



# Estimativa de anisotropia local de dados de onda P em experimentos de VSP multiazimutal

Adriano C. R. Barreto<sup>1</sup>, Raiza de N. A. Macambira<sup>1</sup>, Ellen N. S. Gomes<sup>2</sup> e Ivan Pšenčík<sup>3</sup>

(1) Faculdade de Geofísica- UFFa, (2) INCT-GP, UFFa, (3) Institute of Geophysics, Acad. Sci. of Czech Republic.

Copyright 2011, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica.

This paper was prepared for presentation at the Twelfth International Congress of the Brazilian Geophysical Society, held in Rio de Janeiro, Brazil, August 15-18, 2011.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the Twelfth International Congress of The Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of The Brazilian Geophysical Society is prohibited.

## Abstract

**Inversion scheme for the local determination of anisotropy from P-wave data obtained during a multi-azimuth multiple-source VSP experiment is studied. The inversion is based on an approximate formula relating linearly weakly anisotropic (WA) parameters describing the medium at a receiver and the vertical components of slowness vectors and complete polarization vectors measured at the same point. The optimum choices of the reference isotropic medium and of the unit normal of the wave in the reference medium are presented. Efficiency of the inversion scheme, stability and sensitivity of its results with respect to varying number of profiles, types of used waves (direct and/or reflected) and noise levels are analyzed. It is also shown that although only P-wave data are used, it is possible to estimate the orientation of the axis of symmetry of a TI medium from estimated parameters.**

## Introdução

É estudada a sensibilidade e a estabilidade do esquema de inversão dos dados de ondas P medidos em experimentos de VSP multiazimutal. A partir dessa inversão é estimada a anisotropia local para meios anisotrópicos arbitrários. O esquema apresentado não depende da estrutura do meio acima do geofone e nem da forma do poço (direcional ou curvado, vertical e inclinado) ou da forma como as fontes são distribuídas na superfície. A inversão é baseada na aproximação de primeira ordem de Zheng & Pšenčík (2002), que relaciona os parâmetros de fraca anisotropia do meio na vizinhança de um receptor com os vetores de polarização e as componentes verticais dos vetores de vagarosidade de ondas P medidos em experimento VSP. Para estimar a anisotropia são apresentados testes numéricos que foram considerados vários fatores, tais como o tipo de onda (direta ou refletida), grau de anisotropia e nível de ruído nos dados observados. As matrizes estão representadas por letras maiúsculas e os vetores são representados por letras minúsculas, ambos em negrito. Utiliza-se também a notação indicial e a conversão da soma.

## Fundamentos Teóricos

### Relação entre dados observados e os parâmetros do meio

Consideremos um sistema de coordenadas cartesiano  $(x_1, x_2, x_3)$ , com eixo  $x_3$  positivo na direção que aponta de cima para baixo. O poço é paralelo ao eixo  $x_3$ . Para determinar os parâmetros de fraca anisotropia, usamos a equação (1) de Gomes et al., 2004:

$$D(\alpha^2 - \beta^2)^{-1} B_{13} - \frac{1}{2} \alpha^{-1} \eta B_{33} = D g_i e_i^{(1)} + \alpha \Delta \eta, \quad (1)$$

em que,  $D = \sqrt{n_1^2 + n_2^2}$ , é a projeção na horizontal do vetor  $\mathbf{n}$ ;  $\mathbf{n} = (n_1, n_2, n_3)$  é o vetor normal à frente da onda P no meio isotrópico da referência. Os símbolos  $\alpha$  e  $\beta$  são as velocidades das ondas P e S, respectivamente, no meio isotrópico de referência;  $g_i$  é o  $i$ -ésima componente do vetor de polarização observado;  $\Delta \eta = p_3^{obs} - \eta$  é a diferença entre as componentes verticais do vetor de vagarosidade observado,  $p_3^{obs}$ , é o vetor de vagarosidade no meio isotrópico de referência,  $\eta = n_3/\alpha$ ; os vetores  $\mathbf{e}^{(1)}$ ,  $\mathbf{e}^{(2)}$  e  $\mathbf{e}^{(3)} = \mathbf{n}$  são os vetores unitários, mutualmente perpendiculares. Os vetores  $\mathbf{e}^{(1)}$  e  $\mathbf{e}^{(3)}$  estão confinados no plano vertical que contém o perfil estudado. Os vetores  $\mathbf{e}^{(1)}$ ,  $\mathbf{e}^{(2)}$  e  $\mathbf{e}^{(3)}$  são definidos da seguinte forma (Pšenčík & Gajewski, 1998):

$$\begin{aligned} \mathbf{e}^{(1)} &= D^{-1}(n_1 n_3, n_2 n_3, n_3^2 - 1), \\ \mathbf{e}^{(2)} &= D^{-1}(-n_2, n_1, 0), \quad \mathbf{e}^{(3)} = (n_1, n_2, n_3). \end{aligned}$$

$B_{mn}$ ,  $m, n=1,2,3$ , são elementos da matriz de fraca anisotropia. Esta é uma projeção da matriz de Christoffel nos vetores  $\mathbf{e}^{(k)}$  e os elementos são dados por:

$$B_{mn} = \Delta a_{ijkl} e_i^{(m)} e_j^{(3)} e_l^{(3)} e_k^{(n)}. \quad i, j, k, l = 1, 2, 3 \quad (2)$$

O termo  $\Delta a_{ijkl}$  visto na equação acima representa a diferença entre os parâmetros elásticos normalizados pela densidade no meio anisotrópico e os parâmetros elásticos normalizados pela densidade no meio isotrópico de referência. Os elementos da matriz  $\mathbf{B}$  dependem dos parâmetros WA (weak anisotropy) procurados, ver Zheng & Pšenčík (2002) e Gomes(2003).

### Matriz de sensibilidade

A equação (1) pode ser escrita na forma matricial como segue:

$$\mathbf{Mw} = \mathbf{y}. \quad (3)$$

Em (3),  $\mathbf{y}$  é o vetor das observações de dimensão  $N_{obs}$  (número de observações) e é formado pelo lado direito

da equação (1). A matriz  $\mathbf{M} = \mathbf{M}(\alpha, \beta, \mathbf{n})$  é uma matriz de ordem  $N_{obs} \times N_{par}$  e é conhecida como matriz de sensibilidade. Ela depende dos parâmetros do meio de referência (velocidades das ondas P e S e vetor normal à frente de onda P,  $\mathbf{n}$ ), da geometria do levantamento e dos parâmetros WA a serem estimados. Uma análise desta matriz quanto a escolha destes parâmetros é feita em Macambira (2010). O vetor  $\mathbf{w}$  possui dimensão  $N_{par}$  (número de parâmetros) e é constituído pelos parâmetros WA. No caso da onda P o vetor  $\mathbf{w}$  é formado por:

$$\begin{aligned} w_1 &= \varepsilon_x & w_2 &= \varepsilon_y & w_3 &= \varepsilon_z & w_4 &= \delta_x \\ w_5 &= \delta_y & w_6 &= \delta_z & w_7 &= \chi_x & w_8 &= \chi_y \\ w_9 &= \chi_z & w_{10} &= \varepsilon_{15} & w_{11} &= \varepsilon_{16} & w_{12} &= \varepsilon_{24} \\ w_{13} &= \varepsilon_{26} & w_{14} &= \varepsilon_{34} & w_{15} &= \varepsilon_{35}. \end{aligned} \quad (4)$$

A relação entre os parâmetros WA e os parâmetros elásticos normalizados pela densidade é dada em Zheng & Pšenčík (2002) e Gomes (2003).

### Inversão

No problema inverso, os parâmetros WA são estimados determinando-se que valores do vetor  $\mathbf{w}$  minimizam a função de mínimos quadrados dada por:

$$\Phi = \left\| \sum_{i=1}^{N_{obs}} (y_i - M_{ij} \bar{w}_j) \right\|_2. \quad (5)$$

O subscrito 2 refere-se a norma euclidiana,  $\bar{w}_j$  são as estimativas dos parâmetros WA e  $y_i$  representa as componentes do vetor das observações. Para se estimar o vetor  $\mathbf{w}$  é necessário que toda a matriz  $\mathbf{M}$  seja conhecida e, portanto, que os parâmetros do meio de referência ( $\alpha, \beta, \mathbf{n}$ ) sejam conhecidos.

### Parâmetros do meio isotrópico de referência ( $\alpha, \beta$ e $\mathbf{n}$ )

Existem diversas formas de se determinar os parâmetros do meio de referência que são discutidas em Macambira (2010). Nos testes deste trabalho optou-se por calcular a velocidade da onda P através da relação  $\alpha p_3^{(i)} = g_3^{(i)}$ , sendo os valores  $p_3^{(i)}$  e  $g_3^{(i)}$  as componentes verticais dos vetores de vagariedade e polarização, respectivamente, gerados pela  $i$ -ésima fonte. Deste modo a velocidade  $\alpha$  no meio de referência pode então ser estimada a partir da inversão da relação acima por mínimos quadrados para o número total de observações  $N_{obs}$ . Para meios fracamente anisotrópicos, esta é uma boa aproximação a ser feita para a velocidade da onda P no meio isotrópico de referência. Quanto à velocidade da onda S, esta foi calculada através da razão de Poisson,  $\beta = \alpha/\sqrt{3}$ . Com relação à escolha do vetor  $\mathbf{n}$ , este foi considerado igual ao vetor de polarização observado ( $\mathbf{g}$ ), logo,  $\mathbf{n} = \mathbf{g}$ . Como consequência temos  $\mathbf{g}e^{(1)} = 0$ , e a equação (1) simplifica.

### Testes Numéricos

Nos testes apresentados, foram utilizados dados de ondas P diretas e refletidas adquiridos em um experimento de VSP walkaway multiazimutal (ver Figura 1), em que 18 fontes estão distribuídas em perfis na superfície. Treze receptores estão no interior do poço, com o receptor mais raso na profundidade de 0,1 km e o espaçamento entre eles de 0,05 km. Nos dados sintéticos utilizados neste

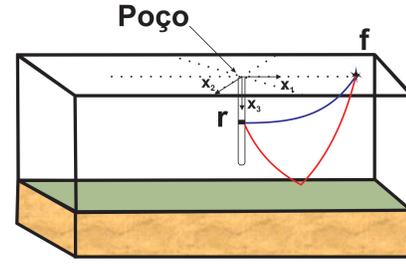


Figure 1: Experimento de VSP walkaway multiazimutal. Fontes (f) localizadas na superfície distribuídas em vários perfis (linhas pontilhadas) e receptor (r) no poço. Foram utilizados dados de ondas P diretas (azul) e refletidas (vermelho).

trabalho, a componente vertical do vetor de vagariedade e o vetor de polarização de ondas P diretas e refletidas, foram gerados usando o pacote de traçamento de raio ANRAY (Gajewski & Pšenčík, 1990) em um modelo formado por dois meios separados por uma interface plana situada a 5 km. O meio adjacente é anisotrópico. O topo era inicialmente um TIV, com os parâmetros elásticos normalizados pela densidade, em  $(km/s)^2$ , dados por  $A_{11} = 15,71$ ,  $A_{13} = 4,46$ ,  $A_{33} = 13,39$ ,  $A_{44} = 4,98$  e  $A_{66} = 5,33$ . O eixo de simetria do TIV foi rotacionado de  $\theta = 80^\circ$  em relação ao eixo  $x_2$  e em seguida, rotacionado de  $\phi = 25^\circ$  em relação ao eixo  $x_3$ , sendo agora um TTI. A base desse meio era inicialmente um TIV cujo parâmetros elásticos normalizados pela densidade em  $(km/s)^2$  são dado por  $A_{11} = 35,35$ ,  $A_{13} = 10,03$ ,  $A_{33} = 30,13$ ,  $A_{44} = 11,20$  e  $A_{66} = 11,99$ . O eixo de simetria foi rotacionado de  $\theta = 90^\circ$  em relação ao eixo  $x_2$  (tem-se agora um TIH). Desse modo, temos um meio anisotrópico com gradiente vertical. A anisotropia do meio incidente é de aproximadamente 8%, o que caracteriza o modelo como sendo fracamente anisotrópico. O meio subjacente é isotrópico, cujas velocidades das ondas P e S são  $\alpha = 4,76$  km/s e  $\beta = 2,76$  km/s, respectivamente. Este modelo surgiu da modificação dos modelos usados em Zheng & Pšenčík (2002). A estabilidade das estimativas foi avaliada através de simulação numérica e foi feita de forma que cada observação obtida através do pacote ANRAY fosse contaminada com ruído Gaussiano gerado por 100 diferentes sementes. A partir de cada uma das 100 observações contaminadas, foi estimada a velocidade  $\alpha$  e os parâmetros WA. Em seguida determinou-se a média e o desvio padrão dessas estimativas. Não foram usados estabilizadores na inversão, pois o número de condição da matriz de sensibilidade para os testes apresentados neste trabalho era da ordem de  $10^2$ . Assim consideramos que o problema é estável.

### Resultados

Os resultados das estimativas dos parâmetros WA serão apresentados na forma de projeções estereográficas do quadrado da velocidade de fase calculada a partir da fórmula de primeira ordem em Pšenčík & Farra (2005):

$$\begin{aligned} c^2(x_m, n_m) &= \alpha^2 (1 + 2[2n_3^3(\varepsilon_{34}n_2 + \varepsilon_{35}n_1) + n_3^2(\eta_y n_1^2 + \eta_x n_2^2 \\ &\quad + 2\chi_z n_1 n_2 + \varepsilon_z) + 2n_3(\chi_x n_1^2 n_2 + \chi_y n_1 n_2^2 + \varepsilon_{15} n_1^3 + \varepsilon_{24} n_2^3) \\ &\quad + \varepsilon_x n_1^2 + \varepsilon_y n_2^2 + \eta_z n_1^2 n_2^2 + 2\varepsilon_{16} n_1^3 n_2 + 2\varepsilon_{26} n_1 n_2^3]). \end{aligned} \quad (6)$$

Em que:

$$\eta_x = \delta_y - \varepsilon_y - \varepsilon_z; \quad \eta_y = \delta_x - \varepsilon_x - \varepsilon_z; \quad \eta_z = \delta_z - \varepsilon_x - \varepsilon_y. \quad (7)$$

Serão mostrados três tipos de projeções estereográficas:  
 1) O quadrado da velocidade de fase,  $c^2$ , calculado a partir dos parâmetros WA exatos<sup>1</sup>;  
 2) O quadrado da velocidade de fase,  $c^2$ , calculado a partir dos parâmetros WA estimados. A velocidade de fase calculada dessa forma será chamada de estimada;  
 3) O erro percentual entre os dados dos itens 2) e 1).  
 Os testes foram feitos considerando: o número de perfis, nos quais os dados foram adquiridos o nível de ruído adicionado aos dados de vagarosidade e polarização; tipo de onda P utilizada na inversão (direta e refletida).

*Número de perfis*

São apresentados os resultados obtidos para 2 e 5 perfis, para dois receptores: o receptor 1, mais raso (0,1 km de profundidade) e o receptor 13, mais profundo (0,7 km de profundidade). O nível de ruído considerado nos dados foi aplicado da seguinte forma: para os dados de onda direta, considerou-se o desvio padrão do ruído igual a 5% dos dados da componente vertical da vagarosidade observada e quanto a polarização, um erro que muda em até 1° a sua direção. Para os dados de ondas refletidas adotou-se o dobro desses valores. Os resultados considerando medidas em 2 e 5 perfis são discutidos a seguir. Para medidas ao longo de dois perfis, o melhor resultado é obtido para perfis perpendiculares. Os estereogramas da velocidade de fase exata, estimada e o erro percentual para perfis perpendiculares são mostrados a seguir.

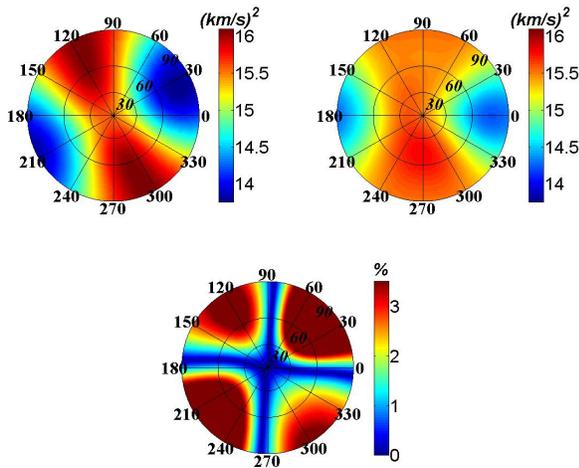


Figure 2: Inversões obtidas para o receptor 1. Aquisição dos dados feita em 2 perfis. O valor do quadrado da velocidade de fase é calculado a partir dos parâmetros WA exatos (à esquerda), a partir dos parâmetros WA estimados (à direita) e o erro percentual (embaixo).

De acordo com o erro percentual mostrado na Figura 2, o melhor ajuste para o receptor 1 ocorre na direção em que

<sup>1</sup>Ainda que a (6) seja uma aproximação, chamaremos a velocidade de fase calculada dessa forma de exata.

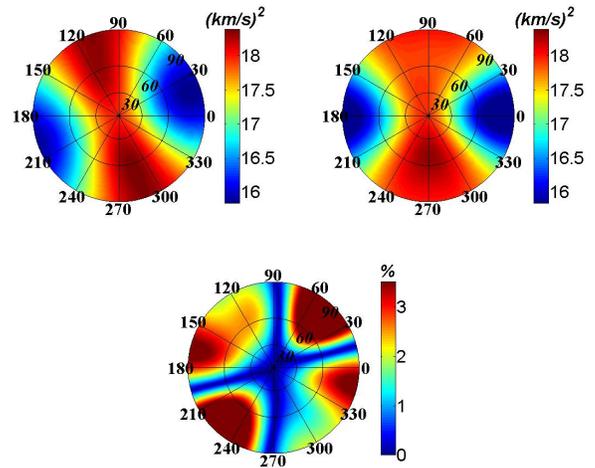


Figure 3: Inversões obtidas para o receptor 13. Aquisição dos dados feita em apenas 2 perfis. O valor do quadrado da velocidade de fase é calculado a partir dos parâmetros WA exatos (à esquerda), a partir dos parâmetros WA estimados (à direita) e o erro percentual (embaixo).

foram feitas as duas medidas, que neste caso foram  $\phi = 0^\circ$  e  $\phi = 90^\circ$ . Em outras direções, o erro chega a ser até de 3,5% do valor exato.

Considerando os resultados das inversões obtidos para o receptor 13 (Figura 3), verifica-se também que para estimativas em dois perfis, o melhor ajuste ocorre nas direções perpendiculares; as medidas foram realizadas para  $\phi = 0^\circ$  e  $\phi = 90^\circ$ , ver erro percentual na Figura 3. Percebe-se na aquisição com dois perfis, comparando os resultados para ambos os receptores, que as estimativas para o receptor 13 são melhores do que as estimativas para o receptor 1. Isto se deve ao fato de que a área de iluminação no receptor 13 é maior que a área de iluminação do receptor 1. De acordo com esse resultado, verifica-se que dados medidos em apenas dois perfis são insuficientes para a estimativa dos parâmetros WA. Isso está de acordo com a observação feita por Pšenčík & Gajewski (1998) e Gomes (2003) que com dois perfis podemos achar somente 9 parâmetros WA. De acordo com a análise de sensibilidade em Gomes (2003), com 5 perfis é possível obter todos os 15 parâmetros WA quaisquer que sejam as direções escolhidas desde que estas não sejam paralelas. Foi verificado ainda que as estimativas são melhoradas quando a aquisição é realizada em perfis regularmente espaçados (Barreto, 2010; Macambira, 2010). Para 5 perfis regularmente espaçados nas direções  $\phi = 0^\circ$ ,  $\phi = 72^\circ$ ,  $\phi = 144^\circ$ ,  $\phi = 216^\circ$  e  $\phi = 288^\circ$ , os estereogramas da velocidade de fase exata, estimada e o erro percentual são mostrados nas Figuras 4 e 5 para os receptores 1 e 13.

Para o receptor 1, comparado com as estimativas anteriores (2 perfis), nota-se que as estimativas obtidas a partir de 5 perfis são melhores (ver Figuras 2 e 4). Para o receptor 13, da mesma forma que para os resultados obtidos em 2 perfis, os resultados são ainda melhores do que para o receptor 1, apresentando erro em algumas regiões próximas de zero (ver Figuras 3 e 5 embaixo).

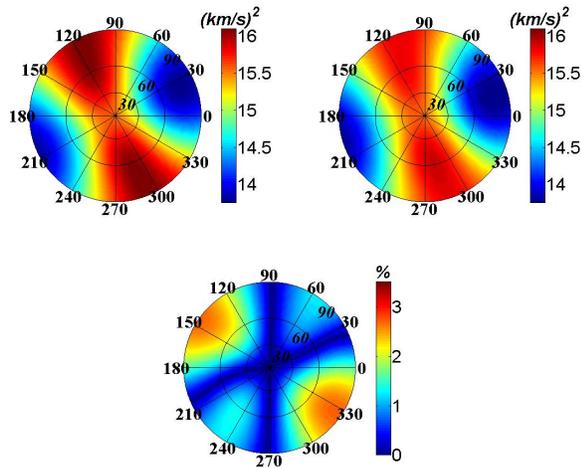


Figure 4: Inversões obtidas para o receptor 1. Aquisição dos dados feita em 5 perfis regularmente espaçados. O valor do quadrado da velocidade de fase é calculado a partir dos parâmetros WA exatos (à esquerda), a partir dos parâmetros WA estimados (à direita) e o erro percentual (embaixo).

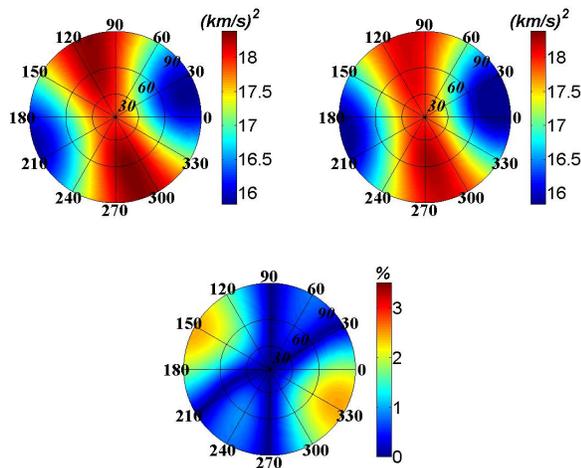


Figure 5: Inversões obtidas para o receptor 13. Aquisição feita em 5 perfis regularmente espaçados. O valor do quadrado da velocidade de fase é calculado a partir dos parâmetros WA exatos (à esquerda), a partir dos parâmetros WA estimados (à direita) e o erro percentual (embaixo).

De acordo com as Figuras mostradas anteriormente, tem-se que: a medida que o número de perfis aumenta as estimativas melhoram e os melhores resultados são obtidos a partir de dados medidos em cinco perfis regularmente espaçados e para receptores mais profundos.

#### Nível de ruído

A estabilidade das estimativas foi avaliada através de simulação numérica e foi feita de forma que cada observação obtida através do pacote ANRAY fosse contaminada com ruído Gaussiano gerado por 100

diferentes sementes. A partir de cada uma das 100 observações contaminadas foi estimada a velocidade  $\alpha$  e os parâmetros WA. Em seguida determinou-se a média e o desvio padrão dessas estimativas. Nos testes apresentados admitiu-se que para as ondas diretas: a componente vertical da vagarosidade foi contaminada com ruído cujo desvio padrão era de um percentual do valor observado e a polarização foi contaminada com um ruído que modificava a direção de polarização de até um determinado ângulo; para ondas refletidas considerou-se o dobro dos valores das ondas diretas. Foi então analisado o comportamento das estimativas dos parâmetros WA na presença de quatro diferentes níveis de ruído apresentados na Tabela 1. O objetivo de aplicar os ruídos 2 e 3 é verificar como as estimativas dos parâmetros WA se comportam quando o ruído aumenta na vagarosidade ou na polarização.

| Tipo de ruído | Desvio padrão | Ângulo |
|---------------|---------------|--------|
| Ruído 1       | 5%            | 1°     |
| Ruído 2       | 5%            | 2°     |
| Ruído 3       | 10%           | 1°     |
| Ruído 4       | 10%           | 2°     |

Table 1: Tabela com tipo de ruído aplicado as ondas diretas. O desvio padrão, refere-se ao ruído aplicado a contaminação da componente vertical da vagarosidade ( $p_3$ ). O ângulo, modificação na direção de polarização após aplicação do ruído.

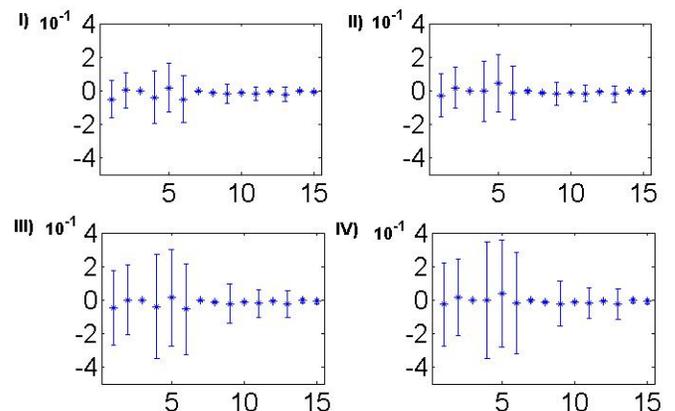


Figure 6: Estimativas e variações dos parâmetros WA para os quatro níveis de ruído, 1, 2, 3 e 4, que contaminam os dados medidos no receptor 1.

As Figuras 6 e 7 mostram as estimativas e variações dessas estimativas (desvio padrão) obtidas para dados em 5 perfis regularmente espaçados, para os receptores 1 e 13 considerando os quatro níveis de ruído. O eixo horizontal apresenta a numeração dos parâmetros WA conforme a organização do vetor  $w$  na equação (4) e o eixo vertical mostra o valor das estimativas dos parâmetros WA. As barras indicam o desvio padrão dessas estimativas. A partir da análise das figuras, nota-se que nove parâmetros apresentam menor variação, sendo eles:  $\epsilon_z$ ,  $\chi_x$ ,  $\chi_y$ ,  $\epsilon_{15}$ ,  $\epsilon_{16}$ ,  $\epsilon_{24}$ ,  $\epsilon_{26}$ ,  $\epsilon_{34}$  e  $\epsilon_{35}$ .

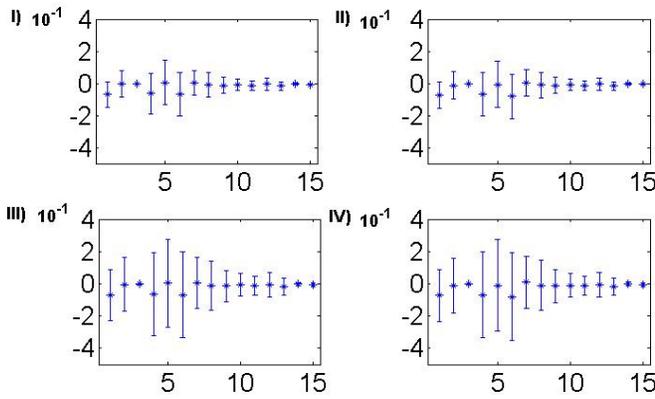


Figure 7: Estimativas e variações dos parâmetros WA para os quatro níveis de ruído, 1, 2, 3 e 4, que contaminam os dados medidos no receptor 13.

Percebe-se ainda que as estimativas são mais sensíveis ao ruído aplicado nos dados de vagarosidade do que na polarização. Além disso, as estimativas de uma maneira geral oscilam mais no receptor 13 do que no receptor 1, o que provoca uma maior contaminação dos dados no receptor 13.

*Tipo de onda utilizada*

Foram feitos testes em que se utilizou na inversão apenas ondas P diretas. A geometria de aquisição considerada foi de 5 perfis regularmente espaçados, pois esta configuração apresentou os melhores resultados. O nível de ruído usado foi o ruído 1. Estas estimativas foram comparadas com as estimativas obtidas com a mesma geometria, mas considerando ondas P diretas e refletidas. O nível de ruído considerado nas ondas refletidas foi o dobro do ruído das ondas diretas. Para o receptor 1, os erros percentuais para os dois tipos de inversão feitos são mostrados na Figura 8.

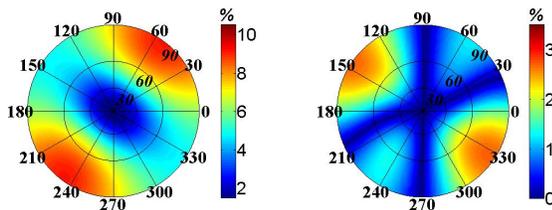


Figure 8: Erros percentuais das estimativas para o receptor 1 com a geometria de 5 perfis regularmente espaçados. À esquerda, o erro percentual para inversão utilizando dados de apenas ondas P diretas e à direita, para inversão utilizando dados de ondas P diretas e refletidas.

De acordo com a Figura 8, verifica-se que a melhor estimativa acontece quando são consideradas ondas P diretas e refletidas, ainda que para a onda refletida o nível de ruído seja maior do que o aplicado as ondas diretas. O erro, considerando as estimativas obtidas pela inversão de ondas diretas e refletidas é inferior a 3%, enquanto que, o

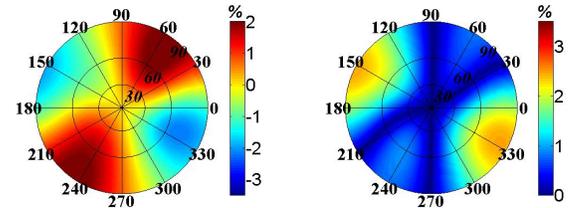


Figure 9: Erros percentuais das estimativas para o receptor 13 com a geometria de 5 perfis regularmente espaçados. À esquerda, o erro percentual para inversão utilizando dados de apenas ondas P diretas e à direita, para inversão utilizando dados de ondas P diretas e refletidas.

erro considerando a inversão apenas com ondas P diretas possuem valor superior a 10% em algumas direções. Considerando as inversões feitas para o receptor 13, os erros percentuais são mostrados na Figura 9. Para o receptor 13, de acordo com a Figura 9, a melhor estimativa acontece quando são consideradas ondas P diretas e refletidas, ainda que para a onda refletida tenha-se considerado o dobro do ruído aplicado as ondas diretas. Nota-se ainda que, quando comparado com os resultados obtidos para o receptor 1, o resultado para o receptor 13 é melhor. Este fato se deve a melhor iluminação na profundidade do receptor 13. E ainda considerando este receptor, nota-se que foi possível colocar os dois erros na mesma faixa de variação, de -3,5% a 2%, sem perda de informação. O mesmo não foi possível para os erros no receptor 1.

*Orientação do eixo de simetria*

O meio utilizado nos testes aqui apresentados se caracteriza por ser um meio TI. Uma informação importante que pode ser estimada qualitativamente a partir dos estereogramas do quadrado da velocidade de fase, diz respeito à orientação do eixo de simetria do meio. No receptor 1 (ver Figura 10), o eixo de simetria possui a seguinte orientação: azimute de  $\phi = 24^\circ$  e inclinação de  $\theta = 80,5^\circ$ , enquanto que para o receptor 13 (ver Figura 11), o eixo de simetria apresenta azimute de  $\phi = 18^\circ$  e inclinação de  $\theta = 83^\circ$ <sup>2</sup>. São mostradas nas Figuras 10 e 11, o quadrado da velocidade de fase calculada a partir dos parâmetros WA com azimute a cada  $10^\circ$  e a inclinação a cada  $15^\circ$ , com objetivo de ajudar na observação da orientação do eixo de simetria. Os estereogramas do quadrado da velocidade de fase calculada a partir dos parâmetros WA estimados também são mostrados nas Figuras 10 e 11. De acordo com a metodologia atualmente utilizada (Helbig, 1994), para se estimar a orientação do eixo de simetria faz-se necessário o conhecimento de alguns parâmetros elásticos que não aparecem nas estimativas do parâmetros WA realizada a partir de ondas P, é o caso por exemplo dos parâmetros  $A_{14}$ ,  $A_{45}$  e  $A_{36}$ . Dessa forma, de acordo com as Figuras 10 e 11, ainda que não se conheça esses parâmetros, é possível se ter uma noção sobre a orientação do eixo de

<sup>2</sup>Os valores de azimute e inclinação para o eixo de simetria do meio considerado foram calculados a partir dos parâmetros WA exatos de acordo com Helbig (1994)

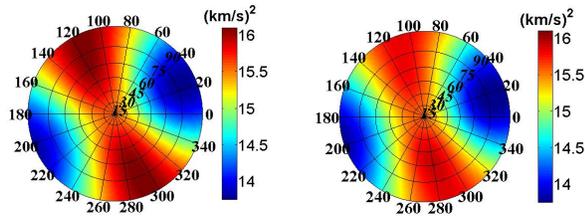


Figure 10: Estereogramas com o quadrado da velocidade de fase para 5 perfis regularmente espaçados obtidos das inversões para o receptor 1. Estereograma calculado a partir dos parâmetros WA exatos (esquerda) e parâmetros WA estimados (direita).

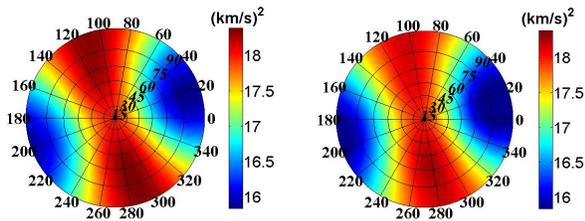


Figure 11: Estereogramas com o quadrado da velocidade de fase para 5 perfis regularmente espaçados obtidos das inversões para o receptor 13. Estereograma calculado a partir dos parâmetros WA exatos (esquerda) e parâmetros WA estimados (direita).

simetria de um meio TI a partir da análise do estereograma do quadrado da velocidade de fase obtida a partir dos parâmetros WA estimados.

### Discussões e Conclusões

Neste trabalho foi realizada uma análise do esquema de inversão que determina localmente os parâmetros WA de um meio anisotrópico utilizando dados sintéticos de vagarosidade e polarização. Os dados de polarização e vagarosidade de ondas P diretas e refletidas foram gerados diretamente do pacote do programa ANRAY (Gajewski & Pšenčík, 1990) e contaminados com ruído de forma distinta. O esquema de inversão utilizado neste trabalho é uma aproximação de primeira ordem da fórmula entre os parâmetros WA e os dados de vagarosidade e polarização em torno de um meio isotrópico de referência. Nos testes numéricos, uma análise da estabilidade das estimativas dos parâmetros WA para um meio TI foi realizada através de simulação numérica. Pelo fato de se escolher o vetor normal à frente de onda P no meio isotrópico de referência,  $\mathbf{n}$ , igual ao vetor de polarização observada, a matriz  $\mathbf{M}$  (equação (3)) também é influenciada pelo nível de ruído aleatório. Nas simulações numéricas foi mostrado como as estimativas dos parâmetros WA se comportam quanto ao número de perfis utilizados na aquisição, quanto ao nível de ruído nos dados e quanto ao tipo de onda utilizada na inversão. Verificou-se que quanto maior o número de perfis usados na aquisição dos dados, melhor as estimativas dos parâmetros WA, os melhores resultados são obtidos para cinco perfis regularmente espaçados. Verificou-se ainda que: as estimativas são mais sensíveis ao nível de

ruído nos dados de vagarosidade que nos dados de polarização. Os parâmetros perdem resolução se só onda P é usada, em comparação à inversão realizada com dados de ondas P diretas e refletidas. Por fim, é mostrado ainda que através do estereograma do quadrado da velocidade de fase calculada a partir das estimativas dos parâmetros WA é possível para um meio TI, apenas com os 15 parâmetros WA que surgem para o caso de onda P, estimar a orientação do eixo de simetria para esse meio. Vale ressaltar que não seria possível obter tal estimativa utilizando a metodologia em geral usada atualmente (Helbig, 1994).

### Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico (CNPq) e ao projeto do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia Geofísica do Petróleo (INCT-GP) pelo apoio financeiro muito importante no desenvolvimento deste trabalho e a Faculdade de Geofísica da UFFa pela estrutura oferecida. Os autores também agradecem o apoio do consórcio SW3D e o projeto GACR 210/11/0117.

### Referências

- Barreto, A. C. R. Inversão de dados de ondas qP em VSP multiazimutal para a estimativa de anisotropia local. [S. l.]: TCC, Faculdade de Geofísica, UFFa, 2010.
- Gomes, E. N. S. Estimativa de parâmetros elásticos em meios anisotrópicos. Tese de Doutorado. Curso de Pós-Graduação em Geofísica. Universidade Federal do Pará - UFFa, 2003.
- Gomes, E., Zheng, X. & Pšenčík, I., Horne, S. & Leaney, S., 2004. Local determination of weak anisotropy parameters from a walkaway VSP qP-wave data in the Java Sea region. *Stud. Geophys. Geod.* 48: 215-231.
- Gajewski, D. & Pšenčík, I. 1990. Seismic profile synthetics by dynamic ray tracing in laterally varying layered anisotropic structures. *J. Geophys. Res.* 95: 11301-11315.
- Helbig, K. *Foundations of Anisotropy for Exploration Seismics*. [S.l.]: Oxford, Pergamon. Handbook of Geophysical Exploration, 22, 1994.
- Horne, S. A. & Leaney, W. S., 2000. Polarization and slowness component inversion for TI anisotropy. *Geophysical Prospecting*. 48: 779-788.
- Macambira, R. N. A. Análise de sensibilidade do esquema de inversão de dados de ondas qP em experimentos de VSP walkaway multiazimutal [S. l.]: TCC, Faculdade de Geofísica, UFFa, 2010.
- Pšenčík, I. & Farra, V., 2005. First-order ray tracing for qP waves in inhomogeneous weakly anisotropic media. *Geophysics*, 70: D65-D75.
- Pšenčík, I. & Gajewski, D., 1998. Polarization, phase velocity and NMO velocity of qP waves in arbitrary weakly anisotropic media, *Geophysics*, 63: 1754-1766.
- Zheng, X. & Pšenčík, I., 2002. Local determination of weak anisotropy parameters from qP-wave slowness and particle motion measurements. *Pure and Applied Geophysics*, 159: 1881-1905.