



## Caracterização Geométrica do Aquífero Serra Grande na Borda Nordeste da Bacia Sedimentar do Parnaíba

Robério Boto de AGUIAR<sup>1</sup>; Sônia Maria Silva VASCONCELOS<sup>2</sup>, José Márcio Lins MARINHO<sup>3</sup>; Walber CORDEIRO<sup>4</sup>

**Resumo:** O aquífero Serra Grande representa a sequência basal da Bacia Sedimentar do Parnaíba, cuja área de exposição e recarga se caracteriza por uma estreita faixa de direção N-S, que engloba os limites dos Estados do Ceará e do Piauí. Para definir as características geológicas e geométricas dos estratos da borda nordeste da Bacia do Parnaíba, foram utilizadas técnicas de investigação indireta, através da aplicação do método geofísico de eletrorresistividade, visando definir a configuração estrutural e estratigráfica dessa área, além de identificar os locais mais promissores para acumulação de água subterrânea. Foram realizadas oitenta sondagens elétricas verticais cujos dados foram tratados, processados e interpretados, através de softwares específicos, que permitiram investigar, em média, 500 metros de profundidade. Algumas sondagens, especialmente na zona central e sul da área, não alcançaram as rochas do embasamento cristalino, e outras, investigaram pequenas profundidades, o que tornou difícil definir com precisão o limite inferior do aquífero e estimar uma espessura média para as rochas do Grupo Serra Grande. Foram elaboradas seções geométricas que ilustram bem o comportamento hidrogeológico do Grupo Serra Grande e indicam a presença de estruturas do tipo grabeniformes. Os estudos revelaram a existência de duas zonas aquíferas, as quais estão separadas por uma camada resistiva, com valores de resistividade entre 100 e 400 ohm.m. As seções M-N e O-P reforçam a ideia de que o graben relativo à falha Café-Ípueiras adentra a bacia. Estimar o potencial do aquífero não foi possível porque muitas sondagens não investigaram todas as camadas. Os maiores gradientes hidráulicos estão relacionados aos grandes declives topográficos e os menores, localizados na parte oeste da área, nos municípios de Cocal, Domingos Mourão e Pedro II e na parte leste em Guaraciaba do Norte. Estes são locais mais favoráveis à captação de água subterrânea. Os estudos de eletrorresistividade trazem grandes subsídios para projetos de perfuração de poços, tanto de caráter hidrogeológico quanto estratigráfico.

**Palavras-Chave:** Geofísica; Eletrorresistividade; Bacia do Parnaíba.

**Abstract:** *Serra Grande Aquifer represents Parnaíba's Sedimentary Basin basal sequence, which outcrop and recharge area is tiny and has an N-S trend. To define*

<sup>1</sup> Serviço Geológico do Brasil - CPRM – Residência de Fortaleza.

<sup>2</sup> Departamento de Geologia - Universidade Federal do Ceará - UFC

<sup>3</sup> Professor aposentado - Departamento de Geologia - Universidade Federal do Ceará - UFC

<sup>4</sup> Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos - FUNCEME

Autor para correspondência: Robério Boto de Aguiar

CPRM - Serviço Geológico do Brasil – Residência de Fortaleza. Av. Antônio Sales, 1418, Bairro Joaquim

*geological and geometric characteristics of northeastern border of it, were used indirect survey techniques, using geophysical method of eletroresistivity, purposing definition of structural and stratigraphic sequences. In total were conducted eighty vertical electrical sounding which data were treated, processed and interpreted by specific software, achieving depths, in average, of 500 meters. Some soundings didn't cross entirely the aquifer, especially at central and south area, and some others achieved just shallow depths which caused a difficulty to define accurately inferior limit of it. Were made eight geoelectric sections to illustrate hydrogeological behavior and they show graben and horsts structures. Results showed two aquifer zones, separated by a resistive layer, showing the most frequent resistivity values between 100 and 400 ohm.m. Sections M-N and O-P show that a graben relative to Café-Ipueiras fault cross the basin. Estimations of aquifer's potential were not possible because surveys didn't cross it entirely. The highest hydraulic gradients were related to big slopes and smallest are located on west (Cocal, Domingos Mourão and Pedro II municipalities) and east (Guaraciaba do Norte). Those areas are more favorable to groundwater exploitation. The studies of eletroresistivity bring great subsidies to wells drilling projects, both to hydrogeologic and stratigraphic character.*

**Keywords:** *Geophysics; Electrical Resistivity; Parnaíba Basin.*

## 1. INTRODUÇÃO

A Bacia Sedimentar do Parnaíba está situada na região nordeste ocidental do território brasileiro, ocupando uma área de aproximadamente 600.000 km<sup>2</sup>, abrangendo, parcialmente, os estados do Piauí, Maranhão, Tocantins, Pará, Ceará e Bahia (Góes e Feijó, 1994). Trata-se de bacia intracratônica e sua evolução propiciou a deposição cíclica de sequências arenosas e siltico-argilosas, resultando na formação de sistemas aquíferos, separados por espessas camadas semipermeáveis que se comportam como aquíferos. Dessa forma, esses processos deposicionais deram origem a três sistemas aquíferos principais, conhecidos como Serra Grande, Cabeças e Poti-Piauí, de idade Paleozoica, entre os quais se intercalam os aquíferos Pimenteiras e Longá (Correia Filho, Monteiro e Sousa, 2009).

O aquífero Serra Grande representa a sequência basal da bacia, cuja área de exposição e recarga se caracteriza por uma estreita faixa que aflora por todo flanco oriental da Bacia Sedimentar do Parnaíba. Trata-se de

unidade geológica predominantemente clástica, com espessuras anômalas e muito variáveis, tanto em sua faixa aflorante como em subsuperfície, em função de movimentações tectônicas que ocorreram durante sua sedimentação, especialmente na borda da bacia. Essas feições estruturais de natureza grabenforme são muito importantes no armazenamento de água subterrânea e, se bem conhecidas e adequadamente exploradas, podem suprir satisfatoriamente as diversas demandas hídricas.

O objetivo deste trabalho é contribuir para o conhecimento hidrogeológico da borda nordeste da Bacia Sedimentar do Parnaíba, através da caracterização geolétrica e geométrica do aquífero Serra Grande, utilizando-se o método geofísico da eletrorresistividade. A aplicação da técnica de sondagem elétrica vertical (SEV), arranjo Schlumberger, nesse trabalho, condiz com a metodologia investigativa de áreas de contexto geológico similar ao encontrado na borda

dessa bacia e é parte do levantamento geofísico maior realizado pelo Laboratório de Geofísica de Prospecção e Sensoriamento Remoto para a CPRM – Serviço Geológico do Brasil.

A eletrorresistividade é um dos mais antigos métodos geofísicos de investigação. Uma quantidade crescente de trabalhos tem sido apresentada a cada ano em congressos, simpósios e outros meios de divulgação científica nacional e internacional sobre pesquisas geolétricas direcionadas à prospecção hidrogeológica. Podem-se destacar os trabalhos geofísicos realizados na Bacia Sedimentar do Parnaíba, como: Vitorello & Padilha (1993), Meju *et al.* (1999), Lima (2000), Abreu (2002) e Correia Filho, Monteiro e Barradas (2012) e Castelo Branco *et al.* (2015).

## 2. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo situa-se na borda leste da Bacia Sedimentar do Parnaíba, popularmente conhecida com Serra da Ibiapaba, parte leste do estado do Piauí e oeste do estado do Ceará, onde afloram os sedimentos do Grupo Serra Grande (Figura 1). Essa área possui 13.437 km<sup>2</sup>, abrangendo totalmente, ou em parte, 27 municípios localizados nos estados do Ceará e Piauí e onde vivem cerca de 750 mil habitantes, sendo que 53% dessas pessoas residem na zona urbana.

Segundo classificação de Köppen (1948), o clima na região da Ibiapaba é tropical chuvoso de monção, com a temperatura oscilando entre 19°C e 30°C. As chuvas nas chapadas são mais regulares, com índices superiores a 1.000 mm e média de 700 mm/ano, com período chuvoso concentrando-se entre os meses de janeiro a maio, e o período seco de julho a novembro.

O conhecimento estratigráfico dessa bacia resulta dos vários estudos

realizados a partir do início do século passado, complementados por trabalhos desenvolvidos pela Petrobras, através da perfuração de poços e estudos geofísicos para a pesquisa de petróleo. Destacam-se os trabalhos de Small (1913), Lisboa (1914), Mesner e Wooldridge (1964), Aguiar (1971), Lima e Leite (1978), Caputo (1984), Della Fávera, (1990), Góes e Feijó (1994) e Góes (1995).

Para melhor entendimento da geometria das sequências estratigráficas da Bacia Sedimentar do Parnaíba, é apresentada na Figura 2, de forma esquemática, a seção transversal NE-SW, onde são evidenciadas as formações geológicas sedimentares, apoiadas sobre rochas do embasamento cristalino. Pode-se observar também, que estes depósitos sedimentares podem ser representados por unidades hidroestratigráficas diferenciadas com base nas suas propriedades hidráulicas. Desta forma os aquíferos e aquíferos na bacia são, em geral, coincidentes com seus representantes estratigráficos.

O Grupo Serra Grande, considerado o melhor aquífero da região, é constituído, da base para o topo, pelas formações Ipu, Tianguá e Jaicós. A Formação Ipu é composta de arenitos, conglomerados, arenitos conglomeráticos e diamictitos. A unidade Tianguá é formada por folhelhos, siltitos e arenitos finos. A Formação Jaicós é constituída por arenito médio, grosseiro a conglomerático, com estratificação cruzada, mal selecionado e friável. Esses litotipos afloram nas bordas leste e sul da bacia, limitando-se com o embasamento impermeável, numa área total de aproximadamente 31.650 km<sup>2</sup>, com variações de espessuras de 50 a 1.000 metros (Góes e Feijó, 1994).

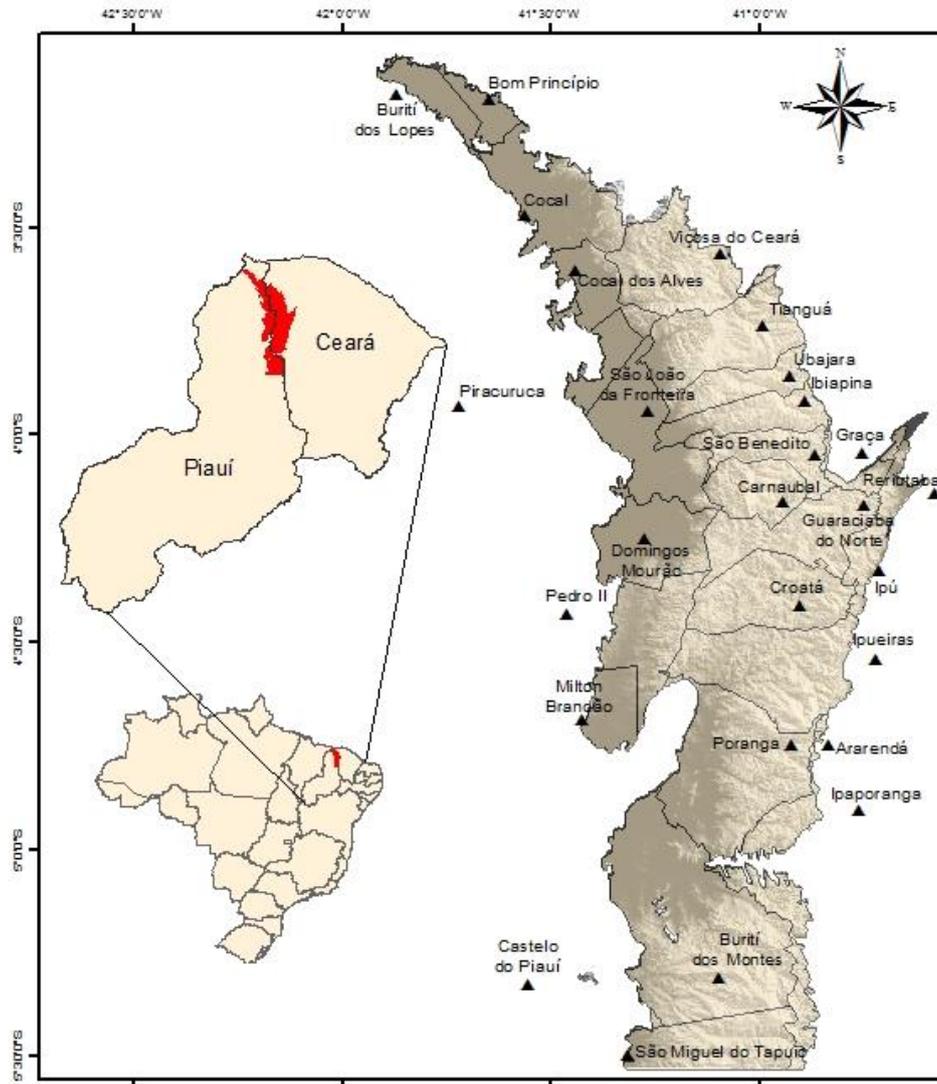


Figura 1. Localização da área de trabalho. Fonte: Aguiar, et al., 2014.

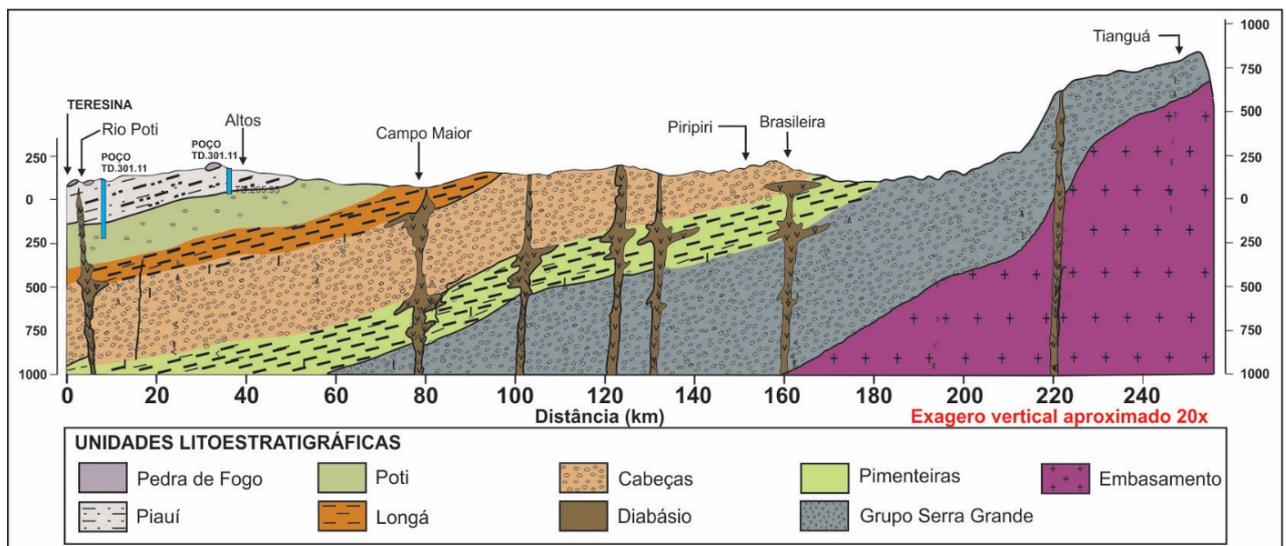


Figura 2: Seção geológica esquemática de direção NE – SW (Teresina – Tianguá), da Bacia Sedimentar Parnaíba. Fonte: Vasconcelos, et al., 2014.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

O método da eletrorresistividade baseia-se no estudo do potencial elétrico tanto dos campos elétricos naturais, existentes na crosta terrestre, como dos campos artificialmente provocados. Alguns minerais podem atuar como uma bateria e criar seu próprio campo elétrico, o chamado potencial espontâneo. No entanto, o mais frequente é enviar energia ao terreno, criando assim, campos artificiais cuja deformação permite deduzir características geológicas ou minerais do subsolo.

O princípio de aplicação do método consiste na observação do potencial elétrico criado pela injeção de corrente contínua ou alternada introduzida no solo através de dois eletrodos (AB), usando equipamento específico (eletrorresistivímetro), e na medida de uma diferença de potencial pelo equipamento através de um segundo par de eletrodos (MN). O valor medido desta diferença de potencial e da corrente associada é função da resistividade aparente do solo e do arranjo geométrico dos eletrodos, sendo a profundidade alcançada diretamente proporcional ao espaçamento entre os eletrodos (Orellana, 1972).

Isto permite a investigação da distribuição de resistividade em

subsuperfície através de três técnicas: Sondagem Elétrica Vertical (SEV), Caminhamento Elétrico (CE) e Perfilagem Elétrica (PERF). A primeira técnica se dedica ao estudo de camadas horizontalmente estratificadas, a segunda, de estruturas com variações laterais e, a terceira, a investigação lateral e vertical das variações do parâmetro físico efetuadas no interior de furos de sondagens (Figura 3). Já os arranjos correspondem à disposição dos eletrodos na superfície do terreno (Schlumberger, Wenner, Dipolo-Dipolo, etc.).

Quanto à aplicação, o método da eletrorresistividade é particularmente utilizado para prospecção de água subterrânea, pois o parâmetro resistividade é o que melhor distingue a rocha seca da rocha saturada.

Neste trabalho, o arranjo adotado foi o *Schlumberger*, que é o mais aceito mundialmente. A profundidade de investigação depende fundamentalmente da abertura AB. Deste modo, para que as linhas de corrente alcancem profundidades maiores, faz-se necessário aumentar cada vez mais a distância AB, obedecendo à proporcionalidade de  $MN \leq AB/5$  no arranjo *Schlumberger*.

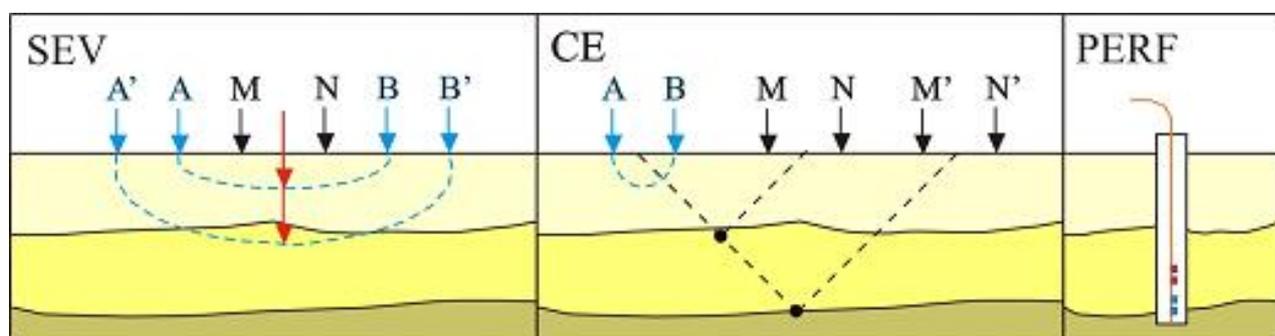


Figura 3: Representação simplificada das técnicas referentes ao método da eletrorresistividade. Fonte: (Braga, 2005)

Nas anotações de uma SEV são registradas as aberturas de AB/2 e MN/2, o valor do fator geométrico K, o valor da corrente I (mA), o valor da diferença de potencial DV (mV) e o valor calculado da resistividade aparente  $\rho_a$  (ohm.m), além de outras informações que identifiquem a sondagem, tais como, o número da SEV, as suas coordenadas geográficas, obtidas através de GPS (Global Positioning System), a data, o nome do local, o operador, as condições do tempo e o equipamento utilizado. A curva de resistividade aparente é gerada à medida que os valores vão sendo obtidos, em gráfico bilogartmico (resistividade aparente x AB/2), conforme mostra a Figura 4.

distribuídas ao longo da área da pesquisa de maneira a atender os objetivos gerais propostos: i) A caracterização geolétrica das unidades geológicas e aquíferas quanto as suas profundidades e espessuras; e ii) A integração com as informações hidrogeológicas, de modo a estabelecer correlações qualitativas da potencialidade hídrica específica ao sistema aquífero Serra Grande.

Desta maneira, foram locadas de acordo com a disponibilidade de estradas e acessos, além do contexto geológico local. Foram realizadas oitenta (80) SEVs, com diferentes aberturas de AB, todas no arranjo *Schlumberger*, portanto, com profundidades de investigação variadas. A Figura 5 apresenta a distribuição espacial dessas sondagens.

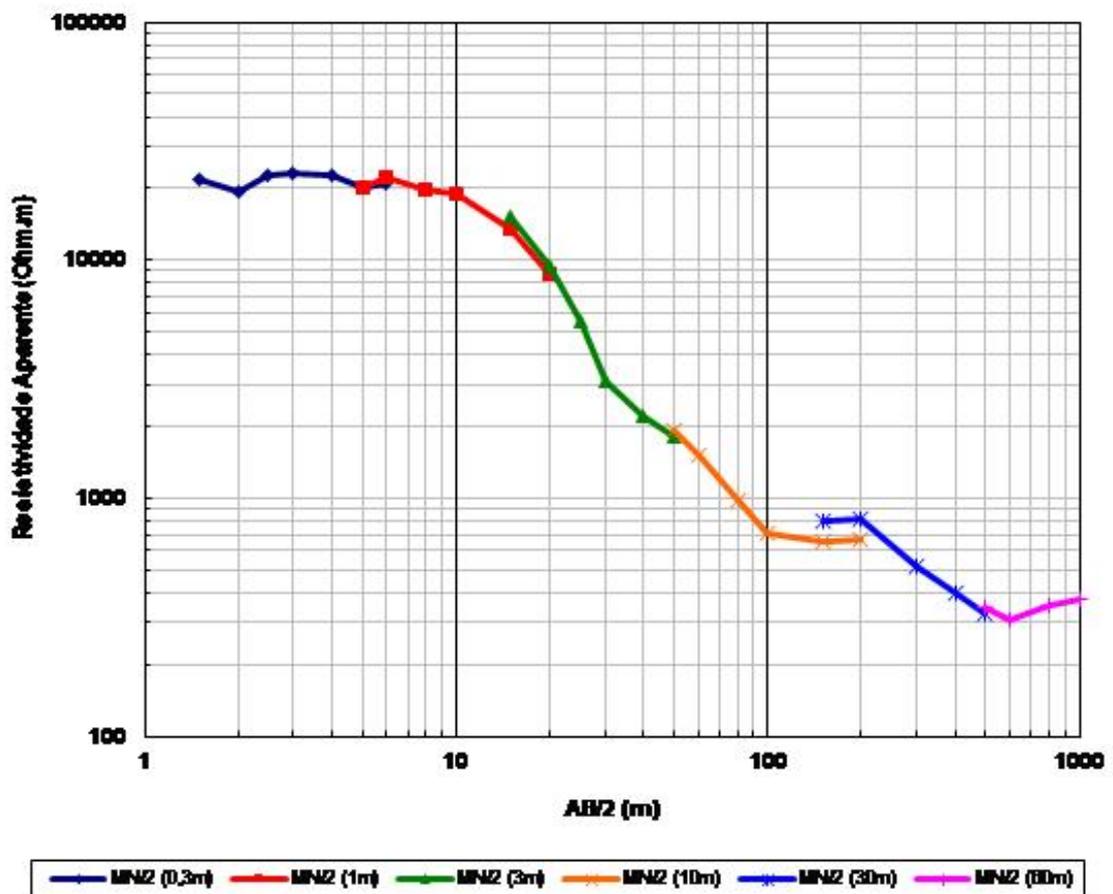


Figura 4: Curva de campo apresentada no papel bilogartmico (Resistividade Aparente x AB/2).

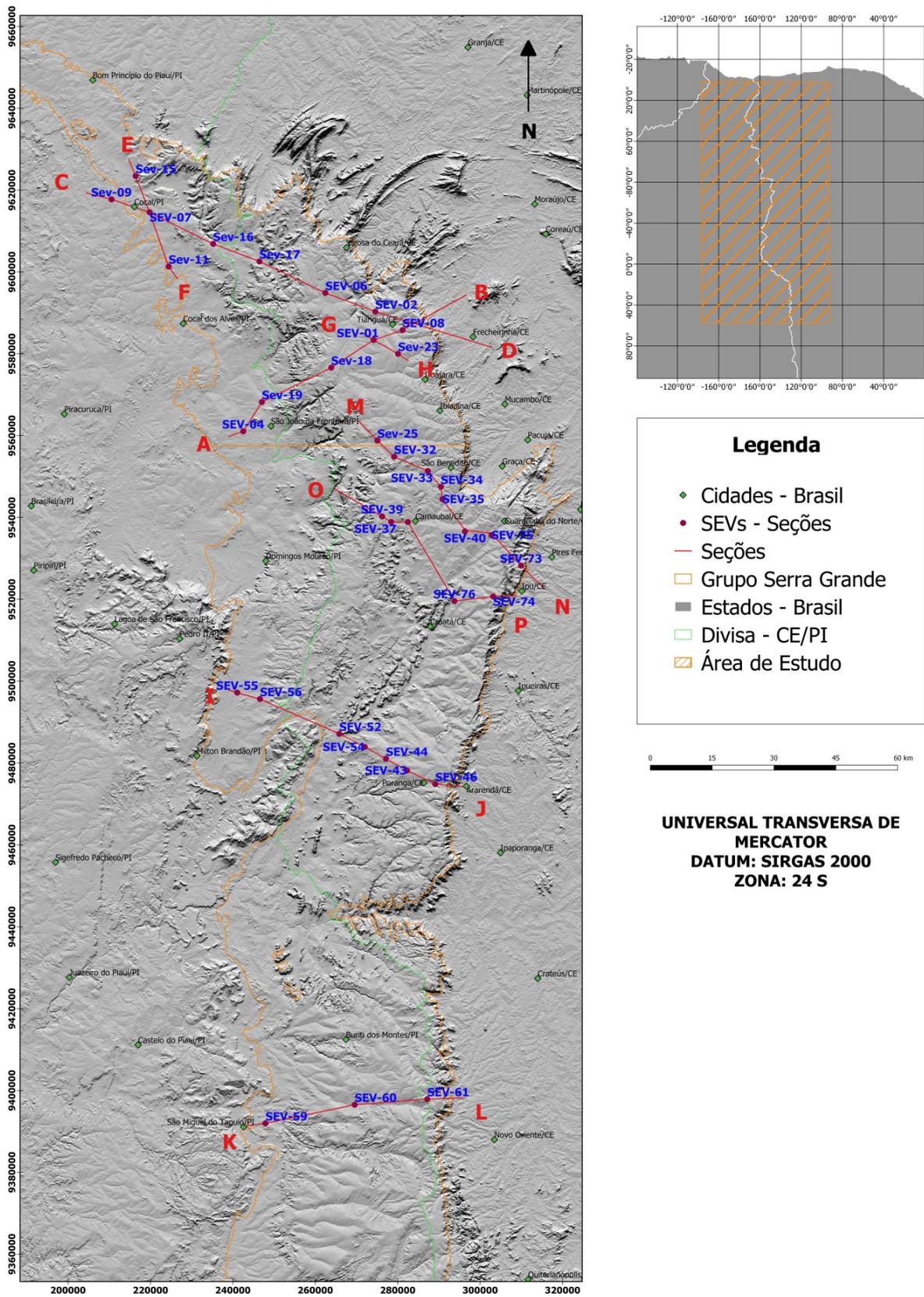


Figura 5: Mapa de distribuição das sondagens elétricas verticais (SEV) sobre os litótipos do Grupo Serra Grande, borda nordeste da Bacia Sedimentar do Parnaíba.

A unidade transmissora utilizada neste levantamento consta de uma fonte DC-DC, com potência máxima de 500W, saída máxima de 1000V e com precisão na medida de 0,1mA, fabricada pela Tectrol Equipamentos Elétricos e Eletrônicos Ltda.

O receptor utilizado para medir a diferença de potencial é digital e tem uma impedância de entrada de 10Mohm, sua sensibilidade é de 0,1mV e a leitura máxima é de 4V. É fabricado pela Minipa Indústria e Comércio, modelo ET – 2055, que faz o ajuste automático de zero.

Também foram utilizadas quatro bobinas para a linha AB, com cabos flexíveis de 1,5mm<sup>2</sup> de seção, podendo obter-se uma abertura máxima de 2400m. Os eletrodos usados na linha AB foram de aço inoxidável, com comprimentos de 60cm e 80cm e diâmetros não superiores a 2,5cm. Em regiões de solos secos foi necessário a utilização de eletrodos mais longos, da ordem de 1,2m. Na linha de potencial MN foram utilizados eletrodos não-polarizáveis, para melhor estabilização da leitura.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após as etapas de campo para realização das oitenta (80) sondagens

elétricas verticais (SEV), os dados foram tratados, processados e interpretados, através de softwares específicos. Para o processamento e interpretação dos dados, foram utilizados os programas ProcSev e Resin, respectivamente Marinho (2011a) e Marinho (2011b).

A Figura 6 apresenta o histograma de frequência para as aberturas máximas de AB/2 utilizadas neste estudo. Observa-se que a grande maioria das SEVs teve a abertura máxima de AB/2 igual ou superior a 1000m, sendo que as aberturas variaram de 1500m a 400m.

A profundidade de investigação de cada sondagem (SEV) realizada foi calculada através do programa de interpretação (Resin). A Figura 7 mostra o histograma de frequência para as profundidades de investigação alcançadas durante neste levantamento. Verifica-se que, a grande maioria das SEVs investigou profundidades superiores a 400m, bem maiores que as profundidades dos poços perfurados em toda essa região. Isto significa, que o método da eletrorresistividade, embora indireto, deve contribuir fortemente para o conhecimento geológico/hidrogeológico da área estudada.

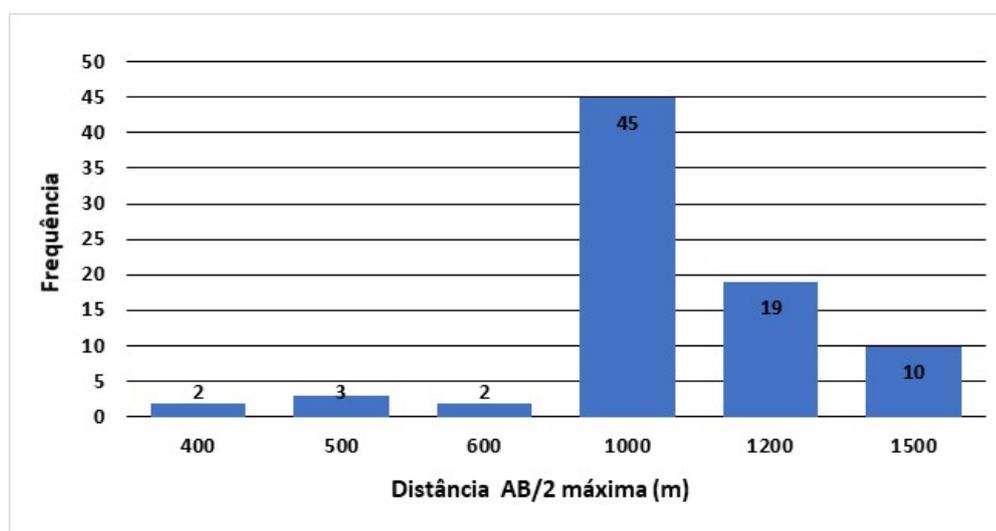


Figura 6: Histograma de frequência para as aberturas máximas de AB/2.

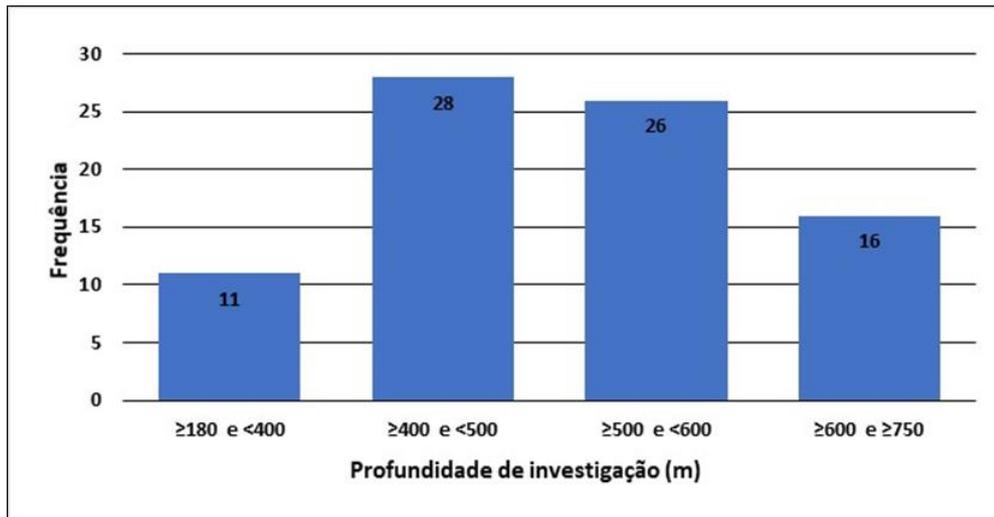


Figura 7: Histograma de frequência para as profundidades investigadas.

Na Figura 8 está representado o histograma de frequência das resistividades encontradas para os sedimentos que formam o aquífero Serra Grande. Os valores abaixo de 50 ohm.m devem corresponder aos níveis mais condutivos e argilosos do Grupo Serra Grande. Acima de 650 ohm.m, configura-se o arenito Serra Grande resistivo, provavelmente não saturado.

Tendo em vista que muitas das sondagens, especialmente na zona central e sul da área de estudo,

não alcançaram as rochas do embasamento cristalino, assim como, por razões operacionais, outras, investigaram pequenas profundidades, torna-se difícil definir com precisão o limite inferior (base) do aquífero. Neste sentido, os valores das espessuras saturadas do aquífero, apresentados no histograma de frequência da Figura 9, estão subestimados. Ou seja, a espessura do aquífero Serra Grande nesta região deve ser maior.

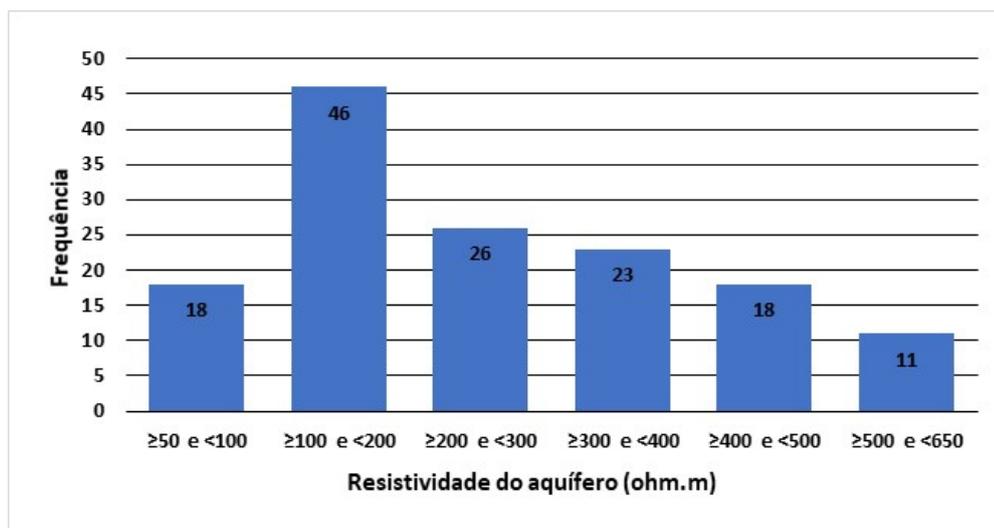


Figura 8: Histograma de frequência para as resistividades do aquífero Serra Grande.

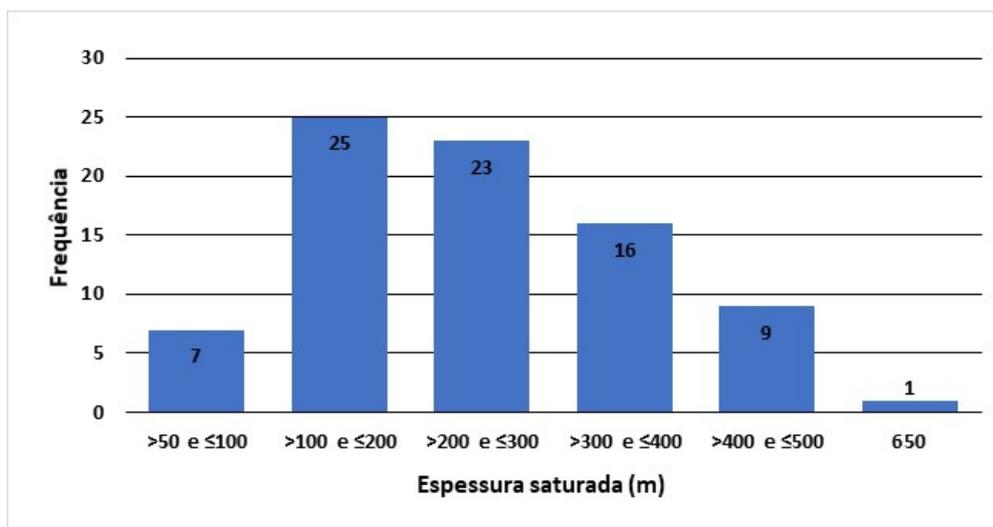


Figura 9: Histograma de frequência das espessuras do aquífero Serra Grande. Atenta-se para o fato desses valores estarem subestimados.

Baseados nas características geofísicas das unidades que compõem o aquífero Serra Grande e ao conhecimento geológico/hidrogeológico da área de estudo, foram elaboradas oito seções geolétricas com o intuito de representar a distribuição lateral e vertical do aquífero e, conseqüentemente, as áreas propícias à perfuração de poços tubulares. A Figura 10 mostra a localização dessas seções na área pesquisada.

Para facilitar a interpretação dos perfis geolétricos, convencionou-se que: a tonalidade azul nas colunas indica a zona aquífera do Grupo Serra Grande; as tonalidades de cores rósea a vermelha indicam os estratos resistivos e, caso estejam na parte superior da seção, correspondem às coberturas secas (solos), se estão no corpo da coluna, são as camadas resistivas (não saturada) do Grupo Serra Grande e, se ocorrerem na parte basal, quando indicado, são rochas do embasamento cristalino.

A Figura 11 apresenta a seção geolétrica A-B. Observa-se que, nas SEVs 01 e 18 ocorre um aquífero superior raso separado do aquífero inferior por uma camada resistiva. No entanto, este aquífero superior não tem continuidade

para NE, na SEV 08, nem para SW nas SEVs 19 e 04. A ocorrência de surgências entre as SEVs 18 e 19 evidencia essa afirmativa. As interpretações indicam a presença do embasamento cristalino em toda seção.

A seção geolétrica C-D, entre as cidades de Cocal-PI e Tianguá-CE, é exibida na Figura 12. As interpretações das SEVs 09, 07 e 17 indicam a presença de estruturas do tipo graben e das SEVs 16, 06 e 02 do tipo horst afetando o embasamento cristalino. O aquífero Serra Grande também aparece em toda seção.

Já a Figura 13 mostra a seção geolétrica E-F, formada pelas SEVs 11, 07 e 15. Chama atenção o padrão bastante diferente da SEV 15, que exibe uma camada superficial argilosa e uma zona aquífera reduzida, em comparação com as duas outras SEVs da seção.

A seção G-H, representada na Figura 14, mostra de forma clara o que se advoga para diversos locais da área investigada: a presença de um aquífero superior, raso e pouco espesso, separado por uma camada resistiva, de um aquífero inferior, bem mais espesso.

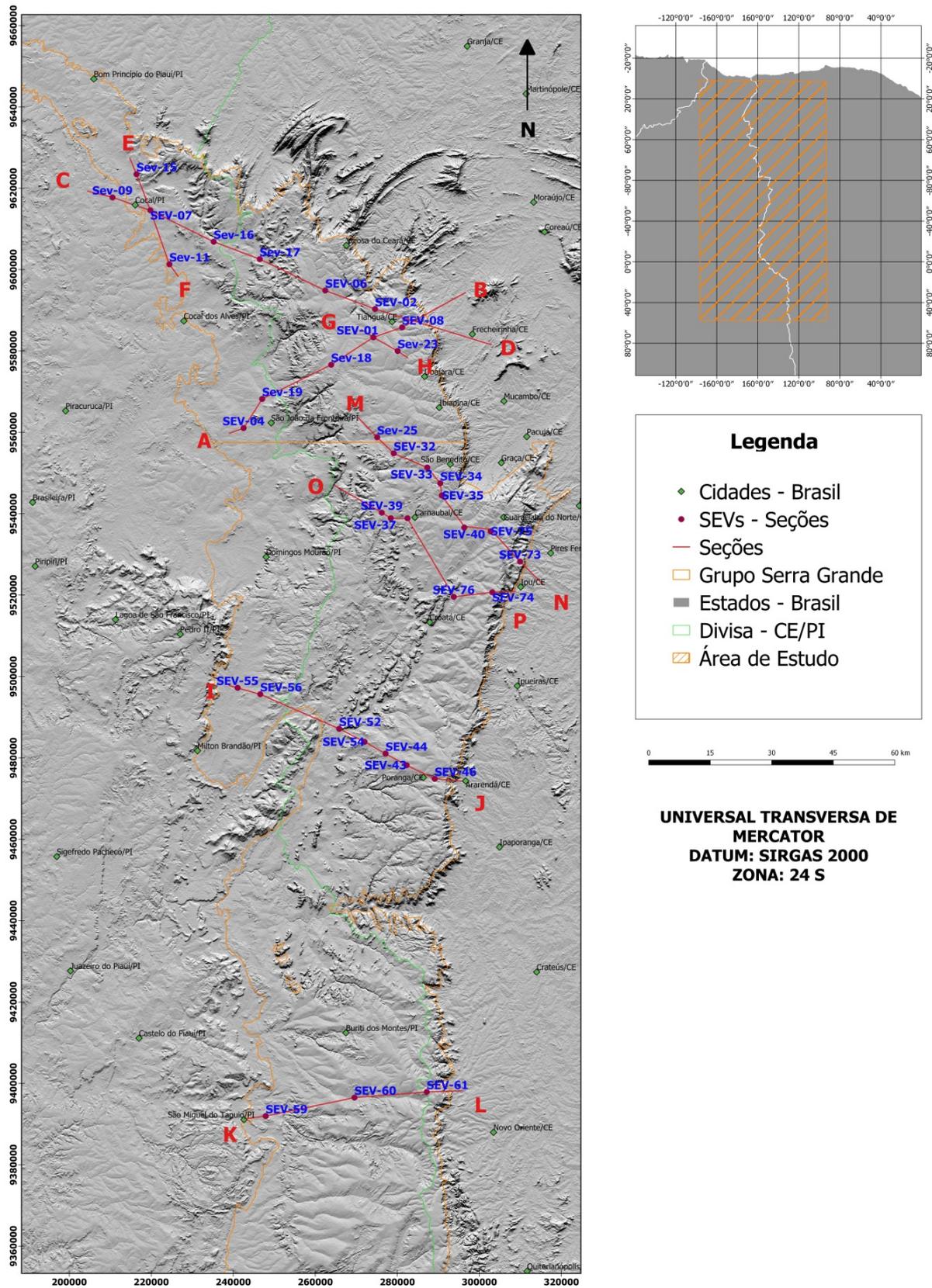


Figura 10: Localização das seções geolétricas e das SEVs envolvidas.

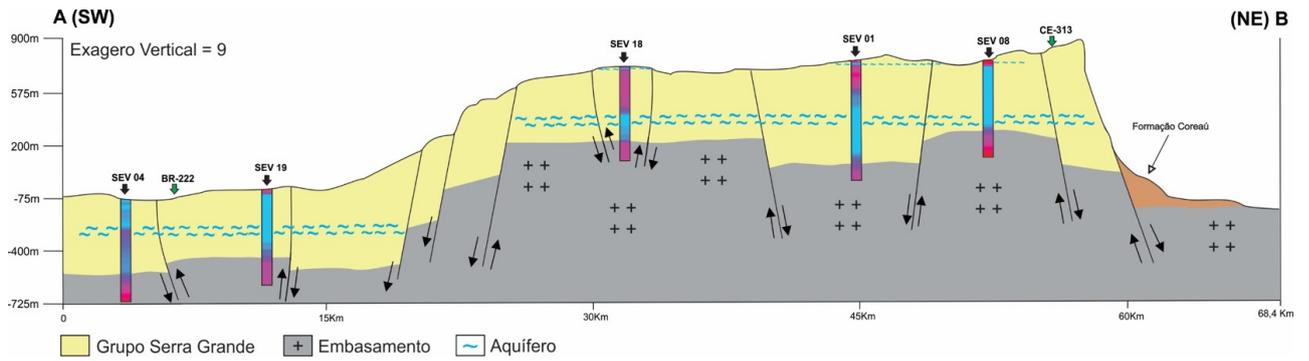


Figura 11: Seção geolétrica A-B. Localizada ao longo BR-222, entre as cidades de Tianguá-CE e São João da Fronteira-PI.

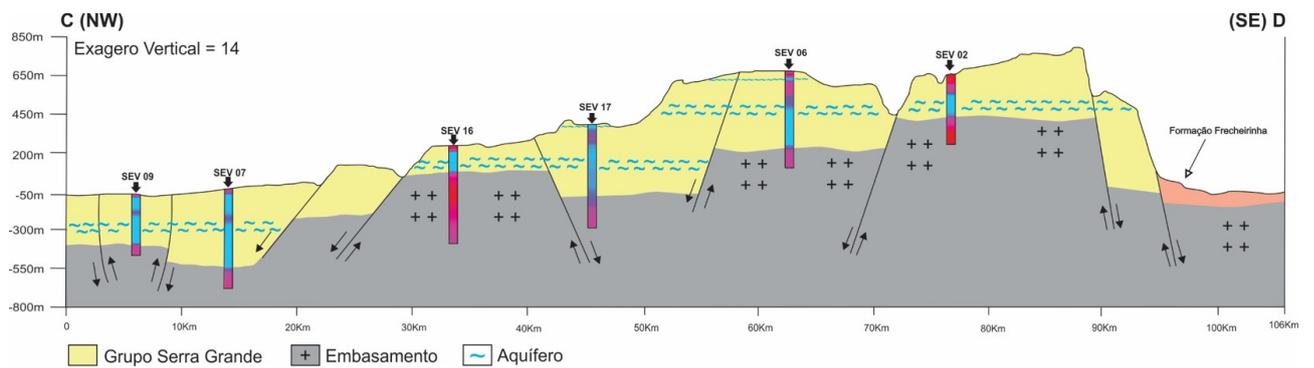


Figura 12: Seção geolétrica C-D, ao longo das rodovias estaduais CE-232 e PI-213, que liga os estados do Ceará ao Piauí.

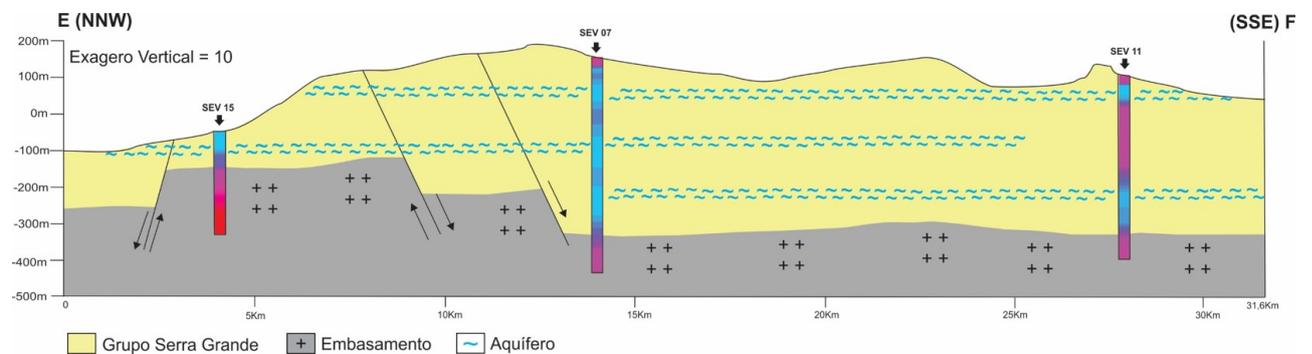


Figura 13: Seção geolétrica E-F, localizada no município de Cocal-PI.

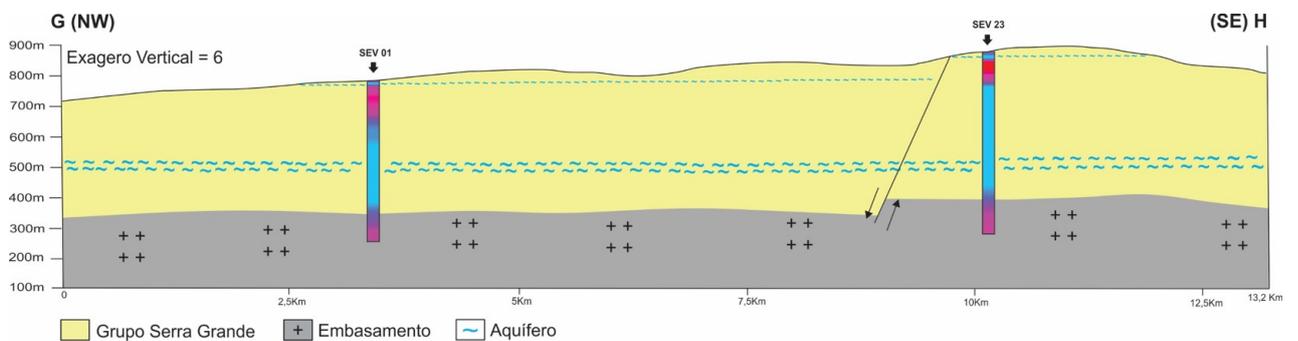


Figura 14: Seção geolétrica G-H, localizada no município de Tianguá, no Ceará.

A Figura 15 mostra a seção geolétrica I-J, situada na BR-404, entre as cidades de Pedro II–PI e Poranga–CE. O embasamento foi alcançado na SEV 46, que está mais próxima da borda leste da bacia. As curvas são muito regulares, e as condições hidrogeológicas melhoram em direção ao centro da bacia indicando a possibilidade de uma porção mais profunda (graben) do aquífero.

Com relação a seção K-L (Figura 16), localizada ao sul da área investigada, o substrato cristalino não foi alcançado em nenhuma das três SEVs utilizadas. O padrão geológico/hidrogeológico da seção é semelhante ao de toda área investigada.

Durante o trabalho de campo, observou-se que o embasamento cristalino não era alcançado em muitas SEVs da borda leste, na região entre São Benedito e Guaraciaba do Norte. Como o

mapa geológico regional (Bizzi, *et al.*, 2003) indica que o lineamento Sobral-Pedro II e a falha Café-Ipueiras se prolongam na Serra da Ibiapaba, decidiu-se fazer duas seções transversais as tais estruturas para analisar o caso.

A seção M-N (Figura 17), mostra que o substrato cristalino foi alcançado nas SEVs 25, 32, 33 e 34, situadas do lado noroeste da seção, enquanto nas demais SEVs as profundidades investigadas não ultrapassaram o aquífero Serra Grande, sugerindo a presença de uma estrutura do tipo graben. Por outro lado, na seção geolétrica O-P (Figura 18), paralela à seção M-N, as SEVs 37, 38 e 76 não atingiram o substrato cristalino, enquanto as SEVs extremas 39 e 74 da seção o fizeram, sugerindo também a presença do graben.

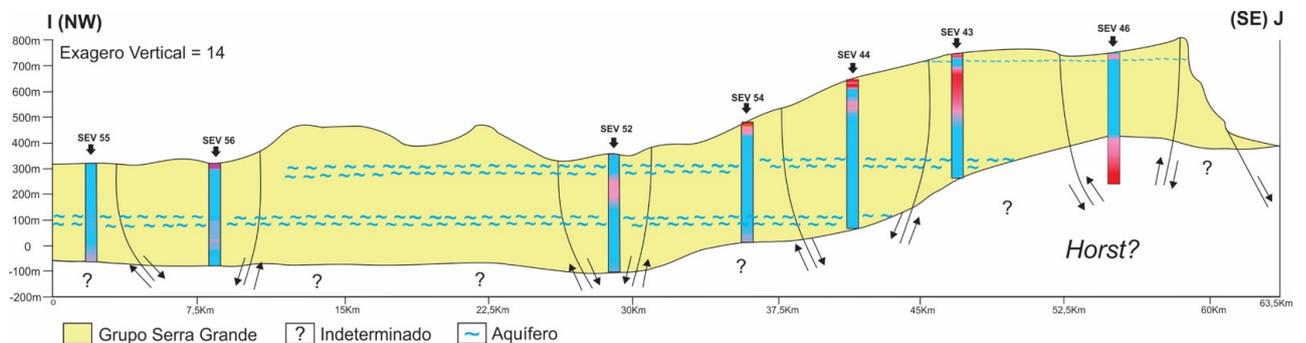


Figura 15: Seção geolétrica I-J, ao longo da BR-404 no município de Poranga-CE.

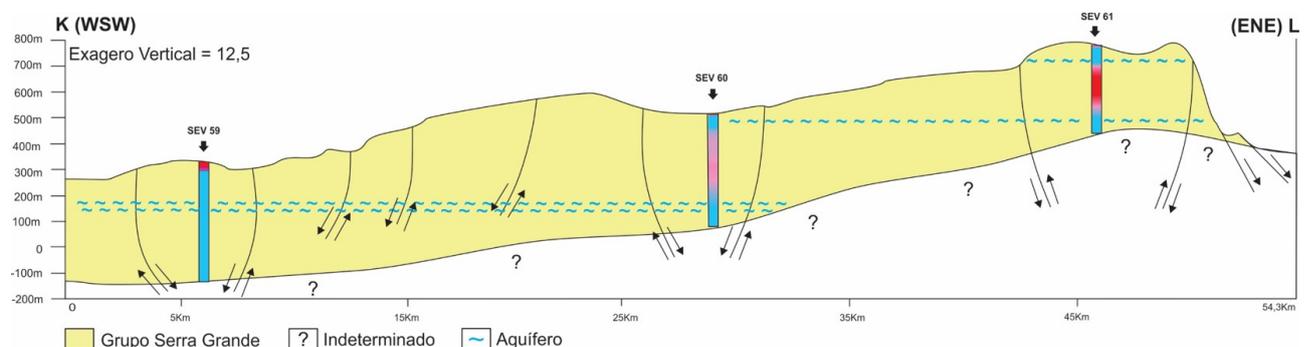


Figura 16: Seção geolétrica K-L, localizada no município de São Miguel do Tapuio.

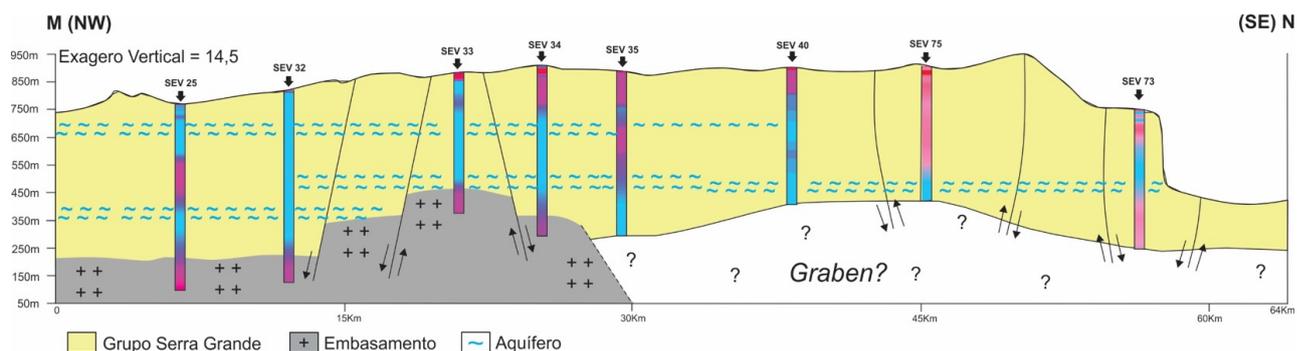


Figura 17: Seção geolétrica M-N.

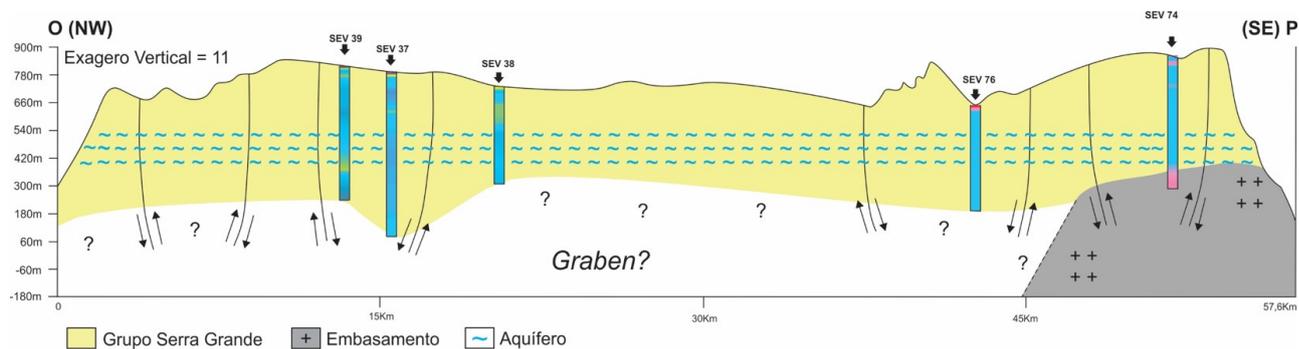


Figura 18: Seção geolétrica O-P.

Apesar da descontinuidade do aquífero em muitas SEVs e o fato de a investigação em grande parte das sondagens não ter alcançado o embasamento cristalino, foi elaborado o mapa de profundidade mínima do embasamento cristalino (Figura 19). Através deste mapa é possível a determinação da espessura mínima do aquífero Serra Grande. O termo “mínima”, como explicado anteriormente, se deve ao fato de muitas SEVs não terem investigado toda espessura sedimentar, especialmente nas partes central e sul da área investigada. Portanto, o mapa deve ser visto com restrições. Para elaboração desse mapa foram utilizadas informações de 75 SEVs. As espessuras variam basicamente entre 200 e 500m, mas em muitos pontos estão subestimadas, ou seja, os valores podem estar bem acima do indicado no mapa.

O mapa mostra, no geral, um aumento da espessura para oeste, como era de se esperar. No entanto, no trecho entre Guaraciaba do Norte, São Benedito e Carnaubal, os resultados sugerem que as profundidades ao topo do embasamento cristalino são maiores, na direção nordeste, conforme indicado nas seções N-M (Figura 17) e O-P (Figura 18). Fato idêntico ocorre no sul da área, incluindo o município de Buriti dos Montes. Estes fatos são melhor visualizados na Figura 19, com destaque para cor vermelha.

Através dos valores de oitenta sondagens foi elaborado o mapa potenciométrico e de fluxo d'água do aquífero Serra Grande, apresentado na Figura 20. O mapa potenciométrico mostra que os contornos variam de 50 a 900m. As linhas de fluxo d'água se direcionam nitidamente para oeste. Os

maiores gradientes hidráulicos, na parte central da área, estão relacionados aos grandes declives topográficos na direção oeste. Os menores gradientes estão localizados na parte oeste da área, em Cocal, em Domingos Mourão e ao leste de Pedro II; são locais mais favoráveis à captação de água subterrânea.

Uma anomalia no mapa potenciométrico pode ser vista na parte leste da área, tendo como referência a cidade de Guaraciaba do Norte. Trata-se de um baixo potenciométrico, que deve ser mais bem estudado, pois pode ter melhores condições locais de captação de água subterrânea.

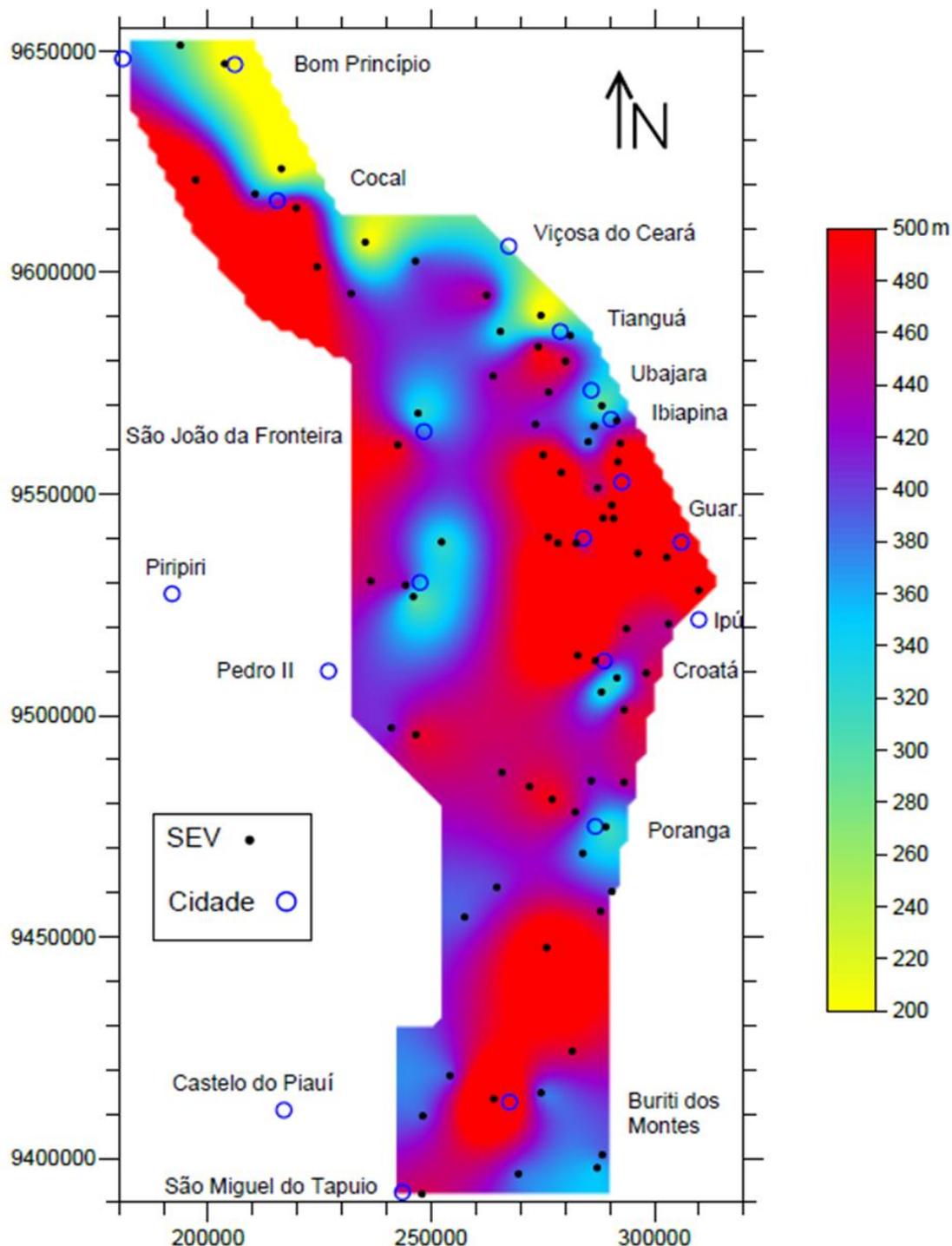


Figura 19: Mapa de profundidade mínima ao topo do cristalino. Escala de cores em metros.

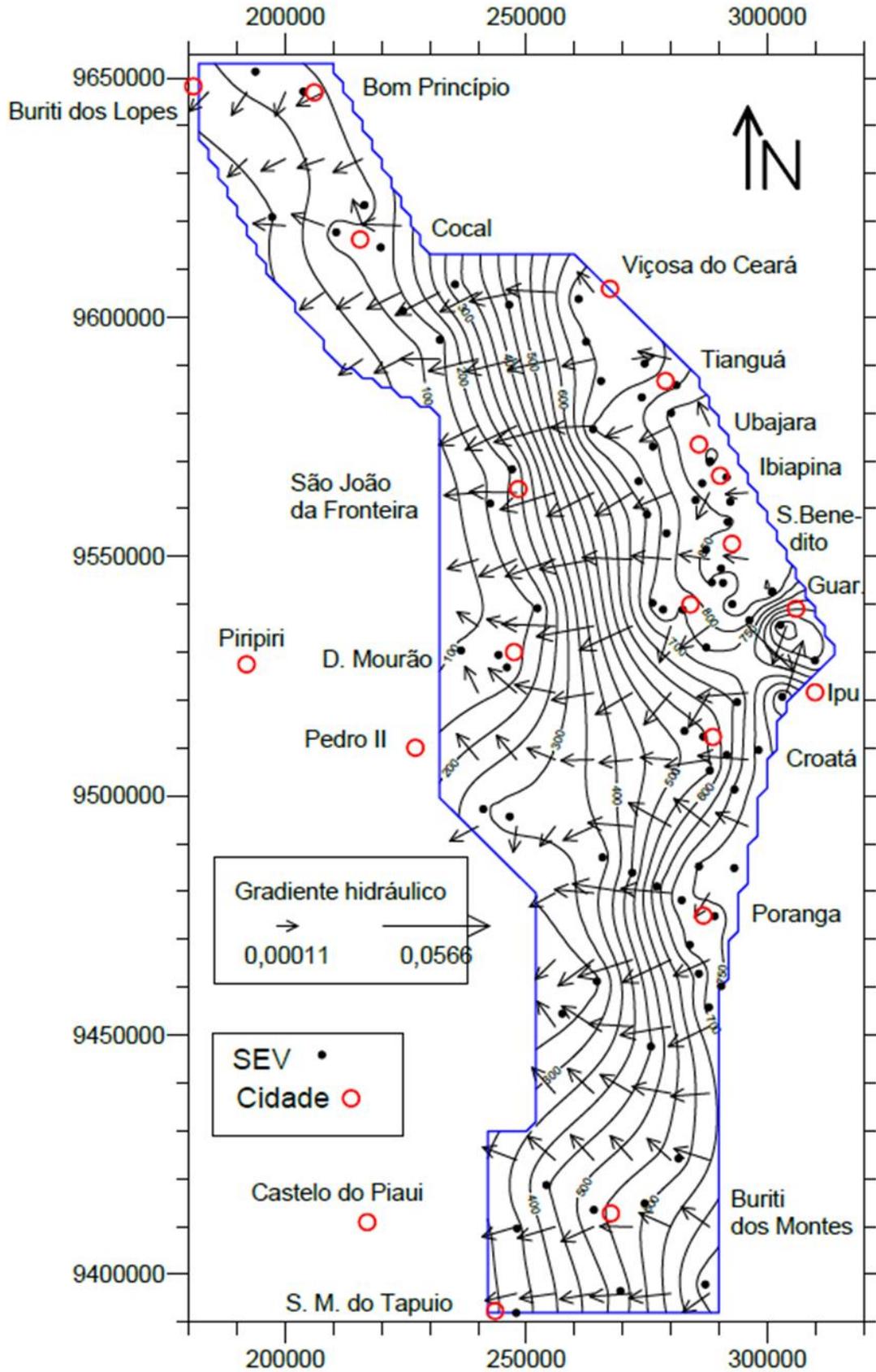


Figura 20: Mapa potenciométrico e de fluxo d'água.

## 5. CONCLUSÕES

Em muitas SEVs, distribuídas pela área investigada, os estudos revelam que ocorrem dois aquíferos no Grupo Serra Grande, que podemos denominar de Superior e Inferior, os quais estão separados por camada resistiva, que se constitui, provavelmente, em uma barreira hidrogeológica. O aquífero superior, muito comum na faixa leste entre Tianguá e São Benedito, é raso e pouco espesso, entre 10m e 20m.

Os valores mais frequentes de resistividade do aquífero Serra Grande estão entre 100 e 400 ohm.m. Por outro lado, a média, de sete valores medidos de condutividade elétrica da água do aquífero Serra Grande, foi de 389  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , sendo o menor valor de 40 e o maior de 1020  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

A estimativa da potencialidade do aquífero Serra Grande não foi possível porque muitas sondagens não investigaram toda camada aquífera. Em uma avaliação subestimada, as interpretações das SEVs conduzem a um resultado em que as espessuras saturadas mais frequentes estão entre 100m e 400m.

As oito seções geoeétricas ilustram bem o comportamento hidrogeológico do Grupo Serra Grande. As seções M-N e O-P reforçam a ideia de que o graben relativo à falha Café-Ipueiras adentra a bacia.

O mapa de profundidade mínima ao topo do embasamento cristalino serve de suporte à projetos de perfuração de poços com relação à profundidade dos mesmos.

As cotas potenciométricas variam de 900m, na borda leste da bacia, até 50m na parte oeste da área investigada. A borda leste é importante para recarga dos mananciais subterrâneos do aquífero Serra Grande. O fluxo de água

subterrânea é nitidamente para oeste.

Os maiores gradientes hidráulicos, na parte central da área, de norte a sul, estão relacionados aos grandes declives topográficos na direção oeste. Os menores gradientes estão localizados na parte oeste da área, em Cocal, em Domingos Mourão e ao leste de Pedro II; são locais mais favoráveis à captação de água subterrânea.

O mapa potenciométrico revela também um baixo, abrangendo o Município de Guaraciaba do Norte. Esta área de mínimo poderá ser mais favorável à captação de água subterrânea.

Os estudos de eletrorresistividade trazem grandes subsídios para projetos de perfuração de poços, tanto de caráter hidrogeológico quanto estratigráfico.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, P. M. 2002. Estudos geofísicos (Magnetotélúrico e Eletromagnético Transiente) da porção leste da Bacia do Parnaíba: Contribuição ao conhecimento hidrogeológico. Dissertação de Mestrado. Observatório Nacional, Rio de Janeiro.
- AGUIAR, G. A. 1971. Revisão geológica da bacia paleozóica do Maranhão. Congresso Brasileiro de Geologia, 25 (pp. 113 - 122). São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia.
- AGUIAR, R. B., & VERISSÍMO, L. S. 2014. Hidrogeologia da Porção Nordeste da Bacia Sedimentar do Parnaíba. In CPRM, Pesquisa Hidrogeológica em Bacias Sedimentares do Nordeste Brasileiro (Vol. CDRom). Rio de Janeiro: Serviço Geológico do Brasil.
- AGUIAR, R. B., VERISSÍMO, L. S., & VASCONCELOS, S. S. 2014. Subsídio à gestão dos recursos hídricos subterrâneos na borda nordeste da Bacia Sedimentar do Parnaíba. Anais

- XVIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas (p. CD Rom). Belo Horizonte: ABAS.
- ARAUJO, C. C. 1979. Projeto Estudo Global dos Recursos Minerais da Bacia Sedimentar do Parnaíba. Subprojeto Hidrogeologia: Relatório Final. Folha 12 - Teresina SO. CPRM, Recife.
- ARAUJO, C. C., MIRANDA, J. F., SOARES FILHO, A. R., TEIXEIRA, C. P., BARROS, F. D., & SILVA, F. C. 1979. Projeto Estudo Global dos Recursos Minerais da Bacia Sedimentar do Parnaíba: Subprojeto Hidrogeologia: Relatório Final - Folha 17 - Rio São Francisco - NO. CPRM, Recife.
- ARCHIE, G. E. 1942. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Petroleum Technology*, pp. v. 146 54 - 62.
- BIZZI, L. A., SCHOBENHAUS, C., VIDOTTI, R. M., & GONÇALVES, J. H. 2003. *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil: Textos, Mapas & SIG. Geology, Tectonics and Mineral Resources of Brazil: Text, Maps & GIS.* (C.-S. Brasil, Ed.) Brasília: Universidade de Brasília.
- BRAGA, A. C. O 2005. *Métodos Geoeétricos Aplicados. Notas de Aula.* UNESP. Rio Claro –SP.
- BRASIL. 1973. Estudos de reconhecimento do Vale do Gurguéa. DNOCS (OESA/TECNOSOLO/OTI/EPTISA), Teresina.
- BRITO NEVES, B. B. 1983. O mapa geológico do nordeste oriental do Brasil, escala 1:1.000.000. (Tese de Livre Docência - Instituto de Geociência - USP). Universidade de São Paulo, São Paulo.
- CAPUTO, M. V. 1984. Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology and paleogeography of Northern Basins of Brazil. Thesis (Doctorate). University of California, Santa Bárbara.
- CAPUTO, M. V., & LIMA, E. C. 1984. Estratigrafia, idade e correlação do Grupo Serra Grande - Bacia do Parnaíba. *Anais do XXXIII Congresso Brasileiro de Geologia* (pp. 740-753). Rio de Janeiro: SBG.
- CAROZZI, A. V., FALKENHEIN, F. H., CARNEIRO, R. G., ESTEVES, F. R., & CONTREIRAS, C. A. 1975. Análise ambiental e evolução tectônica sin-sedimentar da seção siluro-eocarbonífera da Bacia do Maranhão. *Ciência - Técnica - Petróleo*, Rio de Janeiro.
- CASTELO BRANCO, R. G., PEDROSA JR., N., AGUIAR, R. B., MARTINS, J. A., & SILVA, N. V. 2015. Gravimetria da borda nordeste da Bacia Sedimentar do Parnaíba: Importâncias e reflexos geológicos e estruturais para a pesquisa hidrogeológica. *Anais 14th International Congress of the Brazilian Geophysical Society*. Rio de Janeiro: SBGf.
- CASTRO, D. L., FUCK, R. A., PHILLIPS, J. D., VIDOTTI, R. M., BEZERRA, F. H., & DANTAS, E. L. 2014. Crustal structure beneath the Paleozoic Parnaíba Basin revealed by airborne gravity and magnetic data, Brazil. *Tectonophysics* 614, pp. 128 - 145.
- CEARÁ. 1992. Estudos de Base I - Hidroclimatologia. In S. d. Hídricos, Plano Estadual de Recursos Hídricos (p. 663). Fortaleza: Imprensa Oficial do Ceará.
- CHIFUNGA, T. R. 2003. Estudos de aquíferos em regiões cristalinas no município de São Raimundo Nonato (Piauí), com o método eletromagnético HLEM. Dissertação de Mestrado. Observatório Nacional, Rio de Janeiro.
- CORREIA FILHO, F. L., MONTEIRO, A. B., & BARRADAS, M. T. 2012. Estruturas armazenadoras de água subterrâneas na borda sudeste da Bacia

- Sedimentar do Parnaíba. Anais XVII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Bonito: ABAS.
- CORREIA FILHO, F. L., MONTEIRO, A. B., & SOUSA, N. G. 2009. Projeto Borda Sudeste da Bacia Sedimentar do Parnaíba. CPRM - Serviço Geológico do Brasil, Teresina.
- COSTA, W. D. (1996. Água subterrânea e o desenvolvimento sustentável do semiárido nordestino. In P. Áridas, Uma estratégia de desenvolvimento sustentável para o Nordeste: GT II- Recursos hídricos. (Vol. 7v., p. 62). Brasília: SEPLAN-Brasília.
- CPRM. 2004. Atlas digital dos recursos hídricos subterrâneos do Piauí. CPRM - Serviço Geológico do Brasil, Fortaleza.
- CRUZ, W. B. 1967. Alguns aspectos de circulação e salinização de água subterrânea em rochas cristalinas do nordeste do Brasil. Sudene, Recife.
- CRUZ, W. B., & FRANÇA, H. M. 1970. Inventário hidrogeológico básico do nordeste brasileiro. Sudene, Recife.
- DELLA FÁVERA, J. C. 1990. Tempestitos na Bacia do Parnaíba, Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- FIGUEIREDO, A. F., & RAJA GABAGLIA, G. P. 1986. Sistema classificatório aplicado às Bacias Sedimentares Brasileiras. Revista Brasileira de Geociências, 16 (4), 350 - 369.
- FREEZY, R. A., & CHERRY, J. A. 1979. Groundwater (Vol. 598p.). Nova Jersey: Prentice-Hall, Inc.
- GÓES, A. M. 1995. A Formação Poti (Carbonífero Inferior) da Bacia do Parnaíba. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo.
- GÓES, Á. M., & FEIJÓ, F. J. 1994. Bacia do Parnaíba. Boletim de Geociências Petrobrás, pp. 57 - 67.
- GÓES, Á. M., SOUZA, J. P., & TEIXEIRA, L. B. 1990. Estágio exploratório e perspectivas petrolíferas da Bacia do Parnaíba. Boletim de Geociências da Petrobras, pp. 55 - 64.
- IRITANI, M. A., HSSUDA, S., SOUZA, J. S., & REBOUÇAS, A. C. 2000. Avaliação dos valores de transmissividade do aquífero sedimentar no município de Caçapava (SP), com base na capacidade específica obtida em testes de bombeamento. Anais do I Congresso Mundial Integrado de Águas Subterrâneas (p. 21 p.). Fortaleza: ABAS.
- JULIÃO, A. 2015. A fratura-mãe. Pesquisa Fapesp, I(236), 56 - 57.
- KEGEL, W. 1953. Estudos no estado do Piauí. Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM, Teresina.
- KEGEL, W. 1961. Pesquisa sistemática de água subterrânea na bacia do Parnaíba (Piauí e Maranhão) e bacia do Apodi (Rio Grande do Norte). Sudene, Recife.
- KOPPEN, W. 1948. Climatologia: con un estudio de los climas de la tierra. Mexico: Fondo de Cultura Económica, 1948. 478 p
- LEAL, A. S. 1970. Inventário hidrogeológico básico do Nordeste, folha n.19, Aracaju-NO. Sudene, Recife.
- LIMA, E. M., & LEITE, J. F. 1978. Projeto Estudo Global dos Recursos Minerais da Bacia Sedimentar do Parnaíba: integração geológico-

- metagenética, Relatório Final, Etapa III. Texto. DNPM/CPRM, Recife.
- LIMA, J. R. 2000. Investigação geoeletrica da porção sudeste da Bacia do Parnaíba: Implicações hidrogeológicas e tectônicas. Tese de Doutorado. Observatório Nacional, Rio de Janeiro.
- LISBOA, M. A. 1914. The permian geology of Northern Brazil. *American Journal of Science*, pp. 425 - 443.
- MARINHO, J.M.L. 2011a. Programa para suavização de curvas de sondagem elétrica vertical.
- MARINHO, J.M.L. 2011b. Programa para modelagem e inversão de curvas de sondagem elétrica vertical.
- MEJU, M. A., FONTES, S. L., OLIVEIRA, M., LIMA, J. R., ULUGERGERLI, E. U., & CARRASQUILLA, A. A. 1999. Regional aquifer mapping using combined VES-TEM-AMT/EMAP methods in the semiarid eastern margin of Parnaiba Basin, Brazil. *Geophysycs*, 64(2), 337-356.
- MESNER, J. C., & WOOLDRIDGE, L. C. 1964. Estratigrafia das bacias Paleozóica e Cretácea do Maranhão. *Boletim Técnico da Petrobras*, v 7, n 2, pp. 137 - 164.
- MILANI, E. J., & THOMAZ FILHO, A. 2000. Sedimentary Basins of South America. In U. G. CORDANI, E. J. MILANI, A. THOMAS FILHO, & D. A. CAMPOS Tectonic Evolution of South America (V ed., pp. 389 - 450). Rio de Janeiro: 31 International Geological Congress.
- MIRANDA, J. F. 1979. Projeto Estudo Global dos Recursos Minerais da Bacia Sedimentar do Parnaíba. Subprojeto Hidrogeologia: Relatório Final. Folha 01- São Luiz – NO. CPRM, Recife.
- OLIVEIRA, D. C. & MOHRIAK, W. U. 2003. Jaibaras Trough: an important element in the early tectonic evolution of the Parnaiba interior sag Basin, Northeastern, Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, pp. 351 - 383.
- ORELLANA, E. 1972. Prospection geoeletrica em corrente continua. Madri: S.A. Ediciones Paraninfo.
- PEDREIRA, A. J., LOPES, R. D., VASCONCELOS, A. M., & BAHIA, R. C. 2003. Bacias Sedimentares Paleozóicas e Meso-Cenozóicas Interiores. In L. A. Bizzi, C. Schobbenhaus, R. M. Vidotti, J. H. Gonçalves, & U. d. Brasília (Ed.), *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil: Texto, Mapas & SIG* (Vol. I, pp. 55 - 85). Brasília, Distrito Federal, Brasil: CPRM - Serviço Geológico do Brasil.
- PESSOA, M. D. 1979. Inventário Hidrogeológico Básico do Nordeste. Folha n. 18 - São Francisco - NE. . *Sudene (Hidrogeologia, 59)*, Recife.
- REBOUÇAS, A. C., & GASPARY, J. 1966. As águas subterrâneas do nordeste: estimativas preliminares. *Sudene*, Recife.
- SCHOBHENHAUS, C., CAMPOS, D. D., DERZE, G. R., & ASMUS, H. E. 1984. *Geologia do Brasil: Texto explicativo do Mapa Geológico do Brasil e da área oceânica adjacente incluindo depósitos minerais. Escala 1:2.500.000* (I ed., Vol. I). Brasília: DNPM.
- SILVA, F. C. 1979. Estudo global dos recursos minerais da Bacia Sedimentar do Parnaíba. Subprojeto Hidrogeologia. Folha 22 - Rio São Francisco. Relatório Final. CPRM, Recife.
- SILVA, F. C. 1979. Projeto Estudo Global dos Recursos Minerais da Bacia Sedimentar do Parnaiba. Subprojeto Hidrogeologia: Relatório Final - Folha 03 - São Luis - SO. CPRM, Recife.
- SILVA, F. C., ARAUJO, C. C., MIRANDA, J. F., SOARES FILHO, A. R., TEIXEIRA, C. P., & BARROS, F. D. 1979. Projeto

- Estudo Global dos Recursos Minerais da Bacia Sedimentar do Parnaíba: Subprojeto Hidrogeologia: Relatório Final - Folha 22 - Rio São Francisco - SO. CPRM, Recife.
- SMALL, H. L. 1913. Geologia e suprimento d'água subterrânea no Ceará e parte do Piauí e parte do Ceará. Inspetoria de Fomento a Obras Contra as Secas - IFOCS, Rio de Janeiro.
- SOARES FILHO, A. R. 1979. Projeto Estudo Global dos Recursos Minerais da Bacia Sedimentar do Parnaíba: Subprojeto Hidrogeologia: Relatório Final - folha 07 - Teresina - NO. CPRM, Recife.
- SOARES, P. C., LANDIM, P. M., & FULFARO, V. J. 1978. Tectonic cycles and sedimentary sequences in the Brazilian intracratonic basins. Geological Society of America Bulletin, v. 89, pp. 181 - 191.
- VASCONCELOS, M. B., GONÇALVES, N., GENARO, D. T., LUZ, C. A., & TUPINAMBÁ, M. F. 2014. Histórico das perfurações de poços tubulares no estado do Piauí. Revista de Geologia, 27(2), 111-126.
- VAZ, P. T., REZENDE, N. A., WANDERLEY FILHO, J. R., & TRAVASSOS, W. A. 2007. Bacia do Parnaíba. Boletim de Geociências da Petrobras, pp. 253 - 263.
- VERHAGEN, B. T., GEYH, M. A., FROHLICH, K., & WIRTH, K. 1991. Isotope hydrological methods for the quantitative evaluation of groundwater resources in arid areas - Development of a methodology. Federal Ministry for Economic Cooperation, Bonn.
- VITORELLO, I., & PADILHA, A. L. 1993. Perfis de resistividade AMT: Contribuição ao reconhecimento estrutural da borda sudeste da bacia do Parnaíba. Revista Brasileira de Geociências, 1, 81 - 91.