



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

Northeast Geosciences Journal

v. 9, nº 1 (2023)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2023v9n1ID31205>



Método da Eletrorresistividade aplicado à variação temporal do nível freático do aquífero alter do chão, em Santarém, Pará.

Electrical Resistivity method applied to the temporal variation of the groundwater level of the Alter do Chão aquifer, in Santarém, Pará.

Antonio Carlos de Siqueira Neto¹; Flávia Regina Pereira Santos²; Ana Carolina Sousa Pantoja Chahini de Barros³; Lucas Dias Arraes⁴

¹ Universidade Federal do Oeste do Pará, Instituto de Engenharia e Geociências/ Docente do curso de Geofísica, Santarém/PA, Brasil. Email: antoniodesiqueira@ufopa.edu.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3581-7486>

² Universidade Federal de Mato Grosso, Faculdade de Engenharia/Docente do curso de Engenharia de Minas, Cuiabá/MT, Brasil. Email: frpsantos@hotmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8309-3948>

³ Universidade Federal do Oeste do Pará, Bacharel em Geofísica, Santarém/PA, Brasil. Email: anacarolinachahini@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5602-9548>

⁴ Universidade Federal do Pará, Discente do curso de Geofísica, Belém/PA, Brasil. Email: lucasdarraes@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2971-293X>

Resumo: A partir da observação alagamentos permanentes nas proximidades da Universidade Federal do Oeste do Pará, este estudo teve como objetivo verificar a oscilação do nível freático do aquífero livre da Formação Alter do Chão e a possível relação com os alagamentos permanentes da área de pesquisa. Na área de estudo foram aplicadas as técnicas da Sondagem Elétrica Vertical e do Caminhamento Elétrico. As medidas das sondagens elétricas verticais permitiram identificar a camada mais superficial, associada ao solo, com espessura média de 1,42 m e resistividade aparente de $\cong 1000\Omega\text{m}$; uma 2ª camada subjacente, com espessura média de 10,91 m e uma anomalia altamente resistiva ($\cong 4600\Omega\text{m}$); e uma 3ª camada, aos 12,34m de profundidade, em que há uma queda abrupta da resistividade ($\cong 300\Omega\text{m}$). A Sondagem Elétrica vertical foi realizada por 5 vezes no mesmo local, no período de dezembro de 2017 a junho de 2018, permitindo a correlação da variação do nível freático com a pluviosidade no mesmo período. Os resultados indicam oscilação do nível d'água do aquífero livre da Formação Alter do Chão no período estudado em 7 m. O Caminhamento Elétrico possibilitou associar a anomalia altamente resistiva da 2ª camada à Cobertura Laterítica Matura, a qual é a principal causa dos alagamentos na área investigada.

Palavras-chave: Aquífero Alter do Chão; Método da Eletrorresistividade; Variação Temporal.

Abstract: Based on the observation of permanent floods near the Federal University of Western Pará, this study aimed to verify the fluctuation of the water table level in the free aquifer of the Alter do Chão Formation and the possible relationship with permanent flooding in the research area. In the study area, the techniques of Vertical Electrical Sounding and Electrical Profiling Technique were applied. The measurements of the vertical electrical soundings made it possible to identify the most superficial layer, associated with the soil, with an average thickness of 1.42 m and apparent resistivity of $\cong 1000\Omega\text{m}$; a 2nd underlying layer, with an average thickness of 10.91 m and a highly resistive anomaly ($\cong 4600\Omega\text{m}$); and a 3rd layer, at a depth of 12.34 m, in which there is an abrupt drop in resistivity ($\cong 300\Omega\text{m}$). Vertical Electrical Sounding was carried out 5 times in the same location, from December 2017 to June 2018, allowing the correlation of the water table level variation with rainfall in the same period. Results indicate oscillation in water level of the Alter do Chão Formation unconfined aquifer in 7 m, during the studied period. Electrical Profiling Technique made it possible to associate the highly resistive anomaly of the 2nd layer with the Matura Lateritic Cover, which is the main cause of flooding in the investigated area.

Keywords: Alter do Chão Aquifer; Electrical Resistivity Method; Temporal Variation.

Recebido: 03/01/2023; Aceito: 07/04/2023; Publicado: 15/06/2023.

1. Introdução

Dados do IBGE (2019) apontam que, nas últimas décadas, a Região Norte sofreu um intenso processo de expansão populacional nos centros urbanos, com o aumento da ocupação de 27%, em 1940, para 74%, em 2010. Assim como em outros locais do país, o crescimento desordenado e a falta de políticas de infraestrutura, juntamente com as históricas ocupações próximas aos cursos d'água, fez com que o ambiente urbano brasileiro fosse impactado por alagamentos e inundações (SILVA E CABRAL, 2014). Em Santarém, a SEMINFRA - Secretaria Municipal de Infraestrutura informou que, no ano de 2016, dos 673 km de ruas existentes, apenas 31% estavam pavimentadas. Essa condição, somada à litologia local e ao período de chuvas intensas na região, dificulta que o sistema hidrogeológico do aquífero livre da Formação Alter do Chão tenha sua recarga através de uma drenagem adequada, ocasionando alagamentos em vias públicas e obstruindo o tráfego em alguns pontos da cidade.

O objeto de estudo desse trabalho partiu da observação de um ponto de alagamento permanente nas proximidades da UFOPA – Campus Tapajós e as tentativas da Prefeitura em solucionar o problema aterrando a área, que em poucos dias tornava a apresentar níveis altos de saturação até acumular água na superfície novamente. As águas subterrâneas compõem uma fase do ciclo hidrológico, consistindo na parcela das águas precipitadas pelas chuvas que se infiltram abaixo da superfície da Terra e preenchem os poros, vazios intergranulares, fissuras e fraturas dos solos e das rochas, logo, a variação do nível d'água ou nível freático (NA) dos aquíferos está diretamente ligada ao regime de chuvas local. Na Amazônia essa variação é intensa, haja vista que a periodicidade das estações do ano não é regular como em outros locais do país. De acordo com o site *Weather Spark*, em Santarém (PA), a média climática de precipitação entre os períodos de 1980 à 2016, caracterizam duas estações ao ano: o chamado “inverno amazônico” com fortes chuvas e duração média de 5,7 meses, iniciando no final de dezembro e se estendendo até o “Verão Amazônico”, que possui média de 6,3 meses de estiagem prolongada e inicia a partir de junho.

Sendo assim, compreender o sistema hidrogeológico requer o desenvolvimento de estudos que auxiliem no entendimento da dinâmica de oscilação do nível freático, não apenas para sua utilização na forma direta e mais comum (exploração de água), mas também na sua forma indireta, contribuindo em outras áreas de aplicação, especialmente na Geotecnia, pois em toda obra de engenharia o conhecimento da posição do nível freático previne potenciais problemas.

A UFOPA, com pouco mais de 10 anos de criação, encontra-se em processo de consolidação da infraestrutura física. Dentre os Campi, a unidade Tapajós é a área que detém o maior número de projetos para a construção de prédios, laboratórios e pavimentações. A contribuição da geofísica na geotecnia e hidrogeologia já é amplamente empregada em vários estudos, com o destaque daqueles com o foco no mapeamento do nível freático (CASTRO, 2018; OLIVA E CHANG, 2007; SILVA *et al.*, 2011; MARCELINO *et al.*, 2005). Dentre os diversos métodos se destaca o método da Eletroresistividade (ER), com suas técnicas de Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e Caminhamento Elétrico (CE).

O presente estudo teve como objetivos: I) verificar a oscilação do nível freático do aquífero livre da Formação Alter do Chão, em via não pavimentada de acesso à UFOPA – Campus Tapajós, durante a transição do regime de máxima estiagem e máxima precipitação, através do método da ER, utilizando a técnica SEV; II) compreender melhor o comportamento lateral de ascensão da zona saturada e sua possível relação com os alagamentos permanentes da área de pesquisa, através da técnica do CE; III) contribuir com outras informações litológicas que auxiliem no desenvolvimento dos projetos futuros de infraestrutura local.

2. Materiais e Métodos

Área de estudo

Esse trabalho foi desenvolvido no município de Santarém-PA, microrregião de mesmo nome e mesorregião do Baixo Amazonas. Situa-se na confluência dos rios Tapajós e Amazonas e está localizada cerca de 800 km da capital do estado, Belém. O campus Tapajós da UFOPA encontra-se no centro urbano da cidade, no bairro Salé, sem número. A via de acesso ao campus se dá pela Rua Vera Paz, que é parcialmente asfaltada. A área de estudo (Figura 1) onde essa pesquisa foi realizada contempla a parte não pavimentada da rua de 426 m de extensão, que possui fluxo intenso de carretas sendo o único acesso aos tanques de abastecimento da Petrobrás, na Companhia DOCAS do Pará (Porto de Santarém).

A região possui clima tropical quente e úmido, segundo a classificação climática baseada no método de Köppen. A região do Município de Santarém enquadra-se dentro do grupo Am (clima quente de monção) da Amazônia Brasileira (ALVARES *et al.*, 2013), com temperatura média do ar entre 25 °C e 28 °C, umidade relativa do ar média de 86%. O regime de chuvas possui grande variação durante o ano. Pelo fato da temperatura do ar apresentar pequena variabilidade,

a caracterização climática é feita basicamente em função da distribuição de sua precipitação. A precipitação pluvial é o elemento meteorológico que apresenta maior variabilidade anual, onde seus valores médios anuais oscilam em torno de 1920 mm, sendo esta região caracterizada por apresentar dois períodos bem distintos: um mais chuvoso, que vai de dezembro a maio; e outro menos chuvoso, que se estende de julho a novembro, segundo (JACINTO *et al.*, 2006).

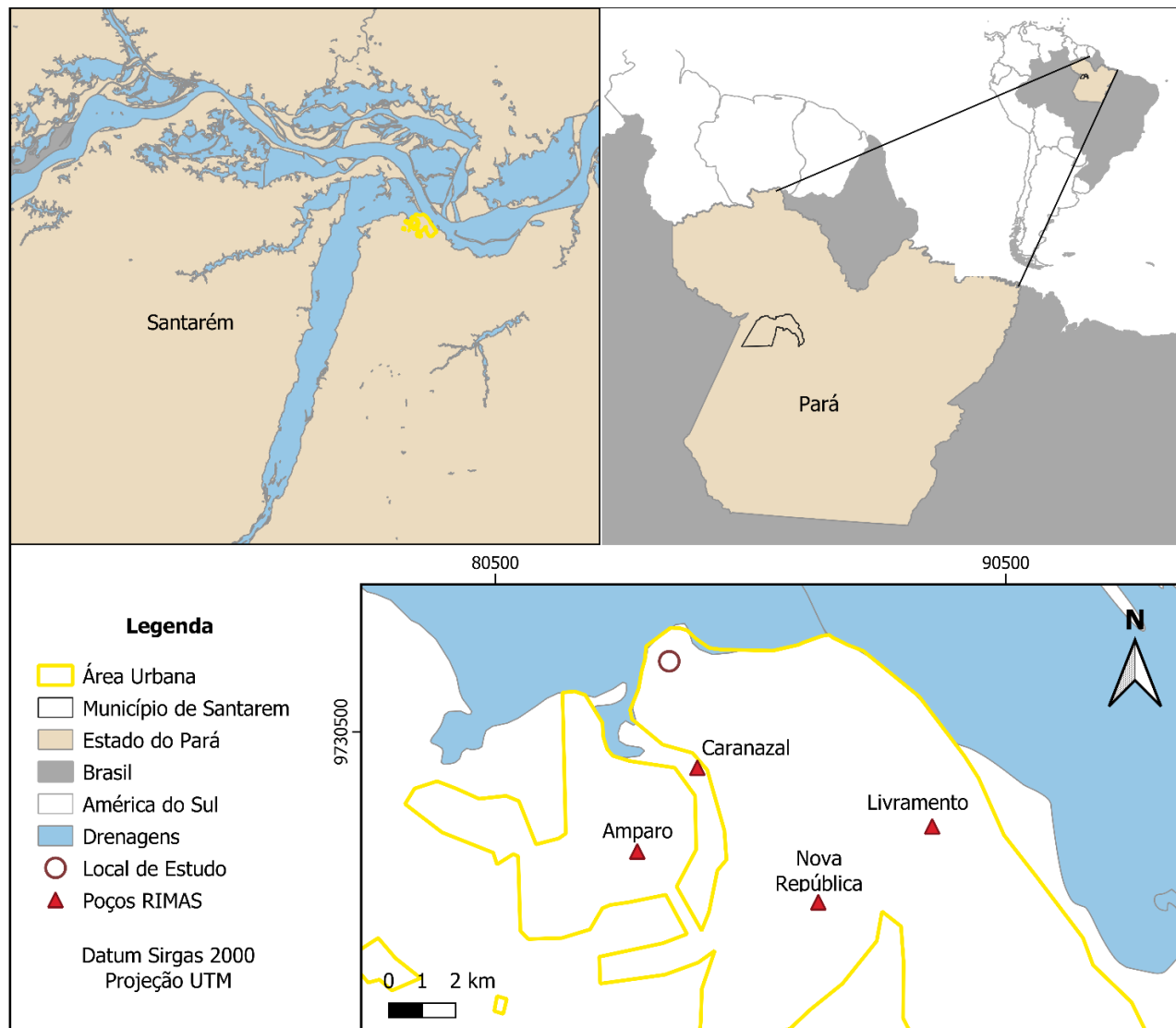


Figura 1 – Localização da área de estudo no município de Santarém (PA) e dos respectivos poços RIMAS utilizados neste trabalho.

Fonte: Autores (2023).

A rua Vera Paz foi o alvo de estudo deste projeto, visto que apresentava as condições ideais de logística, pelo fato da mesma não ser pavimentada e da ocorrência de surgências de alagamentos no período chuvoso (Figura 2A). Na locação dos alinhamentos geofísicos verificamos a ocorrência de afloramento laterítico ao longo da rua (Figura 2B). Este tipo de ocorrência é comum na formação de solos do Brasil, devido principalmente a intensa precipitação ao longo do ano, as quais influenciam no processo de alteração química dos minerais e de lixiviação. A maturação do solo é mais facilmente atingida, podendo-se observar elevada concentração hidrogeniônica no solo, com conseqüente aumento da alteração química por hidrólise e condições facilitadas de transporte de soluções em seu interior, possibilitando a remoção dos

elementos solúveis e acumulação dos insolúveis. Formam-se principalmente óxidos (óxidos, hidróxidos e óxidos hidratados) de silício, alumínio e ferro. Estes últimos são produtos da alteração dos silicatos e de outros minerais primários pelo intemperismo químico, podendo ocorrer na sua forma amorfa ou cristalina, como, por exemplo, os minerais gibbsita, hematita e goethita (FASSBENDER, 1975).



Figura 2 – (A): Localização do alagamento permanente da Rua Vera Paz em frente a guarita de acesso ao Campus Tapajós da UFOPA; (B): Afloramento de concreção ferruginosa ao longo do alinhamento geofísico com detalhe para amostra de Laterita.

Fonte: Autores (2023).

Contexto geológico regional

De acordo com as informações disponibilizadas pela CPRM - Serviço Geológico do Brasil, no Mapa Geológico Estadual (VASQUEZ *et al.*, 2008), a área de pesquisa está inserida na Bacia do Amazonas. A bacia, intracratônica, ocupa uma área de cerca de 500.000 km², em uma faixa de direção E-W que acompanha o vale do Rio Amazonas (Figura 3A). É delimitada pelo Arco de Purus a oeste, que a separa da Bacia do Solimões; pelo Arco de Gurupá a leste, que a separa da Bacia da Foz do Amazonas; pelo Escudo das Guianas ao norte; e pelo Escudo Brasil Central ao sul (CAPUTO, 1984; CUNHA *et al.*, 2007).

O substrato Proterozóico sob qual se desenvolveu o pacote sedimentar Fanerozóico da bacia está representado por rochas metamórficas pertencentes por faixas móveis, acrescida de um núcleo central mais antigo, denominado Província Amazônia Central (CORDANI *et al.*, 1984), constituído essencialmente por rochas graníticas. Os 5.000 m de preenchimento sedimentar apresentam arcabouço estratigráfico com duas importantes megassequências: a paleozóica, cortada por diques e soleiras de diabásio juró-triássicos; e a outra mesozóica-cenozóica sedimentar (CUNHA *et al.*, 1994).

Formalizada por Caputo *et al.* (1971), a Formação Alter do Chão é constituída por um espesso pacote de arenitos intercalados com camadas de pelitos e, em menor escala, de conglomerados (TANCREDI, 1996). Os arenitos são finos a médios, marrom-avermelhados e variegados, argilosos, caulíníficos, e com estratificação cruzada. Os pelitos, representados por siltitos e argilitos em proporções variadas, são vermelhos e variegados, maciços ou laminados (CAPUTO *et al.*, 1971). Segundo (DAEMON, 1975), o ambiente de deposição desta camada é o fluvial de alta energia lacustrino-deltaico. Em alguma fácies dos depósitos da Formação Alter do Chão é apontada a influência marinha na porção oeste da Bacia do Amazonas (ROSSETTI E NETO, 2006).

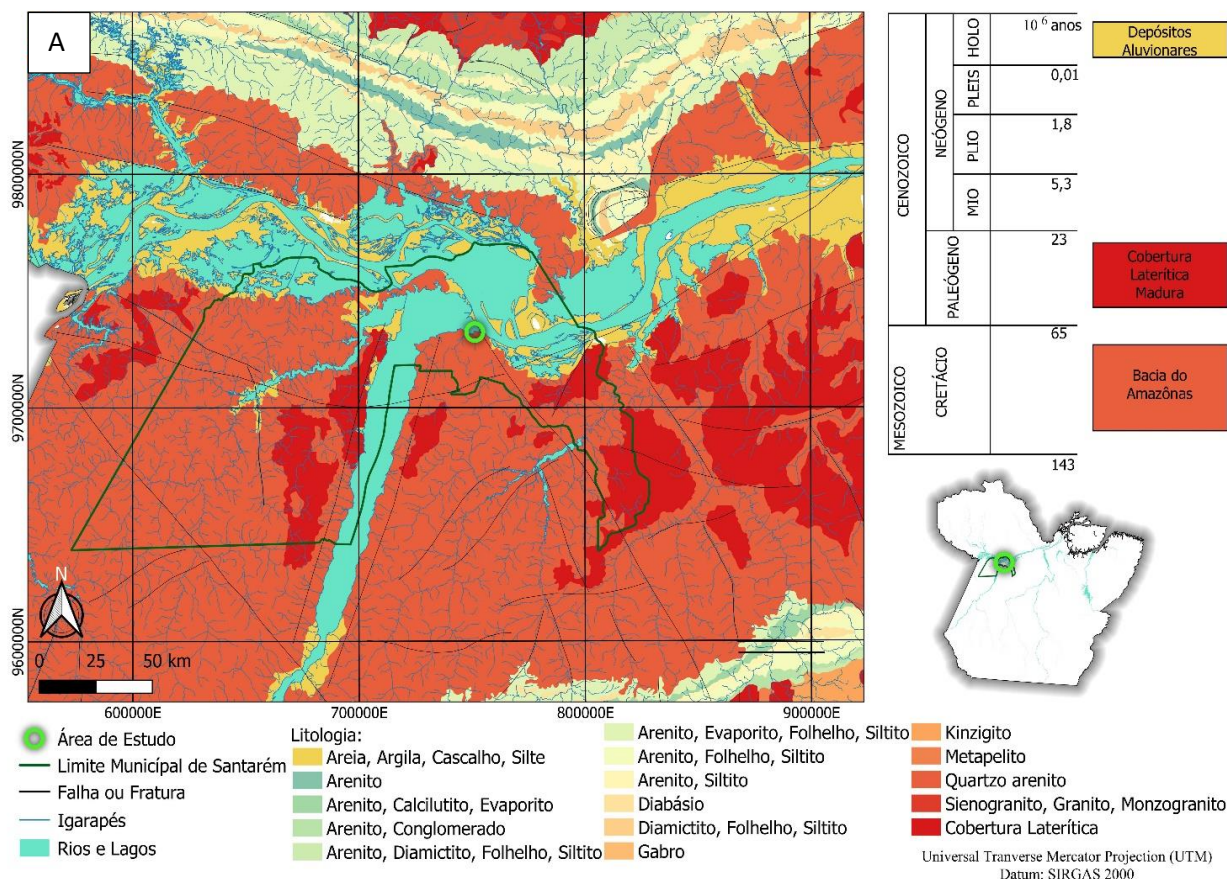
A Cobertura Laterítica Matura é uma cobertura superficial, de idade cenozóica, relacionada à Superfície de Aplainamento Sul-Americana (KING, 1956), que consiste em platôs, formados entre o Cretáceo Superior e o Paleógeno, que formam o relevo atual (COSTA *et al.*, 2005). No estado do Pará, esta unidade está bem representada na porção nordeste, sobre as formações Ipixuna e Itapecuru, e ao longo da calha do rio Amazonas, sobre a Formação Alter do Chão. Além disso, destacam-se as ocorrências da região da Serra dos Carajás, sobre diversas unidades litoestratigráficas. De acordo com Costa (1991), a utilização da designação de Cobertura Laterítica Matura caracteriza a laterita como mais evoluída,

com perfil completo, constituído pelos horizontes (dispostos da base para o topo): pálido transicional, argiloso, bauxítico e/ou fosfático e crosta ferruginosa.

Os Depósitos Aluvionares representam os sedimentos clásticos inconsolidados das planícies aluvionares atuais dos principais cursos d'água, que constituem basicamente depósitos de canais (barras em pontal e barras de canais) e de planícies de inundação. Os Depósitos Aluvionares podem atingir até dezenas de quilômetros de extensão e largura, a exemplo do rio Amazonas, cuja planície aluvionar é mais expressiva. Sua morfologia é típica de planícies sedimentares associadas ao sistema fluvial, que são, de modo geral, constituídas por sedimentos arenosos a argilosos, com níveis de cascalho e matéria orgânica, inconsolidados a semi-inconsolidados (VASQUEZ E ROSA-COSTA, 2008).

Segundo Tancredi (1996), a região de Santarém está localizada na área central da Bacia do Amazonas, onde a Formação Alter do Chão é aflorante. Tal litologia, depositada em ambiente continental durante o Cretáceo, em uma camada de 600 m de espessura, é composta por arenitos, siltitos, argilitos e conglomerados. Os depósitos aluvionares do quaternário, que recobrem parcialmente a Formação Alter do Chão, são compostos por argilas, siltes, areias e cascalhos. A espessura desses depósitos aluviais, no município, é estimada em 20 m nos baixos cursos dos igarapés e mais espessa na planície aluvial do rio Amazonas. No Estado do Pará, ao longo da calha do rio Amazonas, sobre a Formação Alter do Chão, destaca-se também a ocorrência de cobertura laterítica.

Para este trabalho, foi confeccionada uma coluna cronoestratigráfica esquemática das estruturas aflorantes no município de Santarém (Figura 3A), com o objetivo de auxiliar na interpretação geológica dos levantamentos geofísicos.



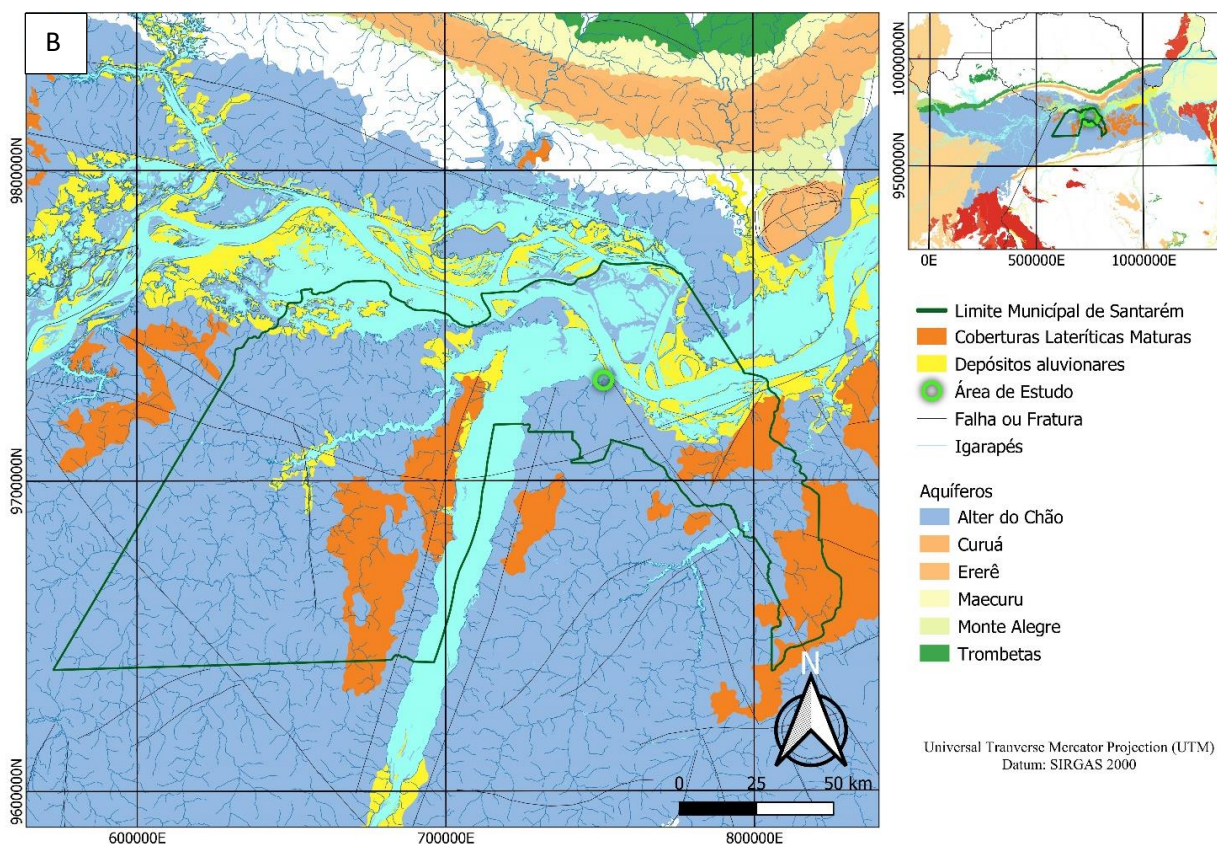


Figura 3 – (A) Mapa Geológico do município de Santarém (CPRM, 2019) e Coluna cronoestratigráfica esquemática da área de estudo; (B) Mapa Hidrogeológico do município de Santarém
Fonte: (CPRM, 2019).

Hidrologia e climatologia local

A distribuição hidrogeológica na região de Santarém é controlada pela litologia, geomorfologia e estrutura das rochas. O aquífero Alter do Chão (Figura 3B) compreende um sistema hidrogeológico com propriedades de aquífero livre e confinado e está inserido na Região Hidrográfica Dominante do Amazonas (ANA, 2005 apud CPRM, 2012). Tancredi (1996), em sua tese de Doutorado pela Universidade Federal do Pará (UFPA), realizou estudos detalhados sobre o Aquífero Alter do Chão na cidade de Santarém, onde desenvolveu, também, o cadastramento de poços no perímetro urbano e áreas adjacentes.

A maior profundidade registrada desses poços na época foi de 258 m, sendo os dados hidrogeológicos complementados com informações de duas perfurações petrolíferas na região: a primeira, em Alter do Chão, com 527 m de profundidade; e a segunda em Belterra, com 603 m de profundidade. Os dados obtidos através de inventário hidrogeológico indicaram para o aquífero livre a espessura média de 50 m e para o aquífero confinado 430 m, constituídos por uma sequência de camadas arenosas, com permeabilidade e espessuras variadas e intervalos separados por aquicludes e/ou aquitardes constituídos de estratos argilosos de pequenas espessuras entre 44 m e 80 m de profundidade (TANCREDI, 1996).

O conhecimento das variáveis meteorológicas são de suma importância para os estudos climáticos de uma região, como, por exemplo, os de manutenção do equilíbrio do clima. O comportamento das chuvas na região Amazônica tem sido alvo de investigação, tendo em vista que a periodicidade das estações do ano não é regular como em outros locais do país, além de ter enorme relevância para a climatologia da América do Sul, principalmente por seu efeito no ciclo hidrológico regional (FIGUEROA E NOBRE, 1990).

Os dados de Santarém foram obtidos através da compilação de dados no período da aplicação das técnicas de eletrorresistividade. Disponíveis de forma gratuita no site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Como

referência para precipitação mensal, utilizou-se a normal climatológica (INMET, 2021), da estação convencional 82246 – Belterra (Figura 9B). Os dados de precipitação mensal no período de agosto de 2017 e julho de 2018 foram obtidos da estação meteorológica automática A250 – Santarém (INMET, 2021).

De acordo com Silva *et al.* (2013), a análise do índice pluviométrico da região de Santarém (PA) entre os anos de 1969 e 2010 apontou que os três meses com maiores índices de chuvas foram fevereiro, março e abril, enquanto setembro, outubro, novembro e dezembro foram os mais representativos da estação correspondente ao “Verão Amazônico”. A média anual pluviométrica da série foi de 2318,69 mm. Assim o “inverno” apresenta chuvas mais intensas, iniciando no final de dezembro e se estendendo até o “verão”, período seco.

Dados diretos compilados

Atualmente existem 519 poços registrados pelo Serviço Geológico do Brasil no município de Santarém-PA. Desses, 515 estão catalogados no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) e 04 na Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas (RIMAS). Apesar da enorme quantidade de poços SIAGAS, os dados inseridos no sistema não possuem a mesma confiabilidade dos poços cadastrados pelo RIMAS, pois estes possuem acompanhamento durante a perfuração e monitoramento regular pela CPRM. Sendo assim os poços utilizados como parâmetro para análise da litologia local nesse estudo se restringem aos 4 que possuem perfil descritivo completo (Figura 4).

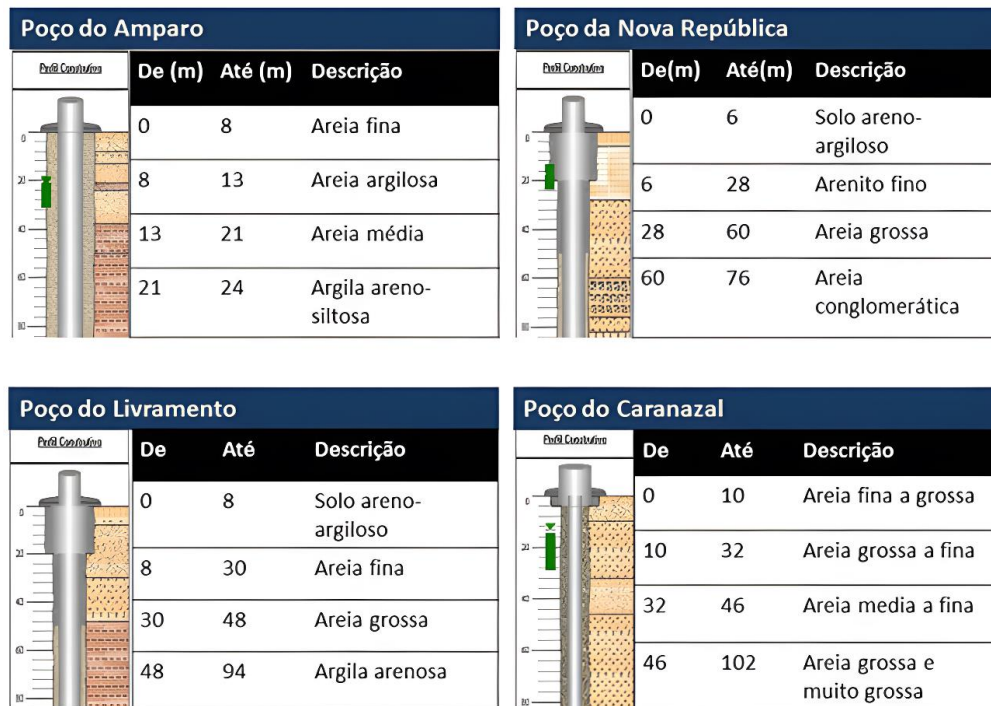


Figura 4 – Perfis geológicos dos 04 poços, próximos à área de estudo, utilizados para análise da geologia local. As demarcações em verde determinam a oscilação do nível dinâmico.

Fonte: (RIMAS/CPRM, 2019)

A análise litológica do conjunto dos 4 poços (Figura 4) indicou, em média, um solo com espessura de 8 m e uma segunda camada com espessura média de 36 m. As litofácies presentes são constituídas por areia de fina a grossa; porém, no poço do Amparo, a segunda camada apresentou um certo teor de argila. Os poços da Nova República e do Caranazal apresentaram, na sua quarta camada litológica, uma composição de areia grossa a conglomerática, iniciando a uma profundidade de 60 e 46 m, respectivamente. Já os poços do Amparo e Livramento tiveram sua quarta camada iniciando a uma profundidade de 21 e 48 m, nessa ordem, composta de argila arenosa a areno-siltosa.

Levantamento Geofísico

Os levantamentos geofísicos foram realizados utilizando-se o resistímetro RD-1000A, fabricado pela GEOTEST e o resistímetro SUPERSTING R8-IP. O conjunto da GEOTEST é composto por uma unidade transmissora RD 1000 TX, ligada a duas baterias de 60 Ah em série, totalizando 24 V; e uma unidade receptora RD 1000 RX, alimentada por oito baterias de hidreto de níquel (NI-MH), tamanho AA de 1,2 V. Em campo, foram utilizados eletrodos de aço inoxidável e quatro bobinas, cada uma com 500 m de fio elétrico 16 AWG; e o resistímetro SUPERSTING R8-IP, fabricado pela Advanced Geosciences, Inc.-AGI, composto pela unidade transmissora, a caixa de comutação (Switch Box) e 04 cabos multi-eletrodos totalizando 280 metros de comprimento, com 8 canais e 56 eletrodos, e alimentado por uma única bateria de 150 Ah e 12 V.

Os trabalhos de campo foram realizados de dezembro de 2017 à junho de 2018. O levantamento consistiu em: 6 alinhamentos geofísicos, sendo: 1 caminhamento elétrico (CE), com extensão de 270 m; e 5 sondagens Elétricas Verticais (SEVs), com abertura de AB/2 de 100 m (SEV), e realizados nas datas de 01/12/17 (SEV_01), 01/02/2018 (SEV_02), 02/03/2018 (SEV_03), 02/05/2018 (SEV_04) e 26/06/2018 (SEV_05), respectivamente. A distribuição espacial dos perfis 1D e 2D geolétricos investigados e todas as referências são apresentadas na Figura 5. As coordenadas e especificações de profundidade são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Coordenadas geográficas das técnicas geofísicas empregadas.

| | Latitude | Longitude |
|------|---|---|
| CE | Início: 2°25'14,88"S Final: 2°25'10,06"S | Início: 54°44'25,19"O Final: 54°44'16,89"O |
| SEVs | 2°25'12,79"S | 54°44'25,26"O |

Fonte: Autores (2023).

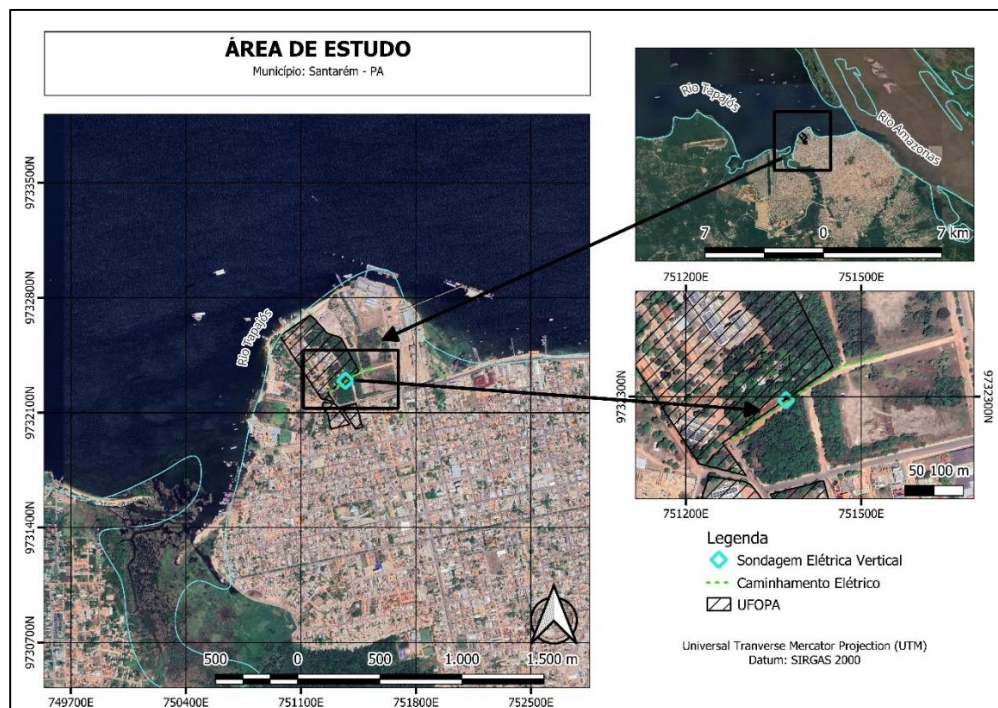


Figura 5 – Mapa da localização do campus Tapajós da UFOPA e das locações dos levantamentos geofísicos, com destaque para o perfil de CE e a demarcação pontual das cinco SEVs realizadas.

Fonte: Autores (2023).

Método da Eletroresistividade

Os diferentes materiais que compõem a superfície e subsuperfície da Terra (solos e rochas) apresentam características físicas distintas, já bastante estudadas e conhecidas no meio científico. Dentre elas ressalta-se a capacidade que os materiais apresentam de conduzir corrente elétrica, conhecida como condutividade elétrica e seu inverso, a resistividade elétrica. Diferentes solos e rochas apresentam valores contrastantes de resistividade e, apesar da grande variabilidade desta capacidade, os diferentes materiais podem ser identificados por esta propriedade que fundamenta o método eletroresistivo. O principal mecanismo de condução elétrica pelos materiais da subsuperfície é a condução iônica ou eletrolítica. Neste mecanismo, o fluxo da corrente ocorre por meio de íons presentes nos fluidos intersticiais nos poros dos solos e rochas. Em alguns casos, a condução eletrônica também ocorre em materiais que apresentam elétrons livres, como é o caso de materiais metálicos e sulfetos metálicos.

O método da resistividade elétrica de corrente contínua costuma trabalhar com dois eletrodos de corrente (A e B) e dois de potencial (M e N), todos fixados na superfície do solo. Um diferencial de potencial é aplicado entre os eletrodos A e B e, como resultado, uma corrente elétrica direta viaja pelo solo. O valor atual é medido e registrado. Os eletrodos M e N são usados para medir a diferença de potencial que é estabelecida no solo e associada à corrente de viagem. Vale ressaltar que o solo já possui um potencial elétrico natural, denominado potencial espontâneo, que deve ser subtraído da medida entre os eletrodos M e N. Conhecendo a corrente que percorre o subsolo, a geometria do arranjo dos eletrodos e o potencial medido entre os eletrodos M e N, é possível calcular um valor de resistividade elétrica aparente, denominado como tal porque é medido em um meio heterogêneo e anisotrópico em função do arranjo de eletrodos (ORELLANA, 1972; DOBRIN, 1981; TELFORD ET AL., 1985; PARASNIS, 1986).

Os dois métodos mais usuais para medições de resistividade elétrica como meio de investigação da subsuperfície são: informação pontual, com valores tomados na vertical (Sondagens Elétricas Verticais - SEV) e informação bidimensional (Caminhamento Elétrico ou Imageamento Elétrico - CE) com medidas obtidas na vertical e na horizontal.

Técnica de Sondagem Elétrica Vertical – Arranjo Schlumberger

A técnica de Sondagem Elétrica Vertical (permite medir as variações da resistividade em profundidade no meio, pontualmente (Figura 6). Consiste em injetar uma corrente elétrica no solo através de dois eletrodos (A e B) e medir a diferença de potencial em dois receptores (M e N), também cravados diretamente ao solo. Por meio dessa corrente, da variação de potencial, da distância entre os pontos de injeção de corrente e de medidas de potencial, calcula-se a resistividade aparente do meio, usando a Equação 1 (BHATTACHARYA E PATRA, 1968).

$$\rho_a = k \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

Onde:

ρ_a = resistividade aparente (Ohm.m)

K = fator geométrico para o arranjo utilizado (m)

$\Delta V/I$ = Resistência elétrica (Ohm)

O fator geométrico utilizado nesse trabalho, proposto por BHATTACHARYA E PATRA (1968), para esse tipo de arranjo, é dado pela Equação 2.

$$k = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}\right)} \quad (2)$$

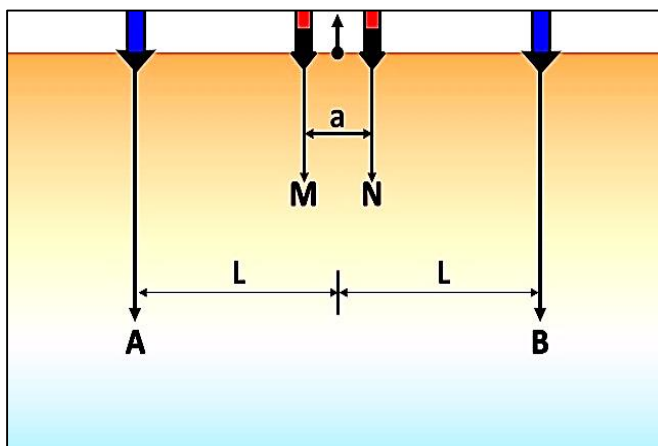


Figura 6 – Arranjo de campo Schlumberger da técnica da SEV. As letras “L” e “a” representam, respectivamente, as distâncias sempre crescentes entre os eletrodos de corrente e a distância que permanece a mesma entre os eletrodos de potencial. A letra “O” representa o ponto central da SEV.

Fonte: (Adaptado de Braga, 2016).

Com o aumento da distância entre os eletrodos de corrente AB, o volume total da subsuperfície investigada também aumenta, permitindo atingir camadas cada vez mais profundas. Os resultados sucessivos estarão, exclusivamente, ligados com as variações da resistividade em relação à profundidade. A utilização de curvas logarítmicas, para representar a interpretação dos dados de campo, justifica-se por permitir que as variações das estruturas geoeletricas representativas sejam realçadas e por reduzirem os cálculos teóricos para o traçado das curvas-modelos usadas na interpretação.

A corrente flui no meio de modo radial, quanto maior a distância entre os pontos de injeção de corrente, maior será a profundidade investigada. Essa profundidade é definida como teórica e obedece a relação de $AB/4$ (BRAGA, 2016). No arranjo Schlumberger (Figura 5) os eletrodos de corrente são movimentados sobre a linha de investigação com uma distância crescente (L) enquanto os de potencial são fixados ao solo a uma distância (a) obedecendo à relação de $MN \leq AB/5$.

Os dados das Sondagens Elétricas Verticais foram processados no *Software IPI2WIN*, distribuído pela Geoscan-M Ltd., Moscou, Rússia. O erro de aproximação RMS (*root-mean-square*), utiliza o método dos mínimos quadrados, sendo calculado medindo a distância entre a curva de resistividade aparente e a curva sintética gerada. (SIQUEIRA NETO et al, 2019).

Técnica do Caminhamento Elétrico – Arranjo Dipolo-Dipolo

Adotou-se o arranjo dipolo-dipolo para aquisição dos dados de caminhamento elétrico. Esse arranjo é caracterizado por apresentar espaçamentos entre os centros dos dipolos (AB e MN), variáveis ao longo da linha levantada. Para cada nível de investigação (profundidade teórica) adota-se um determinado espaçamento dipolar superficial. Outras particularidades do arranjo dipolo-dipolo são as distâncias entre os eletrodos de corrente A e B serem iguais às dos eletrodos de potenciais M e N.

Normalmente, as medidas são efetuadas em várias profundidades de investigação, isto é, $n = 1, 2, 3, 4$ e 5 , atribuídas na intersecção das linhas que partem do centro de AB e MN com ângulos de 45° graus (Figura 7). A cada ponto de medida, os dipolos são deslocados de uma distância igual a “X”. Os dados obtidos são plotados nas posições $n = 1, 2, 3, 4$ e 5 , e interpolados, gerando uma pseudoseção de resistividade aparente. A Equação 3 é usada para calcular a resistividade elétrica aparente.

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (3)$$

$$K = 2\pi \cdot G \cdot X \quad (4)$$

$$G = 1 / [(1/n) - (2/n+1) + (1/n+2)] \quad (5)$$

Onde:

ρ_a = resistividade aparente (Ohm.m)

K = fator geométrico para o arranjo utilizado (m)

$\Delta V/I$ = Resistência elétrica (Ohm)

G = múltiplo das distâncias dos dipolos (geralmente $n = 1,2,3,4,5$ e 6)

X = distância deslocada pelos dipolos (m)

$\pi = 3,1415$

ΔV = diferença elétrica de potencial (mV)

I = corrente elétrica (mA)

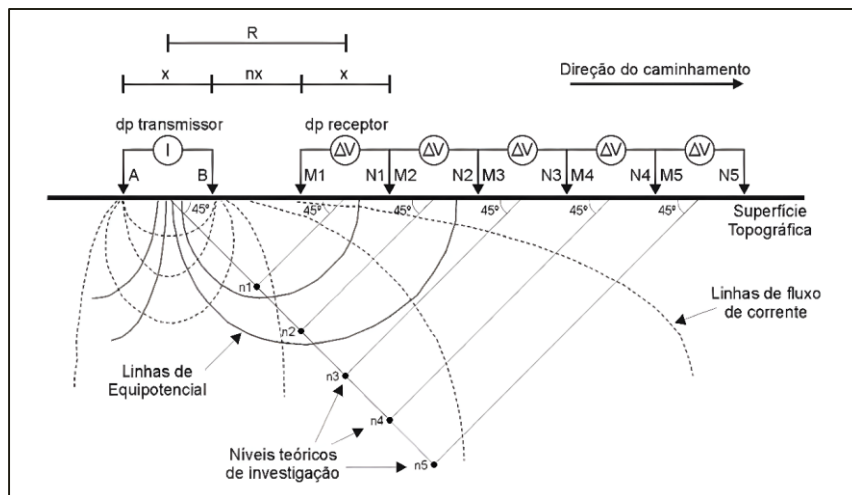


Figura 7 – Esquema de arranjo de campo dipolo-dipolo utilizado no CE. As linhas pontilhadas representam as linhas de fluxo de corrente e as linhas completas as linhas equipotenciais. A letra “n” representa os níveis teóricos de investigação (n1 a n5). As letras “x” e “nx” representam a distância entre os eletrodos transmissores A e B, e a distância entre o dipolo transmissor e o dipolo receptor.

Fonte: (Siqueira Neto E Elis, 2016).

O desenvolvimento de equipamentos de imageamento elétrico 2-D foi acompanhado pelo desenvolvimento de um software de computador específico para representar este tipo de medição, como o RES2DINV (LOKE E BARKER, 1996a; 1996b). Este software inverte o conjunto de medidas, ou seja, permite construir um modelo geoeletrico subsuperficial, cuja resposta reproduz, da melhor forma possível, as medidas obtidas. Este modelo geoeletrico é posteriormente interpretado com base no modelo geológico/hidrogeológico/pedológico que melhor se adapta à área estudada. Neste estudo foi utilizado o arranjo dipolo-dipolo com espaçamento entre eletrodos de 5 m, obtendo assim 19 níveis teóricos de investigação.

3. Resultados

Sondagem Elétrica Vertical (SEV)

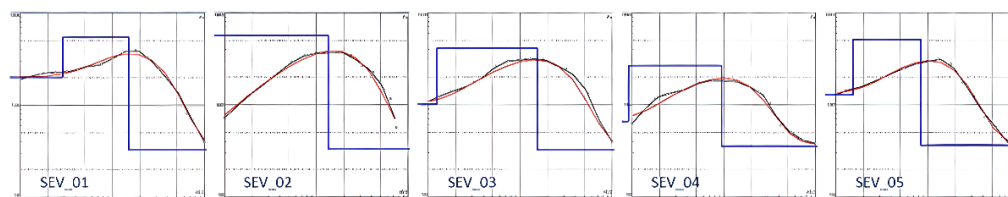
Na Figura 8 são apresentadas as curvas de resistividade modelas para cada SEV executada. Na sondagem elétrica vertical 01 (SEV_01) o modelo geoeletrico processado foi dividido em três camadas. A primeira camada apresentou uma

resistividade de 2000 Ωm e espessura de 2,89 m. A segunda camada teve um aumento significativo da resistividade aparente atingindo o valor de aproximadamente de 5500 Ωm , com coluna deposicional de 12,10 m. Aos 14,99 m de profundidade a resistividade apresentou uma queda abrupta de valor, caindo para a ordem de 330 Ωm , não foi possível determinar a espessura dessa última camada devido ao limite da profundidade teórica estabelecido na investigação (50 m). Na SEV_02, o modelo geoeletrico processado foi dividido em três camadas. A zona não saturada se estendeu até 13,53 m de profundidade e foi dividida em duas partes, sendo a primeira com resistividade de 449 Ωm e espessura 0,53 m e a segunda com resistividade de 5671 Ωm e espessura de 13,00 m. A última camada, aos 13,53 m, apresentou queda de resistividade de 332 Ωm .

Na SEV_03 o modelo geoeletrico processado manteve o padrão de camadas das sondagens anteriores. A primeira camada apresentou uma resistividade de 1016 Ωm e espessura de 1,25 m. A segunda camada apresentou uma leve queda de resistividade quando comparada com as coletas anteriores (4089 Ωm), com coluna deposicional de 14,10 m. Aos 15,35 m de profundidade a resistividade apresentou uma queda abrupta de valor, caindo para 323 Ωm . Assim como as demais, não foi possível determinar a espessura dessa última camada, devido ao limite da profundidade teórica estabelecido na investigação. Na SEV_04, o modelo geoeletrico processado foi dividido em três camadas. A zona não saturada teve seu registro de espessura mais superficial que as medidas passadas (9,54 m) e foi dividida também em duas partes: a primeira com resistividade de 658 Ωm e espessura 0,91 m; e a segunda camada com um valor bem inferior às medidas coletadas anteriormente, porém com o mesmo padrão altamente resistivo de 2665 Ωm e espessura de 13,00 m. A última camada, aos 9,45 m, apresentou queda de resistividade para 332 Ωm .

A última coleta, SEV_05, teve o modelo geoeletrico processado dividido também em três camadas. Nessa coleta, os dados voltaram a apresentar o padrão próximo das coletas iniciais. A primeira camada apresentou uma resistividade de 1289 Ωm e espessura de 1,54 m. A segunda camada apresentou o valor de aproximadamente de 5100 Ωm , porém com espessura menor (6,58) m. Na profundidade de 8,39 m de profundidade a resistividade apresentou uma queda abrupta de valor, caindo para a ordem de 363 Ωm .

Na Figura 9A são apresentadas as profundidades do nível freático observado em cada SEV e na Figura 9B os dados de pluviosidade mensal e a normal climatológica para o período de agosto de 2017 à julho de 2018 obtidos em estação meteorológica próxima a área de estudo. Analisando as cinco SEVs e os respectivos períodos em que foram analisadas, é possível correlacionar a ascensão do nível freático com o aumento de precipitação ao longo dos meses, variando de 15 m de profundidade na SEV_01 no mês de dezembro 2017, quando a precipitação foi de ~180 mm e 8,39 m na SEV_05 no mês de junho de 2018, quando a precipitação foi de ~340 mm demarcando uma variação de aproximadamente 7 m no nível freático.



| Camadas Geoeletricas (RMS 6,7%) | SEV_01 (01/12/17) | | | SEV_02 (01/02/18) | | | SEV_03 (02/03/18) | | | SEV_04 (02/05/18) | | | SEV_05 (26/06/18) | | |
|---------------------------------|-------------------|-------|-------|-------------------|-------|-------|-------------------|-------|-------|-------------------|------|------|-------------------|------|------|
| | ρ | h(m) | d(m) | ρ | h(m) | d(m) | ρ | h(m) | d(m) | ρ | h(m) | d(m) | ρ | h(m) | d(m) |
| 1ª | 2000 | 2,89 | 2,89 | 449 | 0,53 | 0,53 | 1016 | 1,25 | 1,25 | 658 | 0,91 | 0,91 | 1289 | 1,54 | 1,54 |
| 2ª | 5439 | 12,10 | 15,00 | 5671 | 13,00 | 13,50 | 4089 | 14,10 | 15,40 | 2665 | 8,54 | 9,45 | 5107 | 6,85 | 8,39 |
| 3ª | 327 | - | - | 332 | - | - | 323 | - | - | 355 | - | - | 363 | - | - |

ρ = resistividade aparente h = espessura da camada d = profundidade

Figura 8 – Curvas de resistividade modeladas das 5 SEVs executadas na área de estudo e suas respectivas camadas geoeletricas.

Fonte: Autores (2023).

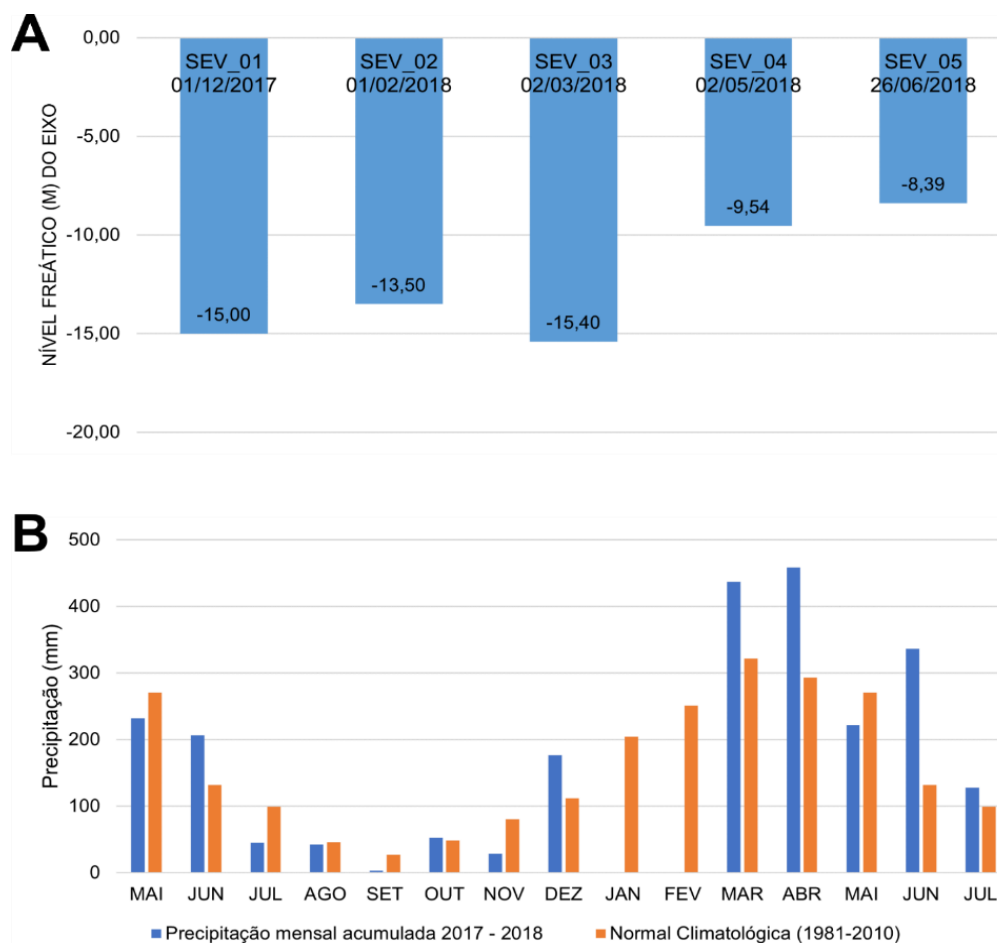


Figura 9 – (A) Variação do nível freático do aquífero livre (Fm. Alter do Chão) no período de dezembro de 2017 a junho de 2018; (B) Variação da pluviosidade mensal na região de Santarém e normal climatológica de estação convencional mais próxima a área de estudo (Belterra).

Fonte: Autores (2023).

Caminhamento Elétrico (CE).

Tendo em vista que as SEVs 01, 02, 03 e 04 registraram uma alta resistividade na 2ª camada de investigação, no dia 16 de junho de 2018, optou-se por somar ao trabalho mais uma técnica (CE) para investigar se a anomalia registrada era pontual ou se prolongava por toda a extensão da linha de abertura da sondagem. A construção geoestatística de isovalores interpolados pelo software modelou um perfil com profundidade de 52,80 m, com 19 níveis de profundidade para uma linha de abertura de 270 m.

Analisando os dados quantitativos (Figura 11) os registros iniciais de resistividade aparente começaram a uma profundidade de 0,85 m, não sendo possível apontar valores do comportamento elétrico na camada acima desse nível e que foi associada ao solo nas SEVs. O perfil indicou uma camada altamente resistiva que foi registrada no início da linha de investigação do CE (partindo da guarita), se prolongando horizontalmente por mais de 135 m e apresentando resistividade de ordem superior a 5000 Ω m; porém, este valor foi diminuindo gradativamente para além do local da SEV. Nesse ponto, a espessura aproximada da camada foi de 11 m. A partir dessa profundidade, a resistividade aparente sofreu queda para casa dos 300 Ω m, mantendo o padrão de valor registrado nas SEVs coletadas anteriormente e marcando o início da interface entre a zona não saturada e saturada.

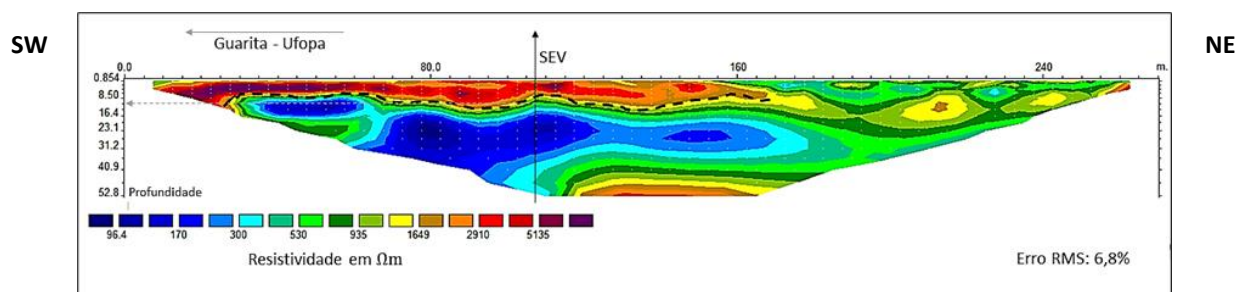


Figura 10 – Seção Geométrica modelada da área de estudo com demarcações em destaque da localização da SEV, sentido da guarita da UFOPA e linha pontilhada representando a base da camada de cobertura laterítica.

Fonte: Autores (2023).

4. Discussões

Comparando os dados das SEVs 01, 02, 03, 04 e 05 (Figura 8), foi possível correlacionar a 1ª camada ao solo, devido à sua pequena espessura (média de 1,42 m) e resistividade elevada, associada à alta compactação da via por se tratar do único acesso de carretas aos galpões de combustível da Companhia Docas do Pará (Porto de Santarém). As SEVs 02 e 04 apresentaram uma menor resistividade nessa camada pois, nos 06 dias que antecederam sua coleta, houve chuva intensa no município sendo a cota pluviométrica semanal registrada em 186 mm e 57 mm (HIDROWEB, 2019), respectivamente, portanto saturando a camada pedológica nos dias seguintes. Ao fim das 05 sondagens, essa camada teve sua espessura média estimada em 10,91 m. A interface com maior profundidade entre a zona não saturada e a saturada ocorreu no dia 02 de março de 2018 (15,40 m) e a menor interface foi no dia 26 de junho de 2018 (8,39 m), conforme Figura 9B.

A segunda camada apresentou um padrão alto de resistividade que se manteve nas 04 primeiras SEVs realizadas, sendo assim optou-se por acrescentar ao trabalho uma segunda técnica, o CE, para verificar se a anomalia registrada era pontual ou se estendia lateralmente. Esta anomalia resistiva foi posteriormente associada a cobertura laterítica que aflora na área de estudo, que é denominada de Cobertura Laterítica Madura sobreposta a Fm. Alter do Chão (Figura 3B), que na região ocorre associada com a calha do rio Amazonas.

A área de estudo é próxima à margem do rio Tapajós. Portanto, a surgência pode estar relacionada a uma antiga planície de inundação ou estar à pluviosidade natural da localidade. A formação dessa cobertura é proveniente do processo intenso de lixiviamento por intemperismo químico, que se desenvolve em climas tropicais a temperados úmidos, e que contém solo pobre em nutrientes com alta concentração residual de hidróxidos de Fe e Al. O comportamento de ascensão e descensão do NA, somados à alta concentração residual desses hidróxidos pouco solúveis, leva a formação de uma crosta bastante compactada, altamente resistiva, muito resistente aos agentes erosivos, que atua como uma “lente impermeável”, conferindo localmente ao reservatório o comportamento de um aquífugo. Ou seja, a infiltração de águas proveniente de chuvas é dificultada, gerando acúmulos de água na superfície, como ocorre no alagamento permanente da Rua Vera Paz, em período chuvoso.

Não foi possível determinar a profundidade da coluna da zona saturada devido à profundidade máxima teórica de investigação estabelecida (50m). Utilizando como parâmetro hidrogeológico a correlação feita com a descrição geológica do poço do Caranazal e os dados disponíveis em TANCREDI (1996), foi possível associar essa camada com o Aquífero Livre de Alter do Chão, com seu nível d'água variando em 7,0 m entre os períodos de transição do “verão” e do “inverno” amazônico na área estudada - estes, delimitados pelo estudo da variação da pluviosidade mensal na região de Santarém.

5. Considerações Finais

Os resultados mostraram que o Método ER, utilizando as técnicas SEV e CE com a análise da precipitação mensal na região de Santarém, atenderam de maneira satisfatória o principal objetivo da investigação, que visava verificar a oscilação do NA do aquífero livre da Formação Alter do Chão durante o período de transição entre o “verão” e o “inverno” amazônico. O estudo ainda permitiu um melhor entendimento do comportamento de ascensão da zona saturada e a relação com os alagamentos permanentes da Rua Vera Paz.

A segunda camada geométrica, altamente resistiva, possivelmente está associada a uma cobertura laterítica, sendo esta associada à Cobertura Laterítica Madura, devido à presença de afloramentos presentes na área de estudo. Com o levantamento do CE constatou-se que essa camada geométrica se estende lateralmente ao longo de todo perfil, constatou-se também que sua espessura varia ao longo da linha de estudo. Por se tratar de uma camada espessa de baixa

permeabilidade ela se comporta como um aquifugo impedindo que água se infiltre até o aquífero livre, caracterizando assim um aquífero suspenso próximo a superfície, com acúmulo de água que ascende a superfície gerando alagamentos recorrentes na rua Vera Paz.

Portanto, conclui-se que a Cobertura Laterítica Matura é a causa principal do alagamento da via, no entanto, não foi possível afirmar se a origem da ocorrência da mesma na área de estudo é resultado de precipitação pluviométrica ou se estava relacionada também com períodos de inundação na área pelo Rio Tapajós, haja visto que esta camada não foi descrita nos perfis geológicos dos poços cadastrados no RIMAS. Sugere-se a coleta de amostras de solo com trado e a realização de trincheiras para estudar os horizontes pedológicos e com isso poder compreender melhor a laterização do solo e seus processos associados. E quanto a variação do nível freático, sugere-se a associação de dados diretos de poços aos dados já coletados com a geofísica para que haja como compará-los, sendo ideal a coleta de dados ao longo do mesmo período do estudo.

Referências

- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. D. M., & Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711-728. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507
- Bhattacharya, P. K.; Patra, H. P. (1968). *Direct current geoelectric sounding*. New York: Elsevier Publishing Company, p. 134.
- Braga, A. C. O. (2016). *Geofísica aplicada: Métodos geoeletricos em hidrogeologia*. São Paulo: Oficina de Textos, p. 81.
- Caputo, M.V.; Rodrigues, R.; Vasconcelos, D.N.N. (1971). *Litoestratigrafia da Bacia do Amazonas*. RENOR – Petrobras. 92 p. (Relatório interno).
- CAPUTO, M. V. (1984). *Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology and paleogeography of northern basins of Brazil*. Tese (Doutorado). Califórnia: Universidade da Califórnia.
- CASTRO, B.C. (2018). *Uso de Resistividade Elétrica Em Investigação Geotécnica: O caso De Palmas-TO*. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-142/18, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 298 p.
- Cordani, U.G., Brito Neves, B.B. De B., Fuck, R.A., Thomaz Filho, A., Cunha, F.M. B. (1984). Estudo preliminar de integração do Pré-Cambriano com os eventos tectônicos das Bacias Sedimentares Brasileiras. *Revista Ciência-Técnica-Petróleo*. Seção Exploração de Petróleo. Rio de Janeiro: Petrobrás/Cenpes/Sintep, Publicação n. 15, pp.70.
- Costa, M.L. (1991). Aspectos geológicos dos lateritos da Amazônia. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 21, n. 2, p. 146-160. DOI: 10.25249 / 0375-7536.1991146160
- COSTA, M.L.; HOEHN, H.; FARACO, M.T.L.; CHOQUE, O.J. (2005). O Jade Araguaia. *Contribuições à geologia da Amazônia*. Manaus: SBG-Núcleo Norte. v. 4, p. 230-235.
- CPRM – Serviço Geológico Brasileiro (2012). *Relatório Diagnóstico: Aquífero Alter do Chão no Estado do Pará – Bacia Sedimentar do Amazonas*. V. 7, p. 19. RIMAS - Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas.
- Cunha, P. R. C. et al. (1994). *Bacia do Amazonas*. Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, v. 8, n.1, p. 47-55.
- Cunha, P. R. C., Melo, J. H. G., Silva, O. B. (2007). *Bacia do Amazonas*. Boletim de Geociências da Petrobras, 15(2), 227-251.
- Daemon, R.F. (1975). Contribuição à datação da Formação Alter do Chão, Bacia do Amazonas. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 5, n. 2, p. 78-84.
- Dobrin, M.B. (1981). *Introduction to Geophysical Prospecting*. International Student Edition, 630p.
- Fassbender, W.H. (1975). *Química de suelos; con énfasis en suelos de América Latina*. Ed. IICA. San José de Costa Rica.

- Figueroa, S.N.; Nobre, C.A. (1990). *Precipitations distribution over Central and Western Tropical South America*. Climanálise - Boletim de Monitoramento e Análise Climática, v. 5, n.6, p.36-45.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2019). *Séries históricas e estatísticas: Taxa de Urbanização*. Disponível em: <<https://seriesestatisticas.ibge.gov.br/default.aspx?op=busca>> Acesso em: 12 maio
- Jacinto, A. I.; Simas, M. T. M.; Bianchi, R.; Oliveira, K. N.; Rech, C. M. C. B. (2006). *Aspectos físicoterritoriais e atrações turísticas do município de Santarém, Pará*.
- King, L.C. (1956). A geomorfologia do Brasil Oriental. *Revista Brasileira de Geografia*, v. 18, n. 2, p. 147-165.
- Loke, M.H.; Barker, R.D. (1996a). *Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method*. Geophysical Prospecting, 44, pp 131-152.
- Loke, M.H.; Barker, R.D. (1996b). *Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion*. Geophysical Prospecting, 44, pp 499-523.
- Marcelino, T. H.; Shiraiwa, S.; Borges, W. R.; Filho, P. N.; Raiter, F. (2005). *GPR para a verificação do nível d'água subterrânea em transição Floresta Amazônica e Cerrado*. ACTA AMAZÔNICA – INPA, Vol. 35 (3), p. 367 – 374, Manaus, AM.
- Oliva, A.; Chang, H. K. (2007). *Mapeamento do lençol freático no município de Rio Claro (SP) empregando a técnica de Sondagem Elétrica Vertical*. - São Paulo, UNESP, Geociências, v. 26, n. 1, p. 27-34.
- Orellana, E.S. (1972). *Prospección geoelectrica en corriente continua*, Paraninfo, Madrid, 523p.
- Parasnis, D.S. (1986). *Principles of Applied Geophysics*. Chapman and Hall, New York, 4th Ed., 402 p.
- PORTAL HIDROWEB – *Séries Históricas das Estações* – Inventário de Estações da Agência Nacional das Águas (ANA). Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/medicoes_historicas_abas.jsf>. Acesso em: 10/06/2019.
- Rossetti, D.F.; Neto, R.G. (2006). *First evidence of marine influence in the Cretaceous of the Amazonas Basin, Brazil*. Cretaceous Research, p. 1-16.
- SEMINFRA – Secretaria de Infraestrutura de Santarém, G1 SANTARÉM. *Falta de planejamento de vias em Santarém provoca alagamentos*. Disponível em: <<http://g1.globo.com/pa/santarem-regiao/noticia/2016/06/falta-de-planejamento-de-vias-em-santarem-provoca-alagamentos.html>>. Acessado em: 12 de junho de 2019.
- Silva, A. C.; Dourado, J. C.; Moreira, C. A. (2011). *Aplicação da eletrorresistividade na caracterização do meio hidrogeológico na cidade de Ji-Paraná (RO)* - São Paulo, UNESP, Geociências, v. 30, n. 4, p. 641-650.
- Silva, A. F.; Mitsuya, M.; Silva, R. (2013). *Análise do índice pluviométrico da região de Santarém (PA), entre 1969 e 2010*. Trabalho apresentado em evento - 65º Reunião Anual da SBPC, Recife (PE) – Brasil.
- Silva, P. O.; Cabral, J.J.S.P. (2014). Atenuação de Picos de Vazão em Área Problema: Estudo Comparativo de Reservatórios de Detenção em Lote, em Logradouros e em Grande Área da Bacia. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos - RBRH*, Porto Alegre, v. 19, n. 2, p. 7-18.
- Siqueira Neto, A.C., Elis V.R. (2016). Characterization of an experimental cell in a municipal solid waste landfill using 2-D electrical profiling technique. *Brazilian J. Geophys.* 34, 559-570
- SIQUEIRA NETO, A.C.; BARROS, A.C.S.P.C.; SOUZA, L.G. (2019). Mapeamento hidrogeológico e estudo da vulnerabilidade do Aquífero Itapecuru utilizando sondagens elétricas verticais na fazenda Alta Floresta II, Tailândia-PA. Livro: *Contribuições à Geologia da Amazônia - Volume 11*, 21-35.
- TANCREDI, A.C.F.N.S. (1996). *Recursos hídricos subterrâneos de Santarém*. 153 f. Tese (Doutorado) - Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém.
- Telford, W.M.; Geldart, L.P.; Sheriff, R.E. (1990). *Applied Geophysics*. Cambridge Univ. Press. 2nd edition, 770 p.

Vasquez, M. L.; Rosa-Costa, L. T. (2008). (Org.). *Geologia e recursos minerais do estado do Pará*: texto explicativo. Belém: CPRM.

Vasquez, M. L.; Sousa, C. S.; Carvalho, J. M. A. (2008). (Orgs.) – *Mapa Geológico e de Recursos Minerais do Estado do Pará*. Escala 1:1.000.000 – Programa de Geologia do Brasil (PGB), Integração, Atualização e Difusão de dados da Geologia do Brasil, mapas Geológicos Estaduais. CPRM – Serviço Geológico do Brasil, Superintendência Regional de Belém.