

Determinação da resistividade elétrica de águas intersticiais usando perfilagens de potencial espontâneo

Olivar A. L. de Lima (CPGG/UFBA) e Geraldo Girão Nery (HYDROLOG)

Abstract

The self-potential (SP) log is a useful tool for estimating groundwater resistivities. Since it is dominantly of electrochemical origin, a simple equation, $SP = -K \log(R_{mf}/R_w)$, relates the SP deflection opposite a permeable bed to the resistivity contrast between its formation water (R_w) and that of the invasive mud filtrate (R_{mf}). K is a parameter strongly dependent on the temperature. This equation works successfully for concentrated solutions rich in sodium chloride. For diluted multi-salt solutions very poor results are normally obtained. Based on the formulation proposed by Gondouin et al. (1957) and using chemical analysis of groundwaters a modified SP equation was developed which provides excellent results for the São Sebastião aquifer system in the Recôncavo Basin, Brazil. The procedure may be easily adapted to other groundwater reservoirs.

INTRODUÇÃO

O perfil do potencial elétrico espontâneo tem sido extensivamente utilizado para determinar a resistividade elétrica das águas das formações (Vonhof, 1966; Alger, 1966; Jorden and Campbell, 1986). No ambiente de ocorrência de petróleo tradicionalmente se aplica com sucesso a equação

$$SP = -K \log \frac{R_{mf}}{R_w}, \quad (1)$$

onde SP é a deflexão lida no perfil em frente a um intervalo permeável, R_w a resistividade da água da formação, R_{mf} a resistividade do filtrado da lama e K um parâmetro dependente da temperatura ($K = 65 + 0,24t$, t em $^{\circ}C$). Todavia, o emprego da equação 1 na hidrogeologia tem, frequentemente, produzido resultados muito incorretos para R_w (Gondouin et al., 1957; Alger, 1966; Lima, 1993).

O gráfico da Figura 1 ilustra um caso típico em que o emprego da equação 1 fornece resultados errôneos. Trata-se de parte do perfil geofísico de um poço de exploração de água subterrânea, perfurado através da Formação São Sebastião, na região de Camaçari – Bahia. No lado esquerdo, tem-se a curva do potencial espontâneo (SP), com uma deflexão negativa em frente a uma camada de arenito. Na direita tem-se duas curvas de resistividade aparente: a normal curta (SN) de 16" de separação, que é sensível à zona de invasão do filtrado da lama; a de indução (ILD) investiga, na maior parte, a zona virgem da formação. Pela equação 1, a deflexão negativa implica em que $R_{mf} > R_w$. Todavia, a separação das curvas de resistividade aparente indicam justamente o oposto, isto é, que $R_w > R_{mf}$. Esta discrepância atesta a inadequação da expressão 1 na presente situação.

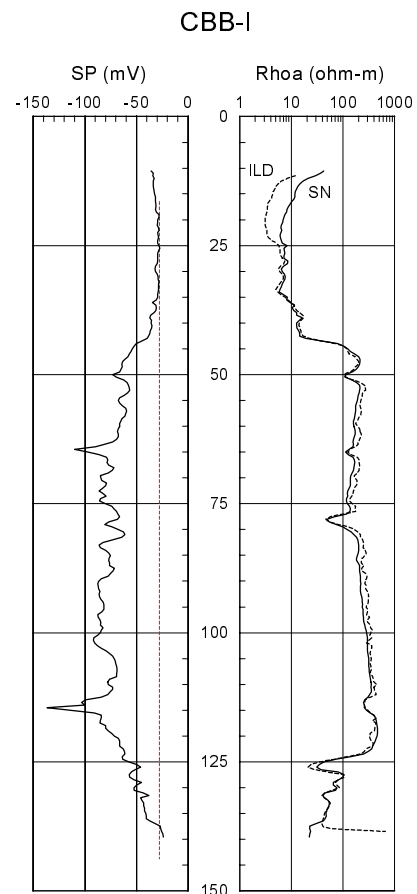


Figura 1: Perfil geofísico do poço CBB-1A na região de Camaçari – Bahia.

Neste trabalho, usando a formulação teórico-experimental proposta por Gondouin et al. (1957) para descrever os efeitos dos ions HCO_3^- , SO_4^{2-} , Ca^{++} e Mg^{++} na amplitude da deflexão do SP, em combinação com dados de análises químicas de águas do aquífero São Sebastião na Bacia do Recôncavo, propõe-se modificações na equação 1, de modo a torná-la adequada para uso na interpretação quantitativa de perfis elétricos de poços perfurados neste importante aquífero do Estado da Bahia.

BASES DO PROCEDIMENTO

Para soluções eletrolíticas que são misturas de diferentes sais de cálcio, magnésio e sódio, Gondouin et al. (1957)

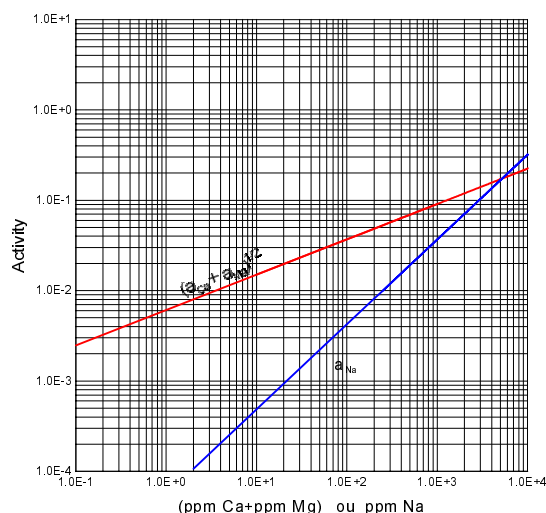


Figura 2: Atividades em função das concentrações iônicas de Na, Ca e Mg (Dados extraídos de Gondouin et al., 1957).

mostraram que o potencial eletroquímico (SP) é aproximadamente expresso pela equação

$$SP = -K \log \frac{(a_{Na} + \sqrt{a_{Ca} + a_{Mg}})_w}{(a_{Na} + \sqrt{a_{Ca} + a_{Mg}})_{mf}}, \quad (2)$$

onde a_{Na} , a_{Ca} e a_{Mg} são as atividades iônicas do sódio, cálcio e magnésio medidas tanto na água da formação (sub-índice w) quanto no filtrado da lama (sub-índice mf). As atividades envolvidas na equação 2 se relacionam diretamente às concentrações iônicas das soluções conforme mostrado nas curvas da Figura 2.

Análises químicas de amostras de água de 10 poços perfurados na Formação São Sebastião indicam a presença, além de sódio e potássio, de quantidades expressivas de cálcio e magnésio (Tabela 1). Esses dados e a Figura 2 permitem definir uma relação entre atividade total e resistividade elétrica válida para as águas dessa formação. Estatisticamente, os valores de atividade e resistividade dessas águas se ajustam a uma expressão da forma (Fig. 3)

$$a_w = \frac{\alpha}{R_w^\beta}, \quad (3)$$

com $\alpha = 0,05121$, $\beta = 0,346$ e coeficiente de relação $r^2 = 0,8486$.

Usando o conceito de resistividade equivalente de uma solução eletrolítica como um parâmetro inversamente proporcional a sua atividade (Gondouin et al., 1957), pode-se escrever para as águas da Formação São Sebastião

$$R_{wS} = \frac{k}{a_w} = \frac{k}{\alpha} R_w^\beta. \quad (4)$$

Na região de referência, supõe-se que as águas usadas no preparo de lamas possuem características químicas comparáveis às das águas subterrâneas. Todavia, essas lamas são normalmente compostas com argilas bentonitas ricas

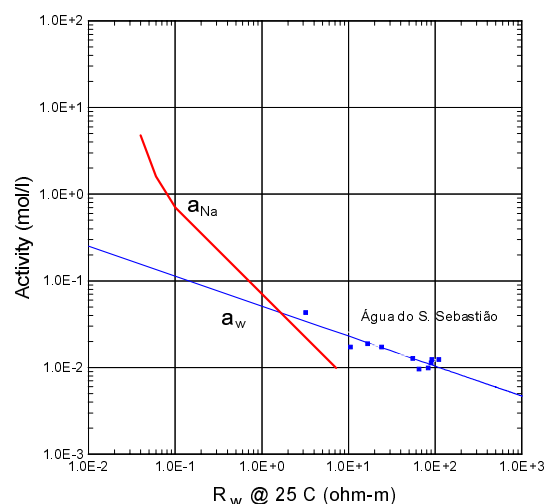


Figura 3: Fig. 3 - Atividade total versus R_w para águas subterrâneas do aquífero São Sebastião.

em sódio. Dada a elevada capacidade de troca catiônica das bentonitas, o fluido filtrado da lama tende a comportar-se como uma solução de cloreto de sódio. Com isso, a relação atividade versus resistividade para filtrados tem a forma da equação 3, com $\alpha' = 0,075$ e $\beta' = 1$. Usando a resistividade equivalente para o filtrado da lama obtém-se da equação 4 que $k = 0,075$.

Com isso, a equação 2, adaptada para as condições experimentais na região e para as águas do aquífero São Sebastião, tem a forma

$$SP = -K \log \frac{R_{mf}}{R_w S}, \quad (5)$$

com $R_{wS} = 1,465 R_w^{0,346}$. Tais resultados mostram que, se não for feita uma distinção clara entre R_{wS} e R_w , as estimativas baseadas em perfis de SP podem levar a resistividades fictícias bem menores que as resistividades verdadeiras das águas das formações, que se expressam eletricamente como mais salinas do que realmente são.

RESULTADOS

O emprego do procedimento discutido aos dados ilustrados na Figura 1 é instrutivo. No intervalo de 45 a 124 m de profundidade, a deflexão média do potencial espontâneo é de -48 mV. A resistividade da lama bentonítica medida durante a perfilagem do poço foi $R_m = 15$ ohm-m. Como a resistividade do filtrado não foi medida no campo, seu valor foi estimado usando o modelo de condutividade volumétrica proposto por Lima e Sharma (1990). Para lamas e folhelhos esses autores derivaram a seguinte expressão

$$R_m = \frac{1}{f} [R_{mf} + m_c(f-1)R_s], \quad (6)$$

onde $f = \phi^{-m_c}$ é um fator característico do folhelho, m_c é um parâmetro de forma das argilas e R_s é a resistividade elétrica de uma partícula de argila molhada. Para montmorilonitas sódicas suspensas em águas destiladas, eles en-

Poço	$R_w(25^\circ\text{C})$ (ohm-m)	Ca^{++} (mg/l)	Mg^{++} (mg/l)	Na^+ (mg/l)	K^+ (mg/l)	HCO_3^-	Cl^-
CIA-23	83	0,75	1,75	18,65	1,95	22,5	24,5
CIA-29	65	0,20	2,40	14,60	2,55	12,0	24,5
CIA-35	55	1,50	3,15	17,45	2,55	18,5	25,0
CIA-37	110	1,60	3,05	9,0	3,30	10,0	17,5
CIA-39	90	0,75	3,40	8,20	3,90	15,0	18,0
CIA-42	92	0,95	3,60	8,10	2,50	7,0	15,5
CB-03	10,5	2,0	2,90	98,0	0,10	110,7	77,4
CB-04	16,6	4,5	7,5	38,0	1,0	43,7	75,3
CB-05	24,1	5,0	6,4	24,0	5,0	23,2	53,3
PT-1	3,2	25,5	74,7	134,0	28,0	15,1	674,5

Tabela 1: Dados físico-químicos de amostras de água de poços do aquífero São Sebastião (Dados extraídos de CERB, 1983).

contraram $R_S = 0,143$ ohm-m e $m_c = 1,1$. Supondo porosidades de lama entre 50 e 60%, obtém-se da equação 6 que $R_{mf} = 30,3$ ohm-m. Este resultado, satisfatoriamente válido quando o processo de condução elétrica na lama se realiza predominantemente pela matriz sólida, contraria o uso de uma aproximação estatística para lamas de NaCl dada por ($R_{mf} = 0,75 R_m$ (Schlumberger, 1979).

Com o valor estimado de R_{mf} , a equação 5 fornece $R_{WS} = 6,285$ ohm-m, correspondente a uma resistividade verdadeira da água $R_W = 70,6$ ohm-m. A resistividade elétrica medida em uma amostra de água de um poço distante 50 m do poço perfilado foi de $R_W = 67$ ohm-m. Resultados semelhantes foram obtidos para outros poços da região, de modo que se poder garantir a adequabilidade do procedimento proposto.

CONCLUSÕES

Com base em resultados de análises químicas representativas de águas da Formação São Sebastião na Bacia do Recôncavo e na formulação teórico-experimental de Gondouin et al. (1957) para soluções multi-salinas, propõe-se um procedimento analítico para interpretação de dados de potencial espontâneo obtidos em poços dessa região. As relações discutidas explicam satisfatoriamente as inferências contraditórias obtidas da comparação de SP com curvas de resistividade aparente lidas por ferramentas de perfilação que se caracterizam por diferentes raios de investigação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CPGG/UFBA pelo apoio à realização deste trabalho. Aos Profs. Hédison K. Sato e Abílio C. P. Bittencourt pelas discussões e pelas sugestões na revisão do texto. O. A. L de Lima agradece ao CNPq por financiamento à Projeto Integrado e Bolsa de Produtividade em Pesquisa.

REFERÊNCIAS

Alger, R. P., 1966, *Interpretation of electrical logs in fresh water wells in unconsolidated formations: 17th Ann. Log. Symp., Soc. Prof. Well Log Analysts, Trans.*, 246-270.

CERB, 1983, *Cadastro de Poços Tubulares do Estado da Bahia: Companhia de Engenharia Rural da Bahia, SSRH, Salvador, 10 Volumes.*

Lima, O. A. L. de, 1993, *Geophysical evaluation of sandstone aquifers in the Recôncavo-Tucano Basin, Bahia – Brazil: Geophysics*, 58(11), 1689-1702.

Gondouin, M.; Tixier, M. P. and Simard, G. L., 1957, *An experimental study on the influence of the chemical composition of electrolytes on the SP curve: Am. Inst. Min. Eng., Petroleum Trans.*, 210, 58-72.

Jorden, J. R. and Campbell, F. L., 1986, *Well Logging II – Electric and Acoustic Logging: Soc. Petr. Eng. Mono. 10, H. L. Doherty Series.*

Lima, O. A. L. and Sharma, M. M., 1990, *A grain conductivity approach to shaly sandstones: Geophysics*, 55(10), 1347-1356.

Schlumberger, 1979, *Log Interpretation Charts: Schlumberger Well Surveying Co., 97p., U.S.A.*

Vonhof, J. A., 1966, *Water quality determination from spontaneous-potential electric log curves: Jour. Hydrology*, 4, 341-347.