



**Determinação das Condições de Circulação em Aquíferos Fraturados com
Auxílio de Eletrorresistividade e Perfilagem Ótica: Estudo de Caso em Petrolina, PE**
Estimative of Groundwater Circulation in Fractured Aquifers with
Resistivity and Optical Borehole Logging: Case Study in Petrolina, PE

Aline Isabel de Pádua & José Eloi Guimarães Campos

*Universidade de Brasília, Campus Darcy Ribeiro, Instituto de Geociências,
Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica, 70910-900, Brasília, DF, Brasil*
E-mails: aline.geofisica@gmail.com; eloi@unb.br
Recebido em: 01/08/2019 Aprovado em: 21/11/2019
DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2020_1_138_150

Resumo

Um modelo conceitual de fluxo em aquífero fraturado foi proposto com base em resultados de investigações geofísicas (com auxílio de tomografia elétrica) e perfilagem ótica de alta resolução, além de estudos do fraturamento em escala local e regional. Os resultados mostram que fraturas verticais são importantes para a recarga e fluxo descendente, enquanto as fraturas sub-horizontais são fundamentais para a conexão das diferentes famílias de anisotropias de maior ângulo de mergulho, e ainda são importantes meios de transmissão para produção de água pelos poços tubulares. A perfilagem ótica mostra que uma única fratura de baixo ângulo de mergulho, a 75,5 metros de profundidade, corresponde a uma entrada d'água responsável por vazão de 4 m³/h em poço tubular profundo. A análise detalhada nos poços instalados nos sítios de desenvolvimento da pesquisa mostra que a recarga do aquífero local é mais eficiente em áreas em que os solos são pouco profundos ou ausentes, pois a condição semiárida do clima não gera superávit hídrico para que os solos alcancem a condição ideal para que as plumas de umidade migrem em direção à zona saturada das fraturas. Os resultados alcançados neste estudo desenvolvido na região de Petrolina, PE podem ser aplicados a outras áreas em que aquíferos fraturados ocorrem no semiárido da região Nordeste do Brasil.

Palavras-chave: aquífero fraturado; clima semiárido; fluxo subterrâneo

Abstract

A conceptual flow model in fractured aquifer has been proposed based on results of geophysical investigations (with the aid of electrical tomography) and high-resolution optical profiling, as well as studies of the local and regional scale fracturing. The results show that vertical fractures are important to recharge and descending flow, while the sub-horizontal fractures are important to connection of different families of high dip angle anisotropies, and are still important to water transmission to the production deep wells. The optical profiling shows that a single low dip angle fracture, 75.5 meters deep, corresponds to a water entry responsible for a yield of 4 m³/h in a deep well. The detailed analysis in the wells installed on the research sites shows that the local aquifer recharge is more efficient in areas where soils are shallow or absent, once the semiarid climate condition does not generate excess water to the soil to reach the ideal condition for moisture plumes to migrate toward the saturated zone of fractures. The results reached from this study performed in the Petrolina region, Pernambuco State, can be applied to other areas where fractured aquifers occur in the semiarid Brazilian Northeast region.

Keywords: fractured aquifers; semiarid region; groundwater flow

1 Introdução

Aquíferos fraturados estão entre os reservatórios subterrâneos menos conhecidos, tanto com relação ao fluxo da água, quanto com relação às condições de recarga e por isso, sua caracterização resulta em grandes incertezas e ambiguidades (Singhal, 2008). Nestes sistemas as fraturas mais propícias para armazenamento e transmissão de água estão relacionadas à evolução tectônica regional e a condições crustais da deformação. O acúmulo e fluxo de água explotável é resultado de processos geológicos recentes e mais rasos (dezenas ou centenas de metros), sendo que os processos neotectônicos imprimem forte controle sobre estes reservatórios (Jardim de Sá, 2000; Xavier, 2010).

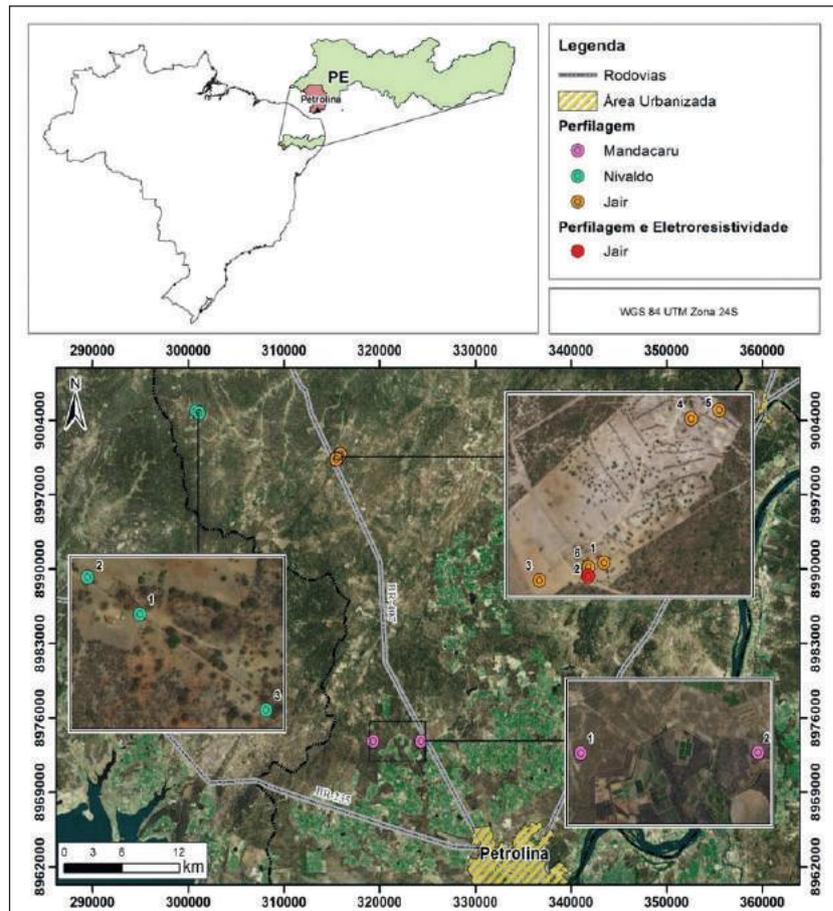
Os aquíferos fraturados são descontínuos, heterogêneos e fortemente anisotrópicos, e por consequência não apresentam parâmetros hidrodinâmicos constantes. A porosidade é função das fraturas, que não possuem distribuição homogênea em todo o maciço rochoso. A condutividade hidráulica depende

da densidade, abertura, tamanho e interconectividade do fraturamento (Costa & Silva, 2000; Barrocu, 2003 e Chambel *et al.*, 2003).

A região semiárida inserida no Nordeste do Brasil merece grande atenção em relação ao abastecimento de água para suprir as necessidades da população, pois é caracterizada por baixo índice de pluviosidade, evaporação elevada e alta susceptibilidade aos efeitos dos ciclos recorrentes de secas prolongadas. O substrato geológico é constituído por rochas proterozoicas (gnaisse, granitos e metassedimentos de baixo grau metamórfico), no qual a água subterrânea ocorre em sistemas de fraturas e discontinuidades (Feitosa & Diniz, 2011).

A área onde foram executados os trabalhos de campo foi o município de Petrolina, estado de Pernambuco, escolhido por ser um local representativo das características gerais da região semiárida do nordeste brasileiro. Os sítios de investigação estão localizados em zonas rurais, situadas a aproximadamente 40 km da cidade de Petrolina (Figura 1).

Figura 1 Localização de Petrolina/PE e locais de investigação. Destaque para a área do Sítio Jair onde as diferentes técnicas foram aplicadas.



De acordo com a classificação de Köppen, a região apresenta clima semiárido quente com chuvas de verão. O regime pluviométrico destaca dois períodos distintos: um que se estende de novembro a abril, correspondente à estação chuvosa; e outro, de maio a outubro, correspondente à estação seca. Os maiores registros pluviométricos ocorrem no mês de janeiro, apresentando médias superiores a 87 mm. Por outro lado, os menores são registrados no mês de agosto, com médias inferiores a 2 mm (Figura 2).

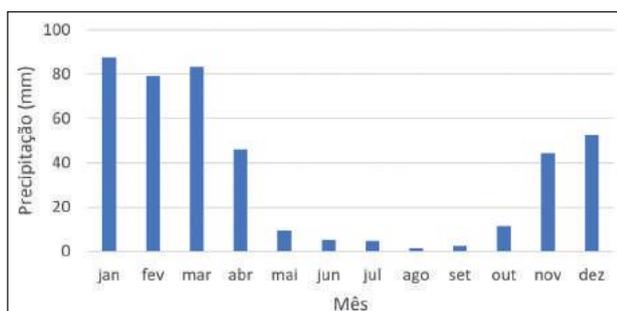


Figura 2 Distribuição da pluviosidade média mensal (1991-2017), na Estação Petrolina, PE (Fonte INMET,2018).

Dentre os tipos de rochas mais comuns estão os gnaisses bandados ricos em biotita, granitos leucocráticos, granulitos félsicos e xistos e, de forma subordinada, mármore bandados, sendo todos cortados por veios de quartzo de segregação metamórfica. Lineamentos longos com padrão geral N45°E, compondo amplas zonas de falhas e cisalhamentos são facilmente reconhecíveis na cartografia geológica. Em menor densidade e com registro menos intenso, ocorrem falhas de direção geral N15°W. Em campo não se observam evidências ou registros de atividade neotectônica remobilizando e reativando as falhas e zonas de cisalhamento. De qualquer forma as zonas aquíferas da região são definidas pela conexão das fraturas de extensão e pares conjugados de cisalhamento o que resulta em um reservatório do tipo fraturado.

Segundo o Projeto Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea (CPRM, 2005), no município de Petrolina, a água subterrânea é explorada, em sua maioria, por meio de poços tubulares para uso doméstico e dessedentação animal. A água é considerada salina em 57% dos poços cadastrados, salobra em 27% e doce em apenas 16% dos poços.

O presente estudo se justifica pelo fato de que os aquíferos fraturados ainda são pouco conhecidos, não apenas no contexto do Brasil, mas de outras regiões em que a água subterrânea é armazenada em rochas desprovidas de porosidade primária (Wright & Burgess, 1992; Jayawardena, 2003 e Lachassagne, 2008).

O principal objetivo desta pesquisa é a elaboração do modelo conceitual de fluxo subterrâneo para ampliar o conhecimento de como ocorrem as transferências de água da superfície até o meio saturado e entre as diferentes famílias de fraturas presentes no maciço rochoso. Este modelo deve, em última análise, auxiliar na gestão dos recursos hídricos subterrâneos dos aquíferos cristalinos do semiárido brasileiro.

2 Materiais e Métodos

Para a realização desta pesquisa foram utilizados dados estruturais, perfis de eletrorresistividade e perfilador ótico de alta resolução para ampliar-se o entendimento da circulação da água nos aquíferos.

Como infraestrutura para o desenvolvimento dos experimentos utilizou-se um poço tubular e um sistema de recarga artificial representado por uma trincheira de infiltração (Figura 3) preenchida por cascalhos e blocos de quartzo de veio (Silva, 2016). A trincheira de recarga tem dimensões de 3 m de comprimento, por 1,5 m de largura e 1,8 m de profundidade.

O local foi escolhido pela facilidade para a captação de água a partir de telhados e pela existência de outros poços tubulares nas adjacências. Esse sistema permitiu a análise do comportamento da água em subsuperfície e auxiliou na proposição do modelo conceitual de fluxo subterrâneo. Poços localizados em outros sítios também foram estudados para se verificar a repetição dos padrões em profundidade em diferentes áreas.

Para o desenvolvimento da pesquisa foram utilizados o método geofísico de eletrorresistividade e o perfilador ótico de alta resolução integrado a informações sobre construção de poços e dados estruturais, pedológicos e geomorfológicos.

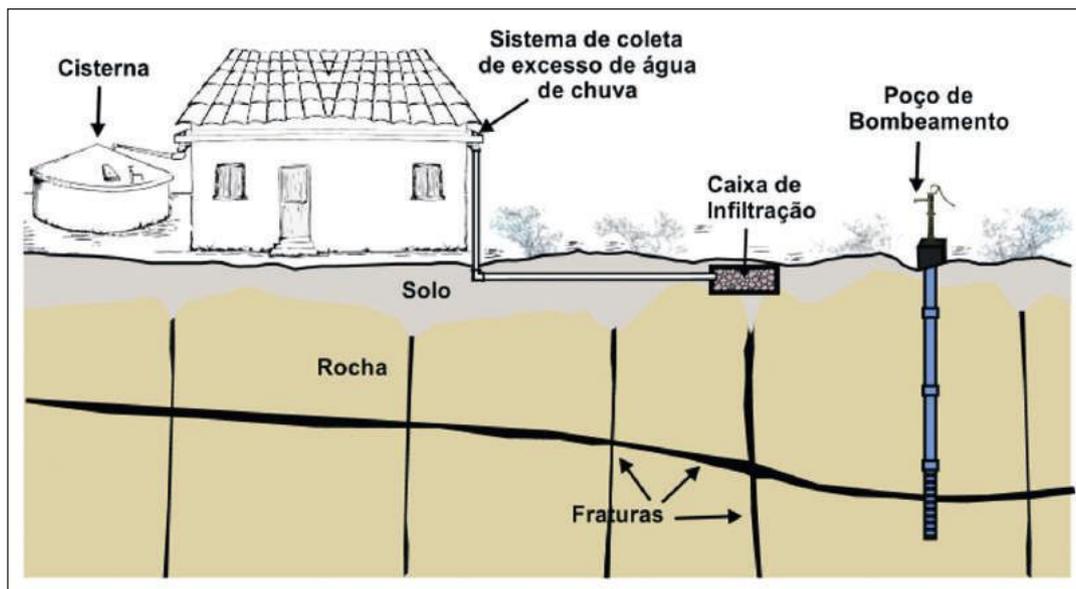


Figura 3 Ilustração esquemática do sistema piloto de recarga artificial instalado em um dos sítios de desenvolvimento da pesquisa.

Nesta pesquisa foi utilizada a técnica de caminhamento elétrico com o arranjo dipolo-dipolo. Foram realizadas 4 linhas de levantamento com o equipamento *Super Sting R8 IP* de 56 canais. Ao longo de quatro dias consecutivos injetou-se 42 mil litros de água (com auxílio de caminhões-pipa) e as leituras geofísicas foram realizadas antes e após o processo de infiltração. A tomada dos dados de resistividade foi realizada em diferentes tempos após o início de injeção da água na trincheira de recarga. Os eletrodos foram distribuídos a 2 m de distância permitindo uma profundidade de investigação de até 25 m. As seções em que os dados geofísicos foram adquiridos foram distribuídas ao longo de 4 linhas a 45° entre si, em cujo centro está localizada a trincheira de injeção da água (Figura 4). A água injetada é oriunda de canal de irrigação com captação direta no curso do rio São Francisco (portanto, se tratando de água doce, de elevada resistividade elétrica, quando comparada à água presente no aquífero local).

A perfilagem de poços foi proposta em função da dificuldade de se reconstituir um conjunto de rochas a partir da amostragem fragmentada de calha (CPRM, 2008). Esta técnica fornece informações sobre inclinação, direção e a caracterização de estruturas geológicas para poços não revestidos (Guerra, 2010; Williams & Johnson, 2004 e Robertson Geology, 2016). A perfilagem foi realizada em 11

poços com o equipamento da marca Robertson® e para o tratamento das imagens foram utilizados os *softwares*, o RG Winlogger e o OPTV Logger.

3 Resultados e Discussão

Os resultados do estudo de eletrorresistividade foram processados no *software* Res2dinv. Para elaboração dos perfis foi realizada a filtragem dos dados espúrios, a inversão de mínimos quadrados e a inserção da topografia. A Figura 5 apresenta os resultados antes e depois do processo de infiltração de seções representativas. É possível analisar as alterações de resistividade nos 5 m iniciais, principalmente onde a camada superficial de alta resistividade é menos espessa. Para verificação de outras seções geofísicas com resultados e comparações do padrão da resistividade antes e depois da injeção da água, a diferentes tempos e volumes de água inserida, verificar o trabalho de Pádua (2019).

A avaliação visual das seções mostra que em alguns momentos ocorreu variação significativa do padrão geofísico. Tais variações são explicadas pelos seguintes argumentos: o aumento da área resistiva é interpretado pela chegada da água de infiltração que apresenta baixa condutividade elétrica (de 156,7 $\mu\text{S}/\text{cm}$) com relação à água do aquífero local que é de 4440 $\mu\text{S}/\text{cm}$; a diminuição das áreas resistivas é atribuída à mistura da água de infiltração com sais

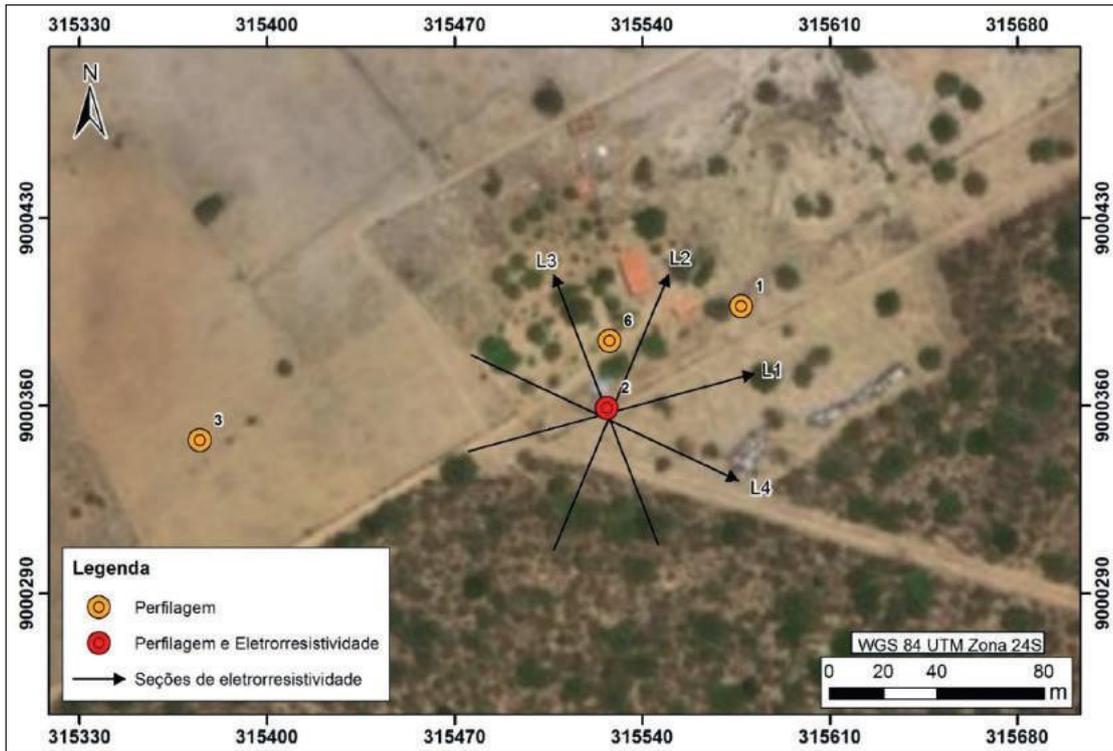


Figura 4
 Arranjo da principal área de investigação, com distribuição das seções de levantamento geoeletrico e localização dos poços submetidos a perfilagem optica. A trincheira de recarga na qual a água foi injetada está localizada no cruzamento das seções próximo ao poço tubular 2.

dissolvidos presentes na zona de saprolito e rocha alterada e a mudança da zona de transição é explicada pela interação da água infiltrada através da caixa de infiltração em zonas de pequenas fraturas.

As linhas de levantamento também foram plotadas no *software Oasis Montaj*, onde foi usado o método de interpolação da krigagem, com o tamanho

da célula de 0,5 m. O modelo pseudo-3D (Figuras 6 e 7) foi gerado a partir do *grid* de cada nível, o voxel permite a visualização da continuação dos horizontes de acordo com os valores de eletrorresistividade.

A partir das seções geradas foi proposto um modelo de camadas baseado na resposta da eletrorresistividade, conforme Lima (2010). A Tabela 1 e

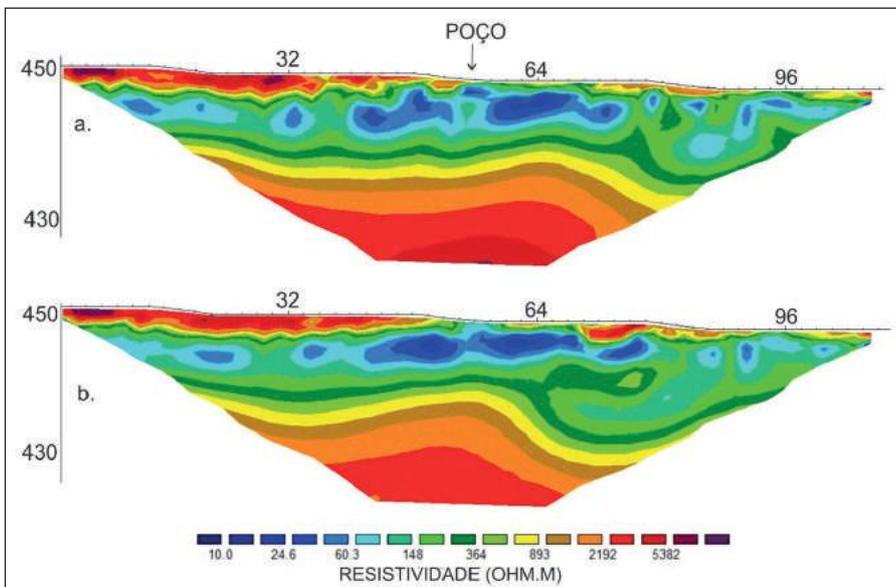


Figura 5 Pseudoseção de resistividade aparente dos dados da Linha 2 a) antes da injeção de água b) após a injeção de água.

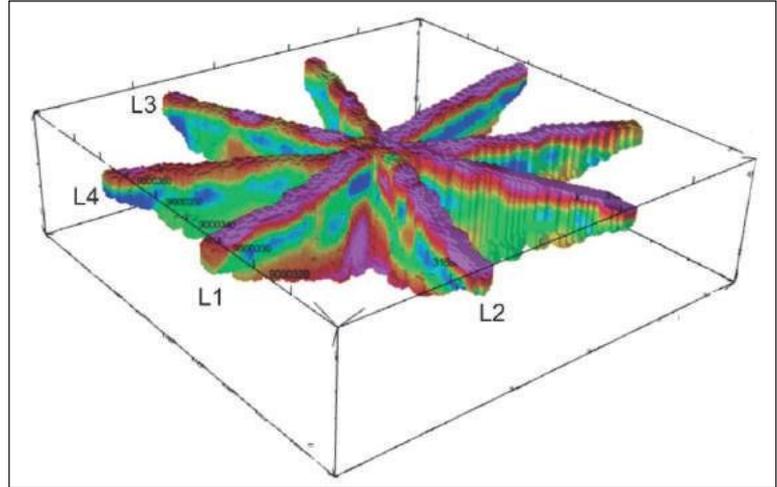


Figura 6 Modelo pseudo-3D gerado antes da injeção de água.

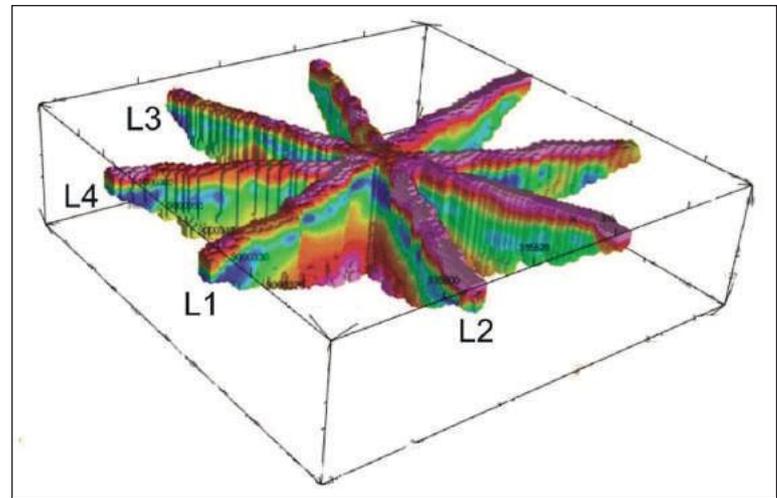


Figura 7 Modelo pseudo-3D gerado após a injeção de 42 mil litros de água em 3187 min.

Figura 8 ilustram a distribuição das cinco camadas interpretadas:

a) Solo arenoso seco - possui resistividade elétrica alta, acima de 200 ohm.m. A espessura média foi de 1,8 m e foi correlacionada como cobertura de solo arenoso;

b) Solo arenoargiloso úmido - é a camada com menor espessura observada, aproximadamente 1 m, com valores de resistividade intermediários;

c) Rocha alterada ou saprolito úmido - este horizonte geoeletrico apresenta espessura aproximada de 5 m e expressivo decaimento dos valores de resistividade das seções;

d) Rocha alterada seca ou com menor umidade que a camada anterior - ocorre a partir dos 8 m de profundidade e os valores de resistividade voltam a se elevar (890 - 2192 ohm.m);

e) Rocha sã com variações na quantidade de bandas ricas em minerais máficos e quartzo-feldspáticos - relaciona-se à rocha sã, a partir de 10 m de profundidade e valores de resistividade acima de 2912 ohm.m.

Modelo Geológico	Descrição Geológica	Espessura Média (m)	Resistividade (ohm.m)
	Solo arenoso seco	2,3	2192 - 5380
	Solo arenoargiloso úmido	1,0	148 - 360
	Saprolito úmido	5,0	10 - 60
	Saprolito seco	3,0	893 - 2192
	Rocha sã	< 10	< 2192

Tabela 1 Modelo geofísico-geológico com base nas respostas geoeletricas.

Determinação das Condições de Circulação em Aquíferos Fraturados com Auxílio de Eletrorresistividade e Perfilagem Ótica: Estudo de Caso em Petrolina, PE
 Aline Isabel de Pádua & José Eloi Guimarães Campos

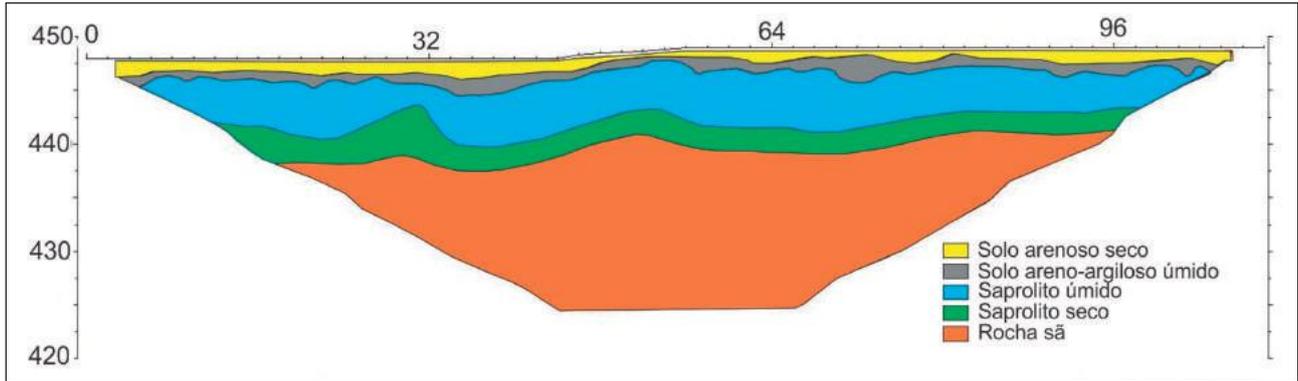


Figura 8 Modelo geológico para a área de estudo obtido a partir dos dados invertidos da pseudoseção geoeletrica da Linha 1.

A análise estrutural consistiu em comparar os dados medidos em campo e as medidas traçadas nos lineamentos estruturais nas imagens de satélite (Figura 9). As rosetas de fra-

turas, elaboradas no *software Open Stereo*, são ambas coerentes com a determinação da direção principal N40-60E, como a família predominante (Figura 10).

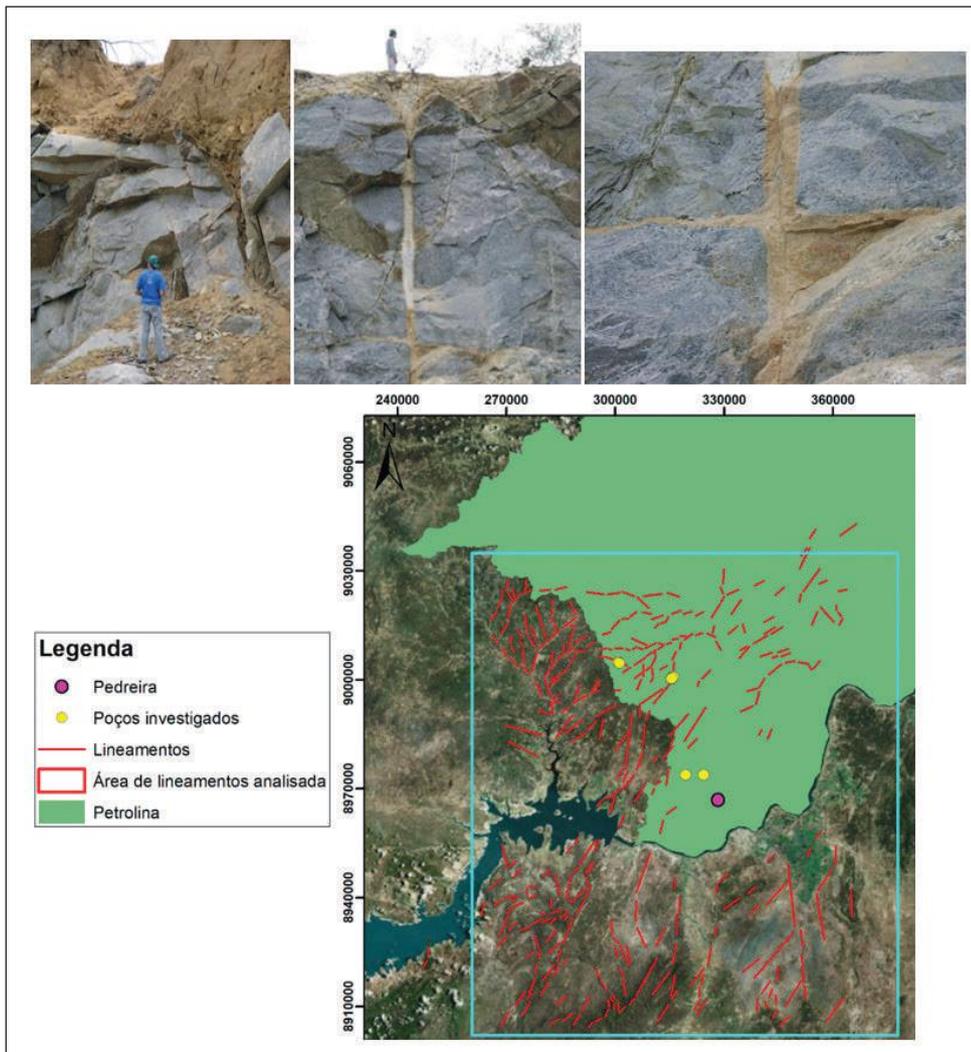


Figura 9 Exposição de rochas fraturadas (em pedreira) e lineamentos estruturais traçados sobre imagem de satélite.

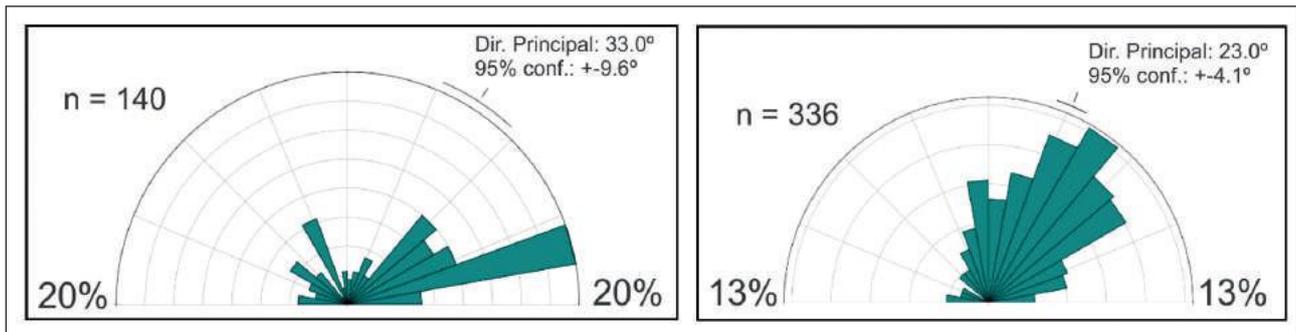


Figura 10 Roseta de fraturas de estruturas verticais medidas de campo (N = 140) e roseta dos lineamentos e estruturais obtidos sobre imagem de satélite (N = 336).

O perfilador ótico permite identificar estruturas como fraturas secas ou preenchidas, foliações e a litologia do poço. As imagens podem ser coletadas em poços secos ou com água limpa, uma vez que algumas condições dificultam a visualização dos dados como, por exemplo, lama de perfuração, precipitação química e crescimento bacteriano (Willians & Johnson, 1994).

Os resultados da perfilagem ótica possibilitaram a observação da litologia, com predomínio de bandamento gnáissico com minerais quartzo-felds-

páticos e bandas ricas em minerais máficos. Por meio das filmagens pode-se evidenciar a importância das fraturas horizontais/sub-horizontais na circulação do fluxo subterrâneo. Foi possível observar a continuidade lateral destas fraturas, que alimentam poços à mesma profundidade com distâncias de cerca de 100 m entre si. A Figura 11 traz, a título de ilustração, imagens selecionadas para destaque de feições específicas.

No Sítio Jair foram investigados seis poços, dentre os quais cinco produtores e um seco (Poço Jair 3). Neste poço é possível observar bandamento

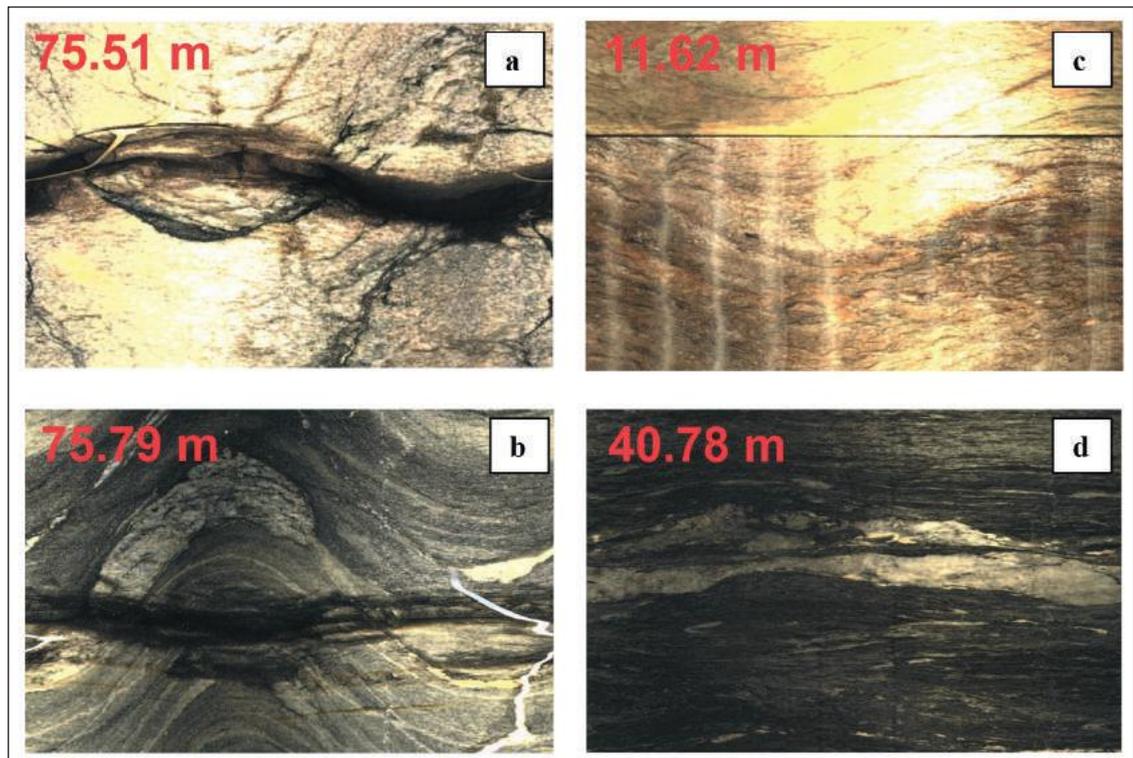


Figura 11 Exemplos de imagens obtidas a partir da perfilagem ótica. Detalhes de fratura sub-horizonta aberta (a), bandamento gnáissico (b), nível d'água (c) e veio de segregação de quartzo (d).

gnáissico com amplo predomínio de minerais quartzo-feldspáticos e fraturas sub-horizontais com maiores aberturas, que podem ser observadas nas zonas saturadas e não saturadas do aquífero. No Poço Jair 1 o revestimento atinge 3,70 metros, a rocha se apresenta fresca após 20 m. O nível freático é evidenciado em 56 metros.

No Poço Jair 2 (Figura 11a) ocorre uma fratura horizontal com 0,5 cm de abertura truncando o bandamento gnáissico que é ondulado a 75,51 metros. Esta é a única entrada d'água neste poço, responsável pela vazão de 4,1 m³/h e nível d'água em 16 metros. A partir dos 48 metros de profundidade a rocha apresenta predominância de minerais máficos. O Poço Jair 3 é o único seco neste sítio de estudo, tendo sido perfurado até uma profundidade de 77 metros, apresenta cor mais clara, rochas secas e uma fratura em alto ângulo fechada a 56,13 metros. O nível d'água do Poço Jair 4 é observado a 11,62 metros (Figura 11b). Observam-se micro fraturas subverticais e o cruzamento de uma fratura em alto ângulo com outra horizontal a 22,42 metros. No Poço Jair 5 o nível freático é evidenciado a 14,5 metros e observa-se uma fratura na mesma profundidade que é observada no Poço Jair 4, em 22,40 metros. Esse poço foi perfurado até os 60 metros. O Poço Jair 6 apresenta uma fratura horizontal a 75,79 (Figura 11c) a qual pode ser correlacionada com a fratura observada no Poço Jair 2. Esta correlação é direta em função do relevo local plano e da curta distância entre estes poços (cerca de 70 metros).

No sítio Mandacaru foram investigados dois poços. No Poço Mandacaru 1 não foi possível obter boas imagens, provavelmente pelo fato do poço ter sido perfurado no mesmo dia da sondagem e os particulados em suspensão bloquearem a luz e dificultarem a tomada de imagens. O poço foi perfurado até os 47 metros e se encontra seco após a finalização da perfuração. No Poço Mandacaru 2, com 60 metros de profundidade, foi observado o mesmo padrão, com bandamento gnáissico e predomínio de minerais máficos. Neste poço são observadas as seguintes feições: fratura horizontal seca a 8,42 metros; nível freático a 11,70 metros e fratura horizontal de alívio com deslocamento do bandamento gnáissico a 51,71 metros.

No sítio Nivaldo foram investigados três poços, todos secos. Os poços foram escavados até uma profundidade de 66 metros. O padrão de imagens observado varia com relação aos outros dois locais investigados. Nas imagens são observadas rochas com bandamento gnáissico e predomínio de minerais máficos, são observadas fraturas horizontais e verticais preenchidas com material mineral (Figura 11d) ou secas. É possível observar o processo de oxidação intempérica no Poço Nivaldo 2. No Poço Nivaldo 3 ocorrem fraturas com ~45° de mergulho a 19,97 e 60,86 metros.

Considerando as informações obtidas com a aplicação dos métodos e técnicas expostas foi possível elaborar o modelo conceitual de fluxo (Figura 12). O modelo proposto segue os critérios propostos por Silva (2008), Silva (2015) e Walczuk (2019) para sistema aquífero similar.

As fraturas verticais a subverticais que ocorrem sob solos mais espessos (latossolos, planossolos e luvisolos) apresentam condições de infiltração menos favoráveis, pois parte das águas de precipitação deverá ficar retida, principalmente para aumentar a umidade destas coberturas e na forma de evapotranspiração pela demanda hídrica da vegetação. Assim, é considerado que o manto de intemperismo mais espesso funciona como uma barreira à recarga local, de forma que o fluxo vertical pode ser dividido em principal (em estruturas aflorantes ou subaflorantes) e secundário (em estruturas que ocorrem sob solos mais espessos). A condição dos solos mais espessos como barreiras ao fluxo fica evidenciada em função do regime de chuvas da região que são, na média, restritas (de 400 a 500 mm/ano) e ainda muito concentradas em alguns meses do ano (entre dezembro e março).

As fraturas horizontais a sub-horizontais, por outro lado, não são importantes para a recarga dos sistemas, mas sim pela interconexão de estruturas verticais e pelo espalhamento das águas de infiltração por fluxo lateral, que dependem do ângulo de mergulho destas estruturas (mesmo que de baixo caimento). A importância das fraturas de baixo ângulo é corroborada pelo estudo de poços próximos entre si que mostram uma única entrada d'água que

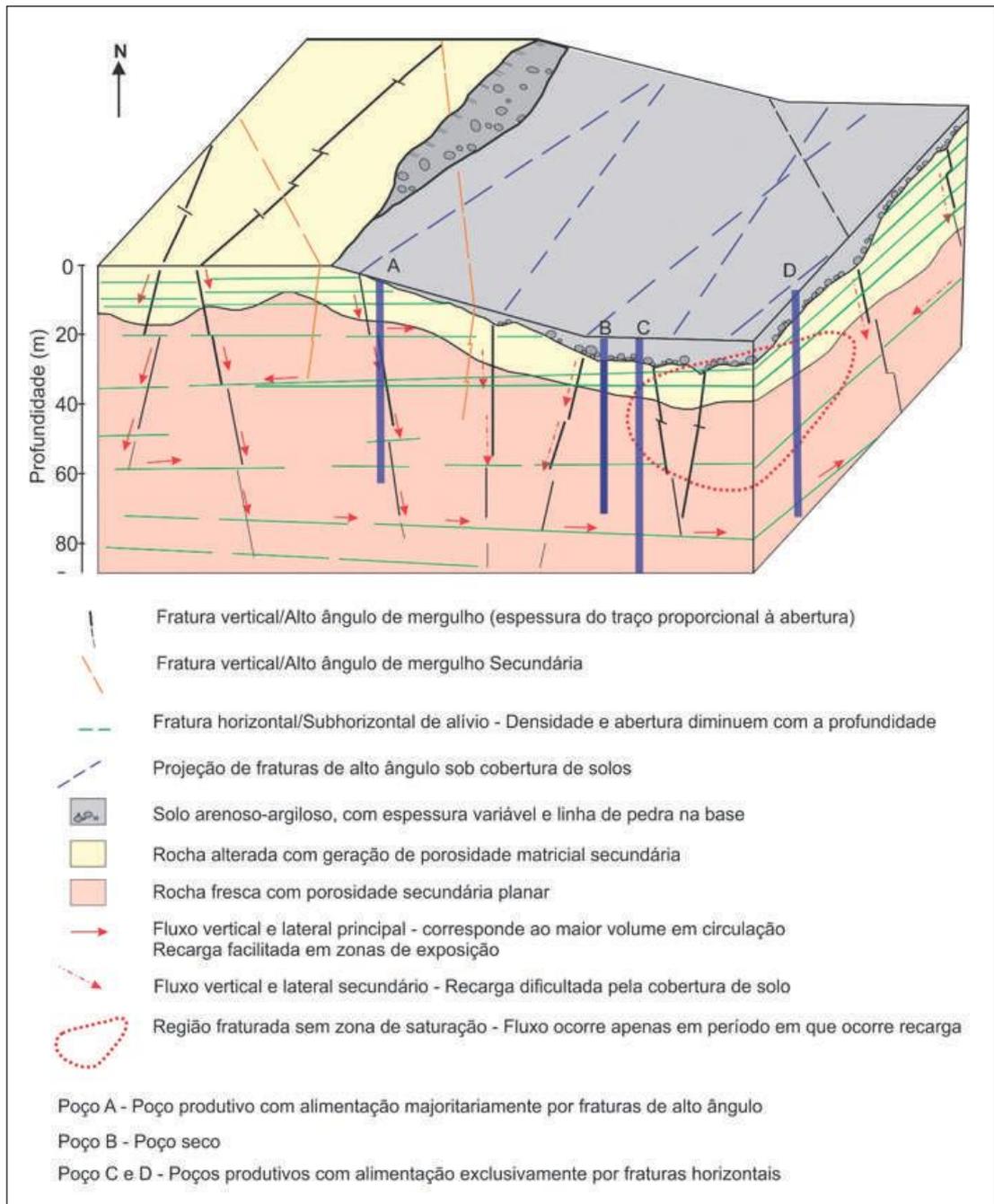


Figura 12
Bloco diagrama
ilustrando de
forma esquemá-
tica o modelo de
fluxo na região
estudada.

é representada por uma fratura horizontal aberta a cerca de 75 metros de profundidade (Sítio Jair).

A presença de horizontes saprolíticos espessos também é considerada uma barreira ao fluxo, uma vez que nestas condições as rochas se tornam plásticas (pela transformação de feldspatos e micas em argilominerais) facilitando o fechamento das estruturas que em rocha sã permanecem abertas. A

presença de partículas infiltradas a partir dos solos superficiais também funciona como barreira à infiltração das águas que alcançam a base do horizonte saprolítico. Estes horizontes saprolíticos ainda apresentam um aspecto negativo com relação à produção de íons responsáveis por aumentar a salinização das águas subterrâneas, uma vez que se comportam como uma fonte de grande disponibilidade de cá-

tions e ânions (principalmente a partir da hidrólise parcial de feldspato potássico e plagioclásio).

Foram simuladas quatro situações de poços observados no sítio Jair (Figura 12). Para o Poço A infere-se que a recarga ocorra por meio de discontinuidades verticais com alto ângulo de mergulho expostas à superfície, isto é, sem cobertura de solos, em que parte da precipitação se infiltra diretamente pelas fraturas abertas (que interceptam a superfície). O Poço B representa um exemplo das investigações realizadas em poços secos, onde as fraturas de pequena abertura são preenchidas com materiais argilosos que impede a circulação da água que infiltra ocorrendo uma zona de isolamento do fluxo.

As fraturas que ocorrem a, aproximadamente, 75 m de profundidade observadas em dois poços e possivelmente conectadas pela proximidade dos locais foram ilustradas no modelo representado pelos Poços C e D, que são poços produtivos alimentados exclusivamente por fraturas horizontais. A determinação da profundidade de alimentação destes poços foi realizada durante o acompanhamento da obra, em que foi possível verificar que o poço estava seco até 75 m de profundidade e que aos 75,5 m foi interceptada uma fratura responsável pela vazão total daquele poço (4,1 m³/h). Posteriormente, durante a perfilagem do poço, foi possível caracterizar a fratura produtora como horizontal e aberta.

Apesar de o Poço C apresentar apenas uma fratura produtiva (a 75,5 m), seu nível estático estabilizou a 14,56 m, indicando seu caráter artesiano. As fraturas de alto ângulo observadas acima são totalmente secas ou não produtivas, indicando que não apresentam conexão com nenhuma zona de recarga. Por outro lado, a fratura produtiva sub-horizontal deve ter conexão com sistemas que conduzem água a partir da infiltração das águas de chuvas, em áreas de exposição de maciços rochosos ou em fraturas sob coberturas de solos.

4 Conclusões

A análise do sistema de circulação nos aquíferos fraturados de Petrolina permite a expansão dos resultados para outras regiões do semiárido do nor-

deste do Brasil com as mesmas características de meio físico. As informações coletadas forneceram subsídios para a elaboração de um modelo de fluxo subterrâneo.

O estudo em aquíferos fraturados é complexo pelo fato da circulação da água depender de diversos fatores, incluindo: abertura, tamanho, densidade, rugosidade das fraturas, propriedade do material que preenche as fissuras, interconexão dos planos, entre outros. A circulação limitada condiciona maior salinização da água presente, muitas vezes tornando-a imprópria para a utilização e consumo sem o tratamento adequado para a diminuição da quantidade de sais dissolvidos.

A base de informações necessárias para a geração do modelo de fluxo foi adquirida a partir de três metodologias: eletrorresistividade, perfilagem ótica e análise de dados estruturais da região. A eletrorresistividade resultou na interpretação de cinco horizontes geoeletricos e forneceu resposta do meio com o processo de infiltração de água, uma vez que as seções mudam seu padrão depois da infiltração da água.

Os dados estruturais permitem determinar a direção principal das fraturas verticais e subverticais como família predominante N40-60E. Como esperado a partir dos padrões fractais há repetição da atitude das estruturas determinadas pela análise de lineamentos sobre imagens de satélite com aquelas medidas em campo e observadas pela perfilagem (Manoel Filho, 1996).

A perfilagem ótica forneceu informações sobre horizontes de rochas alteradas, diferentes feições em rocha são em profundidade e ainda possibilitou correlacionar as fraturas que efetivamente alimentam poços próximos.

A integração dos dados obtidos possibilitou a elaboração de um modelo conceitual de fluxo subterrâneo, correlacionando os resultados obtidos. Foram representadas fraturas verticais de alto ângulo principais e secundárias, e sua relevância no fluxo no sentido de transmitir a água infiltrada das chuvas para maiores profundidades no maciço rochoso. As fraturas horizontais e sub-horizontais são responsá-

veis pelo espalhamento da água e infiltração por fluxo lateral, além da conexão das anisotropias de alto ângulo. No modelo se buscou representar exemplos de poços a partir da comparação com casos reais.

As observações de campo, tanto durante os ensaios de eletroresistividade ao longo do tempo, quanto nas exposições de rochas em pedreiras e afloramentos permitiram concluir que as condições de recarga são mais favoráveis em áreas de exposições de rochas ou onde os solos são mais rasos que nos locais em que os solos são mais espessos (da ordem de 2 m de espessura). Esta constatação se deve ao fato de que na condição semiárida as chuvas serem escassas e mal distribuídas no tempo. Assim, quando as condições ideais de umidade de solos são alcançadas, para que ocorra a infiltração das plumas de umidade e consequente recarga há um novo ciclo de recessão das chuvas e o processo de recarga não é completado. Por outro lado, nas áreas de exposição das fraturas qualquer elevação de precipitação pode infiltrar e, pelo menos em parte, alcançar a zona saturada das fraturas.

Os dados gerados, interpretados e apresentados contribuem para a ampliação do conhecimento sobre o fluxo subterrâneo em regiões semiáridas onde a água subterrânea ocorre em aquíferos fraturados. A título de exemplo, pode-se considerar que o senso comum de que os poços na região semiárida do nordeste do Brasil devem ser rasos (na ampla maioria dos casos com menos de 50 m de profundidade) pode não ser correto. Em um dos sítios estudados existe um poço seco com 68 m de profundidade que de acordo com dados obtidos deverá ser produtivo se aprofundado até pelo menos 78 m, pois ocorre próximo a dois outros poços cujas entradas d'água situam-se entre 75 e 76 m de profundidade.

A observação e descrição dos fenômenos hidrogeológicos durante a perfuração de poços tubulares nos sítios de pesquisa também é considerada uma ferramenta importante para se ampliar o conhecimento do fluxo subterrâneo. A descrição do poço Jair 6 é utilizada para exemplificar esta afirmação:

- a perfuração ocorreu sem nenhuma entrada de águas até 75,5 metros (o poço permanecia seco mesmo depois de interceptar fraturas abertas sem fluxo);

- a 75,79 metros a perfuração alcança uma fratura horizontal aberta responsável pela vazão de 4,1 m³/hora e

- o poço apresenta nível estático a 14,8 metros após estabilização, confirmando a condição de confinamento do aquífero, pelo próprio maciço de rocha sã sobreposta à fratura produtora.

5 Referências

- Barrocu G. 2003. Hydrogeology of granite rocks in Sardinia. *In: Krasny J. et al. (Eds), Proceedings of International Conference on Groundwater in Fractured Rocks, Praga, 2003. IHP-VI Series on Groundwater, p. 27-29.*
- Chambel, A.; Krásny, J. Sastre Merlin, A. & Duque, J. 2003. Comparing transmissivity classes of hard-rock aquifers in the Iberian Peninsula and the Bohemian Massif. *In: Krasny J. et al. (Eds), Proceedings of International Conference on Groundwater in Fractured Rocks, Praga, 2003. IHP-VI Series on Groundwater, p. 39-40.*
- Costa, W.D. & Silva, A.B. 2000. Hidrogeologia dos Meios Anisotrópicos. *In: Hidrogeologia: conceitos e aplicações. Fortaleza. 2a Ed. CPRM, LABHID-UFPE. p. 133-174.*
- CPRM - Serviço Geológico do Brasil. 2005. Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea - Diagnóstico do Município de Petrolina, Relatório Final. 47p.
- CPRM - Serviço Geológico do Brasil. 2008. Hidrogeologia - Conceitos e Aplicações 3ª Edição - Revisada e Ampliada. 835p.
- Feitosa, F.A.C. & Diniz, J.A.O. 2011. Água subterrânea no cristalino da região semiárida brasileira. *In: II Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo, São Paulo, 2011. 4p.*
- Guerra, K.J. 2010. *Aplicação de método geofísico em estudo hidrogeológico, no município de Nova Lima - MG, caracterização de aquíferos em área urbana.* Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Dissertação de Mestrado, 143p.
- INMET, 2018. Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br>>. Acesso em: 05 mai. 2018.
- Jardim de Sá, E.F. 2000. O condicionamento de água subterrânea no cristalino fraturado: reavaliação da Abordagem Estrutural. *In: I Congresso Mundial Integrado de Águas Subterrâneas, Fortaleza, 2000. CD Rom, Abas192.*
- Jayawardena, S. 2003. The Availability of groundwater in crystalline rocks of Kandy area, Sri Lanka. *In: Krasny J. (Eds.). Proceedings of International Conference on Groundwater in Fractured Rocks, Praga, 2003. IHP-VI Series on Groundwater, p. 69-70.*
- Lima, O.A.L. 2010. Estruturas geoeletrica e hidroquímica do sistema aquífero cristalino da Bacia do Alto Rio Curacá, semiárido da Bahia. *Revista Brasileira de Geofísica, 28(3):445-461.*
- Lachassagne, P. 2008. Overview of the hydrogeology of Hard Rock Aquifers: Applications for their Survey, Management, Modeling and Protection. *In: Ahmed, S.; Jayaku-*

**Determinação das Condições de Circulação em Aquíferos Fraturados com
Auxílio de Eletroresistividade e Perfilagem Ótica: Estudo de Caso em Petrolina, PE**

Aline Isabel de Pádua & José Eloi Guimarães Campos

- mar, R. & Salih, A. Groundwater dynamics in hard rock aquifers. p. 40-63.
- Mailu, G.M. 1992. The Influence of precambrian metamorphic rocks on groundwater in the Chyulu Area, Kenya. *Applied Hydrogeology*, 2: 26-32.
- Manoel Filho, J. 1996. *Modelo de dimensão fractal para avaliação de parâmetros hidráulicos em meio fissural*. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Tese de Doutorado, 197p.
- Pádua, A.I. 2018. *Determinação das condições de circulação em aquíferos fraturados com auxílio de eletroresistividade e perfilagem ótica: estudo de caso em Petrolina, PE*. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Dissertação de Mestrado, 74p.
- Robertson Geologging. 2016. Hi-resolution optical televiewer. Disponível em: <<http://www.geologging.com/slimhole-logging/optical-televiewer-rgdip/>> Acesso em: 02 de jul. 2016.
- Silva, L.F. 2008. *Geologia estrutural e geoquímica aplicados ao estudo do aquífero localizado na área do Complexo Minerio-industrial (URA/INB) de Caetitê, Bahia*. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Monografia de Graduação, 70p.
- Silva, L.F. 2015. *Modelo conceitual do aquífero fraturado da área da Jazida de Urânio de Caetitê, Bahia: Implicações para o fluxo subterrâneo*. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Dissertação de Mestrado, 130p.
- Silva, P.S. 2016. *Avaliação de viabilidade de aplicação de técnicas de recarga artificial em aquíferos fraturados*, Petrolina, PE. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Dissertação de Mestrado, 113p.
- Singhal, B.B.S. 2008. Nature of Hard Rock Aquifers: Hydrogeological Uncertainties and Ambiguities. In: Ahmed, S.; Jayakumar, R. & Salih, A. Groundwater dynamics in hard rock aquifers. p. 20-39.
- Walczuk, A.G. 2019. *Impactos da variabilidade temporal do regime pluviométrico na recarga de aquíferos: estudo de caso em Caetitê - BA*. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Dissertação de Mestrado, 108 p.
- Williams, J.H. & Johnson, C.D. 2004. Acoustic and optical borehole-wall imaging for fractured-rock aquifer studies. *Journal of Applied Geophysics*, 55(1-2):151-159.
- Wright, E.P. & Burgess W.G. 1992. The Hydrogeology of crystalline basement aquifers in Africa. Geological Society, London, Special Publications, 264p.
- Xavier, T.O. 2010. *Registros de atividade neotectônica no Distrito Federal: implicações para o condicionamento dos recursos hídricos subterrâneos*. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Dissertação de Mestrado, 106p.