



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE
PETRÓLEO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**FILTRO KL/DVS PARA ATENUAÇÃO
DO RUÍDO "*GROUND ROLL*"**

Pedro Henrique Cáceres Figueiredo

Natal / RN, Agosto de 2009

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**FILTRO KL/DVS PARA ATENUAÇÃO
DO RUÍDO "*GROUND ROLL*"**

Pedro Henrique Cáceres Figueiredo

ORIENTADOR:

Prof. Dr. Liacir dos Santos Lucena

Natal / RN, Agosto de 2009

PEDRO HENRIQUE CÁ CERES FIGUEIREDO

**FILTRO KL/DVS PARA ATENUAÇÃO
DO RUÍDO "GROUND ROLL"**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo – PPGCEP, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, pré-requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Petróleo.

Aprovado em _____, de _____ de 2009.

Prof. Dr. Liacir dos Santos Lucena
Orientador – UFRN

Prof. Dr. German Garabito Callapino
Membro Interno – UFRN

Prof. Dr. Francisco Edcarlos Alves Leite
Membro Externo – UFERS

Figueiredo, Pedro Henrique Cáceres - Filtro KL/DVS para atenuação do ruído de "*ground roll*". Dissertação de Mestrado, UFRN, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo, Área de concentração: Física Aplicada à Exploração e à Produção de Petróleo e Gás Natural (FAP). Natal – RN, Brasil.

Orientador: Prof. Dr. Liacir dos Santos Lucena

Resumo

Na geofísica existem diversas etapas no estudo da Terra, uma delas é o processamento de registros sísmicos. Esses registros são obtidos através de observações realizadas na superfície, sendo úteis para informações sobre a estrutura e a composição das zonas inacessíveis em grandes profundidades. Grande parte das ferramentas e técnicas desenvolvidas para tais estudos tem sido aplicada em pesquisas acadêmicas. O grande problema do processamento sísmico é a energia indesejada, registrada pelos receptores que não trazem nenhum tipo de informação em relação aos refletores podendo mascarar as informações e/ou gerar informações erradas da subsuperfície. Essa energia indesejada é conhecida como ruído sísmico. Atenuar esse ruído para melhorar um sinal que indica uma reflexão, sem perder sinal desejável é algumas vezes um problema de difícil solução. O projeto tem como objetivo a atenuação do ruído "*ground roll*", o qual apresenta um padrão caracterizado pela baixa frequência, baixa velocidade de propagação e forte amplitude. A Transformada de Karhunen-Loève é uma ótima ferramenta para identificação de padrões baseada nos autovalores e autovetores. Em conjunto com a Transformada de Karhunen-Loève será utilizado a Decomposição em Valores Singulares, já que a mesma é uma ótima técnica matemática para manipulação dos dados.

Palavras chaves: Transformada de Karhunen-Loève, *Ground Roll*, Decomposição em Valores Singulares, Sísmica.

Abstract

In geophysics there are several steps in the study of the Earth, one of them is the processing of seismic records. These records are obtained through observations made on the earth surface and are useful for information about the structure and composition of the inaccessible parts in great depths. Most of the tools and techniques developed for such studies has been applied in academic projects. The big problem is that the seismic processing power unwanted, recorded by receivers that do not bring any kind of information related to the reflectors can mask the information and/or generate erroneous information from the subsurface. This energy is known as unwanted seismic noise. To reduce the noise and improve a signal indicating a reflection, without losing desirable signals is sometimes a problem of difficult solution. The project aims to get rid of the ground roll noise, which shows a pattern characterized by low frequency, low rate of decay, low velocity and high amplituds. The Karhunen-Loève Transform is a great tool for identification of patterns based on the eigenvalues and eigenvectors. Together with the Karhunen-Loève Transform we will be using the Singular Value Decomposition, since it is a great mathematical technique for manipulating data.

Keywords: Karhunen-Loève Transform, Ground Roll, Singular Value Decomposition, Seismic.

AGRADECIMENTOS

Ao ser supremo, pela vida e a possibilidade de empreender esse caminho evolutivo, por propiciar tantas oportunidades de estudos e por colocar em meu caminho pessoas amigas e preciosas.

Ao meu orientador, um agradecimento especial por todos os momentos de paciência, compreensão, apoio e competência.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia do Petróleo, pelos momentos compartilhados, sem esmorecimento e a todos os funcionários e professores que fizeram parte desse caminhar.

Ao Centro Potiguar de Geociências – CPGeo, por todo apoio financeiro e técnico.

DEDICATÓRIA

Ao meu pai Gilton, e minha mãe Patrícia, pelo apoio, amor e confiança incondicional. Representando a base para tudo na minha vida. Sem vocês nada disso seria possível. Obrigado por tudo.

A minha fiel companheira, Cynara, e minha filha Liz, principalmente pela paciência e compreensão, compartilhando dúvidas e angústias, mas sempre permanecendo ao meu lado.

Ao meu tio Daniel da Luz, e minha tia Graciete, por nunca deixarem de acreditar, e sempre me incentivarem. Um agradecimento mais que especial.

Ao meus irmãos, Clecinha, Davi, Daniel, Bruno, Léo, Plínio, Isaac e Leonel, que além de tudo, são meus eternos amigos, parceiros de longas caminhadas.

Aos meus amigos, que mesmo seguindo diversos caminhos, sempre se fizeram presentes, e em especial a Popoff, Zumba e Gabriel pela grande ajuda nessa difícil missão.

Aos senhores Tassini, Wander, Heron e German por todos os ensinamentos.

SUMÁRIO

RESUMO.....	IV
ABSTRACT	V
AGRADECIMENTOS	VI
DEDICATÓRIA	VII
LISTA DE FIGURAS	X
INTRODUÇÃO	12
CAPÍTULO 1 – TRANSFORMADA DE KARHUNEN-LOÈVE	16
1.1 - INTRODUÇÃO.....	17
1.2 – DEFINIÇÃO E PROPRIEDADES.....	20
CAPÍTULO 2 – DECOMPOSIÇÃO EM VALORES SINGULARES.....	24
2.1 – INTRODUÇÃO	25
2.2 – DEFINIÇÃO E PROPRIEDADES.....	26
CAPÍTULO 3 – SÍSMICA	28
3.1 – INTRODUÇÃO	29
3.2 – SÍSMICA DE REFLEXÃO.....	30
3.3 – PROSPECÇÃO SÍSMICA	31
3.4 – ONDAS ELÁTICAS E PARÂMETROS DE PROPAGAÇÃO	31
3.5 – ONDAS VOLUMÉTRICAS	31
3.6 – ONDAS SUPERFICIAIS.....	34
3.7 – VELOCIDADES DAS ONDAS SÍSMICAS NAS ROCHAS.....	35
3.8 – FATORES QUE AFETAM A VELOCIDADE.....	35
3.9 – PONTO MÉDIO COMUM (CMP – COMMON MIDPOINT).....	37

CAPÍTULO 4 – SISMOGRAMA.....	39
4.1 – INTRODUÇÃO	40
4.2 – DEFINIÇÃO E PROPRIEDADES	40
4.3 – SEG-Y	43
CAPÍTULO 5 – RUÍDO SÍSMICO	45
5.1 – INTRODUÇÃO	46
5.2 – <i>GROUND ROLL</i>	47
CAPÍTULO 6 – COERÊNCIA NO KL	48
6.1 – INTRODUÇÃO	49
6.2 – COERÊNCIA HORIZONTAL	50
6.3 – <i>LINEAR MOVE-OUT</i>	51
CAPÍTULO 7 – APLICAÇÃO E RESULTADOS	53
7.1 – INTRODUÇÃO	54
7.2 - APLICAÇÃO.....	54
7.3 - RESULTADOS.....	56
CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS	71
REFERÊNCIAS	74

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.5.1 Partição de energia	33
Figura 3.9.1 Aquisição de dados sísmicos com uma única leitura para cada ponto de reflexão na interface.	38
Figura 3.9.2 Aquisição de dados sísmicos com várias leituras para um mesmo ponto de reflexão na interface.....	38
Figura 4.2.1 Sismograma onde estão representadas as amplitudes captadas por cada geofone (rec_j) no instante de tempo tt_i	40
Figura 4.2.2 Mostra o sismograma da Tabela representado graficamente.	41
Figura 6.2.1 (A) Dado de Entrada; (B) Primeira autoimagem; (C) Sem a primeira autoimagem	50
Figura 6.2.2 Sismograma sintético	51
Figura 6.2.3 Primeira autoimagem	51
Figura 6.2.4 Demonstra a aplicação do <i>Linear Move Out</i>	52
Figura 7.2.1 Tabela de autovalores do dado de entrada real <i>A</i>	55
Figura 7.2.2 Dado de entrada real <i>A</i>	56
Figura 7.2.3 Dado de entrada real <i>A</i> corrigido LMO	56
Figura 7.3.1 Primeira autoimagem	57
Figura 7.3.2 Sem a primeira autoimagem	57
Figura 7.3.3 Segunda autoimagem	57
Figura 7.3.4 Sem a segunda autoimagem	57
Figura 7.3.5 Terceira autoimagem	58
Figura 7.3.6 Sem a terceira autoimagem	58
Figura 7.3.7 Quarta autoimagem	58
Figura 7.3.8 Sem a quarta autoimagem	58
Figura 7.3.9 Quinta autoimagem	59
Figura 7.3.10 Sem a Quinta autoimagem	59
Figura 7.3.11 Sexta Autoimagem	59
Figura 7.3.12 Sem a sexta autoimagem	59
Figura 7.3.13 Sétima autoimagem	60

Figura 7.3.14 Sem a sétima autoimagem	60
Figura 7.3.15 Somando as 2 primeiras autoimagens	60
Figura 7.3.16 Zerando as 2 primeiras autoimagens	60
Figura 7.3.17 Somando as 3 primeiras autoimagens	61
Figura 7.3.18 Zerando as 3 primeiras autoimagens	61
Figura 7.3.19 Somando as 4 primeiras autoimagens	61
Figura 7.3.20 Zerando as 4 primeiras autoimagens	61
Figura 7.3.21 Somando as 5 primeiras autoimagens	62
Figura 7.3.22 Zerando as 5 primeiras autoimagens	62
Figura 7.3.23 Somando as 6 primeiras autoimagens	62
Figura 7.3.24 Zerando as 6 primeiras autoimagens	62
Figura 7.3.25 Somando as 7 primeiras autoimagens	63
Figura 7.3.26 Zerando as 7 primeiras autoimagens	63
Figura 7.3.27 Dado de entrada	64
Figura 7.3.28 Dado filtrado KL	64
Figura 7.3.29 Dado de entrada	65
Figura 7.3.30 Dado filtrado	65
Figura 7.3.31 Resíduo.....	66
Figura 7.3.32 Dado de entrada	66
Figura 7.3.33 Dado filtrado	67
Figura 7.3.34 Resíduo.....	67
Figura 7.3.35 Dado de entrada	68
Figura 7.3.36 Dado filtrado	68
Figura 7.3.37 Resíduo.....	69
Figura 7.3.38 Dado de entrada	69
Figura 7.3.39 Dado filtrado	70
Figura 7.3.40 Resíduo.....	70

INTRODUÇÃO

A Geofísica é uma ciência que estuda a Terra usando medidas físicas tomadas normalmente na sua superfície, tornando possível o estudo de partes profundas, geralmente inacessíveis às observações diretas. Através da interpretação das observações realizadas na superfície, são obtidas informações úteis sobre a estrutura e a composição das zonas inacessíveis em grandes profundidades. Grande parte das ferramentas e técnicas desenvolvidas para tais estudos tem sido aplicada em pesquisas acadêmicas sobre a natureza do interior da Terra. Entretanto, o grande avanço obtido nas técnicas geofísicas é, principalmente, devido à sua intensa utilização na exploração de hidrocarbonetos e de minérios.

Um dos problemas do processamento sísmico é a presença de ruídos, que corresponde a uma energia indesejada. Atenuar esses ruídos para melhorar um sinal que indica uma reflexão, sem perder sinal desejável é algumas vezes um problema de difícil solução. Essa energia indesejada é um sinal registrado pelos receptores que não traz nenhum tipo de informação útil em relação aos refletores. A necessidade de atenuar os ruídos é justamente porque eles podem mascarar as informações e/ou gerar informações erradas da subsuperfície.

Existem diversas técnicas de atenuar ruído, como a Transformada de Fourier e a Transformada em Ondeletas, porém a Transformada de Fourier (TF) apresenta aplicabilidade deficiente em séries-temporais não-estacionárias, o que é a maioria dos casos na natureza. Gabor então dividiu uma série temporal em vários segmentos e que estes fossem todos de comprimento fixo. Em seguida, Gabor aplicou a TF em cada um desses segmentos separadamente, criando a Transformada de Fourier Janelada (TFJ), mas tinham alguns problemas, já que a janela da TFJ é fixa, não podendo modificá-la após o início do processo de aplicação da TFJ, o outro problema é que as funções trigonométricas possuem energia infinita. Morlet percebeu a necessidade de desenvolver uma função matemática base, que

além de possuir energia finita, com um início e um fim, pudesse ser capaz de dilatar ou comprimir esta função, eliminando o problema da janela fixa da TFJ. A expansão ou decomposição de Karhunen-Loève, criadas por Kari Karhunen e Michel Loève, é uma ótima técnica para identificação de padrões, através dos autovalores e autovetores. A filosofia do método é substituir um grupo de traços vizinhos por outro grupo de traços composto pelos primeiros componentes de maiores autovalores. Este grupo de traços reúne as principais características estatísticas de coerência (correlacionáveis), sendo os maiores valores singulares os elementos de maior correlação.

Uma excelente ferramenta matemática para se trabalhar com autovalores e autovetores é a Decomposição em Valores Singulares (DVS). O filtro DVS parte do princípio de que as autoimagens (imagem referente ao autovalor), associadas a grandes valores singulares, concentram a maior parte da informação correlacionável presente nos dados. A característica principal da decomposição em valores singulares está na capacidade do método em determinar o posto ou o grau de singularidade de uma matriz. Quando se trata com dados sísmicos esta singularidade reflete-se no grau de correlação entre os traços do registro. Quanto menor for o posto, maior será a correlação entre os traços, com a informação da matriz de dados de entrada sendo concentrada em poucas autoimagens, que estarão sendo associadas a grandes valores singulares.

Nesta dissertação será utilizado o método da Transformada Karhunen-Loève em conjunto com a Decomposição em Valores Singulares para atenuação do ruído “*ground roll*”, já que este apresenta um padrão caracterizado pela baixa frequência, baixa taxa de decaimento, baixa velocidade de propagação e alta amplitude. Inicia-se no primeiro capítulo com a definição e propriedades da Transformada Karhunen-Loève, e no segundo capítulo se dará essas especificações para a Decomposição em Valores Singulares. O capítulo três será

sobre Sísmica, focando a sísmica de reflexão e prospecção sísmica, com ênfase nas ondas elásticas e parâmetros de propagação, velocidades dessas ondas nas rochas e fatores que afetam a velocidade. No capítulo quatro será visto a definição e as propriedades de um sismograma, como também o seu formato de gravação SEG-Y. No capítulo cinco será abordado o ruído, dando ênfase ao ruído coerente “*ground roll*”, o qual será filtrado com o uso das técnicas estudadas. No sexto capítulo será relatado a coerência no KL, e explicado a análise de velocidades de “*Linear Move-out*”. No capítulo 7 estarão as aplicações e resultados do método KL/DVS, e por fim a conclusão e perspectivas.

Capítulo 1

TRANSFORMADA DE KARHUNEN-LOÈVE

1.1.INTRODUÇÃO

O estudo de sinais não-estacionários, ou seja, sinais onde as séries-temporais em que seus momentos estatísticos, média, variância, entre outros, variam em quaisquer segmentos tomados, exigem abordagens matemáticas robustas de análise para compreensão dos fenômenos físicos que estão agindo em qualquer sistema natural.

Antes de 1930, Joseph Fourier, com sua teoria de análise de frequência afirmou que qualquer função periódica poderia ser expressa por uma somatória de senos e cossenos, sendo muito útil para soluções analíticas e numéricas de equações diferenciais, e para análise de tratamento de sinais. A Transformada de Fourier (TF) pode ser considerada como um limite de uma combinação linear infinita de ondas senoidais, que encontra grandes aplicações no tratamento de sinais estacionários.

Devido a deficiente aplicabilidade da Transformada de Fourier em séries-temporais não-estacionárias, o que é a maioria dos casos na natureza, Gabor, em 1946, percebeu essa deficiente aplicabilidade, por isso ele procurou modificar a TF utilizando o seguinte mecanismo. Dividiu uma série temporal em vários segmentos sendo estes de comprimentos fixo. Em seguida, aplicou a TF em cada um desses segmentos separadamente, criando a Transformada de Fourier Janelada (TFJ).

Embora a TFJ de Gabor tenha dado uma contribuição enorme para o estudo de séries-temporais não-estacionárias, havia ainda um problema a ser resolvido. Na realidade eram dois problemas: um é que a janela da TFJ é fixa, não podendo modificá-la após o início do processo de aplicação da TFJ; e o outro é que as funções trigonométricas possuem energia infinita.

Por volta do início da década de 1980, um pesquisador francês chamado Jean Morlet percebeu estes dois problemas quando estava usando a TFJ em séries-temporais de ecos geofísicos na busca por poços petrolíferos. Morlet percebeu a necessidade de desenvolver uma função matemática base, que além de possuir energia finita (ter um início e um fim), pudesse ser capaz de dilatar ou comprimir esta função, eliminando o problema da janela fixa da TFJ. Outro matemático francês, chamado Alex Grossman, juntou-se a Morlet na busca destas funções matemáticas base, que fossem como pequenas ondas. No entanto, se a base possuir suporte limitado, decaindo para zero muito rapidamente, a melhor maneira então de cobrir todo o eixo dos reais seria dado através de translações dessa base em todo o comprimento da série-temporal.

Meyer demonstrou as condições de ortogonalidade desse novo operador matemático, oferecendo condições seguras para a aplicação da nova técnica. A idéia central da análise em ondeletas consiste em decompor um sinal a diferentes níveis de resolução, processo conhecido como multiresolução. A representação de multiresolução fornece uma moldura hierárquica simples para interpretação de informação do sinal. As diferentes resoluções e os detalhes de um sinal geralmente caracterizam diferentes estruturas físicas. A uma resolução mais grosseira, estes detalhes geralmente caracterizam as grandes estruturas que fornecem o contexto, assim com o aumento da resolução, obtemos detalhes mais finos.

A expansão ou decomposição de Karhunen-Loève, criadas por Kari Karhunen e Michel Loève, surgiu na literatura de processamento de sinais, onde também é conhecido por Análise de Componentes Principais, Transformada de Hostelling, Decomposição em Valores Singulares, Decomposição Ortogonal Própria, Funções Ortogonais Empíricas. São discutidas nas referências Sirovich, 1987; Holmes et al, 1996 e Jolliffe, 2002 suas especificações e aplicações. A expansão Karhunen-Loève é uma poderosa ferramenta estatística para análise e

compressão de dados, onde se encontraram muitas outras aplicações úteis como reconhecimento de oceanografia, meteorologia, voz e imagens, entre outros (Thiebaux, 1994).

Se considerarmos um processo estocástico, isto é, uma função em que o valor é aleatório em um intervalo $[a, b]$, então este teorema pode ser considerado como uma expansão aleatória ortonormal. Na teoria dos processos estocásticos, a transformada de Karhunen-Loève é uma representação de um processo estocástico como uma infinita combinação linear de funções ortogonais. Em contraste com uma série de Fourier, onde os coeficientes são números reais e a expansão da base consiste em funções senoidais, os coeficientes na transformada Karhunen-Loève são variáveis aleatórias e a expansão da base depende do processo da função covariância.

A transformada de Karhunen-Loève, ou simplesmente Transformada KL é muito bem utilizada para identificação de padrões no sentido de coerência de sinais, podendo se utilizar em matrizes, pois nos permite a transformação do espaço original em outro, de maneira que essa nova representação esteja livre de informações redundantes.

Os registros sísmicos atendem muito bem a esses requisitos, de forma que podem ser representados por uma matriz e analisados utilizando conceitos e métodos da física matemática. Nesta dissertação a transformada KL é utilizada para melhorar a relação sinal/ruído do traço sísmico. A filosofia do método é substituir um grupo de traços vizinhos por outro grupo de traços, recompostos sem os primeiros componentes de maiores autovalores. Este grupo de traços reúne as principais características estatísticas de coerência (correlacionáveis), sendo os maiores valores singulares, os elementos de maior correlação.

Na transformada KL, os traços sísmicos de um registro são substituídos por outros traços que são ortogonais entre si, ditos componentes principais. Esses componentes contém,

de uma maneira otimizada, no sentido dos mínimos quadrados, a informação correlacionável contida nos dados originais, levando a uma maior compactação da informação e frequentemente reduzindo a dimensão do problema.(Freire, 1986).

1.2.DEFINIÇÃO E PROPRIEDADES

Imagine uma matriz $A_{m \times n}$, consistindo de n traços com m amostras por traço, onde o elemento A_{ij} corresponde ao registro de amplitude no geofone j no tempo i , sendo $m > n$. Os vetores X_i representam as linhas e os vetores Y_j representam as colunas de A .

$$A = [Y_1 \ Y_2 \ Y_3] [X_1 \ X_2 \ X_3]^t \quad \text{Eq. 1.1}$$

$$A_{ij} = X_{ij} \ Y_{ji} \quad \text{Eq. 1.2}$$

Uma matriz simétrica Γ , a qual possui autovalores reais e ortonormais e de ordem $m \times m$, pode ser definida a partir da matriz de dados A , ou seja:

$$\Gamma = A \ A^t \quad \text{Eq. 1.3}$$

Onde Γ é a matriz covariância e seus valores são definidos positivamente. Em termos multivariados define-se a matriz de covariância (ou matriz de variância-covariância) como a matriz que contém na sua diagonal principal as variâncias das colunas e nos restantes elementos as covariâncias.

A transformada KL de uma matriz A é dada por uma matriz $\Psi_{m \times n}$:

$$\Psi_{m \times n} = U^t \ A \quad \text{Eq. 1.4}$$

Onde as colunas da matriz U são os autovetores de Γ , onde U_i é o autovetor normalizado dos autovalores λ_i onde $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \dots$ da matriz de covariância Γ .

$$U = [U_1 \ U_2 \ \dots \ U_m] \quad \text{Eq. 1.5}$$

Um vetor u (u diferente de 0) é um autovetor da matriz quadrada A se existir um escalar λ , chamado de autovalor (ou valor característico), tal que:

$$Au = \lambda u \quad \text{Eq. 1.9}$$

ou seja:

$$(A - \lambda I) u = 0. \quad \text{Eq. 1.10}$$

Como u é diferente de 0, então é necessário que: $\det(A - \lambda I) = 0$, que é chamada de equação característica da matriz A . A matriz $(A - \lambda I)$ deverá ser, então, uma matriz singular. As raízes desta equação são os autovalores de A . Os autovalores e autovetores de uma matriz identificam padrões dentro de um conjunto de dados, onde seus maiores valores são os mais correlacionáveis.

O dado original pode ser recuperado:

$$A = U \Psi \quad \text{Eq. 1.6}$$

$$\Psi = [X_1 \ X_2 \ X_3]^t \quad \text{Eq. 1.7}$$

$$A = \sum A_i = \sum U_i X_i \quad \text{Eq. 1.8}$$

Assim a matriz A está implícita entre a coluna do vetor U_i e a linha do vetor X_i . Os autovetores U_i são chamados autovetores empíricos com bons modos ortogonais ou modos KL, sendo $A_i = U_i X_i$ o i -ésimo termo da autoimagem de A . No contexto da componente principal analisada, os autovetores U_i definem as componentes principais considerando que os

vetores de linha X_i da transformada de KL (Ψ) contém os números da i -ésima componente principal.

O somatório dos autovalores λ_i pode ser analisado como sendo a medida da energia total dos dados, portanto cada λ_i será a energia do modo empírico i representado pelo vetor U_i . Assim a energia E da matriz A , é a soma dos autovalores da matriz Γ .

$$E = \sum \lambda_i \quad \text{Eq. 1.11}$$

$$\text{Eq. 1.12}$$

Podendo λ_i ser interpretado como a energia capturada pelo i -ésimo autovetor empírico U_i , sendo E_i a energia relativa do i -ésimo modo KL.

Uma importante propriedade da expansão KL é que podemos montar uma matriz A_k utilizando somente k autovalores para obter a melhor aproximação da matriz de dados A . Utilizamos a matriz Ψ_k mantendo as primeiras K linhas da matriz Ψ e zerando as $m - k$ linhas restantes, assim:

$$A_k = U \Psi_k \quad \text{Eq. 1.13}$$

Onde $k < m$, sendo a melhor aproximação da matriz A de posto r , por uma matriz A_k de posto k com $k < r$. Esta propriedade é dita ser ótima e conduz à aplicação da compressão de dados, por permitir a aproximação da matriz de dados A por uma matriz A_k com perda mínima de informações.

No caso do “ground roll”, ele apresenta um padrão onde as amplitudes são mais fortes do que o sinal refletido, baixa velocidade de propagação e concentração de energia nas frequências baixas, propagando-se próxima a superfície da terra (Ylmaz, 2003). Estando

assim, o ruído presente na coerência de dados, pode-se ser usada a transformada KL para atenuação. Portanto forma-se a matriz Ψ'_k onde são zeradas as primeiras K linhas da transformada Ψ e as restantes são mantidas.

$$A'_k = U \Psi'_k \quad \text{Eq. 1.14}$$

Tal que A'_k será uma versão filtrada da matriz A , onde os maiores k autovalores da matriz de covariância Γ (modos mais coerentes) foram removidos.

No entanto, um ruído localizado no espaço e no tempo terá uma melhor aplicação do filtro quando aplicado na região que o contém, já que o filtro pode atuar também onde há informação, assim mascarando o dado.

Capítulo 2

DECOMPOSIÇÃO EM VALORES SINGULARES

2.1.INTRODUÇÃO

A expansão da matriz de dados sísmicos em autoimagens e valores singulares, conhecida como Decomposição em Valores Singulares (DVS) é aplicada em diferentes etapas do processamento de dados sísmicos. A idéia é decompor o dado em imagens, baseada nos autovalores e autovetores, onde esse conjunto ou soma dessas imagens refletem novamente o dado. Cada autoimagem é dada pelo produto escalar dos vetores de base. As autoimagens e os valores singulares associados são calculados com base nos conceitos de álgebra linear relacionados aos autovetores e autovalores das matrizes de covariância correspondentes. Uma escolha apropriada do número e dos índices das autoimagens usadas na decomposição é a base do método de filtragem bidimensional de coerência. Esta técnica é empregada em diferentes tipos de registros sísmicos. O filtro DVS se baseia em que as autoimagens associadas a grandes valores singulares concentram a maior parte da informação correlacionável presente nos dados (Sérgio L. M. Freire, 1986).

A decomposição em valores singulares (DVS) foi definida primeiramente para matrizes quadradas reais em 1870 por Beltrami e Jordan. Posteriormente, em 1902, Autonne expandiu a técnica para matrizes complexas. O desenvolvimento para qualquer matriz foi realizado por Eckart e Young em 1939 (Klena e Laub, 1980). A técnica DVS tem sido usada em geofísica aplicada na solução de problemas inversos (Lawson e Hanson, 1974), e na representação de uma matriz em seus valores singulares e auto-imagens associadas (Andrews e Hunt, 1977).

O método de inversão de sistemas lineares com DVS consiste em evitar as singulares existentes, descartando da solução os valores singulares próximos de zero (Lanczos, 1961; Lines e Treitel, 1984). Esta técnica foi usada por Jackson em 1972, Jupp e Vozoff em 1975 na

inversão de dados geofísicos, demonstrando que a aplicação de DVS estabiliza a solução de sistemas aproximadamente singulares.

A expansão de uma matriz em uma soma ponderada de suas autoimagens tem sido amplamente usada na representação e no armazenamento de imagens digitais (Habibi e Wintz, 1971; Pratt, 1971; Wintz, 1972). No método DVS as autoimagens podem ser analisadas como matrizes de posto unitário, determinadas a partir dos autovalores associados ao espaço dos parâmetros e das observações, carregando toda a informação necessária para a construção dos dados originais. A importância relativa de cada autoimagem pode ser medida através da magnitude do valor singular correspondente. A principal motivação para a utilização da expansão DVS em dados geofísicos, origina-se do fato de que as autoimagens associadas nos valores singulares muito pequenas podem ser desprezadas da expansão DVS, sem afetar substancialmente os dados originais. Uma outra importante característica desta decomposição é a sua capacidade de medir o grau de singularidade das matrizes (o posto) através da razão entre o maior e o menor autovalor associados.

2.2.DEFINIÇÃO E PROPRIEDADES

A característica principal da decomposição em valores singulares está na capacidade do método em determinar o posto ou o grau de singularidade de uma matriz. Quando se tratar com dados sísmicos esta singularidade reflete-se no grau de correlação entre os traços do registro. Quanto menor for o posto, maior será a correlação entre os traços, com a informação da matriz de dados de entrada sendo concentrada em poucas autoimagens, que estarão sendo associadas a grandes valores singulares.

Toda matriz $A \in \mathbf{R}^{m \times n}$ pode ser escrita na forma:

$$A = U \Sigma V^t \quad \text{Eq. 2.1}$$

Onde U é uma matriz ortogonal do tipo $m \times n$, onde suas colunas são os autovetores U_i da matriz de covariância Γ , e são chamados de autovetores empíricos ou modos KL. A matriz $\Sigma \in \mathbf{R}^{m \times n}$ é uma matriz real e diagonal, retangular, do mesmo tipo de A ($m \times n$), tal que a diagonal principal são números não negativos com elementos $\sigma_i = \sqrt{\lambda_i}$ sendo r o posto da matriz Σ . Por convenção, a ordem para os valores singulares é determinado do maior para o menor, com $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_n > 0$. As colunas da matriz ortogonal $V \in \mathbf{R}^{m \times n}$ correspondem aos n autovetores V_i da matriz $A^t A$, com autovalores não-nulos (Francisco Edcarlos A. Leite, 2007).

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1 & & & \\ & \sigma_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \sigma_r & & \\ & & & & & 0 \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 2.2}$$

$$A_k = \sigma_k u_k v_k = \sigma_k Q_k \quad \text{Eq. 2.3}$$

Os elementos diagonais de S são os valores singulares. As colunas de U são os vetores singulares à esquerda. As colunas de V são os vetores singulares à direita. Posto (A) = r , o número de valores singulares não nulos.

Capítulo 3

SÍSMICA

3.1.INTRODUÇÃO

A Geofísica é uma ciência que estuda a Terra usando medidas físicas tomadas normalmente na sua superfície, envolvendo o estudo de partes profundas da Terra geralmente inacessíveis às observações diretas (SBGf, 2003). Através da interpretação das observações realizadas na superfície, são obtidas informações úteis sobre a estrutura e a composição das zonas inacessíveis em grandes profundidades. Pode-se conhecer a subsuperfície sem ser preciso “cavar”. Quase todo o conhecimento sobre áreas abaixo de profundidades limitadas por poços e minas subterrâneas provém de observações geofísicas. Grande parte das ferramentas e técnicas desenvolvidas para tais estudos tem sido aplicada em pesquisas acadêmicas sobre a natureza do interior da Terra. Entretanto, o grande avanço obtido nas técnicas geofísicas é, principalmente, devido à sua intensa utilização na exploração de hidrocarbonetos e de minérios.

A forte utilização da sísmica na exploração e desenvolvimento de reservatórios de hidrocarbonetos deve-se à sua larga e densa amostragem tanto em área quanto em profundidade, aliada ao contínuo refinamento de técnicas de tratamento e interpretação dos dados sísmicos. O desenvolvimento de tecnologias nas áreas de aquisição, processamento e interpretação dos dados sísmicos, aliado ao estudo das relações entre propriedades sísmicas, propriedades petrofísicas e condições ambientais, tornaram esta técnica indiscutivelmente a mais poderosa ferramenta de exploração, e uma das mais importantes na caracterização de reservatórios de petróleo.

3.2.SÍSMICA DE REFLEXÃO

O principal objetivo da exploração sísmica é deduzir informações sobre o comportamento das rochas e como estas estão dispostas na subsuperfície, a partir da observação dos tempos de trânsito das ondas sísmicas, além das variações na amplitude, frequência e forma de onda (Sherrif & Geldart, 1995).

A sísmica de reflexão é aplicada na determinação das profundidades a que se encontram as superfícies refletoras, bem como as velocidades sísmicas das rochas que compõem as várias camadas (Miranda et al., 2005).

A técnica mais utilizada na exploração sísmica consiste em gerar artificialmente ondas elásticas na subsuperfície da terra através de uma fonte (como por exemplo um explosivo, ar-comprimido, placas vibrantes...), e registrar o tempo em que a onda percorre dentro da camada, no trajeto entre a fonte e um conjunto de receptores. Esse tempo de viagem da onda é conhecido como tempo de trânsito. O tempo percorrido pelo pulso sísmico da fonte até os receptores e suas amplitudes na chegada são digitalizados e armazenados em arquivos, chamados de traço sísmico.

Temos a exploração sísmica tanto marítima quanto a terrestre, e em ambas, as ondas elastodinâmicas, após se propagarem e refletirem-se pelas diversas camadas do subsolo, são medidas e registradas através de sensores (geofones ou hidrofones) na superfície. A medida gravada em cada receptor, que é função do tempo da onda de ida da fonte e volta para o receptor, é chamada de traço sísmico, e o conjunto desses traços gravados para cada onda gerada (tiro sísmico) é chamado de sismograma. Quando a aquisição sísmica é realizada através de uma única linha, o tiro sísmico resulta em uma imagem bidimensional, e diz-se que a aquisição é do tipo 2D. Já quando a aquisição é realizada por um conjunto de linhas em

paralelo ou uma rede bidimensional de sensores diz-se que a aquisição é do tipo 3D, resultando um cubo sísmico.

3.3. PROSPECÇÃO SÍSMICA

A prospecção sísmica baseia-se no fato das ondas elásticas (também chamadas ondas sísmicas) se moverem com velocidades diferentes em rochas diferentes. A partir da liberação de energia sísmica em um ponto e da observação dos tempos de chegada destas ondas a um número de outros pontos à superfície da terra, é possível determinar a distribuição da velocidade e localizar interfaces subterrâneas onde as ondas são refletidas ou refratadas.

3.4. ONDAS ELÁSTICAS E PARÂMETROS DE PROPAGAÇÃO

Quando uma tensão é aplicada ou retirada repentinamente a um corpo elástico, a deformação correspondente propaga-se como uma onda elástica propagando-se pelo meio. Existem dois tipos principais de ondas elásticas: ondas volumétricas e ondas superficiais.

3.5. ONDAS VOLUMÉTRICAS

Um meio elástico está sujeito basicamente a dois tipos de deformação, a causada pelas ondas de compressão/dilatação (ondas P) e causada pelas ondas de cisalhamento (ondas S). A principal diferença entre os dois tipos é que, as ondas P não são tão destrutivas quantos as ondas S ou as ondas de superfície que lhes seguem, e sua velocidade de propagação é, em geral, ligeiramente inferior ao dobro das ondas S. Por sua vez, as ondas S tem sua amplitude

várias vezes maior que a onda P. Nas ondas P, as partículas do meio movem-se na direção do percurso da onda, envolvendo alternadamente, expansão e contração do meio. Nas ondas de cisalhamento ou ondas S, o movimento das partículas é perpendicular à direção do percurso da onda.

As equações do movimento para as ondas P e S que se propagam através de um material, podem ser definidas em termos de deformações dilatacionais e rotacionais (Richter, 1958). Isto é, as velocidades das ondas P e S (V_p e V_s , respectivamente) estão relacionadas com os módulos de elasticidade e a densidade do material. As relações estão explicitadas nas equações 3.1 e 3.2, onde ρ é a densidade do material, e λ e μ são os módulos de elasticidade definidos.

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\mu}} \quad \text{Eq. 3.1}$$

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\mu}} \quad \text{Eq. 3.2}$$

Onde V_p e V_s são as velocidades das ondas P e S respectivamente ;

λ e μ são constantes de Lamé, que relacionam tensões com deformações ;

ρ é a densidade do material onde a onda se propaga.

Um aspecto importante é que as ondas P são significativamente mais lentas enquanto se propagam através de rochas porosas e altamente fraturadas. A velocidade das ondas S (V_s) é em primeiro lugar, função do módulo de cisalhamento (μ). Assim, as ondas S não podem se propagar através de meios líquidos e gasosos, uma vez que μ é zero. Na prospecção sísmica,

as ondas mais importantes são as P porque são as primeiras a serem registadas.

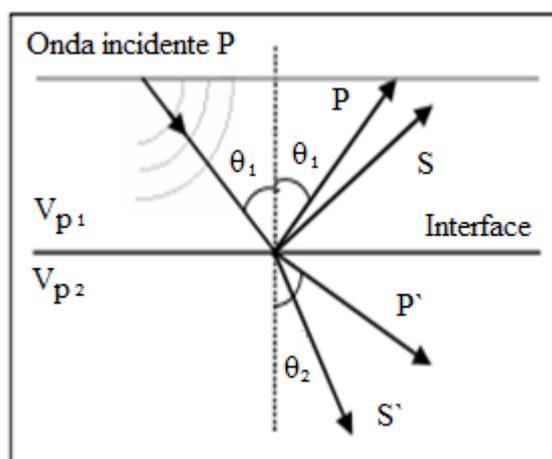


Figura 3.5.1 Partição de energia.

Onde :

V_{p1} = Velocidade da onda P no meio 1;

V_{p2} = Velocidade da onda P no meio 2;

P = Onda P refletida;

S = Onda S refletida;

P' = Onda P transmitida;

S' = Onda S transmitida.

O ângulo de incidência θ_1 é igual ao ângulo de reflexão, e θ_2 é o ângulo de transmissão da onda no meio 2. Dado que as velocidades do meio 1 e 2 são respectivamente V_{p1} e V_{p2} , a lei de Snell mostra a relação entre as velocidades das camadas e os ângulos de reflexão e refração, dada por:

Eq. 3.3

Onde p é uma constante conhecida como parâmetro do raio (Sherrif & Geldart, 1995).

Esse processo de partição de energia se repete a cada nova transição entre rochas, até que a energia da onda propagada se disperse e não mais retorne à superfície.

Os meios em que as ondas percorrem são classificados como homogêneos ou heterogêneos, e isotrópicos ou anisotrópicos. Levando em consideração a análise de velocidade, um meio é dito homogêneo se tem a mesma velocidade de propagação da onda na mesma direção, e no meio heterogêneo se a velocidade varia na mesma direção.

Já os meios isotrópicos consideram que as propriedades físicas do meio são iguais em qualquer direção em que forem medidas. Anisotropia é um termo que denota a variação das propriedades físicas dependendo da direção em que elas são medidas. A anisotropia sísmica pode ser evidenciada pela variação da velocidade sísmica na direção em que ela é medida (Sherrif & Geldart, 1995).

3.6.ONDAS SUPERFICIAIS

Além das ondas volumétricas que se propagam através de um meio elástico, existem também ondas que se movem, somente ao longo da superfície livre de um sólido elástico. As ondas superficiais chegam depois das ondas P e S porque as suas velocidades são inferiores às das ondas volumétricas. Nos sólidos existem dois tipos de ondas superficiais: as ondas “*Rayleigh*” e as ondas “*Love*”.

Nas ondas “*Rayleigh*” o movimento das partículas é mais ou menos uma combinação

das vibrações longitudinais e transversais, dando origem a um movimento elíptico em um plano vertical paralelo à direção de propagação.

Em contraste com as ondas “*Rayleigh*”, que podem se propagar ao longo da superfície de um sólido uniforme, as ondas “*Love*” são possíveis, somente, se o material for não-uniforme, como por exemplo, uma camada superficial de baixa velocidade cobrindo um meio de alta velocidade. As ondas “*Love*” propagam-se horizontalmente na camada superficial e o movimento da partícula é horizontal e transversal à direção do percurso da onda.

3.7. VELOCIDADES DAS ONDAS SÍSMICAS NAS ROCHAS

Na aplicação dos métodos sísmicos, em meios geológicos, a propriedade mais importante nas rochas é a velocidade de propagação, particularmente, das ondas longitudinais (ondas P) que são as mais rápidas, e as primeiras a serem registradas. As características da reflexão e refração da onda sísmica depende, principalmente, dos contrastes de velocidade envolvidos através da interface. Assim, o conhecimento das velocidades das ondas nas rochas é a base para a interpretação sísmica.

3.8. FATORES QUE AFETAM A VELOCIDADE

A velocidade sísmica é função da densidade e propriedade elástica das rochas. As equações (3.1) e (3.2) mostram que as velocidades das ondas P e S (V_p e V_s) variem inversamente com a raiz quadrada da densidade, ρ .

Quando se exerce um esforço de tensão em um pedaço de um material qualquer, este vai sofrer uma deformação longitudinal, proporcional ao esforço aplicado, e determinado pelo seu módulo de “Young”. O módulo de “*Young*” ou módulo de elasticidade é um parâmetro mecânico que proporciona uma medida da rigidez de um material sólido.

Quando se define o módulo de “*Young*”, só se considera a deformação longitudinal. No entanto, qualquer material elástico ao ser “esticado” sofre também uma deformação transversal que é proporcional à deformação longitudinal aplicada. Podem ocorrer estes dois tipos de deformação esticando um pedaço de borracha suficientemente maleável. A razão entre a deformação transversal (Def_{transv}) associada a uma deformação longitudinal (Def_{long}) na direção do esforço de tração, chama-se o coeficiente (ou razão) de “*Poisson*”, “*n*”:

————— Eq. 3.4

As ondas S, que não se propagam através de um fluido, por exemplo, em um aluvião (um depósito sedimentar, formado em geral por materiais grosseiros, mal rolados e mais ou menos soltos), exibem essencialmente a mesma velocidade, quer este esteja seco ou saturado de água. Em contraste, a velocidade da onda P varia drasticamente de um aluvião seco para um aluvião saturado uma vez que a energia da onda P pode propagar-se através da matriz do aluvião e através da água intersticial. Para rochas com uma porosidade entre 0 e 30 %, a velocidade global para as ondas P pode ser dada pela expressão.

$$V_g = V_m (1 - f) + f V_f \quad \text{Eq. 3.5}$$

Em que:

V_g – velocidade global

f - porosidade

V_m – velocidade na matriz

V_f – velocidade no fluido

É importante ter em conta que os fatores que afetam o valor da densidade levam a uma correspondente variação na velocidade. Esses fatores são a porosidade, fraturamento, conteúdo de fluido e composição da matriz da rocha.

As velocidades sísmicas são frequentemente usadas para identificar materiais subterrâneos. Dentro de certos limites, a informação da velocidade pode ser convertida para o tipo de rocha. O intervalo de variação nas velocidades das ondas nas rochas é consideravelmente maior do que as variações correspondentes nas suas densidades. Valores típicos de velocidades das ondas P, já conhecidas em algumas rochas, servem para dar uma idéia aproximada do intervalo de velocidades esperado para outros tipos de rocha.

3.9.PONTO MÉDIO COMUM (*CMP – COMMON-MIDPOINT*)

Em meados de 1960, passou-se a realizar várias leituras de um mesmo ponto na interface a partir de vários tiros. Tornou-se necessário ler o mesmo ponto várias vezes para melhorar a relação sinal-ruído e ter uma melhor amostragem na obtenção de parâmetros, garantindo uma maior cobertura nesse ponto.

Nos primeiros levantamentos de dados sísmicos para cada ponto de reflexão da onda na interface era feita apenas uma única leitura. Um único tiro era dado e os receptores armazenavam as amplitudes das ondas refletidas. A interpretação sísmica era realizada a partir desses dados, como pode ser visto na Figura 3.9.1.

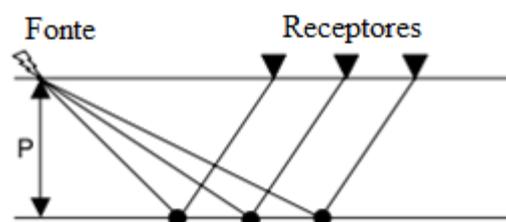


Figura 3.9.1 Aquisição de dados sísmicos com uma única leitura para cada ponto de reflexão na interface.

A Figura 3.9.2 mostra um exemplo de traços em *CMP*, e também conhecido como *CDP*, “*common depth point*” (para camadas horizontais o *CMP* é igual ao *CDP*). O ponto médio comum é formado pelo agrupamento dos traços obtidos, considerando o par fonte-receptor, a partir do mesmo ponto de profundidade “P” na subsuperfície (Sherrif & Geldart ,1995). O ponto “M” representa a metade da distância entre a fonte e o receptor. Para obter o *CMP* as posições da fonte e do receptor precisam ser alteradas a cada tiro, garantindo múltiplas amostragens sobre o ponto “P”.

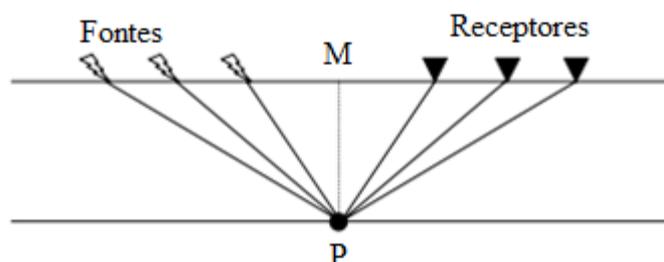


Figura 3.9.2 Aquisição de dados sísmicos com várias leituras para um mesmo ponto de reflexão na interface.

Capítulo 4

SISMOGRAMA

4.1. INTRODUÇÃO

No processo de aquisição sísmica, as ondas ao retornarem da subsuperfície são capturadas por receptores que transformam a vibração do solo (sinal sísmico), em sinal elétrico. Esses sinais são armazenados e formarão um sismograma.

O sismograma pode ser definido como uma matriz em que as colunas são os índices dos receptores, e as linhas os índices dos instantes de tempo, e em seu conteúdo são armazenadas as amplitudes das ondas capturadas.

4.2. DEFINIÇÃO E PROPRIEDADES

A Tabela abaixo mostra um exemplo de sismograma obtido a partir de uma fonte, 4 receptores ($rec_1, rec_2, rec_3, rec_4$) e 6 instantes de tempo ($tt_1, tt_2, tt_3, tt_4, tt_5, tt_6$) em segundos. As amplitudes das ondas capturadas em cada receptor rec_j no instante de tempo tt_i formam o conteúdo deste sismograma.

Para calcular o tempo de trânsito correspondente a uma determinada onda lida, representada pela sua amplitude no sismograma, deve-se selecionar o índice da linha na matriz referente ao dado e multiplicar pelo intervalo de amostragem.

		Receptor			
		rec ₁	rec ₂	rec ₃	rec ₄
Tempo de trânsito	tt ₁	0.06	0	0	0
	tt ₂	0.08	0.05	0	0
	tt ₃	0.07	0.07	0.04	0
	tt ₄	0	0.04	0.06	0.04
	tt ₅	0	0	0.04	0.05
	tt ₆	0	0	0	0.03

Figura 4.2.1 Sismograma onde estão representadas as amplitudes captadas por cada geofone (rec_j) no instante de tempo tt_i .

Abaixo, tem-se um exemplo de um sismograma contendo as amplitudes lidas nos receptores em cada instante de tempo. No tempo tt_1 o receptor rec_1 está iniciando a leitura de uma onda e a amplitude lida neste tempo é 0.06 segundos. Nenhuma onda está atingindo os demais receptores no instante de tempo tt_1 . Isto ocorre devido o afastamento entre a fonte e os receptores.

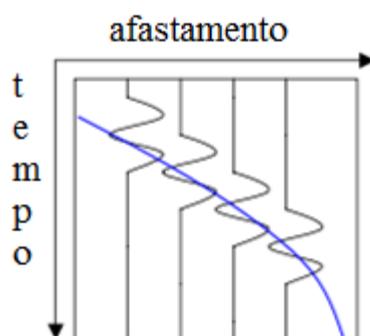


Figura 4.2.2 Mostra o sismograma da Tabela representado graficamente.

O eixo “X” corresponde ao afastamento (medida de distância entre a fonte e cada receptor), neste exemplo, é iniciado com o valor zero e termina com o valor da distância entre a fonte e o último receptor, pois os receptores foram colocados apenas de um dos lados da fonte. Já o eixo “Y”, corresponde ao tempo das leituras dos receptores, sendo iniciado com um tempo de referência (neste exemplo o valor é *zero*), e termina com o tempo máximo de aquisição de dados.

Cada linha vertical do sismograma corresponde às leituras feitas por um receptor, que no sismograma pode ser relacionado a uma coluna da matriz, esse conjunto de dados é denominado de traço sísmico.

Nessa mesma figura pode ser identificado um evento sísmico que corresponde às amplitudes das ondas lidas pelos receptores, sendo que essas ondas foram refletidas em uma mesma interface, trazendo informações de uma mesma camada de rocha. Para relacionar um

evento sísmico com os afastamentos, deve ser traçada uma curva aproximada (linha azul na Figura 4.2.2) a uma semi-hipérbole que se ajuste a amplitude máxima de cada traço sísmico.

Neste sistema devem ser estabelecidas: a quantidade de receptores, a distância entre a fonte e o primeiro receptor, e a distância entre os demais receptores. A distância entre a fonte e o primeiro receptor é conhecida como afastamento mínimo (“*offset*” mínimo). Os demais receptores são posicionados, normalmente, em linha a uma mesma distância entre si a partir do primeiro receptor. A distância entre cada receptor e a fonte é conhecida como afastamento (“*offset*”).

A velocidade intervalar (V_i) é a média de um intervalo a uma determinada profundidade para uma camada. Para uma camada homogênea e isotrópica, tem-se que a velocidade intervalar é a velocidade da camada.

Os receptores fazem leituras simultâneas e com um intervalo de tempo d_t , ou seja, a cada tempo d_t os receptores verificam se existe algum sinal retornando da subsuperfície. Este intervalo de tempo d_t é conhecido como intervalo de amostragem e deve ser definido antes de iniciar a aquisição sísmica para se evitar um mascaramento do dado (alias), sendo também necessário estabelecer o tempo máximo de aquisição de dados. A aquisição é projetada de forma que um mesmo ponto médio seja amostrado várias vezes. Várias equações têm sido desenvolvidas com o objetivo de modelar matematicamente o comportamento de uma subsuperfície em um processo de aquisição sísmica.

O tempo de trânsito para afastamento *zero* (t_0) é também conhecido como tempo para incidência normal. Este atributo sísmico indica o tempo que uma onda levaria para atravessar uma camada “ j ”, considerando que a propagação da onda é na vertical e retornar a um receptor localizado na mesma posição que a fonte (afastamento *zero*). É dado por:

$$\text{---}$$
Eq. 4.1

Onde “ e ” é a espessura da camada “ j ” e “ V_i ” é a velocidade intervalar para a mesma camada. Por fim, os tempos de trânsito são gerados a partir de uma equação que utiliza a formulação hiperbólica dada por:

$$\text{---}$$
Eq. 4.2

Onde “ t ” é o tempo de trânsito para qualquer afastamento “ x ”, “ t_0 ” o tempo de trânsito para afastamento *zero* (fonte e receptor localizados em posições idênticas) e “ V_{rms} ” é uma medida da velocidade média entre a superfície e a interface refletora, ou seja, a raiz média quadrática das várias velocidades intervalares ao longo do percurso da onda.

4.3.SEG-Y

O SEG-Y, nada mais é do que a padronização do formato do arquivo para gravação, sendo um dos diversos padrões de gravações de dados sísmicos desenvolvidos pela “*Society of Exploration Geophysicists*” (SEG). O pacote computacional utilizado para as leituras e visualizações dos dados sísmicos aqui analisados obedece a essa norma.

O formato foi desenvolvido originalmente em 1973 para armazenar uma única linha sísmica digital de dados em fitas magnéticas. A especificação foi publicada em 1975 e desde então tem sido utilizado como padrão. No entanto, desde o seu lançamento houveram avanços significativos na aquisição de dados geofísicos como o 3D, e técnicas de alta velocidade e capacidade de gravação. A mais recente revisão do formato SEG Y foi publicado em 2002, e ainda apresenta alguns legados do formato original, tal como uma fita cassete opcional, com

entrada de 3200 bytes, texto EBCDIC (codificação de carácter) e cabeçalho de 400 bytes binário (Norris, M.W; Faichney,A.K, Eds. 2002).

Capítulo 5

RUÍDO SÍSMICO

5.1.INTRODUÇÃO

Um dos maiores problemas do processamento sísmico é o ruído, que corresponde a uma energia indesejada. Atenuar esse ruído para melhorar um sinal que indica uma reflexão, sem perder sinal desejável é algumas vezes um problema de difícil solução.

Essa energia indesejada (ruído sísmico) é um sinal registrado pelos receptores que não trazem nenhum tipo de informação em relação aos refletores. A necessidade de atenuar os ruídos é justamente porque eles podem mascarar as informações e/ou gerar informações erradas da subsuperfície.

O ruído sísmico é geralmente classificado em ruído coerente ou ruído aleatório. Nesta dissertação dar-se-á ênfase aos ruídos coerentes, com objetivo de atenuá-los sem a perda significativa de sinal de interesse.

Os ruídos aleatórios, captados pelos geofones, são geralmente do próprio ambiente, com várias fontes como o vento, falha na implantação de geofones, movimentos transientes na vizinhança da linha, ruído elétrico, entre outros, não possuem correlação traço a traço e não são dispersivos.

Os ruídos aleatórios na direção temporal são geralmente fortes nos tempos grandes, com isso, podem ser atenuados com a utilização de filtros passa banda variante no tempo. Já os ruídos não correlacionados traço a traço são atenuados com a utilização da técnica de empilhamento *CMP* devido a múltipla cobertura do dado. (Ylmaz, Oz. 2001)

Os ruídos coerentes são ruídos que apresentam algum padrão e geralmente já são esperados, mas mesmo assim se torna difícil de filtrá-los na aquisição. Na categoria de ruído coerente inclui-se ruído coerente linear, reverberação e múltiplas. Na etapa de processamento existem várias técnicas de filtragem para tratar do ruído coerente linear, que são formados

pelos guias de ondas, “*ground roll*”, ruído associado a bolsões de água na subsuperfície, “*swell noise*” e ruído de cabo.

5.2.GROUND ROLL

Um dos principais ruídos na sísmica terrestre é o “*ground roll*”, também conhecido por ondas de “*Rayleigh*”, são ondas dispersivas, formada por ondas compressoriais (P) e por ondas cisalhantes (S) que se propagam na superfície como ondas rolantes. É caracterizada pela baixa frequência, baixa taxa de decaimento e alta amplitude, com isso domina a energia da primeira reflexão (primeira quebra). (Ylmaz, Oz 2001)

Por ser um ruído de superfície gerado pela fonte sísmica, ele é registrado primeiro pelos geofones mais próximos a fonte e depois pelos mais distantes, onde o registro desses geofones podem coincidir, ser antes ou depois de uma reflexão, com isso é preciso atenuá-lo para tornar visíveis as reflexões. O ruído “*ground roll*” pode ser visualizado em um sismograma com o formato de um cone superficial.

No campo são utilizados arranjos de geofones para atenuar o “*ground roll*”, porém não é tão eficiente, sendo necessário processamento específico para atenuá-lo como: transformada de *Fourier*, transformada “*Wavelet*”, transformada KL entre outras técnicas. (Leite, Francisco Edcarlos A. 2007).

Capítulo 6

Coerência no KL

6.1.INTRODUÇÃO

A separação e/ou extração de eventos sísmicos com KL/DVS depende fundamentalmente do grau de correlação horizontal entre os traços do registro. Em algumas situações entretanto, os dados possuem outros tipos de coerência, tais como, linear, inclinada, hiperbólica e elíptica. Por exemplo, em um modelo de camadas planas e mergulhantes, a seção zero offset apresenta uma maior correlação ao longo do mergulho dos refletores. Um outro caso acontece em famílias CDP e sismogramas de campo, onde a correlação do sinal segue uma função aproximadamente hiperbólica, e no caso do “*ground roll*” onde o ruído apresenta uma correlação ao longo de uma inclinação próxima às primeiras quebras. Nestas situações é aconselhável que se realize um processo anterior à aplicação do filtro, de modo a deslocar os traços estática ou dinamicamente, um em relação ao outro, e posicionar o sinal desejado em um padrão, o mais horizontalizado possível. Isto irá concentrar a maior parte da informação correlacionável nas primeiras autoimagens. Após a aplicação da filtragem KL/DVS retorna-se a posição original dos refletores, fornecendo um deslocamento contrário ao anterior. (Freire, Sérgio 1986).

6.2.COERÊNCIA HORIZONTAL

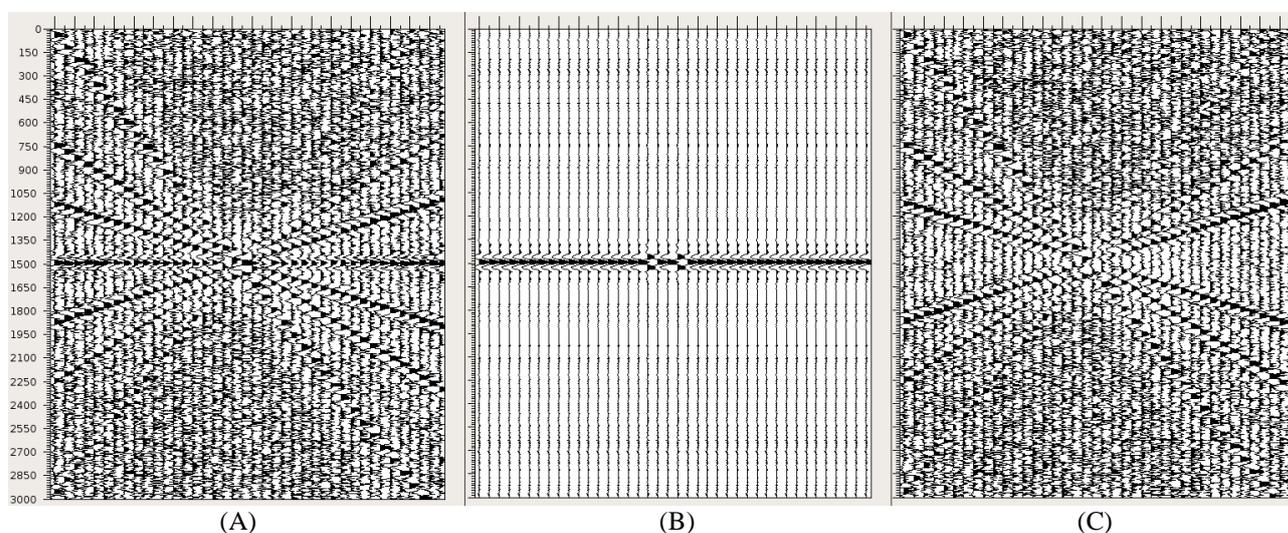


Figura 6.2.1 (A) Dado de Entrada; (B) Primeira autoimagem; (C) Sem a primeira autoimagem

Para se comprovar que a coerência será horizontal, foi gerado um sismograma sintético, e aplicado nele o programa KL/SVD para gerar a primeira autoimagem referente ao primeiro autovalor como ilustrado na figura 6.2.1. Outro exemplo também foi montado (figura 6.2.2), e a montagem do dado deu-se da seguinte maneira: foi capturado do dado de entrada real apenas o registro do canal (geofone) 16, sendo adotado no dado sintético como o canal 1 e repetido até o canal 47. Do canal 47 ao 63 foi dado um deslocamento vertical de 20 milisegundos, com passo 20. Do canal 64 ao 96 foi repetido o canal 63. A figura 6.2.3 mostra, como esperado, a primeira autoimagem com exclusão dos sinais inclinados.

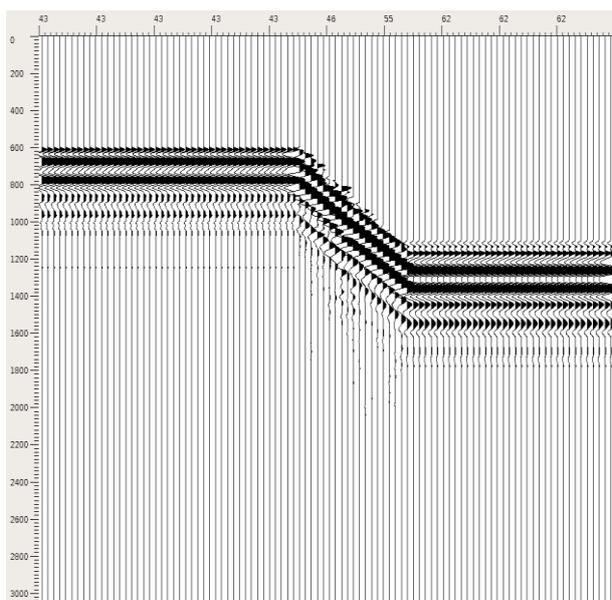


Figura 6.2.2 Sismograma sintético

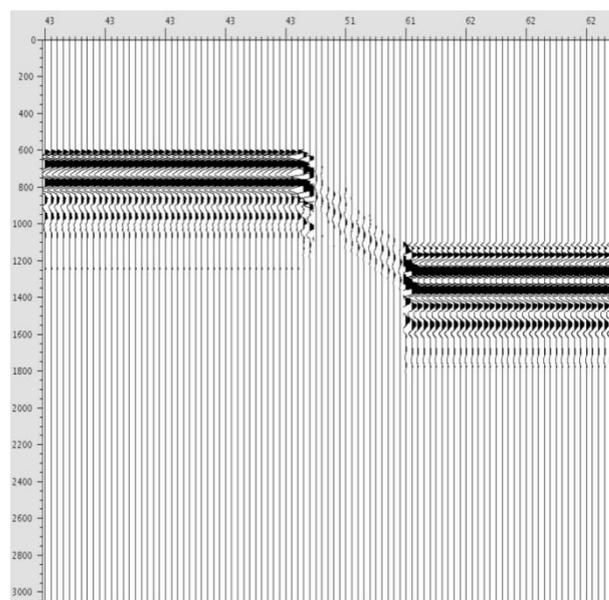


Figura 6.2.3 Primeira autoimagem

6.3.LINEAR MOVE OUT

A técnica de “*linear move out*”, será usada neste trabalho com o intuito de horizontalizar o ruído “*ground roll*”. O “*linear move out*” é uma transformação do sismograma em outro, segundo a seguinte regra: as amostras de um traço que ocupem as coordenadas (x, t_i) , para “*i*” positivo, são posicionadas nas coordenadas $(x, t_i - px)$, para “*p*” constante. Assim, o traço preserva sua integridade, pois todas as amostras são deslocadas do mesmo intervalo de tempo.

As posições relativas de cada traço, dentro do sismograma são mantidas, pois só há deslocamento de tempo, posicionando-se os dados do afastamento “*x*”. Não há alteração dos valores das amostras, preservando-se as amplitudes originais. A qualquer tempo, a transformação pode ser desfeita, sem perda de informações. Por causa das dimensões das coordenadas do sismograma (distância, tempo), o parâmetro “*p*” tem dimensão de velocidade. A velocidade será corrigida de acordo com uma reta de declive “*p*”, como podemos observar na figura 6.2.3:

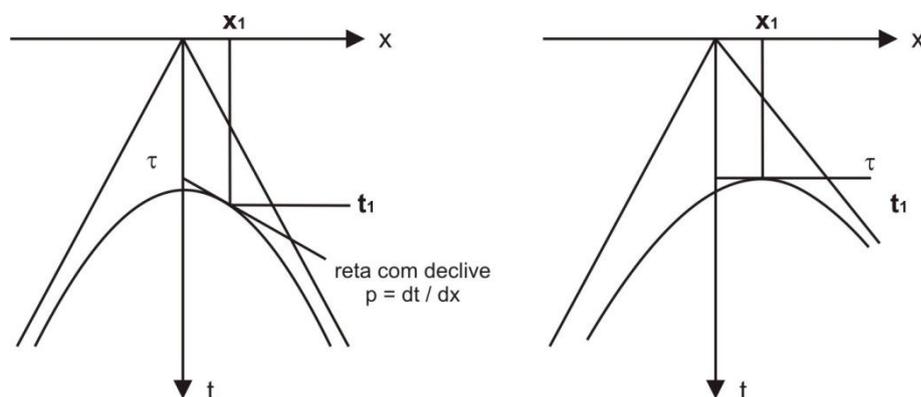


Figura 6.2.4 Demonstra a aplicação do *Linear Move Out*.

Onde:

$$p = dt / dx \quad \text{Eq. 6.1}$$

O método baseia-se na escolha de uma velocidade para onde se queira deslocar o dado, em seguida eleva-se a varredura desse dado para encontrar o ponto tangente a essa velocidade (reta de declive p), assim a energia localizada do offset x_1 e no tempo t_1 no plano (x,t) é movido para o tempo τ no plano (x, τ) , onde :

$$\tau = t - px \quad \text{Eq. 6.2}$$

A análise de “*linear move out*” converte todos os eventos de saída a uma taxa p , com o intuito de horizontalizar o ruído a ser atenuado, com a finalidade de que ele esteja à uma velocidade que facilite a sua identificação horizontal. Essa correção também pode ser recorrigida, fazendo o processo inverso.

$$t = \tau + px \quad \text{Eq. 6.3}$$

Capítulo 7

APLICAÇÃO E RESULTADOS

7.1.INTRODUÇÃO

O programa do filtro KL/DVS foi escrito na linguagem de programação Java, uma linguagem de programação orientada a objeto, ou seja, a análise e projeto orientados a objetos tendo como meta identificar o melhor conjunto de objetos para descrever um sistema de software. O funcionamento deste sistema se dá através do relacionamento e troca de mensagens entre estes objetos. Na programação orientada a objetos, implementa-se um conjunto de classes que definem os objetos presentes no sistema de software. Cada classe determina o comportamento (definidos nos métodos) e estados possíveis (atributos) de seus objetos, assim como o relacionamento com outros objetos. A linguagem Java foi desenvolvida na década de 90 por uma equipe de programadores chefiada por James Gosling, composta por Patrick Naughton e Mike Sheridan na empresa Sun Microsystem(Sun, 2008). Diferentemente das linguagens convencionais, que são compiladas para código nativo, a linguagem Java é compilada para um bytecode que é executado por uma máquina virtual. A linguagem de programação Java é a linguagem convencional da Plataforma java, mas não sua única linguagem.

O programa KL/DVS foi desenvolvido para ler o dado de entrada no formato SEG-Y, em seguida criar a matriz de dados com as amplitudes captadas por cada geofone (colunas) em metros, a cada tempo (linha) em milisegundos. Essa matriz de dados é decomposta em valores singulares, e seus autovalores são mostrados em uma tabela, para um melhor critério de escolha na manipulação desses valores.

7.2.APLICAÇÃO

Para poder selecionar quais autoimagens são as com mais coerência, precisa-se da tabela dos autovalores do dado de entrada.

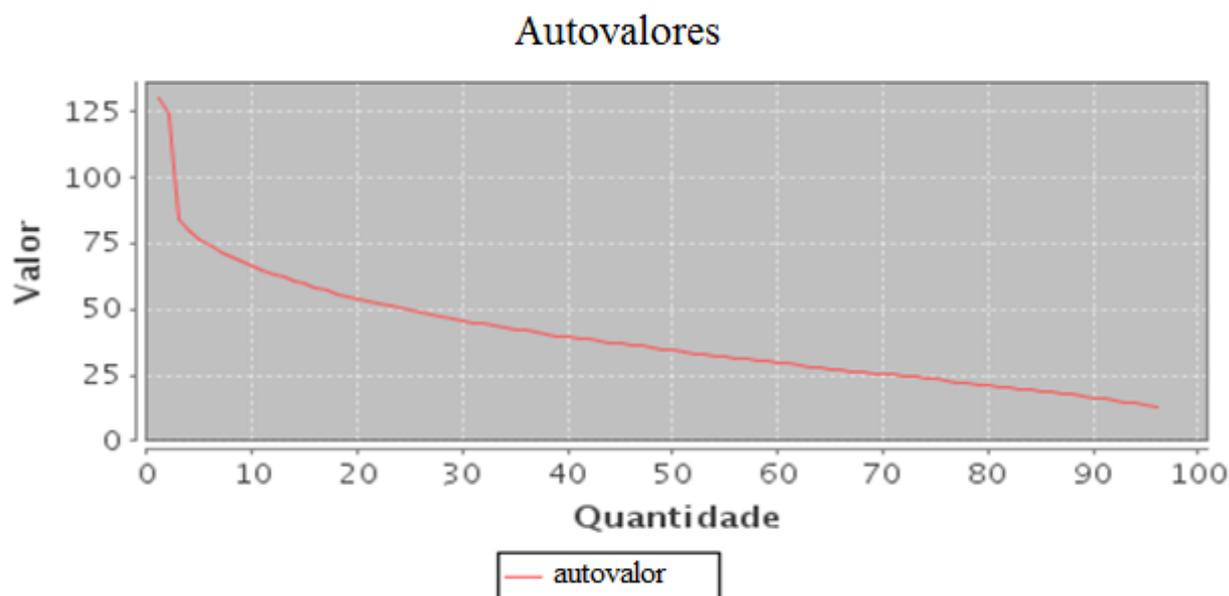


Figura 7.2.1 Tabela de autovalores do dado de entrada real A.

Como o objetivo é filtrar o “*ground roll*”, precisa-se horizontalizar o ruído e localizar os modos de energia (autovalores) mais altos. A horizontalização do dado é feita através da técnica de “*Linear Move Out*”, e para esse dado especificamente foi utilizada uma velocidade 800 m/s. Para que não houvesse perda do sinal, o sismograma que antes era de 2000 *milisegundos* foi aumentado para 5000 *milisegundos* e foi aplicado no dado um “*bulk shift*” (deslocamento vertical) de 3000 *milisegundos*, para depois ser aplicado um LMO de 800 m/s.

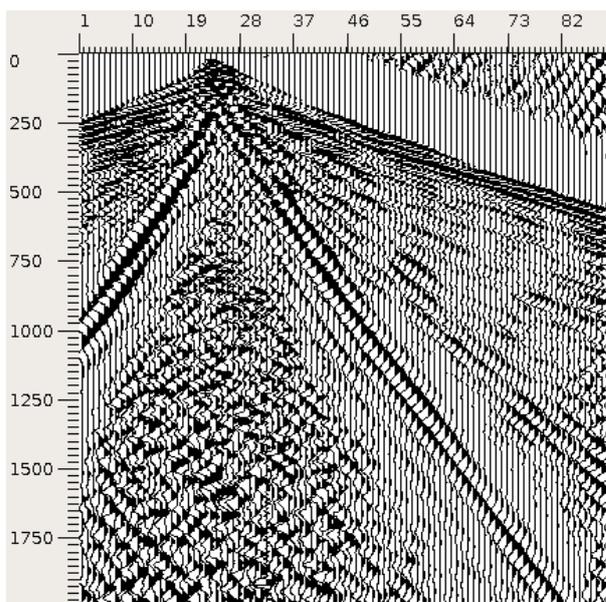


Figura 7.2.2 Dado de entrada real A.

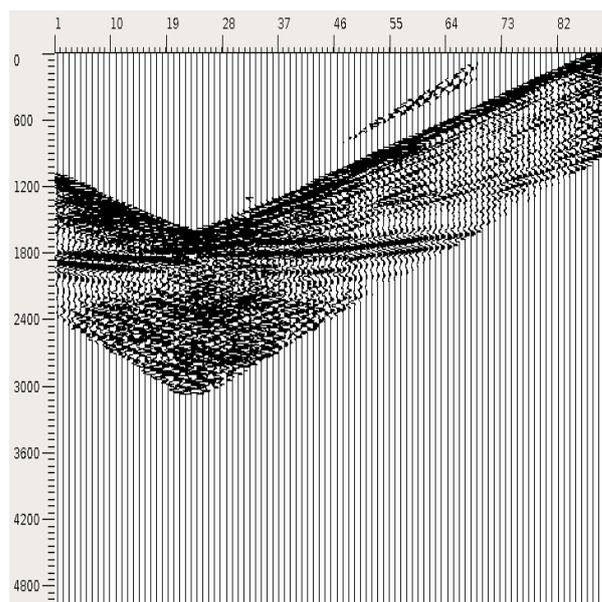


Figura 7.2.3 Dado de entrada real A corrigido LMO.

7.3.RESULTADOS

Pela tabela de autovalores, pode-se perceber que até o seis primeiros autovalores é onde estão os modos de energia mais altos. Visualizam-se os sete primeiros autovalores, onde o programa KL/DVS é aplicado no dado corrigido de LMO, e o resultado é visualizado no dado recorrigido. Será aplicado um ganho maior nas amplitudes, para uma melhor visualização.

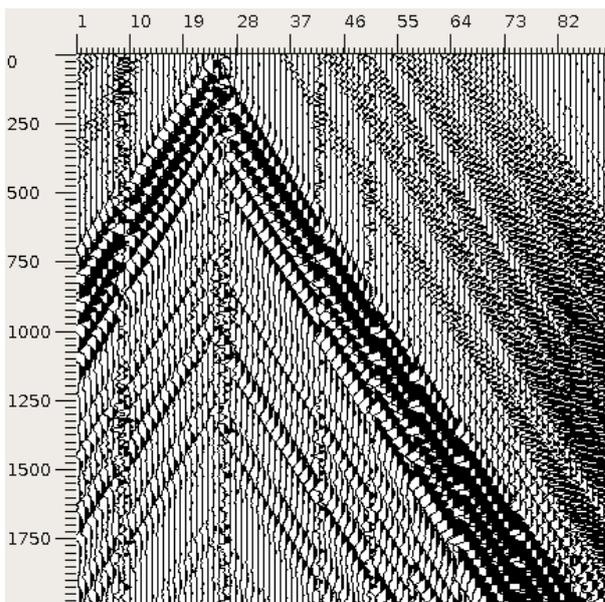


Figura 7.3.1 Primeira autoimagem.

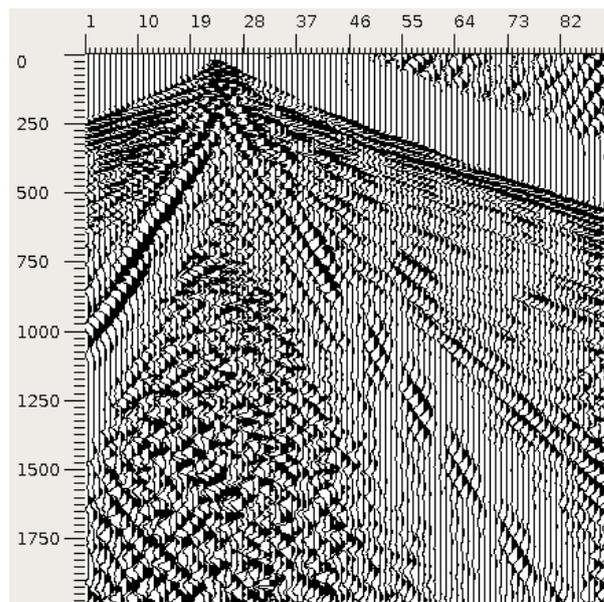


Figura 7.3.2 Sem a primeira autoimagem.

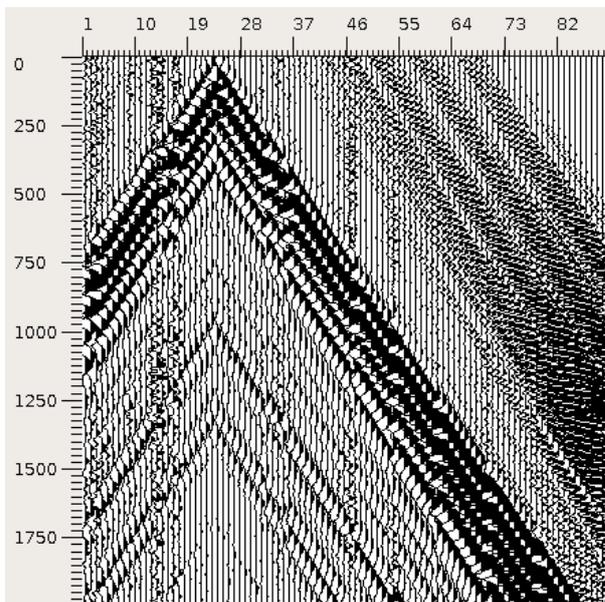


Figura 7.3.3 Segunda autoimagem .

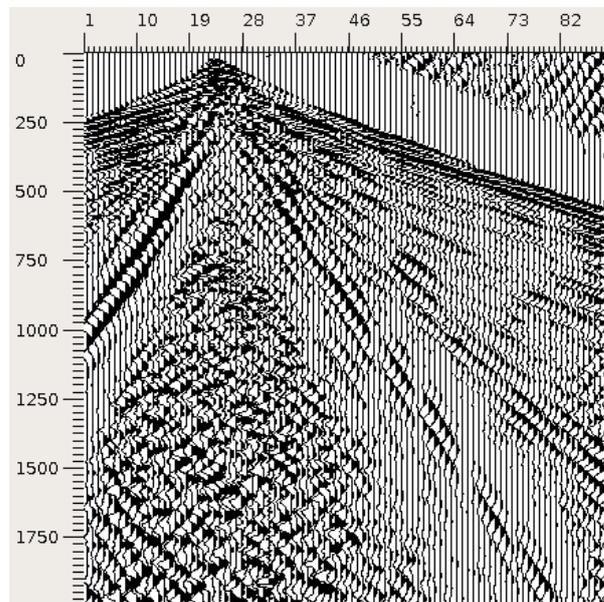


Figura 7.3.4 Sem a segunda autoimagem.

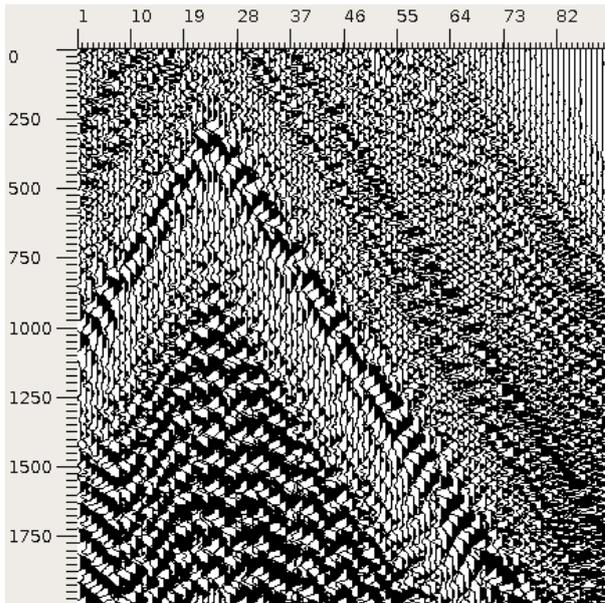


Figura 7.3.5 Terceira autoimagem.

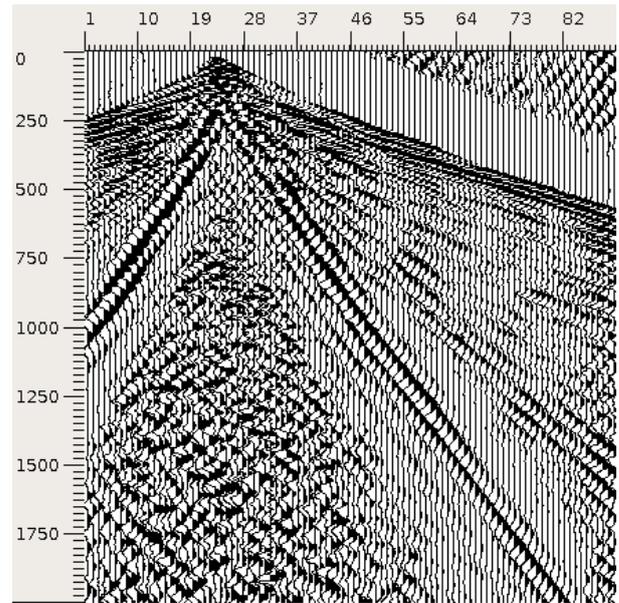


Figura 7.3.6 Sem a terceira autoimagem.

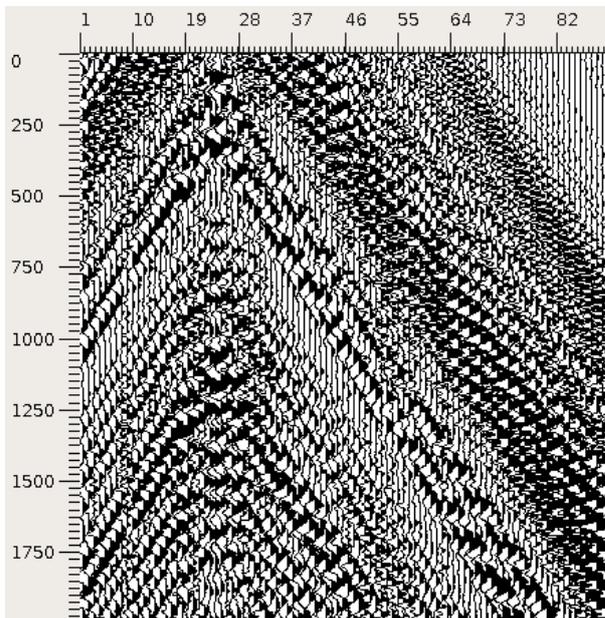


Figura 7.3.7 Quarta autoimagem.

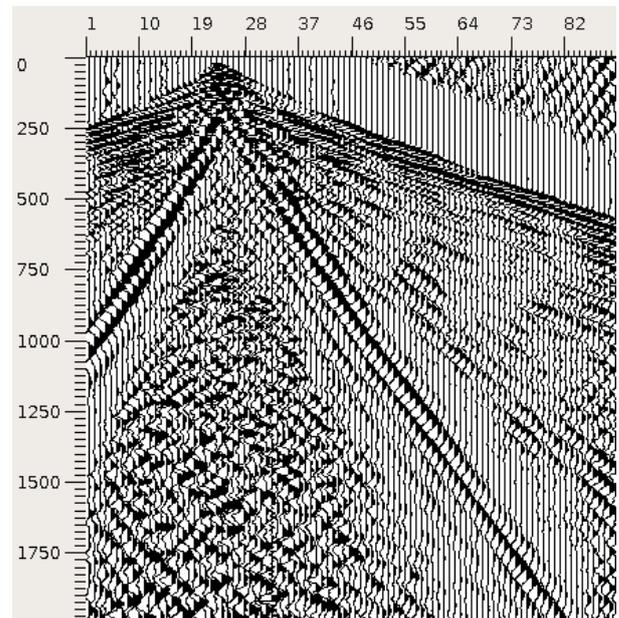


Figura 7.3.8 Sem a quarta autoimagem.

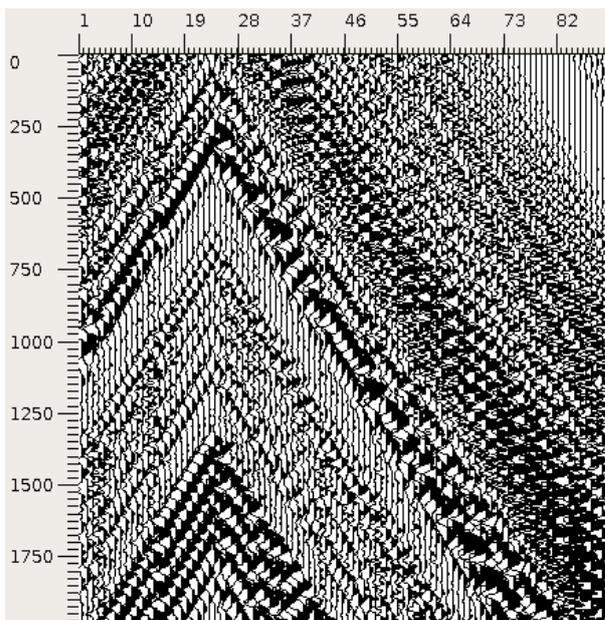


Figura 7.3.9 Quinta autoimagem.

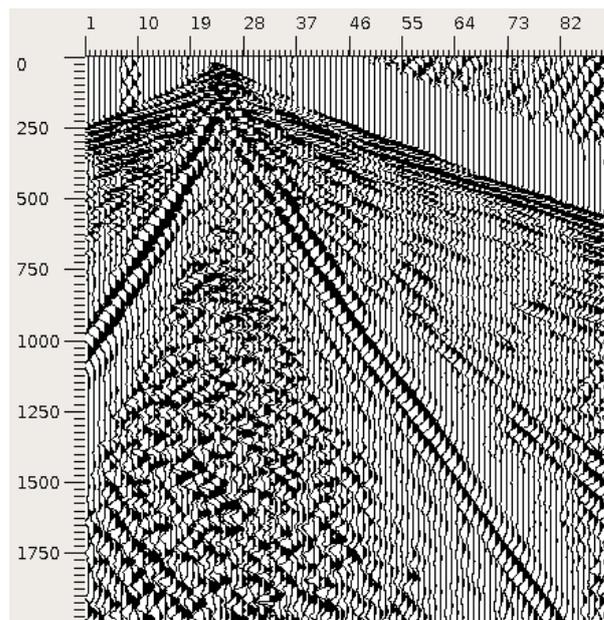


Figura 7.3.10 Sem a Quinta autoimagem.

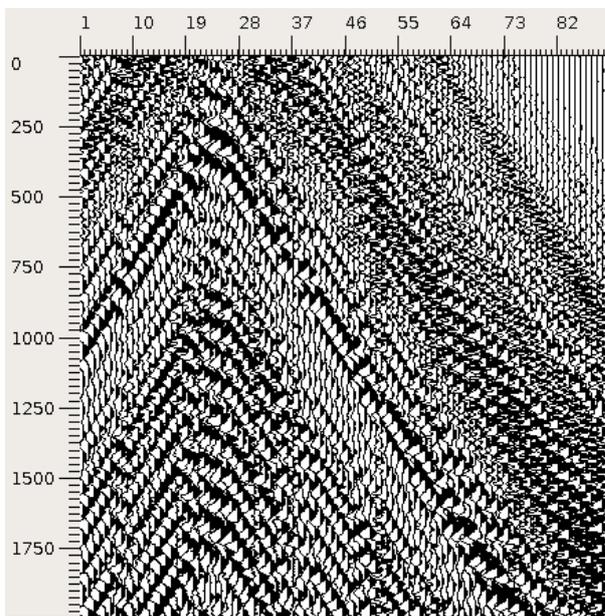


Figura 7.3.11 Sexta Autoimagem.

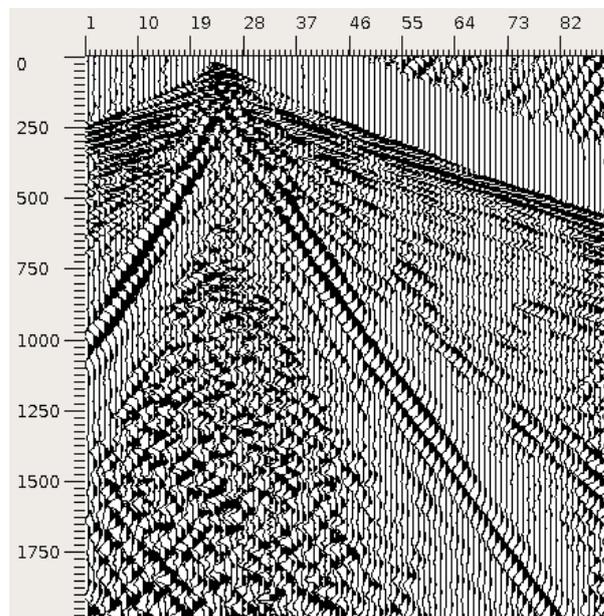


Figura 7.3.12 Sem a sexta autoimagem.

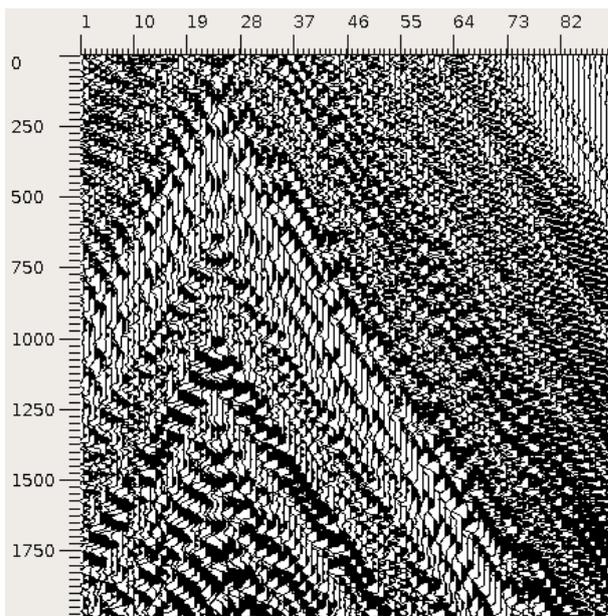


Figura 7.3.13 Sétima autoimagem.

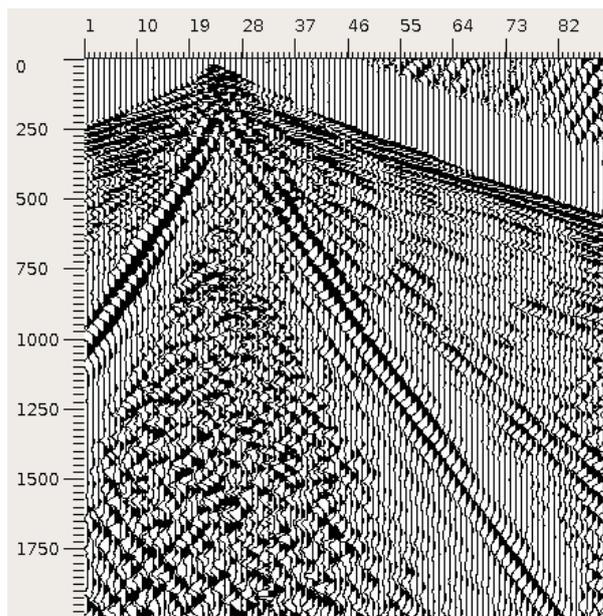


Figura 7.3.14 Sem a sétima autoimagem.

Nota-se que a partir da quarta autoimagem o sismograma praticamente não se altera, isso ocorre porque essas autoimagens por si só não representam o ruído, mas sim a soma delas. Agora se ver a soma dessas autoimagens.

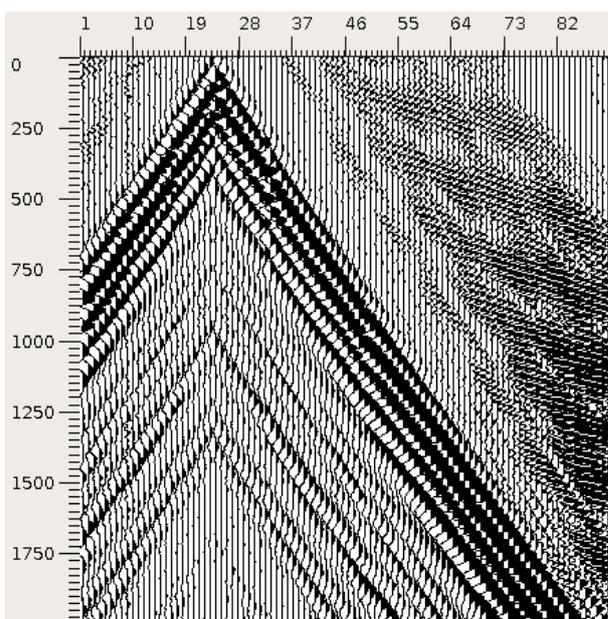


Figura 7.3.15 Somando as 2 primeiras autoimagens.

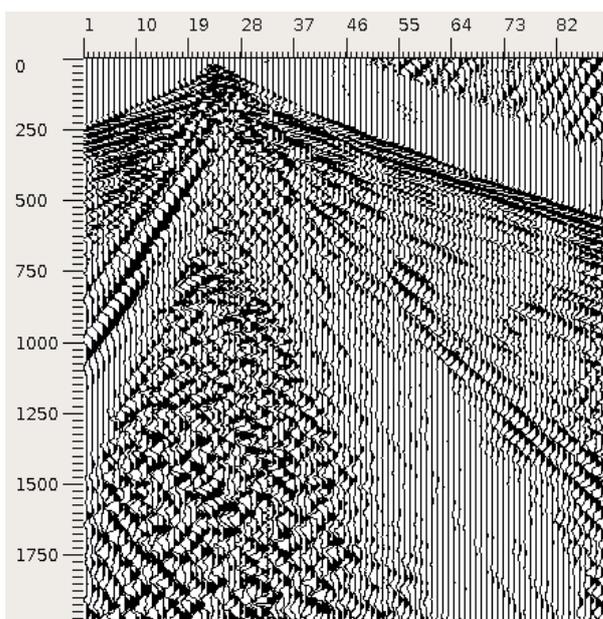


Figura 7.3.16 Zerando as 2 primeiras autoimagens.

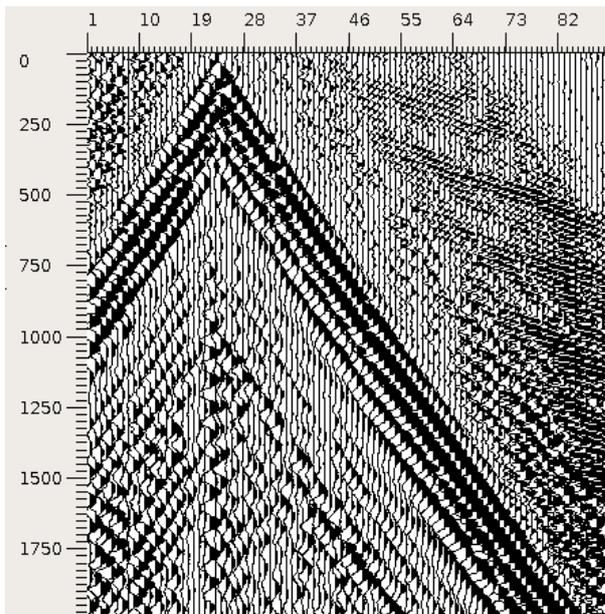


Figura 7.3.17 Somando as 3 primeiras autoimagens.

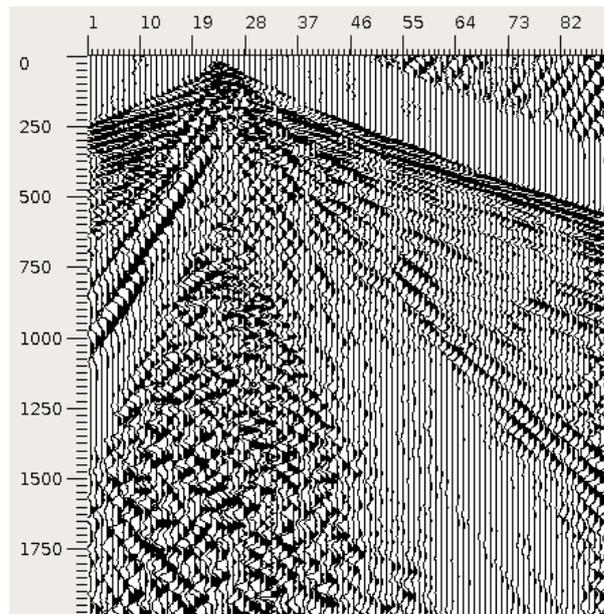


Figura 7.3.18 Zerando as 3 primeiras autoimagens.

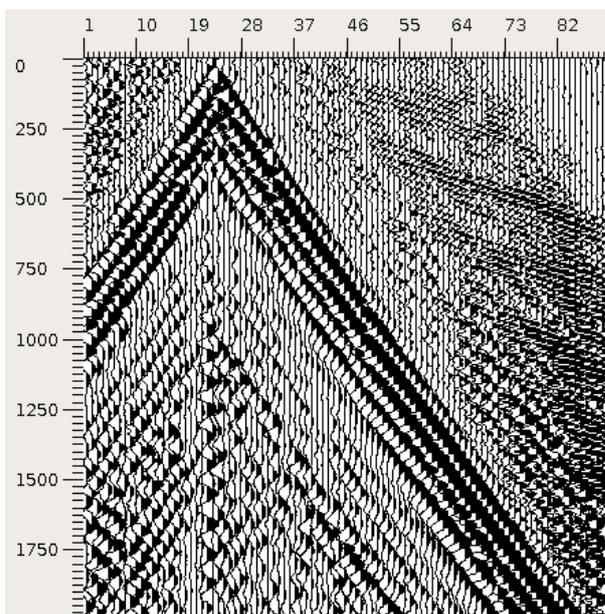


Figura 7.3.19 Somando as 4 primeiras autoimagens.

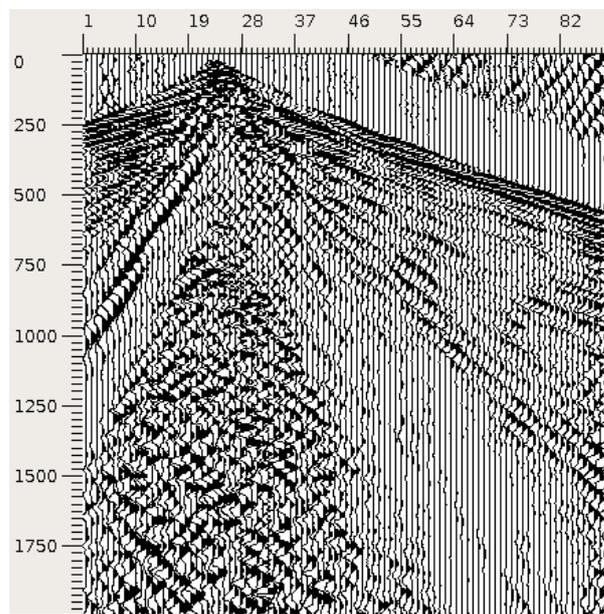


Figura 7.3.20 Zerando as 4 primeiras autoimagens.

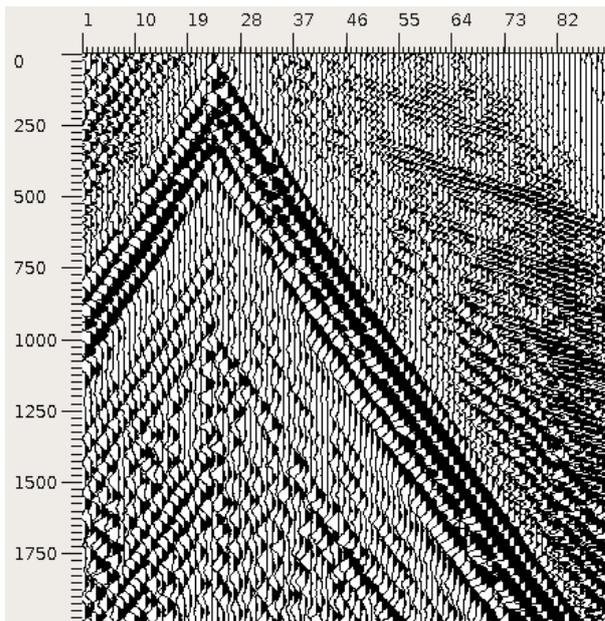


Figura 7.3.21 Somando as 5 primeiras autoimagens.

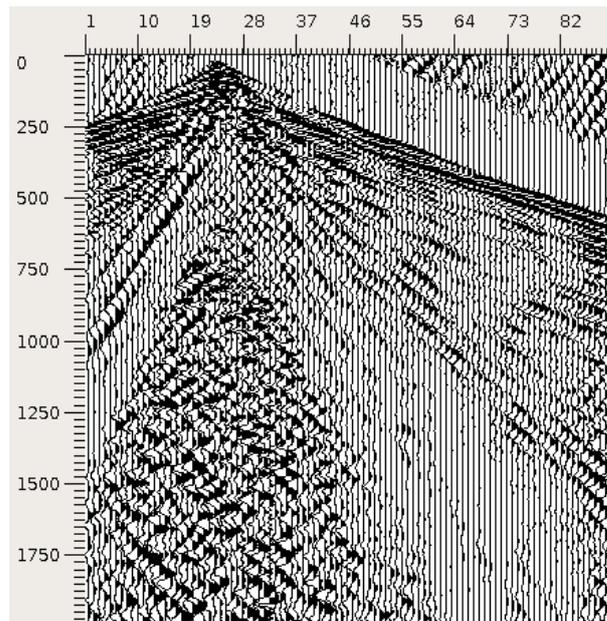


Figura 7.3.22 Zerando as 5 primeiras autoimagens.

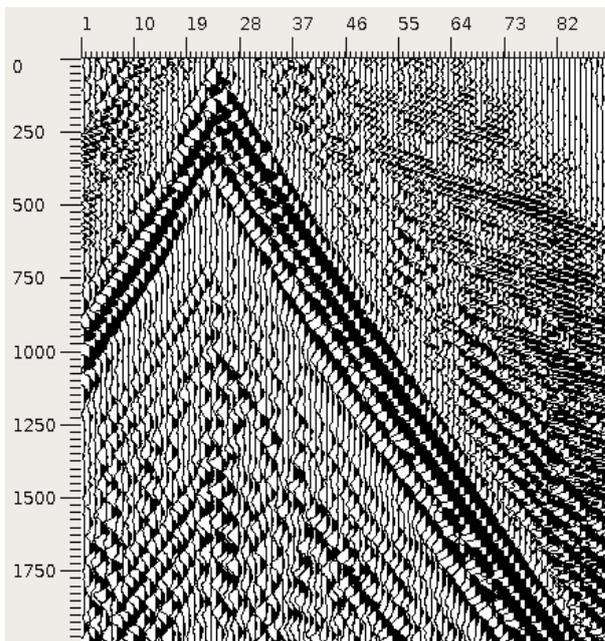


Figura 7.3.23 Somando as 6 primeiras autoimagens.

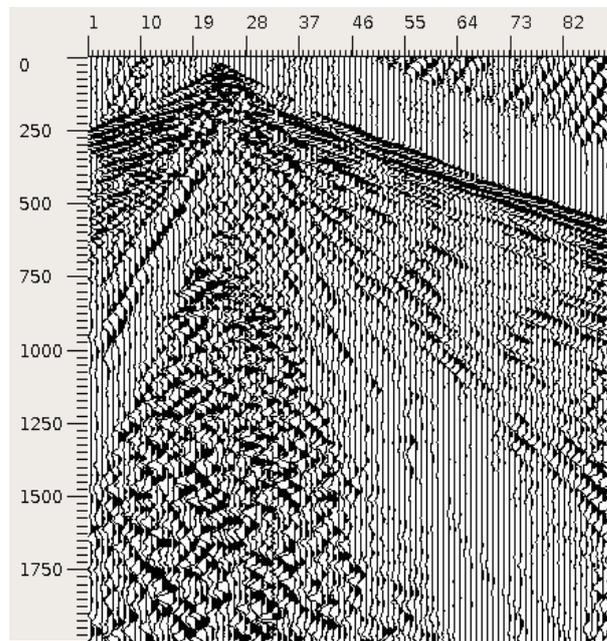


Figura 7.3.24 Zerando as 6 primeiras autoimagens.

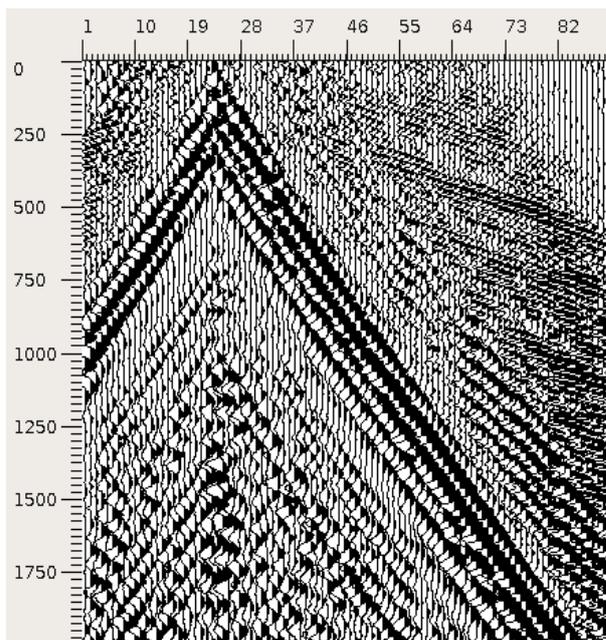


Figura 7.3.25 Somando as 7 primeiras autoimagens.

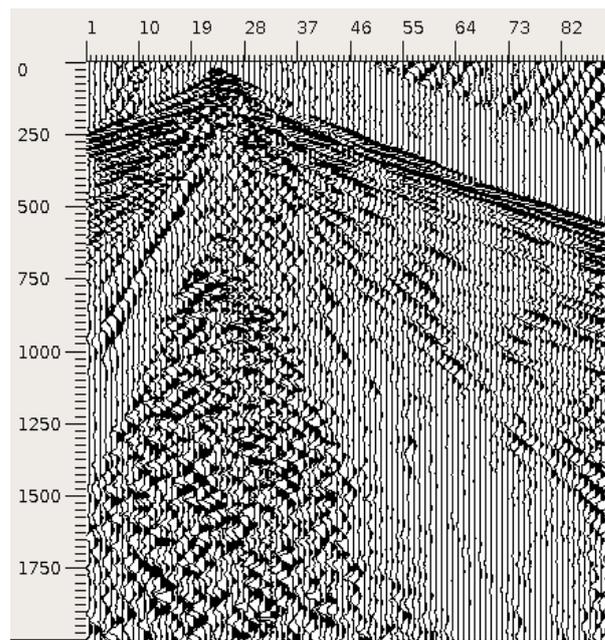


Figura 7.3.26 Zerando as 7 primeiras autoimagens.

Percebe-se então que, a partir do somatório das seis primeiras autoimagens, que o dado começa a perder também informações relevantes. É importante ressaltar que o dado de entrada é um dado real, onde suas reflexões não são tão bem definidas como em um dado sintético, sendo necessário uma sensibilidade maior na análise do mesmo.

Agora pode-se apresentar o melhor resultado e compará-lo com o dado de entrada.

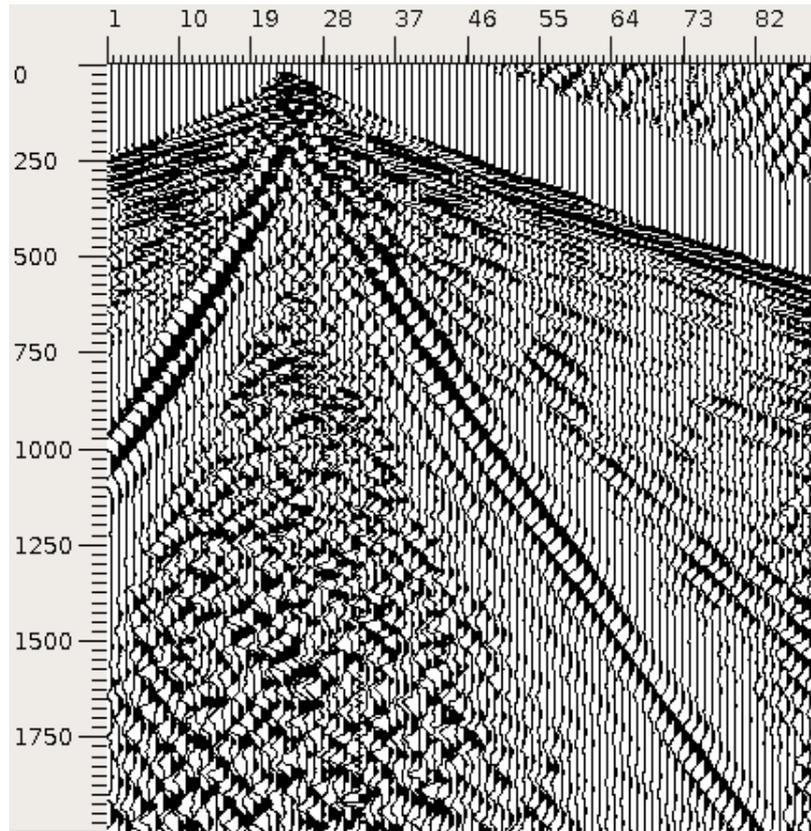


Figura 7.3.27 Dado de entrada.

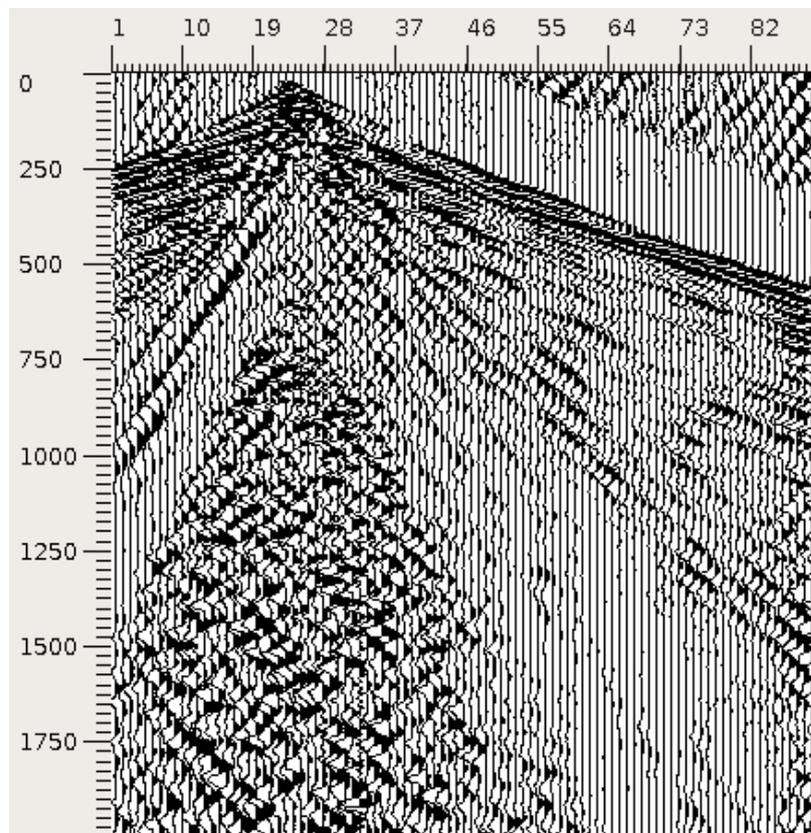


Figura 7.3.28 Dado filtrado KL.

Agora será mostrado, sem demonstrar os passos da aplicação como anteriormente, o resultado do programa KL/DVS em outros dados.

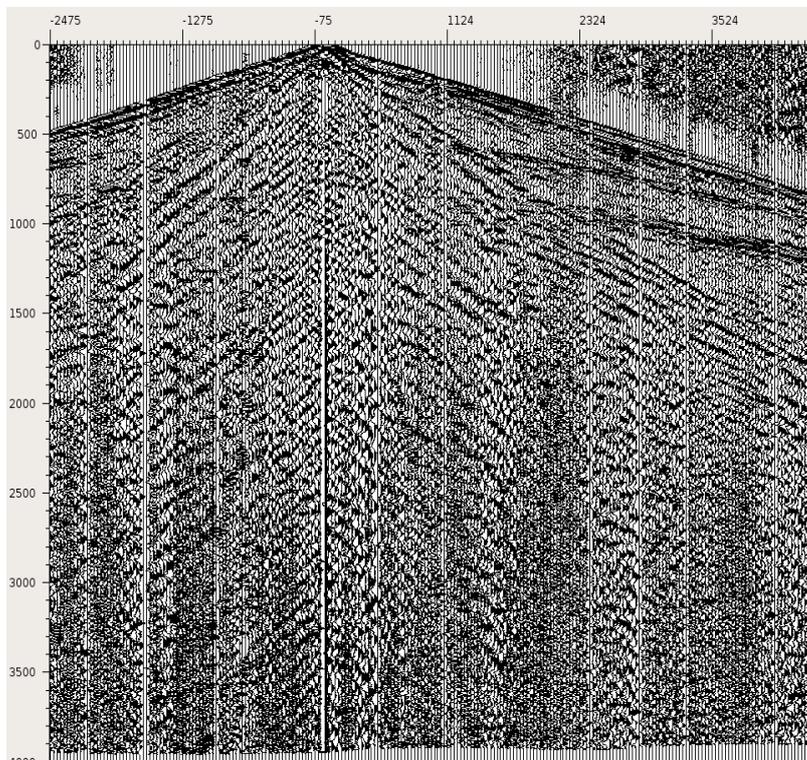


Figura 7.3.29 Dado de entrada.

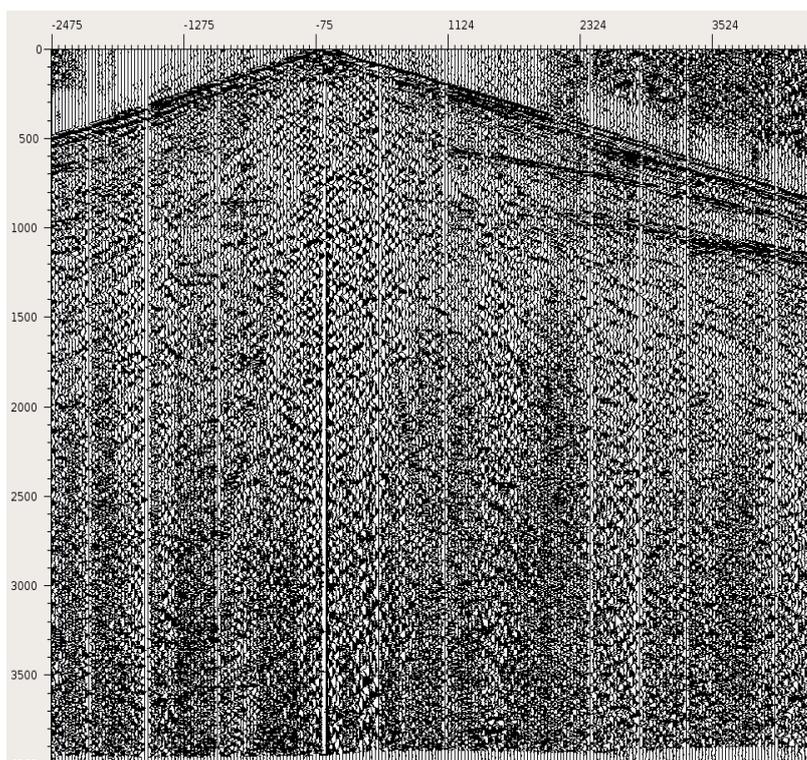


Figura 7.3.30 Dado filtrado.

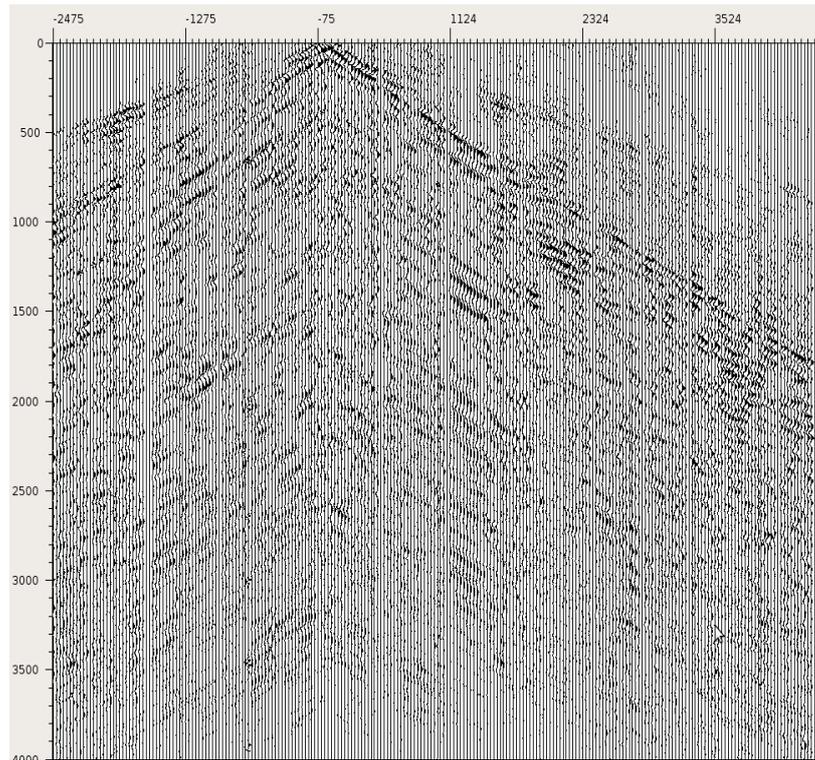


Figura 7.3.31 Resíduo.

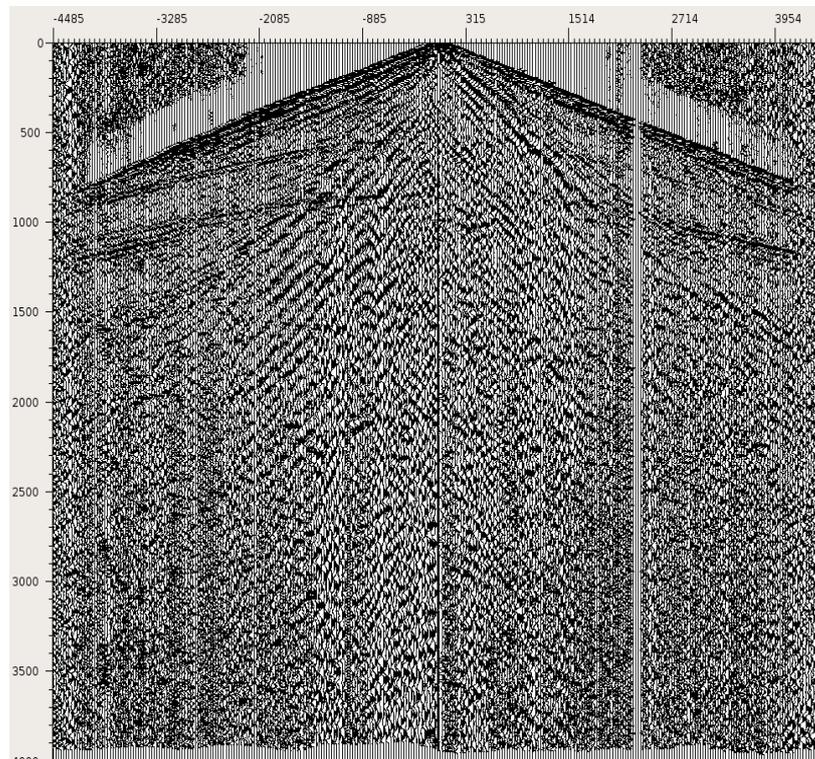


Figura 7.3.32 Dado de entrada.

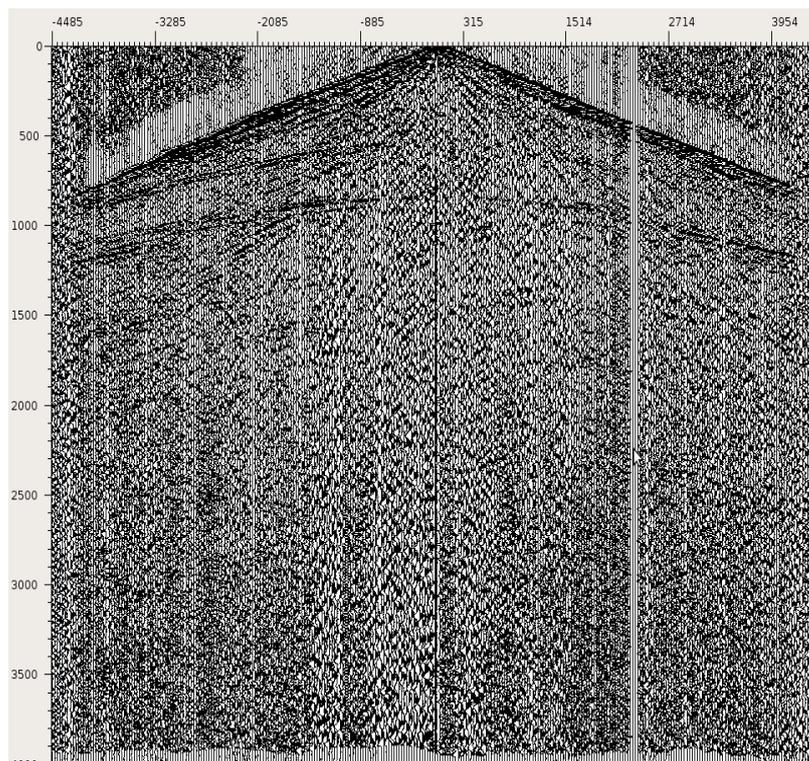


Figura 7.3.33 Dado filtrado.

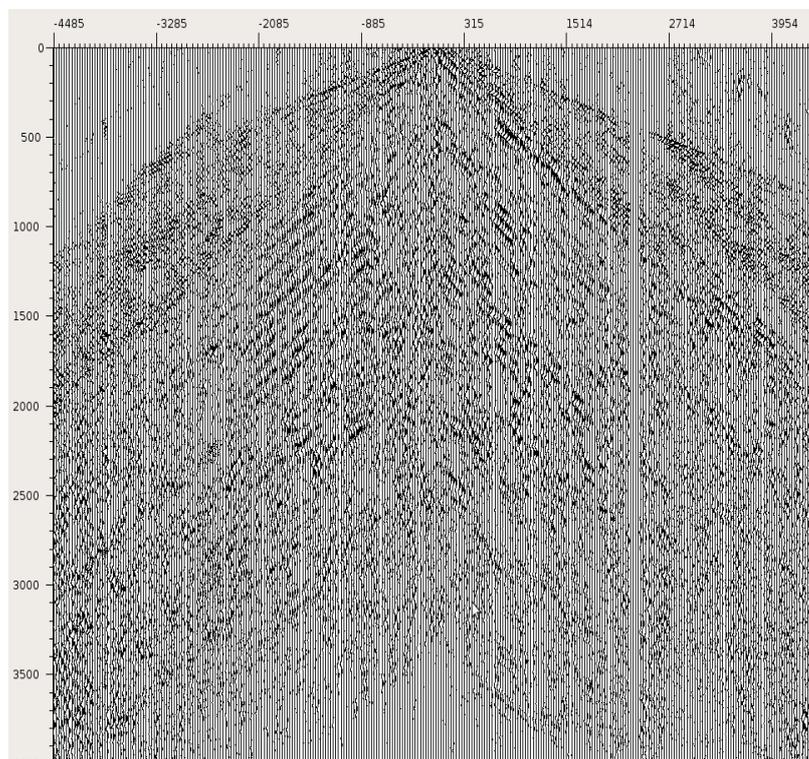


Figura 7.3.34 Resíduo.

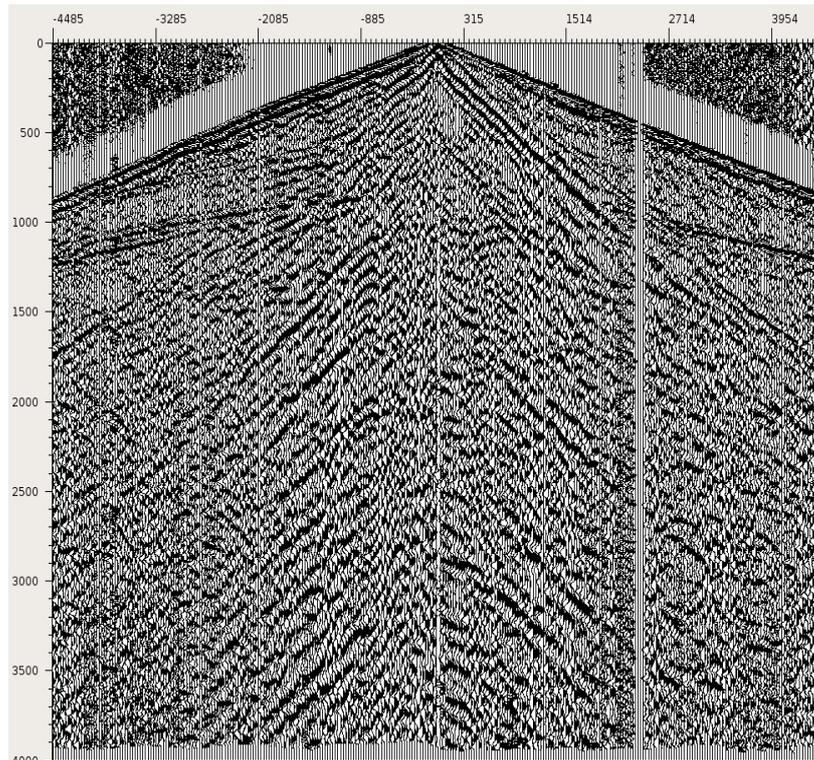


Figura 7.3.35 Dado de entrada.

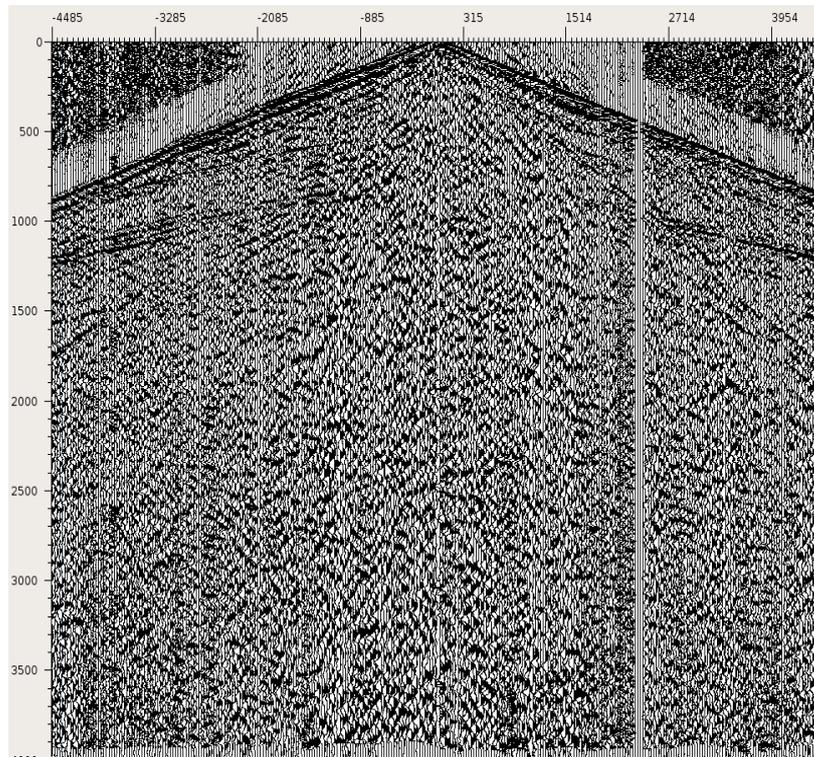


Figura 7.3.36 Dado filtrado.

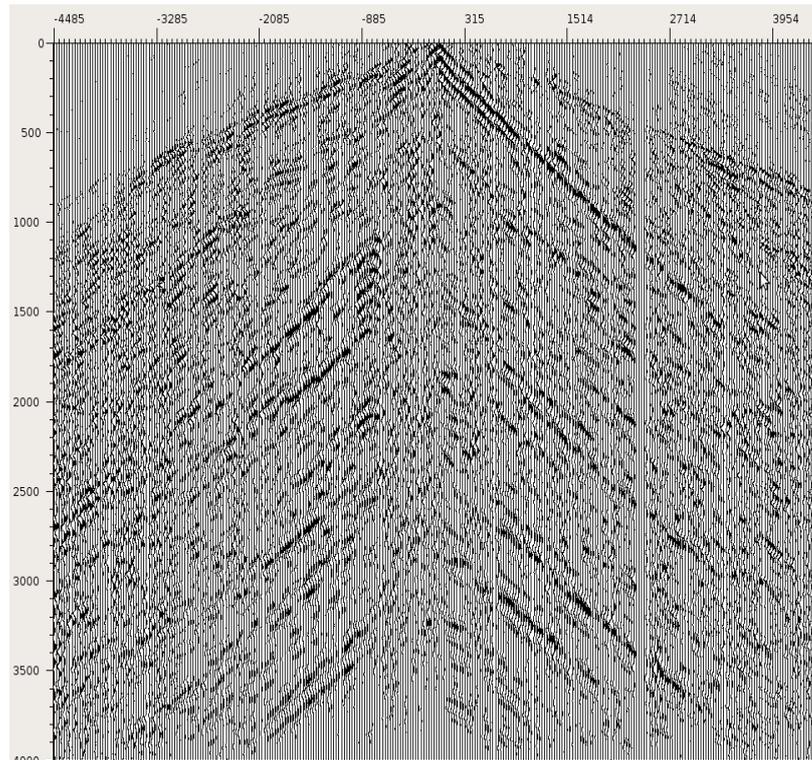


Figura 7.3.37 Resíduo.

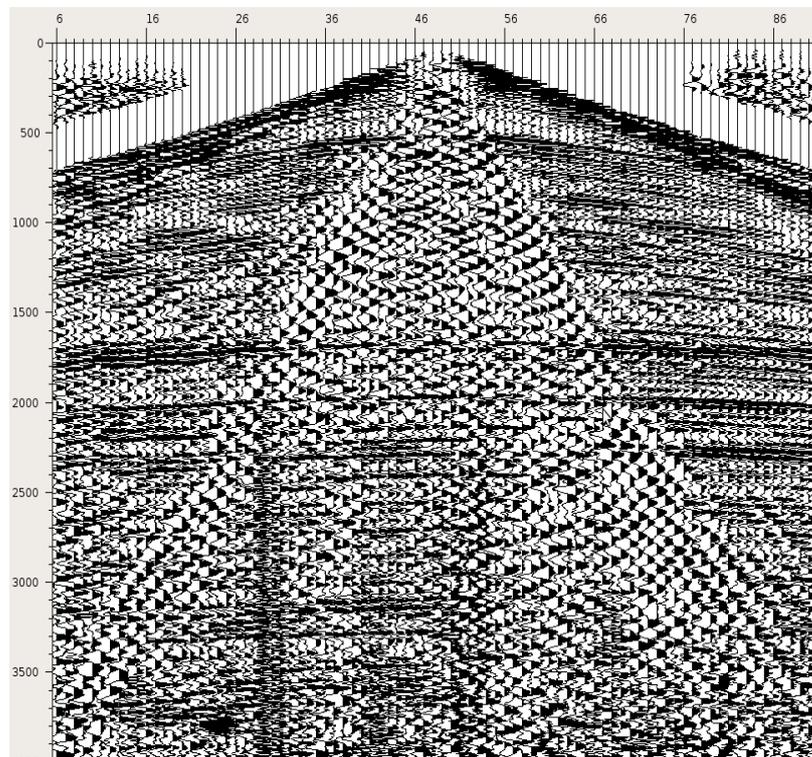


Figura 7.3.38 Dado de entrada.

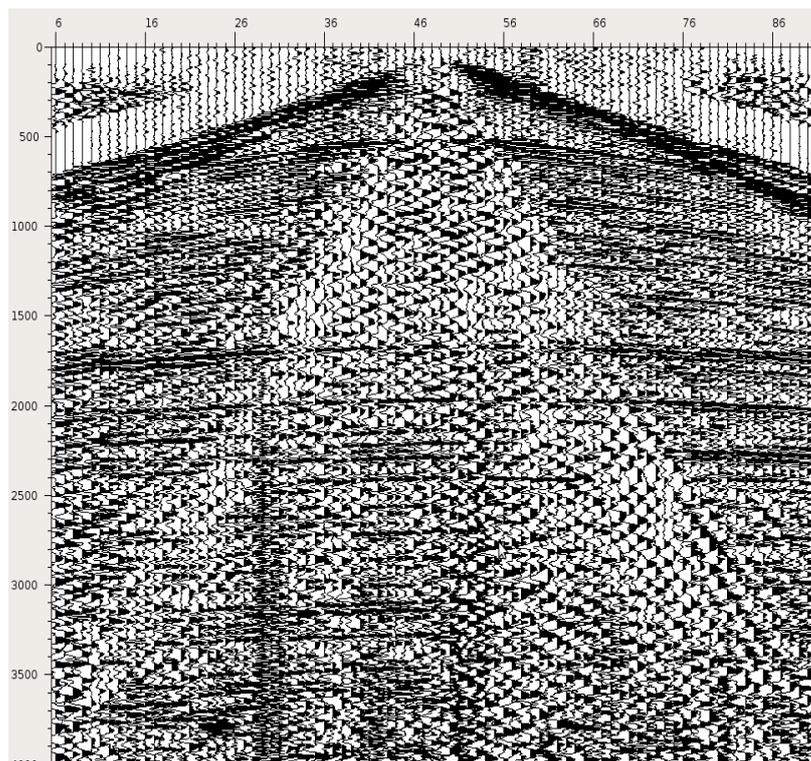


Figura 7.3.39 Dado filtrado.

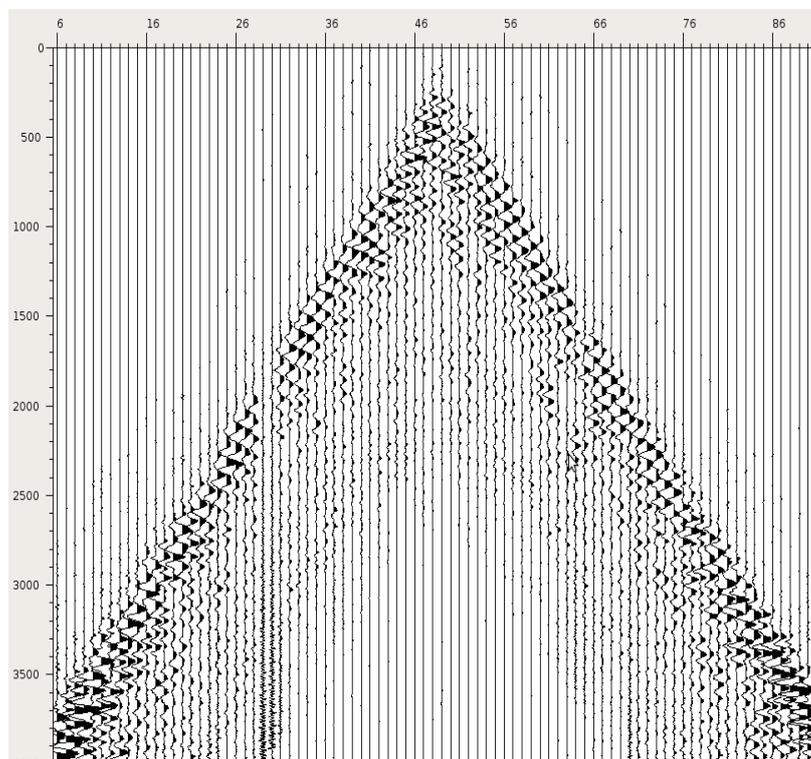


Figura 7.3.40 Resíduo.

Conclusão e Perspectivas

O programa KL/DVS foi utilizado para manipular o dado de entrada real através dos seus autovalores e autovetores, obtidos da decomposição em valores singulares. O objetivo é obter as autoimagens do mesmo e assim conseguir a visualização do ruído “*ground roll*” nesse dado. A idéia é a de dividir o dado em várias imagens, onde cada uma delas corresponde a autoimagem de um autovalor correspondente ao seu autovetor da matriz covariância.

A soma de todas essas autoimagens resulta na imagem do dado, mas como cada autoimagem concentra uma energia, pode-se manipulá-lo zerando algumas dessas autoimagens na soma, ficando apenas com alguns modos de energia.

A transformada KL permite muito bem uma identificação de padrões dentro de um conjunto de dados, baseado nos autovalores e autovetores, os quais contém, de uma maneira ótima, no sentido dos mínimos quadrados, a informação correlacionável contida nos dados originais, levando a uma maior compactação da informação e frequentemente reduzindo a dimensão do problema.

A Decomposição em Valores Singulares tem como característica principal a capacidade em determinar o posto ou o grau de singularidade de uma matriz. Quando se tratar com dados sísmicos esta singularidade reflete-se no grau de correlação horizontal entre os traços do registro. Quanto menor for o posto, maior será a correlação entre os traços, assim a informação da matriz de dados de entrada será concentrada em poucas autoimagens, que estarão sendo associadas a grandes valores singulares.

Com o conhecimento de que a melhor coerência do KL é a horizontal, devido isto concentrar a maior parte da informação nas primeiras autoimagens, usou-se como critério de seleção na aplicação, a horizontalização do ruído “*ground roll*” com a aplicação da técnica

“*linear move out*”, sendo necessário após a aplicação da filtragem, retornar a posição original dos refletores fornecendo um deslocamento contrário ao anterior.

Como o ruído “*ground roll*” apresenta um padrão, caracterizada pela baixa frequência, baixa taxa de decaimento, baixa velocidade de propagação e forte amplitude, caracterizando uma coerência ao longo do dado, pode-se usar a técnica KL/DVS para atenuá-lo.

Verificou-se que apenas uma autoimagem não seria suficiente para remoção do ruído “*ground roll*”, sendo necessária a soma dessas. Teve-se então que ser levado em consideração a tabela de autovalores, onde os maiores valores correspondem aos modos de maior energia ou modos mais coerentes.

Assim pode-se concluir, com o conhecimento de que a coerência mais forte é a horizontal, utilizando a ferramenta matemática de Decomposição em Valores Singulares e a técnica de “*Linear move-out*”, que a aplicação do filtro KL/DVS, obedecendo à seus modos de energia, é um ótimo filtro para remoção do ruído “*ground roll*” sem maiores perdas de informação relevante.

REFERÊNCIAS

Andrews, T.W., 1958, *An introduction to multivariate statistical analysis*: John Wiley & Sons; Inc.

Blackman, R.B., Tukey J.W., 1959, *The Measurement of Power Spectra* (Dover, New York).

Corso, G., Kuhn, P. S., Lucena, L. S., Thomé, Z. D. 2003, *Seismic Ground Roll Time-Frequency Filtering using the Gaussian Wavelet Transform*. *Physica A*, 318, 551 - 561.

Daubechies, I., 1988, *Orthonormal Bases of Compactly Supported Wavelets*. *Communications on Pure and Applied Mathematics*, 41, 909 - 996.

Daubechies, I., 1990, *The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis*. *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 36, pp. 961- 1005.

Daubechies, I., 1992, *Ten Lectures on Wavelets*. Society for Industrial and Applied Mathematics. Philadelphia.

Daubechies, I., 1996, *Where Do Wavelets Come From? A Personal Point of View*. *Proceedings of the IEEE, Special Issue on Wavelets* 84, 510 - 513.

Farge, M., 1992, *Annual Review of Fluid Mechanics* 24, 395.

Freire, S.L.M, UFBA, 1986, *Aplicações do método de decomposição em valores singulares no processamento de dados sísmicos*, Tese de Doutorado.

Habibi, A., Wintz, P. A., 1971, *Image coding by linear transformations and block quantization*; *IEEE trans. Comm. Tech.*, vol. COM-19, N°:1, pp. 50 – 63.

Kimura, H., 1913, *Monthly Notices R. Astron. Soc.* 73, 543.

Lanczos, C., 1961 , *Linear differential operators*: B.Va. Nostrand Co. Ind. Ch 3.

Lawson, C.L., Hanson, R. J., 1984, *Solving least squares problems*; Prentice-Hall, m Englewood Cliffs, New Jersey.

Leite, F. E. A., UFRN, 2007, *Análise estatística de padrões sísmicos: Decomposição em multiescala*, Tese de Doutorado.

Leite, F. E. A., Montagne, R., Corso, G., Vasconcelos, G., Lucena, L. S., (2007a). *Optimal wavelet filter for suppression of coherent noise with an application to seismic data*. Physica A. Submitted.

Leite, F. E. A., Tavares, D. M., Lucena, L. S., (2007b). *Efficient selective filtering of seismic data using multiresolution decomposition*. Physica A. Submitted.

Lines, L.R., Treitel, S., 1984 , *Tutorial: a review of least-squares inversion and its application to geophysical problems*; Geophysical Prospecting, 32, pp. 159 – 186.

Lopez, L. C., Londono, E. G., Kazmierczak, T. S., 2005. *Using the Karhunen-Loève transform to suppress ground roll in seismic data*. Earth Sciences Research Journal. Vol. 9, no 2, 139 - 147.

Mallat, S., 1989, *A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 11(7), 674 - 693.

Mallat, S., 1989, *Multiresolution approximations and wavelet orthonormal bases of $L^2(\mathbb{R})$* . Transactions of American Mathematical Society, 315(1), 69 - 87.

Mallat, S., 1989, *Multifrequency channel decomposition of images and wavelet models*. IEEE Transaction in Acoustic, Speech and Signal Processing, 37, 2091 - 2110.

Mallat, S. and Hwang, W. L., 1992, *Singularity detection and processing with wavelets*. IEEE Transaction in Information Theory, 38(2), 617 - 643.

Mallat, S. and Zhang, Z., 1993, *Matching pursuit in a time-frequency dictionary*. IEEE Transactions on Signal Processing, 3397 - 3415.

Mallat, S., 1999, *A Wavelet Tour of Signal Processing*. Academic Press, New York.

Meyer, Y., 1986, *Principe d'incertitude, bases Hilbertiennes et algèbres d'opérateurs*. Séminaire Bourbaki. 662, no662, 1985 - 1986.

Meyer, Y. 1990, *Ondelettes*. Hermann. New York.

Meyer, I., 1992, *Wavelets and Operators. Advanced mathematics*. Cambridge University Press.

Meyer, Y., 1993, *Wavelets: Algorithms and Applications. Society for Industrial and Applied Mathematics*. Philadelphia. SIAM.

Miranda, C. R., 2005, Phys. Rev. Lett. 95.

Montagne, R., Vasconcelos, G. (2006a); *An optimized Filter for seismic data using the Karhunen-Loève transform and a minimum-energy criterium*. Physical Review E, 74,

Montagne, R., Vasconcelos, G. (2006b); *Thermodynamic criteria for optimal suppression of coherent noise in seismic data using the Karhunen-Loève transform*. Physica A,371, pp. 122 - 125.

Morettin, P.A., 1999, *Ondas e Ondeletas* (EdUSP, São Paulo).

Morlet, J., Arens, G., Fourgeau, E., Giard, D., 1982, *Wave propagation and sampling theory; Complex signal and scattering in multilayered media*. Geophysics, 47(2), 203 -221.

Nordemann, D.J.R., 1998, Pesq. Agropec. Bras. 33, 1787.

Pratt, W. K., 1971, *Spatial transform coding of color images*; IEEE. Transon Comm. Tech. Vol. Com-19, N°:6, pp. 980 – 992.

Ramanuja Rao, K., 1973, *Solar Physics*, 29, 47.

Rodrigues Neto, C., Zanandrea A., 2001, F.M. Ramos, R.R. Rosa, M.J.A. Bolzan, and L.D.A. Sá, *Physica A* 295, 215.

Sheriff, R. E. and Geldart, L. P. 1995, *Exploration seismology*, 2nd edition.

Vertteli , M., Herley ,C., 1992, *Signal Process*, IEEE Trans.. 40, 2207.

Wintz, P. A., 1972, *Transform picture coding*; Proc. IEEE, Vol. 60, N°:7, pp. 809 – 820.

Thiebaux, H. J., 1994, *Statistical analyses for ocean and atmospheric sciences*. Academic Press.

Turner, H.H., 1913, *Monthly Notices R. Astron. Soc.* 73, 714.

Yilmaz, O. (1987); *Seismic Data Processing*. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa (USA).

Yilmaz, O. (2003); *Seismic Data Analysis. Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data*, Society of Exploration Geophysicists.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)