

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO ESCOLA DE MINAS DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ANÁLISE DE LINEAMENTOS E DE GEOPROCESSAMENTO COMO INDICATIVO DE FLUXO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS: REGIÃO DA RODOVIA TAMOIOS – LITORAL NORTE DO ESTADO DE SÃO PAULO

Paula Ribeiro de Melo

MONOGRAFIA nº 374

Ouro Preto, 21 de setembro de 2020

Trabalho de Conclusão de Curso, n. 374 2020



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

Reitora

Prof.ª Dr.ª Cláudia Aparecida Marliére de Lima

Vice-Reitor

Prof. Dr. Hermínio Arias Nalini Júnior

Pró-Reitora de Graduação

Prof.^a Dr.^a Tânia Rossi Garbin

ESCOLA DE MINAS

Diretor

Prof. Dr. Issamu Endo

Vice-Diretor

Prof. Dr. Hernani Mota de Lima

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Chefe

Prof. MSc Edison Tazava

MONOGRAFIA

Nº 374

ANÁLISE DE LINEAMENTOS E DE GEOPROCESSAMENTO COMO INDICATIVO DE FLUXO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS: REGIÃO DA RODOVIA TAMOIOS – LITORAL NORTE DO ESTADO DE SÃO PAULO

Paula Ribeiro de Melo

Orientador

Prof. Dr. Luis de Almeida Prado Bacellar

Co-Orientadora

MSc Ana Maciel de Carvalho

Monografia do Trabalho de Conclusão de curso apresentado ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para avaliação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso – TCC 402, ano 2020/1.

OURO PRETO

2020

Universidade Federal de Ouro Preto – http://www.ufop.br Escola de Minas - http://www.em.ufop.br Departamento de Geologia - http://www.degeo.ufop.br/ Campus Morro do Cruzeiro s/n - Bauxita 35.400-000 Ouro Preto, Minas Gerais Tel. (31) 3559-1600, Fax: (31) 3559-1606

Direitos de tradução e reprodução reservados.

Nenhuma parte desta publicação poderá ser gravada, armazenada em sistemas eletrônicos, fotocopiada ou reproduzida por meios mecânicos ou eletrônicos ou utilizada sem a observância das normas de direito autoral.

Revisão geral: Paula Ribeiro de Melo

Catalogação elaborada pela Biblioteca Prof. Luciano Jacques de Moraes do Sistema de Bibliotecas e Informação - SISBIN - Universidade Federal de Ouro Preto

M528a Melo, Paula Ribeiro de.

Análise de lineamentos e de geoprocessamento como indicativo de fluxo de águas subterrâneas [manuscrito]: região da Rodovia Tamoios – litoral norte do estado de São Paulo. / Paula Ribeiro de Melo. - 2020.

119 f.: il.: color., gráf., tab., mapa. (Série: 374)

Orientador: Prof. Dr. Luis de Almeida Prado Bacellar. Coorientadora: Profa. Ma. Ana Maciel de Carvalho.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Geológica.

 Águas subterrâneas. 2. Aquíferos. 3. Percolação.
Topografia - Lineamento. I. Bacellar, Luis de Almeida Prado. II. Carvalho, Ana Maciel de . III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues CRB6 - 2526

Ficha de Aprovação

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TÍTULO: ANÁLISE DE LINEAMENTOS E DE GEOPROCESSAMENTO COMO INDICATIVO DE FLUXO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS: REGIÃO DA RODOVIA TAMOIOS – LITORAL NORTE DO ESTADO DE SÃO PAULO

AUTORA: Paula Ribeiro de Melo

ORIENTADOR: Luis de Almeida Prado Bacellar

Aprovada em: 21 de setembro de 2020

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Luis de A. P. Bacellar	Two Bondar	DEGEO/UFOP
Prof. Dr. Paulo H. Ferreira Galvão	Paulo alum	IGC/UFMG
Prof. Dr. Humberto Luiz Siqueira Reis_		 DEGEO/UFOP

Ouro Preto, 21/09/2020

SUMÁRIO

RESUMO	XV	12
	ÇΑΟ	
1.1 LUCALL		
1.2 JUSTIFIC		
1.3 OBJETTV	OS ESPECIFICOS E ESPECIFICOS	
2 MATERIA		1/
2.1 REVISA	O BIBLIOGRAFICA	1/
2.2 ANALIS	E DE DADOS DE SONDAGEM	
2.3 CARACI		
2.4 ANALIS	E DE LINEAMENTOS	
3 REVISAO	DE TRABALHOS ANTERIORES	
3.1 CARACI	IERIZAÇAO GERAL DA AREA	
3.1.1	Contexto geomorfológico	
3.1.2	Contexto Geológico	
Geotectônica.		24
O Complexo	Costeiro (615 Ma)	
Geologia estru	ıtural da área	
O arcabouço g	geológico da área e a Neotectônica	
3.1.3	Contexto Climático	
3.1.4	Contexto hidrológico e hidrogeológico	
3.2 FLUXO I	DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM MEIOS FRATURADOS	
3.2.1	Mapeamento de lineamentos	
3.2.2 hidrogeo	Estudo da potencialidade de aquíferos fraturados di lógicos	e parâmetros 45
4 RESULTA	DOS E DISCUSSÕES	53
4.1 LITOLO	GIA DA ÁREA	53
4.2 ANÁLIS HÍDRICA E H	E CLASSIFICATÓRIA DOS LINEAMENTOS PARA POTENC PARA DENSIDADE	IALIDADE 55
4.2.1	Escala 1: 50.000	55
4.2.2	Escala 1: 30.000	63
4.2.3	Escala 1: 10.000	
4.3 CONDIC	IONAMENTO ESTRUTURAL À CIRCULAÇÃO DE ÁGUA	
4.3.1	Escala 1: 50.000	81

4.3.2	Escala 1: 30.000	.84
4.3.3	Escala 1: 10.000	.87
4.4 AVALIAÇÃO ESTRUTURAL À	DAS DRENAGENS SUPERFICIAIS E O CONDICIONAMENTO CIRCULAÇÃO DE ÁGUA) . 91
4.4.1	Escala 1: 50.000	.91
4.4.2	Escala 1: 30.000	.94
4.4.3	Escala 1: 10.000	.96
5 CONCLUSÕES		101
REFERÊNCIAS B	IBLIOGRÁFICAS	105

INDÍCE DE FIGURAS

Figura 1.1- Mapa localização da área de estudo	14				
Figura 2.1 - Principais unidades litológicas do Cinturão Ribeira e localização no contexto geológico					
da área de estudo	25				
Figura 2.2 - América do Sul e África pré-separação mostrando os principais unidades cratônicas e					
cinturões brasiliano-pan-africanos do Gondwana Oeste	26				
Figura 2.4 - Esquema de evolução geológica das bacias marginais brasileiras, simultaneamente à					
deriva continental e consequente origem do Oceano Atlântico	27				
Figura 2.5- Mapa geológico da área de estudo	29				
Figura 2.6 - Sistema Megafalhas Cubatão	30				
Figura 2.7 - Estrutura tectônica do sudeste do Brasil mostrando o paralelismo entre alguns dos					
alinhamentos estruturais no continente e na plataforma continental adjacente.	33				
Figura 2.8 - Circulação Atmosférica no Sudeste Brasileiro.	34				
Figura 2.9 - Gráfico pluviométrico com média anual das cidades de Caraguatatuba, Natividade da					
Serra e Paraibuna.	34				
Figura 2.10 – Mapa Hidrográfico da área de estudo.	36				
Figura 2.11 – Exemplos de porosidade em rochas	38				
Figura 2.12 – Estruturas que podem controlar a ocorrência de água subterrânea em rochas cristalinas	s				
	39				
Figura 2.13 – Decréscimo na produção média de poços segundo a profundidade média em rochas					
cristalinas	10				
Figura 2.14 – Intemperismo e abertura de fraturas e outros tipos de descontinuidades, em					
profundidades rasas	11				
Figura 2.15 – Regimes de fluxo e estruturas frágeis resultantes.	12				
Figura 2.16 – Modelo Riacho-Fenda	13				
Figura 2.17 – Modelo Riacho-Fenda ilustrado na visão de mapa ou fotografia aérea e em					
afloramentos	14				
Figura 2.18 – Modelo Calha Elúvio-Aluvionar	14				
Figura 2.19 – Modelo Bolsões ou Câmaras de Intemperismo	15				
Figura 2.20- Curvas de distribuição acumulada segundo as classes de litologias que constituem os					
aquíferos fraturados do Estado de São Paulo	17				
Figura 2.21 - Curvas de distribuição acumulada segundo as classes de espessura de manto					
inconsolidado que ocorrem sobre os aquíferos fraturados pré-cambrianos do Estado de São Paul	lo				
e sua distribuição em rochas pré-cambrianas ²	18				

Figura 2.22 - Localização das áreas de afloramento dos aquíferos fraturados no Estado de São Paulo e
distribuição dos poços que exploram os aquíferos Pré-Cambriano e Serra Geral
Figura 2.23 – (A) Mapa de classes de densidades de lineamentos EW para as rochas pré-cambrianas e
respectivas distribuições acumuladas. (B) Mapa de classes de densidade de intersecções de
lineamentos EW e NS e respectivas distribuições acumuladas
Figura 2.24 - Mapa de classes de potencial hidrogeológico para os aquíferos fraturados do Estado de
São Paulo e gráfico de distribuições acumuladas correspondentes
Figura 4.1 - Mapa geológico da área de estudo com dados litológicos de sondagens fornecidas pela
empresa Queiroz Galvão
Figura 4.2 – Zoom das áreas demarcadas no Mapa geológico da área de estudo com dados litológicos
de sondagens fornecidas pela empresa Queiroz Galvão54
Figura 4.3 - Mapa Comprimento dos Lineamentos e seus respectivos pesos. Escala 1:50.000
Figura 4.4 - Mapa Direção dos Lineamentos e seus respectivos pesos. Escala 1:50.000
Figura 4.5 - Diagrama de rosas do comprimento dos lineamentos. Escala 1: 50.000
Figura 4.6 - Diagrama de rosas da frequência das direções dos lineamentos. Escala 1: 50.000 58
Figura 4.8 – Mapa do Potencial Hídrico dos Lineamentos. Escala 1:50.000
Figura 4.7 - Zoom dos pontos demarcados no Mapa do Potencial Hídrico dos Lineamentos. Escala
1:50.000
Figura 4.9 – Mapa de Densidade de Lineamentos. Escala 1: 50.000
Figura 4.10 - Mapa de Comprimento dos Lineamentos e seus respectivos pesos. Escala 1:30.000 64
Figura 4.11 - Zoom dos pontos demarcados no Mapa Comprimento dos Lineamentos e seus
respectivos pesos. Escala 1:30.000
Figura 4.12 - Mapa de Direção dos Lineamentos e seus respectivos pesos. Escala 1:30.000
Figura 4.13 - Zoom dos pontos demarcados no Mapa de Direção dos Lineamentos e seus respectivos
pesos. Escala 1:30.000
Figura 4.14 - Diagrama de rosas do comprimento dos lineamentos. Escala 1: 30.000
Figura 4.15 - Diagrama de rosas da frequência das direções dos lineamentos. Escala 1: 30.000 68
Figura 4.16 – Mapa do Potencial Hídrico dos Lineamentos. Escala 1:30.000
Figura 4.17 - Zoom dos pontos demarcados no Mapa do Potencial Hídrico de Lineamentos. Escala
1:30.000
Figura 4.18 – Mapa de Densidade de Lineamentos. Escala 1: 30.000
Figura 4.19 – Mapa Comprimento dos Lineamentos e seus respectivos pesos. Escala 1:10.000 73
Figura 4.20 - Zoom dos pontos demarcados no Mapa Comprimento dos Lineamentos e seus
respectivos pesos. Escala 1:10.00074
Figura 4.21 - Mapa Direção dos Lineamentos e seus respectivos pesos. Escala 1:10.000

Figura 4.22 - Zoom dos pontos demarcados no Mapa Direção dos Lineamentos e seus respectivos
pesos. Escala 1:10.00076
Figura 4.23 - Diagrama de rosas do comprimento dos lineamentos. Escala 1: 10.00076
Figura 4.24 - Diagrama de rosas da frequência das direções dos lineamentos. Escala 1: 10.000 77
Figura 4.25 – Mapa do Potencial Hídrico de Lineamentos. Escala 1:10.000
Figura 4.26 - Zoom dos pontos demarcados no Mapa do Potencial Hídrico de Lineamentos. Escala
1:10.000
Figura 4.27 – Mapa de Densidade de Lineamentos. Escala 1: 10.000
Figura 4.28 - Mapa de Condicionamento Estrutural à Circulação de Água. Escala 1:50.000
Figura 4.29 - Zoom dos pontos demarcados no Mapa de Condicionamento Estrutural à Circulação de
Água, escala 1:50.000
Figura 4.30 - Mapa de Condicionamento Estrutural à Circulação de Água. Escala 1:30.000
Figura 4.31 - Zoom dos pontos demarcados no Mapa de Condicionamento Estrutural à Circulação de
Água. Escala 1:30.000
Figura 4.32 - Mapa de Condicionamento Estrutural à Circulação de Água. Escala 1:10.000
Figura 4.33 - Zoom dos pontos demarcados no Mapa de Condicionamento Estrutural à Circulação de
Água, escala 1:10.000
Figura 4.34 - Comparação entre as drenagens superficiais e o Condicionamento Estrutural à
Circulação de Água na escala 1:50.00092
Figura 4.35 - Zoom dos pontos demarcados no Mapa de Comparação entre as drenagens superficiais e
o Condicionamento Estrutural à Circulação de Água na escala 1:50.000
Figura 4.36 - Comparação entre as drenagens superficiais e o Condicionamento Estrutural à
Circulação de Água na escala 1:30.00095
Figura 4.37 - Zoom dos pontos demarcados no Mapa de Comparação entre as drenagens superficiais e
o Condicionamento Estrutural à Circulação de Água na escala 1:30.000.
Figura 4.38 - Comparação entre as drenagens superficiais e o Condicionamento Estrutural à
Circulação de Água na escala 1:10.00098
Figura 4.39 - Zoom dos pontos demarcados no Mapa de Comparação entre as drenagens superficiais e
o Condicionamento Estrutural à Circulação de Água na escala 1:10.000.

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1- Raio de pesquisa segundo a escala dos lineamentos traçados. 2
Tabela 3.1 – Estágios de movimentação tectônica do Rifte Continental do Sudeste do Brasil
Tabela 3.2 - Fatores considerados na avaliação da variação da produção dos poços e subdivisão destes
fatores em classes
Tabela 3.3 - Direções preferenciais de lineamentos em rochas pré-cambrianas. 4
Tabela 4.1 - Matriz do Potencial Hídrico dos Lineamentos. Escala 1:50.000
Tabela 4.2 - Matriz do Potencial à Circulação de Água nos Lineamentos. Escala 1:30.00066
Tabela 4.3 - Matriz Potencial Hídrico dos Lineamentos. Escala 1:10.000

RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso tem o objetivo de identificar zonas preferenciais de percolação de águas subterrâneas nas áreas de construção da nova rodovia Tamoios e arredores, no litoral norte do Estado de São Paulo e inserida no contexto geológico da Serra do Mar. Partiu-se do traçado de lineamentos a partir de modelos digitais de terreno (MDT), nas escalas 1:30.000 e 1:50.000, e na imagem do satélite CBERS 4/PAN 5 em 1:10.000, bases submetidas a sombreamentos em tipos litológicos identificados por perfis de sondagem e mapa geológico, a saber: migmatitos (cerca de 70% da área de estudo), suítes granitoides (cerca de 25% da área) e depósitos sedimentares marinhos (cerca de 5% da área). A análise foi realizada considerando pesos diferentes para três fatores: i) direção, ii) comprimento e iii) densidade dos lineamentos. A relação entre a direção pelo e o comprimento definiu o potencial hídrico ao longo dos lineamentos, enquanto a relação entre o potencial hídrico (comprimento versus direção) e a densidade de lineamentos definiu o condicionamento estrutural à circulação de água por estas descontinuidades. As orientações mais frequentes de lineamentos, observadas em rosetas, foram, respectivamente: NW-SE, N-S e NE-SW, nas duas escalas de maior detalhe. As maiores densidades de lineamentos, observada pela ferramenta Kernel de geoprocessamento, ocorrem na porção central da área, principalmente no contato mais a sul das unidades de migmatitos e suítes granitoides, local com o maior condicionamento estrutural à circulação de água, com maior detalhe de classificação na escala 1:10.000. Esse contato e o sudeste da nova rodovia Tamoios, merecem uma atenção maior para análises futuras de fraturas, a fim de comprovar esta tendência e evitar colapso e subsidência, redução de vazão e/ou secamento de nascentes, estresse na vegetação, contaminação do ambiente subterrâneo pelo vazamento e infiltração de combustíveis, etc.

Palavras chave: lineamentos, aquíferos fraturados, Serra do Mar, Litoral Norte de São Paulo.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A Serra do Mar está localizada no sudeste do litoral brasileiro, inserida no contexto geotectônico da Província da Mantiqueira (HASUI, 2010). Caracteriza-se por um conjunto de rochas metamórficas e ígneas que, em virtude a longa e complexa história geológica, apresentam uma série de fraturas. Tais estruturas, por sua vez, conferem a porosidade secundária a estas rochas, característica de aquíferos fraturados (Citações). O litoral norte do Estado de São Paulo faz parte desse contexto geoestrutural e é o local atual da construção de túneis da nova Rodovia Tamoios. Este empreendimento representa um potencial desafio para obras de engenharia em terrenos cristalinos e sua construção exige profundo conhecimento do sistema natural de fraturas e o fluxo das águas subterrâneas durante, a fim de minimizar potenciais impactos ambientais.

Dessa forma, neste trabalho foram traçados lineamentos a partir de Modelos Digitais de Terreno (MDT), gerados na escala regional (1:50.000), e em escalas locais, a partir de imagens de satélite Alos-Palsar (escala 1:30.000) e CBERS–4/PAN-5 (escala 1:10.000). Tais lineamentos foram submetidos a análises geoestatísticas e de geoprocessamento, objetivando-se identificar zonas preferenciais de fluxo de águas subterrâneas. Uma vez conhecendo-se essas estruturas preferenciais, pode-se indicar estudos de maior detalhe a fim de prever principais fraturas ou zonas de fraturamento por onde ocorre o fluxo preferencial de água subterrâneas.

A análise dos lineamentos na região da nova Rodovia Tamoios, pelo viés ambiental, torna-se uma ferramenta de grande importância, uma vez que nas proximidades há oleodutos e as rodovias Tamoios e Osvaldo Cruz (figura 1.1), onde derramamentos de hidrocarbonetos e acidentes rodoviários podem ocorrer, respectivamente. Fatores como estes podem ocasionar a poluição do ambiente subterrâneo pelo vazamento e infiltração de combustíveis com substâncias nocivas ao meio ambiente e a saúde humana. A percolação destes fluidos pode ocorrer por meio de locais com altas densidades de fraturas, principalmente próximo a grandes zonas transcorrentes conhecidas na região (CBH-LN, 2017).

1.1 LOCALIZAÇÃO

A área de estudos localiza-se no litoral sudeste brasileiro e possui aproximadamente 204 km², englobando as cidades paulistas de Caraguatatuba, Paraibuna e Natividade da Serra (Figura 1.1). Ocupa três folhas topográficas na escala 1: 25.000 e produzidas pelo IBGE , sendo elas SF-23-Y-D-II-1-SO (São José dos Campos), SF-23-Y-D-VI-1-NO (Caraguatatuba) e SF-23-Y-D-III-3-SO (Natividade da



Serra), limitando-se pelo meridianos 45° 26' 15" e 46° 11' 15" W e pelos paralelos 23° 26' 15" e 23° 33' 45" S.

Figura 1.1- Mapa localização da área de estudo

1.2 JUSTIFICATIVA

A demanda por túneis e galerias, seja para facilitar a mobilidade rodoviária e metroviária, transporte de gás e óleo, seja para mineração subterrânea, tem aumentado, devido as suas vantagens frente às obras superficiais, como menor impacto ambiental, encurtar distâncias, preservar a superfície, acomodar o aumento das demandas; etc. Essa demanda torna crescente a importância de estudos de hidrogeologia em meios fraturados para obras de engenharia, uma vez que fraturas representam importante meio de percolação e contaminação de sistemas aquíferos. Neste sentido, muitos destes empreendimentos encontram-se locados em terrenos constituídos por rochas magmáticas e diferentes idades e configurações culminou na formação de complexas redes de fraturas (DAEE, 2005). Os terrenos cristalinos chegam a aproximadamente 35% em território brasileiro, segundo o IBGE (2006).

O trabalho realizado – estudo em aquíferos fraturados, interceptando áreas de construção de túneis- é uma modalidade que merece atenção na geotecnia, uma vez que é crescente o número de obras subterrâneas, cerca de 3% ao ano na escala mundial (Associação Internacional de Tunelamento e Espaço Subterrâneo 2018). Torna-se, dessa maneira, importante avançar no entendimento de terrenos cristalinos com tais características e suas implicações para o desenho e execução de obras de engenharia desta natureza, considerando a complexidade intrínseca de aquíferos fraturados. A execução de obras subterrâneas, como os túneis, pode gerar uma série de impactos, como colapso e subsidência, redução de vazão e/ou secamento de nascentes, estresse na vegetação, etc. Muito destes impactos decorrem da alteração das condições hidrogeológicas de contorno, uma vez que estas obras passam a se constituir em drenos quando mal construídas (MARTINS, 2016). Quando escavações desta natureza são realizadas em meios porosos e intergranulares, a previsibilidade dos impactos no regime hidrológico local é maior, mas quando a obra se desenvolve em aquíferos anisotrópicos e heterogêneos, como os fraturados, a previsão dos impactos é mais complexa (FERNANDES *et al.*, 2008).

A escavação de obras subterrâneas, como os túneis, pode gerar uma série de impactos, como colapsos e subsidências, redução de vazão ou até o secamento de nascentes, estresse na vegetação; etc. Muito destes impactos decorrem da alteração das condições hidrogeológicas de contorno, uma vez que estas obras passam a se constituir em drenos quando mal construídas (MARTINS, 2016). Quando esta escavação se dá em meios porosos e intergranulares, a previsibilidade dos impactos no regime hidrológico local é maior, mas quando a obra se desenvolve em aquíferos mais anisotrópicos e heterogêneos, como os fraturados, a previsão é mais complexa (FERNANDES *et al.*, 2008).

Cabe destacar ainda que este trabalho se insere num projeto maior, no qual envolve um doutorado do Programa de Pós-graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais (PPG-ECRN).

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS E ESPECÍFICOS

Como objetivo principal, pretende-se identificar zonas preferenciais de percolação de água subterrânea em aquíferos fraturados em áreas de túneis rodoviários, a fim de auxiliar obras de engenharia desse tipo e, ainda, mitigar possíveis problemas ambientais.

Como objetivo secundário, pretende-se fornecer dados para avaliação posterior do desempenho de técnicas estatísticas e de geoprocessamento na análise de estruturas rúpteis em aquíferos fraturados.

Trabalho de Conclusão de Curso, n. 374 2020

CAPÍTULO 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido com base em revisões bibliográficas que permitiram o entendimento do desenvolvimento geotectônico e hidrogeológico da região de estudo e métodos para a análise estatística dos lineamentos. Utilizando os *softwares Azimuth Finder* e *Stereo 32* para separar os lineamentos em grupos por comprimento e por direção, de maneira independente. A geoestatística envolvida na classificação dos lineamentos, teve o *ArcGis 10.5* como ferramenta principal para a classificação visual (qualitativa) e quantitativa.

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica ocorreu com o intuito de compreender os fenômenos que deram origem à atual configuração da geológica e suas possíveis implicações, juntamente com a litologia, e o comportamento hidrogeológico da região. Para tal, foram reunidos e consultados trabalhos anteriores e específicos da geologia regional, geologia local da área da obra, relatórios cedidos pela empresa Queiroz Galvão e trabalhos sobre geologia estrutural para fluxo de água subterrânea. Também foram pesquisados trabalhos que abordam a análise estrutural em aquíferos fraturados, tais como Singhal & Gupta (1999, 2010) e DAEE (2005); além de trabalhos com métodos parcialmente similares aos desenvolvidos nesta tese, como de Krisp & Špatenková (2010), Carvalho *et al.* (2015) e Mendes *et al.* (2016).

2.2 ANÁLISE DE DADOS DE SONDAGEM

Quatrocentas e oitenta e seis sondagens fornecidas pela empresa Queiroz Galvão foram organizadas em planilha de Excel, para auxiliar na caracterização litológica da área de estudo. A partir dessa planilha, os dados dos furos foram convertidos em *shapes* de pontos e plotados em UTM SIRGAS 2.000 23S. Em cada um deles há a etiquetagem, direção e inclinação, bem como as cotas das suas variações litológicas correspondentes. Os testemunhos de sondagem auxiliaram na melhor escolha da base litológica para as sequências de trabalhos descritos a frente.

2.3 CARACTERIZAÇÃO LITOLÓGICA

Foram comparados quatro mapas litológicos da região: Mapa Geológico do Estado de São Paulo CPRM (1999), escala 1:250.000; Mapa Geológico do Estado de São Paulo (CPRM, 2005), escala 1: 750.000; DAEE & UNESP (2009) escala 1:250.000; e Mapa geológico escala 1:50.000, fornecido pela empresa Queiroz Galvão (2018).

Cada um desses mapas teve suas descrições litológicas comparadas com os perfis de sondagem fornecidos. Utilizando-se do software *ArcGis 10. 5* ®, os mapas foram sobrepostos com as informações de sondagens e, aquele que mais se adequou à descrição dos testemunhos de sondagem foi selecionado para a sequência de trabalhos geoestatísticos e de geoprocessamento.

2.4 ANÁLISE DE LINEAMENTOS

Base e traçado dos lineamentos

Lineamentos foram traçados em três escalas diferentes: 1:10.000, 1:30.000 e 1:50.000. As escalas 1:30.000 e 1:50.000 tiveram lineamentos traçados em Modelos Digitais de Terreno (MDT) confeccionados a partir da camada de extensão "*.inc*" da imagem de satélite Alos Palsar e das curvas de nível cedidas pelo Instituto Geográfico e Cartográfico de São Paulo, respectivamente. Para essas duas escalas, os lineamentos foram realçados em superfície e identificados com sombreamentos nos azimutes de 0°, 15°, 45°, 151° e 315°, segundo recomendação de Carvalho *et al.* (2015). Para a escala 1:10.000, os lineamentos foram traçados diretamente na imagem pancromática do satélite CBERS– 4/ PAN-5M, após o ajuste de visualização em 44% de contraste, 2 de brilho e gama com 1,26.

O sensor pancromático do CBERS-4/ PAN-5M tem 5m de resolução espacial na faixa espectral entre 0,51 a 0,85µm (INPE, 2019). Essa resolução permite análise na escala 1:10.000, mas não permite visadas diferentes, portanto, o traçado dos lineamentos foi realizado diretamente na imagem de satélite.

Seguindo Menezes & Almeida (2012), uma imagem de satélite de resolução espacial com maiores valores numéricos (acima de 50 m) é mais indicada para um estudo de aspecto regional, por não apresentar grande detalhamento de seus alvos, visto que a resolução espacial de uma imagem é definida pela magnitude do menor objeto que pode identificar. Sendo isto considerado, as imagens Alos Palsar e CEBERS 4/ PAN 5M foram escolhidas para maiores detalhamentos da área de estudo, tendo elas respectivamente 12,5 e 5 metros de resolução espacial (ASF, 2019; INPE, 2019).

Para aferição da escala que as imagens de satélites poderiam cobrir, emprega-se a fórmula de Boggione *et al.*(2009), seguindo a equação do padrão de exatidão cartográfica em imagens de satélite (equação 3.1), com resultados na tabela 3.1.

$$Escala = \frac{1}{2 * IFOV * 1000}$$

Equação 2.1

Onde IFOV (Instantaneos Field of View) é a resolução espacial nominal do satélite.

Os lineamentos traçados representam feições de vales, tanto pequenas drenagens intermitentes ("cicatrizes retilíneas") nas laterais dos morros, quanto para as drenagens. Teve-se o cuidado de não intercruzar os lineamentos, para não haver falsas áreas de alta densidade. Topos de morro, mesmo que retilíneos, não foram demarcados nesse estudo, para favorecer drenagens superficiais e não superestimar a densidade de lineamentos. Recomendações e definições de Bradbury & Muldoon (1992), Singhal & Gupta (1999) e Carvalho *et al.* (2015) para lineamentos foram respeitadas.

Análises realizadas

Os lineamentos, traçados de maneira independente nas três escalas, foram submetidos à análise de comprimento, da direção e de densidade. As duas primeiras análises citadas, também foram realizadas por unidade litológica. A densidade dos lineamentos foi estimada pelo Método Kernel, que calcula a magnitude de vetores por unidade de área (Silverman,1988); enquanto a análise da frequência de direção e de comprimento dos lineamentos foi possível ao plotar os lineamentos em rosáceas no *software Stereo32* ®, versão 2019.

Os azimutes dos lineamentos foram extraídos pelo *AzimuthFinder 1.1* (compilação que integra *software ArcGis*, cedida pelo grupo de Neotectônica da Universidade Federal do Paraná). O *AzimuthFinder 1.1* gera uma tabela própria para reconhecimento no *software Stereo32*. Para a tabela de azimutes, por unidade litológica, mantenha o comprimento mínimo real da área total e não haver erro estatístico devido ao seccionamento dos lineamentos sobre os contatos litológicos, teve-se o cuidado de inserir os pesos (menor comprimento de lineamento) 51, 121 e 166 respectivamente para as escalas 1:10.000, 1:30.000 e 1:50.000, no "Tamanho de unidade de Peso" na própria caixa de parâmetros do *AzimuthFinder 1.1*.

A distribuição dos comprimentos dos lineamentos foi realizada em três faixas de classificação, apoiando-se em análises de histogramas. Nas três escalas buscou-se uma melhor distribuição dos agrupamentos de pesos, viabilizando destaque para lineamentos com maiores comprimentos, devido à alta possibilidade de esses conduzirem maiores fluxos de água. Isto porque quanto maior o lineamento, maior a possibilidade de movimentação cisalhante na sua geração em futuras reativações (SINGHAL

& GUPTA, 1999). Sendo assim, quanto maior o lineamento, maior a favorabilidade hídrica, o que explica terem recebido maiores valores numéricos de pesos em suas respectivas escalas.

A direção dos lineamentos também recebeu três classificações de pesos. Tais pesos foram distinguidos através da frequência de uma determinada direção na área de estudo, onde a direção mais recorrente recebeu o maior peso, seguindo o que foi indicado nos diagramas de rosetas de direção de lineamentos da área total de cada escala, confeccionados no *software Stereo32* (2019). Ter como base a tensão máxima horizontal local é o parâmetro ideal, para a distribuição de peso dos lineamentos segundo as direções. Porém essa aferição não foi possível com os recursos disponíveis, no momento de realização do presente trabalho, devido ao alto índice de movimentos de massa e acúmulo de corpos de tálus, o que altera a real direção das feições estruturais remanescente na área de estudo (Almeida & Carneiro, 1998).

Tanto para comprimento quanto para direção de lineamentos atribuíram-se pesos de 1, 2 e 3 em ordem crescente de potencialidade hídrica dos lineamentos. As direções e comprimentos de lineamentos tiveram seus pesos combinados entre si, gerando uma matriz peso com cinco classificações (de 1 a 5) para cada escala. Essa classificação foi atribuída para cada lineamento, no qual foi aplicado um *buffer*, com raio de 20 m, pois tais lineamentos não se configuram apenas como uma estrutura única, mas correspondem, quase sempre, a um feixe de fraturas paralelas ao lineamento e, desse modo (estabelecendo esta área e influência), há a garantia de que os lineamentos tivessem, em área, representatividade frente à dimensão das obras.

Deste modo, a partir do cruzamento dessas informações, o maciço rochoso foi subdividido em cinco classes de Potencial à Circulação de Água, sendo a Classe 1 definida como Potencial à Circulação de Água Insignificante e a Classe 5 como Potencial à Circulação de Água Muito Alto, tendo as classes intermediárias, 2, 3 e 4, sido classificadas como Baixo, Médio e Alto Potencial à Circulação de Água, respectivamente.

A densidade de lineamentos, penúltima análise realizada, foi definida com base no Método Kernel, na qual para cada mapa em escala diferente foi atribuído um raio e número de classes de saída, por meio de testes visuais e ponderação para não superestimar ou subestimar as zonas de influência dos lineamentos, segundo a metodologia Krisp & Špatenková (2010) (tabela 3.2). A opção pelos valores e parâmetros da tabela 3.2 partiu das premissas que um menor raio e menor número de classes permitem, em um mapa de densidade em Kernel, uma sinalização mais detalhada com pouco ruído (KRISP & ŠPATENKOVÁ, 2010). Os resultados foram também separados, em três classes de densidade, tendo peso 1 para nula a baixa densidade, peso 2 para médias densidades e peso 3 para altas densidades.

A análise integrada da densidade de lineamentos com o potencial hídrico dos lineamentos (direção e comprimento) permite induzir quais as regiões do maciço rochoso são mais propensas à maior circulação das águas subterrâneas, definido como Condicionamento Estrutural à Circulação de Água.

ESCALA MAPA DE LINEAMENTOS	RAIO DE PESQUISA (m)
1: 10.000	100
1: 30.000	200
1: 50.000	300

Tabela 2.1- Raio de pesquisa segundo a escala dos lineamentos traçados.

A origem do Mapa de Condicionamento Estrutural a Circulação de Água parte do princípio que, quanto maior a densidade de lineamentos, maior a probabilidade de o maciço rochoso estar mais fraturado. Se nessas regiões de maior densidade de lineamentos ocorrerem lineamentos que representam maior favorabilidade à circulação da água, são reunidos indícios que sugerem, com mais clareza, quais as regiões do maciço rochoso cujas características estruturais condicionariam maior fluxo d'água subterrânea, ou as regiões com maior probabilidade de circulação de água, definindo, assim, um condicionamento estrutural à circulação de água subterrânea.

O Condicionamento Estrutural à Circulação de Água foi obtido multiplicando o Potencial Hídrico de Lineamentos e a Densidade de Lineamentos. Esta análise geoestatística resultou em onze classificações ao Condicionamento Estrutural à Circulação de Água, com os seguintes valores numéricos: 1 a 6, 8, 9, 10, 12 e 15. Dessa maneira, o peso 1 configura a mínima favorabilidade estrutural à circulação de água da escala, e o peso 15 a máxima favorabilidade.

Posteriormente, o Condicionamento Estrutural à Circulação de Água nas escalas 1:50.000, 1:30.000 e 1:10.000 foram interceptados com drenagens superficiais na escala 1:50.000 da Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente do Estado de São Paulo (2013). Esta análise foi realizada com o intuito de averiguar possíveis lineamentos com fluxo de águas superficiais.

Trabalho de Conclusão de Curso, n. 374 2020

CAPÍTULO 3

REVISÃO DE TRABALHOS ANTERIORES

3.1 CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA

A Serra do Mar possui aproximadamente 1.000 quilômetros de extensão; é a feição geomorfológica que mais se destaca na borda atlântica na América do Sul, ocupando a área do litoral do estado do Rio de Janeiro até o norte do estado de Santa Catarina (ALMEIDA & CARNEIRO, 1998). A caracterização geral da área abrangerá descrições geomorfológicas, geológicas (geotectônica, litológica e geologia estrutural), clima, hidrogeologia e hidrografia da área de estudo; segundo revisões bibliográficas disponíveis e condizentes com o trabalho. A ênfase maior foi no contexto geológico devido ao objetivo principal do trabalho.

3.1.1 Contexto geomorfológico

A Serra do Mar, no estado de São Paulo, tem configuração de planaltos com altitudes entre 800 a 1.200m (ALMEIDA & CARNEIRO, 1998). É uma região de escarpas festonadas, topos angulosos e vertentes com perfil retilíneo e convexo, oriundos de uma quebra de relevo, observável pela presença de planaltos e serras margeados por uma estreita planície litorânea (ALMEIDA & CARNEIRO, 1998). A quebra do relevo na região, possivelmente, é uma resposta à erosão proporcionada durante episódios de formação de superfícies de aplainamento (Japi e Alto Tietê), como sugerido por Almeida & Carneiro (1998). A Superfície de Aplainamento do Alto Tietê é mais nova, de idade neógena e cerca de 400m mais baixa em relação à Superfície de Aplainamento Japi, de idade cretácea (FREITAS, 1951). Todo esse aspecto geomorfológico citado configura em um forte lineamento estrutural, caracterizando uma possível zona de falha (ALMEIDA & CARNEIRO, 1998).

A área está integralmente situada no Planalto Atlântico, estrutura geomorfológica com as maiores altitudes, próximas ao litoral, que se estende do sul ao nordeste do Estado de São Paulo. Esta porção do relevo possui um padrão de drenagem do tipo retangular, como defendido por Almeida & Carneiro (1998). A área da planície costeira (litorânea), situada num desnível de cerca de 100 m, apresenta baixa quantidade de drenagem, com sistemas meandrantes a anastomosados. Por vezes ocorrem cordões, praias, dunas e planícies de maré.

As áreas com maiores declividades são locais muito susceptíveis a movimentos de massa e acúmulo de depósito de tálus. Onde predominam as menores declividades, ocorre formação considerável de solos, como descrevem Almeida & Carneiro (1998). Tais fenômenos de intempérie

exógena teria se iniciado no Cenozoico, esculpindo a Superfície Japi, e mais tarde as superfícies neógenas, recuando as vertentes (ALMEIDA & CARNEIRO, 1998).

3.1.2 Contexto Geológico

O Contexto geológico aqui apresentado possui informações de geotectônica, litologia, geologia estrutural e neotectônica, fatores importantes para estudar os aquíferos fraturados.

Geotectônica

O litoral norte do Estado de São Paulo pelo viés geotectônico, segundo Fernandes (1991) e Meira (2014), se insere na porção Central do Cinturão Ribeira, Sistema Orogênico da Mantiqueira (figura 2.1). Os cinturões de dobramentos neoproterozoico dos quais fazem parte a Faixa Ribeira envolvidos no processo de amalgamação do supercontinente Gondwana, são alvos de debates acerca do tipo e cronologia das interações entre as placas responsáveis pela configuração final dessas estruturas geológicas (Meira, 2014). Tradicionalmente, é defendido que os orógenos neoproterozoicos brasileiros são resultantes da colisão e amalgamação múltiplas placas litosféricas após a quebra do paleocontinente Rodínia (Fig. 2.2) (BRITO NEVES & CORDANI, 1991; SADOWSKI, 1991; FUCK et al., 2008; BASEI et al., 2010; ALMEIDA *et al.*, 2010; HASUI, 2010).

Segundo Campos-Neto (2000), o Sistema Orogênico Mantiqueira representa um segmento orogênico formado através do fechamento do paleoceano Adamastor, entre o Neoproterozoico e o Paleozoico inferior (figura 2.3). Este evento compõe múltiplos episódios diacrônicos de subducção de crosta oceânica e colisão de microcontinentes mais antigos que marcaram a Orogênese Brasiliana nessa região (CAMPOS NETO, 2000).

A partir de dados radiométricos, Silva (2005) dividiu a "colagem multiepsódica" da Província Mantiqueira em três eventos: Brasiliano I, Brasiliano II e Brasiliano III. A área de estudo inclusa no Cinturão Granítico Costeiro (com idade em torno de 615Ma), formado por ortognaisses do Complexo Rio Negro e paragnaisses de origem pelítica de alto grau metamórfico (HEILBRON *et al.*, 2008), está associada ao evento Brasiliano II. Esta fase envolveu a geração de arcos magmáticos e colisões de microcontinentes de um núcleo litosférico vindo da direção oeste (SILVA, 2005).



Figura 3.1 - Principais unidades litológicas do Cinturão Ribeira e localização no contexto geológico da área de estudo. (Modificada de Hasui 2010).



Figura 3.2 - América do Sul e África pré-separação mostrando os principais unidades cratônicas e cinturões brasiliano-pan-africanos do Gondwana Oeste. Crátons: A - Amazônia; SF - São Francisco; C- Congo; W - África Ocidental; K- Kalahari; RP - Rio de La Prata; P? - Suposto Paranapanema. Cinturões dobráveis: 1 - Ribeira; 2 – Dom Feliciano; 3 - Gariep; 4 - Damara; 5 - Kaoko; 6 - Alto Rio Grande; 7 - Araçuaí; 8 - Brasília; 9 - Congo



Ocidental; 10—Borborema; 11 - Araguaia; 12 - Paraguai; 13 - Serras Pampeanas. (Campanha & Brito Neto 2004).

Figura 3.3 - Vestígios do extinto Oceano Adamastor em a.C. 590Ma: esboço peleogeográfico do oceano. (Campos Neto 2000).

As rochas e estrutura tectônicas desenvolvidas durante Neoproterozoico/Paleozoico inferior foram afetadas por processos tectônicos durante a abertura do Atlântico Sul. Segundo Suguio & Martin (1996), a abertura teve início no Jurássico, no início da fragmentação do Gondwana Ocidental, com uma série de eventos magmáticos sin-tectônicos denominados Reativação Wealdeniana, como o Evento Sul-Atlantiano e a Reativação Pós-Paleozoica esquematizados na figura 3.4 (ALMEIDA, 1967).



Figura 3.4 - Esquema de evolução geológica das bacias marginais brasileiras, simultaneamente à deriva continental e consequente origem do Oceano Atlântico. (Suguio & Martin 1996).

Entre as eras do Cretáceo e Neogeno as bacias marginais do litoral brasileiro evoluíram sob o controle tectônico e termal, bem como por flutuações eustáticas. A influência tectônica sobre estas bacias perduram, mesmo que em menor intensidade, até os dias atuais (ASMUS & PORTO, 1972; SUGUIO & MARTIN, 1996).

O Complexo Costeiro (615 Ma)

O Complexo Costeiro é limitado ao norte pela Falha de Cubatão, e ao sul pela linha de costa e ilhas vizinhas (HASUI *et al.*, 1981). Com o advento do entendimento da superposição de orógenos e acresção de terrenos, Campos Neto & Figueiredo (1995) chamaram o Complexo Costeiro de Microplaca Serra do Mar (figura 2.3), a qual posteriormente foi denominada como terreno.

O Terreno Serra do Mar é composto predominantemente por migmatitos e corpos alongados de (granada)- biotita granitos com estrutura nebulítica e *schlieren* variavelmente deformados em intensidades distintas (CAMPOS NETO& FIGUEIREDO, 1995; CAMPOS NETO, 2000). Os mesmos autores admitem três segmentos crustais para o terreno: i) uma unidade de rochas supracrustais a oeste, sobreposta por ii) uma unidade central gnáissica-migmatítica iii) uma unidade granulítica-granítica-migmatítica a leste. Trata-se de uma pilha estratigráfica inversa, relacionada a um sistema de *nappes* neoproterozoicas a cambrianas, com transporte para oeste (CAMPOS NETO, 2000).

O Planalto do Juqueriquerê, situado na cidade de Caraguatatuba, e delimitado a norte pela Falha Camburu e a sul pelo Oceano Atlântico e Planície Costeira, é sustentado por rochas paraderivadas variavelmente migmatizadas com frequentes intercalações de rochas anfibolíticas e subordinadamente rochas granitoides nebulíticas, além do Complexo Bairro dos Mariscos, caracterizado por rochas básicas e intermediárias parcialmente migmatizadas (CAMPANHA & ENS, 1996). Nesta mesma região, ocorrem diques básicos anfibolitizados, sugerindo para Campanha & Ens (1996), mais uma geração de magmatismo básico no Pré-Cambriano. Os mesmos autores descrevem uma disposição em leque das estruturas principais (xistosidade, bandamento gnáissico e foliação milonítica) em torno da Falha Camburu, associando o padrão estrutural a um sistema transpressivo (estrutura em flor positiva).

Na região do litoral norte paulista, a evolução termal dos kinzigitos e rochas anfibolíticas associadas, ortognaisses e granitoides foliados do Complexo Costeiro em São Sebastião e Cubatão, mostrou nos dados geocronológicos e geoquímicos de Dias Neto (2001), que a sequência metassedimentar foi depositada sobre crosta continental, em ambiente de bacia de retro-arco, com fonte de rochas diferenciadas do manto entre o Paleoproterozoico e o Mesoproterozoico. Rochas graníticas e granitoides são abundantes nos diferentes compartimentos do Pré-Cambriano Paulista, com tipologias e características tectônicas variadas (BISTRICHI et al.,1981). Os granitoides foram divididos em duas suítes: as sin-tectônicas (Fácies Migmatíticas e Fácies Cantareira) e pós-tectônicas (Fácies Graciosa e Fácies Granofírica).

As principais estruturas instaladas no Complexo Costeiro, no Estado de São Paulo tem *trend* ENE-WSW (CHIODI FILHO *et al.*, 1983). As rochas metamórficas em questão têm foliações (xistosidade e foliações gnáissicas) bem penetrativas, visíveis em todas as escalas (CHIODI FILHO *et*

al., 1983; SADOWSKI, 1991). Geometrias anastomosadas são mais expressivas junto a grandes zonas de cisalhamento NE-SW. Um regime transpressivo é indicado pelas estruturas em leque relacionadas às zonas de cisalhamento dúctil, associadas à evolução do Cinturão Ribeira, (SADOWSKI, 1991; EBERT *et al.*, 1991; MACHADO & ENDO, 1993; CAMPANHA & ENS, 1993; EBERT *et al.*, 1993; Ebert & HASUI, 1998; DIAS NETO *et al.*, 2006).

A área estudada neste trabalho exibe três unidades geológicas principais (DAEE & UNESP, 2009): migmatitos, aflorantes a norte e na porção central da área de estudo; suítes granitoides, expostos na parte central; e sedimentos marinhos, ao sul (figura 2.5). A unidade de migmatitos do Complexo Costeiro é composta por migmatitos diversos, incluindo estromatitos, metatexitos, diatexitos, biotita gnaisses, granitoides e granitos gnáissicos, anfibolitos e serpentinitos subordinados, localmente migmatitizados. A unidade de suítes granitoides datada no Proterozoico Superior possui corpos granitoides foliados, com contatos parcialmente discordantes, textura porfiroide frequente, composição tonalítica a granítica. Por sua vez a unidade holocênica de sedimentos marinhos possui sedimentos marinhos e lagunares indiferenciados, incluindo areias, argilas de mangues e areias litorâneas, segundo descrição anexa ao DAEE & UNESP (2009) (figura 2.5).



Figura 3.5- Mapa geológico da área de estudo.

Geologia estrutural da área

Almeida & Carneiro (1998) propõem a origem da Serra do Mar (juntamente com a Serra da Mantiqueira) através de flexuras e falhas paleógenas da Superfície de Aplainamento Japi. Dentro deste contexto, Almeida & Carneiro (1998) pontuam a possibilidade de a Serra do Mar ser resultado de abatimento do planalto por meio da Falha de Santos (figura 2.6).



Figura 3.6 - Sistema Megafalhas Cubatão. (Modificado de Sadowski 1991).

As colisões neoproterozoicas deram origem aos Sistemas Orogênicos da Mantiqueira (SADOWSKI, 1991; ALMEIDA *et al.*, 2010; HASUI, 2010). Sadowski (1991), Campos Neto (2000) e Hasui (2010) ainda propõem que estruturas e elementos formados durante a amalgamação o Gondwana controlaram processos tectônicos e sedimentares posteriores, os quais se manifestam na área de estudos e incluem:

- A reativação sul-atlantiana, com seu ativo magmatismo;
- O rifteamento, a morfogênese e a abertura do Atlântico;
- A neotectônica neógena e quaternária, ainda que pouco expressiva.

As lineações de estiramento presentes no Cinturão Ribeira têm direção NE-SW, coerentes com o Sistema Transcorrente Paraíba do Sul (SADOWSKI, 1991; HASUI, 2010). Há presença de *nappes*, as
quais se apresentam sistemas transcorrentes longitudinais (cinturões transpressivos), fletindo para ENE-WSW no leste do Estado de São Paulo (SADOWSKI, 1991; HASUI, 2010).

Sadowski (1991) denomina as feições com *trend* NE-SW, nas proximidades da área de estudo, como Sistema Megafalha Cubatão (figura 2.6) com cinemática transcorrente, possivelmente ativas desde o Pré-Cambriano. Têm-se também como feições importantes de tectônicas rúpteis: lineamentos com direção NW-SE, possivelmente ativos desde o Cenozoico até o presente, os quais sugerem tectônica compressiva na plataforma Sulamericana (SADOWSKI, 1991). Há macrofeições sinistrais rúpteis, com lineamentos de direção NE-SW em conjunto com destrais interpretadas por Sadowski (1991) como antitéticas dentro do modelo Riedel, principalmente nos trechos da Falha Cubatão. Esta zona cisalhante tem caráter destral e deformações dúcteis, explicadas por uma compressão horizontal de direção N60E a N100E, em colisão continental neoproterozoica, o que pôs em contato granulitos com rochas metamórficas de baixa profundidade (SADOWSKI, 1991).

Sobre o Sistema de Falhas Cubatão, caracterizado em várias zonas de cisalhamento miloníticas de alto ângulo e direções entre N30E a N70E, para Sadowski (1991) resta dúvida sobre o movimento ser transcorrente ou de empurrão. Acredita-se que os dois eventos ocorreram em momentos distintos, sendo o mais recente o de caráter transcorrente (SADOWSKI, 1991). As microestruturas presentes no plano de falha (dobras em bainha de seção circular em quartzito, lineação de estiramento no mergulho do cavalgamento em granito gnáissico sobre filitos e xistos, presentes na área de estudo), favorecem uma interpretação de transpressão.

O arcabouço geológico da área e a Neotectônica

A abertura e desenvolvimento do Atlântico Sul está intimamente ligada à maior parte dos lineamentos da área de estudo, devido sua proximidade com o litoral sudeste brasileiro e seus lineamentos possuírem *trend* equivalente aos das falhas transformantes do Atlântico Sul na região (SALVADOR & RICCOMINI, 1995; RAPOSO, 2017; RAPOSO, 2018). Com regime destral de tensão lenta e constante em E-W, transcorrente ao longo de falhas com direção NE a ENE, (SALVADOR & RICCOMINI, 1995; SUGIO & MARTIN, 1996; RAPOSO, 2017; RAPOSO, 2018), a atividade tectônica ativa do Atlântico Sul. Este fenômeno pode ter os diminutos e esparsos sismos como consequência. Segundo França (2008) e Freitas (1951), estes sismos ocorrem em torno de 10 à 15 anos. Os autores afirmam que é difícil precisar o intervalo entre os tremores, uma vez que faltam registros locais antes da década de 80. Os sismos atingiram 5,2 na escala Richter no ano de 2008, na cidade de São Paulo, segundo o Centro de Sismologia da USP (2013).

As baixas ocorrências e magnitudes de sismos na região são devido a pouca atividade sísmica de uma abertura oceânica em relação às subducções, principalmente quando atinge a fase de bacia oceânica estendida (SUGUIO & MARTIN, 1996). Por mais que essa tensão tenha iniciado no

Cretáceo, Suguio & Martin (1996) consideram a abertura do mesmo como um evento neotectônico. Essa consideração se dá devido à continuidade da tensão transcorrente em ENE-WSW até o Holoceno (Almeida & Carneiro, 1998; Sadowski, 1991).

A Rifte Continental do Sudeste do Brasil (RICCOMINI, 1989), também conhecida como Sistemas de Rift Continental Serra do Mar (ALMEIDA, 1976), na região nordeste da Serra do Mar, se desenvolveu a partir do Eoceno- Oligoceno (SUGUIO &MARTIN, 1978) (figura 2.7). Em seus estudos sedimentares e morfoestruturais, Salvador (1994) deduziu que a Rifte Continental do Sudeste do Brasil tem conexão com estruturas tectônicas rúpteis próximas aos estados de Rio de Janeiro e São Paulo. A partir dessa observação, Salvador & Riccomini (1995) conseguiram reconhecer três estágios de tectônicos (tabela 2.1).

Segundo os estudos estruturais e geotectônicos de Hasui (1975), Riccomini & Assumpção (1999), Magalhães (1999), dentre outros, identificaram que, em escala regional, a tensão horizontal máxima atual tem orientação entre E-W e NW-SE.

Movimentação tectônica	Campo(s) de tensão(ões)	Época geológica	Possíveis consequências
1º estágio	Compressão na direção NW- SE associada à transcorrência binária em E-W.	Pleistoceno	Retrabalhamento de depósitos coluviais, realocados com rochas do embasamento com falhas de orientação NE para ENE.
2º estágio	Extensional com direções E- W (WNW-ESE).	Início Holoceno	Feições com <i>trend</i> N-S com preenchimento sedimentar sin-tectônico.
3º estágio	Compressivo de direção E-W.	Durante Holoceno	Famílias de juntas conjugadas de direções ENE e WNW, seccionando depósitos sedimentares.

Tabela 3.1 – Estágios de movimentação tectônica do Rifte Continental do Sudeste do Brasil, segundo Salvador & Riccomini (1995)



Figura 3.7 - Estrutura tectônica do sudeste do Brasil mostrando o paralelismo entre alguns dos alinhamentos estruturais no continente e na plataforma continental adjacente. (Suguio & Martin 1996)

3.1.3 Contexto Climático

No sudeste do Brasil, os ventos que determinam as condições de climáticas e tempo são: sistema de correntes perturbadas de Oeste (IT – linhas de instabilidade tropicais), sistema de correntes perturbadas de Sul (FP – Frente Polar) e sistema de correntes perturbadas de Leste (EW – ondas de E) ao norte do Rio de Janeiro como representado na figura 2.8 (NIMER, 1989). As frentes frias (mais frequentes no outono e inverno) movem as massas de ar frio dos polos para o Equador, alterando os ventos da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) de N-NE para SE-S-SW, o que ocasiona, na sua passagem, quedas e maior variabilidade na temperatura e na pressão atmosférica, além de chuvas no litoral sudeste brasileiro (SIGAM, 2020). Por sua vez, a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) têm contínua faixa de nebulosidade da Amazônia até o litoral sudeste brasileiro, podendo causar chuvas intensas e duradouras, principalmente no período de verão (SIGAM, 2020).

O litoral norte de São Paulo tem predominância de clima tropical, com temperaturas brandas oscilando anualmente entre 18°C e 24°C (FUNDAÇÃO COPPETEC, 2006). O clima apresenta variações seguindo o sistema orográfico da região (controlado pela Serra do Mar), em conjunto com as principais correntes atmosféricas de vertente atlântica, com influência da Frente Polar.



Figura 3.8 - Circulação Atmosférica no Sudeste Brasileiro. (Modificada de Nimer 1989)

Como é possível observar na figura 2.9, a variação das temperaturas ao longo do ano e a pluviometria nas cidades constituintes da área de estudo são relativamente coincidentes. Têm julho como o mês mais seco (40 mm) e com temperaturas amenas, cerca de 15°C, e em janeiro se concentra as maiores pluviosidades cerca de 240 mm e temperaturas mais elevadas, entorno dos 30°C (CLIMATE DATA, 2020).



Figura 3.9 - Gráfico pluviométrico com média anual das cidades de Caraguatatuba, Natividade da Serra e Paraibuna. (CLIMATE DATA 2020).

O clima tropical da cidade de Caraguatatuba tem forte influência dos fenômenos atmosféricos regionais. A ASAS é responsável por manter na maior parte do ano ventos de sentido N-NE, os quais são submetidos à alta pressão atmosférica no inverno, com a ação das frentes frias e o estabelecimento da ZCAS (SIGAM, 2020).

Os invernos em Caraguatatuba são menos secos que os demais municípios da área de estudo (figura 2.9), bem como sua umidade relativa do ar são característica de regiões litorâneas (acima de 80%) não apresentando sazonalidade específica ao longo do ano (SIGAM, 2020, CLIMATE DATA, 2020). Tem as temperaturas atmosféricas mais altas entre os meses de dezembro a fevereiro, enquanto as temperaturas mais baixas e variáveis foram registradas somente no período de inverno, tendo junho e julho os meses mais frios, devido à passagem das frentes frias (SIGAM, 2020).

A bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, ao longo da qual se localiza os municípios de Natividade da Serra e Paraibuna, é caracterizada por clima subtropical quente, com as mais altas precipitações nos pontos mais altos da Serra do Mar, chegando a valores de 2500mm/ano (MARENGO & ALVES, 2005). O período do verão chega a acumular entre 200 e 250mm/mês, tendo máxima precipitação de dezembro a fevereiro. Entre maio e julho, o período mais seco, a precipitação acumulada é inferior a 50mm/mês (CLIMATE DATA, 2020; MARENGO & ALVES, 2005).

Portanto, o clima da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul é caracterizado por dois períodos distintos ao longo do ano. Uma estação seca de junho a agosto, de condições tropicais continentais, com baixa umidade relativa do ar. E outra estação com alto índice de precipitação e umidade relativa do ar, no período de outubro a março. Nos demais meses são definidos como período de transição das estações secas para úmidas (setembro e outubro) e úmida para seca (abril e maio) (CLIMATE DATA, 2020; ANA, 2011).

3.1.4 Contexto hidrológico e hidrogeológico

As redes hidrográficas da área de estudo pertencem à Unidade Hidrológica Paraíba do Sul, ao norte, nas cidades de Natividade da Serra e Paraibuna, e à Unidade Hidrológica Litorânea São Paulo-Rio de Janeiro, ao sul, na cidade de Caraguatatuba, ambas incluídas na Região Hidrográfica Atlântico Sudeste, com precipitação média anual de 1401 mm, vazão média anual de 3167 m²/s e disponibilidade hídrica anual de 1145 m³/s (ANA, 2015) (figura 2.10). A Bacia do Rio Paraíba do Sul, no Estado de São Paulo abrange cerca de 75 Km² da área de estudos. O rio é resultante da confluência dos rios Paraibuna e Paraitinga, com nascentes no estado à 1.800 m de altitude. A bacia posteriormente percorre o Estado de Minas Gerais e deságua no Oceano Atlântico, em São João da Barra (FUNDAÇÃO COPPETEC, 2006), agregando as sub-bacias dos rios já citados e Lourenço Velho, afluentes da Represa Paraibuna na região (FUNDAÇÃO COPPETEC, 2006). Segundo a CETESB (2016), essas sub-bacias são denominadas em conjunto como Cabeceiras A (figura 2.10).



Figura 3.10 – Mapa Hidrográfico da área de estudo.

No trecho paulista da Bacia do Rio Paraíba do Sul localizado junto à área de estudos, ocorre o Sistema de Aquíferos Cristalinos é (FUNDAÇÃO COPPETEC, 2006). Trata-se de terrenos ígneos metamórficos de idade neoproterozoica, que apresentam localmente com condições aquíferas, com poucos poços tubulares, geralmente rasos, com grande nível de rebaixamento e alocados ao longo dos lineamentos tectônicos (Consórcio ICF KAISER-LOGOS, 1999 *apud* FUNDAÇÃO COPPETEC, 2006).

A Bacia Litorânea São Paulo- Rio de Janeiro, na região de estudos, abarca as sub-bacias dos rios Juqueriquerê e Santo Antonio, ocupando respectivamente cerca de 108Km² e 19Km², da área. A maioria dos canais de drenagem da bacia nasce de altas altitudes e declividades, principalmente do maciço da Serra do Mar e tem sua foz em breves planícies sedimentares junto ao Oceano Atlântico, apesar da bacia apresentar alta disponibilidade hídrica (CBH-LN, 2017).

Além do Sistema de Aquíferos Cristalinos, a Bacia Litorânea São Paulo- Rio de Janeiro apresenta um pequeno trecho de aquífero litorâneo, ao longo da costa de Caraguatatuba (CBH-LN, 2017). Trata-se de um aquífero sedimentar, permeável com porosidade primária ou intergranular (CBH-LN, 2017) (figura 2.10).

3.2 FLUXO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM MEIOS FRATURADOS

O estudo para a quantificação de reservas de água em aquíferos fraturados no Brasil foi um dos primeiros enfoques para meios fraturados (VARGAS JR. & BARRETO, 2003). Seguindo esta linha, Hirata & Ferreira (2001) propuseram a classificação de Sistemas de Aquíferos Cristalinos e suas respectivas potencialidades na produção de poços em aquíferos fraturados. Vargas Jr. & Barreto (2003) estudaram a potencialidade de poços através da caracterização de fraturas e aspectos relevantes de mecânicas das rochas. Neves (2005) ressaltou a importância desses estudos para tópicos como controle da migração de contaminantes e poluentes, resolução de problemas geotécnicos, construção de túneis e cavidades subterrâneas, estimativa de fontes geotermais naturais e reservatórios de gás e óleo. Fernandes (2008), por sua vez, estudou a produtividade de poços, por fatores morfológicos e geológicos.

Aquíferos granulares formados por sedimentos ou rochas sedimentares possuem espaços entre os grãos da sua constituição (figura 2.11 a). Por sua vez, aquíferos fraturados, que também podem ser denominados aquíferos fissurais, têm fluxo de água por meio de porosidade secundária e, costumeiramente, surgem em rochas cristalinas (ígneas e metamórficas) e carbonáticas, sem porosidade primária (e.g., COOK, 2003; VARGAS Jr. & BARRETO, 2003; DAEE, 2005; SÁ *et al.*, 2008; FERNANDES *et al.*, 2008). Fala-se de porosidade secundária neste tipo de aquífero, uma vez que esta se forma posteriormente a formação da rocha, como em processos de fraturamento (figura 2.11 b,c) (DAEE, 2005; SÁ *et al.*, 2008; FERNANDES *et al.*, 2008; FERNANDES *et al.*, 2008; OAEE, 2005; SÁ *et al.*, 2008; FERNANDES *et al.*, 2008; Galcários e mármores) (figura 2.11 c) as fraturas e outras descontinuidades podem ser abertas e alargadas por dissolução do material carbonático que as compõem, ocasionada pela passagem de água, podendo levar a formação de cavidades.



Figura 3.11 – Exemplos de porosidade em rochas: **a**) aquífero granular, **b**) aquífero fraturado em rocha cristalina e **c**) aquífero fraturado em rocha carbonática. (Perrota *et al.* 2005).

O fluxo e acumulação de água em terrenos cristalinos, consensualmente, são controlados por descontinuidades preexistentes no maciço rochoso, geralmente configuradas em estruturas rúpteis associadas ao desenvolvimento geotectônico (figura 2.12) (SIQUEIRA, 1967; COSTA, 1965; COSTA & SILVA, 1997, COOK, 2003; VARGAS Jr. & BARRETO, 2003; DAEE, 2005; FERNANDES *et al.*, 2008; SÁ *et al.*, 2008; CARVALHO *et al.*, 2015). Parte das estruturas estar abertas devido a esforços tectônicos posteriores e/ou um campo de tensões atual favorável.



Figura 3.12 – Estruturas que podem controlar a ocorrência de água subterrânea em rochas cristalinas: (a) fraturas; (b) estruturas associadas a falhas e zonas de falhas (ou zonas de cisalhamento); (c) contatos geológicos;
(d) superfícies de foliação. A escala preferencialmente visualizada é macroscópica. (Sá *et al.* 2008).

Os contatos litológicos também são potenciais estruturas de controle na ocorrência de água subterrânea, devido à possibilidade de proverem espaços abertos entre as rochas, ocasionados por contrastes mecânicos de resistência ao intemperismo junto a acamamento, planos de foliação e zonas miloníticas, entre outros (COOK, 2003; SÁ *et al.*, 2008). As foliações e zonas de cisalhamento (miloníticas ou não), são distribuídas ao longo de corpos geológicos. Por mais que possam exibir concentrações de fraturas, zonas de cisalhamento são estruturas dúcteis e originalmente fechadas, porém podem ser abertas por processos de reativação, intemperismo e descompressão, próximos à superfície da Terra (COOK, 2003; DAEE, 2005; FERNANDES *et al.*, 2008; SÁ *et al.*, 2008).

Fraturas constituem os elementos tectônicos rúpteis mais importantes para circulação de águas subterrâneas. Entretanto, com o aumento das tensões geológicas em profundidade, fraturas abertas tendem a se fechar (figura 2.13), diminuindo a condutividade hidráulica (Sá *et al.*, 2008).



Figura 3.13 – Decréscimo na produção média de poços segundo a profundidade média em rochas cristalinas. a) States-ville, Carolina do Norte – valores em parênteses são m³/h por metro de poço abaixo do nível estático. b) Estado da Paraíba e do Rio Grande do Norte. (Sá *et al.* 2008).

Fraturas superficiais podem não ter potencial para compor aquíferos fraturados, se elas tiverem mergulho sub-horizontal ou não tiverem interconexão com outras, sobrepõe a esses fatores ao fato dessas fraturas, mesmo abertas, não terem volume suficiente para compor em um aquífero fraturado (DAEE, 2005; FERNANDES *et al.*,2008; CARVALHO *et al.*, 2015).

Diz-se que fraturas abertas têm fluxo e acúmulo de água de até 100 m de profundidade, porém, em drenagem de águas de galerias mineiras profundas há histórico de profundidades até 1 a 3 quilômetros (BERTHIER, 1982, *apud* SÁ *et al.*, 2008). Para a identificação de fraturas abertas, a abordagem clássica traz uma análise crítica face à evolução tectônica regional, a geometria do fraturamento e as condições de recarga. Somado a isto, a avaliação indireta por controle estrutural pode ter interferências da denudação e intemperismo. Outro ponto a ser levado em conta, em análises estruturais, é a complexidade geocronológica das fraturas presentes nos terrenos cristalinos, por isso a importância de conhecer os principais aspectos da evolução tectônica da região de estudos (SÁ *et al.*, 2008).

A cinemática das feições estruturais também é importante, assim como, a orientação e tipos de fraturas (juntas de tração, juntas estilolíticas e fraturas de cisalhamento) em relação ao regime atuante de tensão (SÁ *et al.*, 2008).

Algumas propriedades das fraturas podem ser obtidas diretamente por meio de afloramentos e análise de testemunhos de sondagem orientados (VARGAS Jr. & BARRETO, 2003). Porém, deve-se levar em consideração possíveis influências da liberação de estresse que o maciço rochoso foi submetido (SÁ *et al.*, 2008; CARVALHO *et al.*, 2015; MARTINS, 2016). As reativações neotectônicas e intemperismo podem contribuir para a abertura de estruturas dúcteis, em níveis mais

rasos. A mudança de regime tectônico pode interferir no comportamento de fraturas e outras estruturas como ilustrado na figura 2.14 (SÁ *et al.*, 2008; CARVALHO *et al.*, 2015).



Figura 3.14 – Intemperismo e abertura de fraturas e outros tipos de descontinuidades, em profundidades rasas. (a) Isoladamente, os fatores descompressão e intemperismo tendem a abrir planos de descontinuidades com orientações variadas. (b) Na presença de tensões neotectônicas, as fraturas em baixo ângulo com Z/s_1 serão preferencialmente abertas. Na figura a espessura do traço das fraturas é proporcional ao seu comportamento de abertura. (Sá *et al.* 2008).

A cinemática das feições estruturais também é importante, sendo assim, a orientação e tipos de fraturas (juntas de tração, juntas estilolíticas e fraturas de cisalhamento) em relação ao regime atuante de tensão. No regime de cisalhamento simples (figura 2.15 a) os eixos de tensão (σ_1 , σ_2 , σ_3) coincidem com os eixos de *strain* (X, Y, Z) gerando sistemas simétricos de fraturas (FEITOSA *et al.*, 2008).

Por sua vez, o regime de cisalhamento puro ou geral (figura 2.15 c, b), por vias técnicas, tratase de um cisalhamento simples acrescido de componentes de dilatação ou contração. Ao longo de toda a evolução geológica da estrutura, seus eixos de tensões são rotacionados em relação ao eixo de *strain* (SÁ *et al.*, 2008). A partir do cisalhamento puro ou geral é gerado um sistema assimétrico de fraturas, com predominância do movimento da falha principal (destral ou sinistral) e presença de fraturamentos de porte menor (figura 2.15 c, b) como juntas de distensão (T) e fraturas de cisalhamento (R, R' e P) ambas relacionadas à falha principal. Sendo as fraturas antitéticas (R') contrárias ao movimento principal e as sintéticas (R e P) a favor da movimentação da falha principal. O cisalhamento puro ainda pode apresentar dilatações ou contrações ocasionais nas terminações de falhas, característico em falhas com rejeito oblíquo e estruturas em flor (FEITOSA *et al.*, 2008) (figura 2.15 c, b).



Figura 3.15 – Regimes de fluxo e estruturas frágeis resultantes. (Sá et al. 2008).

Os eixos de tensão em escala regional podem não corresponder aos eixos de tensão local, uma vez que a expressão regional das tensões cisalhantes é resultado da média de esforços em uma escala maior que a regional. A região de estudo, devido os altos índices erosivos e de neotectônica atuante, não possui um registro claro e fidedigno dos seus eixos de tensão local, além de se encontrar em área de transição de um regime tectônico transcorrente para compressivo (SALVADOR & RICCOMINI, 1995).

3.2.1 Mapeamento de lineamentos

Os lineamentos podem ser identificados em fotografias aéreas ou imagens de sensoriamento remoto pelas seguintes feições: linhas de diferentes tonalidades no solo, alinhamento da vegetação, vales retilíneos encaixados e cumes alinhados (BRADBURY & MULDOON, 1992). Mais precisamente, tais feições geralmente refletem a geologia de subsuperfície, e podem denotar a presença de falhas ou grandes fraturas (BRADBURY & MULDOON, 1992; DAEE, 2005; FERNANDES *et al.*, 2008). Segundo Bradbury & Muldoon (1992), imagens aéreas e de sensoriamento remoto podem ser aproveitadas para determinar orientação e densidade de lineamentos, em escala regional, consequentemente auxiliando a identificação de zonas de fratura e possíveis zonas de recarga de aquíferos (DAEE, 2005; FERNANDES *et al.*, 2008; SÁ *et al.*, 2008).

Este tipo de análise tem cunho orientativo e complementar ao estudo da tectônica rúptil, na compreensão de aquíferos fraturados. Para tal, há propostas de modelos da ocorrência de águas subterrâneas, com o objetivo de auxiliar nas estratégias de prospecção e no avanço no tema. Sá *et al.* (2008) cita os modelos Riacho-Fenda, Calha Elúvio-Aluvionar e Bolsões ou Câmaras de Intemperismo.

O modelo Riacho-Fenda pressupõe que os trechos retilíneos de riachos coincidem com zonas fraturadas (local preferencial de armazenamento das águas), e aluviões que aí se desenvolvem podem contribuir significativamente na acumulação de água (SIQUEIRA, 1967). Nas imagens de satélite, por processamento digital, para este modelo são discriminados fotolineamentos, aluviões e coberturas provendo zonas de recarga (figura 2.15 e 2.16) (SIQUEIRA, 1967; Sá *et al.* 2008).



Figura 3.16 – Modelo Riacho-Fenda. (Sá et al. 2008).

No exemplo de aplicação do modelo Riacho-Fenda (figura 2.16 a), as fraturas são inferidas a partir de trechos retilíneos e "" da drenagem. Faz-se a aferição adjacente à drenagem se há fraturamento com as mesmas tendências de direção da fotointerpretação. Diferentemente da figura 2.16 (b), na figura 2.16 (c) os trechos retilíneos são controlados pela foliação e o lineamento talvez não represente uma fratura aberta.



Figura 3.17 – Modelo Riacho-Fenda ilustrado na visão de mapa ou fotografia aérea (a) e em afloramentos (b, c). (Sá *et al.* 2008)

O modelo Calha Elúvio-Aluvionar foi primeiramente descrito para aspectos básicos de favorabilidade de recarga por Avelino da Silva (2000) e Nascimento da Silva *et al.* (2001), porém, o modelo já havia sido antes proposto por McFarlane (1992), Olofsson (1994) e Costa & Silva (1997). Segundo os propositores do modelo, os canais de drenagem podem ocorrer em calhas preenchidas por antigos aluviões e regolitos, não evidenciando controle por fraturas, mas sim por foliação do substrato (figura 2.17). Sua identificação por sensoriamento remoto pode ser feita através de calhas orientadas preenchidas por sedimentos em meio ao substrato aflorante.



Figura 3.18 – Modelo Calha Elúvio-Aluvionar. (Sá et al. 2008).

Relacionado com os processos de intemperismo diferencial e acentuado em subsuperfície, o modelo Bolsões ou Câmara de Intemperismo é controlado por fraturas, *fabric*, litologias e tensões

tectônicas recentes (figura 2.18). Há um aumento da permo-porosidade na zona intemperizada, que pode se conectar com outras adjacentes, por meio de rede de fraturas e outras descontinuidades. Em fotografias aéreas e imagens de satélite não é possível o modelo ser identificado em superfície, identifica-se somente zonas intemperizadas rasas (SÁ *et al.*, 2008).



Figura 3.19 – Modelo Bolsões ou Câmaras de Intemperismo. (Sá et al. 2008).

3.2.2 Estudo da potencialidade de aquíferos fraturados e parâmetros hidrogeológicos

Não há um único método amplamente aceito para prever o comportamento hidráulico em meios fraturados (VARGAS Jr. & BARRETO, 2003; DAEE, 2005; FERNANDES *et al.*, 2007; SÁ *et al.*, 2008; CARVALHO *et al.*, 2015). DAEE (2005) e Fernandes *et al.* (2007) constituem alguns dos poucos estudos do litoral Norte de São Paulo, com o intuito de compreender o fluxo de águas nos sistemas fraturados ocorrentes na região.

A produtividade dos poços pode ser medida pela vazão ou capacidade específica, e para verificar tal produtividade constituem fatores relevantes: tipo de rocha; espessura do manto intemperizado e a densidade e interseção de lineamentos que, em geral, tem relação direta com a densidade e interseção das fraturas (DAEE, 2005).

A vazão é o volume de água retirada do poço em um dado tempo, tendo como unidade de medida m³/h (VARGAS Jr. & BARRETO, 2003). O valor da vazão é dependente, principalmente, da bomba utilizada, do potencial do aquífero, da completação, e desenvolvimento do poço (VARGAS Jr. & BARRETO, 2003).

A capacidade específica corresponde à vazão retirada por metro rebaixado do nível d'água do poço (m³/h/m), e se aproxima mais da realidade do potencial do aquífero, sendo este parâmetro preferido em relação às análises de potenciais de poços supracitadas (DAEE, 2005). Em vias práticas, a capacidade específica é a relação entre o rebaixamento e o nível estático. Se acaso essa relação for de

50%, o rebaixamento dentro do poço será o dobro do rebaixamento no aquífero em torno do poço, devido a esse fator, deve- se levar em consideração a eficiência do poço para o diagnóstico da capacidade específica do aquífero (ABAS, 2001).

Os sistemas fraturados a leste do Estado de São Paulo foram avaliados segundo os conjuntos litológicos, espessura da cobertura inconsolidada/manto intemperizado, lineamentos (fraturas) e blocos geológicos delimitados por contatos litológicos, zonas de cisalhamento. Na área de estudo, os fatores considerados para a avaliação da produtividade de poços estão listados na tabela 2.2 (FERNANDES *et al.*, 2007).

Tabela 3.2 - Fatores considerados na avaliação da variação da produção dos poços e subdivisão destes fatores em classes. (FERNANDES *et al.* 2007)

Fator considerado	Classes
Conjuntos litológicos	- Granitos neoproterozoicos
	– Rochas Metamórficas de médio a alto grau
	- Rochas Metamórficas de baixo a médio grau
	- Rochas carbonáticas metamorfisadas ou não (calcários, mármores, marga)
	– Basalto
	- Diabásio
Espessura de material	- Espesso (> 30 m)
inconsolidado	– De espessura intermediária (entre 5 e 30 m)
	– Pouco espesso ou ausente (< 5 m)
Lineamentos	Densidade de lineamentos por direção (em metros) por células quadradas de 5 km de lado:
(fraturas)	- < 4000
	– entre 4000 e 8000
	– entre 8000 e 12000
	– entre 12000 e 16000
	- > 16000
	Densidade de intersecção de lineamentos (combinações possíveis entre as diversas direções) em número de intersecções por km ² .
	- < 0,05
	– entre 0,05 e 0,1
	– entre 0,1 e 0,15
	– entre 0,15 e 0,25
	->0,25.
Blocos geológicos	Blocos definidos pelo agrupamento ou subdivisão dos terrenos geológicos presentes no Mapa Geológico do Estado de São Paulo. Os blocos são delimitados por zonas de cisalhamento dúctil-rúpteis ou por lineamentos, que devem corresponder a estruturas rúpteis de dimensões.

A curva de distribuição acumulada de capacidade específica relaciona a influência do tipo litológico com a capacidade específica do fluxo hídrico (figura 2.19) (DAEE, 2005). Os gnaissesrochas metamórficas pré-cambrianas de alto e médio grau- muito recorrente no Complexo Costeiro (FERNANDES *et al.*, 2007), têm maior capacidade de produção de poços em relação aos granitos (figura 2.19), tendo elas respectivamente medianas de 0,09 m³/h/m e 0,06m³/h/m. A produção de poços torna-se mais clara quando relacionada com os contatos litológicos e ocorrência de zonas de cisalhamento (DAEE, 2005; FERNANDES *et al.*, 2007).



Figura 3.20- Curvas de distribuição acumulada segundo as classes de litologias que constituem os aquíferos fraturados do Estado de São Paulo. *Fonte:* (DAEE 2005).

Quanto ao fator espessura do manto inconsolidado, a curva de distribuição acumulada de capacidade específica não apresentou influência na produção de poços controlada por variações neste parâmetro (DAEE, 2005; FERNADES *et al.*, 2007) (figura 2.20). Dentre os 1202 poços em aquíferos pré-cambrianos e pré-cambrianos cársticos, há uma baixa concentração de poços (figura 2.20 e 2.21) em áreas com mantos inconsolidados pouco espessos ou nulos em rochas pré-cambrianas do litoral norte de São Paulo, o que deixou os resultados inconclusivos para esta análise (DAEE, 2005; FERNANDES *et al.*, 2007).



Figura 3.21 - Curvas de distribuição acumulada segundo as classes de espessura de manto inconsolidado que ocorrem sobre os aquíferos fraturados pré-cambrianos do Estado de São Paulo e sua distribuição em rochas pré-cambrianas. (Modificada de Fernandes *et al.* 2007).

Singhal & Gupta (1999) sugerem alguns parâmetros simples para descrever a densidade de lineamentos: (1) número de lineamentos por unidade de área; (2) o comprimento total de lineamentos por unidade de área; e (3) o número de interseções de lineamentos por área de unidade. Compilam-se os parâmetros dos itens 1, 2 e 3 resultando em um mapa de densidade de interseção, o qual pode refletir a densidade de fraturas em escala regional.

Somente nas áreas de alta densidade de lineamentos na direção EW e interseção dos lineamentos nas direções EW e NS, há maior ocorrência de poços. Esses dados são conclusivos somente entre as cidades de Campinas e São Paulo, devido à concentração considerável de poços na região. Para as demais áreas do Estado de São Paulo os resultados são apenas sugestivos devido à ocorrência muito esparsa de poços. São observadas cinco direções principais de lineamentos em rochas pré-cambrianas a leste do Estado de São Paulo, como exposto na tabela 2.3 (DAEE, 2005; FERNANDES *et al.*, 2007).



Figura 3.22 - Localização das áreas de afloramento dos aquíferos fraturados no Estado de São Paulo e distribuição dos poços que exploram os aquíferos Pré-Cambriano e Serra Geral. (Modificada de DAEE 2005).

Tabela 3.3 - Direções	preferenciais de lineamentos en	n rochas pré-cambrianas.	(PERROTA et al., 2005)
-----------------------	---------------------------------	--------------------------	------------------------

Grupo de rochas	Intervalo	Intervalo de direções preferenciais em ordem decrescente			
		(esquerda para a direita)			
Rochas pré-cambrianas	N5W-10E	N85E-75W	N30-65W	N60-75E	N25-35E

Seguindo as curvas de distribuição acumulada por tipo litológico (figura 2.19), o DAEE (2005) confeccionou um mapa de 4 classes de potencial hidrogeológico (figura 2.23). Desta forma, o mapa final obtido distingue áreas com vazões prováveis, nos intervalos de 20 a 80% da distribuição, entre 1 e 6 m³/h (classe 1), 1 e 12 m³/h (classe 2), 3 e 23 m³/h (classe 3) e 7 e 100 m³/h (classe 4). Segundo a figura 2.23, o litoral norte do Estado São Paulo se insere na classe 3 com intervalos de vazão correspondente de 3 a $23m^3/h$.



Figura 3.23 – (A) Mapa de classes de densidades de lineamentos EW para as rochas pré-cambrianas e respectivas distribuições acumuladas. (B) Mapa de classes de densidade de intersecções de lineamentos EW e NS e respectivas distribuições acumuladas. (Modificada de Fernandes *et al.* 2007).



Figura 3.24 - Mapa de classes de potencial hidrogeológico para os aquíferos fraturados do Estado de São Paulo e gráfico de distribuições acumuladas correspondentes. (Modificada de Perrota *et al.* 2005).

Trabalho de Conclusão de Curso, n. 374 2020

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 LITOLOGIA DA ÁREA

Nos dados de sondagem cedidos pela empresa Queiroz Galvão, foram planilhados 303 furos com indicação de unidades litológicas. Dentre essas unidades litológicas, foram encontradas onze: basalto, biotita granito, diabásio, gnaisse, gnaisse facoidal, granito, granito fino, granito foliado, granito-gnaisse, migmatito e quartzito.

O Mapa Geológico do Estado de São Paulo, escala 1:250.000 (DAEE & UNESP, 2009), teve suas unidades litológicas mais condizentes com as informações mais rasas dos perfis de sondagem, logo foi selecionado para apoiar os estudos. Mesmo não apresentando litologias aflorantes como estromatitos, metatexitos, diatexitos, granitoides, anfibolitos e serpentinitos subordinados, optou-se por manter as litologias do mapa original, uma vez que as sondagens foram obtidas preferencialmente ao longo da rodovia Tamoios e a região de estudos abrange uma área muito maior (figuras 4.1 e 4.2).



Figura 4.1 - Mapa geológico da área de estudo com dados litológicos de sondagens fornecidas pela empresa Queiroz Galvão.



Figura 4.2 – Zoom das áreas demarcadas no Mapa geológico da área de estudo com dados litológicos de sondagens fornecidas pela empresa Queiroz Galvão. A) Área A, B) Área B, C) Área C, D) Área D, E) Área E,
F) Área F, G) Área G, H) Área H, I) Área I, J) Área J.

Deve-se ressaltar que as descrições litológicas de testemunhos de sondagem foram macroscópicas, motivo pelo qual optou-se por adotar neste trabalho o mapa.

4.2 ANÁLISE CLASSIFICATÓRIA DOS LINEAMENTOS PARA POTENCIALIDADE HÍDRICA E PARA DENSIDADE

Os lineamentos nas escalas 1:10.000, 1:30.000 e 1:50.000 foram traçados e tratados estatisticamente, de maneira independente para cada escala e por diferentes tipos litológicos.

O peso para os comprimentos seguiu a premissa de dar os maiores pesos aos lineamentos com os maiores comprimentos, uma vez que um lineamento com maior comprimento têm maiores possibilidades de comportar os maiores fluxos hídricos. A densidade teve seus pesos atribuídos segundo a sua distribuição da frequência das direções que os diagramas de rosas apresentaram. Atribuídos os pesos para a direção e o comprimento, realizou-se em um mapeamento classificatório segundo a compilação destas duas características dos lineamentos.

Além disso, a classificação da densidade de lineamentos foi levantada e o mapa resultante foi gerado pelo Método Kernel, com os raios de pesquisa indicados na tabela 3.2.

4.2.1 Escala 1: 50.000

Na escala 1:50.000 foram traçados 276 lineamentos por meio de análise em *ArcGis 10.5* na área total (figuras 4.3 e 4.4). Porém essa quantidade total de lineamentos se altera quando computados por unidade litológica, com 228, 73 e 23 lineamentos, respectivamente, para os migmatitos, suítes granitoides e sedimentos marinhos, totalizando 324 lineamentos. Isso ocorre, pois um mesmo lineamento, quando em contato litológico, é contabilizado mais de uma vez, para cada unidade geológica que se encontra.

Os comprimentos dos lineamentos variam entre 166 m e 2754 m, aproximadamente. Os lineamentos inferiores a 300 m, entre 300 e 600 m e superiores a 600 m foram distribuídos em pesos 1, 2 e 3 respectivamente. A distribuição desses pesos na área pode ser observada na figura 4.3.

Para as direções foram atribuídos pesos 1, 2 e 3 nos grupos de azimutes entre 330° e 30° , azimutes entre 30° e 90° e azimute entre 270° e 330° , respectivamente (figura 4.4).

O valor numérico dos pesos para comprimento e direção, seguiu a proporção da ocorrência dos seus respectivos grupos na área, o que pode ser observado nos diagramas de rosetas das figuras 4.5 a 4.6.



Figura 4.3 - Mapa Comprimento dos Lineamentos e seus respectivos pesos. Escala 1:50.000. (Modificado de DAEE & UNESP 2009).



Figura 4.4 - Mapa Direção dos Lineamentos e seus respectivos pesos. Escala 1:50.000. (Modificado de DAEE & UNESP 2009).

Por sua vez, a unidade litológica migmatitos (com cerca de 75% dos lineamentos da área de estudo) e a suíte granitoide (20% da área); apresentaram acervos de lineamentos similares à área total (figuras 4.5 b, c e 4.6 b, c). Por outro lado, a unidade de sedimentos marinhos, com cerca de 3% dos lineamentos da área, não apresentou faixas bem definidas e principalmente representativas de frequência de comprimento (figura 4.5 d) e de direção (figura 4.6 d).



Figura 4.5 - Diagrama de rosas do comprimento dos lineamentos. Escala 1: 50.000. a) Lineamentos da área total b) Lineamentos da unidade migmatitos c) Lineamentos da unidade de suítes granitoides d) Lineamentos da unidade de sedimentos marinhos.



Figura 4.6 - Diagrama de rosas da frequência das direções dos lineamentos. Escala 1: 50.000. a) Lineamentos da área total b) Lineamentos da unidade migmatitos c) Lineamentos da unidade de suítes granitoides d) Lineamentos da unidade de sedimentos marinhos.

A compilação dos pesos de direção e comprimento dos lineamentos na escala 1:50.000 permitiu obter a Matriz de Potencial Hídrico dos Lineamentos (tabela 4.1). A distribuição espacial classificatória dos lineamentos segundo esta matriz, pode ser observada nas figuras 4.7 e 4.8. Neste mapa, os lineamentos foram classificados majoritariamente como Potencial Hídrico Alto a Muito Alto (pesos 4 e 5). Os lineamentos classificados como Potencial Hídrico Irrelevante a Baixo (pesos 1 e 2), não apresentaram uma localização preferencial na área de estudos e podem ser observados nas proximidades dos pontos A, B, C, D, E e F, nas figuras 4.7 e 4.8.

Escala: 1:50.000		Comprimento dos Lineamentos (m)			
		0-300	300-600	>600	
Direção dos Lineamentos	Azimutes entre 330°-30°	1	2	3	
	Azimutes entre 30°-90°	2	3	4	
	Azimutes entre 270° – 330°	3	4	5	

Tabela 4.1 - Matriz do Potencial Hídrico dos Lineamentos. Escala 1:50.000



Figura 4.7 – Mapa do Potencial Hídrico dos Lineamentos. Escala 1:50.000. (Modificado de DAEE & UNESP 2009).



Figura 4.8 - Zoom dos pontos demarcados no Mapa do Potencial Hídrico dos Lineamentos. Escala 1:50.000. **a**) Ponto A **b**) Ponto B **c**) Ponto C **d**) Ponto D **e**) Ponto E **f**) Ponto F.

Para a classificação de densidade de lineamentos, o Método Kernel foi aplicado com 300 m de raio de pesquisa e seis classes nos dados de saída, tendo como base a experimentação visual e apoio de trabalhos anteriores e similares, como o de Krisp & Špatenková (2010) (figura 4.9).

Uma vez que há baixo refino das zonas de alta densidade de lineamentos, consideraram-se somente as zonas vermelhas e laranja mais intensa como alta densidade. Essas zonas têm maior ocorrência na proximidade de lineamentos de direções NW-SE e NE-SW.

A concentração dessas zonas de alta densidade ocorre no centro da área, na porção oeste da nova rodovia, nos migmatitos e suítes granitoides com lineamentos de comprimento entre 307 e 2023 m e entre 215 e 1417 m, e direções NE-SW e NW-SE, respectivamente (figura 4.9). De maneira pontual, ocorrem também zonas de alta densidade ao sudeste e nordeste da nova rodovia Tamoios (pontos J e H da figura 4.9) e proximidades da Represa Paraibuna (pontos G, F, E da figura 4.9). Na porção sudeste da nova rodovia Tamoios o lineamento que constitui a zona de alta densidade, tem direção NE-SW, e, a leste da rodovia, no mesmo contexto, dois lineamentos com 389 e 595 m de comprimento têm direção NW-SE (figura 4.9).

Por serem pontuais nessa escala, os lineamentos de direção N-S (sudoeste da área de estudo pontos J e I) e E-W (sudeste da área de estudo, no migmatito, próximo à extremidade do corpo de suíte granitoide, pontos H e J) estão situados nas zonas de médias densidades



Figura 4.9 – Mapa de Densidade de Lineamentos. Escala 1: 50.000. (Modificado de DAEE & UNESP 2009).

4.2.2 Escala 1: 30.000

Foram traçados 740 lineamentos na escala 1:30.000 para a área total de estudos. Devido a distribuição de um mesmo lineamento ocorrer sobre diferentes unidades litoestratigráficas, esse é contado mais de uma vez em unidades geológicas diferentes. Para a escala 1:30.000, foram contabilizados 588 lineamentos nos migmatitos, 197 lineamentos nas suítes granitoides e 69 lineamentos nos sedimentos marinhos.

Os lineamentos na escala 1:30.000 apresentaram comprimentos de valores entre 120 e 3305 m, aproximadamente. Seus comprimentos foram distribuídos em grupos abaixo de 200 m, entre 200 e 400 m e superiores a 400 m, respectivamente com pesos 1, 2 e 3. A distribuição espacial desses grupos de pesos por comprimento é observada nas figuras 4.10 e 4.11. Os pontos A, C e D mostram as poucas ocorrências de lineamentos de comprimento abaixo de 200 m (peso 1).



Figura 4.10 - Mapa de Comprimento dos Lineamentos e seus respectivos pesos. Escala 1:30.000. (Modificado de DAEE & UNESP 2009).



Figura 4.11 - Zoom dos pontos demarcados no Mapa Comprimento dos Lineamentos e seus respectivos pesos. Escala 1:30.000. a) Ponto A b) Ponto B c) Ponto C d) Ponto D.

Os pesos das direções foram atribuídos segundo a representatividade de cada faixa de azimute, observando o diagrama de rosas de frequência de direções (figura 4.15 a). O azimute entre 270° a 330° recebeu de peso 3. As direções menos frequentes com azimutes entre 330° e 30°, e azimute entre 30° e 90°, por sua vez, receberam pesos 2 e 1, respectivamente (figuras 4.12 e 4.13). Os pontos marcados no mapa (A, B, C, D, E, F das figuras 4.12 e 4.13) ilustram o detalhamento de ocorrências de direções nos azimutes entre 30° e 90° (peso 1), menos frequentes.



Figura 4.12 - Mapa de Direção dos Lineamentos e seus respectivos pesos. Escala 1:30.000. (Modificado de DAEE & UNESP 2009).


Figura 4.13 - Zoom dos pontos demarcados no Mapa de Direção dos Lineamentos e seus respectivos pesos. Escala 1:30.000. **a**) Ponto A **b**) Ponto B **c**) Ponto C **d**) Ponto D **e**) Ponto E **f**) Ponto F.

A unidade litológica dos migmatitos com cerca de 70% dos lineamentos da área, e suítes granitoides, com cerca de 20%, acompanham as tendências gerais da área nos quesitos comprimento (figuras 4.14 b, c) e direção dos lineamentos (figuras 4.15 b, c).



Figura 4.14 - Diagrama de rosas do comprimento dos lineamentos. Escala 1: 30.000. a) Lineamentos da área total b) Lineamentos da unidade migmatitos c) Lineamentos da unidade de suítes granitoides d) Lineamentos da unidade de sedimentos marinhos.



Figura 4.15 - Diagrama de rosas da frequência das direções dos lineamentos. Escala 1: 30.000. a) Lineamentos da área total b) Lineamentos da unidade migmatitos c) Lineamentos da unidade de suítes granitoides d) Lineamentos da unidade de sedimentos marinhos.

A frequência das direções e comprimentos dos lineamentos foram interceptadas resultando em uma Matriz de Potencial Hídrico de descontinuidades de pesos entre 1 e 5, sendo 5 Potencial Muito Alto e 1 Insignificante (tabela 4.2 e figura 4.16). Com esses pesos foram gerados *buffers* com raio de 20 metros em torno dos lineamentos.

Escala :30.000		Comprimento dos Lineamentos (m)		
		0-200	200-400	>400
Direção dos Lineamentos	Azimutes entre 30°-90°	1	2	3
	Azimutes entre 330°-30°	2	3	4
	Azimutes entre 270° – 330°	3	4	5

Tabela 4.2 - Matriz do Potencial à Circulação de Água nos Lineamentos. Escala 1:30.000

Segundo esta Matriz de Potencial Hídrico dos Lineamentos na escala 1:30.000, a área de estudo tem predominância de lineamentos classificados como Potencial Alto e Muito Alto (pesos 4 e 5) (figura 4.16). Os lineamentos com peso 3 (Potencial Médio), têm uma distribuição ao longo de todo o mapa, porém, menor em relação aos pesos 4 e 5. Os lineamentos com pesos 1 e 2 (Potencial Insignificante e Baixo) são menos representativos e podem ser melhor visualizados no detalhe dos pontos C, E e B (figura 4.16 e 4.17).



Figura 4.16 – Mapa do Potencial Hídrico dos Lineamentos. Escala 1:30.000. (Modificado de DAEE & UNESP 2009).



Figura 4.17 - Zoom dos pontos demarcados no Mapa do Potencial Hídrico de Lineamentos. Escala 1:30.000. **a**) Ponto A **b**) Ponto B **c**) Ponto C **d**) Ponto D **e**) Ponto E **f**) Ponto F.

Observando o aspecto geral da figura 4.16 e os detalhamentos em figura 4.17, os lineamentos com Potencial à Circulação de Água Muito Alto e Alto, se concentram preferencialmente sobre os contatos litológicos das três unidades litoestratigráficas envolvidas. No centro destas predominam lineamentos com classificações de potenciais médios, baixos e insignificantes (Pontos A, B, C, D, E, F das figuras 4.16 e 4.17). Os lineamentos classificados com pesos 1 e 2, além de configurarem os menores comprimentos, apresentaram o mesmo *trend* de direção das falhas.

Para a classificação de densidade de lineamentos, o Método de Kernel foi configurado para 200 metros de raio de pesquisa e seis classes nos dados de saída, tendo como base a experimentação visual e apoio de trabalhos anteriores e similares, como o de Krisp & Špatenková (2010) (figura 4.18).

Majoritariamente, a área apresentou zonas de alta densidade nas proximidades de lineamentos com as direções NW-SE e NE-SW, onde a área de alta densidade segue parcialmente a tendência do traçado dos lineamentos com direção NW-SE, na maior parte das ocorrências. Esses mesmos comportamentos da densidade estão na seguinte ordem decrescente de representatividade: nas suítes granitoides e proximidades dos seus contatos litológicos (pontos A, B e C da figura 4.18) e noroeste, sudoeste e região central da área de estudo, nos migmatitos (pontos D, E, F, G e H da figura 4.18).



Figura 4.18 – Mapa de Densidade de Lineamentos. Escala 1: 30.000. (Modificado de DAEE & UNESP 2009).

Próximo a extremidade leste onde aflora a suíte granitoide e migmatito (ponto C), no contato dessas duas unidades litológicas (extremo leste da área de estudo ponto C e I) há altas densidades associadas à proximidade de lineamentos de direção N-S e NE-SW e direção N-S e NW-SE, em menor proporção. As zonas de alta densidade com lineamentos de direção N-S e NE-SW são ocorrentes também a sudeste da nova rodovia Tamoios, próximo ao contato litológico dos migmatitos e sedimentos marinhos (ponto J da figura 4.18).

Quanto ao comprimento e direções dos lineamentos nas zonas de alta densidade, no extremo leste (pontos H e B) da nova rodovia os lineamentos têm comprimentos entre 272 e 1150 m, entre 194 e 1914 m e comprimentos de 1198 m, respectivamente nas direções tendendo a N-S, NE-SW e NW-SE. Nas suítes granitoides e centro dos migmatitos (ponto H), são encontrados lineamentos com comprimentos entre 167 e 1975 m e entre 138 e 2133 m, respectivamente nas direções tendendo a NE-

SW e NW-SE (figura 4.18). No sudeste da rodovia (ponto J) há alta densidade de lineamentos com direção tendendo a NE-SW de comprimentos entre 153 e 953metros e lineamentos com comprimentos entre 232 e 326 m na direção tendendo a NW-SE (figura 4.18).

4.2.3 Escala 1: 10.000

Foram traçados 1497 lineamentos para a área total de estudos, na escala 1:10.000. Foram contabilizados 1157, 345 e 114 lineamentos respectivamente para os migmatitos, suítes granitoides e sedimentos marinhos.

Os comprimentos dos lineamentos variaram entre 63 e 1568 m, aproximadamente. Foram subdivididos em peso 1, para comprimentos até 100m; em peso 2, para comprimentos entre 100 e 200m; e peso 3, para comprimentos superiores à 200m (figura 4.19 e 4.20).

Os lineamentos de comprimentos menores (peso 1), na escala 1:10.000, estão próximos aos pontos A, B, C, D e E (figura 4.19). Os lineamentos de peso 2, em menor quantidade em relação ao peso 3, ocorrem preferencialmente e de maneira mais concentrada na região central do mapa (figura 4.19).



Figura 4.19 – Mapa Comprimento dos Lineamentos e seus respectivos pesos. Escala 1:10.000. (Modificado de DAEE & UNESP 2009).



Figura 4.20 - Zoom dos pontos demarcados no Mapa Comprimento dos Lineamentos e seus respectivos pesos. Escala 1:10.000. **a**) Ponto A **b**) Ponto B **c**) Ponto C **d**) Ponto D **e**) Ponto E.

Quanto à frequência de direções, os lineamentos na direção de azimutes entre 270° e 330° receberam peso 3, na direção de azimutes entre 330° a 30° foram classificados em peso 2 e azimutes entre 30° a 90° foram arbitrados em peso 1 (figuras 4.21 e 4.22). O valor numérico dos pesos é proporcional à representatividade dos grupos de direções dos lineamentos na área de estudos. O peso 2, com representatividade secundária, se concentra preferencialmente na região central de estudo. A figura 4.22 demonstra em maior detalhe as regiões próximas aos pontos destacados no Mapa Direção dos Lineamentos e seus respectivos pesos.



Figura 4.21 - Mapa Direção dos Lineamentos e seus respectivos pesos. Escala 1:10.000. (Modificado de DAEE & UNESP 2009).



Figura 4.22 - Zoom dos pontos demarcados no Mapa Direção dos Lineamentos e seus respectivos pesos. Escala 1:10.000. **a**) Ponto A **b**) Ponto B **c**) Ponto C **d**) Ponto D **e**) Ponto E **f**) Ponto F.

Os migmatitos e as suítes granitoides apresentaram respectivamente 73% e 22% dos lineamentos, mostrando as mesmas tendências de comprimentos (figuras 4.23 b, c) e direção (figuras 4.24 b, c) em comparação com a área total.

Os sedimentos marinhos agregaram cerca de 5% dos lineamentos da área de estudos, os quais se localizam somente próximos ao contato com os migmatitos. Não apresentaram faixas bem definidas e principalmente representativas de frequência de direção (figura 4.24 d) e comprimento (figura 4.23 d), em relação às outras unidades litológicas.



Figura 4.23 - Diagrama de rosas do comprimento dos lineamentos. Escala 1: 10.000. a) Lineamentos da área total b) Lineamentos da unidade migmatitos c) Lineamentos da unidade de suítes granitoides d) Lineamentos da unidade de sedimentos holocenicos.



Figura 4.24 - Diagrama de rosas da frequência das direções dos lineamentos. Escala 1: 10.000. a) Lineamentos da área total b) Lineamentos da unidade migmatitos c) Lineamentos da unidade de suítes granitoides d) Lineamentos da unidade de sedimentos marinhos.

A partir dos pesos predefinidos de direção e comprimento dos lineamentos, uma matriz peso com magnitude máxima de peso 5 e mínima de peso 1 (tabela 4.3) foi compilada para gerar um Mapa de Potencial Hídrico de Lineamentos, com *buffers* de raio de 20 metros (figuras 4.26). Na escala 1:10.000 os pesos 4 e 5 predominaram na área de estudo.

Os lineamentos classificados com Potencial Médio, Alto e Muito Alto (pesos 3, 4 e 5) se concentram preferencialmente no centro da área sobre as suítes granitoides e migmatitos, como pode ser observado nos pontos D e C (figuras 4.26 e 4.25). Em contrapartida, os lineamentos classificados com os potenciais insignificante e baixo (pesos 1 e 2) possuem, em maioria, os menores comprimentos da escala e *trend* similar aos das falhas transcorrentes destrais, isto pode ser observado em todos os pontos demarcados ao longo das figuras 4.25 e 4.26.

Escala 1:10.000		Comprimento dos Lineamentos (m)		
		0-100	100-200	>200
Direção dos Lineamentos	Azimutes entre 30°-90°	1	2	3
	Azimutes entre 330°-30°	2	3	4
	Azimutes entre 270° - 330°	3	4	5

Tabela 4.3 - Matriz Potencial Hídrico dos Lineamentos. Escala 1:10.000



Figura 4.25 – Mapa do Potencial Hídrico de Lineamentos. Escala 1:10.000. (Modificado de DAEE & UNESP 2009).



Figura 4.26 - Zoom dos pontos demarcados no Mapa do Potencial Hídrico de Lineamentos. Escala 1:10.000. **a**) Ponto A **b**) Ponto B **c**) Ponto C **d**) Ponto D.

Para a classificação de densidade de lineamentos, o Método Kernel foi configurado para 100 metros de raio de pesquisa e seis classes nos dados de saída, tendo como base a experimentação visual e apoio de trabalhos anteriores e similares, (Krisp & Špatenková, 2010).

As zonas de mais alta densidade (zonas vermelhas e laranja mais intenso da figura 4.27) ocorrem majoritariamente, na região com lineamentos de direção NE-SW e nas regiões de médias (zonas amarelas e laranja menos intenso da figura 4.27) densidades contém lineamentos de direção NW-SE, NE-SW e N-S, em ordem decrescente de representatividade. Vale destacar que os lineamentos de direção N-S, sendo minoria na área de estudo, se concentram preferencialmente na porção leste da área, nas unidades miloníticas, independente da densidade, como nos pontos A e B da figura 4.27.

No nordeste da nova rodovia Tamoios (ponto C da figura 4.27) e leste da área de estudo (pontos E e D da figura 4.27) ocorrem zonas de alta densidade, porém em menor frequência às demais localidades supracitadas. As zonas de alta densidade próximas aos pontos B e C apresentaram maioria de lineamentos com direção NE-SW (figura 4.27).

O contato entre milonitos e suítes granitoides, no nordeste da nova rodovia (ponto B da figura 4.27), apresentou lineamentos de direção NE-SW de comprimentos entre 130 e 1246 m, que compõem zonas de alta densidade. Nesse mesmo contexto tem se lineamentos entre 150 e 476 m, com direção N-S. A sudeste da nova rodovia (ponto A da figura 4.27) as mais altas densidades comportaram lineamentos de direção N-S e NW-SE, em ordem decrescente de representatividade.





4.3 CONDICIONAMENTO ESTRUTURAL À CIRCULAÇÃO DE ÁGUA

Para a confecção do Mapa de Condicionamento Estrutural à Circulação de Água, foi feita a multiplicação entre os pesos da Matriz do Potencial Hídrico dos Lineamentos e os pesos das densidades, como realizado por Carvalho *et al.* (2015). As multiplicações foram realizadas de maneira independente em cada uma das três escalas (1:10.000, 1:30.000 e 1:50.000).

Com base nas multiplicações foram obtidos, pesos de 1 a 6, 8 a 10, 12 e 15, nos quais o valor numérico é diretamente proporcional à favorabilidade da circulação de água nos respectivos lineamentos.

4.3.1 Escala 1: 50.000

O Mapa de Condicionamento Estrutural à Circulação de Água (figura 4.28) na escala 1:50.000 apresentou majoritariamente lineamentos classificados com os pesos 6 e 8.

Os lineamentos com peso 8 têm maior representatividade na direção NW-SE, com comprimentos médios (próximos a 600 metros). A maior concentração desse peso por área ocorre nas suítes granitoides. Esse peso também ocorre em outras direções, tendo E-W e N-S em quantidade relevante. Os lineamentos na direção NE-SW e com peso 8 apresentaram os maiores comprimentos (acima de 1600 metros). Por sua vez, os lineamentos com peso 6 apresentaram, em geral, *trends* NW-SE, outros lineamentos de mesmo peso e direção NE têm maiores comprimentos, ao norte da área. As direções N-S, E-W e NE-SW são pouco representativas no peso 6.

Os maiores pesos de favorabilidade que indicam um condicionamento estrutural ao fluxo hídrico, 12 e 15, coincidiram com as zonas de alta densidade de lineamentos (pontos F, B e A das figuras 4.28 e 4.29). Esse peso comparece como aumento brusco dentro de um mesmo lineamento, independente do comprimento e direção. Ocorrem, no geral, nas proximidades dos contatos litológicos (preferencialmente entre suítes granitoides e migmatitos), zonas de cisalhamento e a leste da área, no centro das suítes granitoides. Na porção mais a norte da área há uma grande concentração de lineamentos com peso 10, os quais na proximidade de outros lineamentos de qualquer peso adquirem fragmentos com peso 15, o que pode ser mais bem observado, por exemplo, próximo ao ponto F (figuras 4.28 e 4.29).

Observando o aumento brusco dos pesos dos lineamentos na proximidade de outros, independentemente do tipo litológico ou da passagem de falha transcorrente, é possível deduzir o fator densidade de lineamentos como o de maior peso, em comparação às demais características analisadas (direção, comprimento e litologia) para a favorabilidade à circulação de água na escala 1:50.000 (pontos B, C, D, E, G e H figuras 4.28 e 4.29).

Os pesos pouco representativos foram 1, 2 e 3, comprovando a pouca influência de tais lineamentos na área. Por vezes, integram poucas zonas de alta densidade de lineamentos (figura 4.9), como observado nas proximidades dos pontos C e D (figuras 4.28 e 4.29).

Próximo a nova Rodovia Tamoios, os lineamentos que apresentam alta favorabilidade ocorrem somente em alguns pontos na escala 1:50.000 (pontos G, H e I das figuras 4.28 e 4.29), a maioria

relacionada a alta densidade de lineamentos no entorno. De maneira geral, a nova Rodovia Tamoios tem seu contorno sobre lineamentos de médias favorabilidades de fluxo de água (pesos 6, 8 e 9).



Figura 4.28 - Mapa de Condicionamento Estrutural à Circulação de Água. Escala 1:50.000. (Modificado de DAEE & UNESP 2009).



Figura 4.29 - Zoom dos pontos demarcados no Mapa de Condicionamento Estrutural à Circulação de Água, escala 1:50.000. a) Ponto A b) Ponto B c) Ponto C d) Ponto D e) Ponto E f) Ponto F g) Ponto G h) Ponto I.

4.3.2 Escala 1: 30.000

O Mapa de Condicionamento Estrutural à Circulação de Água na escala 1:30.000 (figuras 4.30 e 4.31) apresentou lineamentos com condicionamento prevalente de pesos 6 e 8. Nestas classificações, os lineamentos apresentam maior representatividade de direções com *trend* NW-SE e não demonstram concentração preferencial e faixa de comprimentos homogêneos.

Os pontos C, E, F e M (figuras 4.30 e 4.31) apontam lineamentos de comprimentos curtos, classificados com os pesos 1, 2 e 3 (menores condicionamentos estruturais ao fluxo de água). Estes possuem *trend* similar aos das falhas transcorrentes destrais e ocorrem próximos ao contato das suítes granitoides com os migmatitos.

A análise das imagens (figuras 4.30 e 4.31) na escala 1:30.000 permite notar que as maiores favorabilidades de fluxo de água (pesos 10, 12 e 15) ocorrem principalmente na ponta do corpo da suíte granitoide (ponto I das figuras 4.30 e 4.31) e próximo à falha transcorrente a sul da nova Rodovia Tamoios (ponto A das figuras 4.30 e 4.31). Estes pontos em destaque parecem estar relacionados às zonas de maior tensão cisalhante, devido ao contorno dos contatos litológicos e a presença das falhas transcorrentes. Outras altas favorabilidades nos pontos L, M e J também podem ser observadas interceptando a nova Rodovia Tamoios. A escala de 1:30.000 permitiu visualizar melhor locais preferenciais para a favorabilidade nas proximidades da rodovia.

A escala em questão não apresenta uma definição concisa e pontual das maiores favorabilidades do fluxo de água na área total em relação às demais escalas. O que ganha destaque nesta resolução são os maiores pesos de condicionamento estrutural serem atribuídos a lineamentos de maiores comprimentos (acima de 720 metros) e direções tendendo à NW-SE, *trend* coincidente com as

fraturas de distensões associadas à transcorrência destral em E-W de idade pleistocênica (SALVADOR & RICCOMINI, 1995; SUGUIO & MARTIN, 1996; RAPOSO, 2017; RAPOSO, 2018).



Figura 4.30 - Mapa de Condicionamento Estrutural à Circulação de Água. Escala 1:30.000 (Modificado de DAEE & UNESP 2009).



Figura 4.31 - Zoom dos pontos demarcados no Mapa de Condicionamento Estrutural à Circulação de Água. Escala 1:30.000. a) Ponto A b) Ponto B c) Ponto C d) Ponto D e) Ponto E f) Ponto F g) Ponto G h) Ponto H i) Ponto I j) Ponto J l) Ponto L m) Ponto M.

4.3.3 Escala 1: 10.000

O mapa de condicionamento estrutural à circulação de água, na escala 1:10.000, mostrou sobretudo os lineamentos com pesos 6 e 8, os quais podem ser interpretados por vias práticas como pesos médios para condicionamento estrutural da circulação de água (figura 4.32). Esses pesos acompanham zonas de médias densidades de lineamentos quando comparados com a figura 4.27, sem apresentar comprimento e direção homogêneos.

Lineamentos com peso 6 tiveram direções majoritárias em NW-SE, com comprimentos médios a pequenos e apresenta lineamentos com comprimentos acima de 1000 m, com *trend* NE-SW. Por sua vez, os lineamentos com peso 8 apresentam comprimentos superiores a 800 m nos *trends* NE-SW e NW-SE. Nas proximidades do ponto G (figuras 4.32 e 4.33) há uma alta concentração de lineamentos de peso 8 e *trend* N-S, sobre a zona de cisalhamento, esta região também coincide com uma zona de alta densidade de lineamentos (observada na figura 4.27).

Os lineamentos com os maiores pesos de condicionamento estrutural (10, 12 e 15) estão concentrados no centro da área de estudo, principalmente nas suítes granitoides e contatos litológicos. Têm como direção majoritária NW-SE, comprimentos entre 150 e 650 m, sendo a direção N-S de caráter secundário. Acredita-se que esses maiores pesos nesta região, são pela sua possível submissão

a um esforço cisalhante maior em relação ao restante da área. Provavelmente esta característica se dá pela diferença reológica, somada à tensão resultante aplicada pelas duas falhas transcorrente destrais (figuras 4.32 e 4.33). Há poucos lineamentos com peso 10, com longos comprimentos (acima de 700 m) e *trend* NE-SW.

Os lineamentos classificados com pesos 1 e 2 possuem curtos comprimentos e mesmo *trend* da falha transcorrente (pontos B, C, D e G das figuras 4.32 e 4.33), isto talvez possa caracterizar os lineamentos com menores comprimentos, com baixa concentração ao longo da área e de direção tendendo a NE-SW como irrelevantes no condicionamento estrutural ao fluxo de água.

A escala 1:10.000 ainda apresentou lineamentos curtos, menores que 400 m, com altas favorabilidades muito pontuais (pontos H, I, J e G das figuras 4.33 e 4.32) com direções tendendo a N-S e NE-SW próximo a nova Rodovia Tamoios. Esta direção NE-SW pode estar correlacionada com as falhas do embasamento, ativas desde o Pré-Cambriano, que tiveram mudança significativa na direção da tensão durante o Pleistoceno (CHIODI FILHO *et al.*, 1983; SADOWSKI, 1991; HASUI, 2010). As direções N-S dos lineamentos podem também serem associadas a uma mudança de regime transcorrente, para um regime extensional, iniciado no Holoceno (SALVADOR & RICCOMINI, 1995).



Figura 4.32 - Mapa de Condicionamento Estrutural à Circulação de Água. Escala 1:10.000 (Modificado de DAEE & UNESP 2009).



Figura 4.33 - Zoom dos pontos demarcados no Mapa de Condicionamento Estrutural à Circulação de Água, escala 1:10.000. a) Ponto A b) Ponto B c) Ponto C d) Ponto D e) Ponto E f) Ponto F g) Ponto G h) Ponto H i) Ponto I.

4.4 AVALIAÇÃO DAS DRENAGENS SUPERFICIAIS E O CONDICIONAMENTO ESTRUTURAL À CIRCULAÇÃO DE ÁGUA

Neste tópico os condicionamentos estruturais à circulação de água nas escalas 1:50.000, 1:30.000 e 1:10.000 foram interceptados com as drenagens superficiais mapeadas pela Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente do Estado de São Paulo, na escala 1:50.000. As possíveis evidências e resultados obtidos são apresentados a seguir nas suas respectivas escalas.

4.4.1 Escala 1: 50.000

Num aspecto geral, na escala 1:50.000, muitos lineamentos com diversas classificações coincidem com áreas de drenagem superficial, o que pode reforçar o fato de boa parte dos lineamentos traçados serem potenciais zonas de fluxo hídrico.

Lineamentos com direção NW-SE, como apresentado nos pontos A, B, C e D (figuras 4.34 e 4.35) foram aqueles que mais coincidiram com o curso das drenagens superficiais. Há um aumento de favorabilidade do fluxo hídrico nos lineamentos, quando estes se encontram interceptando a afluência dos rios (pontos A, D, E, F e G das figuras 4.34 e 4.35).

Lineamentos com direção E-W, independentes do seu peso, não apresentam intersecção com as drenagens superficiais, provavelmente não configuram zonas de recarga hídrica, exceto quando próximos ao contato litológico com nos sedimentos marinhos (pontos H e C das figuras 4.34 e 4.35).

Todos os lineamentos dentro e próximos das suítes granitoides interceptaram as drenagens superficiais, independente da direção, comprimento e densidade, o que pode caracterizar esta litologia como maior potencial de fluxo hídrico, dentre as demais litologias da área na escala 1:50.000 (figura 4.34).



Figura 4.34 - Comparação entre as drenagens superficiais e o Condicionamento Estrutural à Circulação de Água na escala 1:50.000. (Modificado de DAEE & UNESP 2009 e CPA/ SIMA SP 2013).



Figura 4.35 - Zoom dos pontos demarcados no Mapa de Comparação entre as drenagens superficiais e o Condicionamento Estrutural à Circulação de Água na escala 1:50.000. a) Ponto A b) Ponto B c) Ponto C d) Ponto D e) Ponto E f) Ponto F g) Ponto G h) Ponto H.

4.4.2 Escala 1: 30.000

A escala 1:30.000 apresenta maioria dos seus lineamentos com pesos 6 e 8 na direção NW-SE interceptando as drenagens superficiais. Nas afluências maioria das drenagens coincide com o aumento de peso do lineamento, este fenômeno ocorre preferencialmente nos lineamentos de direção NW-SE e passam a ter pesos 12 e 15 (pontos C, D, E, H, I, L e M das figuras 4.36 e 4.37). Secundariamente o aumento de peso para 9, ocorrem preferencialmente em lineamentos de direção NE-SW (pontos F, L, M, I e J das figuras 4.36 e 4.37).

Há uma grande concentração de afluências que coincidem com lineamentos de pesos 12 e 15 (maiores) nesta litologia (pontos A, B, C e F das figuras 4.36 e 4.37). Este mesmo comportamento pode ser observado nas afluências próximas aos contatos litológicos (pontos C e H das figuras 4.36 e 4.37) e as falhas transcorrentes (pontos E e H das figuras 4.36 e 4.37).

O ponto G mostra um lineamento na direção N-S com aumento do peso para 12, coincidindo com a afluência de uma drenagem superficial. Nesta escala há menos afluências das drenagens superficiais coincidentes com o aumento do peso dos lineamentos, em relação à escala 1:50.000. Mesmo assim, a escala 1:30.000 apresentou um maior número de relação de pesos superiores (12 e 15) com as afluências em relação à escala 1:50.000 (figuras 4.36 e 4.37).



Figura 4.36 - Comparação entre as drenagens superficiais e o Condicionamento Estrutural à Circulação de Água na escala 1:30.000. (Modificado de DAEE & UNESP 2009 e CPA/ SIMA SP 2013).



Figura 4.37 - Zoom dos pontos demarcados no Mapa de Comparação entre as drenagens superficiais e o Condicionamento Estrutural à Circulação de Água na escala 1:30.000. a) Ponto A b) Ponto B c) Ponto C d) Ponto D e) Ponto E f) Ponto F g) Ponto G h) Ponto H i) Ponto I j) Ponto J l) Ponto L m) Ponto M.

4.4.3 Escala 1: 10.000

A escala 1:10.000 apresentou consideráveis interseções de lineamentos com as drenagens superficiais, porém, em menor número em relação as outras duas escalas. Destes lineamentos a maioria tem pesos 6 e 8, e direção NW-SE. Ocorrem também menos interseções do aumento dos pesos dos lineamentos com as afluências das drenagens superficiais (pontos A, D, E e G) (figuras 4.38 e 4.39).

Apesar de suíte granitoide possuir a maior concentração dos lineamentos na área de estudo, na escala 1:10.000, há drenagens superficiais nesta litologia que não interceptam lineamentos, como ocorre nos pontos B e C (figuras 4.38 e 4.39).

Nas proximidades do ponto F (figuras 4.38 e 4.39) é possível ver próximo ao contato litológico afluências que coincidem com o aumento de peso de lineamentos para 9.



Figura 4.38 - Comparação entre as drenagens superficiais e o Condicionamento Estrutural à Circulação de Água na escala 1:10.000. (Modificado de DAEE & UNESP 2009 e CPA/ SIMA SP 2013).



Figura 4.39 - Zoom dos pontos demarcados no Mapa de Comparação entre as drenagens superficiais e o Condicionamento Estrutural à Circulação de Água na escala 1:10.000. a) Ponto A b) Ponto B c) Ponto C d) Ponto D e) Ponto E f) Ponto F g) Ponto G h) Ponto H i) Ponto I j) Ponto J.

Trabalho de Conclusão de Curso, n. 374 2020

CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES

Os métodos indiretos de fluxo hídrico subterrâneo, por meio de análise de lineamentos e geoprocessamento, mostraram-se eficazes, pois, mesmo com resoluções espaciais muito distintas entre as escalas e traçado de lineamentos em *layers* diferentes, como ocorrido em 1:10.000, as tendências de favorabilidade ao fluxo de águas foram similares. No entanto, as informações foram mais refinadas na escala 1:10.000.

Os lineamentos na escala 1:10.000 apresentaram resultados com tendências similares às outras escalas de trabalho. Dentre estes resultados é apresentado o mesmo grupo de azimutes da direção de lineamentos em 1:10.000, com proporções similares aos da escala 1:30.000, de maneira que os pesos atribuídos para as direções em ambas escalas foram iguais. A diferença foi observada com a escala 1:50.000.

As áreas de alta densidade em 1:10.000, mesmo que mais refinadas, coincidiram com as mesmas áreas em 1:30.000 e 1:50.000. Os maiores pesos atribuídos ao Potencial Hídrico dos Lineamentos (4 e 5) e ao Condicionamento Estrutural à Circulação de Água (10, 12 e 15), escala 1:10.000, tiveram estas áreas diagnósticas coincidentes com as demais escalas, tendo maior proximidade com a escala 1:30.000.

Os resultados por unidade geológica (migmatitos, suítes granitoides e sedimentos marinhos), nas três escalas, foram similares em percentagens dos comprimentos e direção dos lineamentos. A unidade de migmatitos apresentou comportamento muito similar aos da área total, uma vez que representava cerca de 70% dos lineamentos da área de estudo. Esta litologia é parte da constituição do embasamento pré-cambriano, sendo uma rocha marcada por uma série de deformações tectônicas, associadas a eventos pré-orogenicos a colisionais durante a consolidação do Gondwana (Citações).

Para a área nas três escalas, destaca-se como pontos potenciais às maiores favorabilidades ao fluxo de água os contatos litológicos, regiões das falhas transcorrentes destrais, suítes granitoides e os trechos com altas densidades de lineamentos.

A escala 1:10.000, comparada as escalas 1:50.000 e 1:30.000, apresenta o maior detalhe dos lineamentos com Condicionamento Estrutural à Circulação de Água alto e médio. As outras duas escalas têm caráter mais generalista e podem inferir um diagnóstico superestimado (como ocorre na escala 1:30.000) ou subnotificado (como ocorre na escala 1:50.000).

Outro fator que também endossa as análises geoestatísticas aqui aplicadas como eficazes, a priori, são os lineamentos em 1:50.000, classificados com pesos médios (6 e 8) e altos (10, 12 e 15), majoritariamente com direções NW-SE no Condicionamento Estrutural à Circulação de água por interceptarem as drenagens superficiais, predominantemente. Todos esses comportamentos descritos neste parágrafo para a comparação entre as drenagens superficiais e o Condicionamento Estrutural à Circulação de Água ocorrem nas outras escalas, porém o número de interseções é reduzido de maneira decrescente nas escalas 1:10.000 e 1:30:000, respectivamente.

Os lineamentos de direção minoritária em E-W na área total, localizados muito próximos da margem litorânea e nos sedimentos holocênicos, podem ter sua pouca ocorrência justificada pela alteração do campo de tensões da última fase da abertura do Atlântico Sul e pelas pequenas e mais recentes reativações neotectônicas. A baixa ocorrência de lineamentos nessa direção, pode ser explicada pelo fato das estruturas estarem em sedimentos inconsolidados e a movimentação tectônica ser pouco representativa imprimir mais estruturas nessa direção. Além do mais, a direção E-W está próxima a tensão máxima horizontal da região. A direção E-W não se apresentou favorável ao possível fluxo hídrico, com baixos condicionamentos estruturais e nenhuma intersecção com as drenagens superficiais, na escala 1:50.000.

Uma atenção para a confirmação de diagnósticos futuros deve ser dada às áreas de contato das unidades geológicas e às proximidades com as zonas transcorrentes. Apesar da litologia não ser o fator de maior peso nas análises, as suítes granitoides, podem ser apontadas como aquelas de maior condicionamento estrutural para o fluxo de águas nas fraturas presentes na área de estudos. Possivelmente a maior concentração de lineamentos com altos condicionamentos estruturais para o fluxo de água, por metro quadrado nesta litologia, se deu principalmente pela sua reologia combinada ao esforço tectônico no qual o corpo foi submetido, por estar localizado entre duas zonas de cisalhamento transcorrente destrais. Na escala 1:50.000, todos os lineamentos da suíte granitoide coincidem com a drenagem superficial, mais um fator que reforça o alto potencial ao fluxo hídrico para esta litologia.

Para comprovar fraturas com fluxo de água, recomenda-se mapeamento das fraturas, realização de *scanlines* e medidas em campo. Ensaio geofísico com eletrorresistividade pode dar um resultado eficaz, principalmente nas áreas de condicionamentos estruturais de pesos 10, 12 e 15 - próximas à nova Rodovia Tamoios, uma vez que a área de estudo está inserida em um contexto de falhas transcorrente, a água que fluir em tais fraturas será mineralizada.

As regiões da área de estudo que requerem um maior detalhamento, são as proximidades dos pontos A, B, G, H, I e J na escala 1:10.000 (figura 4.32), pontos A, B, D, I, L e M na escala 1:30.000 (figura 4.30) e pontos H e G na escala 1:50.000 (figura 4.28). Outros métodos que podem ser empregados para o mesmo diagnóstico na região são ensaios em poços tubulares e mensuração da
vazão específica. Mesmo com tais recomendações de estudos de maiores detalhes, destaca-se a eficácia do método para estudos de pré-campo, otimizando investimentos de recursos e tempo.

Trabalho de Conclusão de Curso, n. 374 2020

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABAS (Associação Brasileira de Água Subterrâneas). 2001. ABAS informa. *In:* Boletim Informativo da Associação Brasileira de Águas Subterrâneas. p. 08- 09.
- Almeida, F. F. M. 1967. Origem e evolução da plataforma brasileira. In: Boletim DNPM / DGM 241, 36p.
- Almeida, F.F.M. 1976. The system of continental rifts bordering the Santos Basin, Brazil. Anais da Academia Brasileira de Ciências, **48** (supl.): 15-26.
- Almeida, F. F. M.; Carneiro, C. D. 1998. Origem e evolução da Serra do Mar. Revista Brasileira de Geociências. 28 (2): 135-150.
- Almeida, R. P.; Janikian, L.; Romalino, A. R. S.; Fragoso-Cesar, S.; Fambrini, G. L. 2010. The Ediacaran to Cambrian Rift System of Southeastern South America: Tectonic Implications, The Journal of Geology, 118: 145-161.
- ANA (Agência Nacional de Águas). 2011. Elaboração de estudos para a concepção de um Sistema de Previsão de Eventos Críticos na Bacia Paraíba do Sul e de um Sistema de Intervenções Estruturais para mitigação do efeitos de cheias nas bacias dos rios Muriaé e Pomba e investigações de campo correlatas. Coleta de dados R 02, 286p.
- ANA (Agência Nacional de Águas) 2015. Região Hidrográfica Atlântico Sudeste. In: ANA (Agencia Nacional de Águas). Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil: Regiões Hidrográficas Brasileiras. Edição especial, p. 64- 77.
- ARSESP (Agência Reguladora de Saneamento e Energia do Estado de São Paulo). 2020. *Mapa de Concessão de Gás*. São Paulo.
- ASF (Alaska Satellite Facility) 2019. https://asf.alaska.edu/data-sets/derived-data-sets/alos-palsar-rtc/alos-palsar-radiometric-terrain-correction/ Acesso 24/jun/2020.
- Asmus, H. E.; Porto, R. 1972. Classificação das bacias sedimentares brasileiras segundo a tectônica de placas. *In*: Congresso Brasileiro de Geologia, 26, Belém, *Anais...*, Belém, SBG, **2**: 67-90.
- Avelino da Silva, J. 2000. *Estruturas de acumulação de água em rochas cristalinas: estudo geofísico e geológico de casos no Estado do Rio Grande do Norte*. Dissertação de Mestrado, Centro de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 92p.
- Basei, M. A. S., Brito Neves, B. B., Siga Jr, O., Babinski, M., Pimentel M. M., Tassinari, C. C. G., Nutmen, A., Cordani, U. G. 2010. Contribution of SHRIMP U-Pb zircon geochronology to

urravelling the evolution of Brazialian Neoproterozoic fold belts. *Precambrian Research*, **183**: 112-144.

- Bistrichi, C.A.; Carneiro, C.D.R.; Dantas, A.S.L.; Ponçano, W.L.; Campanha, G.A.C.; Nagata, N.; Almeida, M.A., Stein, D.P.; Melo, M.S.; Cremonini, O.A.; Hasui, Y.; Almeida, F.F.M. 1981. *Mapa Geológico do Estado de São Paulo 1:500.000.* São Paulo, IPT.
- Boggione, G. A.; Silva, M. V. A.; Carvalho Jr., N. R.; Teles, T. L.; Nazareno, N. R. X. 2009. Definição da escala em imagens de sensoriamento remoto: uma abordagem alternativa. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, INPE,Centro Federal de Educação Tecnológica de Goiás. Natal, Anais, p. 1739-1746.
- Bradbury, K. R.; Muldoon M. A. 1992. Hydrogeology and Groundwater Monitoring of Fractured Dolomite in the Upper Door Priority Watershed, Door Country, Wisconsin. Report final, Wisconsin, Wisconsin Geological and Natural History Survey, University of Wisconsin-Madison, 83 p.
- Brito Neves, B. B. e Cordani, U. G., 1991. Tectonic evolution of South America during Late Proterozoic. *Precambrian Research* **33**: 23-40.
- Campanha, G.A.C.; Ens, H.H. 1993. Estrutura geológica na região de São Sebastião. *In:* Simpósio de Geologia do Sudeste, Rio de Janeiro, *Boletim de Resumos SBG*, p. 51- 52.
- Campanha, G. A. C.; Ens, H. H. 1996. Estruturação Geológica da região da Serra do Juqueriquerê, São Sebastião, SP. *Bol. IG-USP, Sér. Cient.*, **27**: 41-49.
- Campanha, G. A. C.; Brito Neves, B. B. 2004. Frontal and oblique tectonics in the Brazilian Shield. *Episodes*, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, **27** (4): 255-259.
- Campos Neto, M. C.; Figueiredo, M. C. H. 1995. The Rio Doce Orogeny, Southeastern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 8: 143-162.
- Carvalho, A. M.; Albuquerque Filho, J. L.; Terrel, D.; Dehira, L. K.; Azevedo, A. A. 2015. Proposta Metodológica para Zoneamento de Aquíferos Fraturados para a Avaliação de Impactos Hidrogeológicos Decorrentes da Construção de Obras Lineares. Estudo de caso aplicado ao projeto de túneis. *Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental*, 5: 59-70.
- CBH-LN (Comitê de Bacia Hidrográfica do Litoral Norte) 2017. *Plano de Baciais Hidrográficas do Litoral Norte UGRHI 03*. Relatório II, 356p.
- Centro de Sismologia da Universidade de São Paulo. 2013. Catálogo Sísmico Brasileiro. <http://moho.iag.usp.br/eq/bulletin> Acesso em 07/jan/2020.

- CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo). 2016. *Mapa da Hidrografia Conforme Decreto* 10.755/77 - *UGRHI* 03. https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/wp-content/uploads/sites/12/2016/04/UGRHI03-1.pdf> Acesso 09/jun/2020.
- CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo). 2016. *Mapa da Hidrografia Conforme Decreto* 10.755/77 – *UGRHI* 02. https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/wp-content/uploads/sites/12/2016/04/UGRHI02.pdf> Acesso 12/jun/2020.
- Chiodi Filho, C.; Chieregati, L. A.; Theodorovicz, A. M. G.; Theodorovicz, A.; Menezes, R. G.; Ramalho, R.; Batolla Jr., F. 1983. Geologia e recursos minerais das folhas de Natividade da Serra e Caraguatatuba. *In*: Jornada sobre a Carta Geológica do Estado de São Paulo em 1:50.000. São Paulo, *Pró-Minério*, IPT. 1: 8-29.
- Chiodi Filho, C.; Takahashi, A. T.; Silva, C. R.; Ferreira, J.C.G. 1983. *Projeto Capão Bonito*. Relatório Final, Rio de Janeiro, Contrato CPRM/Pró-Minério (inédito), 121p.
- Climate Data. 2020. Temperaturas e precipitações médias em Caraguatatuba, Natividade da Serra e Paraibuna. https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/sao-paulo. Acesso 03/Ago/2020.
- Cook, P. G.; 2003. A Guide to Regional Groundwater Flow in Fractured Rock Aquifers. Austrália, CSIRO Land and Water, 108p.
- CPA (Coordenadoria de Planejamento Ambiental) SIMA SP (Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente do Estado de São Paulo). 2013. Mapa rede de drenagem do Estado de São Paulo, escala 1: 50.000.<https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/cpla/mapa-da-rede-dedrenagem-do-estado-de-sao-paulo/> Acesso 12/ago/2019.
- CPA (Coordenadoria de Planejamento Ambiental) SIMA SP (Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente do Estado de São Paulo). 2013. Mapa Unidade Hidrográfica de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI).<https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/cpla/mapada-rede-de-drenagem-do-estado-de-sao-paulo/> Acesso 19/jun/2020.
- Costa, W. D. 1965. Análise dos fatores que influenciam na hidrogeologia do cristalino. *Revista Água Subterrânea*, **1** (4): 14-47.
- Costa, W. D.; Silva, A. B. 1997. Hidrogeologia dos meios anisotrópicos. *In:* Feitosa, F. A. C.; Manoel Filho, J. (Coord.). *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*, Fortaleza, CPRM, LABIHID-UFPE, p. 133-174.
- DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica). 2005. *Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo : escala 1:1.000.000*. Nota explicativa, São Paulo, DAEE (Departamento de Águas

e Energia Elétrica), IG (Instituto Geológico), IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo), CPRM (Serviço Geológico do Brasil), 119p.

- DAEE (Departamento de Águas e Energia Elética); UNESP (Universidade Estadual Paulista). 2009. *Mapa geológico do Estado de São Paulo. Escala 1:250.000.* São Paulo, Convênio DAEE/ UNESP.
- Davis, S. N.; Turk, L. J. 1964. Optimum depth of wells in crystalline rocks. *Ground Water*, Worthington, **2**: 6-11.
- Dias Neto, C. M. 2001. Evolução tectono-termal do Complexo Costeiro (Faixa de Dobramentos *Ribeira) em São Paulo*. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 180p.
- Dias Neto, C. M.; Fonseca, P. E.; Munhá, J.; Silva, M. E.; Ribeiro, A. 2006. A estrutura em flor (flower structure) do Complexo Costeiro (Faixa Ribeira) em São Sebastião (São Paulo, Brasil). *Cadernos Laboratório Xeolóxico de Laxe*, **31**: 105-125.
- Ebert, H. D.; Hasui, Y.; Costa, J.B.S. 1991.0 caráter transpressivo do Cinturão de Cisalhamento Rio Paraíba do Sul. Rio Claro *In:* III Simpósio Nacional de estudos tectônicos, *B0L..*,IGCE/UNESP-SBG/SP, p.139-141.
- Ebert H.D., Neves M.A., Hasui Y., Szatmari P., Aires J.R. 1993. Evolução dos cinturões de cisalhamento entre os blocos São Paulo, Vitória e Brasília através da tectônica colisional oblíqua - uma modelagem física. *In:* SBG, Simp. Nac. Est. Tect., *Anais*, 4: 254-258.
- Ebert, H.D.; Hasui, Y. 1998. Transpressional tectonics and strain partitioning during oblique collison between three plates in Precambrian of south-east Brazil. *In:* Holdsworth, R.E.; Strachan, R.A.; Dewey, J.F. (eds). *Continental transpressional and transtensional tectonics*. London, Geological Society Special Publication, 135, p. 231-253.
- Fernandes, A. J. 1991. Complexo Embu no leste do Estado de São Paulo: contribuição ao conhecimento da litoestratigrafia e da evolução estrutural e metamórfica. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, 120p.
- Fernandes, A. J.; Perrotta, M. M.; Salvador, E. D.; Azevedo, S. G.; Gimenez Filho, A.; Paulon, N. 2007. Potencial dos Aquiferos Fraturados do Estsdo de São Paulo: Condicionantes Geológicos. *Águas Subterrâneas*, **21** (1): p.65-84.
- Fernandes, A. J. 2008. Aquíferos fraturados: Uma revisão dos condicionantes geológicos e dos métodos de investigação. *Revista do Instituto Geológico*, São Paulo, **29** (1/2): 49-72.

- França, G. S. 2008. Novos tremores podem ocorrer; população deve ter calma. Uol Notícias. < https://noticias.uol.com.br/ultnot/2008/04/23/ult23u1987.jhtm> 07/ jan/2020.
- Freitas, R. O. 1951. Ensaio sobre a tectônica moderna do Brasil. Boletim da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras, Univ. de São Paulo, 130 (6): 1-120.
- FREITAS, R.O. 1976. Definição petrográfica, estrutural e geotectônica das Cintas Orogênicas Antigas do litoral norte do Estado de São Paulo. São Paulo, Instituto Geológico, *Boletim*, 1, 176p.
- Fuck, R. A.; Brito Neves, B. B.; Schobbenhaus, C. 2008. Rodinia descendentes in South America. *Precambrian Research* 160: 108-126.
- Fundação COPPETEC (Laboratório de Hidrologia e Estudos de Meio Ambiente). 2006. Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul - Resumo. Relatório Contratual, Resende, AGEVAP (Associação Pró-Gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul), 194p.
- Hasui, Y.; Dantas, A. S. L.; Carneiro, C. D. R.; Bistrichi, C. A. 1981. O embasamento Pré-Cambriano e Eonpaleozoico em São Paulo. *In*: Mapa Geológico do Estado de São Paulo. Pró-Minério, IPT, 1: 12-45.
- Hasui, Y. 2010. A grande colisão pré-Cambriana do sudeste brasileiro e a estruturação regional. Universidade Estadual Paulista. *Geociências*, **29** (2): 141-169.
- Heilbron, M.; Machado, N., 2003. Timing of terrane accretion in the Neoproterozoic Eopaleozoic Ribeira belt, SE Brazil. *Precambrian Research*, **125**: 87-112.
- Heilbron, M.; Pedrosa-Soares, A. C.; Campos Neto, M.; Silva, L. C.; Trow, R. A. J.; Janasi, V. C. A Província Mantiqueira. 2004. *In*: Mantesco-Neto, V.; Bartorelli, A.; Carneiro, C. D. R.; Brito Neves, B. B. O desvendar de um continente: a moderna geologia da América do Sul e o legado da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo, Beca, p. 203-234.
- Hirata, R. C.; Ferreira, L. M. R. 2001. Aquíferos da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê: Disponibilidade Hídrica e Vulnerabilidade à Poluição. *Revista Brasileira de Geociências*, **31**(1): 43-50.
- IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). 2006. Mapa de Unidades de Relevo do Brasil. Escala 1:5.000.000. Ministério do Planejamento /Orçamento e Gestão, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística/ Diretoria de Geociências.
- IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). 2016. *Hidrogeologia do Sudeste Brasileiro,* escala 1:250.000. Acesso 19/jun/2020">https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoesambientais/geologia/15824-hidrogeologia.html?=&t=downloads>Acesso 19/jun/2020.

- INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) 2019. *Câmeras Imageadoras CBERS-3 e 4*. http://www.dgi.inpe.br/CDSR/index.php Acesso 15/jun/2019.
- ITA (Associação Internacional de Tunelamento e Espaço Subterrâneo). 2018. Cresce no mundo o mercado de obras subterrâneas por causa de projetos de gasodutos, oleodutos e metrôs. https://petronoticias.com.br/archives/111920> Acesso em 07/abr/2020.
- Krisp, J. M.; Špatenková, O. 2010. Kernel Density Estimations for Visual Analysis of Emergency Response Data. In: Konecny, M.; Zlatanova, S.; Bandrova, T. L. (Eds). Geographic Information and Cartography for Risk and Crisis Management, Towards Better Solutions. Heidelberg, Springer, p. 395-408.
- Machado R. & Endo I. 1993 a. Cinturão de Cisalhamento Atlântico: um exemplo de tectônica transpressiva neoproterozóica. *In*: SBG, Simp. Nac. Est. Tect., *Atas*, **4**, p. 189-191.
- Magalhães, F. S. 1999. *Tensões Regionais e Locais: Casos no Território Brasileiro e Padrão Geral.* Tese de doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 225p.
- Marengo, J. A.; Alves, L. M. 2005. Tendências Hidrológicas da Bacia do Rio Paraíba do Sul. *INPE ePrint*, **1**: 1-31.
- Martins, R. N. J. 2016. *Efeito da água subterrânea no projeto, escavação e exploração de túneis*. Tese de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 159p.
- Mcfalane, M. J. 1992. Groundwater movement and water chemistry associated with weathering profiles of the African surface in parts of Malaw. *In*: Wright, E. p.; Brugess, W. G. *The hydrogeology of crystal-line basement aquifers in Africa*. London, Spec Publ., Geol. Soc., p.1-264.
- Meira, V. T. 2014. Evolução Tectono-Metamórfica Neoproterozoica dos Complexos Embu e Costeiro no contexto de formação do Gondwana Ocidental (Leste do Estado de São Paulo). Tese de doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 266 p.
- Mendes, G. F. ; Sousa, R. V.; Albuquerque Filho, J. L. 2016. A relação entre a hidrogeologia e os lineamentos estruturais do Planalto Serrano do Estado de Santa Catarina, com uso de geotecnologias. Águas Subterrâneas, Suplemento - Anais do XIX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 20 p.
- Menezes, P. R.; Almeida, T. 2012. Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto. Brasília, Universidade de Brasília, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, 266p.

- Monteiro, C. A. de F. 1973. A dinâmica climática e as chuvas no Estado de São Paulo: estudo sob forma de atlas. São Paulo, Geografia, Universidade de São Paulo, 23p.
- Nascimento da Silva, C. C. et al. 2001. Integração de dados estruturais, de sensores remotos e de geofísica na prospecção hidrogeológica em terrenos cristalinos: estudos de casos no Estado do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil. *In*: Encontro Nacional Perfuradores de Poços, 12, Simpósio Hidrogeologia do Nordeste. Olinda, *Anais*, p.445-454.
- Neves, M. A. 2005. Hidrogeologia de rochas cristalinas. In: Neves, M. A. Análise integrada aplicada à exploração de água subterrânea na Bacia do Rio Jundiaí (SP). 200 f. Tese de doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, p. 84- 111.
- Nimer, E. 1989. *Climatologia do Brasil*. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística IBGE. Rio de Janeiro.
- Olofsson, B. 1994. Flow of groundwater from soil to crystalline rock. Applied Hydrogeology, 3:71-83.
- Perrotta, M. M.; Salvador, E. D.; Lopes, R. C.; D'Agostino, L. Z.; Peruffo, N.; Gomes, S. D.; Sanchs, L. L. B.; Meira, V. T.; Garcia, MGM; Lacerda Filho, JV. 2005. *Mapa Geológico do Estado de São Paulo, escala 1:750000*. São Paulo, (PGB) Programa Geologia do Brasil, CPRM (Serviço Geológico Brasileiro).
- Raposo, M. I. B. 2017. Magnetic fabrics of the Cretaceous dike swarms from São Paulo coastline (SE Brazil): Its relationship with South Atlantic Ocean opening. *Tectonopysics*. **721**: 395-414.
- Raposo, M. I. B. 2018. Anisotropia Magnéticas dos Diques Máficos do Litoral Norte do Estado de São Paulo. São Paulo, *Concurso para obtenção de título de Livre-Docente*, Departamento de Mineralogia e Geotectônica, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, p. 1-58.
- Riccomini, C. O. 1989. *Rift continental do sudeste do Brasil*. Tese de doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 190p.
- Riccomini, C.; Assumpção, M. Quaternary tectonics in Brazil. Episodes. v 22. n 3. p. 221-226. 1999.
- Sá, E. F. J.; Silva, C. C. N.; Coriolano, A. C. F.; Medeiros, W. E. 2008. Conceitos de Análise Estrutural Aplicados a Hidrogeologia de Terrenos Cristalinos. *In*: Feitosa, F. A. C.; Manoel Filho, J.; Feitosa, E. C.; Demetrio, J. G. A. (orgs) *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. 3. ed, Rio de Janeiro, CPRM (Serviço Geológico do Brasil), LABHID, p. 97-120.
- Sadowski, G.R. 1991. A Megafalha de Cubatão no Sudeste Brasileiro. In: Boletim do Departamento de Geologia Geral, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Série Científica, 22:15-28.

- Salvador, E. D. 1994. Análise Neotectônica da Região do Vale do Rio Paraíba do Sul compreendida entre Cruzeiro (SP) e Itatiaia (RJ). Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 129p.
- Salvador, E. D.; Riccomini, C. 1995. Neotectônica da Região do Alto Estrutural de Queluz (SP-RJ, Brasil). *Revista Brasileira de Geociências*, **25**(3): 151-164.
- SIGAM (Sistema Integrado de Gestão Ambiental). 2020. Diagnóstico técnico Produto 2 Meio Físico- APAMLN (Área de Proteção Ambiental Marinha do Litoral Norte)< https://sigam.ambiente.sp.gov.br/sigam3/Repositorio/511/Documentos/APAM_LN/APAMLN _Clima_Meteo_final.pdf > Acesso 04/ago/2020.
- Signal. B. B. S.; Gupta, R. P. 1999. *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks*. Kluwer Academic Publishers, Boston, 399p.
- Silva, L. C., Mcnaughton, N., Armdtrong, R., Hartmann, L., Fletcher, I., 2005. The Neoproterozoic Mantiqueira Province and its African connections. *Precambrian Research*, **136**: 203-240.
- Silverman, B.W. 1988. Density Estimation for Statistics and Data Analysis. *Journal of the American Statistical Association*, **83**(401): 269-270.
- Singhal, B.B.S.; Gupta, R. P. 2010. Fractures and discontinuities. *In:* Singhal, B.B.S.; Gupta, R. P. *Applied Hydrogeology of fractured rocks*. Second edition, Springer Sciense & Business Media, p. 13-33.
- Siqueira, L. 1967. Contribuição da geologia à pesquisa de água subterrânea no cristalino. *Revista Água Subterrânea*, Recife, **2**(9): 1-29.
- Software Stereo 32. 2019. https://sites.google.com/a/alumnos.ucn.cl/erik-jensen/Descargas Acesso 28/jun/2019.
- Suguio, K.; Martin., L. 1978. Mapa das formações quaternárias do litoral paulista e sul fluminense, escala 1:100.000. São Paulo, Governo do Estado de São Paulo, Secretaria de Obras e do Meio Ambiente, DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica).
- Suguio, K.; Martin, L. 1996. The role of neotectonics in the evolution of the Brazilian Coast. *Geonomos*, **4** (2): 45-53.
- Trow, R. A. J.; Heilbron, M.; Ribeiro, A.; Paciullo, F. V. P.; Valeriano, C. M.; Almeida, J. C. H.;
 Tupinambá, M.; Andreis, R. R. 2000. The central segment of the Ribeira Belt. *In*: Cordani, U.
 G.; Milani, E. J., Thomaz Filho, A.; Campos, D. A. (Eds.). Tectonic Evolution of South America. Rio de Janeiro, *ResearchGate*, p. 287-310.

Vargas Jr., E.; Barreto, A. B. C. 2003.Considerações sobre aspectos do fluxo em aquíferos fraturados relevantes à exploração de água. *In*: I Simpósio de hidrogeologia do Sudeste – XIII Encontro nacional de perfuradores de poços. Petrópolis, p. 71-82.