ciberespaço e operam pela infraestrutura lógica de servidores de internet conhecidos como Web Mapping (LEITE,2003).

O equipamento computacional ou *Hardware* como é comumente chamado, é formado por uma unidade central de processamento, ou seja, é a plataforma física do sistema. Inclui computadores e periféricos conectados entre si, fisicamente ou não, por meio de placas, cabos e dispositivos de conexão remota sem fio (BONHAM-CARTER, 1998)

5.6. Processo Analítico Hierárquico (AHP)

A ideia principal da teoria do Processo Analítico Hierárquico desenvolvida por Saaty (2006) é a redução do estudo de sistemas a uma sequência de comparações por pares. A utilidade do método realiza-se no processo de tomada de decisões, reduzindo suas falhas (SILVA, 2007).

O *Decision Support Systems Glossary*, definiu o método AHP como sendo uma aproximação para tomada de decisão, que necessita de uma análise de multicritérios de uma escolha onde são necessárias ponderações referentes à relevância de cada critério que pertence a solução do problema, formulando um *ranking* das alternativas (MOHAMMADI-BEHZAD et al., 2018).

O benefício do método é que, como os valores atribuídos aos julgamentos ou pesos, como é comumente mencionado na literatura, são atribuídos seguindo a experiência, intuição e também de dados físicos preexistentes, proporcionado ao método uma aplicabilidade sobre aspectos qualitativos e quantitativos de um problema de (SAATY R.W, 2012).

O método AHP possui aplicabilidade em diversas áreas, incluindo na prospecção de águas subterrâneas, onde o método é aplicado levando em consideração tanto parâmetros da superfície como também dados de subsuperfície, que são extraídos de poços de água (RAZANDI, POURGHASEMI, NEISANI, 2015; MOGAJI, LIM, 2017; FASHAE et al., 2014). Outra área onde a metodologia é exaustivamente aplicada é dentro do campo profissional, cabendo destaque à avaliação de riscos em projetos (HUANG et al., 2004).

A hierarquia empregada no método funciona como uma divisão do problema geral em avaliações de menores escalas, o que proporciona uma diminuição da complexidade do caso e mantendo a participação dos problemas menores, que ao final, são somados e resulta na solução do problema global (SILVA, 2007).

Saaty (2006) ressalta que, através de comparações aos pares em cada nível de hierarquia baseada na escala de prioridades do AHP, os integrantes desenvolvem pesos relativos, comumente chamados de prioridade, para diferenciar a importância dos critérios. A prioridade é baseada em julgamentos ou comparação, que representa uma relação de dois elementos que pertence ao mesmo problema (PINTO et al., 2017). O grupo de todos os julgamentos pode ser representados através de uma matriz quadrada, onde os elementos são comparados com eles mesmos. Sendo assim, cada julgamento corresponde a dominância de um elemento da coluna à esquerda sobre um elemento da linha do topo (SAATY R.W, 2012).

Saaty (1991, 2006) recomenda o uso de uma escala numérica (Quadro 3) onde se emprega valores de 1 a 9 ao julgamento, com 1 que significa a indiferença de importância de um critério em comparação ao seu correspondente na matriz, e 9 significando a extrema importância de um critério sobre outro, havendo também estágios intermediários entre 1 e 9.

Quadro 3- Comparações do AHP.

Intensidade de Importância	Definição	Explicação
1	Mesma importância	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo.
3	Importância pequena de uma sobre a outra	A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação à outra.
5	Importância grande ou essencial	A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade em relação à outra.
7	Importância muito grande ou demonstrada	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação à outra; sua dominação de importância é demonstrada na prática.
9	Importância absoluta	A evidência favorece uma atividade em relação à outra com o mais alto grau de certeza.
2, 4, 6, 8	Valores intermediários entre os valores adjacentes	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições.
Recíprocos dos valores acima de zero	Se a atividade i recebe uma das designações diferentes acima de zero, quando comparada com a atividade j, então j tem o valor recíproco quando comparada com i.	Uma designação razoável.
Racionais	Razões resultantes da escala	Se a consistência tiver de ser forçada para obter valores numéricos n, somente para completar a matriz.

Fonte: Extraído de Saaty (1991).

6. MATERIAIS E MÉTODOS

6.1. Preparação das camadas

A litologia é um dos principais fatores controladores da qualidade e quantidade de ocorrências de águas subterrâneas em um determinado local (ADIAT; NAWAWI; ABDULLAH, 2012). Uma vez que, a litologia reflete diretamente nas características propícias para a infiltração da água no meio assim como seu armazenamento, considerando o grau de porosidade de uma rocha e sua permeabilidade, assim como os constituintes químicos presentes na composição mineralógica desta, podendo tornar a água presente em um aquífero impotável decorrente dos íons dissolvidos

através do aquífero. O mapa geológico é feito a partir da disponibilidade do arquivo vetorial extraído da CPRM, em uma escala de 1:300.000.

Lineamentos são manifestações de características lineares que podem ser identificadas através da utilização de sensoriamento remoto (FASHAE et al., 2014). Lineamentos e suas intersecções desempenham um papel de grande relevância nas ocorrências e na movimentação das águas subterrâneas, principalmente em terrenos onde o contexto geológico é de rochas cristalinas (MOHAMMADI-BEHZAD et al., 2018; FERNANDES, 2008)(FERNANDES, 2008). Segundo Fashae (2014), a presença lineamentos estruturais têm a função de atenuar canais para a movimentação das águas subterrâneas, o que pode resulta no aumento da porosidade secundária das rochas do local, sendo assim, pode ser considerado com um grande fator para determinar zonas potenciais de recursos hídricos subterrâneos (FASHAE et al., 2014; OBI et al., 2000).

Os lineamentos foram detectados segundo a metodologia aplicada por Chiang (1984), onde a identificação das estruturas lineares é feita como sabe na combinação de elementos retilíneos do relevo observáveis na imagem (HERNANDEZ, 2016). Tais elementos podem ser: linhas ou segmentos de escarpas, alinhamentos de cristas, vales e trechos de rios, depressões alongadas ou diferenças texturais e de tonalidade (CHIANG, 1984).

Sobre um modelo digital de elevação (MDE) obtido através do portal Alaska Satélite Facility (NASA), levantamento realizado pelo satélite ALOS PALSAR, como uma resolução espacial de 12,5m. Sobre o MDE foram aplicadas técnicas sombreamentos artificiais nas orientações 45° (NE) e 315°(NW), com a utilização do *software* livre Quantum Gis (Qgis) 2.17, com o intuito de ressaltar os lineamentos da área de estudo.

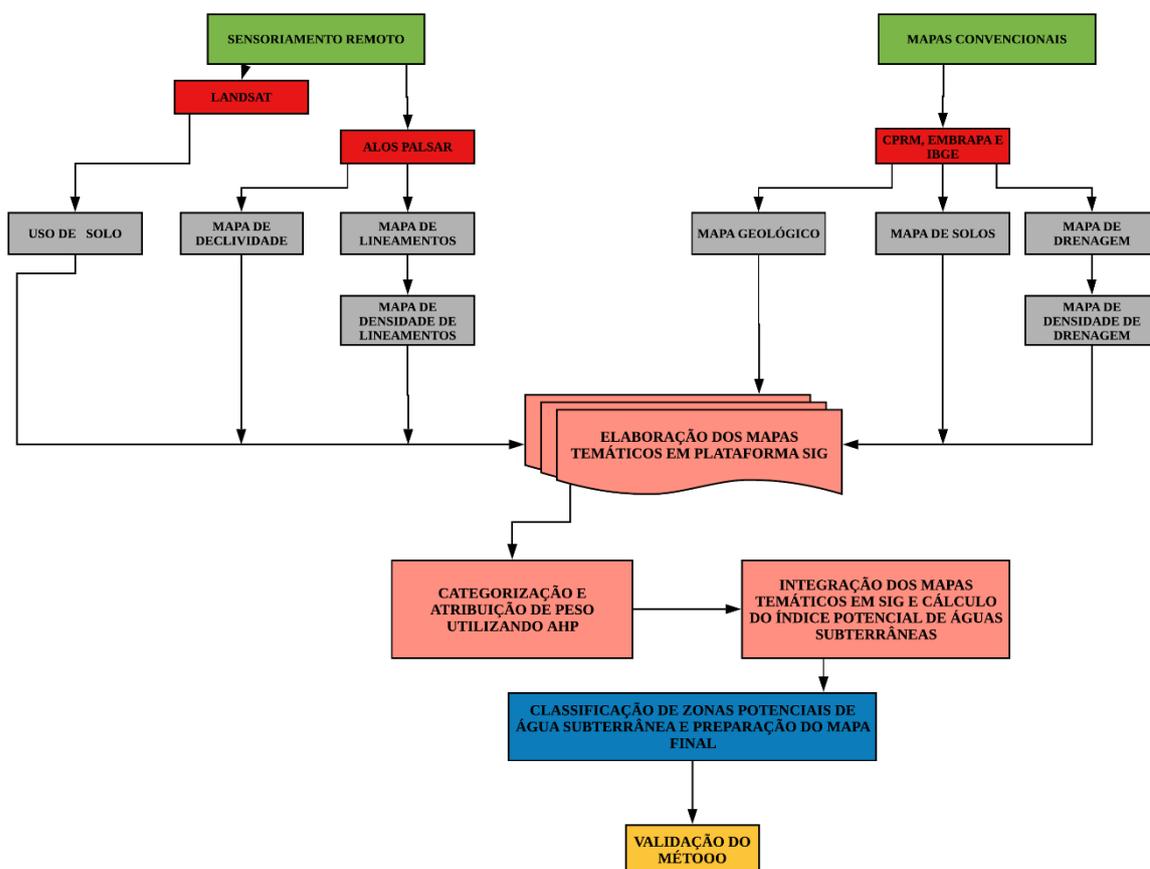
A cobertura do solo e conseqüentemente o seu uso, desempenha um papel de influência na potencialidade às ocorrências de águas subterrâneas, devido as características do escoamento superficial proveniente de cada tipo de solo (DANTAS et al., 2010). A taxa de infiltração é governada pelas características hidráulicas do solo que, é o resultado em grande parte pelo tamanho de grão, que determina a porosidade do meio (FASHAE et al., 2014). O mapa de solos foi obtido através do banco de dados

vetoriais de livre acesso pertencentes a CPRM e reclassificado segundo os padrões estabelecidos pela EMBRAPA dentro da plataforma de SIG Qgis. A camada de uso de solos é obtida através da classificação supervisionada de imagens digital do LANDSAT-TM 5, que revela quais os tipos de ocupação que são evidentes das áreas (FREITAS, 2000).

A densidade de drenagem é uma função inversamente proporcional a permeabilidade de um meio (AL SAUD, 2010), portanto, pode ser considerado um parâmetro avaliativo pra determinar zonas potenciais de águas subterrâneas, pois se comparadas zonas de alta densidade de drenagem e zonas de baixa densidade, a segunda vai possuir maior potencialidade hídrica subterrâneas (Dinesh Kumar et al. 2007; Mageesh et al. 2012), considerando que quanto maior a densidade de drenagem, mais rapidamente a água precipitada responsável pelo escoamento superficial chegará ao exutório da bacia hidrográfica (DANTAS et al., 2010). O mapa da densidade de drenagem é realizado através da vetorização direta da imagem digital do LANDSAT e também das cartas topográficas existente da área, na escala de 1:50.000 (DANTAS et al., 2010). Após a formação do mapa de drenagens, foi utilizado a ferramenta Densidade Kernel do Qgis para calcular a densidade das drenagens.

Após a preparação de todos mapas temáticos com seus atributos distintos, os mapas foram convertidos para o formato raster e, foram atribuídos pesos adequados em ordem de hierarquia na potencialidade em relação a ocorrência de águas subterrâneas usando o processo hierárquico analítico (AHP) (Saaty 1980,1992). Todos os mapas temáticos ponderados e normalizados foram integrados e processados dentro da plataforma Qgis 2.17 para mapear as zonas de potencial hídrico dentro da área de estudo. Os detalhes do procedimento realizado estão ilustrados no fluxograma da Figura 14.

Figura 14- Fluxograma para delinear zonas potenciais de águas subterrâneas utilizando técnicas de Sensoriamento Remoto, SIG e metodologia AHP.



Fonte: Autor.

6.2. Processo de análise hierárquica

O processo de análise hierárquica desenvolvida por Saaty (1980, 1986, 1992) foi a metodologia utilizada nesse estudo para definir os pesos atribuídos nos diferentes mapas temáticos e suas características intrínsecas para classificar a potencialidade de águas subterrâneas dentro da área de estudo. O método AHP funciona através de uma matemática simples, possibilitando ao usuário do método avaliar os pesos de vários critérios por ele considerado de maior importância para o estudo em questão de maneira intuitiva (FASHAE et al., 2014). Sendo assim, o método fornece subsídios para a tomada de decisão, pois este leva em consideração a experiência do usuário no tema, valores e conhecimento para dividir um problema em uma hierarquia e resolvê-los em etapas (CHOWDHURY et al., 2009; FASHE et al.; 2014). A

metodologia desenvolvida por Saaty (1991) também verifica a consistências dos julgamentos atribuídos, que faz com que o método se destaque sobre os outros processos de valores atribuídos (FASHE et al., 2014).

Os mapas temáticos deste trabalho, receberam pesos que variam entre 1 e 4, que dependerá de quanto o tema contribui para a ocorrência e movimentação das águas subterrâneas (AHMAD; VERMA, 2018)). Em termo de potencialidade considerando os trabalhos em contextos semelhantes (Fashe et al., 2014;Kumar et al., 2016; Al Saud, 2010)(AL SAUD, 2010), o fator de ponderação 1 designa grau baixo, 2 representa moderado, 3 implica em bom, 4 representa alta potencialidade de água subterrânea. A ponderação utilizada está em proporção com a respectiva relevância do mapa temático para a ocorrência de águas subterrâneas, baseando-se nas abordagens realizadas por Rao e Jugran (2003), Jah et al., (2010), Mukherjee et al., (2012) e Fashe et al., (2014).

O índice de consistência (IC) (equação 2) dos pesos atribuídos foi calculado seguindo o procedimento estabelecido por Saaty (1980). Tal procedimento é indicado para saber se a matriz de julgamentos paritários está consistente, caso não esteja, se faz necessário reavaliar os julgamentos realizado e a modificação dos mesmos na matriz (SAATY, 19800. O termo λ_{max} da equação 2 simboliza o autovalor, que é a medida da consistência do julgamento, que pode ser calculada através da multiplicação da matriz pelo seu vetor coluna de prioridades computado (w), aplicado a divisão do novo vetor encontrado (Aw), pelo vetor inicial w , como ilustra a equação 3.

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

$$\lambda_{max} = \frac{Aw}{w} \quad (3)$$

A análise final, consistiu no agrupamento dos 6 mapas temáticos construídos, usando o *software* Arcgis 10.3, para o cálculo do índice de potencial de água subterrâneas para a área de estudo. Este índice é calculado utilizando a integração do total de pesos normalizados de distintos mapas, utilizando a equação abaixo. Esta técnica foi desenvolvida por Prassd et al., (2008), que, associa a localização dos fenômenos geográficos com sua dimensão espacial e características associadas (FASHE, 2014).

$$GWPI = (GLwxGlwi + DDwxDDwi + DLwxDLwi + DCwxDCwi + GMwxGMwi + SLwxSLwi + USwxUSwi) \quad (4)$$

Onde GL representa geologia/litologia, DD é densidade de drenagens, DL, densidade de lineamentos, DC remota da declividade, SL é o tipo de solos e US trata-se da camada de uso de solo. O caráter *w* representa o peso normalizado de um mapa temático, enquanto *wi* representa o peso normalizado das classes individuais de cada tema (FASHAE et al., 2014).

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

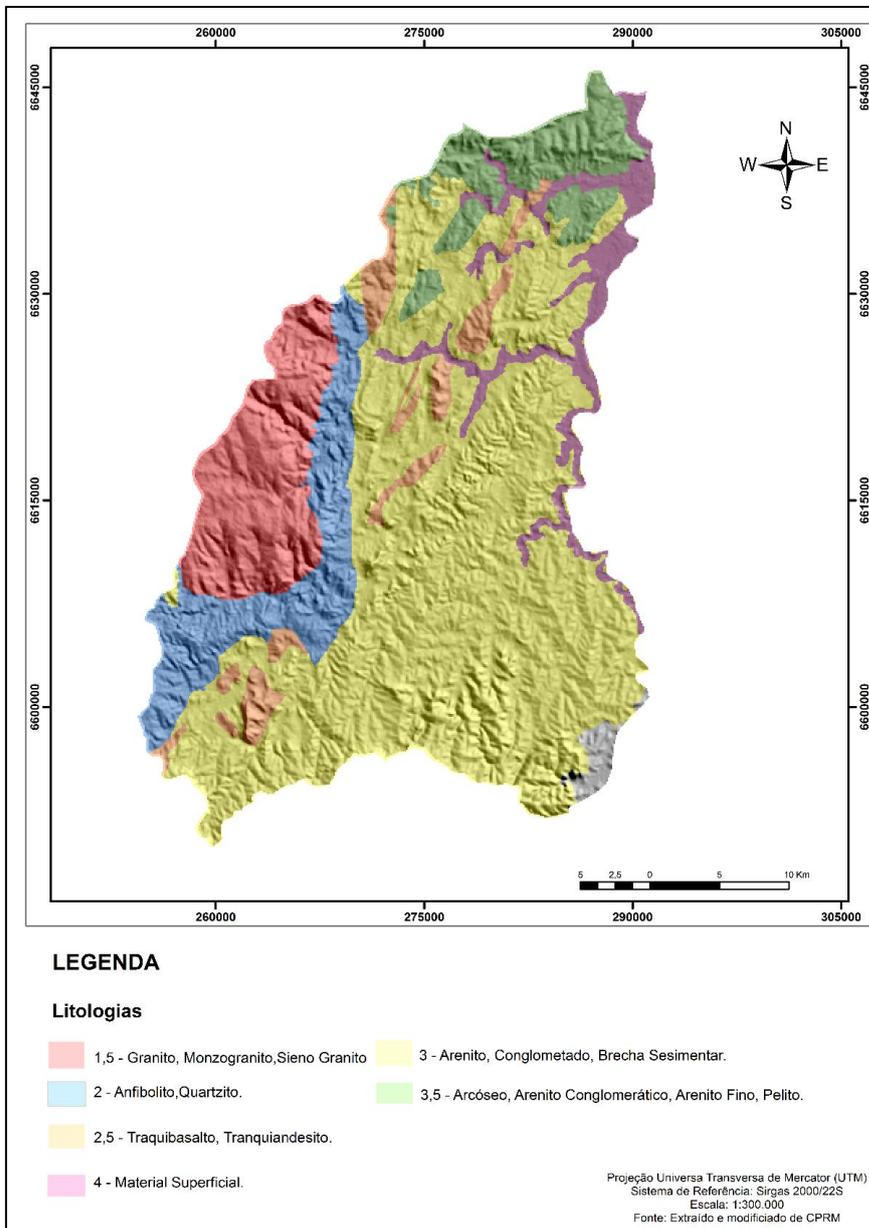
7.1. Mapas temáticos

Para uma melhor compreensão e distinção das litologias em relação ao potencial hidrogeológico, foi necessária a separação das litologias baseando-se nos respectivos domínios hidrogeológicos que compõem a área e as litologias que esse mesmo apresenta tal como realizado por Bomfim (2010).

No domínio Cristalino, onde foi classificado com o menor índice de potencialidade (1,5) é representado pelas rochas pertencentes ao CGCPS, onde se encontram os granitos, são verificaos, granodioritos e sienogranitos (Figura 15). O domínio Metassedimentos-Metavulcânica e as rochas que os englobam, receberam peso intermediário (2), enquanto o domínio Vulcânicas que possuem um caráter hidrológico um pouco mais acentuado, recebeu 2,5,. Já o domínio Poroso Fissural, pela sua característica mista de aquífero, recebeu um peso de escala maior (3) (BOMFIM, 2010M). Os domínios Bacias Sedimentares e Formação Cenozóica por

serem os domínios de maior magnitude em relação a ocorrência de águas subterrâneas, receberam pesos 3,5 e 4 respectivamente (BOMFIM, 2010).

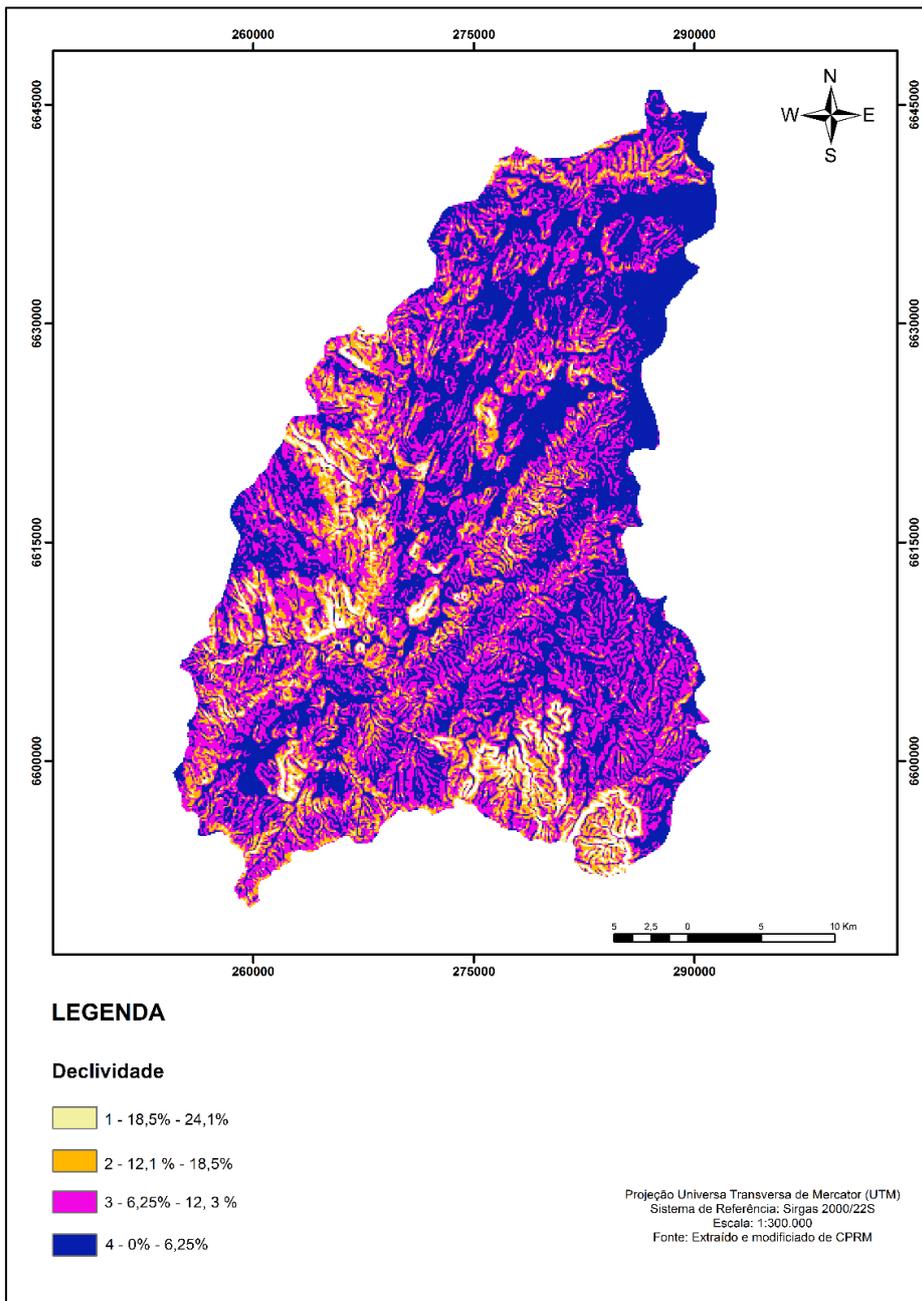
Figura 15- Mapa de litologias com pesos reclassificado segundo os domínios hidrogeológicos.



Fonte: Autor.

O mapa de declividade (Figura 16) atingiu valores entre 0% e 24,1%, onde os valores de declividade ente 0% a 6,25% receberam o maior peso (4), pois declividades baixas influenciam no tempo de escoamento superficial e concentração de chuva, enquanto os outros valores de declividade foram distribuídos pesos de 1 a 3 mediante a influência que exerce para a infiltração e permanência da água no substrato (DANTAS et al., 2010).

Figura 16- Mapa de declividade com pesos reclassificados.

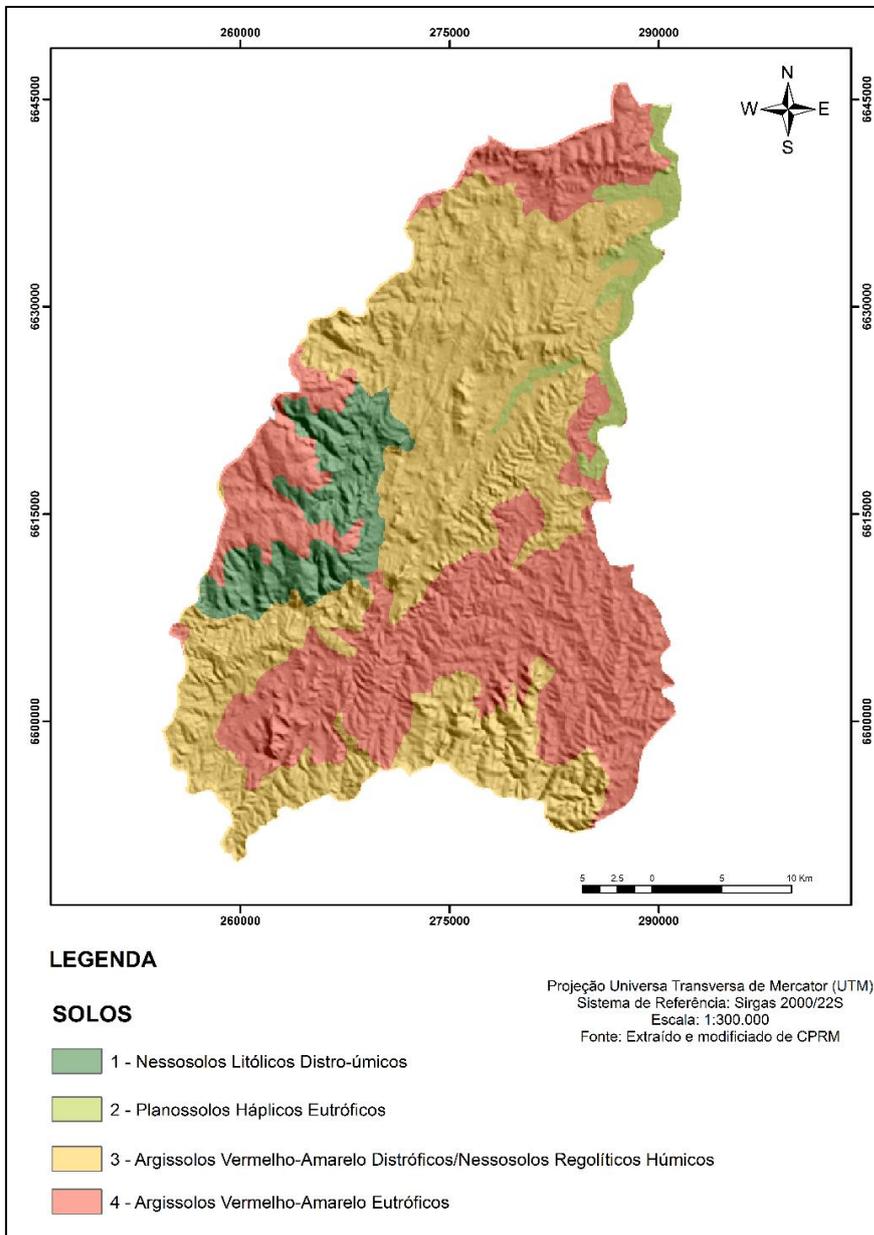


Fonte: Autor.

O mapa de solos (Figura 17) é composto por quatro tipos dominantes dentro da área de estudo: Nossosolos Litólicos Distro-úmicos; Planossolos Háplicos Eutróficos; Argissolos Vermelho-Amarelo Distróficos; Nossosolos Regolíticos Húmicos e Argilossolos Vermelho-Amarelo Eutroficos (EMBRAPA, 2018). Para classificá-los em termos de potencialidade hídrica, foi necessário avaliar os tipos de solos em relação a sua permeabilidade e também a declividade dominante, foram

atribuídos valores entre 1 e 4, mediante ao grau de importância e posteriormente, uma média simples entre as duas componentes.

Figura 17 - Mapa de solos reclassificados pelo seu potencial hidrogeológico.

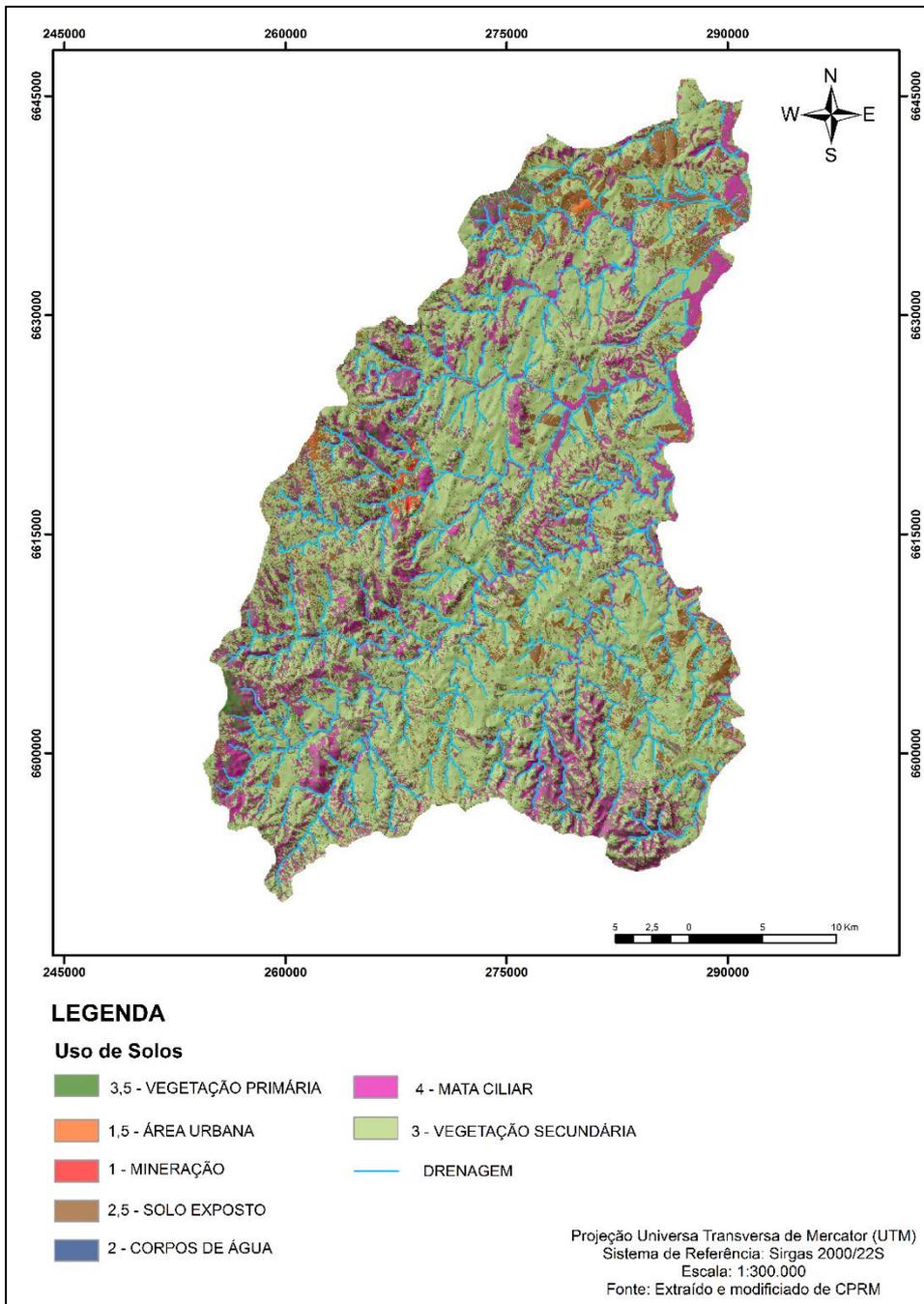


Fonte: Autor

No mapa de uso de solos (Figura 18), as classes e os pesos envolvidos para definir o potencial hidrogeológico, foi baseada segundo Dantas et al., (2010). Foram identificadas através da classificação supervisionada 7 classes, sendo considerada a classe representada pelas matas nativas como a de maior importância, atribuindo-a o

mesmo o peso 4, enquanto a classe representada pela atividade de mineração, recebeu o menor peso da escala (1).

Figura 18- Mapa de classificação supervisionada de uso de solos.

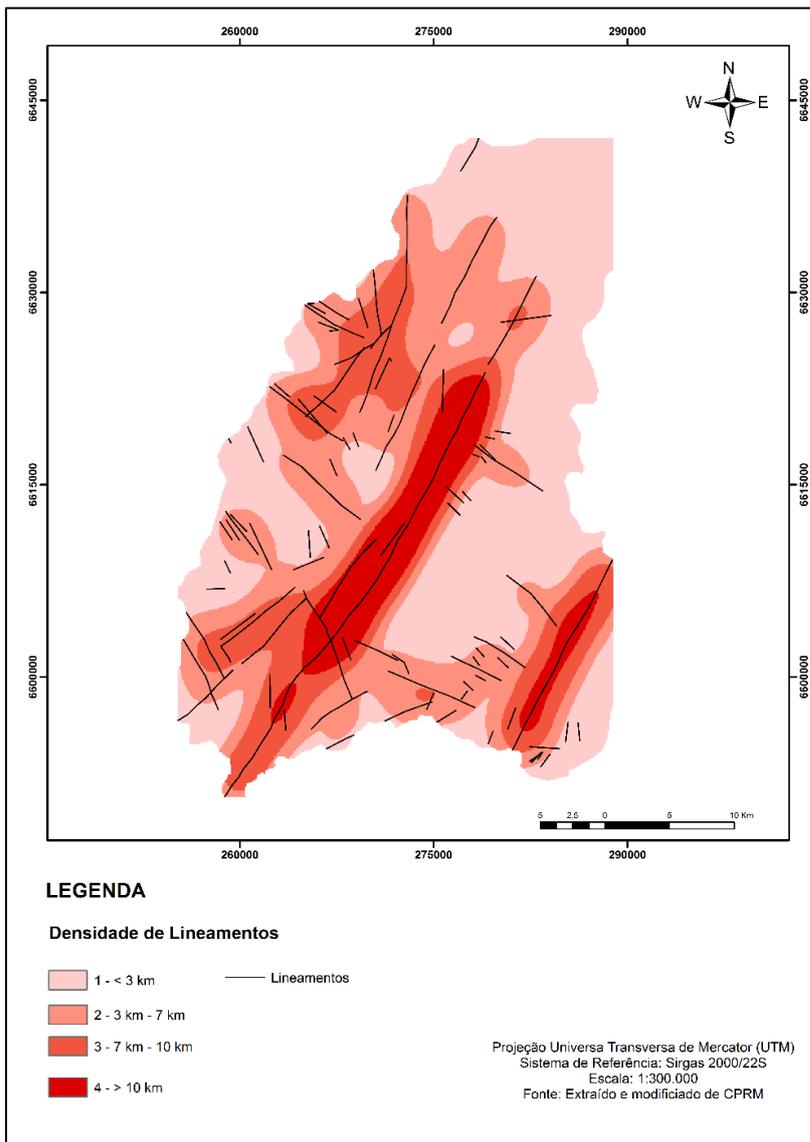


Fonte: Autor.

No mapa de densidade de lineamentos (Figura 19), foi possível nota a dominância da orientação dos lineamentos foi identificada em NE-SW e NW-SE, atingindo comprimentos entre 1 km e 17 km de extensão, como ilustra na Figura 19.

O peso das densidades foi baseado no comprimento em quilômetro pela área de ocorrência em km², segundo Fashe (2014). Os lineamentos com maiores pesos (4) são representados pelas estruturas com comprimentos maiores que 10 km, enquanto os menores pesos foram estabelecidos pelas estruturas com tamanhos inferiores a 3 km de comprimento.

Figura 19 - Mapa de densidade de lineamentos reclassificado em base de potencial hidrogeológico.

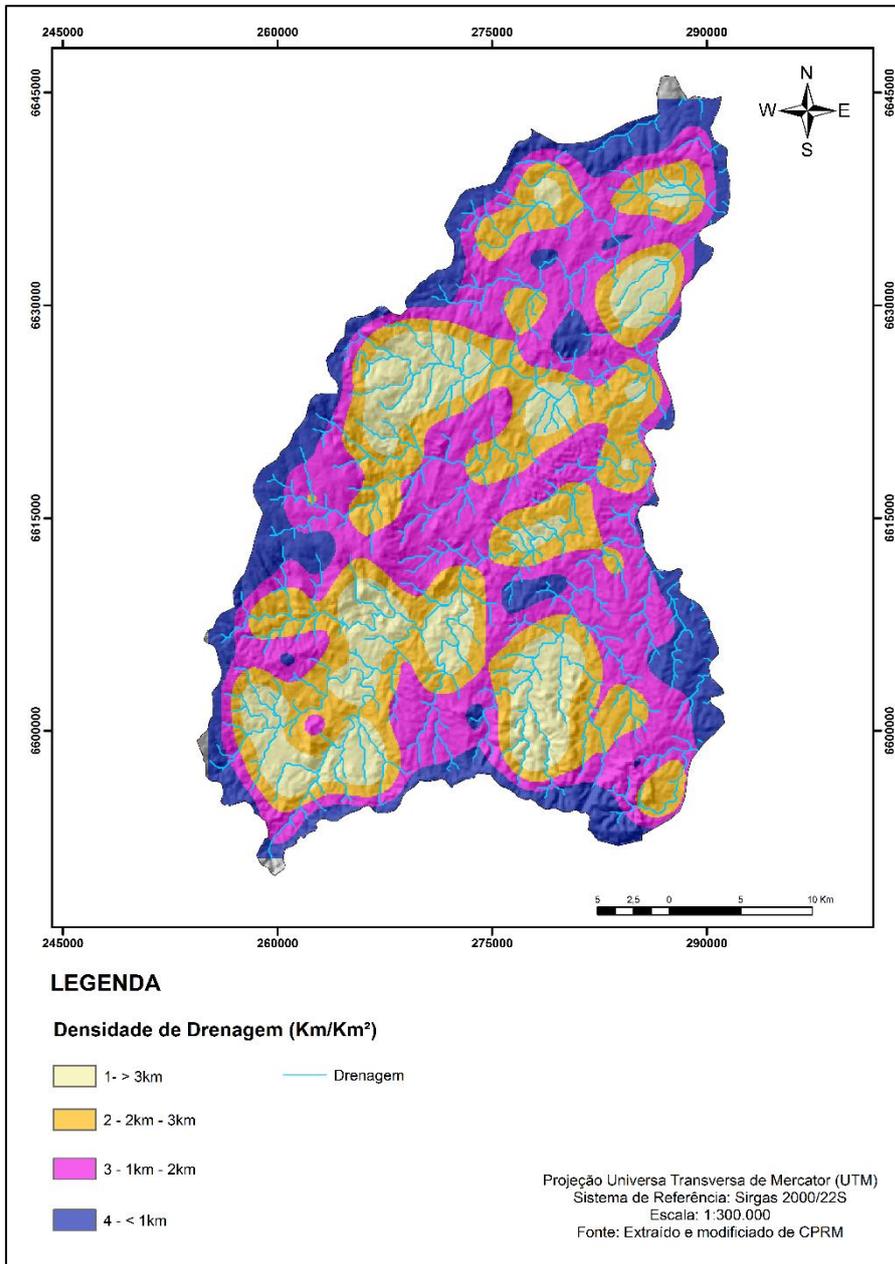


Fonte: Autor

Na densidade de drenagens (Figura 20) também elaborada seguindo os mesmos procedimentos realizados pelo tema anterior. Os pesos estabelecidos segundo Feshae (2014), ressalva que o comportamento da densidade de drenagens é oposto ao mapa de densidade de lineamentos, em decorrência de quanto maior o

número e o tamanho do comprimento das drenagens, mais rápido a água chegará ao exutório da bacia hidrográfica, tendo pouco tempo de permanência da água no meio para infiltração nos aquíferos (FASHAE et al., 2014).

Figura 20 - Mapa de densidade de drenagens reclassificado em base de potencial hidrogeológico.



Fonte: Autor

7.2. Processo Analítico Hierárquico (PAH)

Para construção da Matriz de Comparação Pareada para o estudo do potencial hidrogeológico da área, inicialmente, estabeleceu-se a ordem de importância das

variáveis para hierarquizá-las na tabela, de maior para menor susceptibilidade (DANTAS et al., 2010; FASHAE et al., 2014; REZENDE; MARQUES; OLIVEIRA, 2017). Para definição dessa importância e dos pesos a serem julgados, foi necessário um conhecimento prévio da área e uma abordagem sobre trabalhos realizados em contextos semelhantes por Rao e Jugran (2003), Jah et al., (2010), Mukherjee et al., (2012) e Fashe et al., (2014).

Utilizando a escala de comparadores de Saaty (2006) (Quadro 3) para a construção da matriz, gerando por consequência os pesos a serem inseridos no *Plugin Easy AHP*, dentro da plataforma Quantum Gis 2.1 A matriz foi construída como segue a Tabela 1:

Tabela 1- Matriz de comparações pareadas.

TEMAS	GEOLOGIA	SOLOS	DENSIDADE DE LINEAMENTOS	DECLIVIDADE	DENSIDADE DE DRENAGEM	USO DE SOLOS
GEOLOGIA	1	2	5	7	7	9
SOLOS	0,5	1	5	7	5	5
DENS.LINEA	0,2	0,2	1	2	3	5
DECLIVIDADE	0,14	0,14	0,5	1	2	5
DENS.DRENAGEM	0,14	0,2	0,33	0,5	1	3
USO DE SOLOS	0,11	0,2	0,2	0,2	0,33	1

Fonte: Autor.

Os pesos normalizados calculados pela ferramenta *Easy Plugin AHP* estão representados pela Tabela 2. Os resultados mostram que o valor calculado para λ (6,496), foi próximo do número de temas analisados (6 variáveis) como recomenda Saaty (2006). Em relação ao Índice de Consistência (IC), foi obtido um valor 0,099, valor este que deve ser próximo de zero para atender o método e a Razão de Consistência resultou no valor 0,08, índice que precisa ser inferior a 0,10 (SAATY R.W, 2012). Ressalta-se que os valores encontrados atendem fielmente à recomendação da metodologia de Saaty (2012).

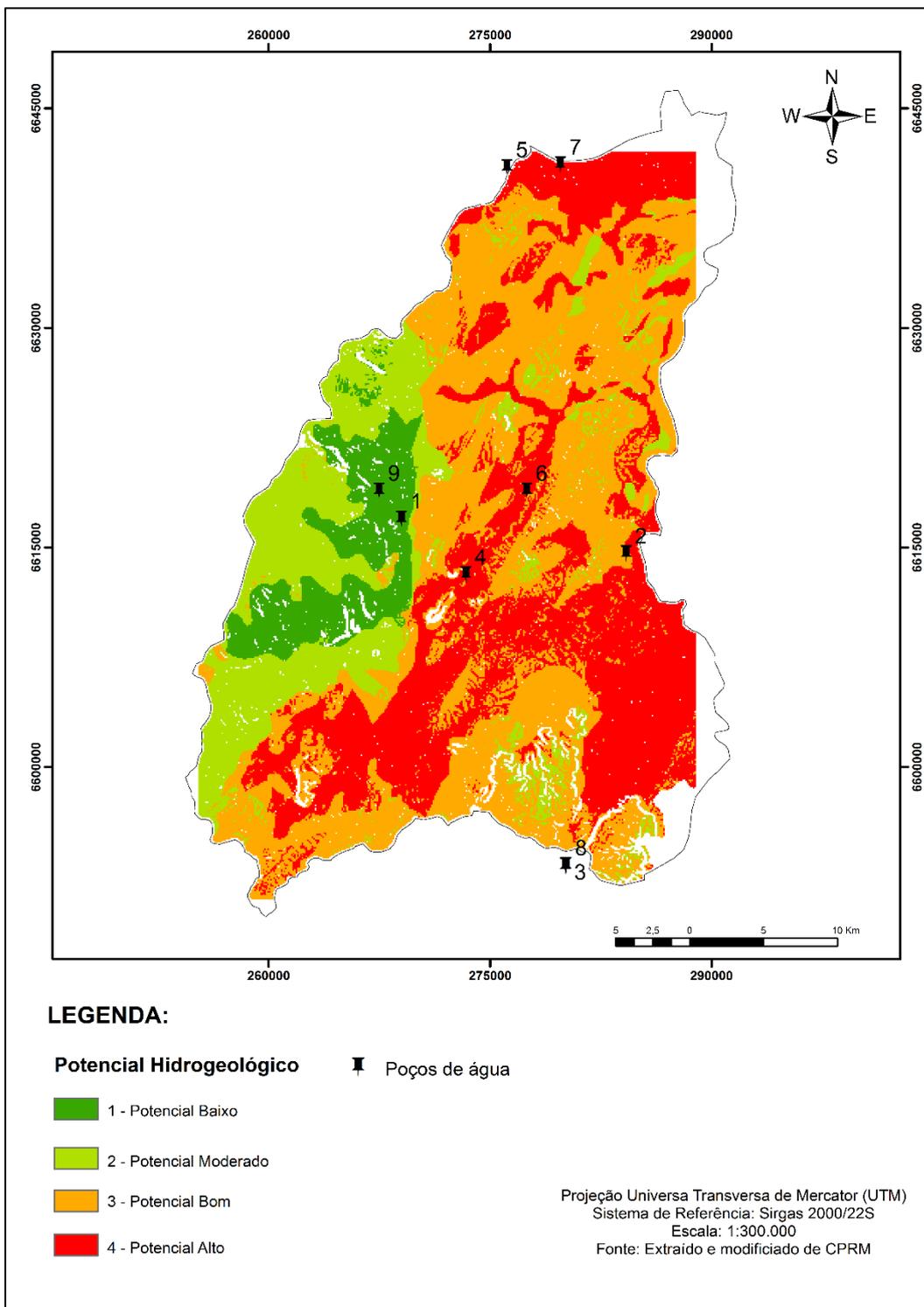
Tabela 2- Pesos dos mapas temáticos após aplicação da matriz de comparação pareada.

Variáveis	Peso
Geologia	0,421
Solos	0,295
Densidade de Lineamentos	0,114
Declividade	0,082
Densidade de Drenagem	0,057
Uso de Solos	0,031

Fonte: Autor.

Para a elaboração do mapa de potencial hidrogeológico (Figura 21) da área por meio do *Weighted Linear Combination* (WLC), foram multiplicados todos os mapas temáticos no formato *raster* pelos seus pesos normalizados respectivos e posteriormente somados, através da ferramenta *Raster Calculator* do Qgis 2.17. Cabe ressaltar que, nos mapas de densidade de lineamentos e densidade de drenagens, não houve extrapolação, devido às especificidades do interpolador, já frisados (FASHAE *et al.*, 2014; SHEKHAR; PANDEY, 2014; SRINIVASA RAO; JUGRAN, 2003). Isto resultou em locais dentro do mapa onde houve campos sem valores, e para não comprometer o resultado final do cálculo, optou-se por deixar estes da maneira que se apresentaram.

Figura 21- Áreas potenciais para a ocorrência de água subterrânea na porção nordeste do município de Caçapava do Sul.



Fonte: Autor.

Comparando os mapas de áreas potenciais e ocorrência de águas subterrâneas com o mapa de domínios hidrogeológico pode-se estabelecer uma correspondência entre as categorias de potencial e as unidades mapeadas (Figura 21). Verifica-se que a porção N-NW do mapa da potencialidade hidrogeológica da área, foi classificada como sendo de alto potencial, o que corresponde as quais características do domínio Bacias Sedimentares e Formações Cenozoicas, que são domínios que possuem vazões que podem atingir de 3000L/h a 130000L/h, que é reflexo da permeabilidade decorrente dos grãos de solo e rocha porosa pertencentes ao local (BOMFIM, 2010).

Na porção centro-oeste do mapa, a predominância da potencialidade está entre baixo e moderado, o que se demonstrou satisfatório, tendo em vista que é o local onde a porosidade do meio é de forma secundária, onde o domínio hidrogeológico Cristalino e Metassedimentos-Metavulcânicas são os correspondes da área. Outros fatores como o tipo de solos, seu uso e declividade, agiram de forma a atenuar a classificação dessa zona. Vale ressaltar que parte da porção centro-oeste tivera uma densidade de lineamentos relativamente considerada, porém não o suficiente para ser classificada em maior ordem.

Na porção central e sudeste, a ordem de potencialidade foi classificada em de bom a alta, em virtude dos melhores parâmetros de concentrarem na região, como os maiores lineamentos, litologias mais propicias, terrenos planos, menores concentrações de drenagens e melhores condições na classificação de uso de solo. A área também representa os domínios hidrogeológicos mais eficazes para exploração de água subterrânea, compreendendo os domínios Bacias Sedimentares e Formações Cenozóicas.

A vazão específica, que é a vazão dividida pelo rebaixamento do nível de água (CPRM, 2016), remete a transmissividade e condutividade hidráulica, podendo ser utilizada como um parâmetro avaliativo de produtividade de um aquífero em uma determinada área. A Tabela (3) mostra os dados de vazão específica dos poços que se localizam na área ou próximo a ela e sua classificação, baseado nas classes de aquíferos segundo Struckmeier & Margat (1995).

Tabela 3- Classificação da produtividade dos poços em relação a vazão específica.

Ponto	Ponto_SIAGAS	utme	utmn	Vazão Específica(m ³ /h/m)	Produtividade
1	4300020762	269001	6616940	0,055	localmente baixa
2	4300020764	284221	6614567	1,052	moderada
3	4300020765	280106	6593251	0,063	localmente baixa
4	4300020766	273364	6613140	0,28	localmente baixa
5	4300021428	276148	6640954	0,395	localmente moderada
6	4300021445	277491	6618859	3,792	alta
7	4300023324	279768	6641133	1,988	moderada
8	4300023875	280158	6593266	0,063	localmente baixa
9	4300023876	267491	6618859	3,792	alta

Fonte: Adaptado de Struckmeier & Margat (1995).

Pela classificação de produtividade através dos valores de vazão específica, pode se obter uma relação positiva com o mapa de potencial hidrogeológico, onde grande parte dos dados de vazão específica, se enquadraram no contexto de potencialidade hídrica determinada pela Figura 20. No poço número 1, embora esteja inserido em uma zona de potencial baixo, sendo este de vazão específica alta, de possível reflexo dos lineamentos bem próximos ao local do poço, acentuando a porosidade secundária e assim melhorando o potencial focalizado.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia AHP demonstrou-se sendo uma ferramenta eficaz para análises hidrogeológicas onde se tem áreas muito extensas e poucos recursos para aplicar metodologias mais robustas. Juntamente com a utilização de geotecnologias o processo e aplicação do método se torna acessível e de fácil entendimento, o que eleva sua eficácia.

É importante considerar que o método é baseado no conhecimento do manuseador e quanto o mesmo buscou entender sobre a problemática imposta, o que o torna muito abrangente e amplamente modificável, possibilitando inúmeras interpretações, quando se utiliza novas camadas temáticas e pesos diferentes para composição da matriz de julgamentos.

Considerando que o trabalho foi unicamente realizado através de sensoriamento remoto, e que os dados físicos eram escassos para validar a metodologia, se faz necessário em trabalhos posteriores que, além de novos parâmetros analíticos, que seja considerado novos levantamentos de dados de campo para alimentar o banco de dados dos poços, podendo também validar o método com levantamentos geofísicos, para melhor inferir se de fato os locais são de baixo ou alto potencial.

Nos resultados alcançados com este trabalho, foi constatado que as melhores áreas para explorar águas subterrâneas se encontra nas porções N-NW, S-SE, em contrapartida, as áreas S-SW, foram classificadas nas piores áreas para a prospecção de água. Um fator importante, é que os lineamentos proximais, podem ter potencializados a produtividade dos poços próximos ale, resultado em vazões específicas altas mesmo em locais classificados como baixo potencial hidrogeológico.

Por fim, o desenvolvimento deste estudo, gerou resultados que podem mostrar de formar preliminar áreas onde há melhores chances de conter águas subterrâneas, que fornece assim subsídios para a tomada de decisão por parte dos gestores, profissionais da área e pesquisadores. Não abrindo mão da acurácia do trabalho de campo.

9. REFERENCIAS

AB'SABER, Aziz Nacib. O relevo brasileiro e seus problemas. **Brasil: a terra eo homem. Sao Paulo: Companhia Ed. Nacional**, 1964.

AB'SÁBER, Aziz Nacib. **Províncias geológicas e domínios morfoclimáticos no Brasil**. Universidade de São Paulo, Instituto de Geografia, 1970.

ADIAT, K. A. N.; NAWAWI, M. N. M.; ABDULLAH, K. Assessing the accuracy of GIS-based elementary multi criteria decision analysis as a spatial prediction tool – A case of predicting potential zones of sustainable groundwater resources. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 440–441, p. 75–89, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.03.028>>.

AHMAD, Ishtiyag; VERMA, Mukesh Kumar. Application of Analytic Hierarchy Process in Water Resources Planning: A GIS Based Approach in the Identification of Suitable Site for Water Storage. **Water Resources Management**, [s. l.], v. 32, n. 15, p. 5093–5114, 2018.

AL SAUD, Mashael. Mapping potential areas for groundwater storage in Wadi Aurnah Basin, western Arabian Peninsula, using remote sensing and geographic information system techniques. *La Cartographie des zones potentielles de stockage de l'eau souterraine dans le bassin Wadi A*. **Hydrogeology Journal**, [s. l.], v. 18, n. 6, p. 1481–1495, 2010.

ALMEIDA, F. F. M., HASUI, Y.; BRITO NEVES, B. B & FUCK, R. A. 1981. Brazilian Structural Provinces: an introduction. **Earth Science Reviews**, vol. 17, pág. 1-29, abril 1981.

ALMEIDA, R. P.. **Tectônica e sedimentação do Ediacarano ao Ordoviciano: exemplos do Supergrupo Camaquã (RS) e do Grupo Caacupé (Paraguai Oriental)**. Tese de doutoramento. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

AZEVEDO, Aroldo de; SILVEIRA, João D. da. O ensino de Geografia na Faculdade de Filosofia da Universidade de São Paulo. **Boletim Paulista de Geografia, São Paulo**, n. 3, p. 76-83, 1949.

BABINSK, M. et al. Juvenile accretion at 750-700 Ma in Southern Brazil. **Geology**, 1996, n. 24, p. 439-442.

BEAR, J.; VERRUIJT, A. Modeling groundwater flow and pollution (Vol. 2). **Dordrecht: Springer Science & Business Media**, v. 10, p. 978-94, 1987.

BITENCOURT, M.F. Metamorfitos da Região de Caçapava do Sul, RS: Geologia e relações com o corpo granítico. In: Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia, 1, 1983, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: **Sociedade Brasileira de Geologia**, 1983. p. 37-48.

BONFIM, Luiz Fernando Costa. Mapa de domínios/subdomínios hidrogeológicos do Brasil em ambiente SIG: concepção e metodologia. 2010.

BONHAM-CARTER, G. F. Geographic Information Systems for Geoscientists, Volume 13: Modelling with GIS (Computer Methods in the Geosciences). 1994.

BORBA, André Weissheimer de et al. Inventário e avaliação quantitativa de geossítios: exemplo de aplicação ao patrimônio geológico do município de Caçapava do Sul (RS, Brasil). **Pesquisas em Geociências**, v. 40, n. 3, p. 275-294, 2013.

BORGES, Karla AV; DAVIS JR, Clodoveu A.; LAENDER, Alberto HF. Modelagem conceitual de dados geográficos. **CASANOVA, et. al. Banco de Dados Geográfico. MundoGEO: Curitiba**, p. 83-136, 2005.

BRANDÃO, R.L.; GOMES, F.E.M. Técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto aplicadas na avaliação potencial hidrogeológico da folha Irauçuba. **Revista de Geologia**, Fortaleza, v. 16, n. 1, 2003.

BRICALLI, L. L. Padrões de lineamentos e fraturamento neotectônico no estado do Espírito Santo (sudeste do Brasil). 2011. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Geologia)—Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Burrough PA (1986) Principals of geographical information systems for land resources assessment. Clarendon Press, Oxford.

CÂMARA, Gilberto. Modelos, linguagens e arquiteturas para bancos de dados geográficos. **São José dos Campos**, v. 264, 1995.

CARVALHO, P. F.; Reconhecimento geológico no estado do Rio Grande do Sul , Boletim do Serviço Geológico e Mineralógico do Brasil, Rio de Janeiro, n.66, 1932.

CHEMALE JR, F. Evolução Geológica do Escudo Sul-rio-grandense. In: HOLZ, M.; DE ROS, L.F. Geologia do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: CIGO- UFRGS, V, 2000. p. 13-52.

COSTA, Waldir Duarte. **Uso e gestão de água subterrânea**. Hidrogeologia: conceitos e aplicações. Fortaleza: CPRM, p. 314-367, 2000.

CRÓSTA, A. P. Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto. São Paulo, 173P. 1992. Tese de Doutorado. Tese-Doutorado)-Instituto de Geociências, Universidade de Campinas.

CRÓSTA, Alvaro Penteado. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. UNICAMP/Instituto de Geociências, 1999.

DANTAS, Daniela et al. Definição De Áreas Potenciais Para a Ocorrência De Água Subterrânea Na Sub-Bacia Do Rio Siriri-Sergipe Com O Auxílio Do Ahp (Método Analítico Hierárquico). [s. l.], n. 75, p. 1–16, 2010.

DE FREITAS, Marcos Alexandre. DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL HIDROGEOLÓGICO DE ROCHAS CRISTALINAS ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE GEOPROCESSAMENTO. **Águas Subterrâneas**, 2000.

DERBY, Orville A.; WAPPAEUS, J. E. Aspectos Físicos, Montanhas e Chapadões”. **WAPPAEUS, JE. A Geografia Física do Brasil Refundida. Rio de Janeiro: Leuzinger**, p. 36-43, 1884.

ENGMAN, Edwin T. et al. **Remote sensing in hydrology**. Chapman and Hall Ltd, 1991. 120p.

FASHAE, Olutoyin A. et al. Delineation of groundwater potential zones in the crystalline basement terrain of SW-Nigeria : an integrated GIS and remote sensing approach. [s. l.], p. 19–38, 2014.

FEITOSA FAC & MANUEL FILHO, J. Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. Fortaleza, CPRM, UFPE, LABHID. 398p, 1997.

FERNANDES, Amélia J. Aquíferos fraturados: uma revisão dos condicionantes geológicos e dos métodos de investigação. **Revista do Instituto Geológico**, [s. l.], v. 29, p. 49–72, 2008. Disponível em: <http://papegeo.igc.usp.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-929X2008000100005&lng=es&nrm=iso>

FERNANDES, L. A. et al. Evolução tectônica do Cinturão Dom Feliciano no Escudo Sul-riograndense: Parte I , Uma contribuição a partir do registro geológico. *Revista Brasileira de Geociências*, 1995, n. 25, p. 375-384.

FETTER, Charles Willard. **Applied hydrogeology**. Waveland Press, 2001.

FRAGOSO-CESAR, A. R. S. O Cráton Rio de La Plata e o Cinturão Dom Feliciano no Escudo Uruguaio-Sulriograndense. In: Congr. Bras. Geol., 31, 1980, Balneário Camboriú. **Anais** Balneário Camboriú: SBG, n.5, p. 2879-2892, 1980.

FRAGOSO-CESAR, A. R. S. Tectônica de placas no Ciclo Brasiliano: as orogênicas dos cinturões Dom Feliciano e Ribeiro no Rio Grande do Sul. Universidade Federal de São Paulo (USP). Tese de Doutorado, São Paulo: Inst. Geoc.-USP, 366p, 1991.

FREITAS, Marcos Alexandre de. Avaliação do potencial hidrogeológico de terrenos cristalinos através de técnicas de geoprocessamento. 1998. AVALIAÇÃO DO POTENCIAL HIDROGEOLOGICO DE TERRENOS CRISTALINOS ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE GEOPROCESSAMENTO MARCOS ALEXANDRE DE FREITAS Orientador: Dr. Carlos André B. Mendes. [s. l.], 1998.

GÕNI, J. C.; GOSO, H.; ISSLER, R. S. Estratigrafia e geologia econômica do Pré-cambriano e Eo-paleozóico Uruguaio e Sul Riograndense. Avulso, Porto Alegre: Escola de Geologia-UFRGS, n. 03, p.1-105, 1962.

HARTMANN, L. A.; CHEMALE JR, F.; PHILIPP, R. P. Evolução Geotectônica do Rio Grande do Sul no Pré-Cambriano. In: IANUZZI, R. ; FRANTZ, J. C. In: **50 anos de Geologia**: Instituto de Geociências. Contribuições. Porto Alegre: Comunicação e Identidade, CIGO e IG-UFRGS, 2007. 399 p.

HARTMANN, L. A.; CHEMALE JR, F.; PHILIPP, R. P. Evolução Geotectônica do Rio Grande do Sul no Pré-Cambriano. In: IANUZZI, R. ; FRANTZ, J. C. In: **50 anos de Geologia**: Instituto de Geociências. Contribuições. Porto Alegre: Comunicação e Identidade, CIGO e IG-UFRGS, 2007. 399 p.

HERNANDEZ, Paula Gabriela Leal. Análise estrutural e modelagem geológica da porção oeste da Janela Bom Jardim, Bacia do Camaquã, Caçapava do Sul – RS. [s. l.], 2016.

HUANG, Ming-Hui et al. **Value-added ERP information into information goods**: an economic analysis. *Industrial Management & Data Systems*, v. 104, n. 8, p. 689-697, 2004.

Jenson SK, Trautwein CM (1987) Methods and applications in surface depression analysis. In: *Proceedings of Auto-Carto 8*, Baltimore, pp 137–144.

JUSTUS, Jarbas de Oliveira; MACHADO, Maria Lídia de Abreu; FRANCO, Maria do Socorro Moreira. Geomorfologia. Levantamento de recursos naturais, v. 33, p. 313-404, 1986.

KLOSS, Heiny Paim. SENSORIAMENTO REMOTO NO RECONHECIMENTO E DELIMITAÇÃO DE ESTRUTURAS GEOLÓGICAS NA FORMAÇÃO SERRA GERAL NA REGIÃO DE SOLEDADE, RS. **Salão de Iniciação Científica** (22.: 2010 out. 18-22: Porto Alegre, RS). Livro de resumos. Porto Alegre: UFRGS, 2010., 2010.

KUMAR, Pankaj et al. Mapping of groundwater potential zones in Killinochi area, Sri Lanka, using GIS and remote sensing techniques. **Sustainable Water Resources Management**, [s. l.], v. 2, n. 4, p. 419–430, 2016.

LACHMAR, Thomas E. Application of fracture-flow hydrogeology to acid-mine drainage at the Bunker Hill Mine, Kellogg, Idaho. **Journal of Hydrology**, v. 155, n. 1-2, p. 125-149, 1994.

LEINZ, V.; BARBOSA, A.; TEIXEIRA, E. Mapa Geológico Caçapava-Lavras. Porto Alegre: Secr. Agric. Ind. Com. Dep. Prod. Min, 1941. Boletim 90. 1:200.000.

LEITE, Carlos Eduardo Sobreira. DEFINIÇÃO DE ÁREAS POTENCIAIS DO PONTO DE VISTA HIDROGEOLÓGICO EM REGIÃO DE CRISTALINO ATRAVÉS DE IMAGENS DO LANDSAT-5 E SIG. **Águas Subterrâneas**, n. 1, 1998.

LILLESAND, Thomas; KIEFER, Ralph W.; CHIPMAN, Jonathan. **Remote sensing and image interpretation**. John Wiley & Sons, 2015.

MACHADO, José Luiz Flores; FREITAS, Marcos Alexandre de. Projeto Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul. 2005.

MADRUCCI, Vanessa. Prospecção de água subterrânea em terreno cristalino utilizando-se análise integrada de dados de sensoriamento remoto, geofísicos e técnicas de geoprocessamento, região de Lindóia, SP. 2004. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

MENEGASSE, Leila Nunes. Estudo hidrogeológico das rochas metassedimentares do Grupo São Roque a NW da grande São Paulo: critérios para a locação de poços profundos. 1991. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

MENESES, P. R.; SANO, E. E.; ASSAD, E. D. Introdução ao processamento de imagens digitais de satélites de sensoriamento remoto. Editora Universidade de Brasília, 1991.

MENEZES, P.R. & FERREIRA JÚNIOR, L.G. Comportamento espectral de alvos naturais como base para interpretação de imagens multiespectrais. (Textos universitários.) Brasília: UnB, 1995. 25 p.

MOGAJI, Kehinde Anthony; LIM, Hwee San. Application of a GIS-/remote sensing-based approach for predicting groundwater potential zones using a multi-criteria data mining methodology. **Environmental Monitoring and Assessment**, [s. l.], v. 189, n. 7, 2017.

MOHAMMADI-BEHZAD, H. R. et al. Delineation of groundwater potential zones using remote sensing (RS), geographical information system (GIS) and analytic hierarchy process (AHP) techniques: a case study in the Leylia–Keynow watershed, southwest of Iran. **Carbonates and Evaporites**, [s. l.], n. 0123456789, p. 1–13, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s13146-018-0420-7>>

NARDI, L.V.S. & BITENCOURT, MF. Geologia, petrologia e geoquímica do Complexo Granítico de Caçapava do Sul, RS. **Revista Brasileira de Geociências**, 19:153-169. 1989.

NOVAKOWSKI, K. 1995. Groundwater flow in fractured rocks. **Waterloo Centre for Ground Water Research**, Canada. Course Notes.46 p

.

NOVO, Evelylin M.L.M. **Sensoriamento Remoto**: princípios e aplicações. São Paulo: Edgar Blucher, 1989. 308 p., il.

PAIM, P. S. G. A Bacia do Camaquã. In: HOLZ, M.; DE ROS, L.F. **Geologia do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: CIGO- UFRGS, V, 2000, p. 231-274, 2000.

PAIM, P. S. G.; CHEMALLE JR, F., WILDNER, W. Estágios evolutivos da bacia do Camaquã. **Revista Ciência e Natura**. Santa Maria: 2014, n.36, p. 183-193. 2014.

PAIM, P. S. G.; LOPES, R. C.; CHEMALE JR, Farid. Aloestratigrafia, Sistemas Depositionais e EvoluçãoPaleogeografica da Bacia do Camaquã - Vendiano Superior/Ordoviciano Inferior do Rs. In: VI Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia, Porto Alegre, **anais SBG**, p.39-50, 1995.

PHILIPP, R. P.; PIMENTEL, M.; CHEMALE JR. Tectonic evolution of the Dom Feliciano Belt in Southern Brazil: Geological relationships and U-Pb geochronology. *Brazilian Journal of Geology*, 2016, n. 46, p. 83-104, 2016.

PICADA, R. S. Ensaio sobre a tectônica do Escudo Sul-rio-grandense: caracterização dos sistemas de falhas. In: Cong. Bras. de Geol. **Anais...** São Paulo: SBG. 1968, v1, pág 167-191, 1971.

PINTO, Domingos et al. Delineation of groundwater potential zones in the Comoro watershed, Timor Leste using GIS, remote sensing and analytic hierarchy process (AHP) technique. **Applied Water Science**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 503–519, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s13201-015-0270-6>>

PORCHER, Carlos Alfredo; LOPES, Ricardo da Cunha. **Cachoeira do Sul: folha SH. 22-YA**. 2000.

Prasad RK, Mondal NC, Banerjee P, Nandakumar MV, Singh VS (2008) Deciphering potential groundwater zone in hard rock through the application of GIS. **Environ Geol** 55:467–475

RAZANDI, Yousef; POURGHASEMI, Hamid Reza; NEISANI, Najmeh Samani. Application of analytical hierarchy process , frequency ratio , and certainty factor models for groundwater potential mapping using GIS. [s. l.], 2015.

REBOUÇAS, Aldo C. **Águas subterrâneas**. Águas subterrâneas e poços tubulares profundos, 2006.

REZENDE, Patrícia Soares; MARQUES, Daniela Vieira; OLIVEIRA, Luiz Antônio De. Construção De Modelo No Qgis E Utilização Do Método De Processo Analítico Hierárquico – Ahp Para Mapeamento De Riscos À Inundação Na Área Urbana De Paracatu – Mg. **Caminhos de Geografia**, [s. l.], v. 18, n. 61, p. 1–18, 2017.

RIBEIRO M.; FANTINEL, L.M. Associações Petrotectônicas do Escudo Sul-Riograndense: Tabulação e distribuição das associações petrotectônicas do Escudo do Rio Grande do Sul. Iheringia, Série Geologia, Porto Alegre , 1978, n. 5, p.19-54, 1978.

RIBEIRO, M.; BOCCHI, P. R.; FIGUEIREDO, P. M. Geologia da Quadrícula de Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil. Boletim DNPM DFPM, Porto Alegre, 1966, n. 127, 1966.

RICCI, Mauro; PETRI, Setembrino. **Princípios de aerofotogrametria e interpretação geológica**. Centro de Publicações Técnicas da Aliança, 1965.

ROBERTSON, J. F. Revision of Stratigraphy and nomenclature of rock units in Caçapava-Lavras Region. **Notas e estudos**, v. 1, n. 2, p. 41-54, 1966.

ROSS, Jurandyr Luciano Sanches. Relevo brasileiro: uma nova proposta de classificação. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 4, p. 25-39, 2011.

ROULEAU, A. 1994. **Notes on direct fracture survey, In:** Environmental Education Enterprises and the Association of Engineering Geologists, Fractured rocks: characterization, flow and transport, Tucson, Arizona, Course Notesp.280-282.

SAATY R.W. the Analytic Hierarchy Process-What and How It Is Used It Is. **International Journal of Advanced Science and Technology**, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 19–24, 2012. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/procedia%0Ahttp://arxiv.org/abs/1109.4490>

SAATY, Thomas L. Decision making — the Analytic Hierarchy and Network Processes (AHP/ANP). **Journal of Systems Science and Systems Engineering**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 1–35, 2006.

SAMI, K. Evaluation of the variations in borehole yield from a fractured Karoo Aquifer, South Africa. **Groundwater**, v. 34, n. 1, p. 114-120, 1996.

SCHOWENGERDT, Robert A. **Techniques for image processing and classifications in remote sensing**. New York: Academic Press, 1983.249 p.

SHEKHAR, Shashank; PANDEY, Arvind Chandra. Delineation of groundwater potential zone in hard rock terrain of India using remote sensing, geographical information system (GIS) and analytic hierarchy process (AHP) techniques. [s. l.], n. June, p. 37–41, 2014.

SILVA, Diva Martins Rosas. Aplicação do Método AHP para Avaliação de Projetos Industriais. **Dissertação Mestrado Programa de Pós Graduação em Engenharia Industrial da PUC-Rio**, [s. l.], p. 128, 2007. Disponível em: <http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/10385/10385_4.PDF>

SINGH, Amanpreet et al. Artificial groundwater recharge zones mapping using remote sensing and gis: A case study in Indian Punjab. **Environmental Management**, [s. l.], v. 52, n. 1, p. 61–71, 2013.

SRINIVASA RAO, Y.; JUGRAN, D. K. Delineation of groundwater potential zones and zones of groundwater quality suitable for domestic purposes using remote sensing and GIS. **Hydrological Sciences Journal**, [s. l.], v. 48, n. 5, p. 821–834, 2003.

TELLES, Pâmela Nathalia Germano. Mapeamento hidrogeoquímico do município de Caçapava do Sul, RS. 2016.

TOLMAN, C. F.; GROUNDWATER, M. C. Graw Hill. **New york**, 1937.

TOCH, J. 1878, Gravity Induced cross-formational flow offormation fluids, red erath region, Alberta, Canada: Analysis, patterns, and evaluation: **Water Resources Research**, v.14.p. 805-843.

WALTON, William Clarence. Groundwater resource evaluation. **McGraw-Hill series in water resources and environmental engineering (USA) eng**, 1970.