

Artigos

Ensaio geofísico em um aquífero fissural do tipo calha elúvio-aluvionar

Geophysical tests in an eluvial-alluvial trough hard rock aquifer

Jesimael Avelino da Silva¹; Walter Eugênio de Medeiros²; Emanuel Ferraz Jardim de Sá²; Carlos César Nascimento da Silva²; Josibel Gomes de Oliveira Júnior²; Iago Domingos Rabelo da Silva²¹ Superintendência de Polícia Federal do Rio Grande do Norte (RN).² Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, RN, Brasil,✉ jesimael.jas@pf.gov.br, walter.medeiros@ufrn.br, emanuel.sa@ufrn.br, cesar.nascimento@ufrn.br, josibel.oliveira@ufrn.br, iago_cks@hotmail.com

Palavras-chave:

Água subterrânea;
Rochas cristalinas;
Eletrorresistividade;
VLF;
Potencial espontâneo e estrutura dúctil.

Resumo

Ensaio geofísico (eletrorresistividade, potencial espontâneo e VLF) foram efetuados com observações geológicas ao longo de perfis transversais a um riacho localizado na Fazenda Santa Rita, município de Santa Cruz, leste do Estado do RN. Foi caracterizada uma estrutura de acumulação de água subterrânea em rochas cristalinas ao longo de estruturação dúctil. O riacho tem direção ENE-WSW com cobertura elúvio-aluvionar. Afloramentos de gnaiss mostram relação angular do riacho com a foliação, que mergulha para sul. Ocorrem também fraturas subverticalizadas N-S. Dados geofísicos confirmam a ausência de fraturas E-W e delimitam as bordas de uma estrutura em forma de calha preenchida por aluvião e regolito. Este modelo caracteriza-se, no método geoeletrico, por linhas de isovalores de resistividade aparente inclinadas, com altos valores em suas bordas, contrastando com linhas subhorizontalizadas e de menores valores no centro, indicando a borda sul da calha mais íngreme do que a norte. Ao longo da calha, não há correlação de anomalias de VLF, porém dados de potencial espontâneo evidenciam as bordas em contato com rochas cristalinas. Este modelo denomina-se calha elúvio-aluvionar e os controles locais de acumulação de água são o relevo em subsuperfície desenvolvido por intemperismo aproveitando a foliação da rocha e a sua conexão com a drenagem.

Keywords

Groundwater;
Hard rocks;
Resistivity;
VLF;
SP and ductile structure.Revisão por pares.
Recebido em: 17/07/2023.
Aprovado em: 31/10/2023.

Abstract

Geophysical tests (resistivity, SP and VLF) were carried out with geological observations along transversal profiles of a stream located at Fazenda Santa Rita, close to Santa Cruz city, east of the RN State. The purpose was to characterize a structure of water accumulation in hard rocks along ductile feature. The stream has an ENE-WSW trend with eluvial-alluvial coverage. Gneiss outcrops show an angular relationship between the stream direction and the foliation trend, which dips south. N-S subvertical fractures also occur. Geophysical data confirm the absence of E-W fracture zones and delineate the edges of a trough-like structure filled with alluvium and regolith. This model is characterized, in the geoelectric method, by inclined apparent resistivity isovalues lines, with high values at their edges, contrasting with subhorizontal lines with lower values in the center, indicating the southern edge of the trough is steeper than the northern one. Along the trough, there is no correlation of VLF anomalies, but self-potential data show the edges in contact with hard rocks. This model is called the eluvial-alluvial trough and the local controls on water accumulation are the subsurface relief developed by weathering taking advantage of the rock foliation and its connection with drainage.

DOI: <http://doi.org/10.14295/ras.v37i3.30236>

1. INTRODUÇÃO

A tarefa de locação de poços para produção de água subterrânea em terrenos cristalinos representa um desafio para os hidrogeólogos, dado o elevado índice de insucesso nas locações. Este índice é da ordem de 30 % (Medeiros, 1987, Rodrigues *et al.*, 2017) quando a locação é realizada empregando-se a metodologia tradicional, que é baseada na análise de imagens aéreas e exames de afloramentos. A presença de coberturas ou de um solo mais espesso pode constituir um obstáculo adicional para a identificação de contatos, alinhamentos e fraturas, que são os elementos normalmente utilizados para embasar as locações.

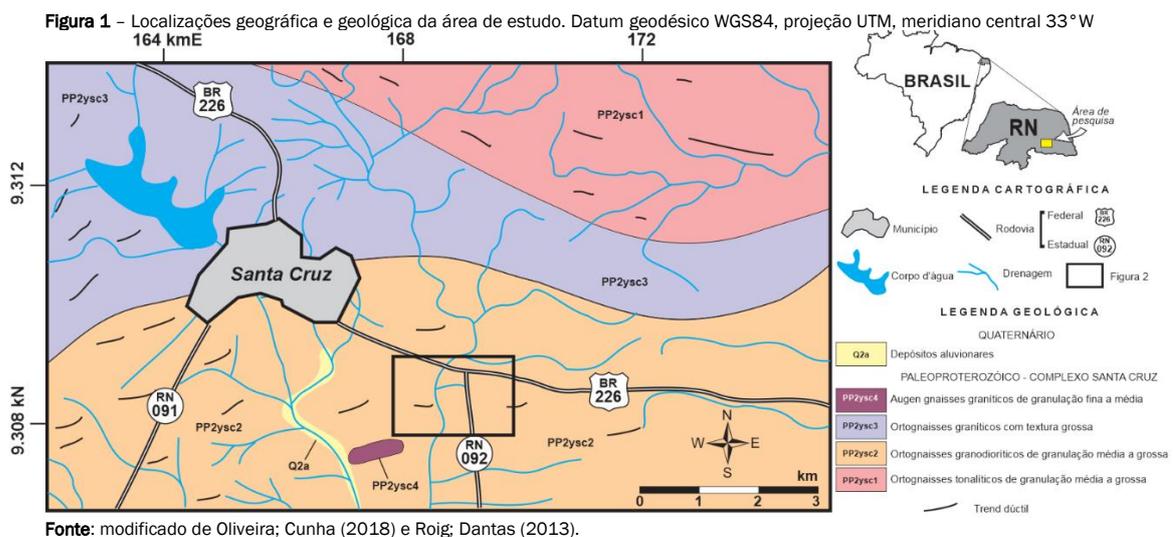
A prática da locação de poços no cristalino geralmente segue uma metodologia tradicional, onde o modelo do “riacho-fenda” (Siqueira, 1963) é bastante empregado. Nessa metodologia clássica, são enfatizados os critérios estruturais (baseados principalmente em imagens aéreas) e de geologia de superfície, onde se tentam identificar zonas intensamente fraturadas, na maioria das vezes compondo pequenos cursos de água estruturalmente controlados ou encaixados, os chamados “riachos-fendas”. Neste contexto, o risco na locação pode ser reduzido com o uso de métodos geofísicos (Nascimento da Silva *et al.*, 2023) através da identificação de descontinuidades hidrogeologicamente importantes.

Este artigo apresenta um modelo de acumulação de água subterrânea no cristalino, denominado de calha eluvio-aluvionar, que ocorre ao longo de zonas intemperizadas desenvolvidas que aproveitam feições dúcteis e não zonas de fratura. Para tanto, foram utilizados estudos geológicos de campo e dados geofísicos (eletrorresistividade, *Very Low Frequency* (VLF) e potencial espontâneo). O local de estudo foi escolhido a partir de uma amostragem em fichas de poços perfurados pela antiga Companhia de Desenvolvimento de Recursos Minerais do Estado (CDM/RN), indicando localmente perfurações com resultados discrepantes em suas vazões, seguida pela análise de fotografias aéreas e avaliações de campo. O artigo inicia com uma breve discussão sobre o modelo riacho-fenda, tradicionalmente utilizado no

cristalino, seguido da apresentação do modelo calha eluvio-aluvionar e suas respectivas caracterizações.

2. CONTEXTUALIZAÇÃO DA ÁREA DE TRABALHO

A área de trabalho situa-se no Agreste Potiguar nas imediações da sede municipal de Santa Cruz (Figura 1). Essa região encontra-se na transição entre os climas do tipo As (zona tropical com verão seco) e BSh (zona seca, semiárida) da classificação de Köppen-Geiger (Alvares *et al.*, 2013), sendo caracterizada pela precipitação pluviométrica anual de até 500 mm, temperatura média de 25,7°C e insolação média de 2.400 h/ano (CPRM, 2005).



Geologicamente, a região estudada (Figura 1) situa-se no Complexo Gnáissico-Migmatítico Santa Cruz de idade paleoproterozóica a arqueana (Almeida *et al.*, 1977, Oliveira; Cunha, 2018, Roig; Dantas, 2013). Este complexo é predominantemente formado por ortognaissos e augengnaissos graníticos, por vezes apresentando bandas de anfíbolitos e variavelmente migmatizados, além de corpos intrusivos de granitóides brasileiros e alguns diques e veios pegmatíticos. A foliação principal das rochas, bandamento gnáissico, tem direção preferencial NE-SW a ENE-WSW, possuindo mergulhos com intensidade e sentido variáveis. Os fraturamentos observados em imagens aéreas e em campo ocorrem, com maior frequência, nas direções NE e NW, N-S e, menos frequentemente, na direção E-W.

Embora a região apresente locais com bons afloramentos, grande parte da mesma encontra-se encoberta por solo, o que dificulta, sobremaneira, a utilização de ferramentas estruturais e de sensoriamento remoto na locação de poços. Esta foi a principal razão de escolha desta região para este estudo geofísico.

3. O MODELO RIACHO-FENDA

Siqueira (1967) e Costa (2008) apresentaram diferentes

situações geológico-estruturais favoráveis à acumulação de água subterrânea no cristalino do Nordeste do Brasil. Dentre as possibilidades propostas, eles consideraram as rupturas (falhas ou fraturas) como as mais promissoras. Em sua análise das fraturas em rochas cristalinas, Costa (2008) apresentou uma classificação que considera a relação angular da direção preferencial das feições frágeis com o *trend* estrutural dominante, em geral tomado como sendo a direção da foliação local das rochas. Costa (2008) designou as fraturas como longitudinais, oblíquas e transversais, correlacionando-as ao sistema de tensões responsável por sua estruturação. Baseado nessa classificação, foi proposto que as fraturas transversais seriam juntas de distensão, neste caso implicando em fraturas abertas, mais favoráveis à percolação e acumulação de água; por outro lado, as fraturas diagonais e longitudinais resultariam de esforços cisalhantes e de compressão, apresentando potencial hidrogeológico intermediário ou mínimo. Ressalta-se, contudo, que o sistema de tensões responsável pela geração destas estruturas frágeis representa, geralmente, herança Pré-cambriana, não apresentando relação direta com o campo de tensões atual, o qual pode condicionar o atual comportamento aberto ou fechado dessas descontinuidades (Coriolano, 2002).

Portanto, o conceito de riacho-fenda representa uma situação

onde ocorre a coincidência da drenagem superficial com uma zona fraturada, proporcionando a infiltração e o armazenamento de água através dos fraturamentos. Essa morfologia é de fácil observação em imagens de sensores remotos e em campo, através de feições retilíneas de trechos de rios e riachos paralelos às direções preferenciais de fraturas no cristalino aflorante.

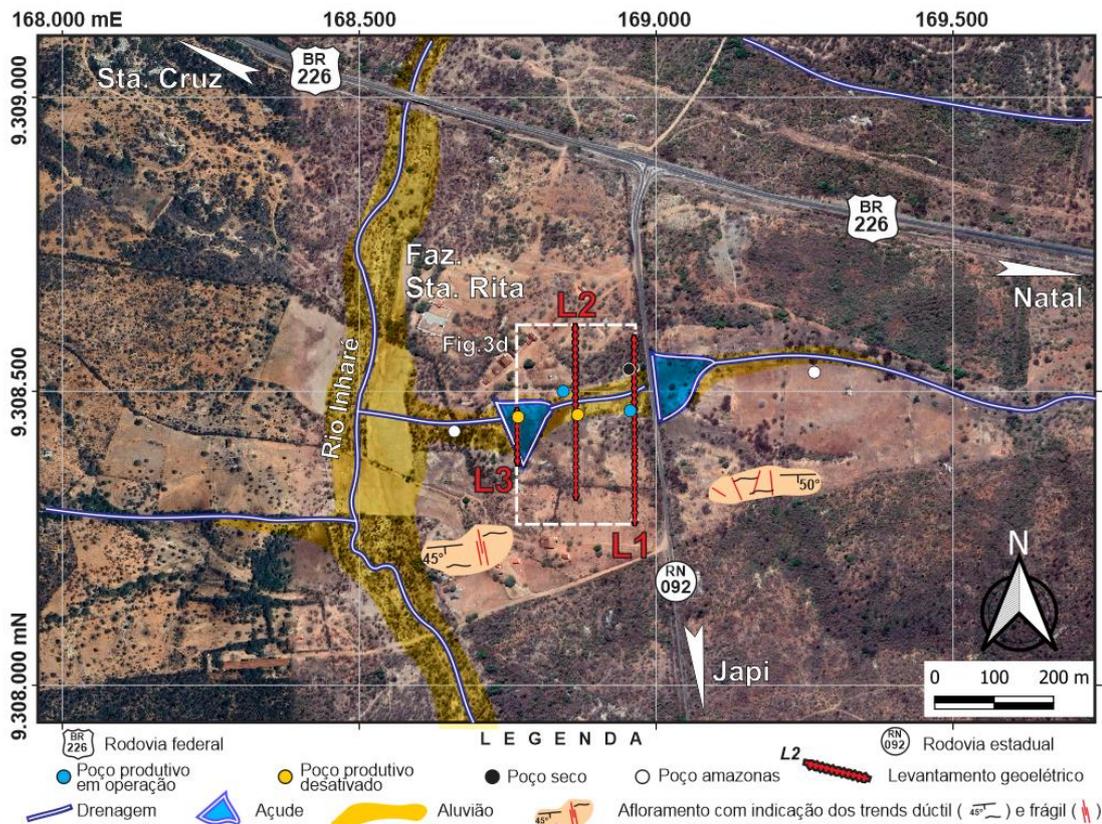
4. A ÁREA DE TRABALHO: A FAZENDA SANTA RITA

A área de trabalho (Figura 1) é predominantemente formada por ortognaisses granodioríticos a tonalíticos, aqui indistintamente denominados de gnaisses, por vezes apresentando bandas de anfibolito. Também ocorrem pequenas intrusões de granito e pegmatito na forma de diques e veios. Localmente (Figura 2), a foliação do gnaisse está disposta predominantemente na direção ENE a E-W, apresentando mergulhos em torno de 45° a 50° para SSE e S. Ocorrem também fraturas dispersas nos afloramentos, que apresentam as direções NNW (predominante) e NW.

Na área existem cinco poços tubulares que foram perfurados em 1993, dos quais quatro foram produtivos com vazões

variando de 0,9 a 2,18 m³/h, (dois estão em operação e dois encontram-se desativados) e um foi considerado seco. Os poços tubulares apresentam profundidades variando de 30 a 50 m, com revestimento na porção inicial até cerca de 4 m, geralmente acompanhando a espessura do aluvião. De acordo com as fichas dos poços disponibilizadas pela CDM/RN, as entradas de água estão concentradas nas profundidades de 6 a 19 m e o nível estático varia de 5,0 a 8,4 m. As fichas indicam as condições do poço imediatamente após a sua perfuração, que ocorreram em períodos diferentes do ano. Em consequência, os valores observados estão sujeitos à variação sazonal do nível freático. Em função da falta de informações precisas de georreferenciamento nas fichas de poços, somente foi possível localizar com precisão o poço considerado seco, sendo os demais plotados com base em reconhecimento de campo. Há ainda dois poços amazonas (Figura 2) que foram completamente escavados no aluvião. Por ocasião dos estudos geológicos e geofísicos de campo realizados em setembro de 1999, o poço amazonas situado na parte leste da área, e que tem aproximadamente 5 m de profundidade, encontrava-se seco, enquanto aquele situado na parte oeste e que tem profundidade de 7 m, apresentava nível estático a cerca de 5 m.

Figura 2 – Imagem de satélite (Google Earth, 08/fev/2017) com detalhe da região da Fazenda Santa Rita, município de Santa Cruz. Destacam-se a disposição da rede de drenagem local, as linhas de levantamento geofísico (L1, L2 e L3) e os poços existentes. Datum geodésico WGS84, projeção UTM, meridiano central 33° W



5. MÉTODOS DE TRABALHO

Foram levantadas três linhas geofísicas (L1, L2 e L3), todas com direção S-N, aproximadamente perpendiculares ao riacho

local e passando ao lado de poços perfurados (Figura 2). Foram executados três tipos de levantamentos geofísicos: geofísico (a), VLF (b) e potencial espontâneo (c). O método geofísico, por sua vez, foi realizado através das técnicas

monocanal (a) e, para a sua validação, também multicanal (d):

(a) sondagens elétricas verticais (SEV's) levantadas com o arranjo Schlumberger, com centros espaçados de 20 m e usando cinco aberturas de eletrodos (AB/2) no intervalo de 2 a 50 m. As aberturas de eletrodos foram escolhidas com base na análise prévia de SEV's completas, visando fazer um compromisso entre a eficiência do levantamento e a boa detecção das camadas geoeletricas. Os dados de resistividade aparente foram filtrados e interpolados utilizando o software Surfer visando compor seções de resistividade aparente, que estão apresentadas na Figura 3. Estes levantamentos foram realizados com aparelhos do tipo monocanal, típicos da década de 1990, antes do advento dos aparelhos digitais de tomografia elétrica. Para os processos de inversão e de geração de modelo geoeletrico foi utilizado o software IPI2win;

(b) perfis de VLF (linhas vermelhas na Figura 3), com medidas a cada 5 m, fazendo uso da estação transmissora GBR (frequência de 16,0 kHz e potência de 750 Kw, ABEM 1989). As medidas são apresentadas na forma de estimativas de densidade de corrente, em percentis, correspondente à profundidade de investigação de 5 m, que foram calculadas a partir da filtragem da componente em fase (HZR) do campo magnético (Karous; Hjelt, 1983), processadas e interpoladas no software Surfer.

(c) perfis de potencial espontâneo (linhas azuis na Figura 3), de forma a averiguar a possível existência de efeitos electrocinéticos provocados pelo fluxo de água subterrânea no aquífero (Medeiros; Lima, 1999), processados e interpolados no software Surfer.

(d) posteriormente, de modo a confirmar a validade das seções de resistividade aparente obtidas com o aparelho monocanal e, adicionalmente, melhor explorar a possibilidade (ou não) de existência de zonas de fratura, foram realizadas tomografias elétricas (ERT's) com os arranjos dipolo-dipolo, Schlumberger e Wenner (Figura 4), ao longo da Linha 2, com espaçamento entre estações de 10 m e aproximadamente 320 m de extensão. Esta ERT representa um levantamento geofísico de maior resolução, permitindo, dentre outros aspectos, um processo mais robusto de inversão, atingindo profundidades de investigação da ordem de 45 a 62 m e distintas resoluções (Silva, 2019). Registre-se que a posição Y=0 m em todos os arranjos corresponde aproximadamente ao centro da drenagem, de modo a separar as seções em duas partes, em relação ao riacho. Os dados de ERT foram filtrados e processados no software RES2DInv, de modo a compor as seções de resistividade aparente e invertidas, mostradas na Figura 4, com isto, subsidiando a interpretação geofísica das seções geoeletricas obtidas pelo método monocanal, descrito anteriormente.

Figura 3 - Levantamentos geofísicos ao longo das linhas 1 (a), 2 (b) e 3 (c). Em cada linha, localizada pelo mapa de situação à direita, está mostrada a seção de resistividade aparente levantada com o equipamento monocanal e o arranjo Schlumberger e os perfis de VLF (componente real, em vermelho) e de potencial espontâneo (em azul). A barra de cores para a resistividade aparente é a mesma para as três seções. A escala das figuras é a mesma

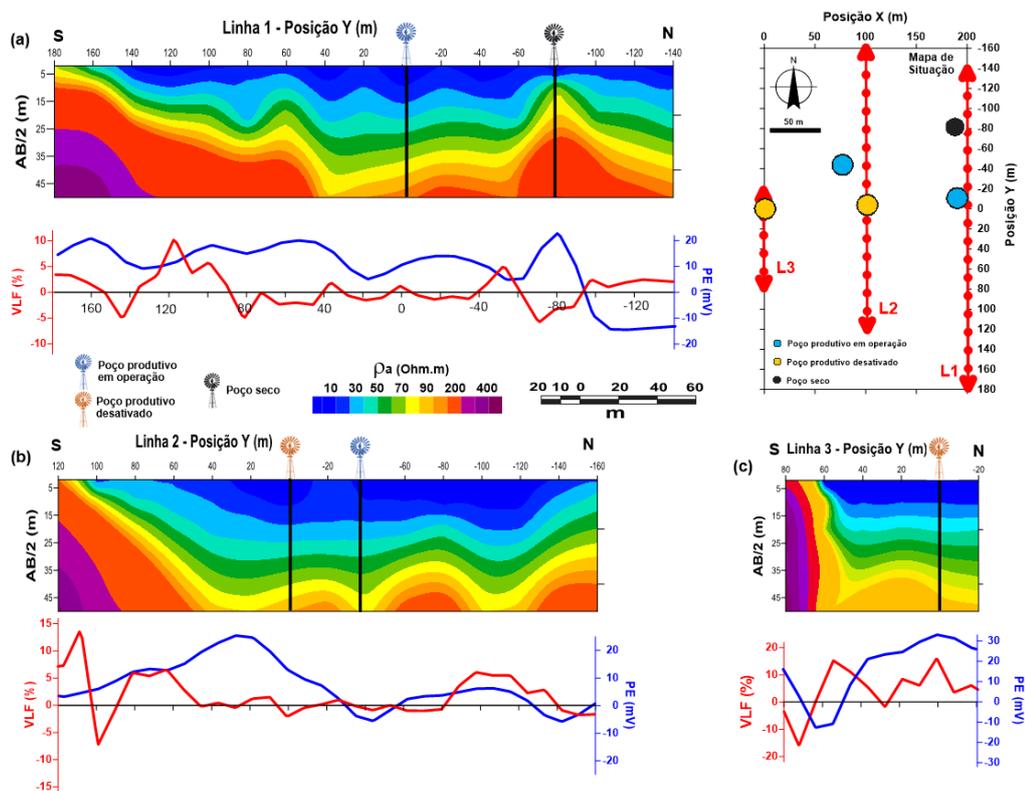
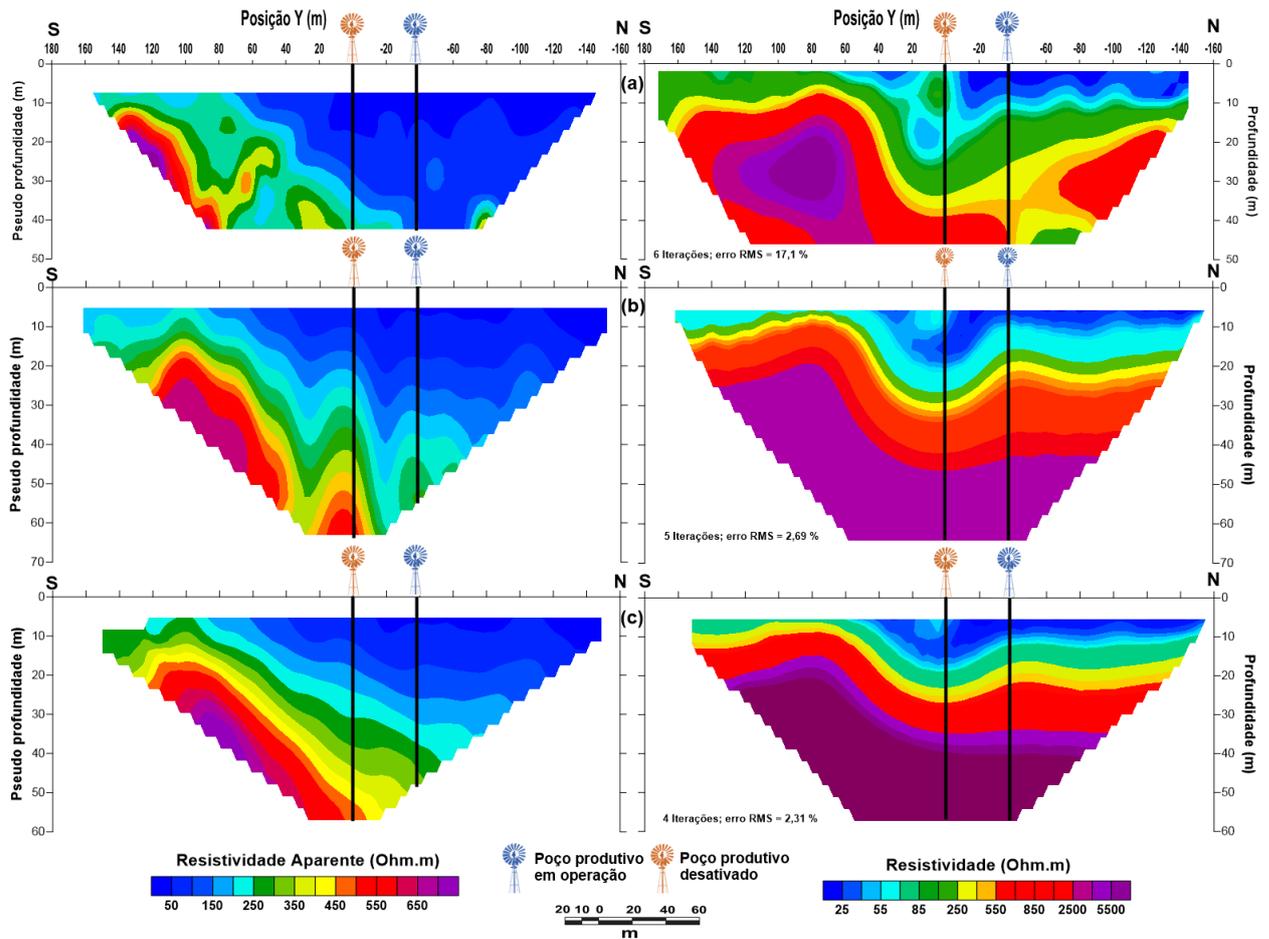


Figura 4 – Imagens geolétricas resultantes das tomografias ERT ao longo da Linha 2. Seções de resistividade aparente (coluna da esquerda) e estimativas da distribuição de resistividade (coluna da direita). De cima para baixo ao longo das linhas, são mostrados os resultados obtidos com os arranjos dipolo-diplo (a), Schlumberger (b) e Wenner (c). As estimativas de resistividade foram obtidas através da solução do problema inverso com o software Res2DInv, que utiliza o vínculo de norma mínima do gradiente de resistividade (Degroot-Hedlin; Constable, 1990). Exagero vertical: 2,4x



6. RESULTADOS OBTIDOS

Os dados geofísicos obtidos permitem analisar a área de estudo através de cortes verticais (seções 2D e linhas 1D, a depender do método geofísico) ou mapas horizontais. As seções de resistividade aparente das linhas 1, 2 e 3 (figuras 3a, 3b e 3c) mostram alguns aspectos semelhantes. Dentre estes, observam-se elevações nos valores de resistividade aparente em suas bordas, principalmente na borda sul, sendo mais proeminente, por volta da estação Y=60 m nas três linhas. Especificamente à Linha 3, a estação Y=60 m representa, em campo, rochas cristalinas subaflorantes. A borda norte é visualizada pela elevação do embasamento cristalino nas estações Y=-80 m, na Linha 1, e Y=-140 m, na linha 2; a borda norte não foi imageada na linha 3. No centro, as linhas de isovalores de resistividade aparente estão subhorizontalizadas, mais realçada entre as estações Y=40 e -60 m na linha 1 e, mais discreta, entre as estações Y=0 e -60 m na linha 2, bem como entre as estações Y=60 e -20 m na linha 3. Esse rebaixamento brusco das linhas de isovalores de resistividade aparente desde os menores valores de AB/2 certamente são provocados por variações de espessura da camada superficial de natureza areno-argilosa, estando mais espessa nestas porções. Na Linha 2, estação Y=-40 m, o rebaixamento só é observado nas aberturas de AB/2

superiores a 20 m, sugerindo, neste caso, que o rebaixamento é provocado por uma maior espessura do cristalino fraturado e/ou alterado. No caso específico da Linha 3, há um pequeno açude próximo que pode explicar o aumento local da condutividade em função de sedimentos argilosos saturados em água.

Os perfis de VLF (linhas vermelhas abaixo de cada uma das seções geolétricas nas figuras 3a, 3b e 3c) mostram picos significativos de densidade de corrente nas estações Y=120 m, nas linhas 1 e 2, e Y=60 m, na Linha 3, interpretados como o resultado do contraste lateral entre as rochas cristalinas subaflorantes e os sedimentos argilo-arenosos da calha do aluvião ao longo da drenagem. Picos menores nas estações Y=-60 m (Linha 1) e -80 m (Linha 2) também são observados, indicando a borda norte da calha. Nas demais estações, situadas nos trechos em que a espessura de aluvião é maior, as curvas de densidades não apresentam deslocamentos importantes, indicando ausência de estruturas significativas, fraturas, na porção central do perfil.

Estas interpretações dos dados de VLF corroboram com os dados de potencial espontâneo, indicados pelas linhas azuis imediatamente abaixo de cada seção geolétrica na Figura 3. Nas estações Y=20 m (Linha 1) e Y=-40 m (Linha 2),

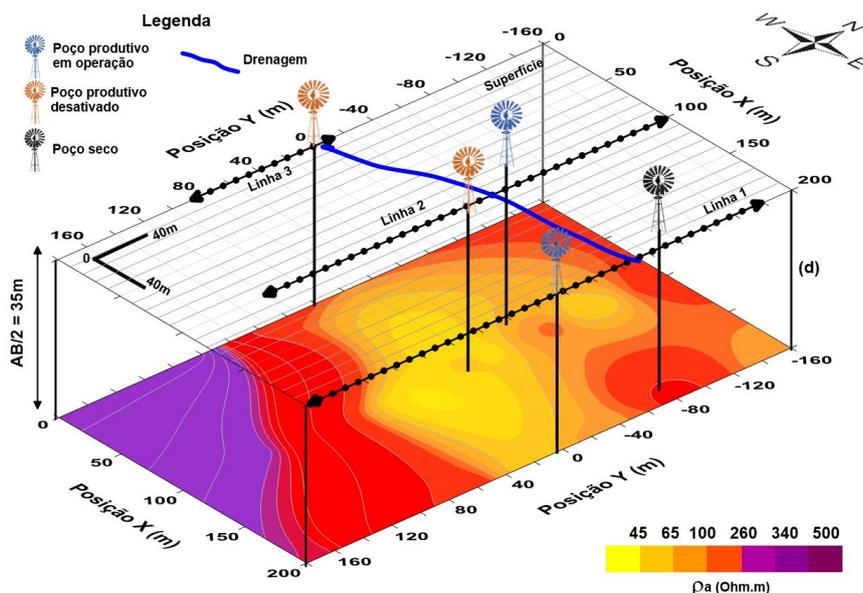
anomalias negativas de potencial espontâneo (PE) são interpretadas como locais de fluxo de água subterrânea, provavelmente associadas, ao menos parcialmente, ao próprio bombeamento do poço no local, uma vez que estava em funcionamento durante a aquisição dos dados geofísicos. As anomalias positivas de maior comprimento de onda, entre as estações Y=60 m e Y=0 m, na Linha 2, bem como aquela observada na estação Y=-80 m, na Linha 1, podem ser interpretadas como o efeito de uma barreira impermeável ao fluxo subterrâneo de água, de acordo com Schiavone; Quarto (1984), geologicamente explicada por ressaltos no embasamento cristalino face aos sedimentos areno-argilosos da calha.

As tomografias ERT's (Figura 4) realizadas ao longo da Linha 2 permitiram analisar a área investigada com maior resolução quando comparada à seção geoeletrica análoga da Figura 3. O processo de inversão das seções de resistividade aparente utilizando o vínculo de norma mínima do gradiente de resistividade (Degroot-Hedlin; Constable, 1990) permitiu atingir profundidades de investigação da ordem de 42 a 62 m, a depender do arranjo. Segundo o arranjo dipolo-dipolo (Figura 4a), pode-se observar satisfatoriamente as regiões de rochas cristalinas subaflorantes (estações 180 a 60 m e -60 a -140 m), contrapondo a porção central (estações 60 a -60 m), relacionada por sua vez à região de maior espessura de sedimentos inconsolidados. Nesta região central, é possível visualizar duas porções com comportamentos geoeletricos discretamente distintos, sendo um relativamente mais resistivo e raso nas imediações da estação 20 m e outro mais condutivo e profundo na estação 0 m. Estes aspectos podem ser relacionados tanto a regiões mais saturadas em água

junto à calha de sedimentos ou, alternativamente, às regiões mais argilosas no substrato. Além disso, o gradiente mais forte de curvas de iso-resistividade, nas imediações da estação 60 m, indica a borda mais acentuada da calha de sedimentos em contato com as rochas cristalinas. Quanto aos arranjos Schlumberger (Figura 4b) e Wenner (Figura 4c), também foi possível observar a morfologia da calha de sedimentos entre as estações 60 e -60 m, além de sua porção mais íngreme na extremidade sul (estação 60 m), justapondo-se às rochas cristalinas. As profundidades máximas de investigação foram superiores (62 m no Schlumberger e 52 m no Wenner) à do arranjo dipolo-dipolo (pouco mais de 40 m). Outro aspecto importante, realçando os demais dados geofísicos e as informações geológicas obtidas em afloramentos, é a ausência de feições compatíveis com zonas de fraturas, transversais às seções, ou seja, ao longo da direção aproximadamente E-W da calha de sedimentos.

Esta característica, ausência de elementos lineares E-W, possibilitou uma maior segurança para interpolar os dados geoeletricos ao longo das linhas 1, 2 e 3 (Figura 3), de modo a compor o mapa para abertura de eletrodos AB/2 de 35 m (Figura 5). Este mapa mostra a porção sul com valores de resistividade aparente substancialmente mais elevados, associados às rochas cristalinas subaflorantes. De forma compatível ao observado nas seções geoeletricas, a borda norte se apresenta mais suave. A parte central, compondo uma região relativamente mais condutiva com linhas de iso-resistividade aparente ao longo da direção E-W, subparalelo à direção do *trend* dúctil local, caracterizado em campo pelo bandamento gnáissico, é consistente com a direção da calha de sedimentos.

Figura 5 - Visão em perspectiva dos poços da área e da seção horizontal de resistividade aparente (arranjo Schlumberger, AB/2 = 35 m). A seção foi composta interpolando as medidas levantadas nas três linhas mostradas na Figura 3



Ainda para atestar que não há influência relevante de zonas de fratura, corroborando os dados geológicos dos afloramentos e os dados geoeletricos, os dados de VLF e de potencial espontâneo foram interpolados e dispostos na forma de blocos diagramas, respectivamente figuras 6a e 6b. Nos dados de VLF (Figura 6a) não são observados alinhamentos consistentes; nos dados de potencial espontâneo (Figura 6b), o alinhamento ocorre longo da direção aproximada E-W. O primeiro caso atesta a inexistência de uma zona de fratura ao longo da drenagem local, enquanto o segundo indica somente a presença da barreira de permeabilidade imposta pelas rochas cristalinas em profundidade face aos sedimentos inconsolidados do aluvião.

As interpretações propostas para os dados geoeletricos na forma de SEV's, baseadas na configuração das curvas, nas observações de campo e na bibliografia disponível, permitiu esboçar para cada estação de leitura um modelo com até quatro camadas com os seus respectivos pares espessura e resistividade (Figura 7).

Devido ao fenômeno da equivalência elétrica na condutância longitudinal (Orellana, 1972), os valores das espessuras e resistividades das camadas geoeletricas obtidas com a interpretação das sondagens elétricas, não devem ser considerados como absolutos; o aspecto mais importante nessas interpretações reside nas razões entre espessuras das camadas de regolito e/ou cristalino fraturado e/ou alterado, indicando assim onde os sedimentos inconsolidados são mais espessos.

No modelo geoeletrico invertido proposto para a Linha 2 (Figura 7), representante para a área, os limites sul e norte representam o cristalino subaflorante, sendo que na borda sul o mesmo está bem mais próximo à superfície (inferior a 1,0 m) e possui um maior gradiente em subsuperfície. A camada areno-argilosa apresenta variações laterais de resistividade, no entanto, sua espessura varia pouco na porção central da estrutura. O cristalino fraturado e/ou alterado apresenta uma ampla variação de espessura ao longo da estrutura, sendo que na estação -40 m ele atinge seu maior valor, em torno de 13 m.

Figura 6 - Vistas em perspectiva, a partir do quadrante NE, das medidas de VLF (a, componente real) e potencial espontâneo (b)

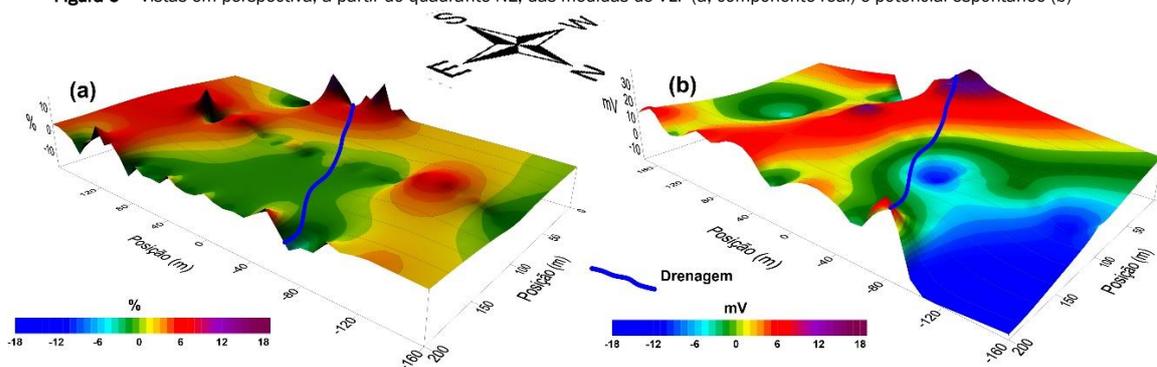
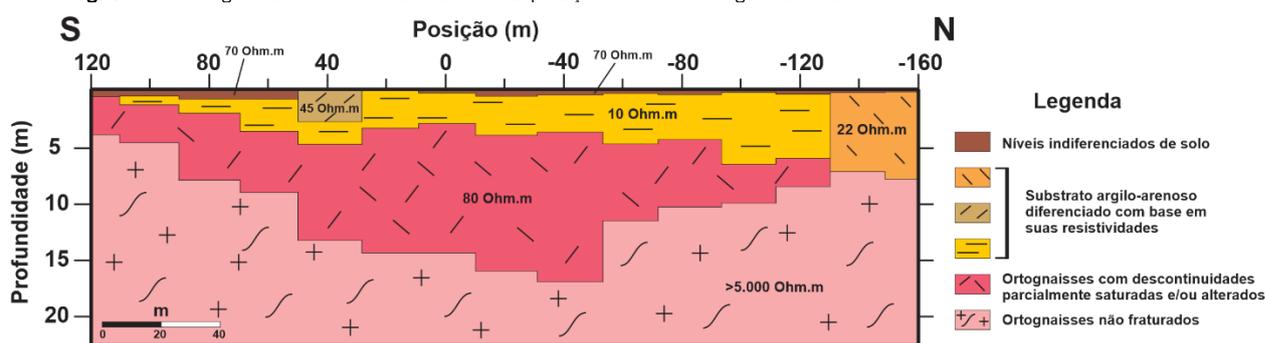


Figura 7 - Modelo geoeletrico de camadas obtido da interpretação das SEV's ao longo da Linha 2



7. O MODELO CALHA ELÚVIO-ALUVIONAR

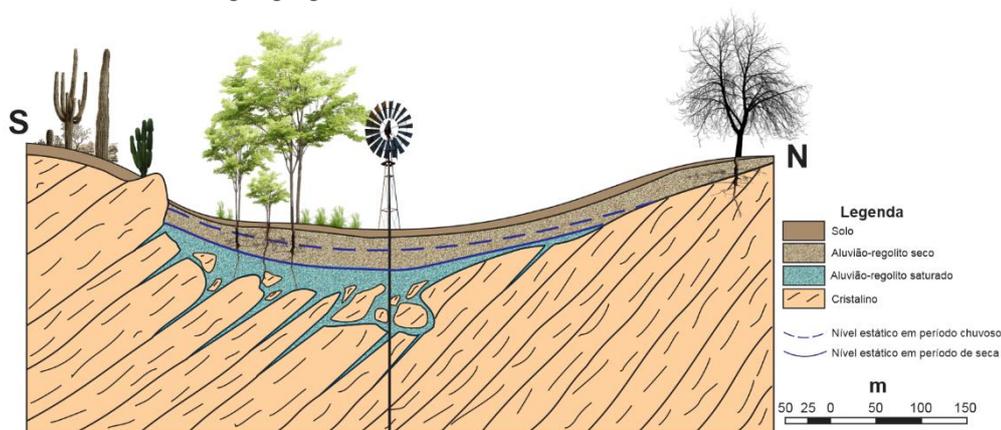
Os dados geofísicos e geológicos da Fazenda Santa Rita indicam que o modelo riacho-fenda, comumente empregado em trabalhos de locação de poços no cristalino, não pode ser aplicado neste caso, sendo necessário esboçar um outro modelo, mais adequado às características da estrutura de acumulação de água no local. Essa estrutura comporta-se

como uma mini-bacia de acumulação de sedimentos e regolito, e foi denominada de modelo calha elúvio-aluvionar (Silva, 2000). Este modelo enfatiza a importância das descontinuidades de origem dúctil, além do papel da topografia local e da ocorrência de uma cobertura sedimentar como condicionantes de recarga, o que já é reconhecido na literatura (por exemplo, Costa, 2008).

O modelo calha representa uma feição morfológica na qual uma região topograficamente mais baixa (geralmente com drenagem associada) recebe sedimentos dos locais mais elevados ao seu redor. Além dessa razoável acumulação de sedimento na estrutura, a percolação de água superficial, que infiltra nos sedimentos (aluvião e regolito), promove a intemperização mais acentuada da rocha cristalina no centro da estrutura, especialmente controlada pelos planos de anisotropia preexistentes, em geral correspondendo à foliação da rocha.

Na Fazenda Santa Rita, observa-se que a morfologia da calha em subsuperfície é controlada pelo bandamento dos gnaisses, ou seja, apresenta sua maior dimensão alinhada na direção do plano de foliação aproximadamente E-W. A depender da atitude da foliação, a borda que não acompanha o seu mergulho apresenta-se mais inclinada (podendo formar uma cuesta incipiente), enquanto a borda oposta geralmente acompanha a declividade da feição dúctil (Figura 8). A superfície potenciométrica da zona saturada provavelmente acompanha parcialmente a topografia e varia sazonalmente em função dos períodos de seca e chuvosos, conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Modelo hidrogeológico para a acumulação de água subterrânea do tipo calha elúvio-aluvionar, baseado no estudo geológico-geofísico da área de estudo



As características geológicas e geofísicas que devem ser atribuídas ao modelo calha são: 1) inexistência, nos afloramentos, de fraturas na direção do alinhamento do riacho; 2) relativa largura e espessura da aluvião, capeando as rochas cristalinas; 3) as seções de resistividade aparente apresentam as linhas de isovalores de resistividade aparente inclinadas e apresentando altos valores nas bordas da estrutura, enquanto no centro as linhas de isovalores de resistividade aparente estão horizontalizadas e com menores valores; 4) não há continuidade/correlação, de um perfil a outro, da(s) anomalia(s) de VLF; 5) dados de potencial espontâneo podem ser úteis para indicar o limite, em subsuperfície, das rochas cristalinas e dos sedimentos inconsolidados, representando uma forte barreira ao fluxo de água subterrânea.

8. DISCUSSÃO

A locação de poços no cristalino é uma tarefa que exige bom conhecimento sobre as principais estruturas acumuladoras de água nesses terrenos. Desde a década de 60, os trabalhos de locação no Nordeste Brasileiro são baseados quase que exclusivamente no conceito do riacho-fenda, introduzido por Siqueira (1963). O riacho-fenda certamente é um bom modelo, embora não deva ser tratado como o único controle.

Baseado em dados estruturais e geofísicos, foi proposto o modelo denominado de calha elúvio-aluvionar, que enfatiza o papel de acumulação e recarga de água subterrânea ao longo

de feições dúcteis, promovida por ação do intemperismo sob condições climáticas com certo grau de umidade, não consideravelmente áridas, e por uma cobertura de material sedimentar, fatores esses já parcialmente reconhecidos na literatura (por exemplo, Costa 2008). Este modelo é caracterizado por configurar uma estrutura na forma de uma mini-bacia preenchida por aluvião e/ou regolito, desprovida de uma zona de fraturas significativa ao longo do seu eixo e possivelmente controlada por outras anisotropias, tais como a foliação das rochas.

Os dois modelos (riacho-fenda e calha elúvio-aluvionar) possuem características bem distintas, que todavia podem ser confundidas em um exame rápido de fotografias aéreas, buscando trechos retilíneos de riachos. Portanto, os critérios para a locação de poços, de acordo com os dois modelos, devem ser diferenciados.

Na locação de poços utilizando o modelo riacho-fenda, deve-se enfatizar a localização exata da zona fraturada, que na maioria dos casos coincide com o leito do riacho para feições subverticalizadas. Os afloramentos adjacentes devem expor fraturas com orientação semelhante, ainda que a sua ocorrência não implique, necessariamente, na existência de uma zona de fraturas profunda condicionadora de vazões importantes. A locação de poços utilizando apenas fotografias aéreas pode fornecer resultados negativos. O uso integrado da ferramenta estrutural de terreno e da geofísica minimiza a ambiguidade interpretativa, possibilitando uma locação mais

segura. Na locação de poços em uma estrutura do tipo calha, a ocorrência de fraturas torna-se um controle subordinado, em relação à maior favorabilidade dos locais topograficamente rebaixados, com maior espessura de aluvião e/ou regolito, que mais uma vez podem ser identificados de maneira rápida e precisa através de métodos geofísicos. Por outro lado, na área de estudo, a ocorrência de poços “secos” e “produtivos”, adjacentes, pode ser função da geometria das lentes argilosas no pacote sedimentar, bem como da ocorrência de fraturas N-S ortogonais à direção da feição tipo calha, facilitando o intemperismo e percolação de água em sítios mais restritos. Aqueles poços que não interceptaram, em profundidade, tanto a estrutura tipo calha elúvio-aluvionar, bem como fraturas N-S existentes, apresentam baixíssima produtividade, sendo considerados secos.

Devido às diferenças nas características geofísicas das estruturas, os métodos que apresentam melhores resultados na identificação e locação de poços nessas estruturas são também distintos. No caso do modelo riacho-fenda, a utilização do VLF oferece excelente resposta tanto em relação à localização da zona fraturada quanto na determinação da direção do seu eixo de prolongamento e profundidade. Para caracterização do modelo calha, o método de geolétrico proporciona a determinação das bordas da estrutura e revela os locais que apresentam maior espessura de aluvião e/ou regolito.

A locação de poços com base num modelo equivocado pode traduzir na perda do poço (poço seco ou baixa vazão), pois na locação em uma estrutura do tipo riacho-fenda, uma diferença de cerca de 5 m já pode comprometê-lo, desviado da zona de fratura. Já no modelo calha essa diferença não comprometeria o poço a priori, devido à maior largura da estrutura. É claro que a locação em local com maior espessura de sedimento certamente otimizará a produção do poço.

9. CONCLUSÕES

Certamente o modelo riacho-fenda ilustra um dos principais mecanismos de acumulação de água no cristalino. Entretanto, o mesmo não se constitui no mecanismo único e de validade geral. Sob condições morfológicas particulares, o desenvolvimento de estruturas de acumulação de sedimentos (aluvião e/ou regolito) pode gerar apreciáveis vazões de água, em poços no cristalino. Esse tipo de estrutura foi denominado de modelo calha elúvio-aluvionar.

O controle da estrutura do tipo calha é exercido basicamente pela foliação da rocha ou outros planos de anisotropia, conjugado ao contexto geomorfológico local. As características importantes que auxiliam na identificação deste modelo incluem: ausência de fraturas na direção da estrutura; as anomalias de VLF no centro da estrutura não apresentam continuidade quando se compara vários perfis; e principalmente, os dados de eletro-resistividade (seções de resistividade aparente), que definem muito bem as bordas da

estrutura com alta resistividade e o centro da estrutura com resistividade menor.

Considerando as características dos modelos calha e riacho-fenda, os trabalhos de locação de poços no cristalino devem levar em conta as diferenças entre ambos, identificáveis com dados geológicos/estruturais e geofísicos do terreno, bem como as suas implicações, em maior detalhe, para seleção dos melhores sítios para perfuração. Os métodos geofísicos aplicados neste trabalho permitem um tratamento mais rigoroso desses aspectos, em especial no quesito profundidade, e são indispensáveis nas situações com carência de afloramentos.

10. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as discussões e participação de Ana Catarina Fernandes Coriolano e Elmo Marinho de Figueiredo nos trabalhos de campo e ao financiamento pelo programa PADCT3, junto com bolsas do CNPq e CAPES. Walter Eugênio de Medeiros agradece ao CNPq a bolsa PQ e a Grant associada. Autores agradecem ao UFRN/DGEF pela disponibilização de equipamentos geofísicos e aos revisores anônimos desta publicação pelos grandiosos comentários e sugestões dispensados, bem como ao corpo editorial da Revista Abas.

REFERÊNCIAS

- ABEM. ABEM Wadi VLF. *Instrument: simple, state-of-the-art water prospecting instrument*, p 47, Equipment Manual, 1989.
- ALMEIDA, F. F. M., HASUI, Y., BRITO NEVES, B. B., FUCK R. A. Províncias Estruturais Brasileiras. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 8., 1977. [Anais...]. Campina Grande, Atas. Recife, PE, SBG, Núcleo Nordeste, 1, 363-392, 1977.
- ALVARES, C.A., STAPE, J.L., SENTELHAS, P.C. GONÇALVES, J.L.M., SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.
- CORIOLOANO, A.C.F. *Reavaliação de critérios estruturais na hidrogeologia de terrenos cristalinos, com ênfase na neotectônica e sensoriamento remoto*. 2002. 274 f. Tese (Doutorado em Geodinâmica; Geofísica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, RN, 2002. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/18354>
- COSTA, W.D. Hidrogeologia de meios fissurados. In: FEITOSA, A.C, MANOEL FILHO, J., FEITOSA, E.C., DEMETRIO, J.G.A., *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*, Rio de Janeiro, CPRM, 3. ed., p. 97-120, 2008. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/14818p.121-151>.
- CPRM. *Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea: diagnóstico do município de Santa Cruz, estado do Rio Grande do Norte*. Recife: CPRM/PRODEEM, 2005. 11p. + anexos. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/17076>. Acesso em: jun. 2023.

- DEGROOT-HEDLIN, C., CONSTABLE, S., Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics*, v. 55, p. 1613-1624, 1990. <https://doi.org/10.1190/1.1442813>
- KAROUS, M.; HJELT, S.E. Linear filtering of VLF dip-angle measurements. *Geophysical Prospecting*, v. 31, p. 782-794. 1983. <https://doi.org/10.1111/j.1365-478.1983.tb01085.x>
- MEDEIROS, W.E. DE. *Eletro-resistividade aplicada à hidrogeologia do cristalino: um problema de modelamento bidimensional*. Dissertação de Mestrado, UFBA/PPPG, 162p, 1987. <https://doi.org/10.1111/j.1745-584.1990.tb01707.x>
- MEDEIROS, W.E. DE, LIMA, O.A.L. DE. Origem do potencial elétrico espontâneo em rochas cristalinas fraturadas e sua utilização na locação de poços. *Brazilian Journal of Geophysics*, [S.l.], v. 17, n. 2 e 3, p. 103-116, 1999. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X1999000200001>
- NASCIMENTO DA SILVA, C.C., MEDEIROS, W.E., JARDIM DE SÁ, E.F., LIMA, M.G. O aquífero fissural no semiárido: análise de modelos com base em dados geológico-estruturais e métodos geofísicos aeroportados e terrestre. *Águas Subterrâneas*, v. 37, n. 2, e-30197, 2023. <https://doi.org/10.14295/ras.v37i2.30197>
- OLIVEIRA, S.F. de; CUNHA, A.L.C. da. *Geologia e recursos minerais da folha Santa Cruz SB.24-Z-B-III: estados do Rio Grande do Norte e Paraíba*. 2018. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/20239>
- ORELLANA, E. *Prospección geoeétrica en corriente continua*. Ed. Paraninfo, Madrid, 523p. 1972.
- ROIG, H.L.; DANTAS, E.L. *Carta geológica: folha São José do Campestre - SB.25-Y-A-I*. 2013. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/17669>
- RODRIGUES, R. S., SILVA, C.D.A., LISBOA, L.H.D. Locações de poços em ambiente cristalino: da análise estrutural aos dados de eletroresistividade. Estudo de caso nos municípios de São Gonçalo do Amarante e Aratuba, Ceará. *Águas Subterrâneas*, 2017. <https://doi.org/10.14295/ras.v0i0.28788>
- SCHIAVONE, D.;QUARTO, R. Self-potential prospecting in the study of water movements. *Geoprospection*, v. 22, n. 1, 1984, p. 47-58. [https://doi.org/10.1016/0016-7142\(84\)90005-X](https://doi.org/10.1016/0016-7142(84)90005-X).
- SILVA, I.D.R. DA. *Uso de eletrorresistivímetro multicanal na prospecção de água subterrânea em rochas cristalinas*. Relatório de Graduação em Geofísica, UFRN, DGEF, 35p, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/34349>
- SILVA, J.A. DA. *Estruturas de acumulação de água subterrânea em rochas cristalina: estudo geofísico e geológico de casos no Estado do Rio Grande do Norte*. 100p. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica e Geofísica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2000. <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/18806>. Acesso em: 13 jul. 2023.
- SIQUEIRA, L. *Contribuição da geologia à pesquisa de água subterrânea no cristalino*. Recife: Grupo de Trabalhos em Águas Subterrâneas - GTAS, Departamento de Recursos Naturais, DEN, SUDENE, relatório interno, 51p, 1963.
- SIQUEIRA, L. Contribuição da geologia à pesquisa de água subterrânea no cristalino. *Água Subterrânea*, Recife, v. 2, n. 9, p. 1-29. jan/mar. 1967.