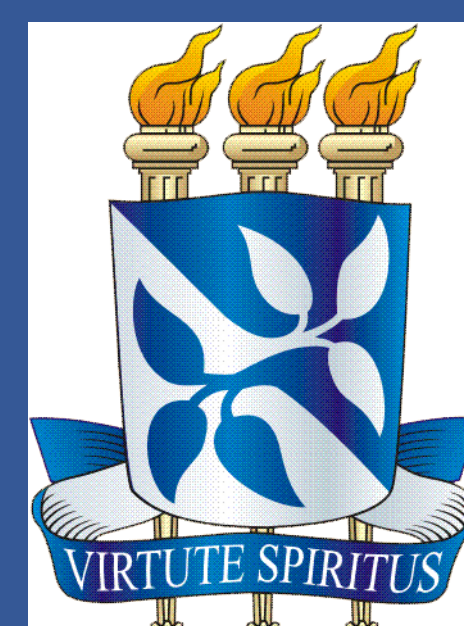


Inversão de Temperaturas de Fundo de Poço para Determinação de Gradiente Geotérmico: Aplicação a Dados do Campo de Pineview (Utah, EUA)

Artur Benevides* e Amin Bassrei

IGEO/UFBA, CPGG/IGEO/UFBA & INCT-GP



Introdução

- Neste trabalho foram realizadas inversões de Temperaturas de Fundo de Poço (BHT) para determinação de Gradiente Geotérmico para diferentes formações presentes em subsuperfície.
- A implementação da inversão deu-se pela SVD (Decomposição em Valores Singulares).
- Para remoção de singularidades foi utilizado o método MQA (Mínimos Quadrados Amortecidos).
- A inversão foi aplicada inicialmente em dados sintéticos e em seguida a metodologia foi utilizada para determinação de gradiente geotérmico em dados reais oriundos do campo de óleo de Pineview, (Utah, EUA) e comparado com os resultados obtidos por Deming & Chapman (1988) para mesma região.

Correção de BHT

As medidas de BHT estão sujeitas a perturbações associadas aos processos de perfuração do poço e circulação da lama de perfuração. A correção das medidas de BHT dá-se através do método de Horner-plot proposto por Lachenbruch and Brewer (1957).

$$T(t_s) = T_{\infty} + \frac{Q}{4\pi K} [E_i(-\frac{r^2}{4\alpha(t_s + t_c)}) - E_i(-\frac{r^2}{4\alpha t_s})]$$

A equação acima pode ser simplificada quando o tempo de descanso do poço é grande.

$$T_{\infty} = T(t_s) + \frac{Q}{4\pi K} [\ln(\frac{t_s}{t_s + t_c})]$$

Problema Inverso

O objetivo da inversão é a determinação de alguns parâmetros a partir de dados observados, ou seja, determinar qualquer entrada ou o sistema que causa as medidas da saída. Para inversão de BHT formulamos inicialmente o problema direto:

$$\mathbf{T}_{\Delta} = \mathbf{Z}\mathbf{g},$$

sendo

$$\mathbf{T}_{\Delta} = [T_{\Delta 1}, T_{\Delta 2}, T_{\Delta 3}, \dots, T_{\Delta M}]^T,$$

e

$$\mathbf{g} = [g_1, g_2, g_3, \dots, g_N]^T,$$

onde \mathbf{T}_{Δ} representa um vetor de dados medidos

$$T_{\Delta M} = T_{bht M} - T_0,$$

\mathbf{g} representa um vetor contendo os gradientes geotérmicos a ser estimado pela inversão, $\mathbf{Z}(M, N)$ é a matriz que contém as espessuras das formações. Supondo \mathbf{Z} conhecida, podemos estimar os valores de \mathbf{g} através do problema inverso:

$$\mathbf{g} = \mathbf{Z}^{-1}\mathbf{T}_{\Delta}.$$

Deste modo, podemos estimar os valores dos gradientes de cada formação utilizando uma inversão de dados. O método utilizado para a solução do problema inverso é a SVD.

SVD

A Decomposição em valores singulares ou SVD é uma técnica empregada para a simplificação de matriz associada a uma transformação linear. Seja \mathbf{Z} uma matriz $(M \times N)$. A sua matriz \mathbf{Z}^+ será a sua pseudo-inversa, agora de dimensões $(N \times M)$. Supondo uma matriz retangular $\mathbf{Z}_{M \times N}$, sua SVD é da seguinte forma:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T,$$

$\mathbf{U}_{M \times M}$ é a matriz que contém os autovetores ortonormalizados de $\mathbf{Z}\mathbf{Z}^T$, $\mathbf{\Sigma}_{M \times N}$ é a matriz que contém as raízes quadradas dos autovalores de $\mathbf{Z}^T\mathbf{Z}$ e $\mathbf{V}_{N \times N}$ é a matriz que contém os autovetores ortonormalizados de $\mathbf{Z}^T\mathbf{Z}$. Então a pseudo-inversa, ou inversa generalizada, é uma matriz $N \times M$:

$$\mathbf{Z}^+ = \mathbf{V}\mathbf{\Sigma}^+ \mathbf{U}^T.$$

Mínimos Quadrados Amortecido

$$\mathbf{g} = (\mathbf{Z}^T\mathbf{Z})^+ \mathbf{Z}^T\mathbf{T}_{\Delta}.$$

$$\mathbf{g} = (\mathbf{Z}^T\mathbf{Z} + e^2\mathbf{I})^+ \mathbf{Z}^T\mathbf{T}_{\Delta}.$$

Uma vez obtido os parâmetros do modelo, utilizamos os parâmetros dos dados para analisar as propriedades deste modelo e o que ele preserva do modelo real, tal como erro e ruídos.

$$E_{RMS}(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (T_{\Delta i}^{obs} - T_{\Delta i}^{calc})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (T_{\Delta i}^{obs})^2}} \times 100.$$

Aplicação em Sintéticos

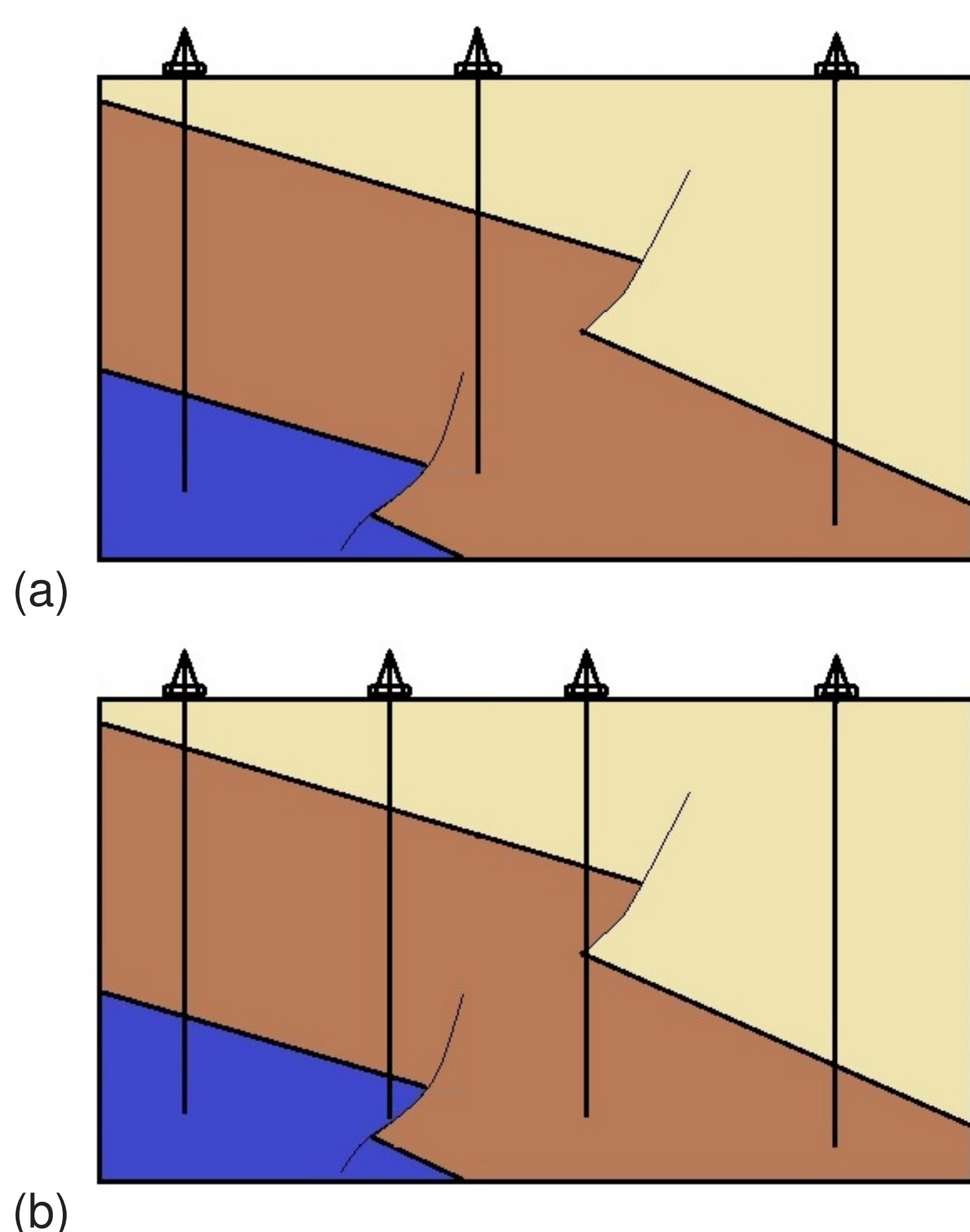


Figura 1. Em (a) modelo sintético I e em (b) modelo sintético II.

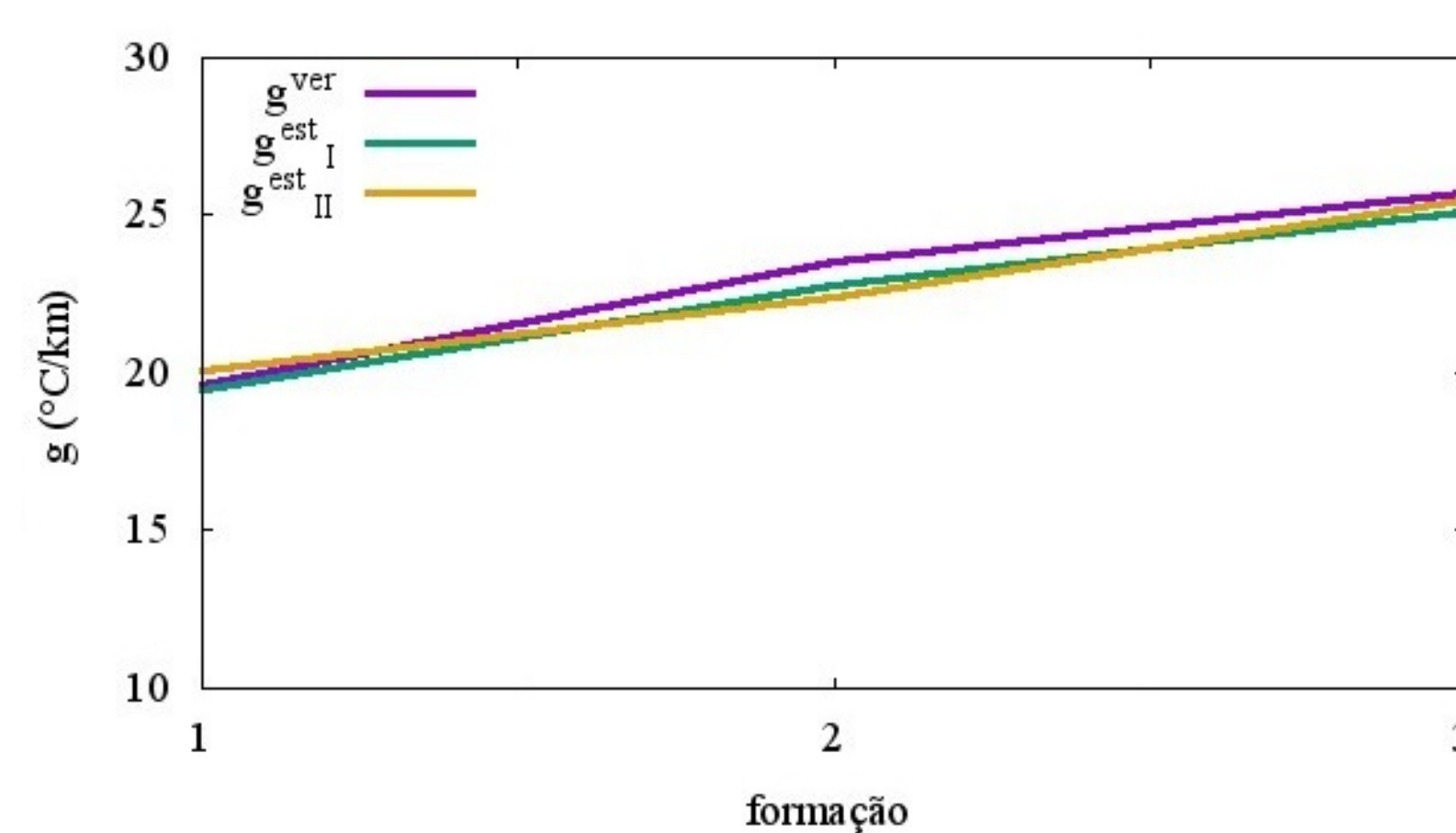


Figura 2. Resultados das inversões SVD para os modelos sintéticos I e II.

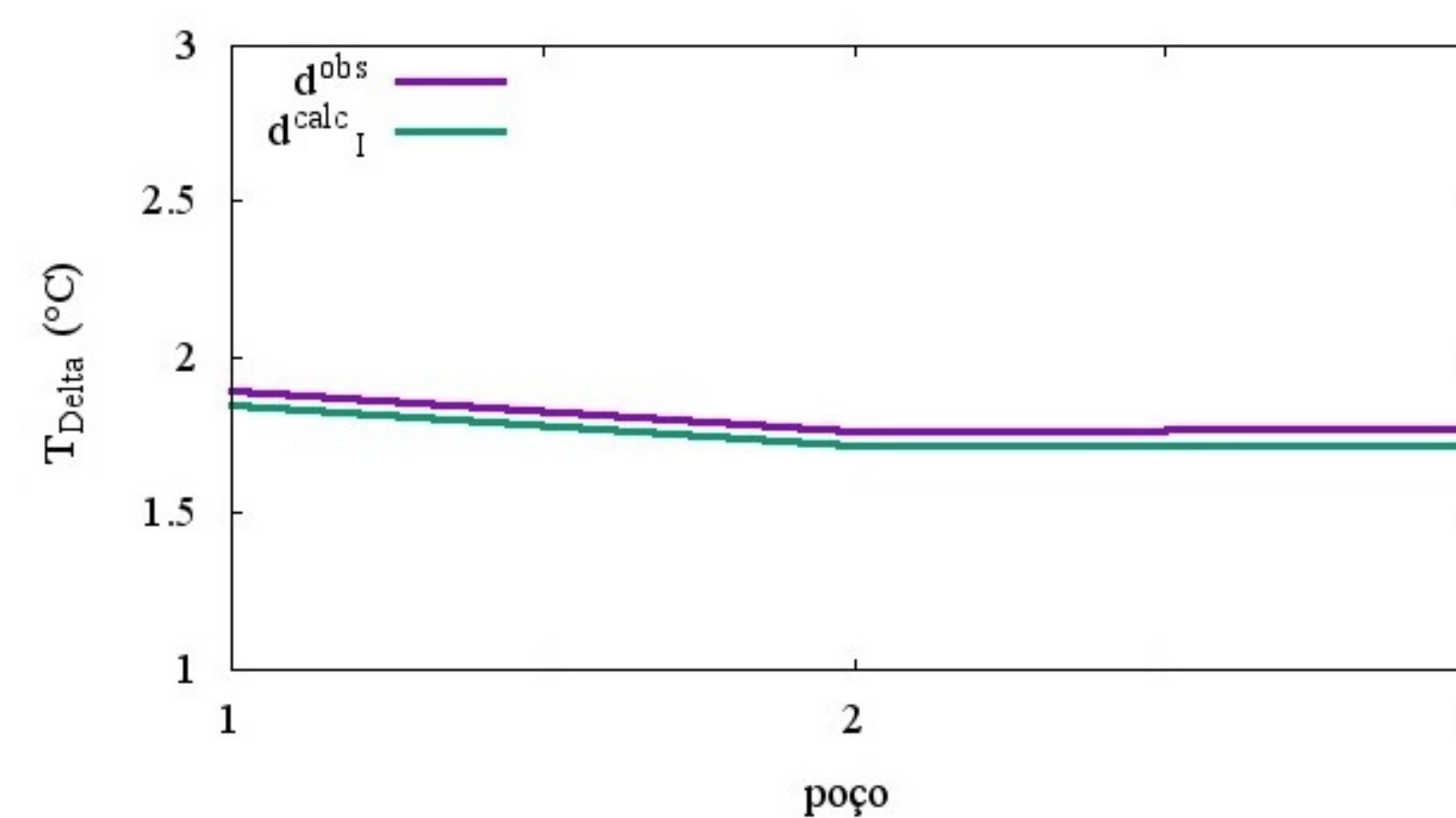


Figura 3. Comparação entre os dados observados e calculados para o modelo I.

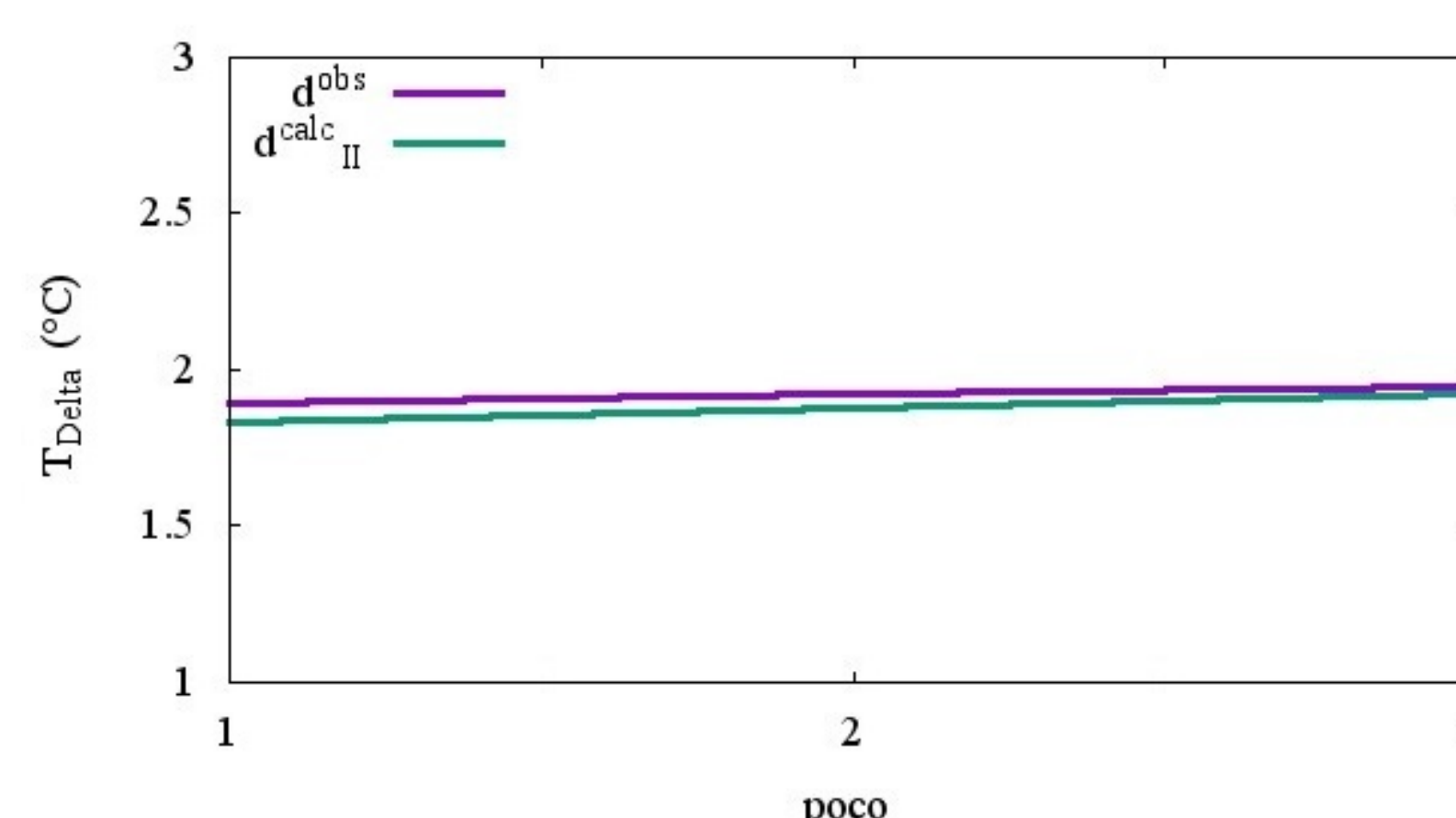


Figura 4. Comparação entre os dados observados e calculados para o modelo II.

Dados de Pineview

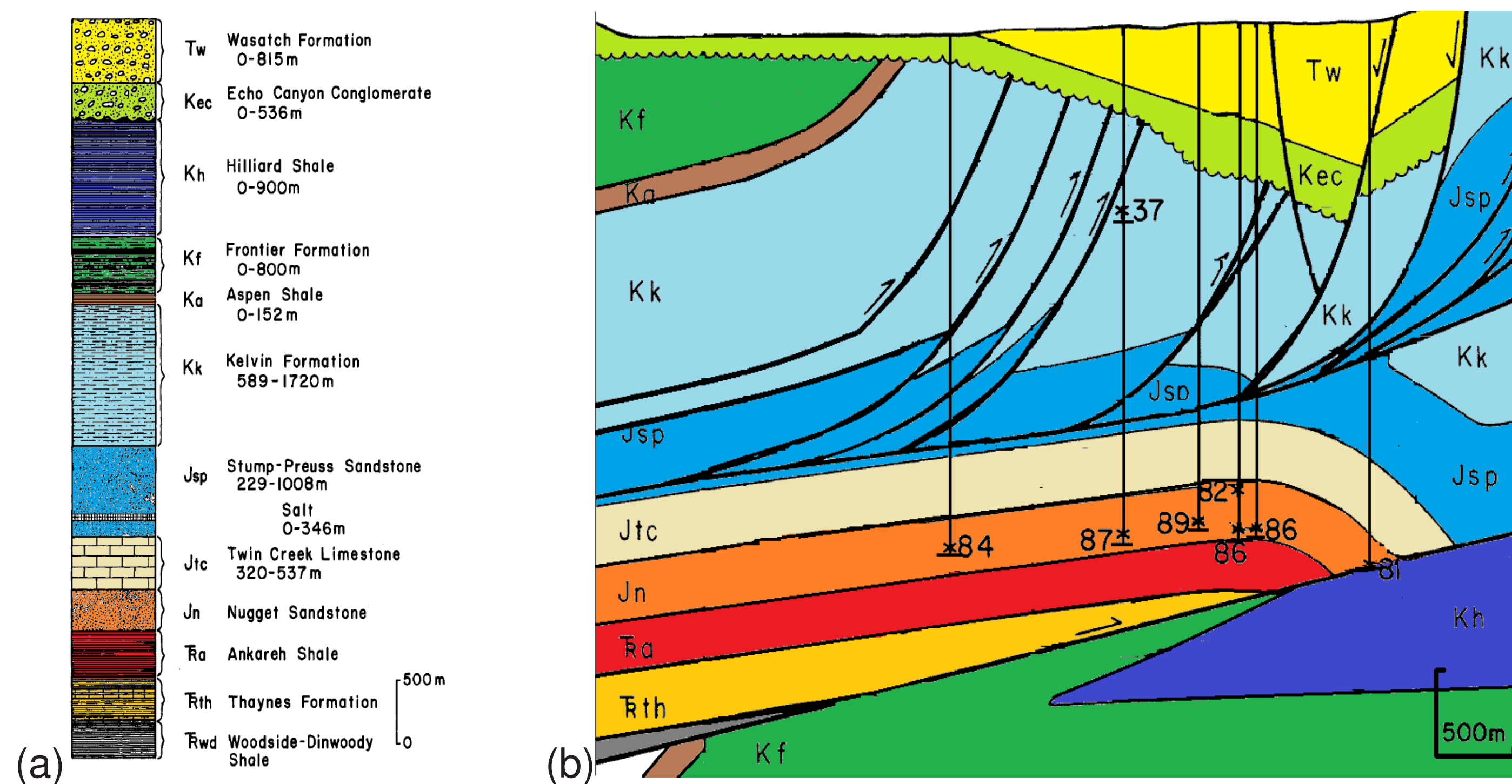


Figura 5. Em (a) e (b), respectivamente têm-se uma coluna estratigráfica e uma seção geológica demonstrativa do Campo de Pineview, adaptado de Deming e Chapman (1988).

Resultados

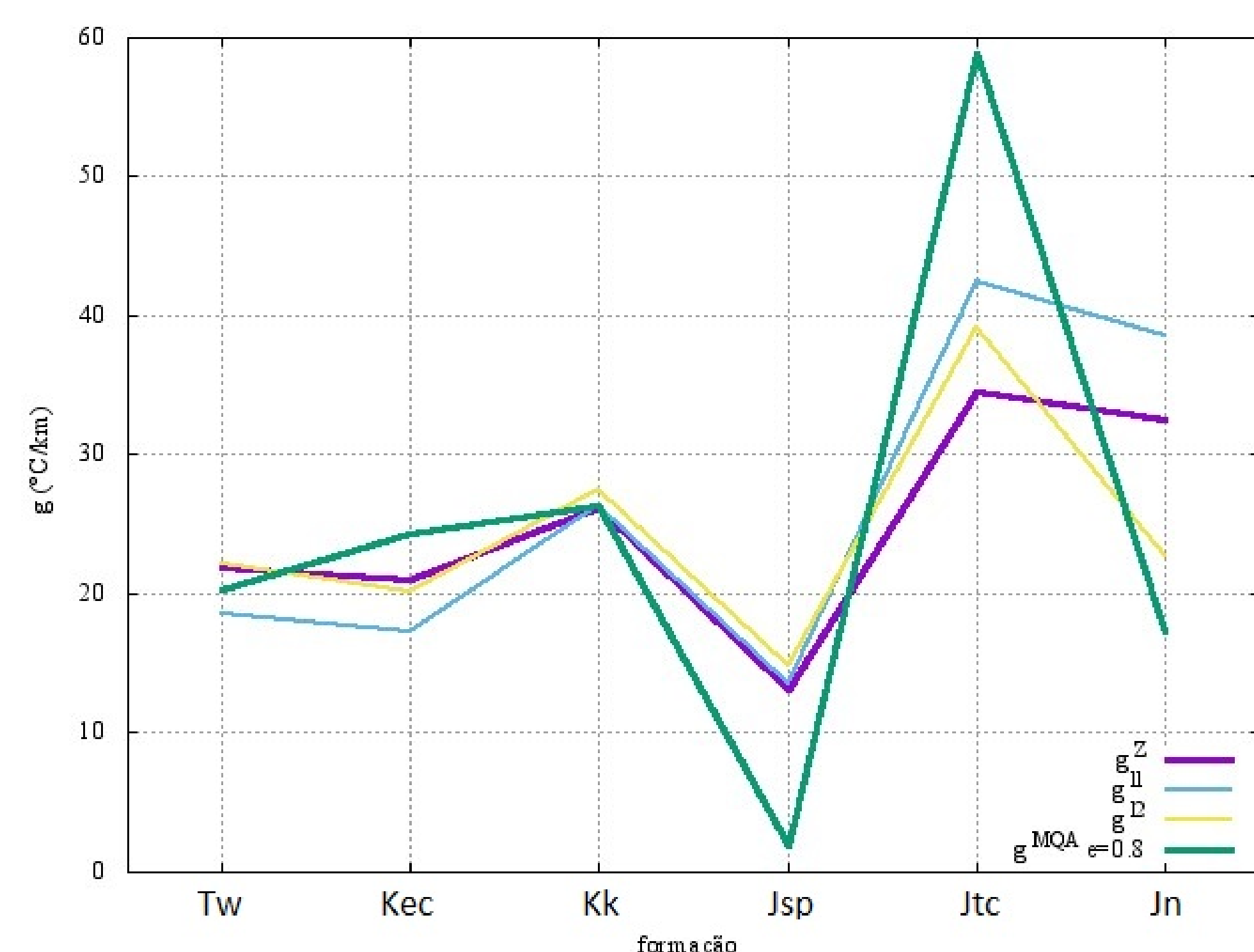


Figura 6. Estimativas dos gradientes das formações de Pineview com o método SVD para as matrizes \mathbf{Z} e $(\mathbf{Z}^T\mathbf{Z} + e^2\mathbf{I})$ realizadas neste trabalho e as estimativas de gradientes com o inverso utilizando norma $l1$ e $l2$ determinadas em Deming e Chapman (1988).

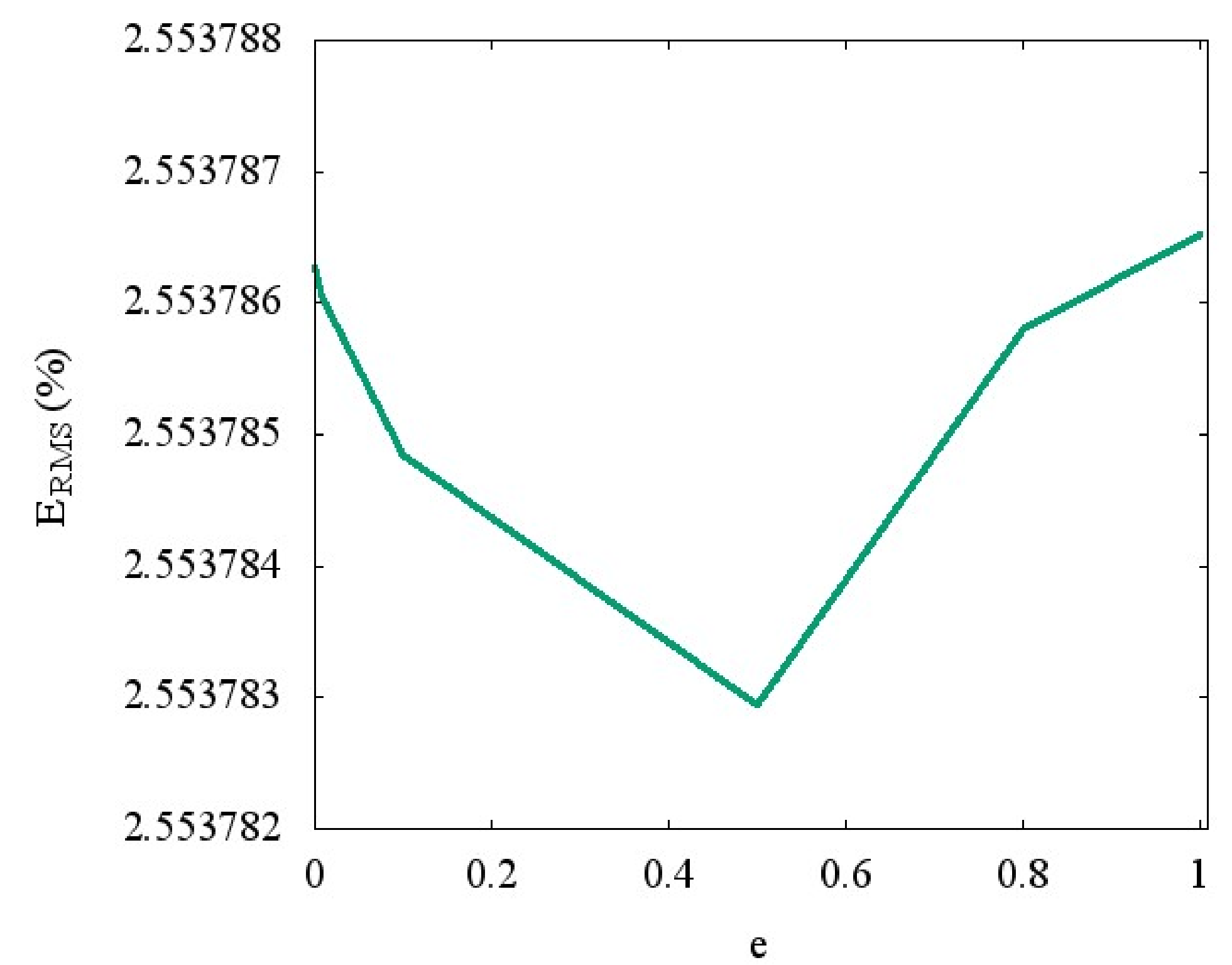


Figura 7. Erro RMS entre o dado observado e calculado em relação a escolha do fator de amortecimento. $e = 0.8$ resulta no menor E_{RMS} entre os dados.

Conclusões

- O resultado obtido na inversão apresentam valores coerentes do ponto de vista físico e semelhantes aos encontrados por Deming e Chapman (1988), na determinação dos gradientes para as formações **Tw**, **Kec**, **Kk**, **Jtc** e **Jn**, Figura 6.
- O gradiente para formação **Jsp** apresentou-se com um valor relativamente baixo, isso pode ser justificado pela presença de uma camada de Sal no meio da formação **Jsp**. O Sal está entre as rochas mais condutivas das bacias sedimentares o que é explicado pela sua baixa porosidade e consequente ausência de fluido de saturação.
- A utilização do Método MQA permitiu encontrar a melhor solução baseado no erro RMS entre os dados observados e calculados oriundos de Pineview. A melhor solução para o gradiente foi utilizando o fator $e = 0.8$.

Referencias

- Deming, D., Chapman, S. D., 1988. Inversion of Bottom-hole Temperature data: The Pineview field, Utah-Wyoming thrust belt. Geophysics, 53: 707-720.
- Lachenbruch, A. H., Brewer, M. C., 1959. Dissipation of the temperature effect of drilling a well in Arctic Alaska. U. S. Geol. Survey Bull., 1083-C: 73-109.