

Universidade de São Paulo – Instituto de Geociências  
Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental (GSA)

Sensoriamento Remoto, Geoprocessamento e Geologia Estrutural aplicados à  
Hidrogeologia: Estudo de caso nos municípios de Boa Viagem e Pedra Branca

Monografia

TF- 18/37

Aluno: Rafael Santos Furtado

Orientador: André Pires Negrão

Coorientadora: Amélia João Fernandes

São Paulo- SP

2018

SENSORIAMENTO REMOTO, GEOPROCESSAMENTO E GEOLOGIA ESTRUTURAL  
APLICADOS À HIDROGEOLOGIA: ESTUDO DE CASO NOS MUNICÍPIOS DE BOA  
VIAGEM E PEDRA BRANCA

De acordo,

---

Aluno: Rafael Santos Furtado

---

Orientador: Prof. Dr. André Pires Negrão

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>7</b>
<b>2.</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>7</b>
<b>3.</b>	<b>FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b>	<b>7</b>
<b>4.</b>	<b>ÁREA DE ESTUDO</b>	<b>9</b>
<b>5.</b>	<b>JUSTIFICATIVA</b>	<b>9</b>
<b>6.</b>	<b>CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA REGIÃO</b>	<b>10</b>
6.1.	ASPECTOS FISIOGRÁFICOS	10
6.2.	GEOLOGIA REGIONAL	11
6.2.1.	<i>Província Borborema</i>	11
6.2.2.	<i>Bacias sedimentares</i>	13
6.2.2.1.	Bacia do Parnaíba	13
6.2.2.2.	Bacia do Araripe	13
6.2.2.3.	Bacia Potiguar	13
6.2.2.4.	Bacias interiores	13
6.2.3.	<i>Província Costeira</i>	14
6.2.4.	<i>Neotectônica</i>	14
6.3.	GEOMORFOLOGIA DO CEARÁ	15
6.4.	POÇOS NOS AQUÍFEROS FRATURADOS DO CEARÁ	16
<b>7.</b>	<b>CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA ÁREA DE ESTUDO</b>	<b>17</b>
7.1.	ASPECTOS FISIOGRÁFICOS	17
7.2.	GEOLOGIA LOCAL	17
<b>8.</b>	<b>AQUÍFEROS FRATURADOS</b>	<b>18</b>
<b>9.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>19</b>
9.1.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
9.2.	SOFTWARE E INTEGRAÇÕES EM AMBIENTE SIG	19
9.2.1.	<i>Mapa geológicos e demais bases físicas</i>	19
9.2.2.	<i>Modelo digital de terreno (MDT) e Hipsometria</i>	20
9.2.3.	<i>Mapa e traçado de lineamentos</i>	20
9.2.4.	<i>Mapa de densidade de lineamentos</i>	21
<b>10.</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>21</b>
10.1.	ANÁLISE REGIONAL	21
10.1.1.	<i>Análise de lineamentos</i>	21
10.1.2.	<i>Análise da produção de poços</i>	22
10.1.3.	<i>Mapa de densidade de lineamentos</i>	27
10.2.	ANÁLISE LOCAL	27
10.2.1.	<i>Análise de lineamentos</i>	27
<b>11.</b>	<b>DISCUSSÕES</b>	<b>31</b>
<b>12.</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>31</b>
<b>13.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>33</b>

## **AGRADECIMENTOS**

Sou eternamente grato a todas as pessoas que contribuíram para o resultado deste trabalho e me acompanharam ao longo desses seis anos, dos quais levarei gratificantes e duradouras recordações.

Primeiramente tenho de agradecer meus pais, Regina e Cícero. Todo o cuidado, conhecimento e amor transmitido por vocês durante minha vida é eterno. Sempre será por vocês.

À Professora Amélia João Fernandes pelo apoio e orientação cedidos durante este trabalho, bem como a gratificação em auxiliar e transmitir conhecimento.

Ao Professor André Pires Negrão pelo suporte, conversas e sugestões tão importantes para a conclusão deste trabalho.

À Família Astenosfera (Manja, Pepê, Cabrita, Nummeral, Pii, Fê, Bundinha, Rolê, Selfie, Monstrão, Consti e Mormaço), agradeço por numerosos momentos de felicidade e irmandade que me propiciaram importantes aprendizados.

À Peps, grande mulher e amiga, obrigado pela amizade, pelos cuidados e conselhos.

Aos amigos Jade, Blá, Titchon, Medíocre, Cuzido, Narúbia, Tênia, Ronaldo, Tavinho, Tutu e Dida, obrigado pela amizade e confiança.

À Ananda, pelo carinho e apoio que me foi dado durante este percurso.

Aos amigos do Brasil Devilz, encontrar com pessoas tão maravilhosas todos os domingos durante os últimos anos é parte extremamente importante da minha vida. Vamos demais.

## RESUMO

O semiárido cearense possui registros de intensos períodos de seca datados desde o período colonial. A região apresenta pluviometria anual que varia de 500 a 850mm, com chuvas concentradas entre os meses de fevereiro e abril, além de temperatura média anual de 28°C. Tais fatores, associados à ausência de rios permanentes no Estado e à baixa disponibilidade hídrica subterrânea, têm gerado impactos na produção, renda e emprego das populações sertanejas. Este Trabalho de Formatura tem como objetivo analisar a produtividade do aquífero fraturado nos municípios de Boa Viagem e Pedra Branca, no semiárido do Estado do Ceará, utilizando imagens de sensoriamento remoto, técnicas de geoprocessamento e fotointerpretação geológica. Estes dados foram analisados em ambiente SIG em conjunto com os valores de capacidade específica dos poços da região, posteriormente confrontados com os condicionantes da produtividade de poços em aquíferos fraturados (tipo litológico, elemento morfológico, compartimentação estrutural, geomorfologia, altitude e profundidade de instalação). A partir do modelo digital de terreno gerado para área, foram confeccionados mapas de lineamentos regional na escala 1:100.000, a fim de compartimentar estruturalmente a área, e na escala 1:25.000, auxiliar na aferição da relação entre a capacidade específica e a direção e distância dos lineamentos em relação aos poços. Estabeleceu-se para a área de estudo um raio de influência 100m das feições lineares na produtividade dos poços. Além disso, poços próximos a lineamentos de direção E-W apresentaram a maior quantidade de valores de capacidade específica acima da mediana, sendo que o campo de tensão principal  $\sigma_1$  atuante no Nordeste Brasileiro possui a mesma direção, promovendo a abertura de fraturas paralelas ou subparalelas. As metodologias utilizadas neste estudo se apresentaram adequadas à fase pré-exploratória, uma vez que permitiu identificar as características das áreas mais suscetíveis a apresentarem poços produtivos. Regiões de vale e superfícies aplainadas apresentaram maior produtividade, resultado esperado de acordo com a literatura. Contudo salienta-se que, com o intuito de minimizar os riscos econômicos da exploração, deve-se obter dados de campo a partir do mapeamento geológico-estrutural da área e caminhamentos geofísicos, entre outros, que incrementem o entendimento do modelo de circulação de água subterrânea em fraturados.

## ABSTRACT

The semi-arid region of Ceará has records of intense periods of drought dating from the colonial period. The region presents annual pluviometry ranging from 500 to 850mm, with concentrated rainfall between February and April, in addition to an annual average temperature of 28°C. These factors, associated with the absence of permanent rivers in the State of Ceará and the low underground water availability, have generated impacts on the production, income and employment of the population living in the “sertão” area. This work aims to analyze the productivity of the fractured aquifer in the municipalities of Boa Viagem and Pedra Branca, in the semi - arid state of Ceará, using remote sensing images, geoprocessing techniques and geological photointerpretation. These data were analyzed in a GIS environment in conjunction with the specific capacity values of the wells of the region, later confronted with the conditioners of wells productivity in fractured aquifers (lithologic type, morphological element, structural compartmentalization, geomorphology, altitude and depth of installation). From the digital terrain model generated for the area, maps of regional lineaments were drawn up in the 1:100.000 scale, in order to structurally compartmentalize the area, and in the 1:25.000 scale, to aid in the measurement of the relationship between specific capacity and direction and distance from the lineaments to the wells. A 100m radius of influence of linear features on well productivity was established for the study area. In addition, wells near E-W direction lineaments presented the highest amount of specific capacity values above the median, and the main stress field  $\sigma_1$  acting in the Brazilian Northeast has the same direction, promoting the opening of parallel or subparallel fractures. The methodologies used in this study were adequate for the pre-exploratory phase, since it allowed identifying the characteristics of the areas most susceptible to presenting productive wells. Vale regions and planed surfaces showed higher productivity, an expected result according to the literature. However, in order to minimize the economic risks of exploration, it is necessary to obtain field data from the geological-structural mapping of the area and geophysical journeys, among others, that increase the understanding of the water circulation model fracture.

## **1. INTRODUÇÃO**

Há tempos a população do semiárido nordestino sofre com problemas de abastecimento de água, decorrentes dos períodos de seca. Alternativas para este cenário foram criadas na forma de políticas públicas, como a construção de açudes, a transposição do Rio São Francisco, com suas obras ainda inacabadas, e a interação local com os cidadãos pela captação de água através de cisternas. Nesse contexto, o conhecimento sobre a hidrogeologia é fundamental para o melhor aproveitamento das águas subterrâneas. Em regiões onde a água subterrânea é armazenada em fraturas, estudos interdisciplinares empregando geologia estrutural e geomorfologia têm auxiliado no conhecimento desses aquíferos, muitas vezes mostrando que existem correlações entre padrões geomorfológico-estruturais e a produtividade de poços.

No estado do Ceará a situação é agravada. Com pluviosidade média anual de 800 mm (FUNCEME, 2018) e extensos períodos sem chuva, as águas subterrâneas têm alta salinidade, provocada pela lixiviação superficial e transporte para o reservatório, ou dissolução interna no próprio aquífero (Santiago et al., 2000), sendo que estudos têm demonstrado a influência da seca na produção, renda e emprego, principalmente na área agrícola (Khan et al., 2005).

Este trabalho faz parte do convênio entre a Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH) do Estado do Ceará e o Centro de Pesquisa de Águas Subterrâneas (CEPAS|USP) do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (IGc/USP). As cidades objeto desse estudo são Boa Viagem e Mombaça, situadas no sertão cearense.

## **2. OBJETIVOS**

Pretende-se analisar a produtividade de poços no aquífero fraturado dos municípios de Boa Viagem e Pedra Branca, no semiárido do Estado do Ceará, a partir das suas características geológicas, geomorfológicas e estruturais. O emprego associado de sensoriamento remoto e geoprocessamento visa a geração de mapas de lineamentos e morfoestrutural, de modo a avaliar sua interferência na produção desses poços.

## **3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

A indicação de áreas para captação de água em aquíferos fraturados, realizada através da análise de lineamentos é extremamente importante na gestão de recursos hídricos de áreas que carecem de informações mais refinadas sobre a circulação de água nestas formações (Bricalli., 2011; Bricalli., 2017; Fernandes., 2008; Vidal et al., 2006, entre outros).

A integração de parâmetros como a geologia, geofísica, geomorfologia, neotectônica e morfotectônica dão suporte para uma análise pré-exploratória de áreas propícias a

apresentarem valores elevados de capacidade específica (Bricalli., 2011; Fernandes & Rudolph., 2001; Fernandes., 1997; Fernandes., 2008; Madrucci et al., 2005, entre outros).

Fernandes (2008) apresenta uma revisão dos fatores que influenciam os valores de capacidade específica de poços, bem como da abordagem metodológica a ser utilizada na fase pré-exploratória em aquíferos fraturados. A autora recomenda a confrontação dos dados de produtividade com fatores como lineamentos, litologia, compartimentação morfológica e estrutural, através de frequências acumuladas, aptas a distinguir de maneira mais efetiva as populações de dados utilizadas. Madrucci et al (2003) apresentam a frequência acumulada da capacidade específica, confrontada com os dados de densidade e distância dos lineamentos em relação aos poços e sua localização nas morfoestruturas, enquanto Fernandes & Rudolph (2001) apresentam a frequência acumulada dos poços por grupo litológico, locados próximos e distante de lineamentos, por compartimento topográfico (áreas de topo, vale e encosta).

Em Madrucci et al (2003) é apresentada uma análise integrada em um aquífero cristalino, na região do Circuito das Águas, porção leste do Estado de São Paulo, a partir do processamento de imagens de sensoriamento remoto e aeromagnetométricas. A análise espacial, em ambiente SIG, resultou em elaboração de mapas morfoestrutural e de isofrequência de zonas de juntas. Ao final do trabalho foi possível estabelecer uma área de influência dos lineamentos, na produtividade dos poços, de 200m, e de até 600m nas regiões onde os lineamentos se interseccionam.

Lousada & Campos (2005), em um estudo de caso de unidades metassedimentares fraturadas do Grupo Paranoá, realizaram perfilagens eletromagnéticas a fim de reconhecer zonas de topo fraturadas. A metodologia proposta, com aplicação na locação de poços tubulares em aquíferos fraturados, foi testada a partir de perfuração de 4 poços em área definida como favorável à captação, sendo que os poços apresentaram capacidade específica aproximadamente 50% maior que a regional. Consiste no tratamento digital de imagem e interpretação fotogeológica para a seleção de áreas-alvo. Na sequência foi realizado o mapeamento geológico/estrutural e levantamento geofísico, que permitiram o tratamento e integração dos dados para realizar a locação dos poços de maneira a interceptar áreas explotáveis. Madrucci et al (2005) realizaram levantamento geofísico de eltrorresistividade (Sondagem Elétrica Vertical e Caminhamento Elétrico) no aquífero fraturado na região de Lindóia (SP), cuja análise integrada ao mapeamento de fraturas, confeccionado a partir de imagens de satélite, possibilitou a confecção de um mapa de favorabilidade de ocorrência de água subterrânea.

A relação dos campos de esforços atuais com a orientação de fraturas e zonas de fraturas mais transmissivas têm sido analisada em uma série de estudos (Fernandes, 1997; Fernandes & Rudolph, 2001; Jardim de Sá, 2000; Silva & Jardim de Sá, 2000; Coriolano et al., 2000; Coriolano 2002; Neves et al., 2002). A influência da neotectônica na estruturação



geomorfológica e hidrogeológica de depósitos sedimentares também tem sido assunto abordado por vários trabalhos (Bandeira & Abreu, 2002; Godoy et al., 2008; Maia & Bezerra, 2011; Maia & Bezerra, 2012; Bricalli, 2016; Rios et al., 2016). Quando os esforços neotectônicos atuam em unidades litoestratigráficas recentes (Terciárias), novas estruturas são geradas, enquanto que no, cristalino precambriano, as fraturas pré-existente são reativadas de acordo com a sua orientação em relação ao elipsoide de tensões (Jardim de Sá, 2000). Partindo deste pressuposto, e conhecendo a cronologia tectono-estrutural da região, é possível estabelecer áreas com fraturas mais propícias e estarem abertas de acordo com os esforços tectônicos atuais e, conseqüentemente, delimitar áreas propensas à circulação e armazenamento de água subterrânea.

#### **4. ÁREA DE ESTUDO**

A área de estudo apresentada na etapa anterior consistiu nas cidades de Boa Viagem, Pedra Branca e Mombaça, no semiárido do estado do Ceará. Com o intuito de aprofundar a análise regional, a área foi dividida em duas unidades com base na compartimentação estrutural definida anteriormente, sendo que a cidade de Boa Viagem quase em sua totalidade (exceto o extremo sudeste) e a porção noroeste do município de Pedra Branca se tornaram alvo de estudo deste projeto, enquanto o restante da área foi estudada em outro Trabalho de Formatura de forma concomitante.

A **Figura 1** apresenta o mapa de localização da região.

#### **5. JUSTIFICATIVA**

O primeiro registro de seca no semiárido nordestino data de 1583. De 1777 a 1778 ocorreu um dos piores períodos de estiagem do período colonial, conhecido como a seca dos três setes, responsável por acabar com sete oitavos do rebanho do Estado do Ceará (Campos, 2014). Já no período Imperial, a população nordestina passou por um período de dois anos (1844 e 1845) de estiagem, fato que incentivou as primeiras projeções da transposição das águas do Rio São Francisco, como política pública (Silva et al., 2016). Em 1877 a região passou pelo período conhecido como “Grande Seca”, de grande impacto na população e que, no Estado do Ceará, foi responsável pela morte da metade da população (Barreto, 2009).

A partir deste evento surge, por parte das autoridades, uma série de projetos de desenvolvimento econômico para o Estado, estruturados no emprego de trabalhadores sertanejos prejudicados pelos períodos de seca. No entanto, essa população foi empregada como mão de obra barata, ao invés de esforços serem direcionados para a gestão de políticas públicas de prevenção aos efeitos das secas na própria região (Sousa, 2009). Na seca de 1915 o governo do Ceará impediu que os retirantes migrassem para as grandes cidades, construindo campos de concentração nas regiões marginais. Em 1979 outro período intenso

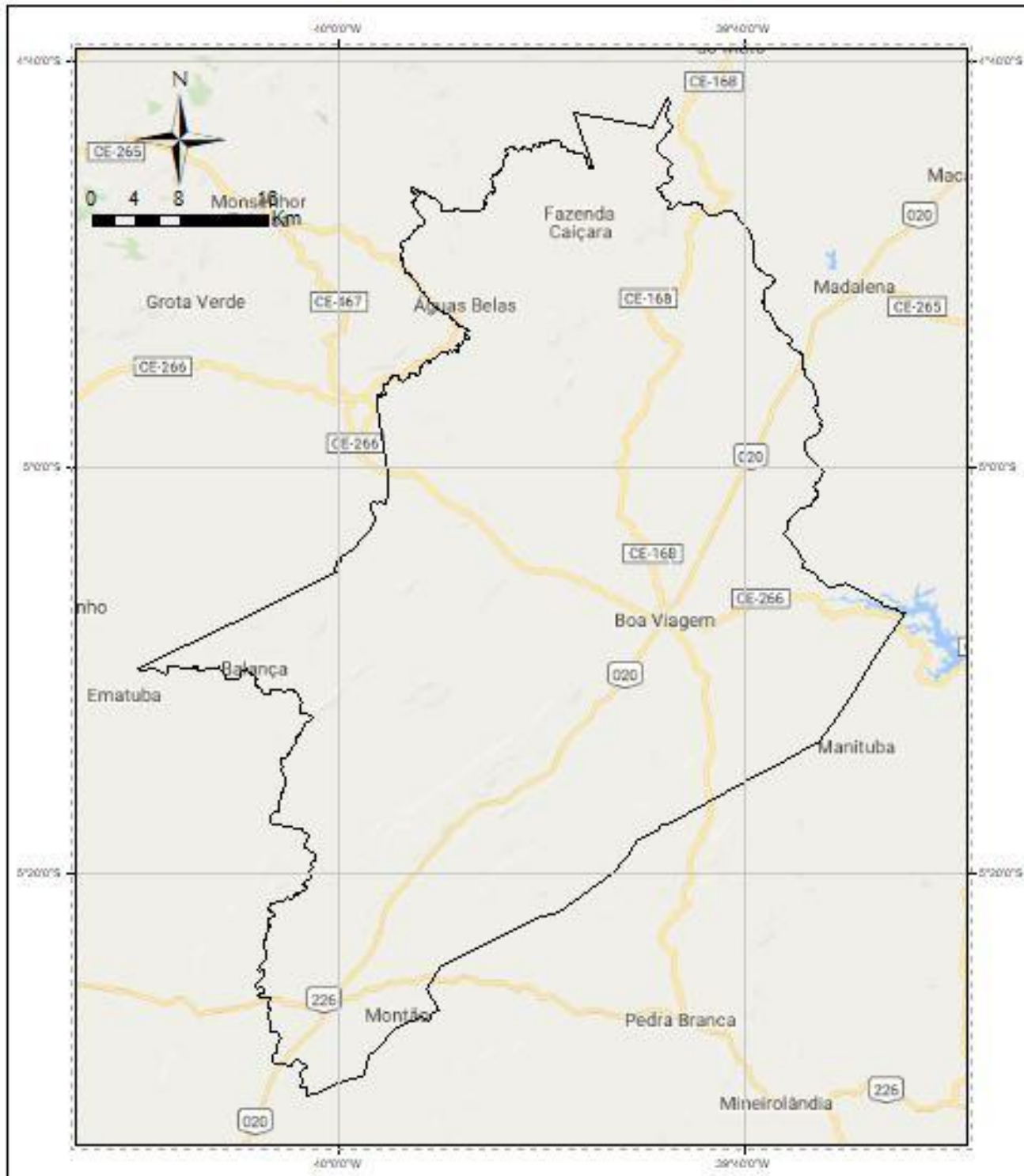


FIGURA 1: LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

PROJETO: TRABALHO DE FORMATURA

INSTITUIÇÃO: INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

FONTE: MALHA MUNICIPAL - IBGE (2016)  
GOOGLE EARTH - WORLD STREET MAP

de estiagem perdurou por cinco anos no nordeste, prejudicando a colheita nas lavouras e resultando em fome e saques (Barreto, 2009). Em 2001 a crise de estiagem, concomitante à crise elétrica, agravou a situação dos sertanejos.

A gestão de águas no Estado do Ceará, através de políticas públicas, tem sido realizada nas últimas décadas a partir da açudagem, transposição de bacias e transposição do rio São Francisco (Campos e Studart, 2001). O aproveitamento das águas pluviais é realizado pela construção de cisternas com recursos do governo estadual, constituindo uma atividade benéfica para as populações do interior cearense, no que tange às questões ambientais e econômicas (Sousa e Ferreira, 2017).

A exploração de rochas cristalinas para a captação de água subterrânea surge, nesse contexto, como alternativa em um estado com grandes exposições da Província Borborema. A escassez, associada ao elevado teor salino das águas subterrâneas, levou o Governo Federal, com a coordenação do Ministério do Meio Ambiente (MMA), a desenvolver o Programa Água Doce (PAD) como iniciativa na busca por novas fontes de qualidade para abastecimento e dessalinização das águas.

A viabilidade para a realização do presente trabalho vem do convênio entre a Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH) do Estado do Ceará e o Centro de Pesquisa de Águas Subterrâneas (CEPAS|USP) do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (IGc/USP). As imagens de satélite Alos Palsar utilizadas foram obtidas na plataforma eletrônica do Alaska Satellite Facility (ASF), de uso público. Os softwares para geoprocessamento estão disponíveis no Laboratório de Informática Geológica (LIG) do Instituto de Geociências- USP e programas para análise estatística e tabelamento de dados são de fácil obtenção.

## **6. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA REGIÃO**

### **6.1. Aspectos fisiográficos**

O Estado do Ceará apresenta cerca de 92% do seu território pertencente ao semiárido (CPRM, 2014). A ausência de rios permanentes no estado, a baixa disponibilidade de recursos hídricos superficiais e os longos períodos de estiagem são responsáveis pelas crises hídricas com as quais a região sempre conviveu. A pluviometria anual varia de 500 a 850 mm, com chuvas concentradas entre os meses de fevereiro e abril.

Aproximadamente 3/4 do território do estado está situado sobre rochas cristalinas da Província Borborema, rodeada pelas bacias do Araripe, Parnaíba, Apodi e sedimentos da Província Costeira. Os aquíferos fraturados são de baixa produtividade. Nas áreas onde ocorrem as bacias sedimentares do estado, os aquíferos apresentam maior potencial produtivo decorrente do armazenamento em porosidade primária (CPRM, 2014).

O clima Tropical Quente Semiárido ocorre em 67,87 % da área do estado (IPECE 2007) e a vegetação típica é constituída pela Caatinga. Complementam o cenário vegetações como Matas Úmidas, Matas Secas, Mata Ciliar, Vegetação de Tabuleiros e Complexo Vegetacional da zona litorânea.

## **6.2. Geologia regional**

Cerca de 70% do Estado do Ceará pertence à Província Borborema, de idade pré-cambriana. Completam o cenário geológico cearense as formações paleozoicas e mesozoicas da bacia do Parnaíba, Araripe, Potiguar, Iguatu, Lima Campos, Icó, Rio do Peixe e Lavras de Mangabeira e os sedimentos cenozoicos da Província Costeira, representada principalmente pela Formação Barreiras. Na área de estudo predomina o Complexo Cruzeta, pertencente ao Domínio Ceará Central, no norte da província.

### *6.2.1. Província Borborema*

A Província Borborema foi definida por Almeida et al. (1977, apud Brito Neves, 1983) como uma região de dobramentos de mobilidade tectono-termal afetada pelo Ciclo Brasileiro. Abrange grande parte do território nordestino e é limitada por dois núcleos cratônicos, São Luís e São Francisco, a norte e sul, respectivamente. A oeste limita-se com a Bacia do Parnaíba e a leste e norte com a Província Costeira.

Brito Neves et al. (1995) descrevem a Província Borborema como uma ampla região de dobramentos do tipo *branching system of orogens*, constituída por sequências supracrustais vulcano-sedimentares datadas do Paleoproterozóico Tardio, Mesoproterozóico e Neoproterozóico, e disposição estrutural proveniente do final do Ciclo Brasileiro, último evento tectônico de grande magnitude e responsável pela formação do Gondwana Ocidental.

A Província Borborema é dividida em três subprovíncias (Meridional, Transversal e Setentrional) limitadas por duas zonas de cisalhamento brasileiras, Pernambuco e Patos. A subprovíncia Setentrional, situada a norte do Lineamento Patos, ocupa cerca de 90% do território do Estado do Ceará, e dentro desta foram definidos três domínios tectônicos: Médio-Coreaú, Ceará Central e Rio Grande do Norte (CPRM, 2014).

O Domínio Médio-Coreaú, situado a NW da Zona de Cisalhamento Sobral-Pedro II (Transbrasílico), tem direção NE-SW, caráter transcorrente dextral, idade neoproterozoica (Bizzi et al., 2003) e é interpretado como produto da colagem entre o cráton São Luís-Oeste Africano e terrenos encontrados entre o Hoggar Central e o Ceará Central-Jaguaribeano (CPRM, 2014). Considerada uma importante feição geológica nordestina, compreende diversas litologias com distintas idades, associadas a um mesmo Cinturão Orogênico (Torquato e Neto, 1996).

O Domínio Ceará Central é limitado a noroeste pela Zona de Cisalhamento Sobral-Pedro II, a sudeste pela Zona de Cisalhamento Senador Pompeu, a leste pelos sedimentos cenozóicos e mesozóicos da Planície Costeira e a oeste pelos sedimentos do Grupo Serra Grande da Bacia do Parnaíba, ocupando cerca de 40% do território cearense (CPRM, 2014). Inclui cinco conjuntos lito-estruturais distintos (Arthaud, 2007): embasamento policíclico (Complexo Cruzeta, Suíte Madalena e Unidade Algodões), coberturas metassedimentares monocíclicas (Grupo Ceará), complexo anatético-ígneo monocíclico (Complexo Tamboril-Santa Quitéria), granitos brasileiros e molassas tardi-brasilianas.

Limitado a noroeste pela Zona de Cisalhamento Senador Pompeu e a sul pela Zona de Cisalhamento Patos, o Domínio Rio Grande do Norte é subdividido nas faixas Orós-Jaguaribe e Seridó (CPRM, 2003). A faixa Orós-Jaguaribe é um cinturão sigmoidal, com cerca de 500 km de extensão, constituído por duas sequências metavulcanossedimentares (Faixa Orós e Faixa Jaguaribe) associadas a ortognaisses porfíricos de caráter alcalino e divididas pelo embasamento, que, por sua vez, é subdividido entre os blocos Jaguaretama e São Nicolau (Parente e Arthaud, 1995). Os metassedimentos são, geralmente, pelíticos com intercalações quartzíticas e calcíticas.

A Subprovíncia Setentrional, ou Zona Central, é definida com um sistema de zonas de cisalhamento transcorrentes dextrais de direção E-W e sinistrais de direção NE-SW (Bizzi et al., 2003), que englobam sequências metavulcanossedimentares Proterozóicas e são cortadas por rochas graníticas brasileiras (Brito Neves, 1983). É segmentado pelos Lineamentos Patos e Pernambuco, a oeste e leste, respectivamente, e integra as Faixas Cachoeirinha, Alto Pajeú, Alto Moxotó e Rio Capibaribe.

A Subprovíncia Meridional é a porção da Província Borborema compreendida entre o Lineamento Pernambuco e o Cráton São Francisco. Os Domínios Paulistana-Monte Orebe e Riacho do Pontal, situados na porção oeste do setor, comumente tratados em conjunto, têm sido atribuídos a idades e processos divergentes. O Domínio Paulistana-Monte Orebe tem embasamento Mesoproterozóico e é constituinte do Evento Cariris Velho (Brito Neves et al., 1995), sendo limitado a sul e a leste pelas supracrustais brasileiras da Faixa Riacho do Pontal por uma zona de cisalhamento transpressiva (Bizzi et al., 2003). Os Domínios Pernambuco-Alagoas, Sergipano, Itabaiana-Simão Dias e Jirau do Ponciano ocupam a maior área do Setor Meridional, e são divididos pelas bacias do Tucano Norte e Jatobá em dois grandes terrenos (Hasui et al., 2012). O Arqueano da subprovíncia é representado por rochas metavulcanossedimentares do Domínio Jirau do Ponciano e ortognaisses do Domínios Itabaiana-Simão Dias e Pernambuco Alagoas). O Paleoproterozoico abriga apenas os gnaisses do Domínio Jirau do Ponciano, com evolução associada ao Transamazônico. As unidades metavulcanossedimentares e metassedimentares da Faixa Sergipana fazem parte do Neoproterozóico.

### 6.2.2. *Bacias sedimentares*

#### 6.2.2.1. Bacia do Parnaíba

A Bacia do Parnaíba ocupa cerca de metade da Província Parnaíba, nos estados do Ceará, Piauí, Bahia, Pará, Tocantins e Maranhão,abrigo sedimentos de rifts periféricos cambro-ordovicianos (Brito Neves, 1983) Jaibaras, Ubari, Jaguarapi, Cococi e São Julião, entre outros. A bacia é limitada estruturalmente a noroeste pelo Arco de Tocantins, a sul pelo Arco de São Francisco e a norte pelo Arco Ferrera-Urbano-Santos (Hasui et al., 2012).

#### 6.2.2.2. Bacia do Araripe

Tida como a maior exposição de rochas cretáceas dentre as bacias nordestinas (12.200 km<sup>2</sup>), a Bacia do Araripe, de idade Cretácea, localiza-se a sul do Estado do Ceará e oeste do Estado de Pernambuco (Hasui et al., 2012). Quatro sequências estratigráficas, com gênese distinta e limitadas por discordâncias, são definidas dentro da bacia (Assine, 1992). A Formação Cariri é constituída por arenitos de idade paleozoica, enquanto que as formações Brejo Santo, Missão Velha e Abaira são de idade juro-neocomiana. No Estado do Ceará, as sequências sedimentares da Bacia do Araripe são expostas na forma do flanco norte da escarpa da Chapada do Araripe, um planalto elevado não dissecado (CPRM, 2003).

#### 6.2.2.3. Bacia Potiguar

A Bacia Potiguar é localizada principalmente no Estado do Rio Grande do Norte, com uma pequena porção situada no noroeste do Estado do Ceará. Faz parte do grupo de bacias sedimentares da margem equatorial brasileira de caráter transformante, com evolução transtensiva associada a movimentos transcorrentes, ambos dextrais (Hasui et al., 2012). A bacia abrange cerca de 48.000 km<sup>2</sup>, sendo que 45% encontra-se emersa e 55% submersa (Pessoa Neto et al., 2007). Os mesmos autores definem três supersequências na coluna estratigráfica: Supersequências Rife e Pós-Rife, que abrigam sedimentos flúvio-deltaicos e Supersequência Drifte, caracterizada por uma sequência flúvio-marinha transgressiva. A Bacia Potiguar é, na sua porção emersa, um rift intracontinental, enquanto que na sua porção submersa é caracterizada como uma bacia do tipo pull-apart (Moura-Lima, 2011).

#### 6.2.2.4. Bacias interiores

As bacias interiores no Estado do Ceará estão associadas ao processo de separação da América do Sul e da África, há 150 milhões de anos. A reativação de antigos alinhamentos estruturais de rochas do embasamento foi responsável pelo controle e formação desses núcleos sedimentares (Hasui et al., 2012). Exemplos são as Bacias de Iguatu, Lima Campos, Icó, Rio do Peixe e Lavras de Mangabeira..

### 6.2.3. *Província Costeira*

A Província Costeira, no Estado do Ceará, está distribuída ao longo de toda a porção litorânea, sendo representada pelos sedimentos cenozóicos do Grupo Barreiras (CPRM, 2003). Configura-se como um substrato sobre o qual estão assentados os sedimentos Quaternários brasileiros (Bezerra; Mello; Suguio, 2006). Com uma grande diversidade de litotipos e de ambientes de deposição, o Grupo Barreiras é enquadrado temporalmente entre o Mioceno e o Plioceno-Pleistoceno.

A Formação Barreiras, anteriormente interpretada como de origem continental e não deformada tem sido, com o crescente número de trabalhos produzidos, analisada sob a perspectiva de uma associação de ambientes continental, transicional e marinho raso (Bezerra; Mello; Suguio, 2006; Bezzerra, 2011). Constatou-se também a deformação da unidade em todas as escalas de observação, responsável pelo controle da sedimentação durante o Cenozoico e da atual disposição da topografia da margem continental (Bezerra, 2011).

### 6.2.4. *Neotectônica*

O termo neotectônica foi criado por Obrushev (1948, apud Neto, 2007) para descrever os movimentos da crosta terrestre ocorridos durante o Terciário Superior e o Quaternário. O período de atuação dos esforços é ainda tema de discussão entre os autores, o que levou a Comissão de Neotectônica da Associação Internacional de Estudos Quaternários (NC/INQUA) a criar em 1978 uma definição atemporal para o termo: “Qualquer movimento de Terra ou deformação do nível de referência geodésico, seus mecanismos, sua origem geológica (independente de quão antiga seja), suas implicações para várias aplicações práticas e suas extrapolações futuras”.

A síntese de estudos de geologia estrutural associados aos campos de tensão neotectônicos é essencial na determinação das direções de fraturamento propensas à abertura e, conseqüentemente, com maiores valores de fluxo de água (Fernandes 1997, Silva & Jardim de Sá, 2000, Fernandes & Rudolph 2001, Fernandes 2008, entre outros). Fraturas paralelas ao esforço compressivo atual seriam mais aptas a serem abertas em relação a fraturas perpendiculares a este esforço.

Os sistemas de tensões neotectônicas atua em porções rasas da crosta, e são os principais responsáveis pela existência e migração de água em aquíferos fraturados (Jardim de Sá, 2000).

A neotectônica é tratada, no território brasileiro, a partir do Neógeno com a deriva para oeste da placa Sul-Americana (Hasui & Sena Costa, 1996), caracterizado por um regime transcorrente vigente até os dias atuais.

O principal controle neotectônico atuante na porção brasileira da Plataforma Sulamericana é a sua localização entre as margens continentais pacífica ativa e atlântica passiva (Hasui, 1990; Saadi, 1993). Na margem ativa o controle é realizado pela orogênese andina, produto da subducção da Placa de Nazca sob a Placa Sulamericana, enquanto na margem atlântica os esforços são gerados principalmente por forças de empurrão, exercidas pela abertura da dorsal meso-oceânica.

Para Saadi (1993), o início da neotectônica no território brasileiro se dá no Eoceno-Oligoceno, junto ao evento andino *Incaic II*, concomitante à formação do “Sistema de *rift* da Serra do Mar”, das bacias do Quadrilátero Ferrífero e ao início da sedimentação da Formação Barreiras.

Segundo o mesmo autor o evento neotectônico andino *Quetchuán II*, inserido no Plioceno, teve alcance global e foi responsável pelo rifteamento São João del Rei, de componentes intermediários da Formação Barreiras e da Formação Solimões. Do Pleistoceno Médio a Inferior, o evento andino *Yarmouthian* estaria relacionado ao soerguimento da plataforma brasileira, emersão de porções litorâneas e deslocamento e deformação de camadas do Grupo Barreiras e falésias situadas nas regiões norte e nordeste. O principal controle das atividades neotectônicas desenvolvidas no território brasileiro é a localização da plataforma entre as margens continentais ativa e passiva.

A definição temporal de neotectônica é variável, mas de um modo geral inclui o período no qual o esforço tectônico atual esteve presente. No nordeste brasileiro este período engloba o Holoceno (Saadi, 1993; Jardim de Sá, 2000). O regime de esforços predominante no Nordeste Brasileiro atualmente, segundo Saadi & Torquato (1992), é produto da compressão na Cordilheira dos Andes, do afastamento da Dorsal Meso-Atlântica e da força de arrasto da base da litosfera. O campo de tensão principal ( $\sigma_1$ ) tem direção E-W, portanto fraturas com essa orientação ou sub-paralelas atuam como fraturas abertas, propícias a aumentarem o fluxo subterrâneo e formarem aquíferos fraturados (Jardim de Sá, 2000; Coriolano et al., 2000; Silva & Jardim de Sá, 2000; Silva (2013), entre outros).

No estado do Ceará as grandes zonas de cisalhamento NE-SW, interceptadas por falhas NW-SE, contêm importantes epicentros (Saadi & Torquato, 1992). Segundo os mesmos autores a porção central do Estado do Ceará, que engloba os blocos tectônicos Santa Quitéria e Itapagé (Domínio Ceará Central), tem sua estruturação geomorfológica afetada pela tectônica cenozoica, sendo o bloco Santa Quitéria soerguido após a sedimentação da Formação Barreiras.

### **6.3. Geomorfologia do Ceará**

O Estado do Ceará é dividido em diversos domínios geomorfológicos, dos quais destacam-se a Depressão Sertaneja, Maciços Residuais Cristalinos, Tabuleiros Costeiros e as Chapadas do Araripe, Apodi e Ibiapaba.



A Depressão Sertaneja com suas superfícies aplainadas, disposta entre as cotas 250 e 500 metros, ocupa a maior parte do território cearense. As feições de relevo são resultado da longa ação de processos de erosão e denudação do embasamento, pertencentes à Província Borborema (CPRM, 2014). Os Maciços Residuais Cristalinos, por sua vez, representam porções denudadas desse embasamento cristalino, constituído de granitóides e rochas quartzíticas, que resistiram ao intemperismo e permaneceram expostas na forma de altos topográficos (600 a 1100 metros) em meio à Depressão Sertaneja (CPRM, 2014).

Os Tabueiros Costeiros são formas de relevos tabulares, distribuídas pelo litoral cearense, formadas nos sedimentos cenozóicos da Província Costeira (Grupo Barreiras) e com elevação de 30 a 100 metros.

As Chapadas do Araripe, Apodi e Ibiapaba são feições de relevo limítrofes do território cearense. A Chapada do Araripe situa-se na porção meridional do estado e ainda percorre os estados do Piauí e Pernambuco, com cotas elevadas (800 a 950 metros) e formada pelas rochas sedimentares da Bacia do Araripe. A Chapada do Apodi, localizada entre os estados do Ceará e Rio Grande do Norte, é definida como um extenso baixo platô sustentado pelas rochas sedimentares da Bacia Potiguar entre as cotas 80 e 160 metros. Já a Chapada da Ibiapaba, situada no limite com o estado do Piauí, constitui uma área soerguida em função do evento epirogênico da borda leste da Bacia do Parnaíba (CPRM, 2014).

#### **6.4. Poços nos aquíferos fraturados do Ceará**

Os aquíferos fraturados perfazem cerca de 75% do território do estado, constituídos por rochas ígneas e metamórficas do embasamento cristalino (Medeiros et al., 2011; Teixeira, 2003).

Os poços situados em regiões cristalinas do Ceará possuem 13% da vazão aferida nos poços locados em bacias sedimentares (Silva et al., 2007). A baixa produção, associada à elevada salinidade das águas subterrâneas, dificulta a alternativa de abastecimento, uma vez que a exploração é sucedida por uma etapa de dessalinização dessas águas. Além destes fatores, as altas taxas de evapotranspiração associadas a pequenas espessuras de manto inconsolidado (Teixeira, 2003) dificultam a recarga dos aquíferos cristalinos no estado do Ceará, e consequentemente diminui sua produção. Esses fatores somados implicam em um regime intermitente dos rios e baixa qualidade das águas subterrâneas.

Ao final de 2003, cerca de 63% dos poços instalados no Ceará estavam alocados no embasamento cristalino (Silva et al., 2007). Apesar da baixa produtividade destes poços a demanda da população por água, em função dos extensos períodos de estiagem, continua elevada, o que implica na construção de poços como alternativa para o abastecimento.

## 7. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA ÁREA DE ESTUDO

### 7.1. Aspectos fisiográficos

De acordo com o IPECE (2007), o clima na cidade de Boa Viagem é definido como Tropical Quente Semi-Árido, com pluviosidade média anual em torno de 700 mm. A temperatura média anual varia de 23 a 29°.

A vegetação é típica de regiões semiáridas cearenses, composta por Floresta caducifólia espinhosa (caatinga arbórea), Caatinga arbusiva densa e Floresta subcaducifólia tropical pluvial (mata seca).

Pertencente à Bacia Hidrográfica do Banabuiú, a principal drenagem do município é o rio Quixeramobim (Feitosa, 1998). O açude Boa Viagem, responsável pelo abastecimento de 93% da população, possui capacidade de 7,2 hm<sup>3</sup> de água.

Predominam no relevo do município as superfícies aplainadas da Depressão Sertaneja. Os maciços residuais cristalinos ocorrem principalmente nas porções sul e noroeste, sendo representativos de porções denudadas do embasamento cristalino. São exposta na forma de serras alongadas de direção NE-SW.

### 7.2. Geologia Local

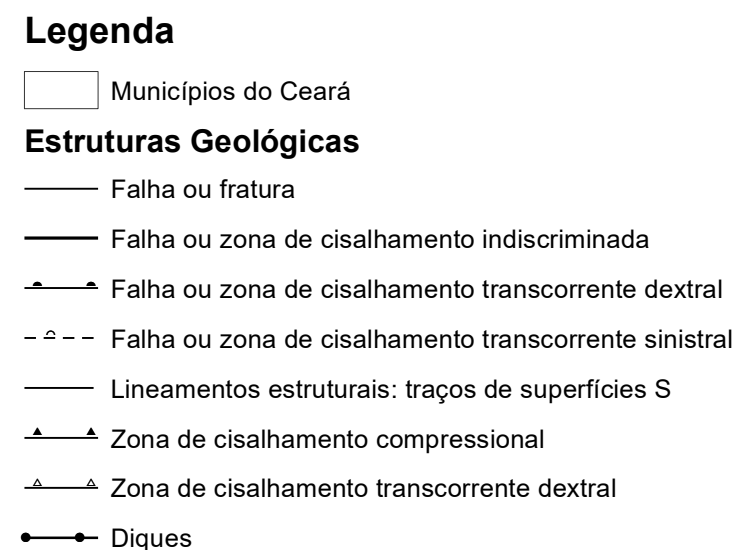
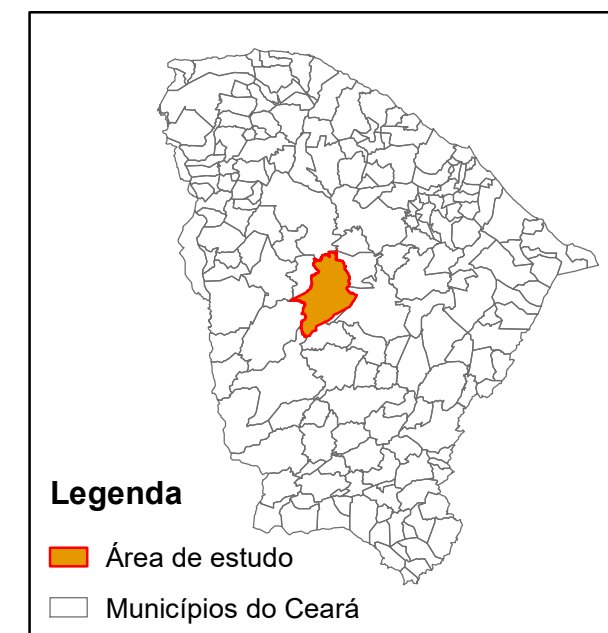
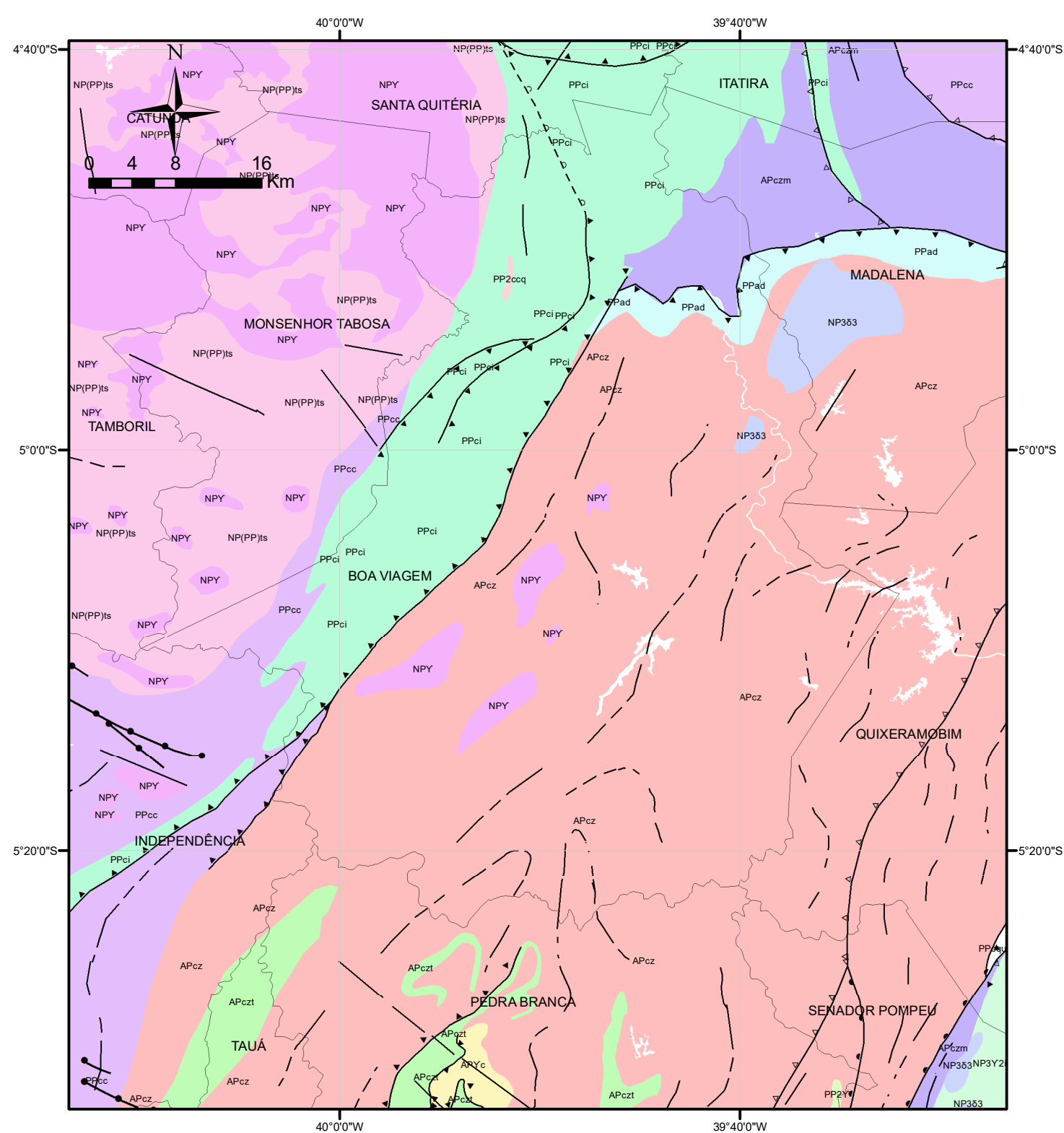
Neste capítulo são descritas as principais unidades geológicas e suas relações tectônicas e estruturais, presentes na região.

Grande parte da região é englobada pelo Complexo Cruzeta (**Figura 2**), também chamado de “Maciço de Tróia”, pertencente ao Domínio Ceará Central, na porção setentrional da Província Borborema.

Segundo Oliveira & Cavalcante (1993), o Complexo Cruzeta constitui um segmento crustal do embasamento composto por três unidades arqueanas retrabalhadas no Proterozoico: Mombaça, Pedra Branca e Troia.

A Unidade Mombaça está situada predominantemente ao longo dos municípios de Boa Viagem (porção norte), Madalena e Itatira, sendo caracterizada por uma associação gnáissico-migmatítica constituída por biotita gnaisses diversos, ortodetivados, de composição granodiorítica, granítica e quartzo-diorítica (Oliveira & Cavalcante (1993). Subordinadamente ocorrem lentes de anfíbolitos, calciossilicátias, metacalcários, quartzitos ferruginosos e metaultramáficas. Disposta na forma de uma faixa direcional NE-SW, é limitado pela Zona de Cisalhamento Senador Pompeu, a sudeste, e pela Zona de Cisalhamento Sabonete Inharé, a noroeste.

A Unidade Pedra Branca ocupa a maior parte do Complexo Cruzeta, sendo exposta nos municípios de Pedra Branca, Boa Viagem, Independência, Senador Pompeu, Quixeramobim e Madalena. Engloba majoritariamente ortognaisses cinzentos de composições quartzo-dioríticas, granodioríticas e graníticas característicos de crosta juvenil



<b>FIGURA 2: GEOLOGIA DA ÁREA DE ESTUDO</b>
<b>PROJETO: TRABALHO DE FORMATURA</b>
<b>INSTITUIÇÃO: INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO</b>
<b>FONTE: MALHA MUNICIPAL - IBGE (2015) GEOLOGIA - MAPA DE GEODIVERSIDADE DO ESTADO DO CEARÁ - 1:750000 (CPRM, 2014)</b>

Supersuíte Granitóide Sintardi- orogénica	NP3δ3	Suíte Gabróide 3: dioritos incluindo, subordinadamente, gabros e granitóides.
	NP3Y2i	Suíte Granitóide Itaporanga: granitos e granodioritos de granulação grossa e porfíricos, à biotita +/- anfibólio, associados a dioritos e fases intermediárias de misturas; monzogranitos subordinados.
	NPY	Granitóides diversos: biotita-granitos, monzogranitos, sienitos, quartzomonzonitos e granitos porfíricos, em parte somados num mesmo espaço cartografado. NP(?) g- granitóides de cronologia NP duvidosa.
Complexo Ceará	NP(PP)ts	Complexo Tamboril-Santa Quitéria: associação granito-migmatítica, envolvendo granitóides neoproterozóicos, cinzentos e rosados, de granulação variável até termos porfíricos, gnaissificados ou não, em jazimentos de geometrias e dimensões diversas; para e ortognaisses migmatíticos, além de rochas calcissilicáticas, anfibolitos e, localmente, rochas ferríferas e metaultramáficas (relacionadas, no geral, ao Complexo Ceará e sendo, as primeiras, freqüentes como enclaves dos granitóides)
	PPci	Unidade Independência: paragnaisses e micaxistos aluminosos (em parte migmatíticos), incluindo quartzitos, metacalcários, rochas calcissilicáticas e, mais raramente, anfibolitos (micaxistos, paragnaisses e quartzitos; paragnaisses e micaxistos).
	PPcc	Unidade Canindé: paragnaisses em níveis distintos de metamorfismo-migmatização, incluindo ortognaisses ácidos (p.ex: em cogn) e rochas metabásicas.
	PPad	Unidade Algodões: paragnaisses diversos, em parte de protólito arcoseano, metabasaltos, anfibolitos, metaultramáficas e formações ferríferas, por vezes associados a e diques de ortognaisses leucocráticos e mesotipos; anfibolitos e/ou anfibólio gnaisses associados, em parte, a gnaisses dioríticos e metaultramafitos.
Complexo Cruzeta	APYc	Suíte Granitóide Cedro: leucogranitóides metamorfizados de granulação média a grossa, composição granito-granodiorítica raramente tonalítica.
	APcz	Indiferenciado: domínio de ortognaisses cinzentos (TTG), paragnaisses e migmatitos, encerrando lentes de anfibolitos/metabasaltos, metagabros, metaultramáficas, metacalcários, micaxistos, gonditos, formações ferríferas/itabiritos e rochas calcissilicáticas.
	APczm	Unidade Mombaça: ortognaisses granodioríticos, graníticos e tonalíticos, geralmente cinzentos, e migmatitos, dominando sobre anfibolitos, metagabros, metaultramáficas, charnockitos (raros), metacalcários e rochas calcissilicáticas.
	APczt	Unidade Tróia: metagabros, metabasaltos e, acessoriamente, metaultramáficas, metadioritos e metatufos básicos (associados ou não a metassedimentos); quartzitos, xistos, metachertes, formações ferríferas, paragnaisses, gonditos, metacalcários impuros e rochas calcissilicáticas; segmento realçado pela existência de paragnaisses e micaxistos cianíticos.

gerada em ambientes de arco magmático (CPRM, 2014). Em associação ocorrem biotita-gnaisses localmente sieníticos, que constituem as encaixantes das rochas da Unidade Troia, diques de leucogranitos pegmatoides e metabasitos (Oliveira & Cavalcante, 1993).

A Unidade Tróia é uma associação plutono-vulcano-sedimentar máfica-ultramáfica constituída por ortoanfibolitos, metatudos básicos e, subordinadamente, quartzitos, micaxistos, metachertes e rochas calcissilicáticas (Oliveira & Cavalcante, 1993). Na área de estudo, a unidade é encontrada na porção noroeste da cidade de Pedra Branca.

Estruturalmente, as unidades Troia e Pedra Branca apresentam foliação com direção principal NNE-SSE, característica de baixo ângulo, afetadas por deformação de tectônica de nappes Caby & Arthaud (1986, apud Naletto et al., 2011). Já a Unidade Mombaça apresenta foliações de direção NE-SW com alto mergulho para SE e NW, resultantes da sua proximidade das zonas de cisalhamento Senador Pompeu e Sabonete-Inharé.

## 8. AQUÍFEROS FRATURADOS

A análise de fluxo em aquíferos cristalinos depende da escala adotada, e pode ser realizada a partir de duas abordagens: meio contínuo e meio descontínuo (discreta). Na abordagem do meio contínuo a rocha fraturada é considerada, hidraulicamente, equivalente a uma rocha porosa. Neste contexto são aplicáveis as Leis de Darcy, o que simplifica a avaliação (Domenico & Schwartz, 1990). No caso da abordagem discreta, o fluxo é descrito em relação a fraturas individuais, ou a zonas de fraturas.

A abordagem descontínua é aplicável a uma escala de detalhe, na qual seriam realizados trabalhos de campo para análise estrutural e neotectônica, perfilagens acústicas ou óticas para identificação de fraturas e perfilagens das propriedades da água (temperatura, condutividade elétrica e velocidade do fluxo) indicativas de fraturas mais transmissivas (Fernandes, 2008).

Pode-se realizar também uma análise preliminar, na qual o fluxo não é tratado a partir de fraturas individuais ou zonas de fraturas. Nesta análise o objetivo é a identificação de critérios para locação de poços a partir da confrontação entre os dados de capacidade específica de poços existente e os fatores que podem alterar estes valores, como litologia, compartimentação topográfica, espessura do manto inconsolidado e proximidade a lineamentos e intersecção de lineamentos (Fernandes, 2008).

Existem 3 mecanismos de propagação que podem ser responsáveis pela abertura de fraturas (**Figura 3**), segundo Lawn & Wilshaw (1975, apud Fernandes, 2008): por abertura (extensional), no qual o esforço de tração é perpendicular ao plano de fratura; por cisalhamento com deslizamento paralelo ao plano de ruptura e à frente de propagação; e por cisalhamento com deslizamento perpendicular ao plano fraturado e à frente de propagação.

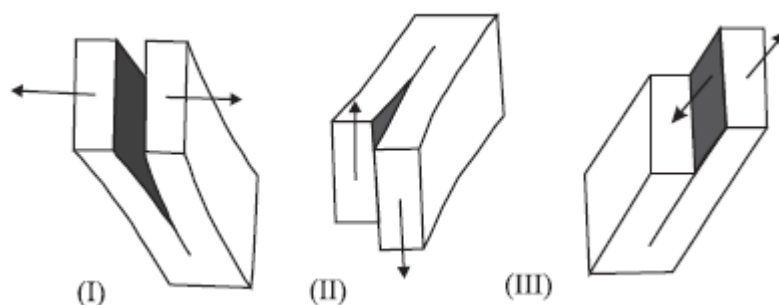


Figura 3: Mecanismos de propagação de fraturas: (I) por extensão perpendicular à frente de propagação; (II) por cisalhamento com deslizamento paralelo à superfície de fratura; e (III) por cisalhamento com deslizamento perpendicular à superfície de fratura. Retirado de Lawn & Wilshaw (1975, apud Fernandes, 2005).

A maneira pela qual as fraturas se propagam tem efeito direto na produção de água subterrânea em aquíferos fraturados. Tal avaliação passa pela identificação de fraturas abertas, mais propícias à acumulação de água. Tendo em vista que as deformações neotectônicas no cristalino precambriano se dão em níveis superficiais da crosta, espera-se uma reativação das estruturas pré-existentes nesses níveis crustais, e uma menor quantidade de fraturas neo-formadas, sendo que a orientação da fratura reativada depende da orientação do elipsóide de tensões dos eventos posteriores (Price & Cosgrove, 1990).

## 9. MATERIAIS E MÉTODOS

### 9.1. Revisão bibliográfica

O levantamento bibliográfico, realizado ao longo de todas as atividades, englobou assuntos referentes ao histórico de secas, geologia, geomorfologia e hidrogeologia do Ceará. Adicionalmente, foram levantados trabalhos relacionados à análise da produtividade de poços em regiões semiáridas e à condutividade hidráulica de fraturas em aquíferos cristalinos. Para a aplicação das metodologias, foram utilizados trabalhos sobre processamento e interpretação de imagens orbitais e análises morfoestruturais e de lineamentos.

### 9.2. Software e integrações em ambiente SIG

Em ambiente SIG foram analisados, de forma integrada, dados de vazão de poços, mapas geológicos e hidrográficos, modelos digitais de terreno e imagens multiespectrais (sensoriamento remoto). Destas análises foram gerados produtos cartográficos interpretados (mapas de lineamentos e mapa de densidade de lineamentos) para contribuir ao entendimento das principais variáveis geológicas controladoras da produtividade de poços.

#### 9.2.1. Mapa geológicos e demais bases físicas

O Mapa de Geodiversidade do Estado do Ceará, do Serviço Geológico do Brasil (CPRM), forneceu as bases geológicas, compatível com a escala 1:750.000, desse estudo. O



mapa foi obtido na plataforma Geobank (<http://geosgb.cprm.gov.br/>) e dispôs as informações referentes aos agrupamentos litológicos e geomorfológicos realizados neste trabalho.

#### *9.2.2. Modelo digital de terreno (MDT) e Hipsometra*

Os dados espaciais de terreno utilizados provêm do satélite Alos Palsar, projeto desenvolvido com o intuito de agregar informações para trabalhos científicos na área de sensoriamento remoto. As imagens darão base à produção do modelo digital de terreno (MDT), uma representação matemática que, a partir de ferramentas de ângulos de iluminação e sombra de imagens, gera uma imagem tridimensional de superfície. O modelo digital de terreno (MDT), a fim de se obter uma compartimentação geomorfológica da área, foi gerado a partir da ferramenta Hillshade do software ArcMap™ 10.3 (ESRI, 1999). Este recurso propicia a identificação de discontinuidades no terreno, uma vez que as estruturas são ressaltadas quando a incidência de luz é oblíqua ou perpendicular a sua direção. Blocos geológicos, delimitados por zonas de cisalhamento, falhas e lineamentos de dimensão regional, foram indicados por Fernandes (2008) como condicionantes da produtividade de poços.

O mapa hipsométrico foi confeccionado através da ferramenta de interpolação Standard Deviations do software ArcMap™ 10.3 (ESRI, 1999). Este mapa permite uma melhor visualização das diferentes formas de relevo, aspectos morfoestruturais e compartimentos geomorfológicos.

#### *9.2.3. Mapa e traçado de lineamentos*

O mapa de lineamentos foi gerado a partir da interpretação manual, na tela do computador, do modelo digital de terreno, incrementado pela rede de drenagem digitalizada. O traçado das feições lineares foi realizado na plataforma ArcMap™ 10.3, segundo as diferentes direções de iluminação do modelo digital de terreno. As medidas de azimuth e comprimento dos lineamentos, obtidas a partir da ferramenta COGO do software ArcMap™ 10.3, permitem o cálculo da inclinação de feições em relação ao norte e dos seus comprimentos.

O traçado dos lineamentos foi realizado manualmente na escala 1:100.000, de acordo com as iluminações artificiais utilizadas (045° e 135°). Os critérios utilizados para a extração dos lineamentos foram baseados no trabalho de Liu (1984), que considera como feições retilíneas do relevo segmentos de escarpa, alinhamentos de vales e trechos de rios e lagos e linhas de costa alongados.

Uma vez traçados, os lineamentos foram analisados de acordo com sua direção e comprimento, através de diagramas de rosetas. Os valores obtidos foram exportados do ArcMap™ 10.3 para uma tabela do Excel 2007 que, posteriormente, foi importada ao software

Oriana, desenvolvido pela Kovach Computing Services, no qual gerou-se as rosetas de frequência das direções de comprimento acumulado dos lineamentos de acordo com as direções.

Procedeu-se o traçado dos lineamentos, agora na escala 1:25.000, nas regiões com raio de cerca de 1 km ao redor dos poços presentes na área. Os valores de direção e comprimentos foram extraídos novamente e expostos em forma de rosetas. Adicionalmente foram construídos gráficos de frequência acumulada da capacidade específica dos poços em função da sua distância aos lineamentos, bem como da sua direção.

#### *9.2.4. Mapa de densidade de lineamentos*

O mapa de densidade de lineamentos foi gerado para todas as direções dos lineamentos traçados na escala 1:100.000, a partir da ferramenta *Line Density* do programa ArcMap™ 10.3. A densidade nesta ferramenta é calculada em unidades de comprimento das feições lineares por unidade de área (km/km<sup>2</sup>).

## **10. RESULTADOS**

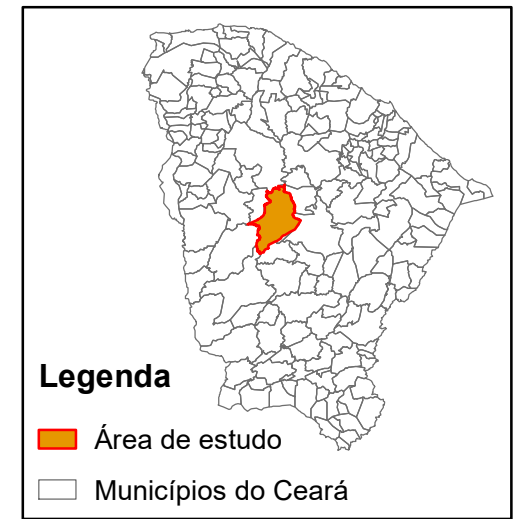
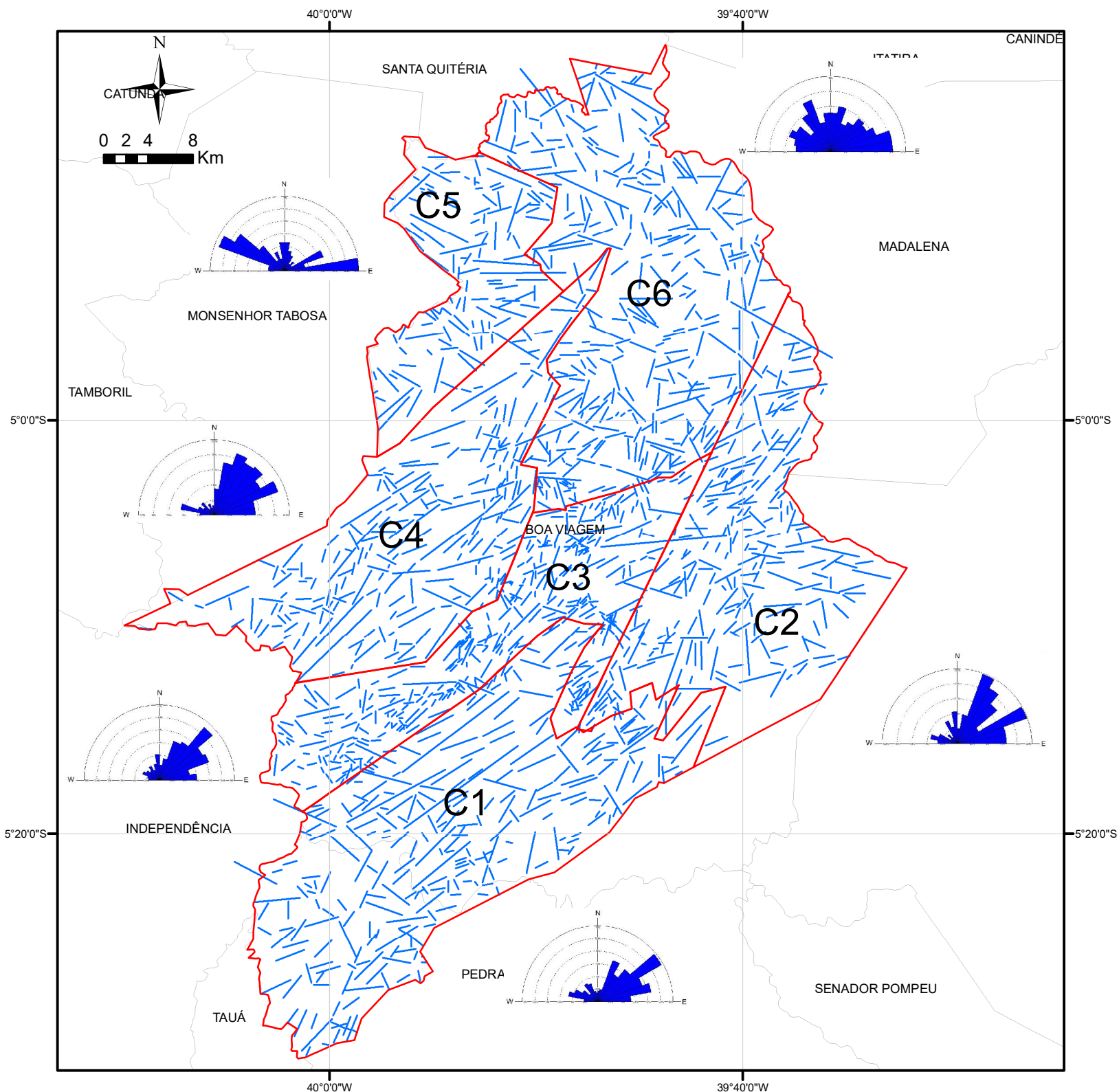
### **10.1. Análise regional**

#### *10.1.1. Análise de lineamentos*

A partir do Modelo Digital de Terreno, foram traçadas manualmente 1515 lineamentos, na escala 1:100.000, com o intuito de realizar uma análise regional preliminar da distribuição dessas feições. A **Figura 4** apresenta o mapa de lineamentos e a compartimentação estrutural da área, enquanto na **Figura 5** pode-se observar o modelo digital de terreno.

Os dados de direção e comprimento das estruturas foram extraídos para uma tabela excel, e com o software Oriana, desenvolvido pela Kovach Computing Services, foram confeccionadas duas rosáceas com intervalos de 10° para a distribuição regional. O primeiro diagrama (**Figura 6**) apresenta a frequência, ou quantidade de traços (em porcentagem) das direções dos lineamentos, enquanto o segundo diagrama (**Figura 7**) mostra o comprimento acumulado (em metros) destes.





**Legenda**

— Lineamentos regionais

FIGURA 4: MAPA DE LINEAMENTOS

PROJETO: TRABALHO DE FORMATURA

INSTITUIÇÃO: INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS -  
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

FONTE: MALHA MUNICIPAL - IBGE (2015)



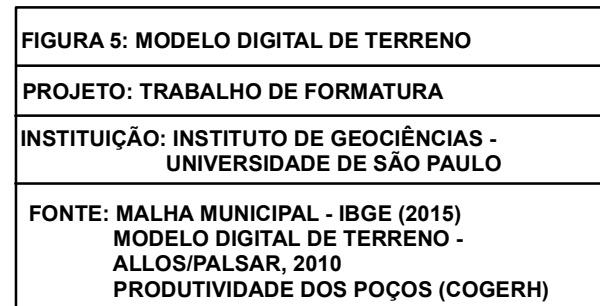
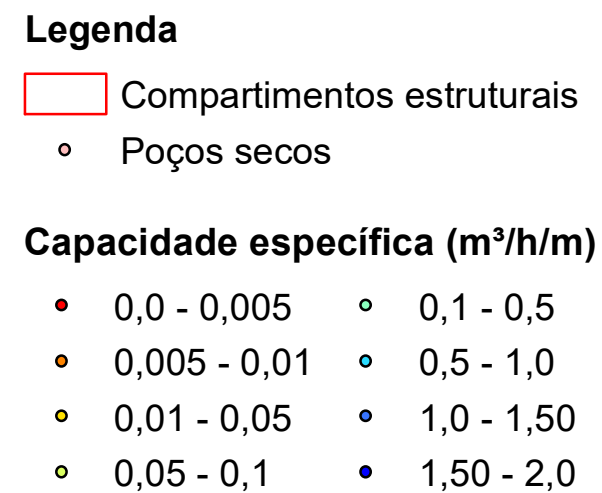
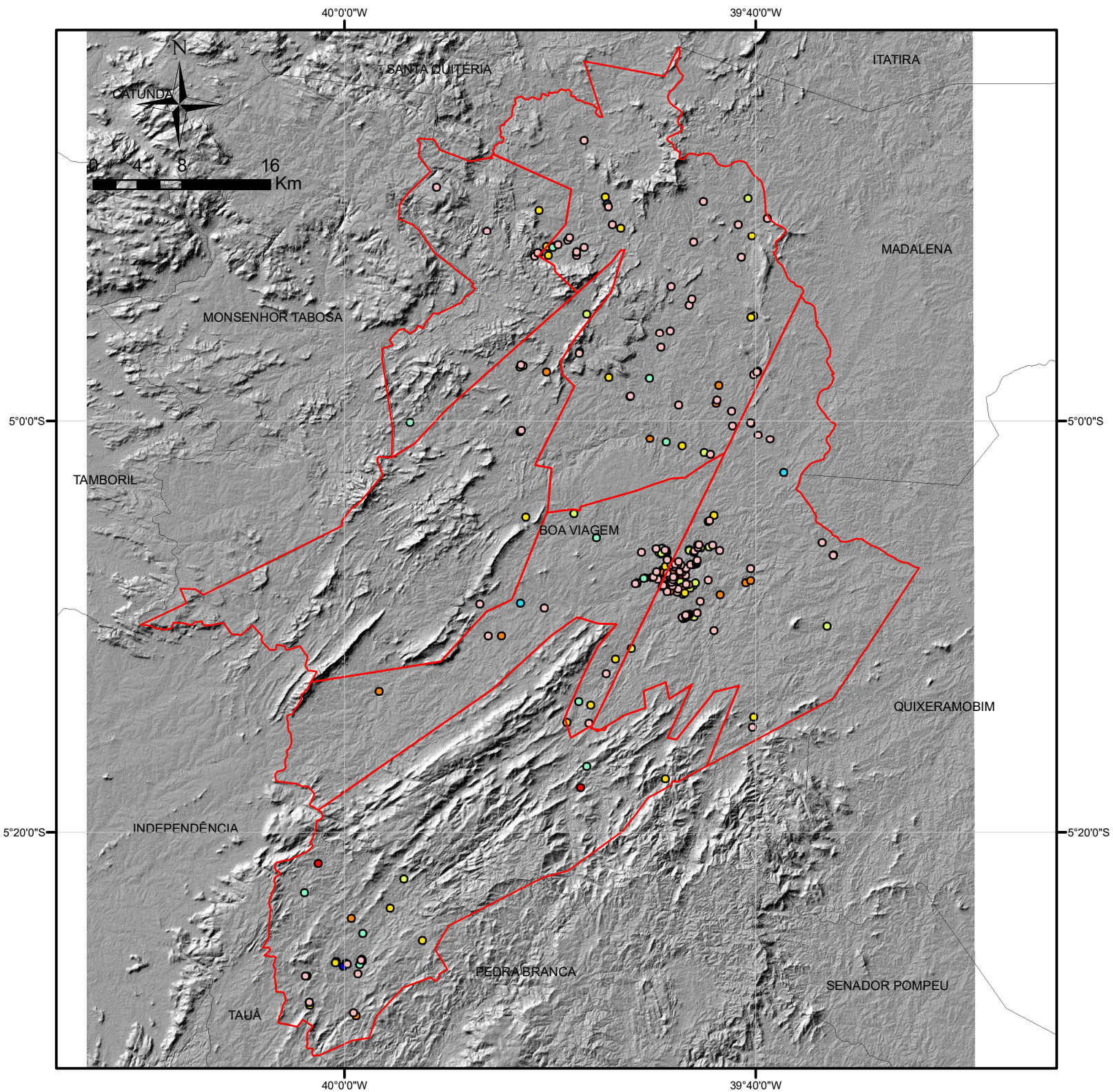




Diagrama de Rosáceas (Frequência das direções)

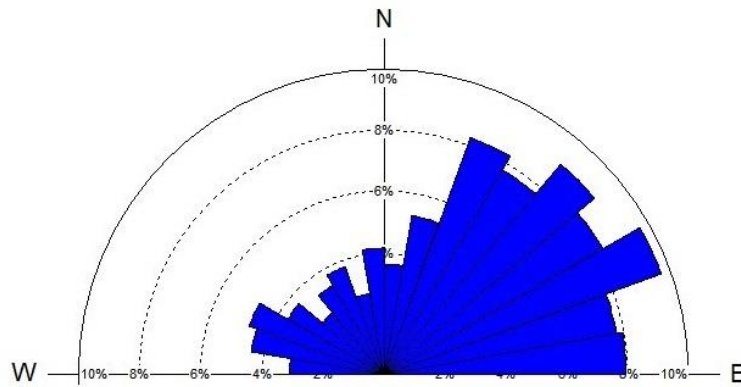


Figura 6: Rosáceas com a frequência de distribuição das direções dos lineamentos (Escala 1:100.000).

No diagrama de frequência das direções, nota-se a predominância de lineamentos NE em relação aos de direção NW, além de uma distribuição uniforme entre N20-90E, que representa cerca de 60% dos lineamentos traçados. Os lineamentos de direção NW apresentam a maior concentração de feições no *trend* N70-80W, totalizando cerca de 10% das estruturas.

Diagrama de Rosáceas (Direção Vs Comprimento)

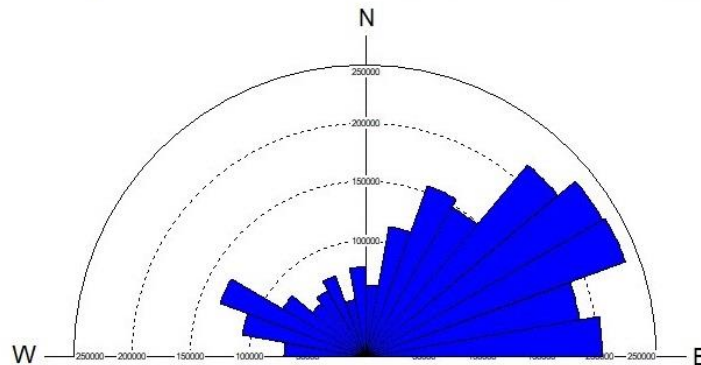


Figura 7: Diagrama de rosáceas com a frequência de distribuição das direções dos lineamentos baseados no comprimento acumulado (em metros) dos lineamentos em um intervalo de 10°.

Na rosácea de comprimento acumulado, percebe-se que os lineamentos de direção N50-90E apresentam maiores comprimentos acumulados, notavelmente no *trend* N50-70E, enquanto os de direção NW, além de menos frequentes, apresentam menores comprimentos acumulados, exceto pelo *trend* N60-70W.

#### 10.1.2. Análise da produção de poços

Os poços são distribuídos em 3 grupos: poços secos, poços com dados de capacidade específica e poços sem esse tipo de dado.

A **Figura 8** apresenta um gráfico de barras com distribuição de frequência acumulada dos poços com capacidade específica. O gráfico mostra que cerca de 60% dos poços

apresenta capacidade específica no intervalo entre 0,01 e 0,1 m<sup>3</sup>/h/m. Além disso, cerca de 80% dos poços apresenta capacidade específica abaixo de 0,1 m<sup>3</sup>/h/m. A mediana para os poços da área de estudo está em torno de 0,04 m<sup>3</sup>/h/m. Salienta-se que foram utilizados dados de 142 poços situados na área de estudo.

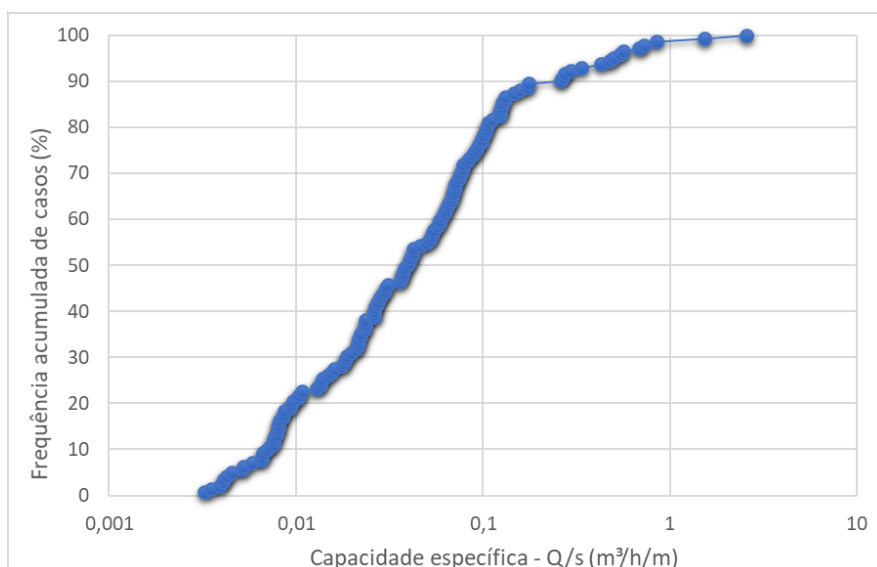


Figura 8: Gráfico de frequência acumulada dos poços com capacidade específica

Após a compartimentação da área com base nos fatores que controlam o fluxo de água subterrânea, optou-se por comparar os valores de capacidade específica dos poços de acordo com a sua posição em determinado compartimento. A maneira mais eficiente de expor tais dados, indicada por Fernandes (2008) é a partir de gráficos de frequência acumulada, que não se limitam a utilizar apenas medidas como a média e a mediana e ajudam a distinguir melhor as populações de dados.

A elaboração destes gráficos foi realizada para os fatores geomorfologia, tipo litológico, topografia, proximidade a lineamentos e proximidade a lineamentos de acordo com sua direção.

Dentre os tipos geomorfológicos separados na primeira etapa do trabalho, foi possível observar na área de estudo superfícies aplainadas, serras alongadas e morros simétricos. Em função da baixa densidade em poços fora das superfícies aplainadas, os dados situados em serras alongadas e morros simétricos, por representarem porções do relevo denudadas e com um controle estrutural mais intenso, foram unidos para a análise comparativa com as áreas mais rebaixadas. Observa-se na **Figura 9** uma clara tendência dos poços situados em superfícies aplainadas apresentarem uma produtividade mais elevada.

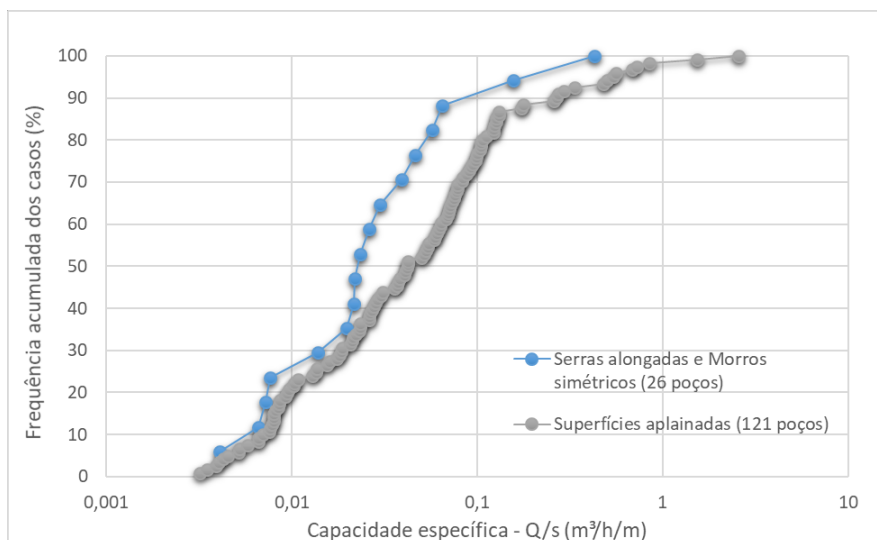


Figura 9: Frequência acumulada da capacidade específica dos poços em função da sua compartimentação geomorfológica

A relação da altitude (em metros) dos poços com a capacidade específica foi realizada com base no modelo digital de elevação (**Figura 10**). Nota-se uma densidade de poços elevada em altitudes menores que 300m, na porção mais ampla da Depressão Sertaneja no município. A **Figura 11** apresenta a frequência acumulada dos poços em função da sua cota. As três populações apresentaram comportamento similar, sendo que os poços nas cotas entre 300 e 400m têm uma tendência de valores mais produtivos para  $Q/S > 0,1$  e a maior mediana dentre as populações. É importante salientar que esperava-se poços mais produtivos localizados em cotas abaixo de 300m, quando comparados ao restante dos poços, em função da proximidade do nível d'água da superfície.

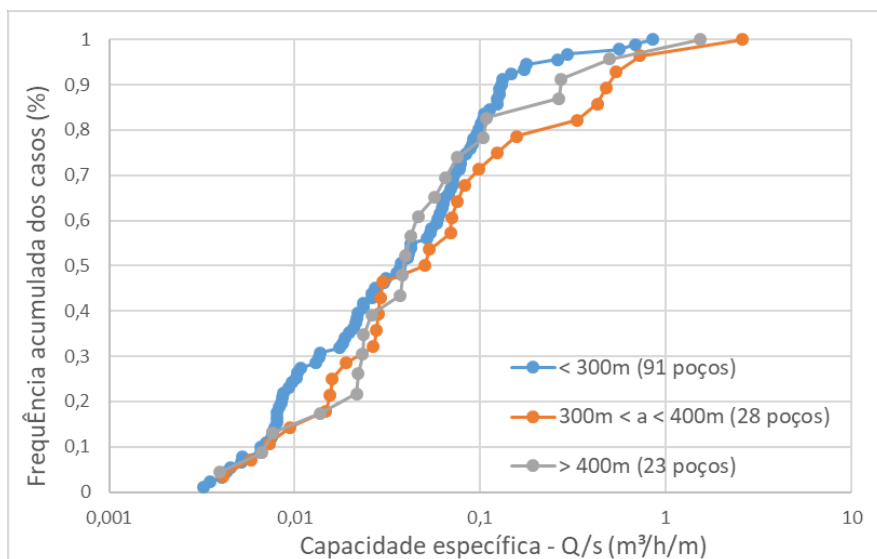
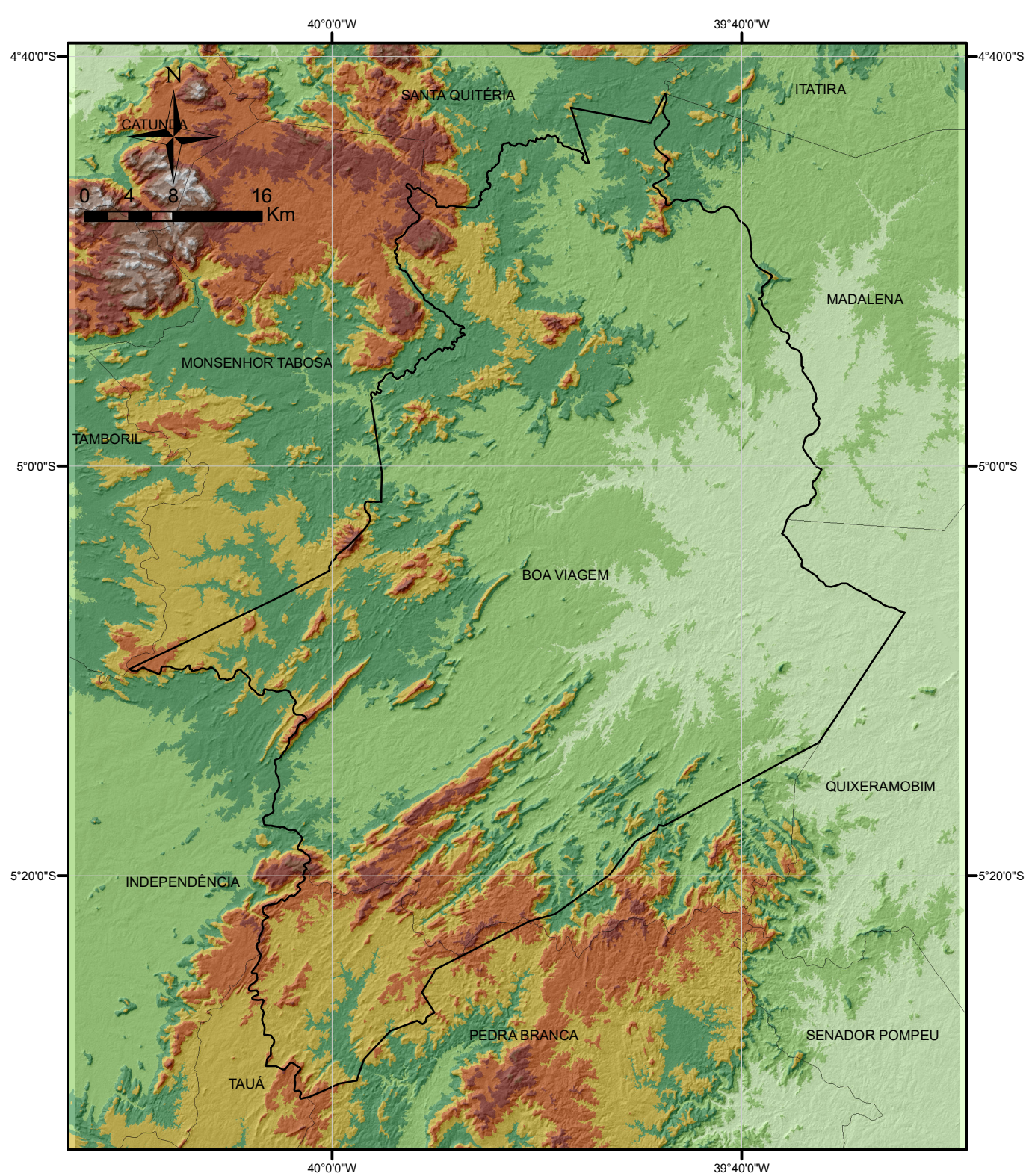


Figura 11: Frequência acumulada da capacidade específica dos poços em função da sua altitude em metros

O tipo litológico é um fator importante no tipo do fraturamento e, conseqüentemente, na circulação de água subterrânea em aquíferos fraturados. Os principais grupos litológicos observados na área são gnaisses associados a porções migmatíticas e metassedimentos





### Legenda

- Área de estudo
- Municípios do Ceará

### Legenda

- |             |               |
|-------------|---------------|
| 100 - 200 m | 700 - 800 m   |
| 200 - 300 m | 800 - 900 m   |
| 300 - 400 m | 900 - 1000 m  |
| 400 - 500 m | 1000 - 1100 m |
| 500 - 600 m | 1100 - 1200 m |
| 600 - 700 m |               |

FIGURA 16: MAPA DE ELEVAÇÃO DO TERRENO

PROJETO: TRABALHO DE FORMATURA

INSTITUIÇÃO: INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

FONTE: MALHA MUNICIPAL - IBGE (2015)  
MODELO DIGITAL DE TERRENO (ALLOS/PALSAR, 2010)

siltico-argilosos (**Figura 12**). Os dois grupos apresentaram a mesma mediana, sendo que os poços estão concentrados em áreas com predomínio de gnaisses (129 dos 141 poços analisados), não permitindo uma comparação representativa.

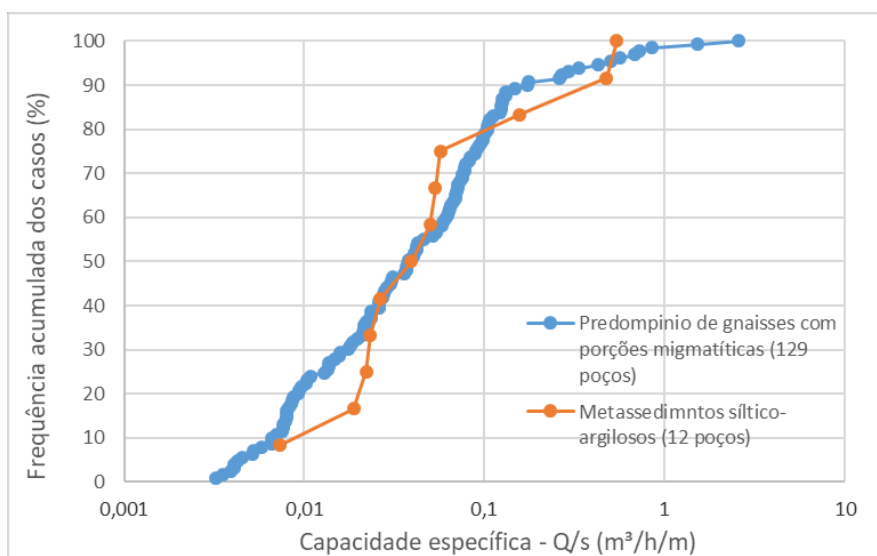


Figura 12: Frequência acumulada da capacidade específica dos poços em função da sua compartimentação litológica

Na primeira etapa do trabalho o confronto de dados de capacidade específica e litologia foi realizado nas cidades de Boa Viagem, Pedra Branca e Mombaça. Desta maneira foi possível integrar na análise grupos litológicos como corpos máficos/ultramáficos e granitoides deformados. Os resultados não indicaram um padrão entre os valores de capacidade específica e os compartimentos litológico. Isto sugere similaridade hidrodinâmica entre as unidades arqueanas e paleoproterozoicas da Província Borborema.

A classificação dos poços segundo seus elementos morfológicos foi realizada através de análise poço a poço, em topo, encosta e vale. A classificação foi realizada com base nas linhas de drenagem, imagem de satélite, mapa hipsométrico e MDT. Áreas de vales tendem a apresentar maiores valores de produtividade devido o nível d'água ser mais raso e, assim, haver uma maior quantidade de fraturas dentro da zona saturada (Fernandes, 2008), o manto inconsolidado pode ser mais espesso nos vales, favorecendo a recarga local (Fernandes, 2008). Percebe-se na **Figura 13** que as áreas de vale apresentam tendência de maiores valores de produtividade em relação a áreas de encosta.

O traçado dos lineamentos permitiu subdividir a área de acordo com a presença de grandes estruturas e pela frequência, direção e comprimento das estruturas. Ao todo foram definidos 6 compartimentos estruturais, sendo sua relação com a capacidade específica dos poços locados em cada compartimento exposta na **Figura 14**.



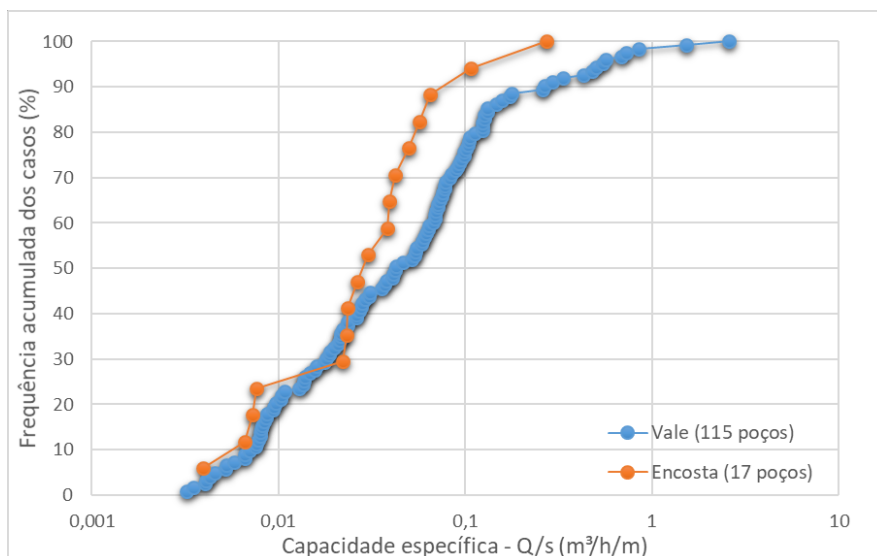


Figura 13: Frequência acumulada da capacidade específica dos poços em função da sua compartimentação morfológica

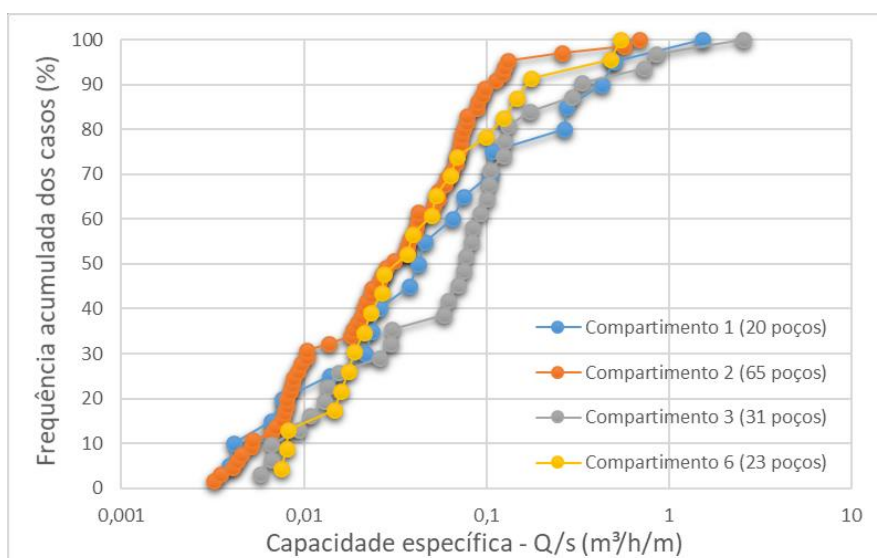


Figura 14: Frequência acumulada da capacidade específica dos poços em função da sua compartimentação estrutural

O compartimento 3, situado em superfícies aplainadas limitadas por maciços residuais de orientação NE-SW, destaca-se por valores mais elevados de capacidade específica e mediana próxima a 0,1 Q/s. No compartimento 2, também situado em superfície aplainada, a presença de lineamentos N30-50E é marcante, bem como seus menores valores de capacidade específica em relação ao compartimento 3. O compartimento 1 por sua vez está associado a porções mais elevadas da área, marcada por grandes serras alongadas e morros simétricos. Neste compartimento os valores de capacidade específica são intermediários em relação aos compartimentos 2 e 3.

Os compartimentos 4 e 5 foram retirados das análises em função da baixa quantidade de dados.



### 10.1.3. Mapa de densidade de lineamentos

A partir da análise visual do mapa de densidade de lineamentos (**Figura 15**) nota-se que os lineamentos apresentam maior densidade nas porções do relevo associadas à Depressão Sertaneja (1,14 a 1,72 km/km<sup>2</sup>). O compartimento estrutural C3, que apresenta os maiores valores de capacidade específica, possui elevada concentração das feições estruturais. Na porção norte do município foram observadas as menores densidades de lineamentos (< 0,57 km/km<sup>2</sup>), enquanto as regiões serranas possuem valores intermediários.

## 10.2. Análise local

### 10.2.1. Análise de lineamentos

O traçado de lineamentos ao redor dos poços, na escala 1:25.000, foi realizado com o intuito de esclarecer as relações direcionais e de distância dos lineamentos em relação aos poços mais próximos a estes. Foram traçadas 891 feições lineares no raio de aproximadamente 1 km ao redor dos poços. Para melhor visualização da disposição dos poços em relação aos lineamentos, foi gerado o mapa da **Figura 16**, situado entre os compartimentos estruturais C2 e C3, local que apresenta a maior densidade de poços da região. A **Figura 17** apresenta o diagrama de rosáceas criado para todos os lineamentos traçados nesta escala.

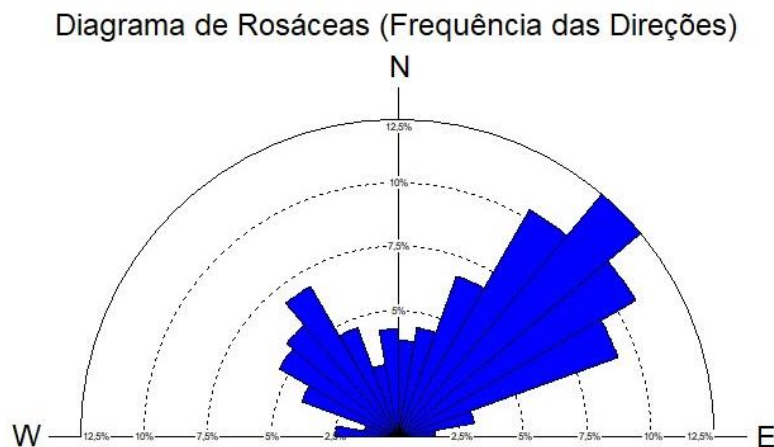
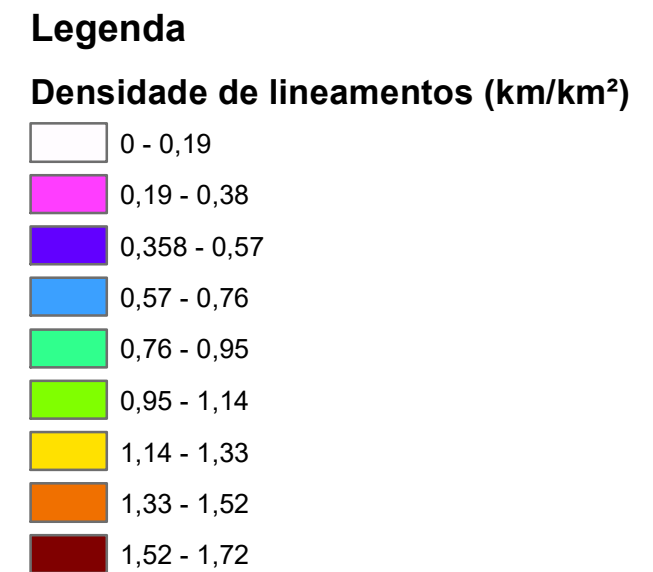
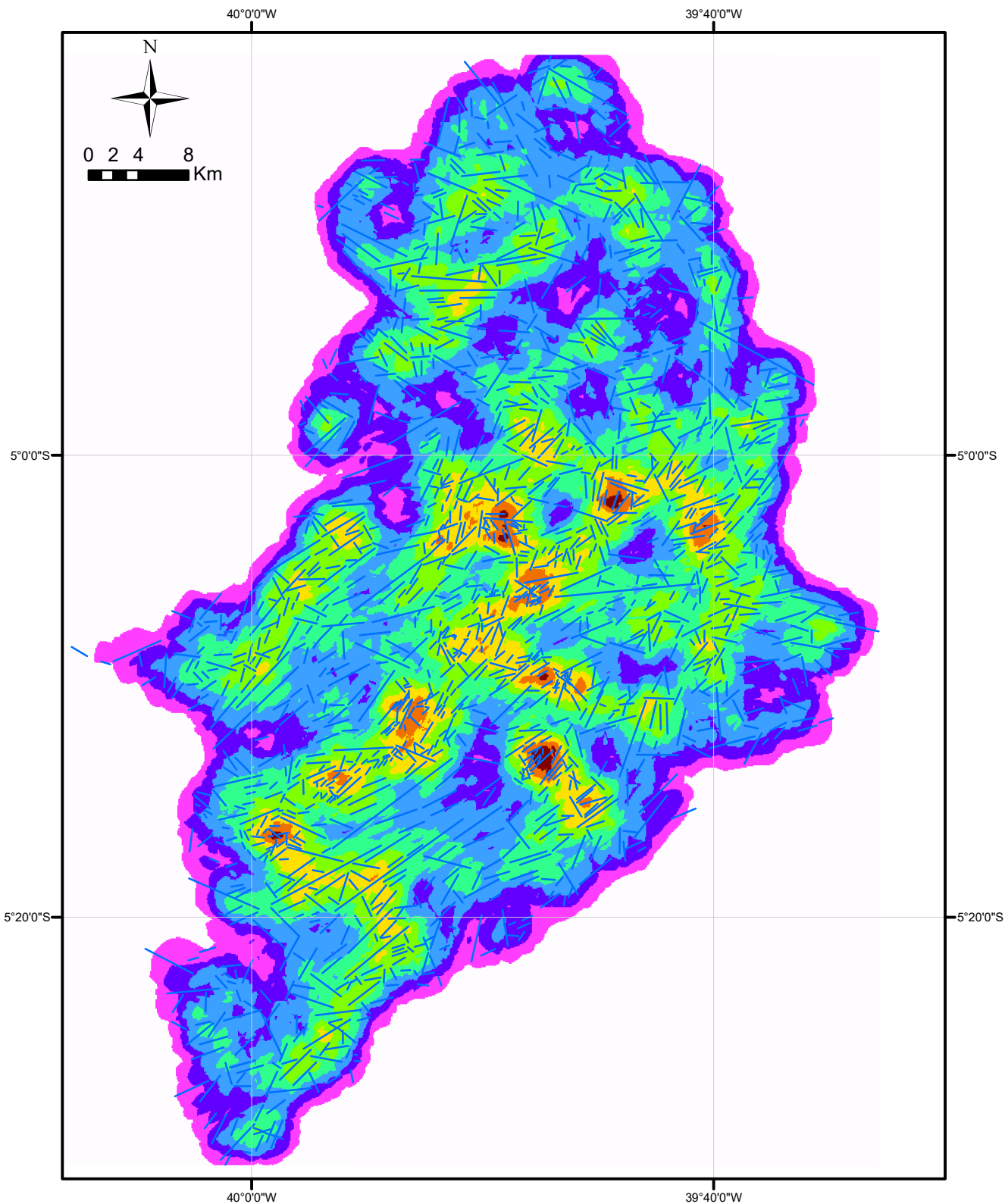


Figura 16: Diagrama de rosáceas com a frequência de distribuição das direções dos lineamentos (escala 1:25.000).

O diagrama apresentado para a análise local discrimina bem o trend N40-80E, dentre os lineamentos NE, bem como o trend N40-70W, dentre os lineamentos NW. Estruturas situadas no trend N0-20E são pouco notáveis em comparação com a análise regional.

A análise da produtividade dos poços com relação à distância de lineamentos foi realizada a partir da extração dessa distância (a do lineamento mais próximo), manualmente, para uma tabela em excel e posterior confecção do gráfico apresentado na **Figura 18**. As distâncias foram subdivididas em classes de 50m.

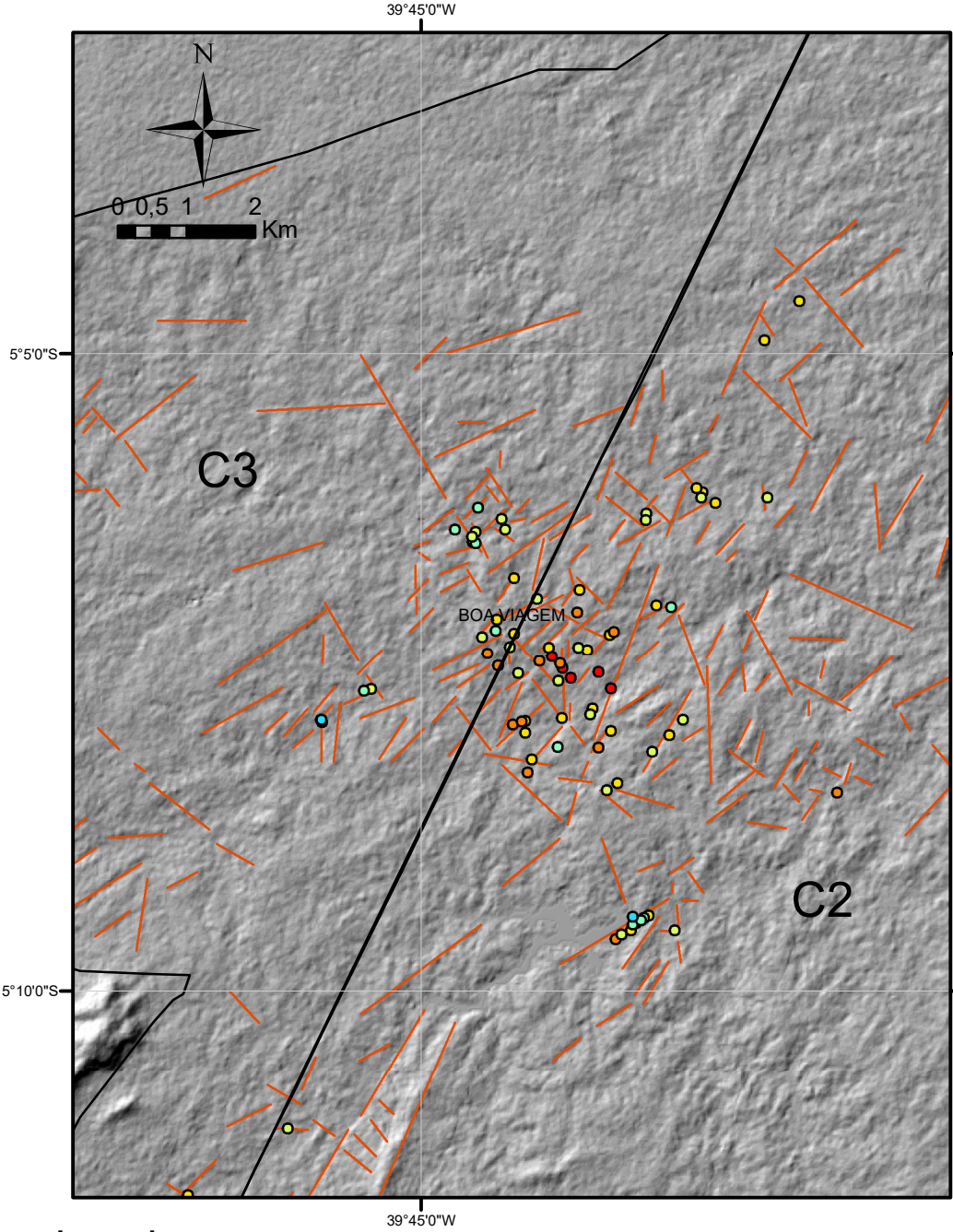


**FIGURA 15: MAPA DE DENSIDADE DE LINEAMENTOS**

**PROJETO: TRABALHO DE FORMATURA**

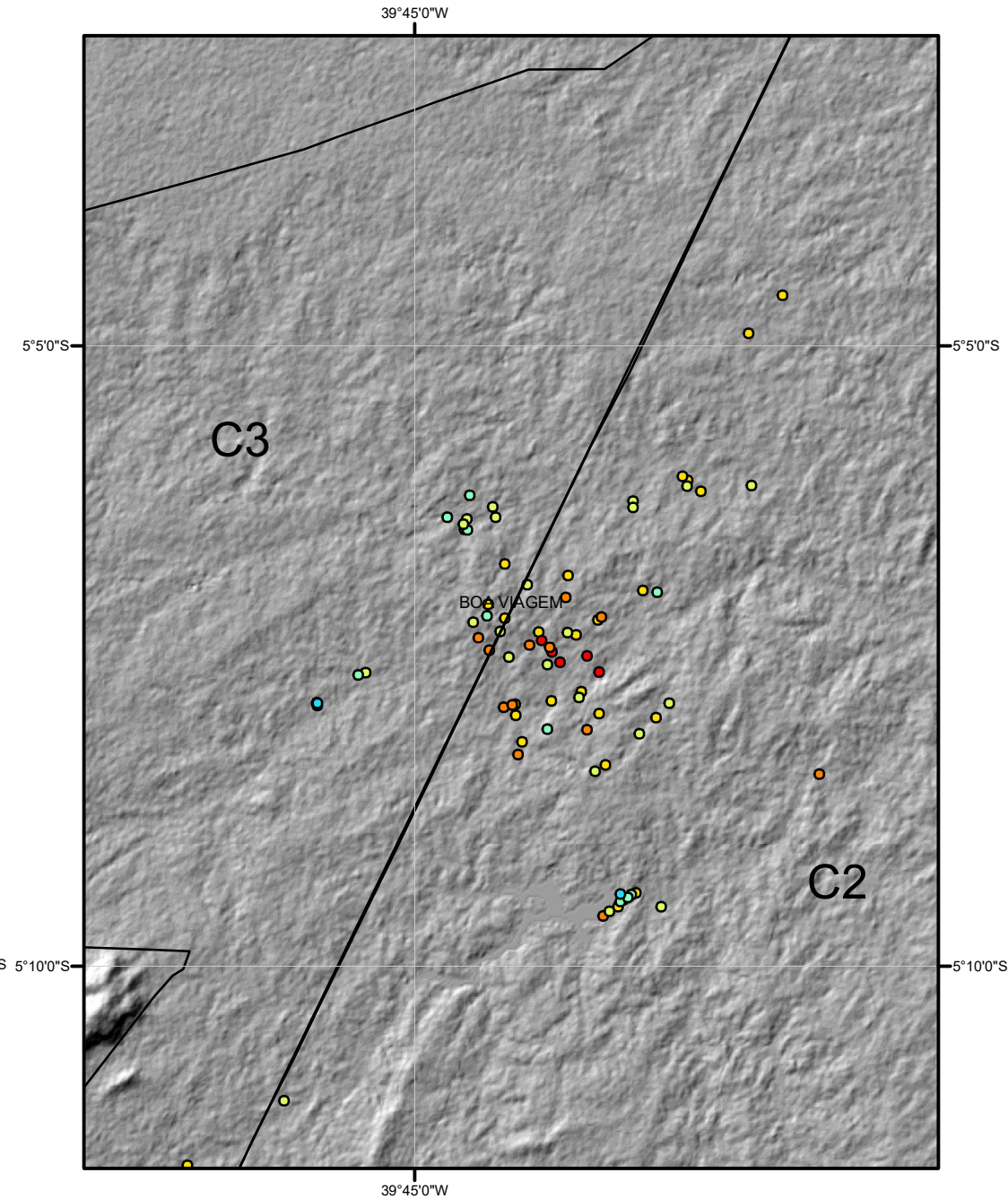
**INSTITUIÇÃO: INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS -  
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**





- Legenda**  
**Capacidade específica (m³/h/m)**
- |                |              |              |
|----------------|--------------|--------------|
| ● 0,0 - 0,005  | ● 0,05 - 0,1 | ● 1,0 - 1,50 |
| ● 0,005 - 0,01 | ● 0,1 - 0,5  | ● 1,50 - 2,0 |
| ● 0,01 - 0,05  | ● 0,5 - 1,0  |              |

- |   |                                 |
|---|---------------------------------|
| □ | C3 - Compartimento estrutural 3 |
| □ | C2 - Compartimento estrutural 2 |



<b>FIGURA 16: MODELO DIGITAL DE TERRENO E MAPA DE LINEAMENTOS LOCAL</b>
<b>PROJETO: TRABALHO DE FORMATURA</b>
<b>INSTITUIÇÃO: INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO</b>
<b>FONTE: MODELO DIGITAL DE TERRENO - ALLOS/PALSAR, 2010 PRODUTIVIDADE DOS POÇOS (COGERH)</b>

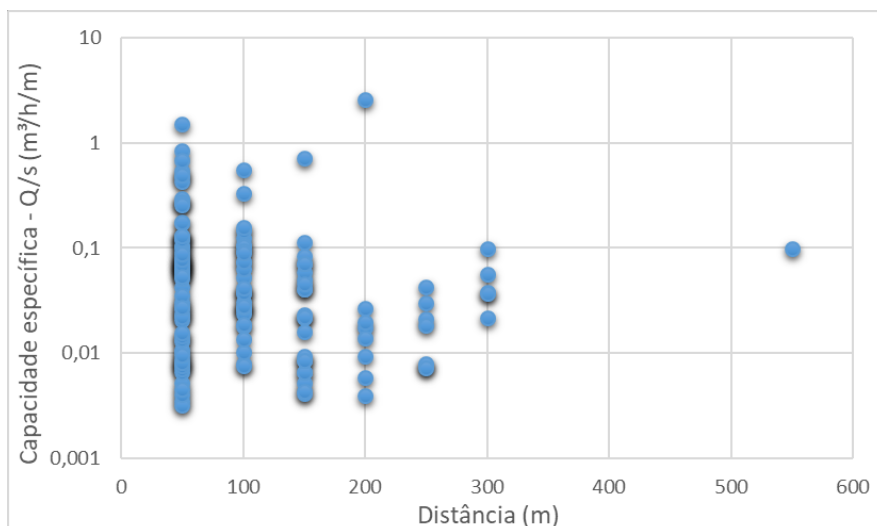


Figura 18: Capacidade específica dos poços vs distância do lineamento mais próximo

Pode-se observar que os maiores valores de produtividade ( $Q/s$  de 0,1 a 1) estão na classe com distando até 100m dos poços. Definindo o valor de 100m como raio de influência, foi ferado o gráfico de frequência acumulada da capacidade específica dos poços situados a distâncias menores e maiores que 100m (**Figura 19**). O gráfico mostra que os poços que distam de 100m ou menos dos lineamentos apresentam produtividade ligeiramente mais elevada (mediana em torno de 0,06  $m^3/h/m$ ) quando comparados aos poços que apresentam o lineamento mais próximo a uma distância maior que 100 metros (mediana em torno de 0,02  $m^3/h/m$ ).

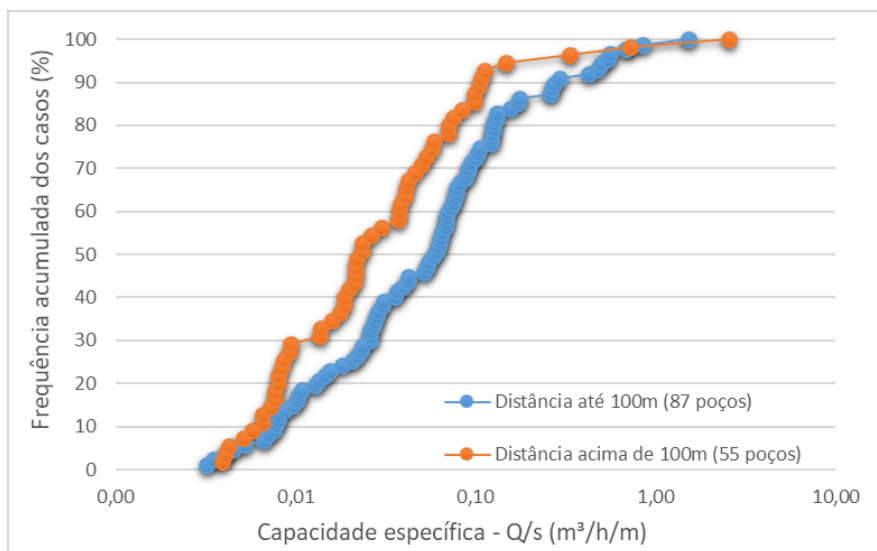


Figura 19: Frequência acumulada da capacidade específica dos poços em função da sua distância em relação aos lineamentos

A relação entre a capacidade específica dos poços com a direção do lineamento mais próximo pode ser observada na **Figura 20**. Na **Figura 21** é apresentada a porcentagens dos poços de cada classe com capacidade específica maior que 0,04  $m^3/h/m$  (mediana dos poços da área). A mesma análise foi realizada para o segundo lineamento mais próximo dos poços (**Figuras 22 e 23**).

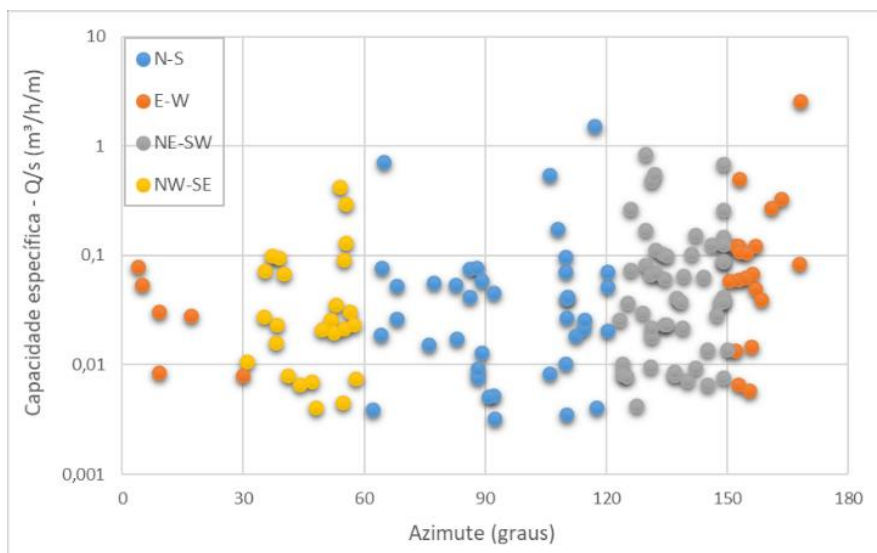


Figura 20: Azimute dos lineamentos (mais próximo) x Capacidade específica

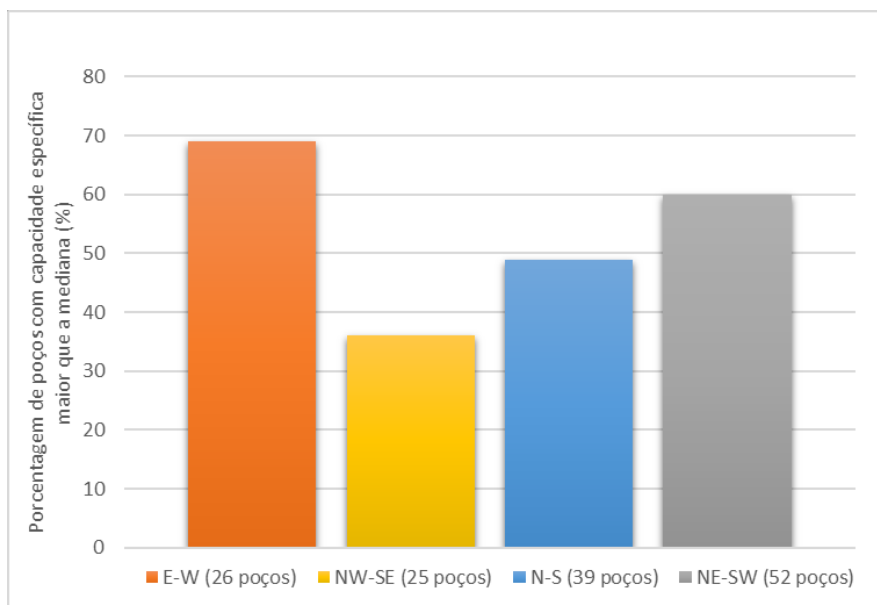


Figura 21: Porcentagem de poços com valor de capacidade específica acima da mediana, de acordo com a direção do lineamento mais próximo

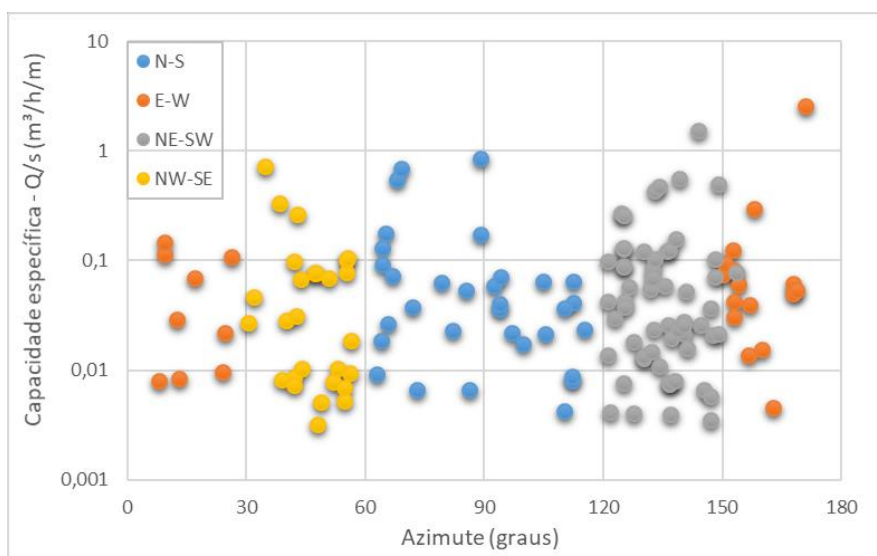


Figura 22: Azimute dos lineamentos (segundo mais próximo) x Capacidade específica



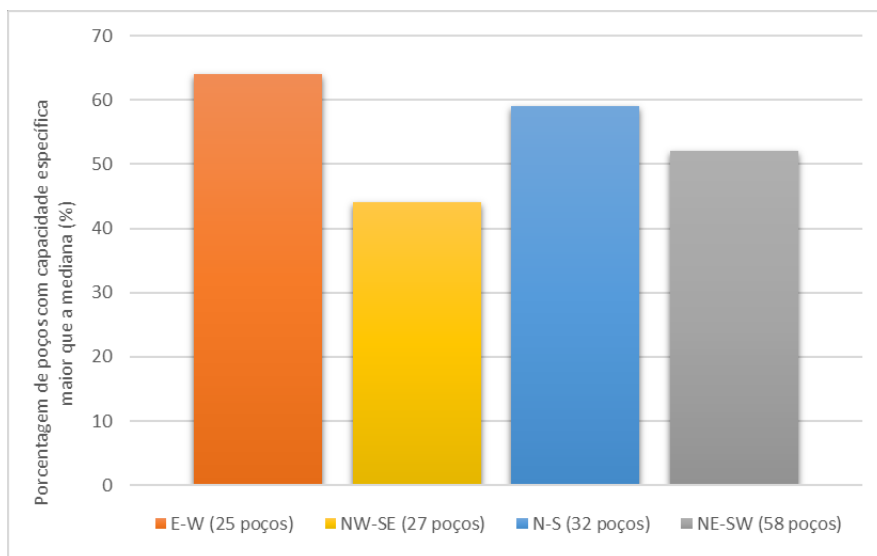


Figura 23: Porcentagem de poços com valor de capacidade específica acima da mediana, de acordo com a direção do segundo lineamento mais próximo

Ambos os gráficos, do lineamentos mais próximo e do segundo lineamento, os poços associados a feições de direção NW-SE são os que possuem a menor proporção de poços, em relação ao total para aquela direção, com valores de capacidade específica maiores que a mediana ( $0,04 \text{ m}^3/\text{h/m}$ ). O oposto ocorre com os poços próximos a estruturas E-W, que apresentam, proporcionalmente, a maior quantidade de valores de capacidade específica acima da mediana.

Tais resultados podem ser relacionados à prevalência de esforços compressivos de direção E-W no Nordeste Brasileiro atualmente, portanto fraturas de mesma direção ou subparalelas tendem a se comportarem como fraturas abertas, a partir de sua reativação. Entretanto, salienta-se que a densidade de dados é um fator que dificulta as análises comparativas.

A profundidade de instalação dos poços também caracteriza-se como um dado importante no aferimento dos valores de capacidade específica, uma vez que a transmissividade de fraturas diminui consideravelmente a partir de 300m, ao mesmo passo que a frequência e tamanho das estruturas não varia com a profundidade (Fernandes 2008).

Um total de 130 poços apresentaram dados de profundidade de instalação, que foram confrontados com sua capacidade específica (**Figura 24**). Percebe-se que os poços instalados abaixo de 100m não apresentam valores de capacidade específica maiores que  $0,1 \text{ Q/s}$ , enquanto que para profundidades acima de 100m estão concentrados os maiores valores. Contudo a análise da profundidade é intensamente enviesada pelo fato das instalações comumente serem aprofundadas de acordo com as produções obtidas em níveis rasos (Fernandes, 2008).

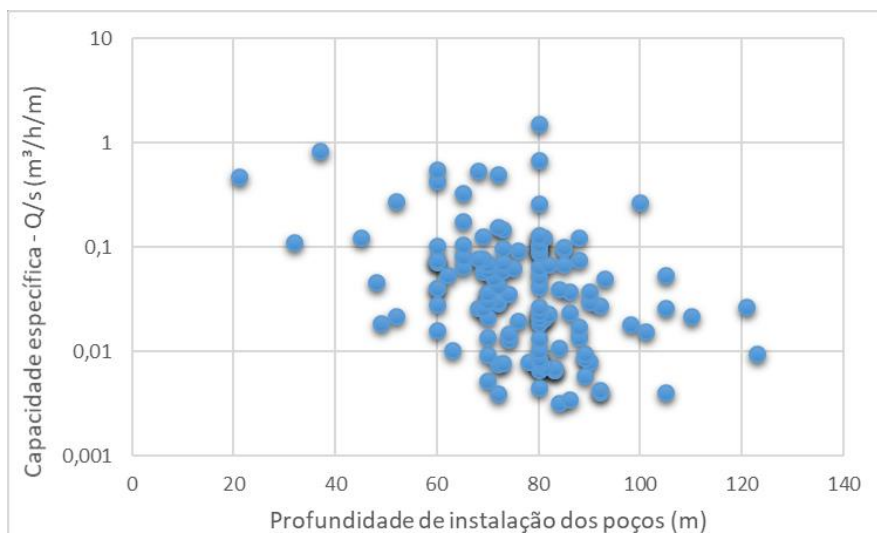


Figura 24: Profundidade de instalação dos poços vs capacidade específica

## 11. DISCUSSÕES

Algumas variáveis espaciais não analisadas neste trabalho, como espessura do manto inconsolidado, variações pluviométricas ao longo da área e influência hidrográfica no abastecimento de determinados setores a partir da análise individualizada de bacias hidrográficas, são condicionantes da circulação de água subterrânea, uma vez que alteram o regime superficial e, conseqüentemente, a dinâmica das áreas de recarga e descarga do aquífero fraturado.

A análise mais aprofundada da distância dos poços em relação à intersecção de lineamentos, bem como da localização dos poços em relação ao mapa de densidade de lineamentos, fornecem informações adicionais sobre as características hidroestruturais da região. Contatos entre tipos litológicos distintos podem se apresentar como regiões de fraturamento mais intenso, porém a densidade e distribuição dos dados não permitiu tal avaliação.

Salienta-se que as metodologias utilizadas neste trabalho são adequadas à fase pré-exploratória e, para alcançar resultados mais confiáveis e selecionar as áreas de possível exploração, deve-se obter dados de mapeamento geológico em campo (estruturais e tectônicos, principalmente), caminhamentos geofísicos, perfilagem acústica para identificação de fraturas ao longo do poço e testes de bombeamento, entre outros que não foram possíveis em função do cronograma financeiro deste estudo.

## 12. CONCLUSÕES

Geomorfologicamente foi possível definir os domínios de superfícies aplainadas, morros simétricos e serras alongadas. As superfícies aplainadas, relacionadas à Depressão Sertaneja, apresentaram valores de capacidade específica maiores em relação aos morros simétricos e serras alongadas, caracterizados como porções denudadas, ou maciços

cristalinos residuais. As duas classes foram analisadas em conjunto em função da baixa densidade de dados nestes setores.

Quando analisada em relação à altitude, em metros, da localização dos poços, a capacidade específica destes apresentou os valores mais elevados em regiões entre 300 e 400m, enquanto os poços situados abaixo de 300m ou acima de 400m apresentaram valores relativamente menores.

A investigação dos elementos morfológicos da área de detalhe possibilitou categorizar três unidades distintas (vale, encosta e topo). Ocorrem apenas dois poços em zonas de topo, ambos com valores abaixo de  $0,04 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ . Dessa forma, foram comparados em gráficos de frequência acumulada poços situados em vales e encostas, que resultou em valores superiores de capacidade específica para os poços localizados nos vales, quando comparados às regiões de encosta. De acordo com a literatura é esperado que as regiões de vale apresentem poços de maior produtividade, uma vez que geralmente expõem níveis estáticos mais elevados e espessuras de manto inconsolidado maiores do que encostas e topos. Tais características fazem com que outros condicionantes da produtividade tenham maior peso na análise do que características topográfica, como densidade e distância de lineamentos.

A predominância de gnaisses associados a porções migmatíticas na área não permitiu a comparação dos valores de capacidade específica associados a poços em diferentes tipos litológicos. Os poucos poços situados em metassedimentos siltico-argilosos apresentaram valores semelhantes aos poços localizados em terrenos gnaissicos. Em geral tipos litológicos como gnaisses, migmatitos e granitoides apresentam produtividade maior quando comparados com xistos, filitos, milonitos e anfibolitos. A diferença da produtividade de poços para diferentes tipos litológicos gira em torno de uma ordem, enquanto que, dentro do mesmo tipo litológico, pode variar até oito ordens de grandeza, de acordo com Banks et al (1994, apud Fernandes, 2008).

Em porções da área situadas em superfícies aplainadas compostas por gnaisses associados migmatitos, a compartimentação estrutural demonstrou-se como um fator mais condicionante da produtividade, visto que poços próximos, porém na área de influência de diferentes grupos de lineamentos, apresentaram valores de capacidade específica consideravelmente distintos.

A verificação da direção dos lineamentos mais próximos dos poços apresentou resultados condizentes com o regime de esforços neotectônicos observados no Nordeste atualmente. Fraturas de direção E-W, que são paralelas ao campo de tensão principal ( $\sigma_1$ ), se comportam como fraturas abertas, que contribuem para a circulação de água subterrânea e formação de aquíferos em terrenos cristalinos. Fraturas NW neste contexto acabam atuando como par cisalhante, gerando fraturas fechadas. Dentre os poços analisados neste estudo, os que estão próximos a feições lineares de direção E-W apresentaram, proporcionalmente, a maior quantidade com valores de capacidade específica acima da mediana. Já os poços



próximos a lineamentos de direção NW têm a menor proporção de valores de capacidade específica acima da mediana.

A análise de lineamentos a partir de fotografias aéreas e modelo digital de terreno apresentou-se como um método eficiente de exibir estruturas de escala regional e local. Os diagramas de rosáceas explicitaram duas direções preferenciais de lineamentos (NE e NW), sendo que os lineamentos de direção NE apresentam maiores comprimentos quando comparados aos de direção NW.

Para correlacionar a capacidade específica com os lineamentos traçados em escala local foi utilizada uma área de influência de 200m, valor extraído da literatura. Os resultados indicam que poços situados a menos que 100 metros de algum lineamento têm produtividade maior que aqueles com lineamentos a mais que 100 metros de distância.

No mapa de densidade de lineamentos foi possível verificar as maiores densidades associadas a porções baixas do relevo (Depressão Sertaneja), caracteristicamente mais produtivas que as regiões serranas. O compartimento estrutural C3, que apresenta os poços mais produtivos dentre os analisados, também apresenta boa parte da sua área com uma densidade elevada de estruturas lineares. A distribuição dos poços, entretanto, dificulta a análise da produtividade em relação à densidade de lineamentos.

Ao confrontar os condicionantes da circulação de água em aquíferos fraturados com os valores de capacidade específica dos poços, os resultados foram satisfatórios em casos nos quais obteve-se maior pluralidade e densidade de dados, como é o caso das análises topográficas, altimétricas e da direção e distância dos lineamentos em relação aos poços mais próximos.

### **13. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Arthaud, M. H. (2007). Evolução Neoproterozóica do Grupo Ceará (Domínio Ceará Central, NE Brasil): da sedimentação à colisão continental brasileira. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília.

Assine, M.L. (2002). Análise estratigráfica da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, v. 22, p. 289-300.

Bandeira, I. C. N., Abreu, F. A. M. (2012). Neotectônica e estruturação dos sistemas hidrogeológicos da região de Castanhal/PA. Águas Subterrâneas 26(1): 1-17.

Barreto, P.H. História - Seca, fenômeno secular na vida dos nordestinos. Revista de Informações e Debates do Instituto de Pesquisa e Econômica Aplicada, Brasília, ano 6, Ed. 48. (2009). Disponível em: <[http://www.ipea.gov.br/desafios/index.php?option=com\\_content&view=article&id=1214:reportagens-materias&Itemid=3](http://www.ipea.gov.br/desafios/index.php?option=com_content&view=article&id=1214:reportagens-materias&Itemid=3)>. Acesso em: mar. 2018

- Bezerra, F. H. R., Mello, C. L., Suguio, K. (2006). A Formação Barreiras: recentes avanços e antigas questões. *Geologia USP, Série Científica*, São Paulo, v. 6, n. 2, 2006.
- Bezerra, F. H. R. (2011). Deformação tectônica na Formação Barreiras: exemplos das bacias Potiguar e Paraíba, Brasil. Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário.
- Bizzi, L. A., Schobbenhaus, C., Vidotti, R. M., Gonçalves, J. H. (2003). Geotectônica do Escudo Atlântico. In: Bizzi, L. A., Schobbenhaus, C., Vidotti, R. M., Gonçalves, J. H (eds) *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil* (p 227-258). Brasília: Serviço Geológico do Brasil (CPRM).
- Brandão, R. L., Freitas, L. C. B. (2014). Geodiversidade do Estado do Ceará. Fortaleza. Programa Geologia do Brasil – Levantamento da Geodiversidade. CPRM – Serviço Geológico do Brasil.
- Bricalli, L. L. (2011). Padrões de lineamentos e fraturamento neotectônico no estado do Espírito Santo (sudeste do Brasil). Tese (Doutorado) — Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Bricalli, L. L. (2016). Procedimentos metodológicos e técnicas em geomorfologia tectônica. *Espaço Aberto, PPGG-UFRJ*, v. 6, n 1, p. 75-110, 2016. Vitória-ES.
- Brito Neves, B. B. (1983). O mapa geológico do Nordeste Oriental do Brasil, escala 1/1.000.000. Tese de Livre Docência. Departamento de Geologia Geral do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, São Paulo. *Revista Geologia USP – Série Científica*.
- Brito Neves, B.B., Van Schmus, W.R., Dos Santos, E. J., Campos Neto, M. C. (1995). O evento Cariris Velhos na Província Borborema: Integração de dados, implicações e perspectivas. *Revista Brasileira de Geociências*, p. 279-296.
- Campos, J. N. B., Studart, T. M. C. (2001). Secas no Nordeste do Brasil: origens, causas e soluções. IV Diálogo Interamericano de. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2001. v. 01.
- Campos, J. N. B. (2014). Secas e políticas públicas no semiárido: ideias, pensadores e períodos. *Estudos Avançados* **28** (82), 2014.
- Coriolano, A. C. F., Jardim de Sá, E. F., Silva, C. C. N. (2000). Implicações da neotectônica no condicionamento estrutural de água subterrânea em terrenos cristalinos: exemplo do semi-árido do leste do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil. 1st Joint World Congress on Groundwater. Fortaleza, 2000.
- Domenico, P., Schwartz, F. (1990). *Physical and chemical hydrogeology*. John Wiley & Sons, Nova York, 824 p.
- ESRI. ArcMap® 10.3 - ArcMap™ 1999. Disponível em: <<http://webhelp.esri.com>>.
- Fernandes, A. J. (1997). Tectônica Cenozóica na Porção Média da Bacia do Rio Piracicaba e sua aplicação à hidrogeologia. Tese de Doutorado. São Paulo: Instituto de Geociências USP.

- Fernandes, A. J., Rudolph, D. L. (2001). The influence of Cenozoic tectonics on the groundwater-production capacity of fractured zones: a case study in São Paulo, Brazil. *Hydrogeology Journal*, 2001, **9**: 151-167.
- Fernandes, A. J. (2005). Aquíferos fraturados: uma revisão dos condicionantes geológicos e dos métodos de investigação. *Revista do Instituto Geológico, São Paulo*, 29 (1/2), 49-72, 2008.
- Fernandes, A. J., Perrotta, M. M., Salvador, E. D., Azevedo, S. G., Filho, A. G., Paulon, N. (2007). Potencial dos aquíferos fraturados do Estado de São Paulo: condicionantes geológicos. São Paulo. *Revista Águas Subterrâneas*, v.21, n.1, p. 65-84.
- Fernandes, A. J. (2008). Aquíferos fraturados: uma revisão dos condicionantes geológicos e dos métodos de investigação. *Revista do Instituto de Geociências*, **29** (1/2), 49-72.
- Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos - FUNCEME. Disponível em: <http://www.funceme.br/>. Acesso em: mar. 2018.
- Godoy, M. C. T. F., Tsuchiya, I., Vicente, L. E. (2008). Hidrogeologia e neotectônica em área localizada no extremo oeste do estado de São Paulo. XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Natal. 2008.
- Hasui, Y., Sena Costa, J.B. (1996). Neotectônica - Fundamentos, métodos e técnicas de análise. Simpósio de Geologia da Amazônia, 5, Belém, 1996.
- Hasui, Y., Carneiro, C. D. R., Almeida, F. F. M., Bartorelli, A. (2012). *Geologia do Brasil*. São Paulo: Ed. Beca. 900p. (Livro).
- Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará – IPECE (2007). Ceará em Mapas. Disponível em: <<http://www2.ipece.ce.gov.br/atlas/>>. Acessado em 03/09/2018.
- Jardim de Sá, E. F. (2000). O condicionamento da água subterrânea no cristalino fraturado: reavaliação da abordagem estrutural. 1st Joint World Congress on Groundwater. Fortaleza, 2000.
- Khan, A.S., Da Cruz, J. A. N., Silva, L. M. R., Lima, P. V. P. S. (2005). Efeito da seca sobre a produção, renda e o emprego agrícola na microrregião geográfica de Brejo Santo e no Estado do Ceará. *Revista Econômica do Nordeste*, Fortaleza, v.36, nº2, abr-jun.
- Lousada, E. O., Campos, J. E. G. (2005). Integração de dados geológicos, geofísicos e de sensoriamento remoto para a locação de poços tubulares em aquíferos fraturados.
- Madrucci, V., Araújo, C. C., Taioli, F. (2003). Sensoriamento remoto, aerogeofísica e geoprocessamento aplicados ao estudo de aquífero fraturado em terreno cristalino, leste do Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências*, 33 (2 supl): 43–52. *Revista de Geociências*, São Paulo, v.24, n.2, p.174-180.

- Madrucci, V., Taioli, F., Araújo, C. C. (2005). Análise integrada de dados de sensoriamento remoto, geologia e geofísica no estudo de aquífero fraturado, Lindóia – SP. *Revista Brasileira de Geofísica*, 23(4): p.437-451.
- Maia, R. P., Bezerra, F. H. R. (2011). Neotectônica, geomorfologia e sistemas fluviais: uma análise preliminar do contexto nordestino. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v.12, nº 3 - 2011.
- Maia, R. P., Bezerra, F. H. R. (2012). Geomorfologia e neotectônica da bacia hidrográfica do rio Apodi-Mossoró – NE/Brasil. *Mercator*, v. 11, nº 24, p. 209-228. Fortaleza-CE.
- Medeiros, C. N., Gomes, D. D. M., Albuquerque, E. L. S., Cruz, M. L. B. (2011). Os recursos Hídricos do Ceará: integração, Gestão e potencialidades. Fortaleza: Instituto de Pesquisa e Estratégias Econômica do Ceará (IPECE).
- Moura-Lima, E. N. (2011). Tectônica pós-rifte na Bacia Potiguar. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte – Centro de Ciências Exatas e da Terra. Rio Grande do Norte.
- Naleto, J. L. C.; Costa, F. G.; Araújo, C. E. G.; Vasconcelos, A. M. (2011). Geologia estrutural do Complexo Cruzeta na folha Mombaça (SB.24-V-D-V) – Ceará. 13º Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos / VII International Symposium on Tectonics. Campinas-SP.
- Oliveira, J. F. de & Cavalcante, J. C. (1993). Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil: Mombaça. Folha SB.24-V-D-V. Estado do Ceará. Escala 1:100.000. DNPM/CPRM.
- Oliveira, D. B., Moreno, R. S., Miranda, D. J., Ribeiro, C. S., Seoane, J. C. S., Mello, C. L. (2009). Elaboração de um mapa de lineamento estrutural e densidade de lineamento através de imagem SRTM, em uma área ao norte do rio Doce, ES. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, XX., Natal.
- Parente, C. V., Arthaud, M. H. (1995). O Sistema Orós-Jaguaribe no Ceará, NE do Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, 25(4): 297-306. Departamento de Geologia – UFC. Fortaleza.
- Pessoa Neto, O. C., Soares, U. M., Silva, J. G. F., Roesner, E.H., Florencio, C.P., Souza, C. A. V. (2007). Bacia Potiguar. *Boletim de Geociências da Petrobras*, v. 15.
- Price, N. J., Cosgrove, J. W. (1990). Analysis of geological structures. Cambridge University Press, Cambridge, 502 p.
- Rios, V. P. L., Amaro, V. E., Vieira, M. M., Matos, M. F. A., Prudêncio, M. C., Camara, M. R. (2016). Influência neotectônica na morfologia do sistema de Ilhas Barreiras, Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 17, nº 3 (2016).
- Saadi, A., Torquato, J. R. (1992). Contribuição à Neotectônica do Estado do Ceará. Fortaleza. *Revista de Geologia, local*, v. 5, p. 5-38.

- Saadi, A. (1993). Neotectônica da Plataforma Brasileira: esboço e interpretação preliminares.
- Santiago, M. M. F., Frischkom, H., Filho, J. M. (2000). Mecanismos de salinização em águas do Ceará, Rio Grande do Norte e Piauí. I Congresso Mundial Integrado de Águas Subterrâneas, 2000, Fortaleza.
- Silva, C. C. N., Jardim de Sá, E. F. (2000). A influência da neotectônica na locação de poços para água no cristalino fraturado: resultados preliminares da região de Equador, Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil. 1st Joint World Congress on Groundwater. Fortaleza, 2000.
- Silva, F. J. A., Araújo, A. L., Souza, R. O. (2007). Águas Subterrâneas no Ceará – Poços instalados e salinidade. Revista Tecnológica Fortaleza, v.28. p.136-159.
- Silva, K. F. (2013). Análise dos aspectos hidrogeológicos aplicados a locação de poços em terrenos cristalinos no município de Quixeramobim, Ceará. Tese (Mestrado). Universidade Federal do Ceará – Departamento de Geologia.
- Silva, B. C. O., Soares, A. M. J., Nóbrega, R. S. (2016). Os paradigmas da seca no semiárido brasileiro: das políticas de combate à concepção de convivência com o fenômeno, I Congresso Internacional da Diversidade do Semiárido.
- Sousa, D. H. N., Ferreira, R. L. (2017). Aproveitamento de águas pluviais no Estado do Ceará. Caderno Meio Ambiente e Sustentabilidade, v.5, nº3.
- Teixeira, F. J. C. (2003). Série Água Brasil 6: Modelos de Gerenciamento de Recursos Hídricos: Análise e Proposta de Aperfeiçoamento do Sistema do Ceará. 1ª Edição. Brasília: Banco Mundial e Ministério da Integração Nacional.
- Torquato, J. R., Neto, J. A. N. (1996). Historiografia da região de dobramentos do Médio Coreaú. Revista Brasileira de Geociências, **26**(4): 303-314. Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará, Campus Piei. Fortaleza.
- Vidal, A. C., Rostirolla, S. P., Kiang, C. H., Martini, M. L. (2006). Estudo da relação entre lineamentos estruturais e a exploração de água subterrânea por meio da análise de favorabilidade. Águas Subterrâneas, v.20, n.2, p.27-38.