



MODELOS GEO-ELÉTRICOS DOS AQÜÍFEROS DE CHAME - BEJUCO, REPÚBLICA DE PANAMÁ

Abel Carrasquilla

Laboratório de Engenharia e Exploração de Petróleo, Universidade Estadual do Norte Fluminense. Prédio da Escola Técnica de Macaé, Rodovia Amaral Peixoto, Km 164, Imboacica. CEP: 27.973-030. Macaé - RJ - Brasil. Fone/Fax: 024-762-6565. email: abel@lenep.uenf.br; <http://www.lenep.uenf.br/~abel/> Anteriormente DFS-IDAAN.

ABSTRACT

Chame - Bejuco region is located 60 km SW of Panama City and has approximately 10 km². The geology of this area presents layers of sand, alluvium, ashes and volcano rocks. This volcano material presents little fractures and cracks, thus, the principal aquifers are constituted by conglomerate and sands. The Groundwater Department of the National Institute of Aqueducts and Sewerages of the Republic of Panama (DFS/IDAAN) drilled 17 wells in this area and performed 59 vertical electrical soundings (VES) in 1986, both with hydrogeological purposes. These data were interpreted using one, bi and three-dimensional models. The used algorithms were 1D forward and inverse with ridge regression approaches; 2D inverse scheme known as smoothness-constrained least-squares with the forward problem using numerical techniques as finite differences and finite elements; and, 3D forward problem with optimized finite differences. Based on these interpretations, the VES were classified in four types of curves, which reveal that the first and third family of curves present highly resistive layers that correspond to conglomerate and sand horizons, respectively. Also, resistivity profiles and contour maps reveal an average thickness of 80 m for the main sand aquifer, located in the depression where the resistive basement form in the N part of the area, and, 150 m for conglomerate aquifer in the W sector. The geo-electrical sections, the numerical modelling and the pumping well tests of the boreholes show us that the N sector is the best to drill boreholes, with the W sector in the second place. For this reason, in this work we chose the N sector to drill more wells, where the well No.18 was drilled and became the best of the area with 150 gpm.

KEYWORDS

Chame, Bejuco, resistivity, inversion, geoelectrical sections, stratigraphic section.

RESUMO

A região Chame-Bejuco, na República de Panamá, possui uma geologia recente com camadas de areia, aluvião e cinzas vulcânicas, sobre um embasamento basáltico. Como o cristalino se apresenta pouco fraturado, os sedimentos sobrepostos possuem as melhores potencialidades aquíferas. Com o objetivo de abastecer de água potável à população, o "Departamento Fuentes Subterráneas" do "Instituto de Acueductos y Alcantarillados Nacionales" (DFS/IDAAN) perforou 17 poços no local, e, em 1986, realizou 59 sondagens elétricas verticais (SEV) para conhecer melhor a hidrogeologia. Essas SEV foram correlacionadas com a informação geológica e interpretadas com modelos unidimensionais (1D), sendo a confiabilidade dos ajustes testada através da estatística do processo de inversão *ridge regression*. Da mesma forma, as SEV foram classificadas em quatro famílias, com a primeira e terceira delas possuindo camadas resistivas de conglomerado e areia, as quais funcionam como os principais aquíferos da região. As interpretações também foram utilizadas na construção de mapas da profundidade do embasamento e da espessura do aquíferos, os quais revelam uma espessura de até de 80 m para a camada de areia localizada numa depressão no setor N, e de até 150 m para o conglomerado, no setor W. Por outro lado, as seções geo-elétricas nas direções N-S e E-W revelam a presença de estruturas bi (2D) e tridimensionais (3D) nos setores W e N, respectivamente. A heterogeneidade 2D foi modelada com o algoritmo inverso *smoothness-constrained least-squares*, que utiliza as técnicas numéricas das diferenças finitas (DF) ou elementos finitos (EF) para o problema direto. A estrutura 3D foi modelada com uma abordagem direta que usa DF otimizadas. Os resultados alcançados neste estudo e os testes hidráulicos, indicam que a camada de areia da estrutura 3D se constitui no principal aquífero, com a de conglomerado no final da estrutura 2D, apresentando interesse secundário. Assim, o setor N se constitui no melhor local para a realização de perfurações, como mostra o último poço aí furado, que foi indicado por este estudo e possui a maior vazão na região.

PALAVRAS CHAVES

Chame, Bejuco, resistividade, inversão, seções geo-elétricas, registro estratigráfico.

INTRODUÇÃO

Uma área de 10 km² foi estudada na região de Chame-Bejuco, localizada num setor da República de Panamá conhecido como "Arco Seco", a 60 km ao SW da Cidade do Panamá (Fig. 1). Este setor se caracteriza por possuir um índice pluviométrico anual muito baixo, que junto a uma crescente população local e turística, provoca frequentes problemas no abastecimento de água potável (ECAISA, 1979). Com o objetivo de dar uma solução a este problema, o DFS/IDAAN perfurou

17 poços ao longo de vários anos, com resultados apenas regulares. Em 1986, com a finalidade de delimitar os principais aquíferos da área, o DFS executou 59 SEV com o arranjo dipolar *Schlumberger* (Fig. 2). Inicialmente, os dados obtidos foram ajustados com modelos 1D, utilizando um programa desenvolvido por Koefoed (1979), o qual foi implementado nos computadores do Departamento de Física da Universidade de Panamá (DF/UPA). Com os dados geológicos provenientes dos afloramentos, dos mapas geológicos e dos registros litológicos das perfurações, a interpretação das SEV foi aferida, com o uso dos princípios de equivalência e eliminação (Ward 1990). A confiabilidade dos modelos ajustados foi verificada utilizando os parâmetros estatísticos do processo interpretativo inverso para o caso 1D, que usa a técnica *ridge regression*, também conhecida como *dumped least-squares* (Rijo et al., 1977). Com base nesses modelos, as SEV foram classificadas em 4 famílias características e foram construídos mapas de contorno da espessura do aquífero principal e da profundidade do embasamento.

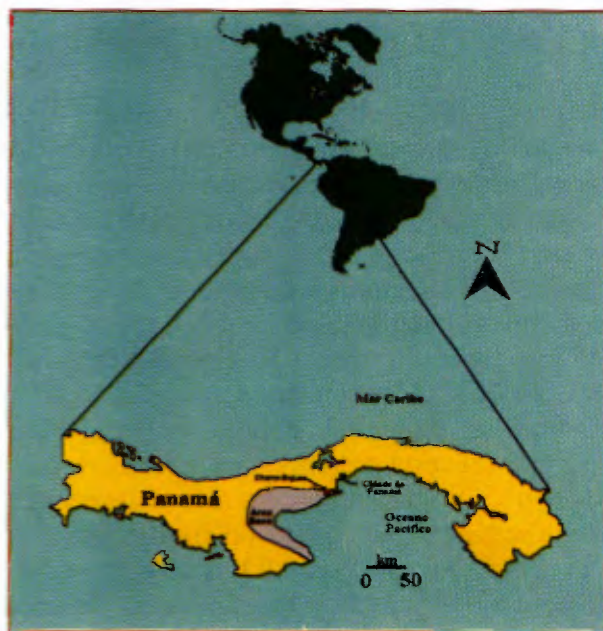


Fig. 1. Localização da região do estudo.



Fig. 2. SEV e poços realizados na região.

Por outro lado, as seções geo-elétricas E-W revelam a presença de uma estrutura 2D, a qual foi modelada num processo inverso 2D que utiliza o algoritmo de inversão *smoothness-constrained least-squares*, no qual o problema direto é calculado com as técnicas numéricas DF ou EF (Loke & Barker 1996a). Da mesma forma, a plotagem conjunta das seções geo-elétricas N-S e E-W mostram a presença de um estrutura 3D, numa depressão que o embasamento faz no setor N da área. Esta estrutura foi modelada com um algoritmo direto 3D que usa DF (Loke & Barker 1996b). Assim, os resultados mostram que a porção N da região estudada apresenta as melhores condições para a realização de perfurações, porque nela está presente uma camada de areia com até de 80 m de espessura, a qual apresenta as melhores características aquíferas e hidráulicas na região, como mostram os poços aí perfurados. O setor W, no final da estrutura 2D, apresenta uma camada de conglomerado com até 150 m de espessura capaz de armazenar água, mas, as vazões dos poços do setor mostram que ele tem importância secundária (Carrasquilla 1987).

HIDROGEOLOGIA

A região de Chame - Bejuco está localizada numa planície de erosão com topografia suave, cuja geologia recente é constituída de camadas finas de areia, aluvião, cinzas e rochas vulcânicas, que repousam sobre um embasamento cristalino de basalto. Na área encontram-se aluviões e sedimentos não consolidados de idade quaternária, assim como lavas, tobas, aglomerados andesítico-basálticos do terciário (Fig. 3). O embasamento apresenta uma inclinação na direção S, com as cidades de Bejuco e Chame ocupando posições topograficamente mais altas, sendo a área limitada nas direções W e N por elevações de até 100 m, ao S pelo vale fluvial do Rio Chame e ao E pelo Morro Chame com 439 m de altitude. Antes de 1986, o IDAAN perfurou 17 poços nesta área para o abastecimento à população, com muitos dos poços apresentando pobres vazões (Fig. 2). Desses furos, possuímos somente quatro registros estratigráficos, nos quais é possível observar camadas de argila, argila-arenosa, conglomerado, areia (fina e grossa), seixos, cascalho, areia-argilosa, tufos e basalto (Fig. 4). Entretanto, algumas das camadas de conglomerado e areia possuem boas propriedades aquíferas, como se percebe nas excelentes vazões de alguns dos poços construídos (Tabela I).



Fig. 3. Mapa geológico da região.

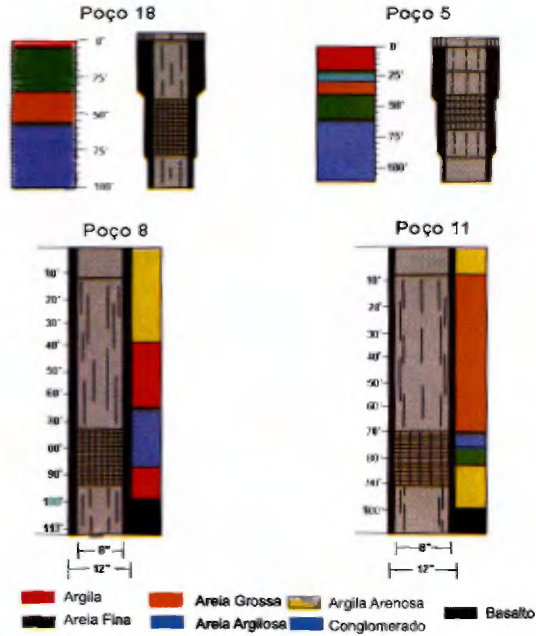


Fig. 4. Perfis litológicos dos poços da região

As informações geológicas resultantes das perfurações, revelam que o embasamento apresenta-se muito sólido, denso e duro, com escasas fraturas, falhas e fissuras, tendo, por conseguinte, pouca porosidade e permeabilidade.

Tabela I. Vazões dos principais poços da região.

Poço N ^o	Vazão (gpm)
5	135
8	125
18	155
11	97

Os poços construídos e a abertura de eletrodos de corrente utilizada na prospecção geofísica (de até $AB/2=300$ m), não atravessam o cristalino. De esta forma, consideramos que os sedimentos acima do embasamento são os que apresentam a melhor potencialidade aquífera e se constituem nos recursos hídricos mais importantes para solucionar o problema de fornecimento de água potável à população da região. Como consequência deste trabalho geofísico, foi perfurado o poço No. 18 (Figuras 2 e 4), que se constituiu no melhor da área, hidraulicamente falando (Carrasquilla 1987).

METODOLOGÍA

A equação diferencial a ser solucionada usando o método eletro-resistivo, que equivale a uma fonte 3D de um eletrodo com contato galvânico no chão num meio geológico 3D, é um problema denominado de 3D-3D, o qual se expressa através da seguinte equação de Poisson:

$$-\nabla \cdot \left[\frac{1}{\rho(x, y, z)} \nabla \phi(x, y, z) \right] = \left(\frac{I}{\Delta V} \right) \delta(x - x_0) \delta(y - y_0) \delta(z - z_0) \quad (1)$$

em que (x, y, z) é a distribuição 3D do potencial elétrico, I é a amplitude da corrente, V é a diferença de potencial, (x, y, z) é a distribuição 3D da resistividade do meio, $(x-x_0)(y-y_0)(z-z_0)$ é a função delta 3D de Dirac que representa a fonte pontual e $=(x, y, z)$. Nos casos 1D e 2D a distribuição de teria as formas (z) e (x, z) , respectivamente (Ward & Hohmann 1987). No caso de um meio geológico 1D, a solução da Equação (1) para o quadripolo Schlumberger é:

$$\rho_a = \rho_1 + s^2 \int_0^\infty \left[R(\lambda, \vec{P}) - \rho_1 \right] J_1(\lambda s) d\lambda; \quad (2)$$

em que s é a variável de integração, $J_1(s)$ é a função de Bessel de primeira espécie e de ordem um, \vec{P} é o vetor de parâmetros das resistividades (ρ) e espessuras (h) das camadas, $R(\vec{P})$ é o núcleo de integração e $s = AB/2$ é a distância do centro do arranjo até os eletrodos de corrente A ou B (Koefoed 1979).

Para problemas geológicos 2D complexos, a Equação (1) só pode ser solucionada de forma numérica com técnicas como EF e DF. Em ambos os casos, o meio geológico é subdividido em elementos

retangulares ou triangulares, em cujos vértices é aproximada a solução da equação diferencial.

$$-\nabla^T \left[\frac{1}{\rho(x, z)} \nabla^T \phi^T(x, k_y, z) \right] = \left(\frac{I}{\Delta V} \right) \delta(x - x_o) \delta(z - z_o); \quad (3)$$

A forma usual de lidar com este problema 2D-3D é transformá-lo num 2D-2D através da transformada de Fourier, tornando a Equação (1) em:

$$-\nabla^T \left[\frac{1}{\rho(x, z)} \nabla^T \phi^T(x, k_y, z) \right] = \left(\frac{I}{\Delta V} \right) \delta(x - x_o) \delta(z - z_o); \quad (4)$$

em que $\phi^T(x, k_y, z)$ é a transformada do potencial elétrico, $\delta(x - x_o) \delta(z - z_o)$ é a função delta 2D de Dirac que representa a fonte pontual e $\nabla^T = (\delta/\delta x, \delta/\delta z)$. Com EF, ϕ^T é aproximado por polinômios f^e sobre cada elemento triangular em que o meio é dividido, do tipo:

$$f^e = N_i^e f_i + N_j^e f_j + N_k^e f_k; \quad N_i^e = \frac{(a_i + b_i x + c_i z)}{2\Delta}; \quad (5)$$

em que as N_i são as funções base; f_i são as funções aproximadas em cada vértice; x e z são coordenadas dos vértices; $a_i = x_j z_k - x_k z_j$, $b_i = z_j - z_k$ e $c_i = x_k - x_j$; Δ é a área do triângulo e i, j e k são os vértices do triângulo. Usando o método de Galerkin para minimizar o erro no cálculo do ϕ^T através deste processo, aplicando as condições de contorno e utilizando a solução de algumas integrais características, chega-se as equações matriciais para cada elemento. Com elas, uma equação matricial global \underline{H} é composta para toda a seção modelada, a qual é bandeda e esparsa. Para encontrar a solução para ϕ^T , resolve-se o sistema linear $\underline{H}\phi = \underline{f}$, em que \underline{f} é o vetor das fontes e ϕ é o vetor dos potenciais ϕ^T . O potencial ϕ pode ser calculado a partir da transformada inversa de Fourier do potencial ϕ^T (Sasaki 1994).

A solução do problema geológico 3D da Equação (1) é alcançada de uma forma direta e utilizando a técnica DF. Esta equação, depois de discretizar, aplicar as condições de contorno de *Neumann e Dirichlet* e usar o teorema de *Green*, é transformada em:

$$\begin{aligned} & C_{top}^{ijk} \phi_{i,j,k-1} + C_{bottom}^{ijk} \phi_{i,j,k+1} + C_{left}^{ijk} \phi_{i-1,j,k} + C_{right}^{ijk} \phi_{i+1,j,k} + C_{front}^{ijk} \phi_{i,j-1,k} + C_{back}^{ijk} \phi_{i,j+1,k} + C_P^{ijk} \phi_{i,j,k} = \\ & I \delta(x - x_o) \delta(y - y_o) \delta(z - z_o); \end{aligned} \quad (6)$$

em que os C , são os coeficientes de acoplamento entre os nós, por exemplo, aquele entre os nós (i,j,k) e $(i,j,k-1)$ tem a forma:

$$C_{top}^{ijk} = \frac{-1}{\Delta z_{k-1}} \left[\frac{\Delta x_{i-1} \Delta y_j}{4\rho_{i-1,j,k-1}} + \frac{\Delta x_i \Delta y_j}{4\rho_{i,j,k-1}} + \frac{\Delta x_{i-1} \Delta y_{j-1}}{4\rho_{i-1,j-1,k-1}} + \frac{\Delta x_i \Delta y_{j-1}}{4\rho_{i,j-1,k-1}} \right]; \quad (7)$$

em que ρ é a resistividade da célula; x , y são coordenadas dos nós onde se procura a solução da função; Δx , Δy e Δz são diferenças de coordenadas; as descrições *top*, *bottom*, *front*, *back*, *left* e *right* se referem as faces da célula prismática ou cúbica e C_p é o coeficiente de auto-acoplamento. No caso 2D, os elementos *front* e *back* não existem, assim como as Δy . Uma vez feito isto, calcula-se a integral superficial ou volumétrica em cada elemento 2D ou 3D, formando-se uma equação matricial $\underline{A}\phi = \mathbf{v}$ para todo o meio modelado, em que \underline{A} é a matriz capacitância, ϕ é o vetor dos potenciais e \mathbf{v} é o vetor das fontes. O método comum para solucionar este sistema linear é através do método bandedo de Cholesky $\underline{A} = \underline{R}^T \underline{R}$; em que ϕ é determinado para cada vetor fonte \mathbf{v} por uma substituição direta $\underline{R}^T \mathbf{q} = \mathbf{v}$, seguida de uma retro-substituição $\underline{R}\phi = \mathbf{q}$ (Dey & Morrison 1979).

Para a inversão 1D das SEV, utilizamos a Equação (2) para o problema direto e o processo *ridge regression*, o qual é derivado da técnica dos mínimos quadrados simples:

$$\Delta \bar{P}_i = \left(\underline{A}^T \underline{A} + \varepsilon^2 \underline{I} \right)^{-1} \underline{A}^T \Delta \rho_a^{-i}; \quad (8)$$

em que \underline{I} é a matriz identidade, ε é o fator de amortecimento, \underline{A} é a matriz sensibilidade, \underline{A}^T é a sua transposta, ΔP_i é a variação entre os parâmetros verdadeiros e os que surgem ao ajustar o mínimo, $\Delta \rho_a^{-i}$ é a variação entre a resistividades observada e calculada pela Equação (2) e i representa o número de iterações (Mejú 1990).

Na inversão 2D dos dados eletro-resistivos, foi utilizado o processo inverso *smoothness-constrained least-squares*, com as técnicas numéricas EF ou DF para solucionar o problema direto. Este método é uma modificação do método Gauss-Newton e tem a expressão:

$$\Delta \bar{P}_i = \left(\underline{A}^T \underline{A} + \lambda \underline{C}^T \underline{C} \right)^{-1} \underline{A}^T \Delta \rho_a^{-i}; \quad (9)$$

em que \underline{C} é um filtro 2D, usado para delimitar a suavização das perturbações do modelo de parâmetros para algum valor constante, \underline{C}^T é seu transposto e λ é o parâmetro de decaimento (Loke & Barker 1996a).

Com base em toda esta metodologia, utilizamos a modelagem 1D direta e inversa, assim como a modelagem 2D inversa e a modelagem 3D direta para simular estruturas geo-elétricas encontradas na região de Chame-Bejuco, sendo os resultados apresentados a seguir.

RESULTADOS

A partir da interpretação 1D das SEV obtidas na área, foi possível dividí-las em quatro famílias características, com a seguinte distribuição geográfica: a primeira família está localizada ao W, a segunda no centro-sul, a terceira no setor central e a quarta ao E (Fig. 5). Para aferir o método geofísico utilizado neste estudo, algumas SEV foram executadas nas vizinhanças das perfurações. Assim, a SEV 1 foi comparada com o poço 5, a SEV 26 com o poço 8 e a SEV 20 com o poço 11 (Fig. 4). A aplicação dos princípios de equivalência e eliminação serviram para ajustar o método para a interpretação do resto das SEV da área. Assim sendo, quanto as camadas geo-elétricas, as SEV apresentam, basicamente, as seguintes (Fig. 6 e Tabela II):

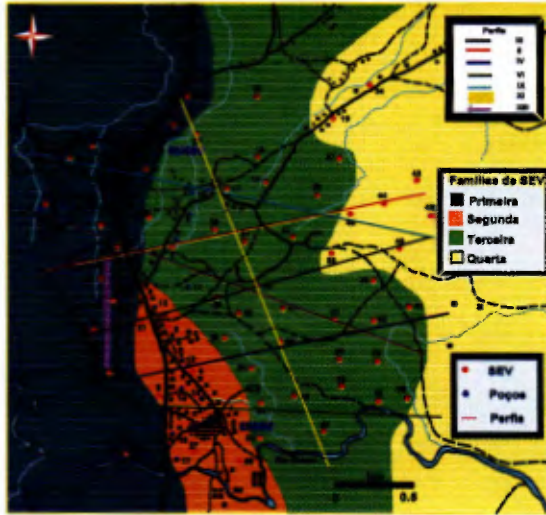


Fig. 5. Famílias de SEV.

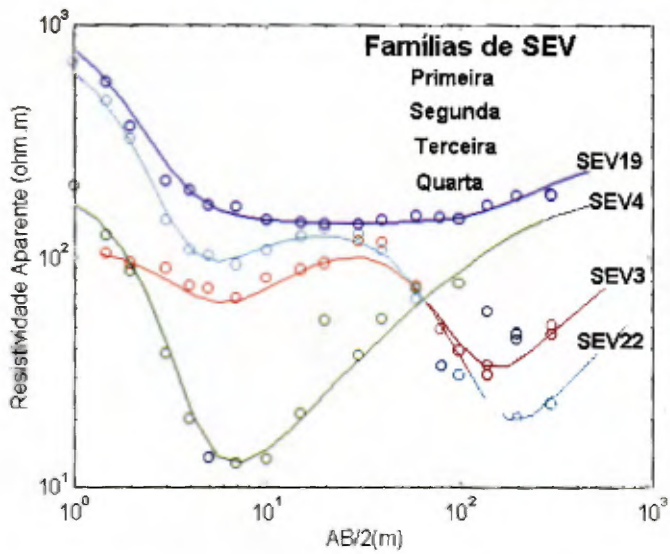


Fig. 6. Famílias características de SEV e suas interpretações 1D.

Tabela II. Estatística da inversão 1D.

SEV	Camada	Modelo Inicial		Modelo Final		Erro Médio (%)		Desvios Padrões (%)		Erro do Ajuste
		$\rho(\Omega.m)$	$h(m)$	$\rho(\Omega.m)$	$h(m)$	ρ	h	$\pm\Delta\rho$	$\pm\Delta h$	%
3	1	110.0	1.5	106.1	1.9	14.3	432.7	15.2	8.27	16.2
	2	40.0	3.0	35.1	2.7	2.0e05	1.6e05	7.0e03	4.3e03	
	3	150.0	20.0	253.1	11.9	9571.4	2.3e04	2.4e04	2.7e03	
	4	20.0	100.0	11.0	42.8	1.7e05	3.3e05	1.9e04	1.4e05	
	5	200.0	-----	159.1	-----	675.8	-----	1.1e03	-----	
4	1	200.0	1.0	224.0	0.9	39.7	33.9	88.8	0.3	35.6
	2	10.0	7.0	6.1	2.3	2329.5	2850.7	143.0	66.8	
	3	200.0	-----	61.1	-----	17.5	-----	10.7	-----	
19	1	800.0	0.8	913.4	0.7	113.2	9771.4	1.0e03	71.3	21.6
	2	200.0	0.5	154.2	0.6	344.6	762.1	1.5e08	5.8e05	
	3	60.0	2.0	63.2	2.4	3.9e05	159.1	2.4e04	2.4e06	
	4	150.0	20.0	173.2	16.8	143.9	440.8	244.0	73.8	
	5	40.0	35.0	28.4	78.3	340.6	119.4	96.6	7.8e07	
	6	9.0	90.0	9.8	98.9	281.6	441.2	9.9e06	9.9e07	
	7	200.0	-----	111.2	-----	3816.4	-----	1.1e08	-----	
22	1	1000.0	0.8	1665.2	0.6	8.6	5.6	143.0	0.0	3.6
	2	200.0	1.0	188.9	2.1	9.5	41.2	18.0	0.9	
	3	140.0	100.0	138.3	54.4	2.3	26.9	3.25	14.7	
	4	300.0	-----	207.0	-----	7.0	-----	14.5	-----	

- A primeira é altamente resistiva e equivale ao solo, possuindo resistividades aparentes (ρ_a) geralmente maiores que 100 e 1000 Ωm e espessuras (h) de até 1 m. Esta camada está presente em todas as famílias de curvas.
- A segunda camada é ligeiramente resistiva e, dependendo do local, trata-se de estratos saturados de argila-arenosa ou areia-argilosa por baixo do nível freático, com ρ_a entre 5 e 200 Ωm e h variáveis entre 1 e 100 m. Na quarta família esta camada se estende em profundidade.
- A terceira camada é resistiva, com ρ_a entre 50 e 150 Ωm e h entre os 20 e 50 m, devida a presença do conglomerado (no caso da primeira família) ou areia (no caso da segunda família), os quais são os melhores aquíferos da área, devido a sua boa porosidade e permeabilidade. Esta camada não aparece na quarta família.
- A quarta camada é condutiva e está presente em toda a área, com ρ_a entre 10 e 15 Ωm e h com até 100 m, tratando-se de argila. Nas SEVs da quarta família, esta camada apresenta maior espessura e está embebida de água salgada.
- A quinta camada é resistiva e aparece no ramo terminal das curvas, subindo com um ângulo de 45° de inclinação, apresentando características que nos levam a identificá-la como o embasamento da área. Esta camada aparece em profundidades variáveis e em alguns casos não é detetada, devendo-se localizar em profundidades maiores.

A interpretação 1D foi também usada na plotagem de mapas de contorno da profundidade do embasamento, que usa o ramo terminal ascendente das SEV, e da espessura do aquífero, no qual selecionamos as espessuras das camadas resistivas de areia e de conglomerado. Esses mapas mostram setores onde a espessura do aquífero é maior, com até 80 m para a areia no setor N e 150 para o conglomerado ao W. A profundidade do embasamento também mostra setores ao N e W onde ele é mais profundo, acumula mais sedimentos e são, portanto, os locais preferidos para realizar perfurações (Fig. 7). Para testar a confiabilidade dos ajustes 1D, invertemos uma SEV de cada família, usando os

modelos diretos da Figura 6 como tentativa inicial. A Fig. 8 mostra esses ajustes para uma SEV característica de cada família e na Tabela 2 aparecem os dados estatísticos derivados do processo inverso. As SEV 3 e 4 convergiram com 4 iterações, quanto que as SEV 19 e 22 o fizeram com 5. Na tabela, podemos perceber que a SEV 22 apresenta um bom ajuste, quanto que as outras SEV (3, 4 e 19) apresentam erros altos, o que se reflete em altos erros na resolução dos parâmetros individualmente, em altos desvios padrões, num amplo intervalo de parâmetros que ajustam o mesmo modelo e, obviamente, numa grande ambigüidade na interpretação.

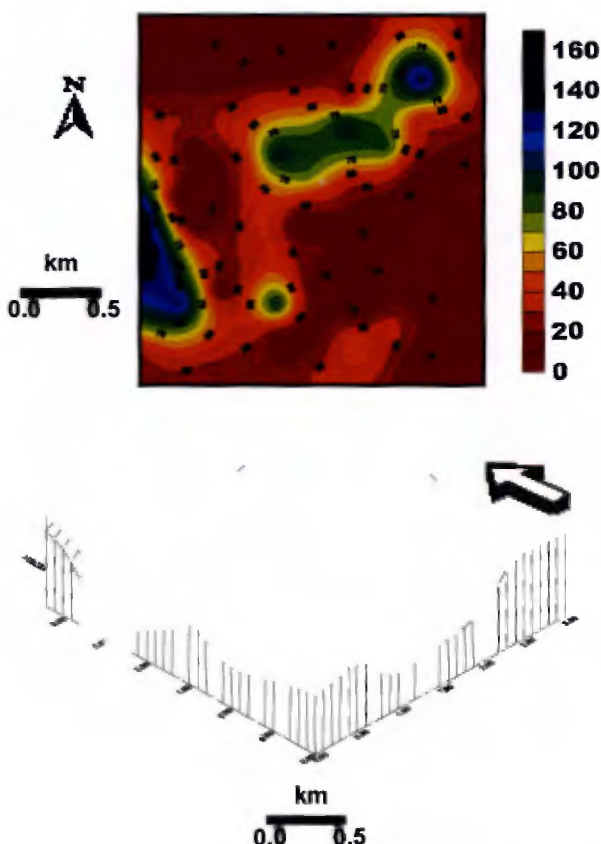


Fig. 7. Mapa da espessura do aquífero (acima) e da profundidade do embasamento (embaixo).

Os parâmetros também se mostram altamente correlacionados entre si, o que é um outro impedimento na solução individual dos mesmos. Isto nos encorajou na procura de soluções diferentes do modelo estratificado para interpretar os dados geo-elétricos desta região, a saber, modelos 2D e 3D.

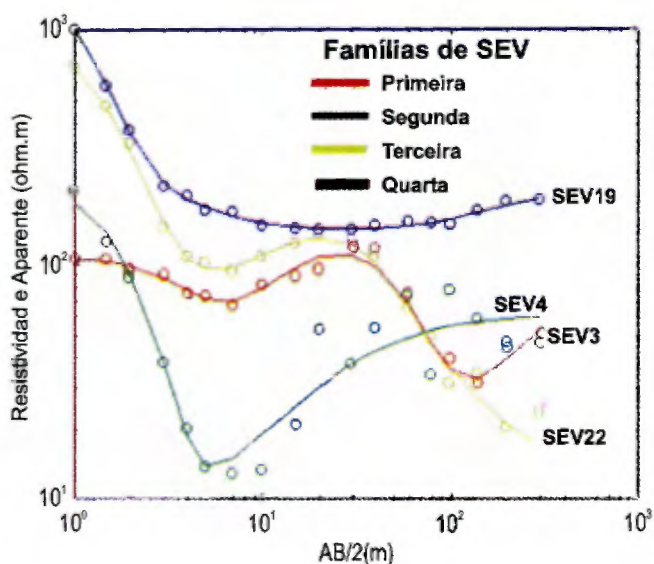


Fig. 8. Modelos 1D ajustados com inversão.

Com a plotagem das seções geoeletricas orientadas no sentido E-W (perfis III, IV, VI e XIII da Fig. 5), foi descoberta uma estrutura 2D aproximada ao W da área. Estas seções mostram a presença de dois setores resistivos no meio (areia) e no final (conglomerado) do perfil, o primeiro é considerado como o aquífero principal e o segundo como secundário (Fig. 9). Utilizando um esquema numérico inverso *smoothness-constrained least-squares*, que usa DF e EF como algoritmos diretos, modelamos a estrutura 2D que aparece no Perfil VI. As Figuras 10 e 11 mostram os resultados desta modelagem, que dá um erro de 16.4% no ajuste para DF e 15.4% para EF.

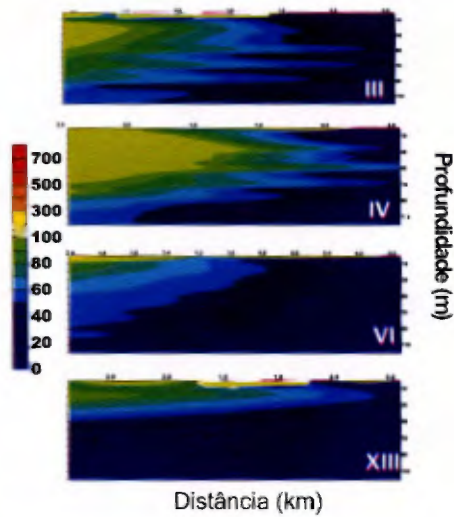


Fig. 9. Seções geolétricas dos perfis III, IV, VI e XIII no sentido E-W.

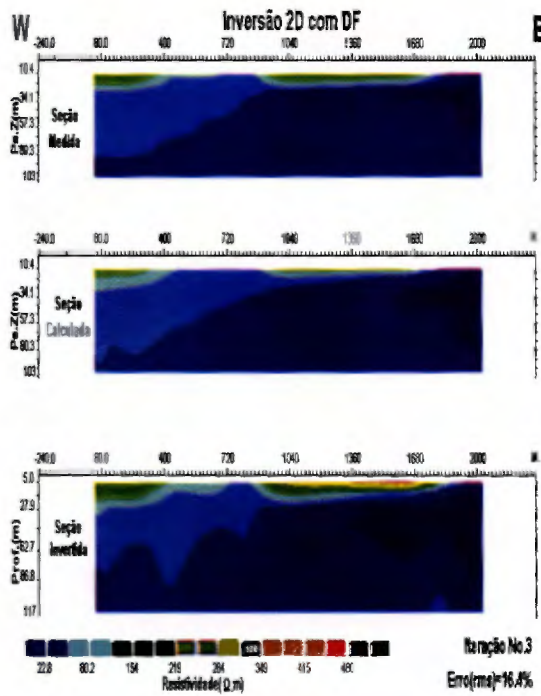


Fig. 10. Inversão do Perfil XIII com diferenças finitas.

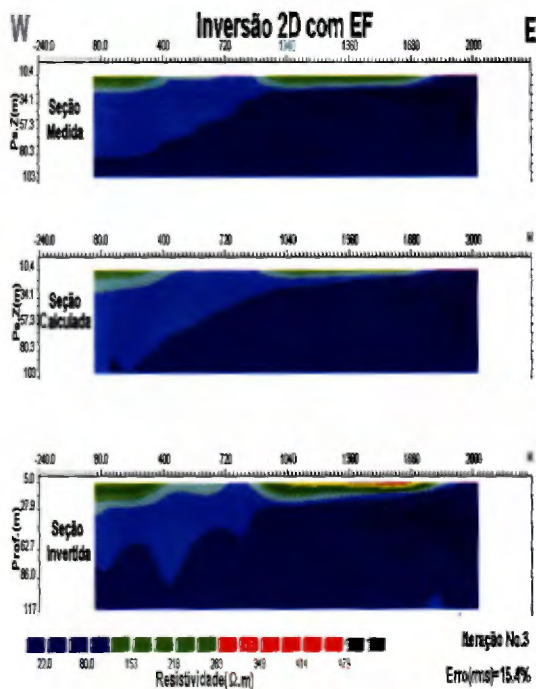


Fig. 11. Inversão do Perfil XIII com elementos finitos.

As seções geolétricas orientadas nos sentidos N-S (perfil XI da Fig. 5) e E-W (perfis II e IX da Fig. 5) mostram uma estrutura 3D ao N da área, na qual aparece um setor com alta resistividade constituído por areia, o qual se constitui no melhor aquífero da área (Fig. 12). Utilizando um esquema numérico direto com DF otimizadas, modelamos esta estrutura. A Figura 13 mostra o modelo 3D de resistividades usado nesta modelagem, com cada visão em planta representando diferentes níveis em profundidade. Na Figura 14 se mostram as seções geolétricas calculadas na direção E-W e na Figura 15 na direção N-S. Note-se a semelhança das seções modeladas com as seções geolétricas reais da Figura 12.

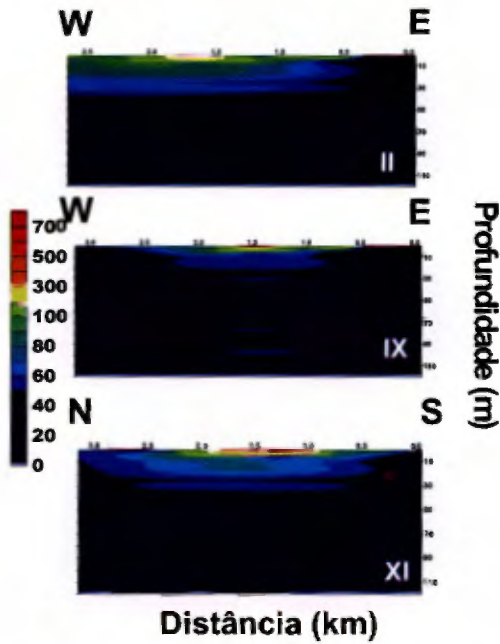


Fig. 12. Seções geo-elétricas dos perfis II, IX, no sentido E-W, e XI, no sentido N-S.

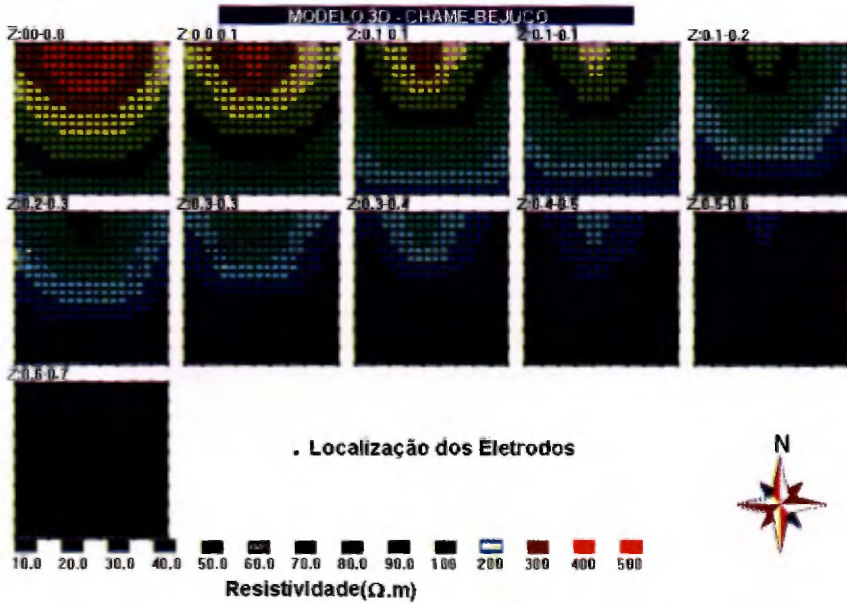


Fig. 13. Modelo da heterogeneidade 3D.

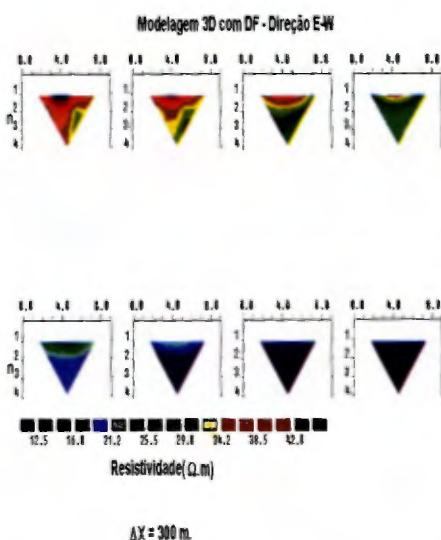


Fig. 14. Seções geo-elétricas calculadas na direção X.

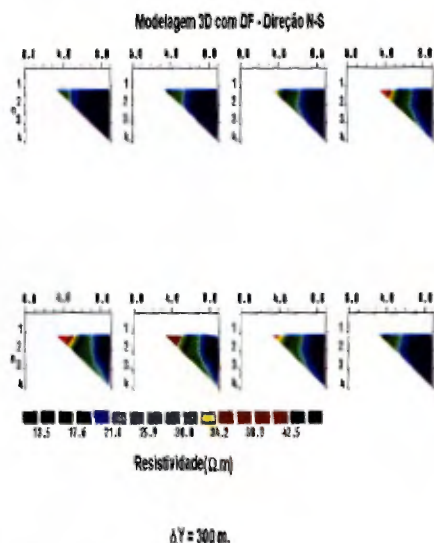


Fig. 15. Seções geo-elétricas calculadas na direção Y.

CONCLUSÕES

O conjunto das informações hidráulicas, geológicas e geofísicas obtidas na região estudada, nos permitem afirmar que os melhores aquíferos se constituem de camadas de areia ou de conglomerados, que estão a profundidades menores que 200 m e possuem uma espessura de até 80 metros, na porção central, e de até 150 m, na porção W. É bem conhecida a alta permeabilidade e porosidade destas camadas e, portanto, suas excelentes qualidades para atuar como aquíferos. Por tal razão, recomendamos a área N como a mais apropriada para a realização de perfurações, na qual o embasamento apresenta uma depressão e onde está presente essa camada de areia, que atua como o melhor aquífero. Os limites desta área foram colocados em base aos mapas da espessura do aquífero e da profundidade do embasamento, à presença da camada resistiva da terceira família, como também das seções geo-elétricas e as modelagens 1D, 2D e 3D, as quais originaram as seções geo-elétricas modeladas. É verdade que a área da primeira família apresenta uma camada de conglomerado que pode atuar como aquífero, a qual também aparece no final das seções geo-elétricas E-W e que também foi modelada, mas esta é menos atrativa, provavelmente devido à cimentação argilosa dos seixos do conglomerado. Isto se

mostra claramente nas perfurações executadas, cujas vazões são menores no setor W que aquele setor indicado no setor N. Como resultado deste estudo, foi perfurado um último poço (No. 18), o qual se constitui no melhor da região, com vazão de mais de 155 galões por minuto.

REFERÊNCIAS

Carrasquilla, A. 1987. Geofísica para Aguas Subterráneas en Chame - Bejuco. Departamento Fuentes Subterráneas, IDAAN. Reporte Interno. Chitré, 150 p.

Dey, A. & Morrison, H.F. 1979. Resistivity modeling for arbitrary shaped three-dimensional structures. *Geophysics*, 44, 753-780.

ECAISA - Engineering Science. 1979. Estudio de factibilidad de los sistemas de abastecimiento de agua potable y alcantarillados para las ciudades de Las Tablas, Guararé, Bejuco, Chame y Nueva Gorgona. Reporte Interno. Ciudad de Panamá, 150 p.

Koefoed, O. 1979. *Geosounding Principles I, Resistivity Sounding Measurements*. Elsevier, Amsterdam, 276 p.

Loke, M.H. & Barker, R.D. 1996a. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44, 131-152.

Loke, M.H. & Barker, R.D. 1996b. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophysical prospecting*, 44, 499-523.

Mejú, M. 1994. *Geophysical data analysis: understanding inverse problem theory and practice*. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa. 296 p.

Rijo, L.; Pelton, W.H., Feitosa, E.C.; Ward, S.H. 1977. Interpretation of apparent resistivity data from Apodi Valley, Rio Grande do Norte, Brasil. *Geophysics*, 42 : 811-822.

Sasaki, Y. 1994. 3-D resistivity inversion using finite-element method. *Geophysics*, 59, 1839-1848.

Ward, S.H. 1990. Resistivity and Induced Polarization Methods. In: WARD, S.H. *Investigations in Geophysics N° 5, Geotechnical and Environmental Geophysics, Vol. I: Review and Tutorial*. Tulsa, Society of Exploration Geophysicists. p 147-189.

Ward, S.H. & Hohmann, G.W. 1987. Electromagnetic theory for geophysical applications. In: NABIGHIAN, M.N. *Electromagnetic methods in applied geophysics, Volume 1, Theory*. SEG, Tulsa, p.131-312.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao DF/UPA, ao LENEP/UENF e ao ON/CNPq, pela infraestrutura e os recursos computacionais colocados a disposição para a realização deste trabalho. Da mesma forma, somos gratos com o CNPq, pelas bolsas de pesquisa, e com o IDAAN/Panamá, por facilitar os dados de campo. Aos avaliadores deste artigo pelas mudanças sugeridas.

Recibido enero de 2004, aceptado junio de 2005.

