



## Condicionamento Geométrico para Processos Kirchhoff

Gerson Luís da Silva Ritter<sup>1</sup>, Carlos Alves da Cunha Filho<sup>1</sup>, André Luiz Romanelli Rosa<sup>1</sup>, Paulo Casañas Gomes<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Petrobras S.A.

Copyright 2003, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 8<sup>th</sup> International Congress of The Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 14-18 September 2003.

Contents of this paper was reviewed by The Technical Committee of The 8<sup>th</sup> International Congress of The Brazilian Geophysical Society and does not necessarily represents 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

Seismic data is acquired in discrete and irregular positions at the surface. Migration algorithms expect, in general, the data to be regularly sampled. In conventional processing, functions like flexible binning and partial stacking try to regularize data before pre-stack migration. We show that these approximate processes lead to a loss of resolution. We test an improvement to Kirchhoff migration that takes into account the natural irregularity in the spatial distribution of traces. The results show a greatly improved horizontal resolution and better signal to noise ratio.

### Introdução

O objetivo da migração de dados sísmicos é obter a melhor imagem possível dos refletores em subsuperfície. Um dos fatores que afetam a qualidade desta imagem é o fato da aquisição de dados ser feita em posições discretas e irregulares na superfície. Este trabalho tem por objetivo discutir um tratamento alternativo para estas irregularidades na aplicação da migração pré-empilhamento Kirchhoff.

Inicialmente, é analisada a integral de Kirchhoff para a migração e de que forma ela é implementada em dados sísmicos discreta e irregularmente adquiridos. Em seguida, critica-se de que forma o processamento sísmico convencional trata este problema. É feita uma revisão bibliográfica dos métodos relativos a esta questão que estão sendo estudados nos centros de pesquisa e em outras empresas. Apresenta-se então o tratamento desenvolvido na Petrobras para o problema, denominado Condicionamento Geométrico, atacando frontalmente a questão da irregularidade no posicionamento dos traços e evitando aproximações que degradem a qualidade final da migração. Neste processo, são utilizados os triângulos de Delaunay, os quais serão introduzidos adiante. Aplicam-se estes conceitos em dados sísmicos reais e comparam-se os resultados com os do processamento convencional. Finalmente, propõe-se a continuação deste trabalho com o condicionamento de amplitudes da fonte e também sua aplicação em processos de imageamento similares.

### Migração Kirchhoff Pré-Empilhamento

O método de migração conhecido na indústria como Kirchhoff é baseado na solução integral da equação da onda através da teoria da função de Green.

A expressão matemática da migração pré-empilhamento Kirchhoff para um determinado afastamento é (ver Biondi (2001), Rosa (1997)):

Na equação acima:

$$I(\vec{\xi}, \vec{h}) = - \iint_{\Omega_{\xi}} W(\vec{\xi}, \vec{m}, \vec{h}) D[t = t_D(\vec{\xi}, \vec{m}, \vec{h}), \vec{m}] d\vec{m} \quad (1)$$

$I$  é a amplitude do ponto migrado;

$\vec{\xi}$  é o vetor coordenada espacial do ponto migrado, seja em tempo ( $\vec{\xi} = \xi(x, y, t)$ ) ou em profundidade ( $\vec{\xi} = \xi(x, y, z)$ ).

$D$  é a derivada em relação ao tempo do volume de dados a ser migrado;

$\vec{m}$  é o vetor do ponto médio entre coordenadas de fonte e receptor (coordenadas do "cmp") no volume "D";

$\vec{h}$  é o vetor da diferença entre coordenadas de fonte e receptor, ou seja, afastamento e azimute, em uma faixa estreita em torno de um afastamento médio  $\vec{h}$ .

$t$  é o tempo da amostra no volume "D";

$W$  é um peso aplicado em "D",

$\Omega_{\xi}$  é a abertura do operador, ou a região do volume "D" onde a integral é calculada.

Na integral acima, assume-se que o volume de dados "D" tem valores definidos para todos os pontos " $m_x$ " e " $m_y$ " na região da abertura do operador e para todos os tempos " $t$ ". Isto implicaria em uma aquisição sísmica com uma cobertura contínua em superfície e no tempo. Na prática, os dados são registrados somente em posições discretas e irregulares em superfície e amostrados em determinados tempos. Levando isso em consideração, a integral deve ser aproximada pela seguinte soma discreta.

$$I(\vec{\xi}, \vec{h}) \approx - \sum_{i \in \Omega_{\xi}} W(\vec{\xi}, \vec{m}_i) D[t = t_D(\vec{\xi}, \vec{m}_i, \vec{h}), \vec{m}_i] \Delta \vec{m}_i \quad (2)$$

onde  $D$  inclui agora o efeito da filtragem anti-alias.

Na aplicação da equação 2, os valores de " $W$ " e " $D$ " são conhecidos. Resta saber como calcular o valor da área do elemento de superfície " $\Delta \vec{m}_i$ " associado a cada traço "i".

O tratamento das irregularidades nas posições dos traços é normalmente realizado no processamento convencional por dois processos: o “flexible binning” e a soma de traços adjacentes, como é explicado a seguir.

### Processamento Convencional

Em um primeiro passo, é feita uma regularização de cobertura por faixa de afastamento através de um processo conhecido como “flexible binning”. De maneira sucinta, este processo analisa uma faixa de afastamento e, se uma cela tem mais de um traço, o melhor deles, segundo algum critério de qualidade, é escolhido e os outros são descartados. Se uma cela não tem traço algum, o melhor traço vizinho é escolhido e copiado para o centro da cela vazia. Pode ocorrer também que os traços vizinhos não tenham qualidade suficiente para serem copiados, e, neste caso, a cela fica vazia. O resultado desta etapa é que, para uma determinada faixa de afastamento, as celas têm um ou nenhum traço.

Dependendo da relação entre intervalo de tiros e de receptores, as faixas de afastamento utilizadas no “flexible binning” não têm suas celas todas preenchidas. A etapa seguinte, a de soma de traços adjacentes, utiliza outras faixas de afastamento de forma a, idealmente, preencher todas as celas. Aplica-se uma correção de “move-out”, os traços são empilhados dentro desta outra faixa e a correção de “move-out” é removida. Os valores de palavras do “header”, como coordenadas de “cmp” e afastamento, são uma média dos traços empilhados. Ao final destes dois processos as celas, para cada faixa de afastamento, deveriam idealmente ter uma cobertura uniforme com um traço por cela.

Nestes volumes de dados regularizados, a aplicação da migração Kirchhoff de acordo com a equação 2 pode ser feita de maneira simples, assumindo como uma aproximação que os elementos de superfície  $\Delta \vec{m}_i$  têm todos a área igual à de uma cela. A migração é simplificada por este processo de regularização.

A equação 2 fica então:

$$I(\vec{\xi}, \vec{h}) \approx -\Delta \vec{m} \sum_{i \in \Omega_{\vec{\xi}}} W(\vec{\xi}, \vec{m}_i, \vec{h}) D[t = t_D(\vec{\xi}, \vec{m}_i, \vec{h}_i), \vec{m}_i] \quad (3)$$

Um preço em qualidade é pago pelas aproximações realizadas por este processo de regularização convencional. O “flexible binning”, quando descarta traços, está jogando fora informação válida que foi obtida a um custo considerável de aquisição. Se estes traços fossem aproveitados, a razão sinal-ruído da migração seria certamente maior. Talvez pior do que isso seja a ação de copiar traços de celas adjacentes. O algoritmo de migração depende fundamentalmente da informação de coordenadas para o posicionamento correto das reflexões. Um traço que tenha suas coordenadas modificadas é um traço intrinsecamente ruim. O efeito disso será uma degradação da resolução horizontal da seção migrada. Quanto à soma de traços, há dois problemas. O primeiro é que o empilhamento parcial é feito com uma correção de “move-out” convencional, a qual não é correta, especialmente para refletores

inclinados. O segundo é que o traço empilhado resultante tem uma posição e afastamento calculados pela média das posições e afastamentos dos traços empilhados. Isso também contribui para degradar a qualidade da migração. Finalmente, assumir que as áreas das superfícies elementares são idênticas para todos os traços é também uma aproximação, pois os traços ainda estão irregularmente espaçados.

O efeito conjunto de todas estas aproximações é reduzir a qualidade da migração, o que se reflete na deterioração da resolução. A hipótese deste trabalho é que, se for possível tratar a migração tal como descrita pela equação 2, de forma mais exata, a qualidade do dado sísmico migrado será melhor.

### Condicionamento Geométrico para Processo Kirchhoff

A crescente necessidade de maior resolução de imagem, especialmente para uma detalhada descrição de reservatórios, tem levado os geofísicos na indústria e nos centros de pesquisa a tratar os problemas das irregularidades da aquisição de dados sísmicos com mais atenção. Várias soluções têm sido propostas para o problema.

Uma destas propostas é a regularização de dados pela inversão para um afastamento comum (Cheningui e Biondi (2002)). Por esta técnica o operador de Azimuth Moveout (AMO) é utilizado para, a partir de dados irregulares, construir um conjunto de dados regulares em afastamento comum, mais adequado para a migração pré-empilhamento. Outro método que regulariza um volume de dados sísmicos, empregando um método de mínimos quadrados associado com uma transformada de Fourier bidimensional, foi proposto por Hindricks e Duijndam (2000). Um método de reconstrução de dados foi proposto por Stolt (2000). Estes métodos de regularização têm a clara vantagem, em relação ao método convencional anteriormente descrito, de produzir um volume regular de dados utilizando informações das amostras sísmicas e não apenas da geometria. A desvantagem deles é que são computacionalmente intensivos.

Outro método que tem sido tratado na literatura é a migração por mínimos quadrados. Baseado na observação de que a migração não é exatamente a operação inversa da modelagem, um esquema de migração baseado na modificação do operador de migração por um método de mínimos quadrados, para aproximar esta inversa, foi descrito por Nemeth, Wu e Schuster (1999). Embora produza bons resultados, este tipo de migração é extremamente cara, especialmente se for implementada antes do empilhamento.

O Condicionamento Geométrico aqui discutido é diferente das duas classes de métodos acima descritos e do processamento convencional. Em primeiro lugar, os dados sísmicos não são regularizados antes de serem migrados, ou seja, suas posições originais são mantidas tais como elas foram registradas. Em segundo lugar, o dado é migrado com exatidão o mesmo programa que está implementado nos centros de processamento da

Petrobras, a Migração Pré-Empilhamento Kirchhoff. Finalmente, em relação ao processamento convencional, este método difere ao dispensar o uso de “flexible binning” e soma de traços adjacentes.

O processo de Condicionamento Geométrico deve ser aplicado antes da migração, para levar em conta as irregularidades nas distribuições de traços em cada plano de afastamento comum. Como será mostrado a seguir, este processo tem a vantagem de ser simples, rápido e resultar numa migração com qualidade superior ao processamento convencional.

Como foi visto, a utilização da equação 2 para a migração esbarra no problema do cálculo das áreas das superfícies elementares. Enquanto outros métodos contornam o problema através da regularização prévia do volume “ $D$ ”, o método do Condicionamento Geométrico ataca o problema frontalmente, calculando estas áreas para cada traço.

Uma forma de calcular a área associada a cada traço é cobrir a superfície com polígonos irregulares, de forma que a cada traço corresponda um polígono e que a área de cada polígono seja, de alguma forma, inversamente proporcional à densidade local de traços. Isto pode ser realizado utilizando o diagrama de Voronoi. Este diagrama tem a propriedade de que para um traço, qualquer ponto dentro do polígono ao qual ele pertence é mais próximo do traço do que de qualquer outro traço no diagrama. Apesar da definição um tanto quanto abstrata, pode-se concordar que isto gera polígonos em torno de cada traço de maneira muito natural. Existe um diagrama geométrico dual do diagrama de Voronoi chamado de triangulação de Delaunay, no qual cada traço será o vértice de um triângulo. Definindo formalmente, cada triângulo tem a propriedade de que um círculo nele circunscrito não contém nenhum outro traço que não os vértices.

A triangulação de Delaunay tem aplicações em geometria computacional, simulação de crescimento de cristais, estudo de ligas em metalurgia, cartografia, problemas de elementos finitos, visualização de superfícies, jogos de computador, e muitas outras mais. Em geofísica, foi usada na regularização de dados sísmicos por Hindricks e Duijndam (2000). O software GeoDepth da Paradigm também faz uso desta técnica, de forma muito similar a este trabalho.

Por ser de utilização comum em outras áreas, é possível conseguir na Internet vários programas de domínio público para o cálculo da triangulação de Delaunay ou do diagrama de Voronoi. O código do programa foi adaptado para fornecer a informação necessária para o Condicionamento Geométrico, ou seja, a área de cada polígono. Na prática, trabalhou-se com os triângulos de Delaunay, pois pode-se mostrar que a área dos polígonos é igual a um terço da soma das áreas dos triângulos com vértice em um determinado traço.

Na figura 2 temos um exemplo com dados reais de um 3D da triangulação de Delaunay. Cada vértice representa a posição de um traço. Nesta figura observa-se que, em regiões onde a densidade de traços é grande, as áreas

dos triângulos são pequenas. Ao contrário, onde a densidade de traços é baixa, as áreas são maiores.

O algoritmo para o cálculo das áreas inicia com a triangulação de Delaunay das posições dos traços de um plano de afastamento comum. Em seguida, para cada traço são identificados os triângulos que têm vértice neste traço e calculada a soma das áreas destes triângulos. As áreas das superfícies elementares serão então iguais a um terço das áreas dos triângulos de cada traço. Finalmente, podemos migrar os dados com a seguinte versão da equação 2:

$$I(\vec{\xi}, \vec{h}) \approx - \sum_{i \in \Omega_i} \sum W(\vec{\xi}, \vec{m}_i, \vec{h}) D[t = t_D(\vec{\xi}, \vec{m}_i, \vec{h}_i), \vec{m}_i] \Delta S_i \quad (4) \quad \text{onde}$$

$\Delta S_i$  é a área correspondente a cada traço.

Na prática, no lugar de utilizar a equação 4 diretamente na migração, optou-se por multiplicar  $D_i$  por  $S_i$  previamente. Há algumas vantagens nesta abordagem. Em primeiro lugar, não é necessário alterar e tornar mais complexo o módulo de migração pré-empilhamento. Em segundo, este processo de triangulação e cálculo de área pode ser aplicado em qualquer algoritmo que aproxime uma integral em duas dimensões por uma soma discreta, pois os problemas de cálculo de áreas são similares. Portanto, um módulo separado permite o uso desta técnica para programas com DMO, AMO e outros similares. Na prática, portanto, a equação 3 está implementada em duas etapas:

$$D^*[t = t_D(\vec{\xi}, \vec{m}_i, \vec{h}_i), \vec{m}_i] = D[t = t_D(\vec{\xi}, \vec{m}_i, \vec{h}_i), \vec{m}_i] \Delta S_i$$

$$I(\vec{\xi}, \vec{h}) \approx - \sum_{i \in \Omega_i} \sum W(\vec{\xi}, \vec{m}_i, \vec{h}) D^*[t = t_D(\vec{\xi}, \vec{m}_i, \vec{h}_i), \vec{m}_i] \quad (5)$$

## Resultados

Foram realizados testes em um levantamento 3D marítimo comparando a migração antes do empilhamento em tempo com processamento convencional (isto é, com “flexible binning” e soma de traços) e com o condicionamento geométrico.

Na figura 2 é apresentado o resultado da migração 3D em um plano de afastamento comum (192 m) do processamento convencional e do Condicionamento Geométrico. A diferença mais evidente é a melhor definição da falha na migração com Condicionamento Geométrico. Isso já era esperado, pois, como já foi dito, a resolução horizontal deve ser melhor com este novo processo. Outra diferença é a melhor continuidade das reflexões, em especial entre 2400 e 3000 ms, na migração com Condicionamento Geométrico. Este processo também produz menor ruído de migração, como se observa acima do fundo do mar. Isto é explicado pelo fato de que a aplicação da equação 2 é feita de forma mais precisa neste caso.

Na figura 3, são mostradas seções em escala ampliada da figura 2, ressaltando as diferenças na continuidade dos refletores e na razão sinal/ruído entre o processamento convencional e o Condicionamento Geométrico.

Na figura 4, são mostradas seções em escala ampliada da figura 2, realçando o aumento da resolução horizontal deste último da seção com Condicionamento Geométrico.

Na figura 5, são comparados um CRP migrado com os dois métodos. O Condicionamento Geométrico produz um resultado bem menos ruidoso.

Na figura 6, os "time-slices" apresentados evidenciam a melhor resolução horizontal proporcionada pelo Condicionamento Geométrico. Esta melhor resolução evidencia também problemas de aquisição provavelmente relacionados com variações de energia da fonte, que não foram corrigidas durante o pré-processamento.

### Conclusões

O processo de Condicionamento Geométrico produz resultados superiores ao processamento convencional, substituindo com vantagens o "flexible binning" e a soma de traços utilizados para regularizar o dado a ser migrado. As vantagens deste processo são:

- melhoria da resolução horizontal,
- melhoria da continuidade das reflexões,
- aumento da razão sinal/ruído.
- simplificação do fluxo de processamento, diminuindo as possibilidades de erro.

O Condicionamento Geométrico tem a desvantagem de trabalhar com um volume maior de dados a migrar e, portanto, ser mais caro que o processo convencional. Entretanto, não foi estudado qual o conjunto mínimo de traços que produzirá resultados de boa qualidade. Neste sentido, é possível que haja espaço para redução do número de traços migrados.

Espera-se que o Condicionamento Geométrico seja benéfico para processos como DMO e AMO, que também realizam o cálculo numérico de uma integral de superfície, embora ainda não tenha sido testado desta forma.

Espera-se também que o Condicionamento Geométrico beneficie estudos que dependam de amplitude e da forma das reflexões, como AVO, inversão elástica e análise de atributos.

### Agradecimentos

Agradecemos à Petrobras pela permissão em publicar este trabalho.

Agradecemos também a Rodrigo Portugal pela indicação do algoritmo da triangulação de Delaunay.

O geofísico Ricardo Oliveira da Petrobras foi o responsável pelo pré-processamento dos dados aqui utilizados.

### Referências Bibliográficas

Biondi, B.L., 2001, 3-D Seismic Imaging, Stanford University.

Chemingui, N., Biondi, B., 2002, Seismic data reconstruction by inversion to common offset: Geophysics, 67, 1575-1585.

Hindricks, C.O.H., Duijndam, A.J.W., 2000, Reconstruction of 3-D seismic signals irregularly sampled along two spatial coordinates: Geophysics, 65, 253-263.

Nemeth, T., Wu, C., Schuster, G.T., 1999, Least-squares migration of incomplete reflection data: Geophysics, 64, 208-221.

Rosa, A.L.R., 1997, Migração de Dados Sísmicos, Apostila de Curso interno da Petrobras.

Stolt, R.H., 2002, Seismic data mapping and reconstruction: Geophysics, 65, 890-908.

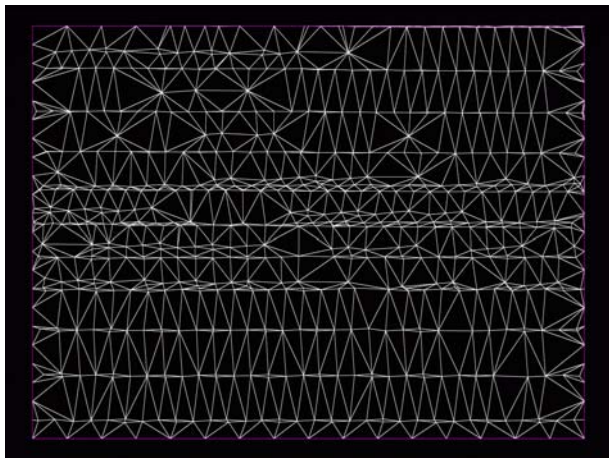


Figura 1 – Triangulação de Delaunay

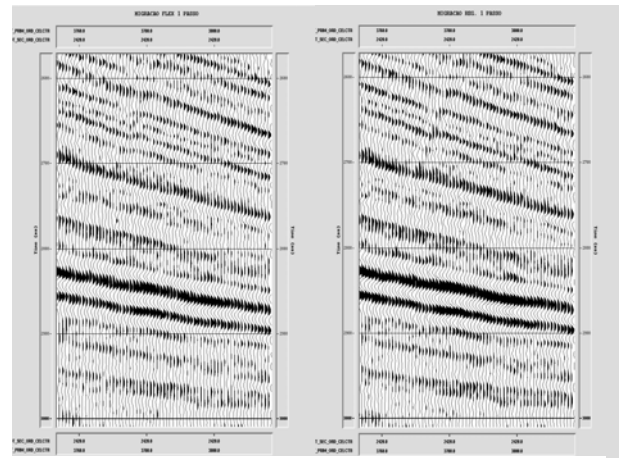


Figura 4 – Detalhe da figura 2 mostrando a melhor definição da falha com o Condicionamento Geométrico (à direita)

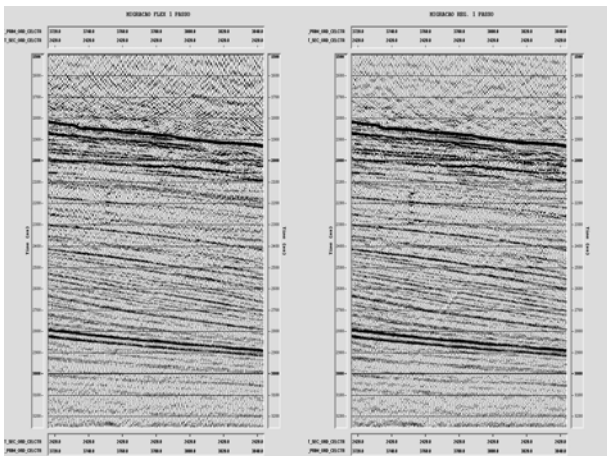


Figura 2 - Plano de afastamento comum com migração convencional à esquerda e condicionamento geométrico à direita

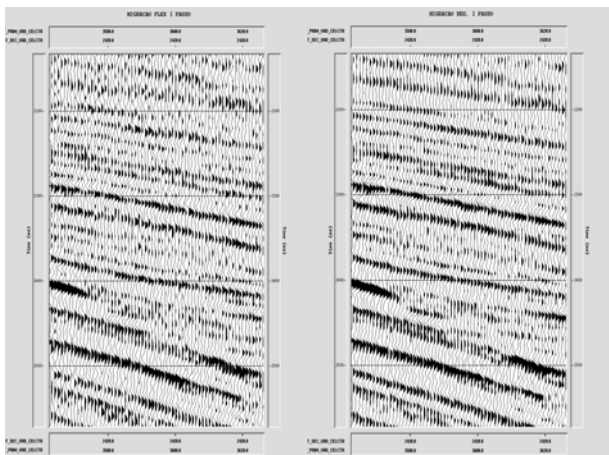


Figura 3 – Detalhe da figura 2 mostrando a melhor razão sinal-ruído com o Condicionamento Geométrico (à direita)

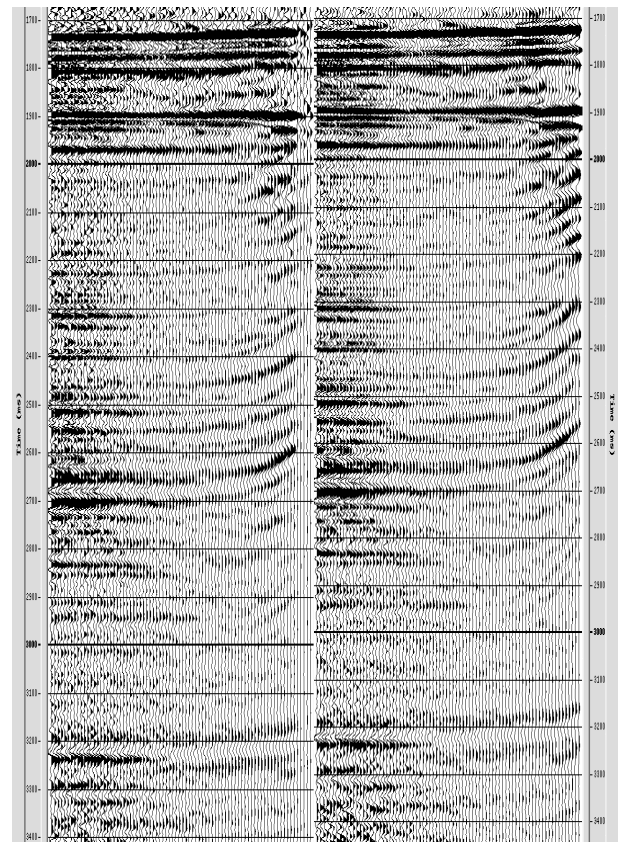


Figura 5 – CRP migrado com processamento convencional à esquerda e Condicionamento Geométrico à direita.



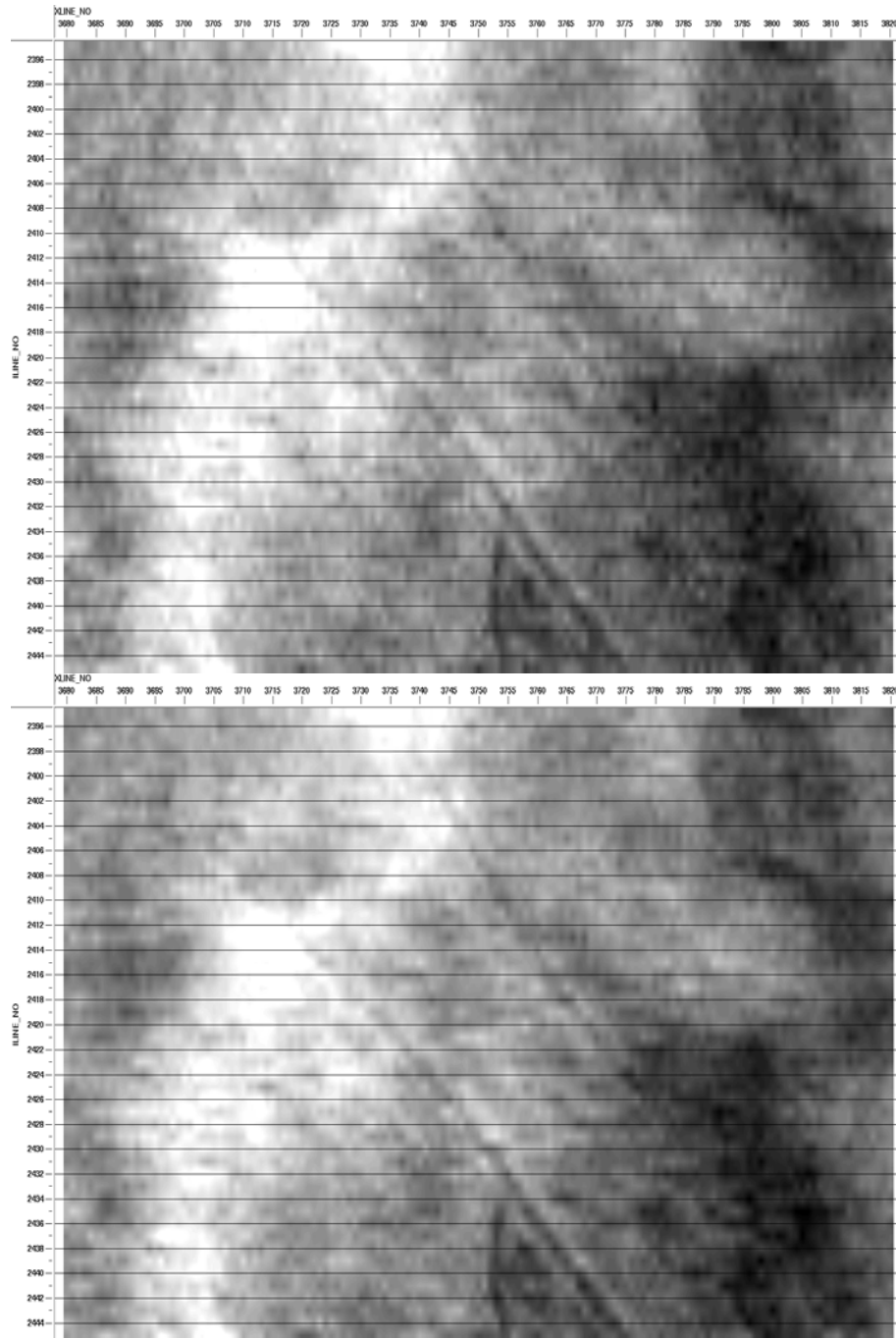


Figura 6 – “Time-slices” migrados convencionalmente (superior) e com Condicionamento Geométrico (inferior). A resolução horizontal é melhor com o novo processo.