

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS, DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA  
PROJETO FINAL II

TÉO PAIVA DOS REIS

ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DE UMA INJEÇÃO CONTROLADA DE ÁGUA NA  
ZONA VADOSA, MONITORADA ATRAVÉS DE RADAR DE PENETRAÇÃO DE SOLOS  
EM LAPSO-DE-TEMPO

NITERÓI

2011

TÉO PAIVA DOS REIS

ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DE UMA INJEÇÃO CONTROLADA DE ÁGUA NA  
ZONA VADOSA, MONITORADA ATRAVÉS DE RADAR DE PENETRAÇÃO DE SOLOS  
EM LAPSO-DE-TEMPO

Projeto Final apresentado ao Curso de Graduação em Geofísica da Universidade Federal Fluminense, como requisito para obtenção do Grau de Bacharel.

Orientador: Dr. Jandyr de Menezes Travassos

Co-orientador: Pedro Cabrera Pereira da Rosa Junior

Niterói

2011

TÉO PAIVA DOS REIS

ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DE UMA INJEÇÃO CONTROLADA DE ÁGUA NA  
ZONA VADOSA, MONITORADA ATRAVÉS DE RADAR DE PENETRAÇÃO DE SOLOS  
EM LAPSO-DE-TEMPO

Projeto Final apresentado ao Curso de Graduação em  
Geofísica da Universidade Federal Fluminense, como re-  
quisito para obtenção do Grau de Bacharel.

Aprovada em junho de 2011.

BANCA EXAMINADORA

---

Jandyr de Menezes Travassos, D.Sc.

---

Marco Antonio Cetale Santos, D.Sc.

---

José Antônio Baptista Neto, D.Sc.

Niterói

2011

R375

Reis, Téo Paiva dos

Análise espaço-temporal de uma injeção controlada de água na zona vadosa, monitorada através de radar de penetração de solos em lapso-de-tempo / Téo Paiva dos Reis. – Niterói: [s.n.], 2011.

112 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geofísica) – Universidade Federal Fluminense, 2011.

1.Processamento de dados sísmicos. 2.Zona vadosa. 3.Radar de penetração de solos. I.Título.

CDD 550

À memória de minha avó, Catarina Clara Nazareth Paiva, e de meu amigo e co-orientador, Luis Peche Puertas.

O Radar de Penetração de Solos - ou GPR -  
é uma técnica eletromagnética de imageamento  
efetiva no estudo de estruturas subsuperficiais,  
inclusive na estratigrafia de sedimentos.

Davis & Annan (1989)

## AGRADECIMENTOS

Aos meus familiares que deram todo o suporte, apoio e incentivo, absolutamente necessários para conclusão desta longa caminhada que pode representar este curso de graduação semi concluído. Aos meus amigos, professores e colegas de classe, que tornaram esta mesma caminhada absolutamente agradável e divertida.

A Universidade Federal Fluminense, Departamento de Geologia e Departamento de Graduação em Geofísica, pelo curso de graduação oferecido e toda estrutura usufruída. Ao Observatório Nacional e CNPq pela oportunidade de elaboração do projeto de pesquisa que veio a resultar neste trabalho de conclusão de curso.

Ao pesquisador Jandyr de Menezes Travassos pela oportunidade de pesquisa concedida e pela orientação neste projeto, além da amizade, dos bons conselhos e exemplo de profissionalismo, que serão, sem quaisquer dúvidas, sempre seguidos.

A imprescindível co-orientação do professor Luis Peche Puertas - *in memoriam* - pela sua sempre pronta disponibilidade em minhas tantas dúvidas e pelas noites de orientação até as várias e várias meias-noites no Observatório Nacional, que não poderiam resultar em nada menos que em uma amizade, a qual certamente jamais será esquecida.

Por fim, agradecimentos a todo o staff envolvido neste trabalho de conclusão de curso e possível graduação conquistada: a secretaria do LAGEMAR, que quebrou tantos galhos burocráticos estritamente necessários a tais conquistas, aos amigos Pedro Cabrera e Fernando Roxo por tantas boas idéias (as mais necessárias às conclusões deste trabalho), e também aos professores examinadores Marco Antônio Cetale Santos e José Antonio Baptista Neto, que compuseram prontamente esta banca examinadora e tantas vezes também estiveram disponíveis para conselhos e apoio na elaboração deste trabalho, além da contribuição com valiosas correções e sugestões.

## **RESUMO**

Este trabalho de pesquisa consiste na avaliação de resultados preliminares de um experimento controlado de infiltração aquosa em subsuperfície, mais precisamente, entre a superfície do solo e o nível freático, Zona Vadosa, onde os poros da rocha não estão totalmente preenchidos com água. A infiltração foi monitorada através de levantamentos GPR Time-Lapse (Radar de Penetração de Solos em Lapsos-de-Tempo), ou seja, um esquema de aquisição/processamento/interpretação que, basicamente, consiste no cálculo da diferença entre levantamentos espacialmente idênticos, realizados em instantes diferentes, para que evidenciem-se apenas as mudanças subsuperficiais do fluxo infiltrado. Com o uso da ferramenta GPR em Time-Lapse será apresentado então, um estudo que permite a avaliação comportamental e espacial da água injetada, em relação às variações temporais de saturações, registradas pelo experimento.

Palavras-chave: Time-Lapse, GPR, Zona Vadosa.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>20</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVO E RELEVÂNCIA</b>	<b>21</b>
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>22</b>
3.1	BREVE PANORAMA DO MÉTODO GPR . . . . .	22
<b>4</b>	<b>ÁREA DE ESTUDOS</b>	<b>27</b>
4.1	LOCALIZAÇÃO . . . . .	27
4.2	ASPECTOS GEOLÓGICOS-GEOMORFOLÓGICOS . . . . .	27
4.3	ASPECTOS FISIAGRÁFICOS . . . . .	30
<b>5</b>	<b>METODOLOGIA DE PESQUISA</b>	<b>33</b>
5.1	DESCRIÇÃO DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL . . . . .	33
5.2	METODOLOGIA DO PROCESSAMENTO DE DADOS . . . . .	36
<b>6</b>	<b>RESULTADOS PARCIAIS</b>	<b>48</b>
6.1	ANÁLISES DOS RESULTADOS PARCIAIS . . . . .	51
<b>7</b>	<b>ANÁLISE DE RESULTADOS</b>	<b>53</b>
<b>8</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>67</b>
<b>9</b>	<b>ANEXO</b>	<b>74</b>

## LISTA DE FIGURAS

3.1	O comprimento de onda é igual à velocidade da onda dividida pela frequência da onda. Maiores antenas podem produzir maiores comprimentos de ondas, e mais baixas frequências. Nas fórmulas acima a velocidade " $v$ " representa a velocidade de propagação da onda eletromagnética no meio (caso o meio seja o vácuo, " $v$ " = " $c$ "), " $f$ " representa a frequência e representa o comprimento de onda, ver também Figura 1. . . . .	22
3.2	Possíveis configurações de antenas GPR. De maneira destacada encontram-se as antenas de 200MHz, utilizadas nos levantamentos deste trabalho. Fonte: <i>Senssoft.ca</i> . . . . .	23
3.3	Esquema ilustrando um levantamento fixed-offset. A distância " $S$ " no 1º quadro, permanece fixa, e a cada " $\Delta X$ " será obtido um traço, como os representados no 2º quadro. Observar que cada reflectância, incluindo a onda direta, de antena para antena, gera uma ondaleta nos traços do 2º quadro, e que a anomalia do 1º quadro torna-se uma 'hipérbole de ondaletas' no 2º. Fonte: Annan, 2001. . . . .	24
3.4	Ilustração das três modalidades mais comuns de configurações de arranjos em levantamentos GPR. Fonte: Annan, 2001. . . . .	24
3.5	Ilustração do procedimento de uma sondagem GPR CMP. Fonte: Annan, 2001. . . . .	25
3.6	Procedimento de estimativa de velocidades do meio, através da análise de tempos de chegada versus separação, em uma sondagem CMP. Fonte: Annan, 2001. . . . .	25
4.1	Mapa de satélite indicando a Região da Ressacada, em Florianópolis, Sul da Ilha de Santa Catarina, onde se deram o experimento e os levantamentos. Fonte: <i>Google Maps</i> . . . . .	28
4.2	Esquema ilustrando áreas e Coordenadas SAD 69 (em roxo) onde se centraram o experimento e levantamento. As linhas de aquisição de interesse deste trabalho são as linhas número 5 da área central de 8m x 8m (em azul). Ao centro, está indicado o ponto de injeção de água (em vermelho). Fonte: Reis, T. P. . . . .	29

4.3	Mapa Geológico do Sul de Florianópolis. Área de estudos destacada pelo círculo de cor roxa. Fonte: Tomazzoli & Pellerín, Modificado. . . . .	31
4.4	Coluna Estratigráfica da Região em Estudo. Reparar que as descrições se dão apenas a partir do Quaternário (Zona de influência na região de interesse). Fonte: Francisco Caruso Junior, Adaptado . . . . .	32
5.1	Esquema ilustrando a área onde foi realizado o experimento. A seta azul ao centro da fotografia indica o direcionador de fluxo no ponto de injeção. É possível reparar ainda o contador de vazão atrelado à mangueira de injeção. As estacas vermelhas ao fundo do terreno são representadas como os pontos vermelhos nas bordas do esquema da área de 20m x 20m ao lado esquerdo da fotografia. Fonte: Reis, T. P. . . . .	34
5.2	Esquema ilustrando o as etapas do experimento: (A) Bombeamento da água de drenagem proximal até (B) Caixa D'água de armazenamento. Em (C) Vemos o ponto de injeção, com o contador de vazão na mangueira e o direcionador de fluxo, este último novamente explicitado e ampliado em (D). Fonte: Reis, T. P. . . . .	35
5.3	Foto ilustrando a realização do levantamento. Observar que as antenas estão dispostas de forma perpendicular ao trajeto do técnico. Observar também que a distância entre o "trem" de antenas (transmissora e receptora) não varia. Fonte: Travassos, J. M. . . . .	37
5.4	<i>GPR PulseEkko PRO, One-Man 200MHz</i> da <i>Sensors&amp;Software</i> . Na ilustração aparatos de um levantamento <i>Fixed-Offset</i> . Fonte: <i>Senssoft.ca</i> . . . . .	37
5.5	Fórmulas ilustrando a influência da Constante Dielétrica ( $K$ ) na Velocidade de propagação da onda eletromagnética ( $v$ ). Fonte: Annan, 2001. . . . .	41
5.6	Esquema ilustrando a evolução dos traços após cada etapa de processamento aplicada. Fonte: Reis, T. P. . . . .	42
5.7	Esquema ilustrando evolução das seções após cada etapa de processamento aplicada. A última seção do esquema é uma seção <i>Time-Lapse</i> representando diferenças entre duas seções. Fonte: Reis, T. P. . . . .	42
5.8	<i>Shell Script</i> desenvolvido e utilizado para as etapas de processamento <i>fixed-offset</i> padrão aplicado de forma comum a todas as seções - PARTE 1. Fonte: Reis, T. P. . . . .	43

5.9	<i>Shell Script</i> desenvolvido e utilizado para as etapas de processamento <i>fixed-offset</i> padrão aplicado de forma comum a todas as seções - PARTE 2. Fonte: Reis, T. P. . . . .	44
5.10	<i>Shell Script</i> desenvolvido e utilizado para as etapas de processamento <i>fixed-offset</i> padrão aplicado de forma comum a todas as seções - PARTE 3. Fonte: Reis, T. P. . . . .	45
5.11	<i>Shell Script</i> desenvolvido e utilizado para as etapas de re-definição de <i>Time Window</i> e alteração do <i>Time Zero</i> . Fonte: Reis, T. P. . . . .	46
5.12	<i>Shell Script</i> desenvolvido e utilizado para as etapas de subtração entre seções. Fonte: Reis, T. P. . . . .	47
6.1	Seção Background dos levantamentos realizados no sentido L/O, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Fonte: Reis, T. P. . . . .	49
6.2	Seção Background dos levantamentos realizados no sentido N/S, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Fonte: Reis, T. P. . . . .	50
7.1	Espectro de Amplitude da Seção Background Sentido N/S crua de processamentos. Reparar a frequência central em $X = 60\text{MHz}$ . Fonte: Reis, T. P. . . . .	54
7.2	Espectro de Amplitude da Seção #01 Pós-Injeção Sentido N/S crua de processamentos. Reparar a frequência central em $X = 80\text{ MHz}$ . Fonte: Reis, T. P. . . . .	54
7.3	Espectro de Amplitude da Seção #10 Pós-Injeção Sentido N/S crua de processamentos. Reparar a frequência central em $X = 81\text{ MHz}$ . Fonte: Reis, T. P. . . . .	55
7.4	Espectro de Amplitude da Seção #18 Pós-Injeção Sentido N/S crua de processamentos. Reparar a frequência central em $X = 67\text{ MHz}$ . Fonte: Reis, T. P. . . . .	55
7.5	Representação do sinal GPR nos domínios: (A) Tempo; (B) Frequência. Fonte: Xavier Neto & Medeiros. . . . .	57
7.6	Representação esquemática do balanceamento espectral. Fonte: Xavier Neto & Medeiros. . . . .	58
7.7	Fluxo de Correção de Amplitudes no Espectro, realizado através do SPW. Lembrar que o AGC é aplicado durante a visualização. Fonte: Reis, T. P. . . . .	59
7.8	<i>Background</i> do Sentido N/S, apenas com ganho AGC. Fonte: Reis, T. P. . . . .	60
7.9	<i>Background</i> do Sentido N/S, com tratamento de amplitude mais o ganho AGC. Fonte: Reis, T. P. . . . .	60
7.10	Seção Pós-Injeção #01 do Sentido N/S, apenas com ganho AGC. Fonte: Reis, T. P. . . . .	61

7.11	Seção Pós-Injeção #01 do Sentido N/S, com tratamento de amplitude mais o ganho AGC. Fonte: Reis, T. P. . . . . .	61
7.12	Seção Pós-Injeção #10 do Sentido N/S, apenas com ganho AGC. Fonte: Reis, T. P.	62
7.13	Seção Pós-Injeção #10 do Sentido N/S, com tratamento de amplitude mais o ganho AGC. Fonte: Reis, T. P. . . . . .	62
7.14	Seção Pós-Injeção #18 do Sentido N/S, apenas com ganho AGC. Fonte: Reis, T. P.	63
7.15	Seção Pós-Injeção #18 do Sentido N/S, com tratamento de amplitude mais o ganho AGC. Fonte: Reis, T. P. . . . . .	63
7.16	Espectro de Amplitude da Seção <i>Background</i> Sentido N/S balanceada em seu espectro. Reparar o pico de amplitude em $X = 112$ MHz, e distribuição mais adequada em relação ao lado esquerdo do pico. Fonte: Reis, T. P. . . . . .	64
7.17	Espectro de Amplitude da Seção #01 Pós-Injeção Sentido N/S balanceada em seu espectro. Reparar o pico de amplitude em $X = 111$ MHz, e distribuição mais adequada em relação ao lado esquerdo do pico. Fonte: Reis, T. P. . . . . .	64
7.18	Espectro de Amplitude da Seção #10 Pós-Injeção Sentido N/S crua balanceada em seu espectro. Reparar o pico de amplitude em $X = 116$ MHz, e distribuição mais adequada em relação ao lado esquerdo do pico. Fonte: Reis, T. P. . . . . .	65
7.19	Espectro de Amplitude da Seção #18 Pós-Injeção Sentido N/S balanceada em seu espectro. Reparar o pico de amplitude em $X = 111$ MHz, e distribuição mais adequada em relação ao lado esquerdo do pico. Fonte: Reis, T. P. . . . . .	65
7.20	Diferença entre duas seções <i>foreground</i> obtida após tratamento com <i>Spectral-Whitening</i> . Pouca ou nenhuma melhoria aparente Fonte: Reis, T. P. . . . . .	66
8.1	Seção <i>background</i> N/S picada no horizonte interface vadosa/freático. O mesmo processo de <i>picks</i> neste mesmo horizonte se repetiu para as seções pós-injeção #01, #10 e #18. Fonte: Reis, T. P. . . . . .	68
8.2	Seção <i>background</i> N/S picada a dois horizontes abaixo da interface vadosa/freático. O mesmo processo de <i>picks</i> neste mesmo horizonte se repetiu para as seções pós-injeção #01, #10 e #18. Fonte: Reis, T. P. . . . . .	68
8.3	Gráfico da variação do tempo de atraso na recepção do sinal, no horizonte picado 1 - interface vadosa/lençol - entre as seções pós-injeção, comparadas com a seção pré-injeção (ou <i>background</i> ). Fonte: Reis, T. P. . . . . .	69

8.4	Gráfico da variação do tempo de atraso de recepção do sinal, no horizonte picado 2 - dois horizontes abaixo da interface vadosa/lençol - entre as seções pós-injeção, comparadas com a seção pré-injeção (ou <i>background</i> ). Fonte: Reis, T. P. . . . .	69
8.5	Seção <i>background</i> com barra de cores nos horizontes picados 1 e 2, representando os atrasos nos tempos de chegada entre as seções <i>Background x Background</i> , ou seja <i>delay zero</i> . Fonte: Reis, T. P. . . . .	71
8.6	Seção <i>background</i> com barra de cores nos horizontes picados 1 e 2, representando os atrasos nos tempos de chegada entre as seções <i>Background x Pós-Injeção#01</i> . Fonte: Reis, T. P. . . . .	71
8.7	Seção <i>background</i> com barra de cores nos horizontes picados 1 e 2, representando os atrasos nos tempos de chegada entre as seções <i>Background x Pós-Injeção#10</i> . Fonte: Reis, T. P. . . . .	72
8.8	Seção <i>background</i> com barra de cores nos horizontes picados 1 e 2, representando os atrasos nos tempos de chegada entre as seções <i>Background x Pós-Injeção#18</i> . Fonte: Reis, T. P. . . . .	72
9.1	Seção 1 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido N/S, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar na parte superior da seção e em comparação com o <i>Background N/S</i> , a presença do <i>Pull-down</i> causado pela região de baixa velocidade em função da água injetada. Fonte: Reis, T. P. . . . .	74
9.2	Seção 2 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido N/S, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do <i>Pull-down</i> . Fonte: Reis, T. P. . . . .	75
9.3	Seção 3 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido N/S, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do <i>Pull-down</i> . Fonte: Reis, T. P. . . . .	75
9.4	Seção 4 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido N/S, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do <i>Pull-down</i> . Fonte: Reis, T. P. . . . .	76
9.5	Seção 5 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido N/S, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do <i>Pull-down</i> . Fonte: Reis, T. P. . . . .	76

9.6	Seção 6 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido N/S, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do <i>Pull-down</i> . Fonte: Reis, T. P. . . . .	77
9.7	Seção 7 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido N/S, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do <i>Pull-down</i> . Fonte: Reis, T. P. . . . .	77
9.8	Seção 8 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido N/S, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do <i>Pull-down</i> . Fonte: Reis, T. P. . . . .	78
9.9	Seção 9 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido N/S, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do <i>Pull-down</i> . Fonte: Reis, T. P. . . . .	78
9.10	Seção 10 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido N/S, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do <i>Pull-down</i> . Fonte: Reis, T. P. . . . .	79
9.11	Seção 11 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido N/S, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do <i>Pull-down</i> . Fonte: Reis, T. P. . . . .	79
9.12	Seção 12 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido N/S, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do <i>Pull-down</i> . Fonte: Reis, T. P. . . . .	80
9.13	Seção 13 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido N/S, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do <i>Pull-down</i> . Fonte: Reis, T. P. . . . .	80
9.14	Seção 14 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido N/S, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do <i>Pull-down</i> . Fonte: Reis, T. P. . . . .	81
9.15	Seção 15 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido N/S, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do <i>Pull-down</i> . Fonte: Reis, T. P. . . . .	81
9.16	Seção 16 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido N/S, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do <i>Pull-down</i> . Fonte: Reis, T. P. . . . .	82

9.17	Seção 17 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido N/S, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do <i>Pull-down</i> . Fonte: Reis, T. P. . . . .	82
9.18	Seção 18 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido N/S, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do <i>Pull-down</i> . Fonte: Reis, T. P. . . . .	83
9.19	Seção 1 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido L/O, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar na parte superior da seção e em comparação com o <i>Background</i> N/S, a presença do <i>Pull-down</i> causado pela região de baixa velocidade em função da água injetada. Fonte: Reis, T. P. . . .	83
9.20	Seção 2 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido L/O, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do <i>Pull-down</i> . Fonte: Reis, T. P. . . . .	84
9.21	Seção 3 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido L/O, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do <i>Pull-down</i> . Fonte: Reis, T. P. . . . .	84
9.22	Seção 4 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido L/O, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do <i>Pull-down</i> . Fonte: Reis, T. P. . . . .	85
9.23	Seção 5 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido L/O, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do <i>Pull-down</i> . Fonte: Reis, T. P. . . . .	85
9.24	Seção 6 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido L/O, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do <i>Pull-down</i> . Fonte: Reis, T. P. . . . .	86
9.25	Seção 7 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido L/O, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do <i>Pull-down</i> . Fonte: Reis, T. P. . . . .	86
9.26	Seção 8 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido L/O, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do <i>Pull-down</i> . Fonte: Reis, T. P. . . . .	87

9.27	Seção 9 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido L/0, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do <i>Pull-down</i> . Fonte: Reis, T. P. . . . .	87
9.28	Seção 10 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido L/0, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do <i>Pull-down</i> . Fonte: Reis, T. P. . . . .	88
9.29	Seção 11 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido L/0, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do <i>Pull-down</i> . Fonte: Reis, T. P. . . . .	88
9.30	Seção 12 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido L/0, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do <i>Pull-down</i> . Fonte: Reis, T. P. . . . .	89
9.31	Seção 13 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido L/0, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do <i>Pull-down</i> . Fonte: Reis, T. P. . . . .	89
9.32	Seção 14 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido L/0, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do <i>Pull-down</i> . Fonte: Reis, T. P. . . . .	90
9.33	Seção 15 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido L/0, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do <i>Pull-down</i> . Observar que esta seção foi completada com traços nulos em seus últimos traços. Fonte: Reis, T. P. . . . .	90
9.34	Seção 16 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido L/0, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do <i>Pull-down</i> . Fonte: Reis, T. P. . . . .	91
9.35	Seção 17 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido L/0, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do <i>Pull-down</i> . Fonte: Reis, T. P. . . . .	91
9.36	Seção 18 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido L/0, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do <i>Pull-down</i> . Fonte: Reis, T. P. . . . .	92

- 9.37 Seção *Time Lapse* 1, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 2 do sentido N/S. Observar que existem poucas diferenças entre as seções. Ver também que na região onde situava-se o *Pull-down* nas seções anteriores, agora há um padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P. . . . . 92
- 9.38 Seção *Time Lapse* 2, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 3 do sentido N/S. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P. . . . . 93
- 9.39 Seção *Time Lapse* 3, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 4 do sentido N/S. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P. . . . . 93
- 9.40 Seção *Time Lapse* 4, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 5 do sentido N/S. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P. . . . . 94
- 9.41 Seção *Time Lapse* 5, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 6 do sentido N/S. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P. . . . . 94
- 9.42 Seção *Time Lapse* 6, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 7 do sentido N/S. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P. . . . . 95
- 9.43 Seção *Time Lapse* 7, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 8 do sentido N/S. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P. . . . . 95
- 9.44 Seção *Time Lapse* 8, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 9 do sentido N/S. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P. . . . . 96
- 9.45 Seção *Time Lapse* 9, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 10 do sentido N/S. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P. . . . . 96
- 9.46 Seção *Time Lapse* 10, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 11 do sentido N/S. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P. . . . . 97

- 9.47 Seção *Time Lapse* 11, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 12 do sentido N/S. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P. . . . . 97
- 9.48 Seção *Time Lapse* 12, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 12 do sentido N/S. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P. . . . . 98
- 9.49 Seção *Time Lapse* 13, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 14 do sentido N/S. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P. . . . . 98
- 9.50 Seção *Time Lapse* 14, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 15 do sentido N/S. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P. . . . . 99
- 9.51 Seção *Time Lapse* 15, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 16 do sentido N/S. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P. . . . . 99
- 9.52 Seção *Time Lapse* 16, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 17 do sentido N/S. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P. . . . . 100
- 9.53 Seção *Time Lapse* 17, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 18 do sentido N/S. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P. . . . . 100
- 9.54 Seção *Time Lapse* 1, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 2 do sentido L/O. Observar que existem poucas diferenças entre as seções. Ver também que na região onde situava-se o *Pull-down* nas seções anteriores, agora há um padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P. . . . . 101
- 9.55 Seção *Time Lapse* 2, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 3 do sentido L/O. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P. . . . . 101
- 9.56 Seção *Time Lapse* 3, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 4 do sentido L/O. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P. . . . . 102

- 9.57 Seção *Time Lapse* 4, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 5 do sentido L/O. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P. . . . . 102
- 9.58 Seção *Time Lapse* 5, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 6 do sentido L/O. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P. . . . . 103
- 9.59 Seção *Time Lapse* 6, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 7 do sentido L/O. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P. . . . . 103
- 9.60 Seção *Time Lapse* 7, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 8 do sentido L/O. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P. . . . . 104
- 9.61 Seção *Time Lapse* 8, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 9 do sentido L/O. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P. . . . . 104
- 9.62 Seção *Time Lapse* 9, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 10 do sentido L/O. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P. . . . . 105
- 9.63 Seção *Time Lapse* 10, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 11 do sentido L/O. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P. . . . . 105
- 9.64 Seção *Time Lapse* 11, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 12 do sentido L/O. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P. . . . . 106
- 9.65 Seção *Time Lapse* 12, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 13 do sentido L/O. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P. . . . . 106
- 9.66 Seção *Time Lapse* 13, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 14 do sentido L/O. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P. . . . . 107
- 9.67 Seção *Time Lapse* 14, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 15 do sentido L/O. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P. . . . . 107

9.68	Seção <i>Time Lapse</i> 15, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 16 do sentido L/O. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P. . . . .	108
9.69	Seção <i>Time Lapse</i> 16, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 17 do sentido L/O. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P. . . . .	108
9.70	Seção <i>Time Lapse</i> 17, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 18 do sentido L/O. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P. . . . .	109

## 1 INTRODUÇÃO

O problema da infiltração de fluidos em meios porosos é de suma importância em diversas áreas de estudos, em particular nos estudos ambientais. Nestes casos a aplicabilidade de técnicas de geofísica rasa, dentre elas o Radar de Penetração de Solos (GPR - *Ground Penetrating Radar* - Davis & Annan, 1989), destacam-se pela precisão e variações na possibilidade de análise de seus resultados.

O conceito de aplicação de ondas de rádio para mapear estruturas internas no solo não é um conceito novo. Porém, a aplicação bem sucedida destas técnicas é que ainda se encontra em sua infância. Sem sombras de dúvidas os trabalhos mais bem sucedidos para este método geofísico, são aqueles aplicados no Ártico e na Antártica, para sondar a espessura de geleiras.

Os trabalhos com GPR em meios *non-ice* começaram no início dos anos 70, com aplicações focadas em solos *permafrost* (Annan & Davis, 1976). Conforme se avançou a compreensão das vantagens e desvantagens do método suas aplicações em formas mais abrangentes, começaram a ser descritas com destaque para o mapeamento estratigráfico (Davis & Annan, 1989 e Annan & Chua, 1992).

Em 2003, por Huisman et al. foram reportadas técnicas aplicáveis no monitoramento da saturação subsuperficial através do GPR. E posteriormente, alguns outros importantes estudos nessa área descreveram quantitativamente a questão do monitoramento de uma infiltração com respeito a suas variações temporais (Galagedara et al., 2005).

## **2 OBJETIVO E RELEVÂNCIA**

O objetivo geral deste trabalho consiste em explorar o emprego de um monitoramento com GPR de frequência 200 MHz, em lapso-de-tempo, na constatação de variações subsuperficiais da saturação da zona vadosa.

Serão apresentados os modos de aquisição dos dados, os fluxos de processamento, além dos perfis GPR resultantes, obtidos no experimento, os quais deverão permitir a identificação e interpretação de tais padrões de modificações temporais na saturação vadosa provocadas pelas variações do comportamento do fluido infiltrante na subsuperfície.

A apresentação destas etapas de metodologia de aquisição, processamento e interpretação necessários para a compreensão de uma pesquisa deste porte, assim como a interpretação dos resultados gerados, são as metas que foram almejadas pelo trabalho desenvolvido.

Como trabalho pioneiro no método GPR e nas análises Time-Lapse, em monografias do Departamento de Graduação em Geofísica da Universidade Federal Fluminense e no LAGEMAR, este projeto visa avaliar a capacidade destas ferramentas geofísicas atuando em conjunto no monitoramento de uma infiltração ou contaminação. Contudo, no experimento em questão, por razões burocráticas e ambientais óbvias, foi utilizada a água como o fluido contaminante, almejando, no entanto, em análises comparativas, que os resultados desta pesquisa possam ser correlacionados e extrapolados para além deste mesmo trabalho, e de forma bem mais abrangente e superficial, avaliar a aplicabilidade destes mesmos métodos geofísicos no controle de infiltrações de poluentes.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 BREVE PANORAMA DO MÉTODO GPR

Radar de Penetração de Solos - GPR, de maneira abreviada - é o termo geral aplicado às técnicas que empregam ondas de rádio, tipicamente entre 1 e 1000 MHz de faixa de frequências, para mapear estruturas e características em subsuperfície.

O conjunto desta ferramenta utilizado neste trabalho, tipicamente chamado de Levantamento GPR Bi-Estático, inclui um transmissor e um receptor de sinal eletromagnético (ondas de radiofrequência), além de antenas transmissora e receptora destes mesmos sinais de rádio. As antenas do aparelho GPR possuem frequências variáveis de acordo com seu tamanho. A relação das frequências de ondas eletromagnéticas com os variáveis comprimentos de ondas é de proporcionalidade inversa, e desta forma as antenas de comprimentos maiores são capazes de gerar ondas de comprimento maior, e conseqüentemente, de menor frequência (Ver Figuras 3.2 e 3.1).

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad v = \frac{\lambda}{T}$$

Figura 3.1: O comprimento de onda é igual à velocidade da onda dividida pela frequência da onda. Maiores antenas podem produzir maiores comprimentos de ondas, e mais baixas frequências. Nas fórmulas acima a velocidade "v" representa a velocidade de propagação da onda eletromagnética no meio (caso o meio seja o vácuo, "v" = "c"), "f" representa a frequência e representa o comprimento de onda, ver também Figura 1.

As antenas, neste caso, dispostas sempre com espaçamento igual entre transmissora e receptora (*Fixed-Offset*), transmitem e recebem o sinal eletromagnético. A partir do registro temporal (captado pela antena receptora e então armazenado em base de dados) das reflexões

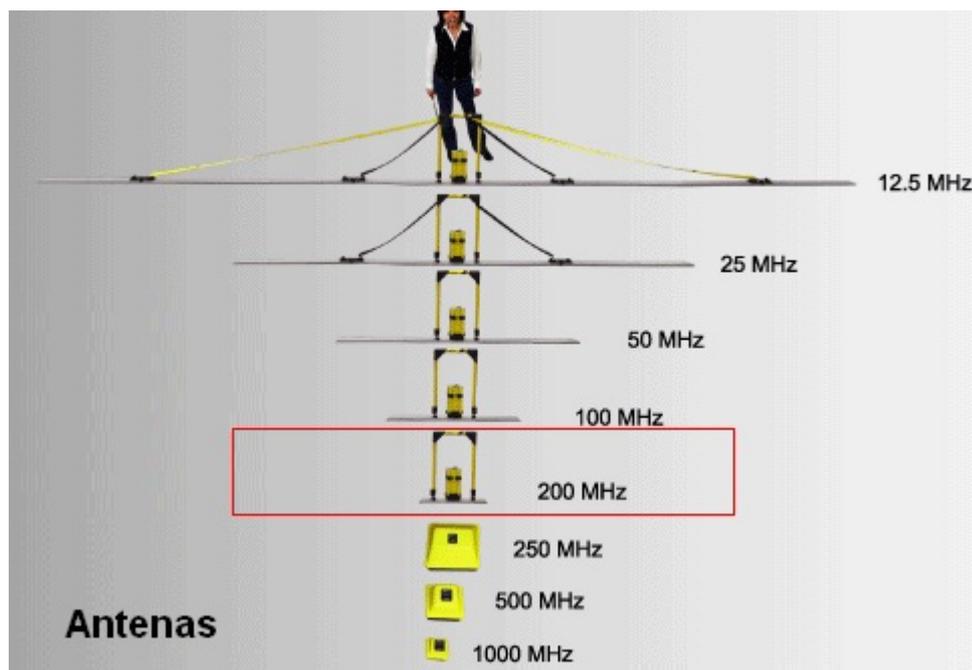


Figura 3.2: Possíveis configurações de antenas GPR. De maneira destacada encontram-se as antenas de 200MHz, utilizadas nos levantamentos deste trabalho. Fonte: *Sensoft.ca*.

causadas pela impedância eletromagnética do meio em que as ondas transmitidas se propagam, são gerados os traços de radar. Mantendo-se sempre o mesmo *offset* esse processo é repetido ao longo de uma linha de aquisição, a qual possuirá diversos traços. Com a justaposição destes traços (de acordo com a ordem de aquisição), gera-se o radargrama *fixed-offset* (seção de GPR *fixed-offset*).

Este processo ocorre de forma análoga ao método geofísico da sísmica de reflexão na fase de *zero-offset* ou pós-empilhamento, onde neste caso, ao invés de ondas mecânicas propagadas, trataremos de ondas eletromagnéticas, e ao invés de impedância acústica como fator regente das refletâncias, trataremos então de impedâncias eletromagnéticas.

As configurações dos arranjos de sistemas de radar podem ser implementadas de três formas básicas:

O modo mais comum de operações é o modo *single-fold*, ou *fixed-offset reflection profiling*, como ilustrado na parte superior da Figura 3.3 (este foi o modo de aquisição utilizado durante os levantamentos GPR envolvidos deste trabalho). Na Figura 3.4, onde estão representados os três tipos de arranjos de levantamentos padrão ao método de Radar de Penetração de Solos.

Estimativas de velocidade por profundidade são frequentemente conduzidas em sistemas GPR pelo arranjo CMP (*Common-Mid-Point Surveys*). Variando-se o espaçamento e identifi-

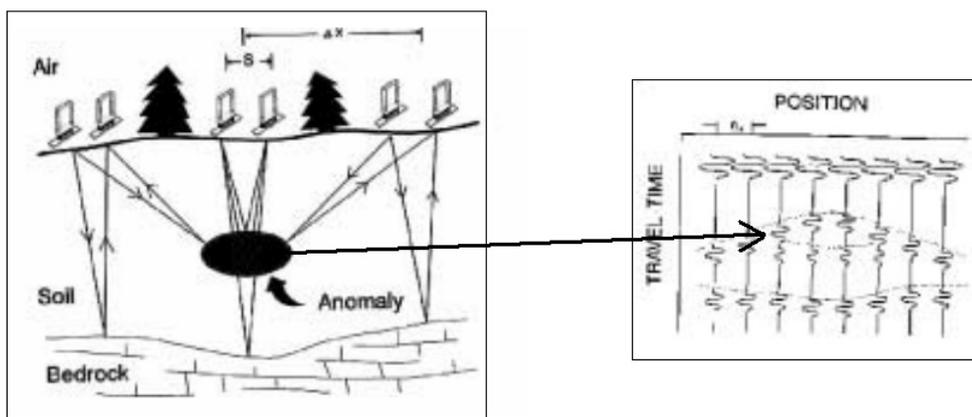


Figura 3.3: Esquema ilustrando um levantamento fixed-offset. A distância " $S$ " no 1º quadro, permanece fixa, e a cada " $\Delta X$ " será obtido um traço, como os representados no 2º quadro. Observar que cada reflectância, incluindo a onda direta, de antena para antena, gera uma ondaleta nos traços do 2º quadro, e que a anomalia do 1º quadro torna-se uma 'hipérbole de ondaletas' no 2º. Fonte: Annan, 2001.

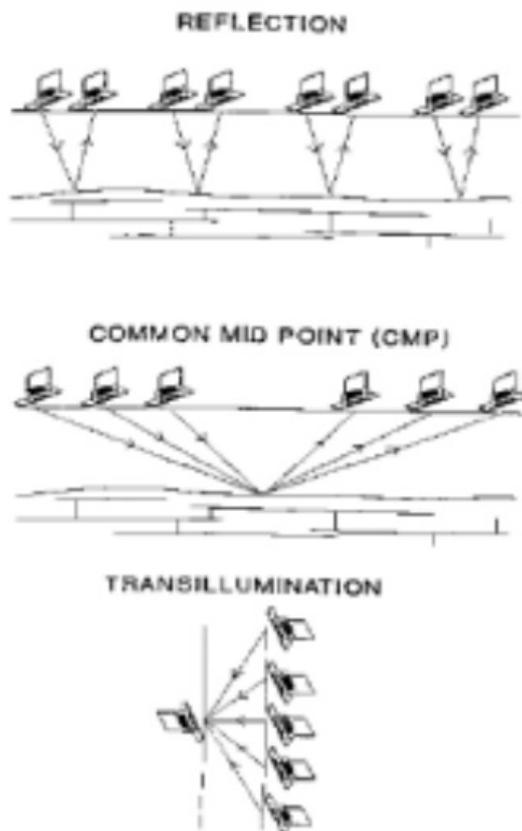


Figura 3.4: Ilustração das três modalidades mais comuns de configurações de arranjos em levantamentos GPR. Fonte: Annan, 2001.

cando o *Move Out* temporal pelas separações das antenas, a velocidade de propagação da onda eletromagnética no solo pode ser estimada (ver Figuras 3.5 e 3.6).

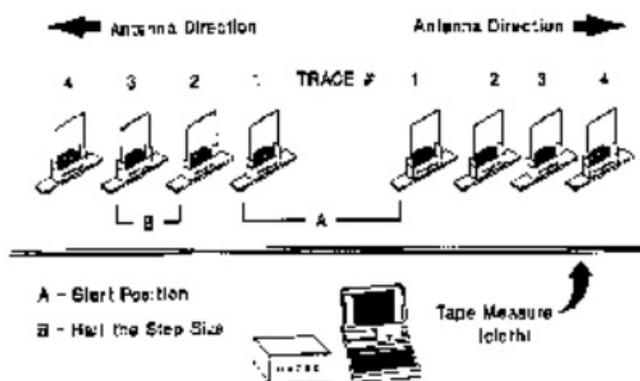


Figura 3.5: Ilustração do procedimento de uma sondagem GPR CMP. Fonte: Annan, 2001.

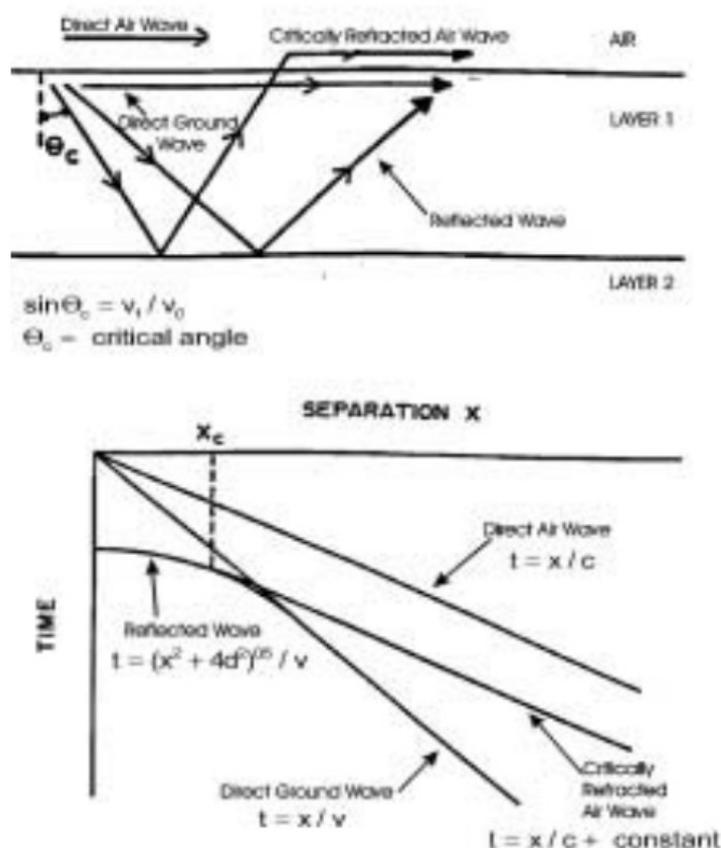


Figura 3.6: Procedimento de estimativa de velocidades do meio, através da análise de tempos de chegada versus separação, em uma sondagem CMP. Fonte: Annan, 2001.

O último arranjo comum aos levantamentos GPR é o arranjo de Trans-Iluminação ou de Tomografia GPR de poços. Este arranjo ocorre como um levantamento CMP, porém de forma

vertical, onde uma antena mantém-se fixa em uma determinada altura de um poço, e a outra se desloca em diferentes profundidades em um poço vizinho.

## 4 ÁREA DE ESTUDOS

### 4.1 LOCALIZAÇÃO

O experimento e a aquisição dos dados foram realizados na Ilha de Santa Catarina, localizada entre os paralelos 27°10' e 27°50' de latitude sul, e entre os meridianos 48°25' e 48°35' de longitude oeste. Mais precisamente na região centro-sul da ilha, conhecida como Ressacada, em um terreno de testes da UFSC (ver Figura 4.1).

A partir de um aparelho GPS diferencial, ou DGPS, foram obtidas as coordenadas SAD 69 de uma área de 20m x 20m, onde dentro desta, realizaram-se os eventos experimentais e levantamentos de dados do projeto de pesquisa (ver Figura 4.2, onde as coordenadas referentes aos vértices do quadrado desta área de interesse estão dispostas conforme o indicado em cor roxa).

### 4.2 ASPECTOS GEOLÓGICOS-GEOMORFOLÓGICOS

A Ilha de Santa Catarina apresenta forma alongada na direção norte-sul, devido à configuração estrutural de seus maciços rochosos, interligados por áreas de sedimentação quaternária (Tomazzoli & Pellerin, 1992).

Sob o ponto de vista geológico-geomorfológico, de acordo com o mapa geomorfológico inserido no Atlas de Santa Catarina (GAPLAN, 1986), a região pode ser dividida em dois domínios fundamentais: a) O domínio das rochas ígneas plutônicas e vulcânicas, de idade precambriana (neoproterozóica), representado por granitos, riolitos e rochas piroclásticas ácidas, cortados por um grande enxame de diques básicos, que constituem morros e elevações; b) O domínio dos depósitos cenozóicos costeiros - o qual engloba a região de interesse deste trabalho - que constituem as planícies costeiras e podem ser compartimentados em depósitos marinhos praias, depósitos eólicos, depósitos lagunares, depósitos paludiais e/ou turfáceos, depósitos coluviais e

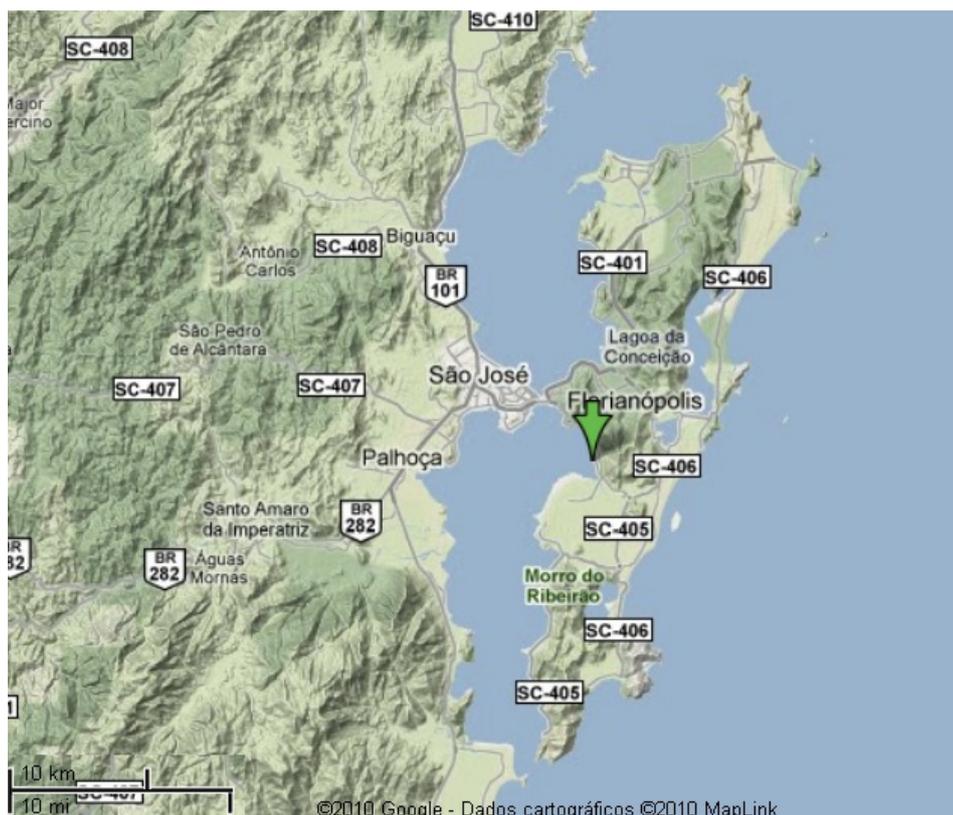


Figura 4.1: Mapa de satélite indicando a Região da Ressacada, em Florianópolis, Sul da Ilha de Santa Catarina, onde se deram o experimento e os levantamentos. Fonte: *Google Maps*.

depósitos fluviais.

As planícies marinhas e lagunares pleistocênicas e holocênicas ligam os maciços ao resto da ilha, e estão presentes também em sua periferia (Naufragados, Tapera de Sul - Região bem próxima a Ressacada -, Caiacangaçu e Pântano do Sul). Em uma área de planícies, se situa a fazenda onde se deram os testes (ver Figura 4.3, Mapa Geológico do Sul de Florianópolis).

Nos maciços de rochas cristalinas, o conjunto solo-alterito varia de espessura em função da posição na paisagem, de modo que será menos espesso nas grandes vertentes frente ao oceano - nesse caso são frequentes na superfície blocos e matacões, ou afloramentos rochosos, particularmente perto do mar, onde os horizontes pedológicos são pouco espessos acima dos alteritos areno-argilosos (como no caso do terreno de testes em questão). O conjunto solo-alterito, possui importância também nos topos das cristas mais arredondadas, nos alvéolos e nos vales suspensos, onde nesses casos - similares ao caso de estudo - os blocos são mais raros, e os solos e alteritos possuem espessura superior a 5 metros, sendo mais argilosos (Tomazzoli & Pellerin, 1992).

Nas planícies costeiras, as formações marinhas pleistocênicas de cor bege e com presença de bandas de cor marrom, são arenosas. As formações holocênicas e atuais sub-dividem-se

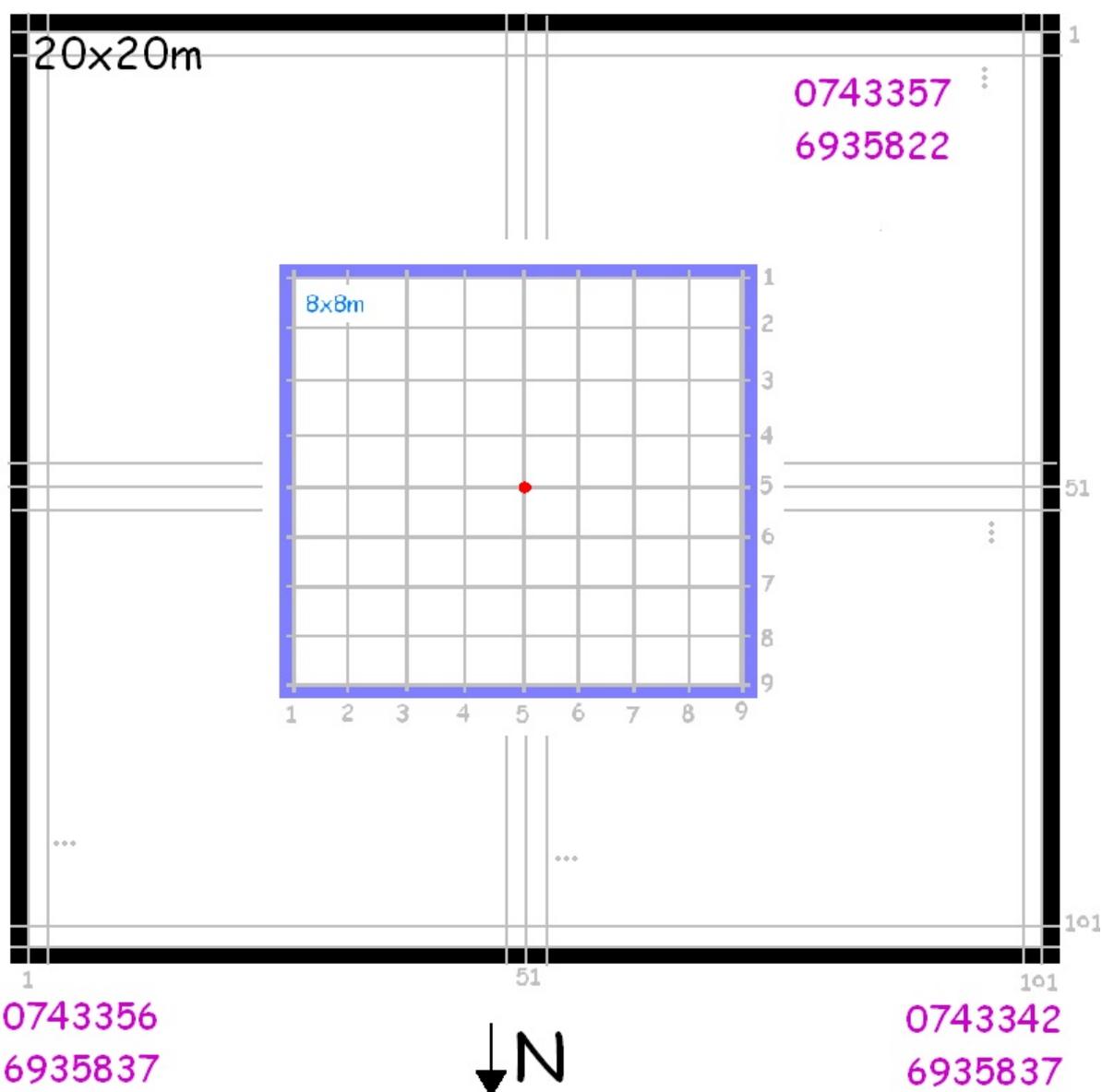


Figura 4.2: Esquema ilustrando áreas e Coordenadas SAD 69 (em roxo) onde se centraram o experimento e levantamento. As linhas de aquisição de interesse deste trabalho são as linhas número 5 da área central de 8m x 8m (em azul). Ao centro, está indicado o ponto de injeção de água (em vermelho). Fonte: Reis, T. P.

em praias arenosas, formações dunares arenosas e lagunares hidromórficas arenosas ou areno-argilosas com camadas orgânicas (ver Figura 4.4, Coluna Estratigráfica e descrições de fácies).

### 4.3 ASPECTOS FISIOGRAFICOS

Por se situar na Zona Subtropical Sul (Strahler, 1977), o clima da região é controlado por massas de ar de origem tropical marítima e polar marítima. Essas características permitem classificar a região como "Clima subtropical úmido sem estação seca e com verão quente" (Koppen, 1948).

As médias meteorológicas anuais da região em estudo são: temperatura variando entre 23°C em Janeiro e 14°C em Julho, umidade relativa do ar em 80%, número de dias chuvosos variando entre 110 e 120, e taxa pluviométrica entre 1.250mm e 1.400mm (Orselli, 1986).

A rede hidrográfica catarinense, segundo a sistematização adotada no atlas Atlas de Santa Catarina (GAPLAN, 1986), está representada por dois sistemas independentes de drenagem: o Sistema Integrado da Vertente do Interior, comandado pela bacia Paraná-Uruguai, e o Sistema da Vertente Atlântica, formado por um conjunto de bacias isoladas (onde se encontra situada a área de estudos em questão).

A vegetação da área de estudo enquadra-se no tipo fitoecológico de Floresta Ombrófila Densa, correspondente à região de floresta pluvial da costa atlântica, conforme a sistematização adotada no Atlas de Santa Catarina (GAPLAN, 1986). Esta floresta engloba planícies litorâneas e principalmente, as encostas íngremes da Serra do Mar (Caruso Jr, 1993). Os solos da região estudada, segundo as normas estabelecidas pelo Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (GAPLAN, 1986), tem as seguintes características:

Margeando rios, ou em locais de depressão sujeitos a inundação, ocorrem solos do tipo *glei úmido eutrófico*, com argila de atividade alta, horizonte A chernozêmico, e textura argilosa a muito argilosa. São solos de média a boa fertilidade natural. Por vezes ocorrem associados a *solos orgânicos distróficos e eutróficos argilosos*, que são solos desenvolvidos sobre sedimentos paludiais ou lacustres do Holoceno, em áreas planas sujeitas a inundações frequentes, com lençol freático próximo da superfície durante boa parte do ano (no caso do terreno em estudo, o lençol encontrava-se também a profundidade aproximada de 1m, em um solo areno 95% - argiloso 5%).

Associadas ao cordão litorâneo atual ocorrem *areias quartzosas distróficas e álicas*, com horizonte A moderado, e dunas de relevo suavemente ondulado. Estas, por não apresentarem processos pedogenéticos na sua formação, são consideradas como tipo de terreno, não como



COLUNA ESTRATIGRAFICA					
ERA	PERIODO		TERMINOLOGIA	FACIES	DESCRICAO LITOLOGICA
C E N O Z O I C A	QUATERNARIO	HOLOCENO	SISTEMA LAGUNA-BARREIRA IV	FACIES EOLICA	AREIAS QUARTZOSAS FINAS A MUITO FINAS, ESBRANQUICADAS, BIMODAIS, AS VEZES CONSTITUINDO DUNAS DE GRANDE ENVERGADURA, SOB A FORMA DE ESTRUTURAS PARABOLICAS.
				FACIES PALUDIAS	TURFAS OU DEPOSITOS DE LAMAS MUITO RICOS EM MATERIA ORGANICA, GERALMENTE RELACIONAM-SE A DEPOSITOS PALEOLAGUNARES
				FACIES LAMOSA DE FUNDO LAGUNAR	SEDIMENTOS LAMOSOS, FINAMENTE LAMINADOS, BIOTURBADOS, EVENTUALMENTE INTERCALADOS POR FINAS CAMADAS DE AREIAS.
				FACIES ARENO-LAMOSA DE FUNDO LAGUNAR	SEDIMENTOS ARENO-LAMOSOS RELACIONADOS AS FACIES TRANSICIONAIS QUE OCUPAM PROFUNDIDADES INTERMEDIARIAS DO CORPO LAGUNAR
				FACIES ARENOSA DE FUNDO LAGUNAR	SEDIMENTOS ARENOSOS QUE OCUPAM AS PARTES MAIS RASAS DO FLANCO OCEANICO
				FACIES ARENOSA DE PRAIA LAGUNAR	SEDIMENTOS ARENOSOS MATURO, SOB O PONTO DE VISTA MINERALOGICO E TEXTURAL, NAS AREAS DO FLANCO OCEANICO, E IMATUROS NO FLANCO CONTINENTAL
				FACIES FLUVIO-DELTA-LAGUNARES	CAMADAS ALTERNADAS DE AREIAS, DE GRANULOMETRIA VARIADA, E LAMAS.
				FACIES ARENOSA DE LEQUES DE SOBRELAVAGEM	CAMADAS ARENOSAS, DE GRANULOMETRIA MEDIA A GROSSEIRA, EVENTUALMENTE COM ESTRATIFICACAO PARALELA OU ONDULADA DE PEQUENO PORTE
				FACIES RESIDUAIS TRENSSGRESSIVAS	DEPOSITOS DE BIODETRITOS CARBONATICOS ORIGINADOS NO DECORRER DAS FASES DE SUBIDA NO NIVEL RELATIVO DO MAR POR OCASIAO DO RETOCESSO DAS LINHAS DE COSTA OCEANICA E LAGUNAR
				FACIES DE CANAIS DE MARES	AREIAS GROSSEIRAS E MEDIAS, RICAS EM BIODETRITOS, TIPICAS DE CANAIS DE INTERLIGACAO OCEANO-LAGUNA, TRANSICIONARAM PARA REGIAO INTRABACINAL, COM FACIES ARENOSAS DE MARE ENCHENTE.
				FACIES DE DELTAS DE MARE ENCHENTE	AREIAS DE GRANULOMETRIA MEDIA, COM ESTRATIFICACOES CRUZADAS TABULARES INCLINADAS EM DIRECAO AO CONTINENTE.
				FACIES PRAIAS MARINHAS	AREIAS QUARTZOSAS FINAS A MEDIAS, BEM SELECIONADAS, COM ESTRATIFICACAO PLANO-PARALELA COM MERGULHO SUAVE EM DIRECAO AO MAR
		PLEISTOCENO SUPERIOR	SISTEMA LAGUNA-BARREIRA III	FACIES EOLICA	AREIAS QUARTZOSAS FINAS A MUITO FINAS, DE COLORACAO AMARELO CLARO ATE AVERMELHADO, MUITAS VEZES ENRIQUECIDAS POR MATRIZES SECUNDARIAS (ARGILA OU OXIDO DE FERRO).
				FACIES PRAIAS MARINHAS	AREIAS QUARTZOSAS, MEDIAS A MUITO FINAS, DE COLORACAO AMARELO CLARO ATE ACASTANHADO, EVENTUALMENTE APRESENTANDO ESTRUTURAS TIPO ESTRATIFICACOES CRUZADAS ACANALADAS.

Figura 4.4: Coluna Estratigráfica da Região em Estudo. Reparar que as descrições se dão apenas a partir do Quaternário (Zona de influência na região de interesse). Fonte: Francisco Caruso Junior, Adaptado

## 5 METODOLOGIA DE PESQUISA

### 5.1 DESCRIÇÃO DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O experimento foi realizado no Terreno de Testes da UFSC na Região da Ressacada-SC em Fevereiro de 2005.

Com o auxílio de um contador de vazão e de um direcionador de fluxo improvisado, durante dez horas, foi injetado um total de 501 litros de água em subsuperfície vadosa, no centro de uma área de 8m x 8m, que por sua vez encontrou-se posicionada de maneira central a outra área, esta de 20m x 20m, ambas demarcadas para o experimento (ver Figura 5.1). A água foi bombeada propositalmente de uma drenagem proximal, portanto, possuindo as mesmas características e propriedades eletroquímicas da água do lençol freático (ver Figura 5.2).

Imediatamente após a injeção dos 501 litros de água, foram realizados os levantamentos de aquisição dos dados, sempre de maneira com que estes permitissem posteriores análises em Lapso-de-Tempo.

As linhas de aquisição se deram nas direções N/S e L/O e estão representadas pelas linhas vermelhas dentro do quadrado (azul) de 8m x 8m da Figura 5.1. O ponto de injeção situou-se exatamente na metade de cada linha de aquisição, e está representado na Figura 5.1 por um pequeno ponto amarelo entre as duas linhas vermelhas.

Para cada direção de aquisição foram realizados 18 levantamentos de GPR espacialmente idênticos, porém defasados em tempo de 20 minutos entre si. Deste modo, a realização dessa aquisição se deu de maneira sistemática alternando levantamentos N/S e L/O, de forma que para cada direção, a diferença temporal entre os sucessivos 18 levantamentos resultou em tais 20 minutos de defasagem.

É importante ressaltar ainda, que antes da infiltração foi realizado, também para cada direção, um levantamento com as mesmas características que os levantamentos pós-injeção, com

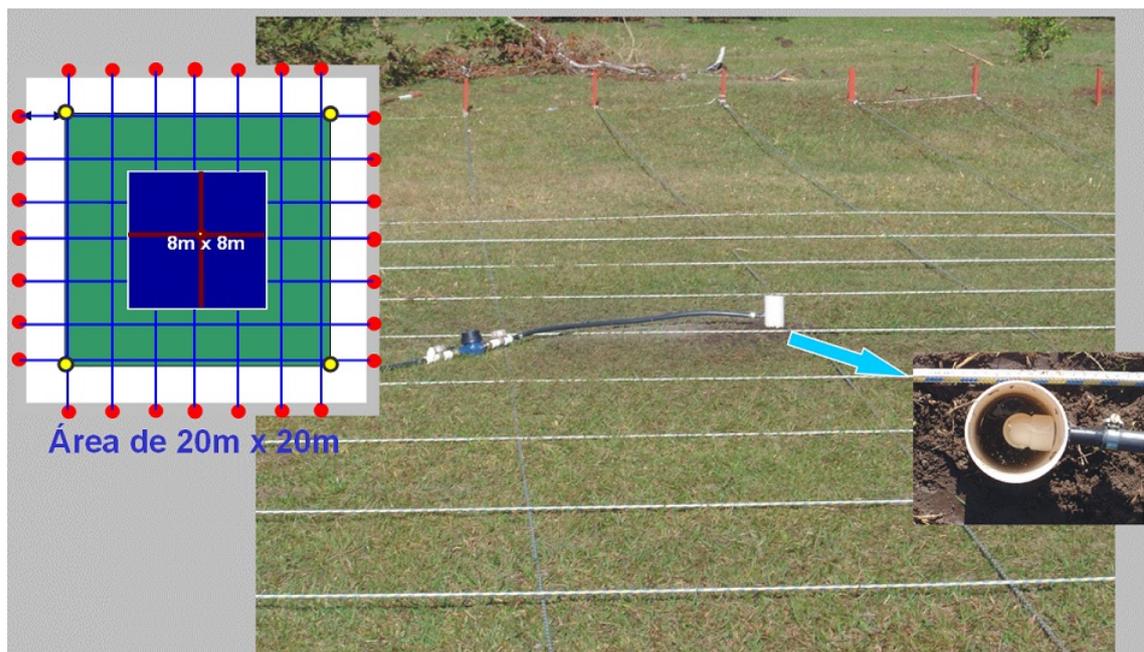


Figura 5.1: Esquema ilustrando a área onde foi realizado o experimento. A seta azul ao centro da fotografia indica o direcionador de fluxo no ponto de injeção. É possível reparar ainda o contador de vazão atrelado à mangueira de injeção. As estacas vermelhas ao fundo do terreno são representadas como os pontos vermelhos nas bordas do esquema da área de 20m x 20m ao lado esquerdo da fotografia. Fonte: Reis, T. P.

o intuito de servir como *Background* para análises das características do meio inalterado pelo experimento. Totalizam-se então, 38 seções GPR (radargramas) a serem processadas - 1 *Background* para a direção de levantamentos N/S e 18 seções espaçadas de 20 minutos entre si, também para a direção de levantamentos N/S; 1 *Background* para a direção de levantamentos L/O e mais 18 seções espaçadas de 20 minutos entre si, para a esta mesma direção de levantamentos L/O.

O planejamento do processamento e aquisição dos radargramas foi desenvolvido para que todas as seções GPR a serem adquiridas tivessem características idênticas de intervalo amostral, número de amostras por traços, número de traços, disposição de arranjo de aquisição, polarização de antenas durante o levantamento, espaçamento entre traços e TTW (*Total Time Window* - Davis & Annan, 1989) com o objetivo de minimizar diferenças entre as seções que não fossem apenas as variações temporais na saturação vadosa.

O arranjo de aquisição adotado foi o arranjo *Fixed-Offset*, que consiste em manter o mesmo espaçamento - correspondente a 1 metro - entre as antenas transmissora e receptora, o *Offset* do GPR, para cada traço do radargrama (Annan, 2001 - ver Figura 5.3).

A polarização das antenas durante os levantamentos de todos os dados se deu com estas

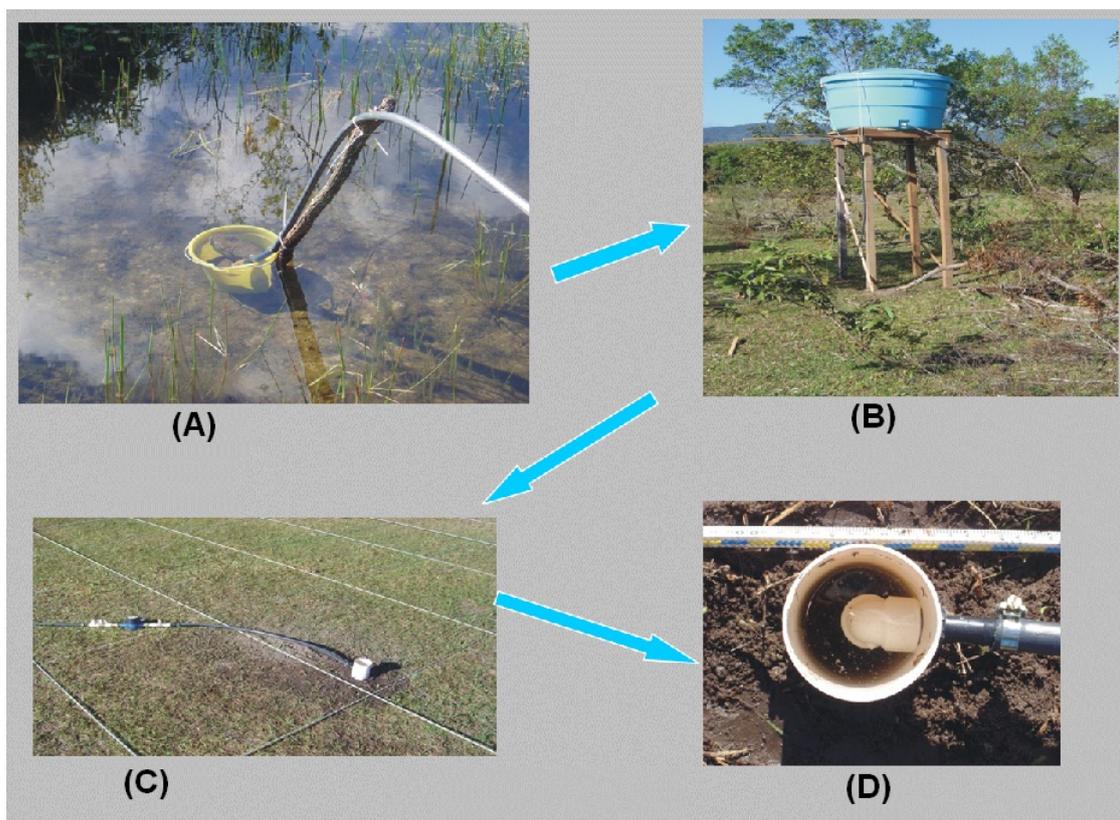


Figura 5.2: Esquema ilustrando o as etapas do experimento: (A) Bombeamento da água de drenagem proximal até (B) Caixa D'água de armazenamento. Em (C) Vemos o ponto de injeção, com o contador de vazão na mangueira e o direcionador de fluxo, este último novamente explicitado e ampliado em (D). Fonte: Reis, T. P.

sempre dispostas de maneira perpendicular ao sentido de aquisição (polarização PR-ED - Annan, 2001 - ver Figura 5.3).

O Número de Amostras por traço foi o mesmo para todos os levantamentos, totalizando sempre 875 amostras em cada traço. A Janela de Tempo Total adotada para cada seção foi ajustada para manter-se constante em 350ns para cada radargrama. Dividindo a 'Janela de Tempo' pelo 'Número de Amostras' por traço, chegamos ao 'Intervalo Amostral', de 0,4ns para todas as seções.

O espaçamento entre os traços se deu sempre por 0,1m resultando num total de 81 traços por seção. Vale lembrar que ocorreram as seguintes falhas (de razões humanas) durante a aquisição:

- Disparar duas ou mais vezes o sinal em um mesmo ponto da linha de levantamento, gerando uma seção com mais traços que o previsto.
- Não disparar o sinal em algum ponto da linha de aquisição, gerando radargramas com número de traços menor que o previsto.

Para ambos os casos foi desenvolvido um processo de correção dos erros, processo este que será exemplificado no tópico 5.2 - referente ao processamento dos dados.

O equipamento adotado para todo este processo experimental, foi o *GPR PulseEKKO PRO - One-Man 200MHz* da *Sensors&Software Company (Sensoft)*, ver Figura 5.4.

## 5.2 METODOLOGIA DO PROCESSAMENTO DE DADOS

Todos os dados do projeto sofreram processamento em fluxos *Shell Script* no *software open source Seismic Un\*x*. Originalmente após a aquisição, realizada com um GPR da fabricante *GPR Sensors&Software*, os dados serão armazenados em formato ".DT1" que é o formato de extensão particular de saída de arquivos adquiridos por equipamentos desta empresa. Desta forma, o primeiro passo necessário ao processamento é a conversão de formatos de "DT1" para "SU", que é o formato particular do *Seismic Un\*x*. Esta etapa do processamento se dá pelo comando "DT1TOSU", que converte dados de radar de penetração de solos neste formato da *Sensoft de GPR* - Ex.: X.dt1 -, em formato *Seismic Un\*x* - Ex.: X.su - (Stockwell Jr., J. W. & Cohen, J.K. - 2008).

O segundo passo do processamento, esta a única etapa realizada com *software* não livre, é a aplicação do filtro "DEWOW" de baixas frequências. Trata-se de um filtro passa alta, que

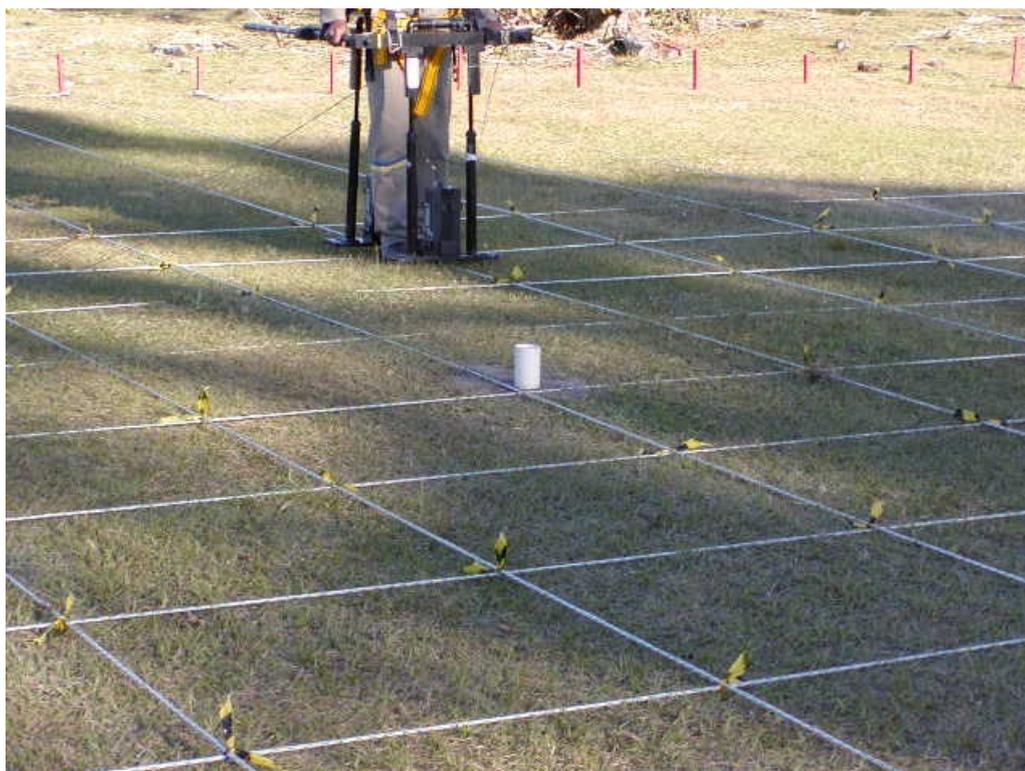


Figura 5.3: Foto ilustrando a realização do levantamento. Observar que as antenas estão dispostas de forma perpendicular ao trajeto do técnico. Observar também que a distância entre o "trem" de antenas (transmissora e receptora) não varia. Fonte: Travassos, J. M.

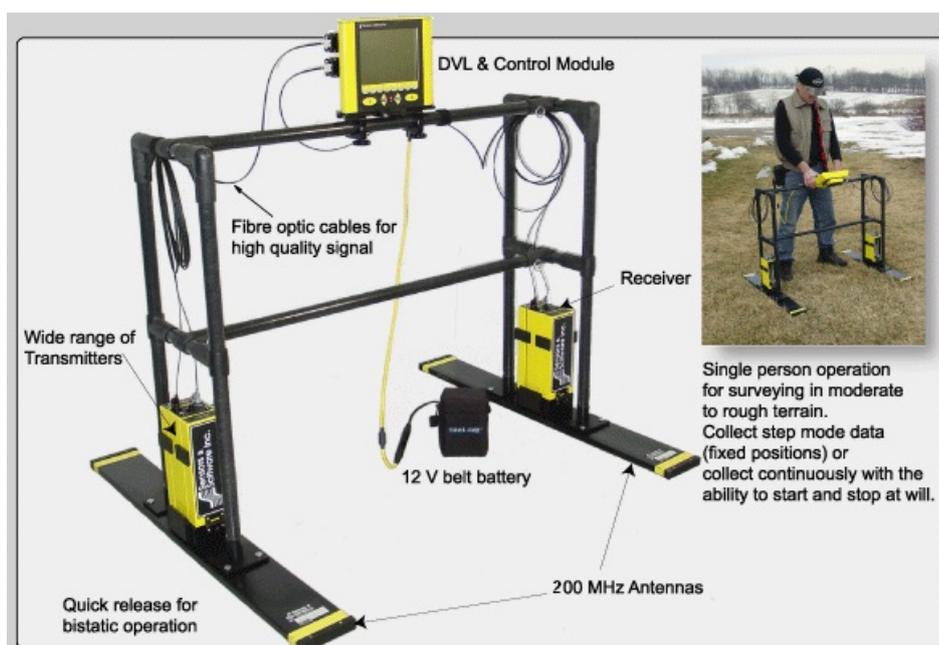


Figura 5.4: *GPR PulseEkko PRO, One-Man 200MHz* da *Sensors&Software*. Na ilustração aparatos de um levantamento *Fixed-Offset*. Fonte: *Sensoft.ca*.

centra as amplitudes do traço em tempo, no eixo zero dos traços. Por se tratar de uma aplicação de filtro de frequências até uma determinada frequência específica, não revelada pelo fabricante do aparelho, foi decidido, visando o melhor processamento possível, que esta função deverá ser aplicada pelo *software* EKKOView Deluxe, de processamento de dados de GPR, que é adquirido em conjunto com o aparelho e elaborado pelo fabricante deste. Segundo Gerlitz et al, 1993, trata-se de um filtro temporal utilizado para remover componentes de frequências muito baixas dos dados. Estas componentes de frequência são associadas às possíveis limitações do alcance dinâmico da instrumentação (Annan, A. P., 2001).

A terceira etapa do processamento das seções será a padronização do número de traços das seções. Este processo é estritamente necessário para realizarem-se as posteriores análises *Time-Lapse* com boa qualidade, pois quanto mais tornarem-se parecidas as seções em relação à posição e número de traços, mais se evidenciarão apenas as variações de fluxo de um radargrama para o outro (considerando que o *Total Time Window* já se encontra equalizado desde a hora da aquisição dos dados, portanto, a janela de tempo dos radargramas já se encontra igual para todos os dados do projeto) quando as subtrações forem realizadas.

Seções podem possuir número de traços diferentes em razão de falhas humanas na aquisição. Pode haver seções com mais ou com menos traços do que os 81 planejados para cada um dos radargramas, originalmente adquiridos com intervalo amostral horizontal (ou o "passo" entre cada traço) de 0,1m em linhas de levantamento de 8m.

Esta fase de processamento pôde ser completada a partir da adição de traços nulos no fim das seções com menos traços do que o esperado, através da função 'SUNULL', que cria pequenas seções nulas com número de traços, intervalo amostral vertical 'dy', número de amostras e *time window* ajustáveis ao desejo do processador (neste caso, as seções nulas criadas foram adaptadas ao padrão pré-existente nos radargramas já adquiridos). Através da função 'SUMIX-GATHERS' (que acopla duas seções em um radargrama resultante), essas pequenas seções de poucos traços criadas com o 'SUNULL', são adicionadas aos radargramas em que estes mesmos poucos traços encontravam-se em débito em relação aos 81 traços esperados por seção.

Quando o número de traços excede o planejado, de forma arbitrária, definimos que serão removidos os traços posteriores ao traço 81. Esse processo se faz usando a função 'SUWIND', com a qual se pode definir a janela horizontal, ou seja, quantidade de traços que irá compor a seção final, cortada dos traços indesejados.

Após sofrerem o DEWOW e serem equalizadas em relação ao número de traços, as seções deverão passar por um processamento próprio e padrão para seções *fixed-offset*. Esse

processamento poderia ser realizado de forma específica para cada seção, visando um melhor imageamento. Porém, todas as etapas do processamento serão aplicadas de forma comum a todos os radargramas, com o intuito de não serem geradas diferenças entre seções provocadas por processamento específico.

O primeiro passo do processamento próprio para seções *fixed-offset* a ser realizado será a análise do Espectro de Fourier de todas as seções através da função 'SUSPECFX', e assim definir um filtro de frequências. A aplicação do filtro se deu através da função 'SUFILTER', que representa um passa-banda trapezoidal, com seus quatro parâmetros (pontas do trapézio) definidos por uma média calculada a partir de cada região de corte escolhida pela análise do espectro em cada seção, uma a uma, resultando em uma espécie de "filtro médio" de frequências para todas as seções. Esta fase de processamento denomina-se "Filtragem" e será aplicada a todas as seções de maneira comum e sistemática.

Depois da filtragem nas frequências, aplicam-se os ganhos temporais, que visam equalizar as perdas de amplitude causadas pelo tempo de viagem e dispersão da onda eletromagnética. Como este trabalho preocupa-se de fato com o imageamento e não com análises de atributos ou intensidade de reflexões, foi escolhido, para aplicação nos dados, o Ganho AGC (*Automatic Gain Control* - Stockwell Jr., J. W. & Cohen, J.K. - 2008), que compensa as perdas de amplitude em janelas de tempo pré-definidas, e de certo modo, torna a amplitude de todas as reflexões bem similares (Yilmaz, O. - 1987). A função geral de ganhos do *Seismic Un\*x*, denomina-se 'SUGAIN' e como parâmetros desta, serão definidos o tipo de ganho, no caso o AGC, e o WAGC, que é o tamanho da janela de tempo de compensações do AGC, definido por sucessivas tentativas, de acordo com o melhor resultado de imageamento, que neste caso para todas as seções a janela de tempo do AGC ou o WAGC foi de 6 ns.

Após ser aplicado o ganho, se evidenciarão em função deste, ruídos que passaram na primeira filtragem de frequências. Será novamente aplicado então, um filtro de frequências visando à exclusão desses ruídos que não foram removidos na primeira filtragem, em um processo denominado "Re-Filtragem". Este processo deverá ocorrer de maneira análoga ao processo de Filtragem, porém, alterando-se os quatro parâmetros do filtro passa-banda trapezoidal para uma nova média de regiões de filtragem re-analisada e re-selecionada em cada seção.

Quando estiverem realizadas as etapas de conversão de formatos, de aplicação do dewow, da filtragem, do ganho e da re-filtragem, deverá ainda ser re-definido o *Time Window* das seções, na intenção de que sejam removidas as regiões dos traços que se encontrem nulas - ou apenas com ruídos - por representarem o tempo de viagem da onda eletromagnética antes da primeira

recepção (onda direta). No tratamento dos dados sísmicos comumente vemos o '*Early Mute*' (aplicado no SU pela função '*SUMUTE*' tendo como parâmetro o limite de tempo que se deseja silenciar por traço) exercendo esta função de silenciar os traços até a onda direta. Porém nestas seções GPR a área de predominante ruído ou nula acima da primeira recepção do sinal, encontra-se bem pouco ruidosa e neste caso não influencia nas seções após a aplicação do ganho, além de encontrar-se em tempo muito semelhante para todos os traços em todas as seções, e por isso não se fez necessário a aplicação do *mute* individual, apenas se definiu a janela de tempo para os radargramas dentro da zona de interesse, praticamente idêntica e definida de forma comum a todas as seções. Esta janela de tempo (*Time Window*) também deverá definir o tempo máximo das seções excluindo-se destas regiões onde o alcance das ondas já não se faz presente, predominando-se novamente, os ruídos em relação às reflexões. A ferramenta do SU que define a janela de tempo picada é a '*SUSHIFT*' onde os parâmetros são o Tempo Mínimo - TMIN, que deve corresponder ao tempo da primeira reflexão registrada no *Header* de cada radargrama, e o Tempo Máximo - TMAX, correspondente ao tempo final que queremos que todas as seções possuam, o qual deverá ser calculado pela adição do tamanho (em tempo que queremos para todas as seções) ao tempo mínimo (*Time Zero*, correspondente ao início de cada seção já shifteada).

Nesta nova seção 'picada' o *Time Zero*, não será zero propriamente, mas sim o tempo referente a primeira reflexão. Assim sendo, é aceitável adaptar o tempo da primeira reflexão para zero nas seções geradas, e se fará necessário alterar esse parâmetro para que estas seções resultado comecem em tempo igual a zero. A função do SU que pode mudar a posição do *Time Zero* é chamada '*SUCHW*' - *Seismic Un\*x Changing Header Word*. Esta será a etapa final do processamento das seções. Em todas as seções processadas neste projeto o *Time Window* adotado foi de 0 até 200 ns.

O mecanismo de análise *Time-Lapse* entre os radargramas se dá por uma "subtração" a ser realizada entre duas seções processadas por vez - com o intuito de evidenciarem-se apenas as variações entre as duas seções a serem subtraídas, já que ambas são espacialmente idênticas tendo como diferenças entre si apenas a variação de tempo - e esta etapa se dará pela função '*SUOP2*', escolhendo-se a opção *diff* representando a subtração como parâmetro de operação. É importante que seja reparado que os radargramas *Backgrounds* não participarão do processo de diferenças - como seria o ideal, pois se subtraindo as seções a partir de uma que seja *Background*, todas as diferenças entre um meio alterado e um meio inalterado pelo experimento seriam explicitadas. O motivo de não utilização dos *Backgrounds*, nas diferenças entre seções, se dá pelo fato de que estes não possuem o *Pull-down* causado pela região de baixa velocidade referente à

concentração de água injetada, que causa um efeito de atraso em todas as reflexões posteriores aos *Pull-downs* nas seções pós-injeção. Este atraso desloca os refletores das seções pós-injeção para baixo, impedindo os seus desejados cancelamentos com seus análogos refletores, que por sua vez não deslocados para baixo nas seções *Background*, sem água infiltrada e conseqüentemente sem *Pull-downs*. A velocidade de propagação da onda eletromagnética depende e é inversamente proporcional aos valores das Constantes Dielétricas dos meios - representa-se por "K" a Constante Dielétrica, que significa em grosso modo, o quanto o meio é mais "denso" que o vácuo em relação à permitividade e condutividade eletromagnética. Como o K do ar é igual a um, e o da água é igual a oitenta, ao penetrar-se nos fluidos saturantes antes e depois da infiltração, a velocidade da onda é atenuada quando há saturação aquosa, gerando o efeito de *Pull-down* (Ver Figura 5.5). Sendo assim uma diferença entre seções pré e pós-injeção não encontraria os mesmos refletores em suas mesmas posições, e estes não se cancelariam como o desejado em uma análise *Time-Lapse*.

$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0 K}} = \frac{c}{\sqrt{K}}$ $\epsilon_0 \mu_0 K = \epsilon \mu$	<p><b>V</b> - Velocidade de propagação da onda eletromagnética</p> <p><b>C</b> - Velocidade de propagação da luz no vácuo</p> <p><b>K</b> - Constante dielétrica</p> <p><b>ε</b> - Permitividade Magnética do meio</p> <p><b>ε<sub>0</sub></b> - Permitividade Magnética do vácuo</p> <p><b>μ</b> - Permeabilidade do meio</p> <p><b>μ<sub>0</sub></b> - Permeabilidade do vácuo</p>
<p><b>K<sub>ar</sub> = 1</b>                      <b>K<sub>água</sub> = 80</b></p>	

Figura 5.5: Fórmulas ilustrando a influência da Constante Dielétrica (*K*) na Velocidade de propagação da onda eletromagnética (*v*). Fonte: Annan, 2001.

Todas as etapas de processamento descritas acima foram realizadas de forma sistemática e sucessiva através de um fluxo em linhas de comando da linguagem *Shell Script*. Estas etapas estão ilustradas nas duas próximas figuras (5.6 referente ao efeito do processamento nos traços, e 5.7 referente ao efeito do processamento nas seções), além disso, os *Shells Scripts* desenvolvidos para cada etapa estão disponíveis para visualização nas figuras 5.8, 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12.

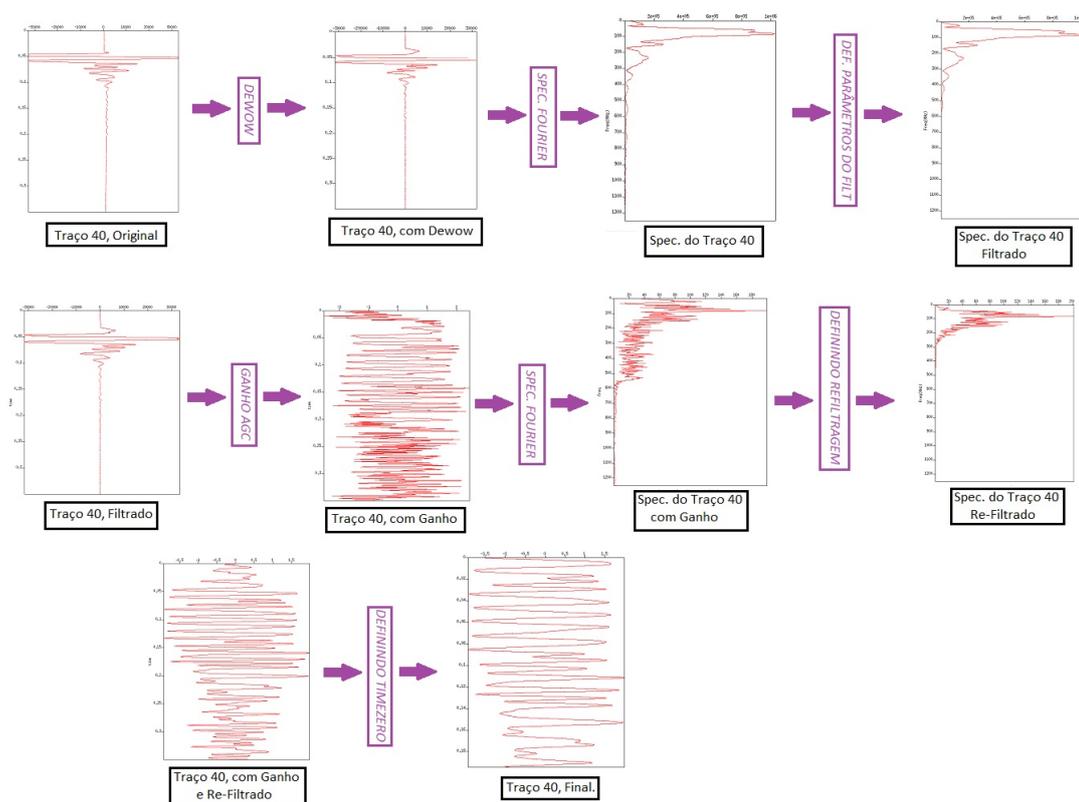


Figura 5.6: Esquema ilustrando a evolução dos traços após cada etapa de processamento aplicada. Fonte: Reis, T. P.

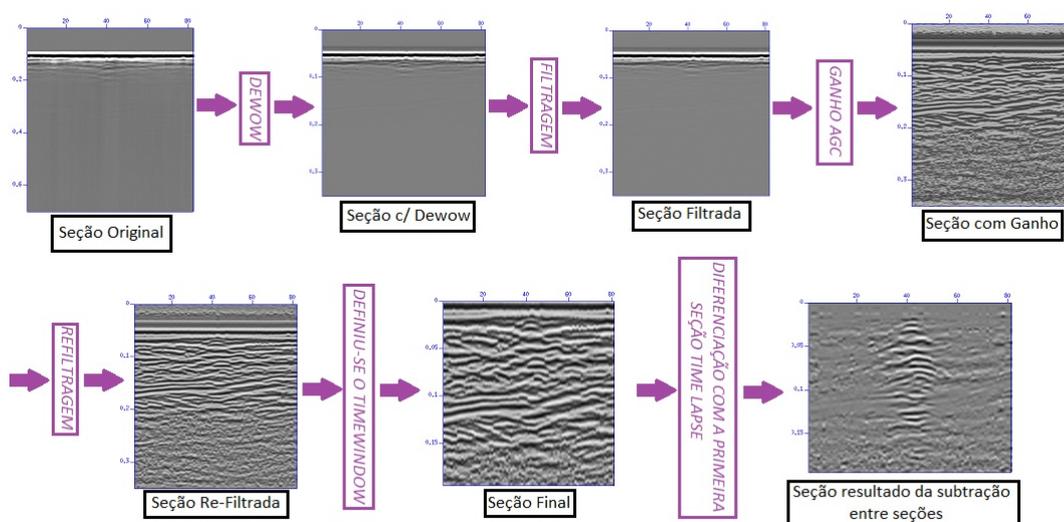


Figura 5.7: Esquema ilustrando evolução das seções após cada etapa de processamento aplicada. A última seção do esquema é uma seção *Time-Lapse* representando diferenças entre duas seções. Fonte: Reis, T. P.

```

#!/bin/sh

#-----Header Information !REEDITAR SEMPRE!!!-----

nm2=81          #number of traces
nss=875        # number of pts/Trc
ddl=0.4        # dt= Total Time Window / (number of pts/Trc)
dd2=1          # sampling interval in the slow dimension (**step size??)

#-----

#####
# DATA INPUT #-----
#####

echo Files .dt1 disponiveis -lembrar de EDITAR HEADER NO SCRIPT!- :
ls *.dt1
echo Entrar arquivo.dtl -sem extensao!- :
read file

file1=$file

#-----

#####
# COVERSÃO DT1 PARA .SU #-----
#####

dtltosu <$file1.dtl >$file1.su ns=$nss dt=$ddl swap=0
echo 1- $file1.dtl convertido em $file1.su .

#-----

#####
# PLOT DA SEC. ORIGINAL #-----
#####

suximage< $file1.su dt=$ddl swap=0 ns=$nss ybox=420 xbox=10 wbox=400 hbox=600 \
    label1="time" \
    label2="meter" \
    title="Sec.Original" &

#-----

#####
# FILTRAGEM #-----
#####

#-----Escolha do Traco-----

tracl1=40
tracl2=40

file2=${file1}Tr=$tracl1

suwind <$file1.su >$file2.su key=tracl min=$tracl1 max=$tracl2
suxgraph<$file2.su ybox=420 xbox=10 wbox=400 hbox=600 \
    label1="time" \
    label2= "Amplitud" \
    title=" Original Trace = $tracl1 " &

echo 2- Trace escolhido para testes de Filtragem = $tracl1 .

#-----Espectro de Fourier do Traco Escolhido-----

suspecfx<$file2.su | suxgraph ybox=10 xbox=420 wbox=400 hbox=20 \
    label1="Freq(MHz)" \
    label2= "Amplitud" \
    title=" Spectrum do Trace = $tracl1 " &

```

Figura 5.8: *Shell Script* desenvolvido e utilizado para as etapas de processamento *fixed-offset* padrão aplicado de forma comum a todas as seções - PARTE 1. Fonte: Reis, T. P.

```

#-----Selecao de Parametros do Filtro:-----
a1=0 a2=10 a3=460 a4=480
#-----

#-----Aplicando do Filtro em Somente o Trace Escolhido-----

file3=${file2}Filt

sufilter <$file2.su f=$a1,$a2,$a3,$a4 >$file3.su

suxgraph<$file3.su ybox=420 xbox=10 wbox=400 hbox=600 \
  label1="time" \
  label2= "Amplitud" \
  title="Trace = $tracl1 Filtrado " &

#-----Conferindo a Filtragem do Traco Escolhido pelo Spectro-----

suspecfx<$file3.su | suxgraph ybox=10 xbox=420 wbox=400 hbox=20 \
  label1="Freq(MHz)" \
  label2= "Amplitud" \
  title=" Spectrum do Trace = $tracl1 Filtrado" &

#-----Aplicando o Filtro a Todos os Tracos: Sec. Inteira-----

file4=${file1}Filt

sufilter <$file1.su f=$a1,$a2,$a3,$a4 >$file4.su

echo 3- 0 $file1 foi filtrado em $a1,$a2,$a3,$a4 MHz.
#-----

#####
# PLOT DA SEC. FILTRADA #=====
#####

suximage< $file4.su ybox=420 xbox=10 wbox=400 hbox=600 \
  label1="time" \
  label2= "meter" \
  title="Sec. Filtrada" &

#-----

#####
# APLICANDO GANHO #=====
#####

file5=${file4}Gain

sugain<$file4.su agc=1.0 wagc=0.006 >$file5.su

echo 4- 0 $file4 sofreu Ganho agc=1 , com wagc=0.006 .

#-----

#####
# PLOT DA SEC. FILTRADA + GANHO #=====
#####

suximage< $file5.su ybox=420 xbox=10 wbox=400 hbox=600 \
  label1="time" \
  label2= "meter" \
  title="Sec. Filtrada + Gain" &

```

Figura 5.9: *Shell Script* desenvolvido e utilizado para as etapas de processamento *fixed-offset* padrão aplicado de forma comum a todas as seções - PARTE 2. Fonte: Reis, T. P.

```

#####
# PROCESSO DE REFILTRAGEM #=====
#####

#-----Escolha do Trace com Filt + Gain -----

file6=${file5}Tr=${tracl1}

suwind < $file5.su > $file6.su key=tracl min=${tracl1} max=${tracl2}

suxgraph < $file6.su ybox=10 xbox=420 wbox=400 hbox=20 \
          label1="time" \
          label2= "Amplitud" \
          title=" Trace = $tracl1 com Filtro e Gain" &

echo 5- Trace escolhido para testes de RE-Filtragem = $tracl1 .

#-----Espectro de Fourier do Trace Escolhido-----

suspecfx<$file6.su | suxgraph ybox=10 xbox=420 wbox=400 hbox=20 \
          label1="Freq" \
          label2= "Amplitud" \
          title=" Spec. do Trace = $tracl1 FiltGain" &

#-----RE-Selecao de Parametros do Filtro:-----
a5=0 a6=0 a7=500 a8=520
#-----

#-----RE-Aplicando do Filtro em Somente o Trace Escolhido-----

file7=${file6}REFilt

sufilter <$file6.su f=$a5,$a6,$a7,$a8 >$file7.su

suxgraph<$file7.su ybox=420 xbox=10 wbox=400 hbox=600 \
          label1="time" \
          label2= "Amplitud" \
          title="Trace = $tracl1 Refiltrado " &

#-----Conferindo a RE-Filtragem do Traco Escolhido pelo Spectro-----

suspecfx<$file7.su | suxgraph ybox=10 xbox=420 wbox=400 hbox=20 \
          label1="Freq(MHz)" \
          label2= "Amplitud" \
          title=" Spect do Trace = $tracl1 Refiltrado" &

#-----Aplicando o Filtro a Todos os Tracos: Sec. Inteira-----

file8=${file5}REFilt

sufilter <$file5.su f=$a5,$a6,$a7,$a8 >$file8.su

echo 6- O $file5 foi Refiltrado em $a5,$a6,$a7,$a8 MHz.

#-----

#####
# PLOT DA SEC. REFILTRADA #=====
#####

suximage< $file8.su ybox=420 xbox=10 wbox=400 hbox=600 \
          label1="time" \
          label2= "meter" \
          title="Sec. FiltGain Refiltrada" &

```

Figura 5.10: *Shell Script* desenvolvido e utilizado para as etapas de processamento *fixed-offset* padrão aplicado de forma comum a todas as seções - PARTE 3. Fonte: Reis, T. P.

```

#!/bin/sh

#----Header Information !REEDITAR SEMPRE!!!-----
-----

nn2=81          #number of traces
nss=875         # number of pts/Trc
ddl=0.4        # dt= Total Time Window / (number of pts/Trc)
dd2=1          # sampling interval in the slow dimension (**step size??)

#-----

#####
# DATA INPUT #-----
#####

echo Files .dt1 disponiveis -lembrar de EDITAR HEADER NO SCRIPT!- :
ls *.su
echo Entrar arquivo.su -sem extensao!- :
read file

file1=$file

#-----

#####
# PLOT DA SEC. ORIGINAL #-----
#####

suximage < $file1.su ybox=420 xbox=10 wbox=400 hbox=600 \
    label1="time" \
    label2="meter" \
    title="Sec.Original" &

#-----

#####
# DEFININDO O WINDOW DA SECs #-----
#####

file2=${file1}shf

sushift < $file1.su > $file2.su tmin=0.047 tmax=0.23

#-----

#####
# PLOT DA SEC. PICADA #-----
#####

suximage < $file2.su ybox=420 xbox=10 wbox=400 hbox=600 \
    label1="time" \
    label2="meter" \
    title="Sec.Window" &

#-----

#####
# HEADER DA SEÇÃO PICADA #-----
#####

echo Header Original da seção picada, abaixo.
surange < $file2.su

#-----

#####
# MUDANÇA DE HEADER #-----
#####

file3=${file2}HD

suchw < $file2.su > $file3.su key1=delrt a=0

#-----

#####
# PLOT DA SEC. WINDOW MOD-HEADER #-----
#####

suximage < $file3.su ybox=420 xbox=10 wbox=400 hbox=600 \
    label1="time" \
    label2="meter" \
    title="Sec.Window HD-mod" &

#-----

#####
# HEADER MODIFICADO DA WINDOW #-----
#####

echo Header MODIFICADO da seção picada, abaixo.
surange < $file3.su

```

Figura 5.11: *Shell Script* desenvolvido e utilizado para as etapas de re-definição de *Time Window* e alteração do *Time Zero*. Fonte: Reis, T. P.

```

#!/bin/sh

#-----Header Information -----

nn2=81          #number of traces
nss=875        # number of pts/Trc
ddl=0.4        # dt= Total Time Window / (number of pts/Trc)

#-----

#####
# DATA INPUT #=====
#####

file1=FSA001
file2=FSA002
file3=FSA003
file4=FSA004
file5=FSA005
file6=FSA006
file7=FSA007
file8=FSA008
file9=FSA009
file10=FSA010
file11=FSA011
file12=FSA012
file13=FSA013
file14=FSA014
file15=FSA015
file16=FSA016
file17=FSA017
file18=FSA018

#-----

#####
# DIFF DAS SECs #=====
#####

suop2 $file1.su $file2.su op=diff [trid=111] > diffFSA1_2.su

suximage < diffFSA1_2.su ybox=300 xbox=520 wbox=700 hbox=500 \
    label1="time" \
    label2="meter" \
    title="Dif1_2" &

```

Figura 5.12: *Shell Script* desenvolvido e utilizado para as etapas de subtração entre seções.  
 Fonte: Reis, T. P.

## 6 RESULTADOS PARCIAIS

Como resultados preliminares do projeto, serão apresentadas as imagens dos radargramas processados seguindo o mesmo fluxograma descrito no item 5.2 deste trabalho.

Dos 38 radargramas referentes aos dados levantados na ressacada dispostos para visualização da seguinte maneira: Seções *Background* Leste/Oeste e Norte/Sul; Seções Pós-Injeção - primeiramente todas as 18 seções Norte/Sul e em seguida as 18 seções Leste/Oeste, encontram-se a seguir apenas as figuras das seções *Background*. As demais figuras encontram-se na seção Anexo (ver a seguir as Figuras 6.1 e 6.2 - *Backgrounds* - , e no Anexo as figuras 9.1 a 9.36 *Foregrounds*).

Das seções *Time-Lapse* explicitando as diferenças entre cada duas seções pós-injeção (sempre em relação à primeira seção *Foregorund*) para cada sentido de levantamento se seguirão: primeiramente todas as 17 seções resultado entre diferenças Norte/Sul e em seguida as 17 seções diferença extraídas das linhas Leste/Oeste, todas estão disponíveis para visualização na seção Anexo (ver Figuras de 9.37 a 9.70).

Ao analisarem-se os resultados (as figuras supracitadas) devemos levar em consideração as seguintes proporções: O "eixo X"(horizontal) das seções a seguir possui 81 traços espaçados de 0,1m, representando ao total, os 8m da área levantada. O "eixo Y"(vertical) das seções representa a duração dos traços, em uma janela de tempo de aproximadamente 200ns, sendo que cada 30ns, neste caso, representam de modo aproximado 1m de profundidade real, ou seja, cada seção possui uma profundidade estimada em 6,7m no alcance de investigação.

No capítulo a seguir, os radargramas e redargramas de diferenças, gerados e apresentados a seguir e na seção Anexo serão brevemente analisados.

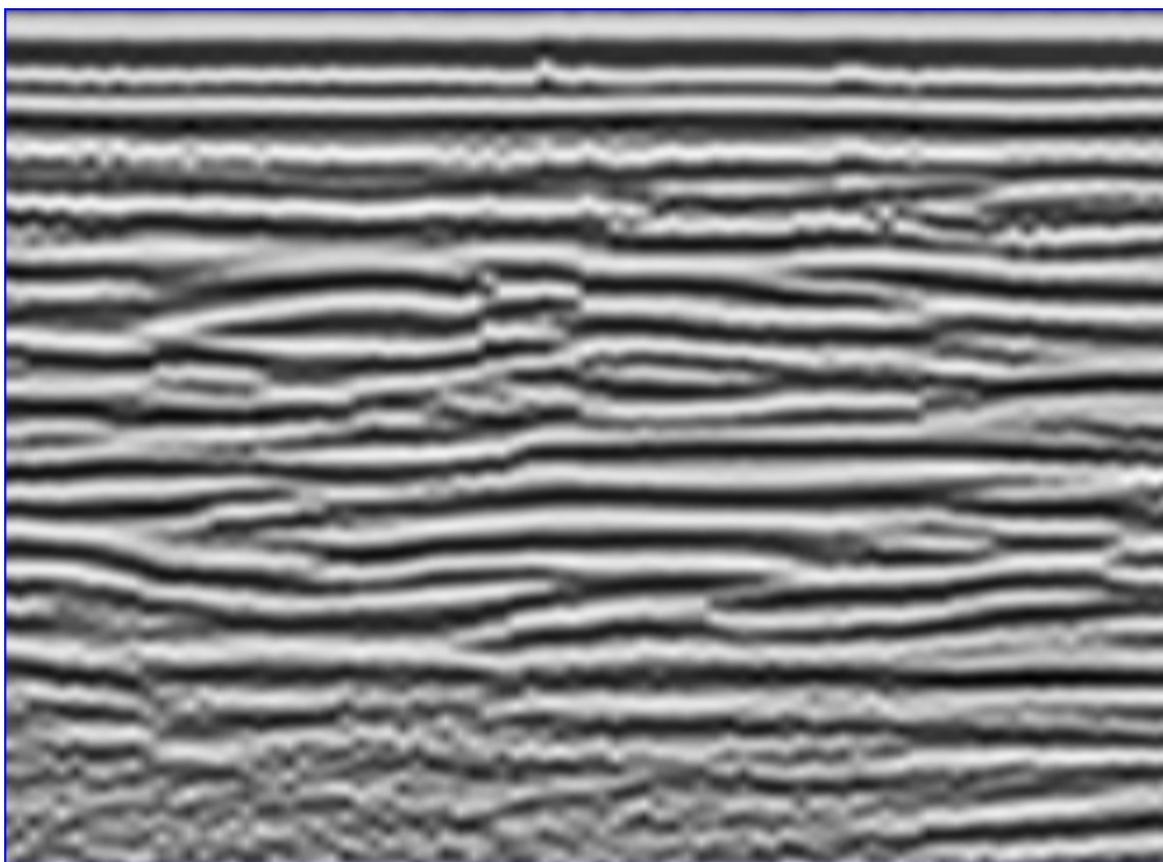


Figura 6.1: Seção Background dos levantamentos realizados no sentido L/O, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Fonte: Reis, T. P.

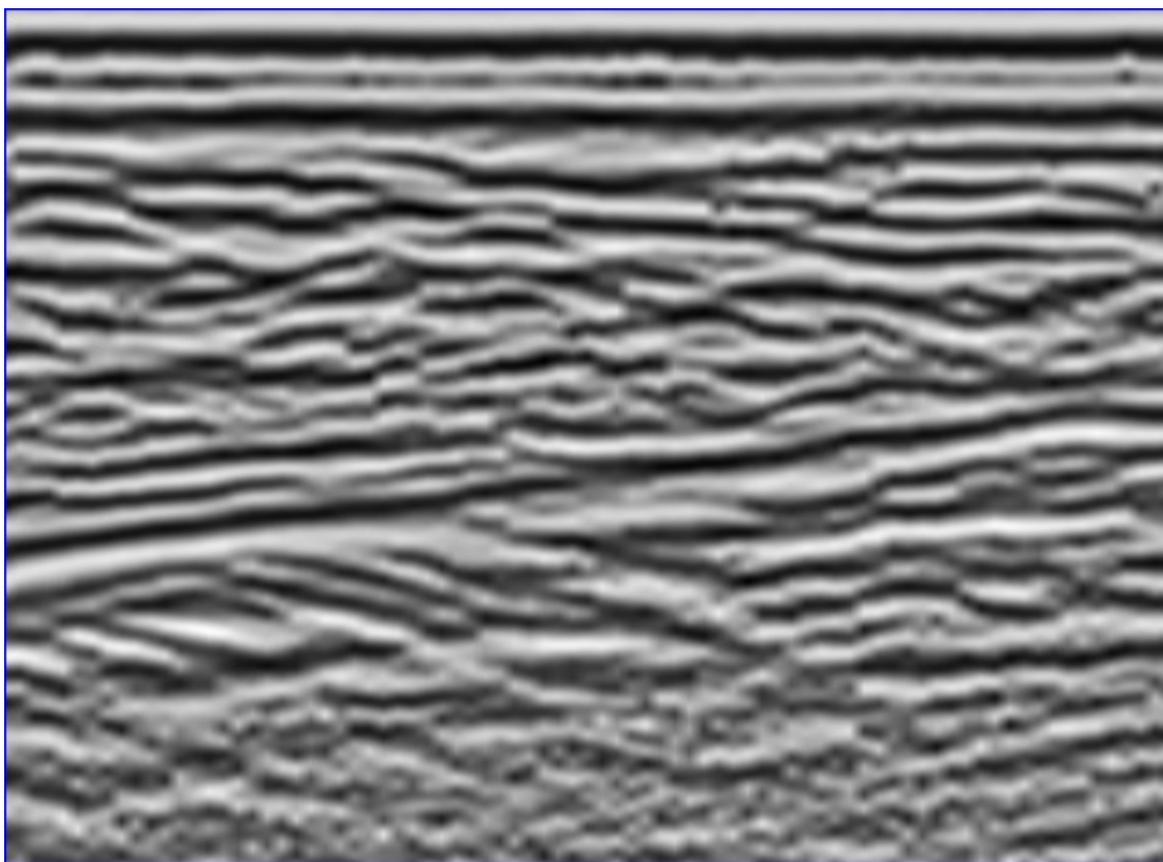


Figura 6.2: Seção Background dos levantamentos realizados no sentido N/S, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Fonte: Reis, T. P.

## 6.1 ANÁLISES DOS RESULTADOS PARCIAIS

Após a exposição dos resultados processados até então neste estudo sobre as capacidades do *Time-Lapse* por diferenças, no monitoramento de um evento de infiltração em subsuperfície vadosa através do GPR, permitiu uma conclusão parcial, na qual duas vertentes de análise dos resultados são consideradas apropriadas ao método em questão. Vertentes estas, descritas e avaliadas da seguinte forma:

A primeira vertente de análise de resultados se dá a partir da sobreposição sistemática dos radargramas obtidos para cada direção, para que se possa avaliar a evolução e dispersão da água infiltrada de seção para seção. Desta forma, levando em consideração que para cada direção de levantamentos o intervalo temporal entre as seções é de 20 minutos, e que possuímos 18 seções espaçadas em tempo para cada sentido de aquisição de dados (além da seção pré-teste ou *background*), assim sendo, então, se pôde acompanhar a dispersão da saturação causada pela infiltração durante 6 horas. Este método mostrou-se eficaz em imagear dentro limitações causadas pelas deturpações na propagação da onda eletromagnética em razão da zona saturada a área infiltrada e sua evolução temporal, porém inviabilizando uma análise estratigráfica concomitante, em razão desta mesma deturpação do sinal.

Na região de infiltração constatou-se em todas as seções um *Pull-Down* (atraso na recepção do sinal, em função do trajeto deste por uma região de menor velocidade relativa de propagação), causado pela região de baixa velocidade no tráfego das ondas eletromagnéticas em função do meio estar saturado com água, mais permissiva do que o ar a permitividade é inversamente proporcional a velocidade de propagação destas ondas (ver Figuras 5.5 e 9.1).

Pôde-se perceber por este tipo de análise (sobreposição de seções) que o *Pull-Down*:

- Evolui em tamanho (principalmente lateralmente), de seção para seção, representando a dispersão do fluido com o tempo;
- Não se dá por razão de refletância de horizontes geológicos, mas sim por conta das propriedades eletromagnéticas do fluido infiltrante,
- É perceptível também, que os refletores abaixo do *Pull-Down* se desalinham em função das distorções na propagação da onda EM, ocasionadas pela água injetada.

Quanto a segunda vertente de análise de resultados, a partir das seções geradas por diferença (entre radargramas pós-injeção espaçados temporalmente para cada sentido de levantamento, sempre em relação ao primeiro levantamento pós-testes), os refletores pertencentes a

cada radargrama envolvido na subtração, se cancelam em função desta operação. Assim sendo, era esperado que restassem nas seções resultantes, apenas ruídos aleatórios e estruturas referentes aos movimentos de fluxo com o tempo, ou seja, apenas variações temporais na saturação subsuperficial de um radargrama para o outro. Neste caso, porém, a análise por diferenças mostrou-se ineficaz, para o que se propunha. Foi percebido que em todas as seções de diferenças geradas há um padrão de reverberações que começa onde se situa o *pull-down* nas seções pós-injeção, e estende-se sempre até o fim das seções.

O padrão de reverberações foi identificado ao perceber-se que estas estruturas estendiam-se para além do nível freático, e sendo este 100% saturado, nas seções geradas por diferenças, não há como haver estruturas para além deste nível (pois o nível do lençol freático é igual em todos os radargramas, então em todas as seções *time-lapse*, geradas por diferença, todos os refletores para além deste nível deveriam se cancelar, pois são teoricamente iguais).

Esse padrão de reverberações, identificado pelas seções de diferenças, não permitiu que se evidenciassem apenas as variações temporais na saturação subsuperficial, fazendo com que essa vertente de análise dos resultados seja considerada como não apropriada para este caso de estudos.

## 7 ANÁLISE DE RESULTADOS

A identificação do padrão de difrações (ou reverberações) que atrapalhou a análise do *time-lapse* através da diferença entre seções, se tornou peça chave na elaboração dos resultados e considerações finais deste trabalho.

A partir de sua identificação, pode-se buscar alcançar alternativas para sua remoção das seções, ou ao menos buscar uma correção prática nos efeitos de propagação das ondas EM do GPR que sofreram tais difrações.

O primeiro passo na busca pela correção dos efeitos do *reverb*, foi a tentativa de identificá-lo no espectro de frequência das seções, analisando o espectro das seções *background* que sem injeção de água não sofreria os efeitos de difração causados pelo acúmulo desta mesma na região vadosa comparando-o com o espectro das seções pós-injeção (Ver Figuras 7.1, 7.2, 7.3, 7.4), onde as difrações se evidenciariam por alguma característica peculiar.

A partir da análise dos espectros notar que foram selecionados apenas dados do sentido de aquisição N/S, em razão de que estas seções são mais identificáveis em termos de horizontes, devido à presença de um forte mergulho em suas camadas. Notar também que foi selecionada apenas uma amostra das seções, com o intuito de que: primeiro se ache a solução do problema nestas amostras, depois se expanda a solução, caso seja pertinente não é possível que se identifique alguma coerência nos espectros pós-injeção, que não esteja presente no espectro *background*, exceto pequenas divergências sem padrão.

A análise espectral acima, contudo, trás uma importante informação, que seguirá como foco da tentativa de correção das difrações: ambos os espectros pré e pós-injeção, possuem suas frequências centrais muito distantes de 200 MHz frequência média do aparelho GPR utilizado durante a aquisição destes dados e encontram-se deslocadas de mais de 120 MHz da região central esperada.

Discutiremos então, a seguir, o problema da correção prática dos efeitos de propagação

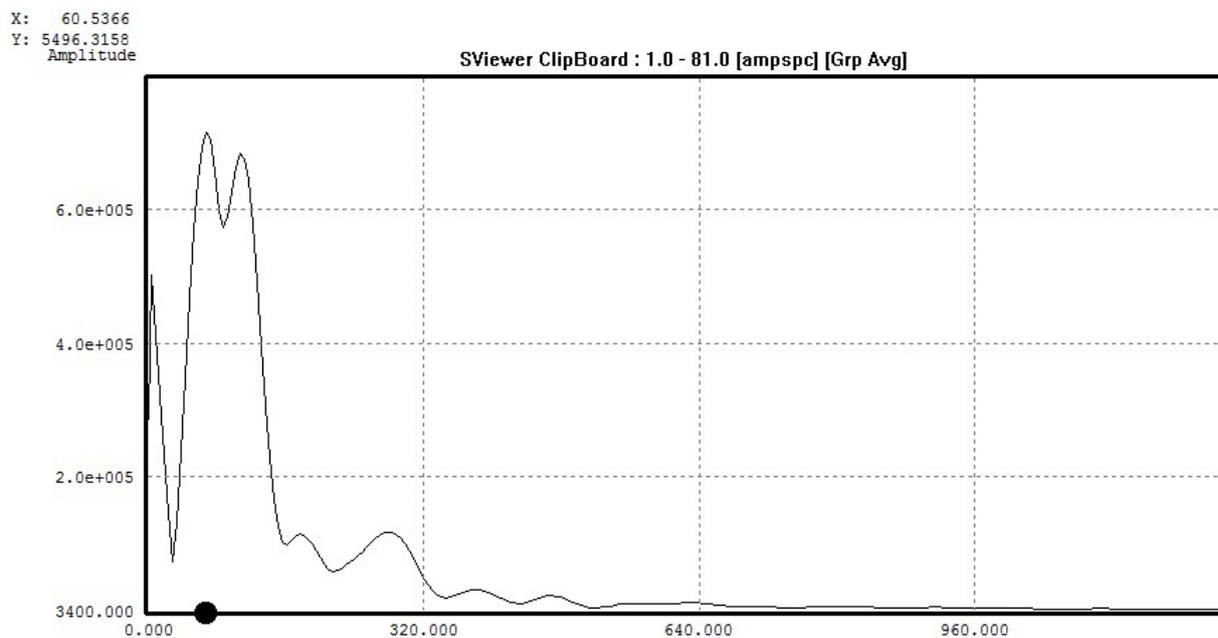


Figura 7.1: Espectro de Amplitude da Seção Background Sentido N/S crua de processamentos. Reparar a frequência central em X = 60MHz. Fonte: Reis, T. P.

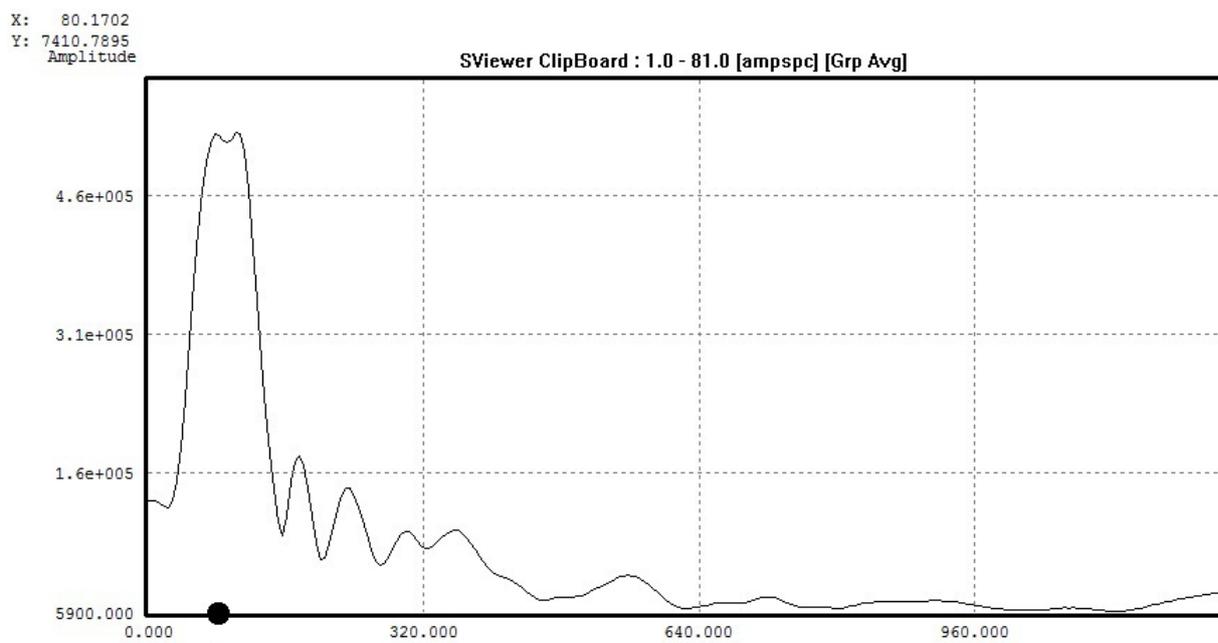


Figura 7.2: Espectro de Amplitude da Seção #01 Pós-Injeção Sentido N/S crua de processamentos. Reparar a frequência central em X = 80 MHz. Fonte: Reis, T. P.

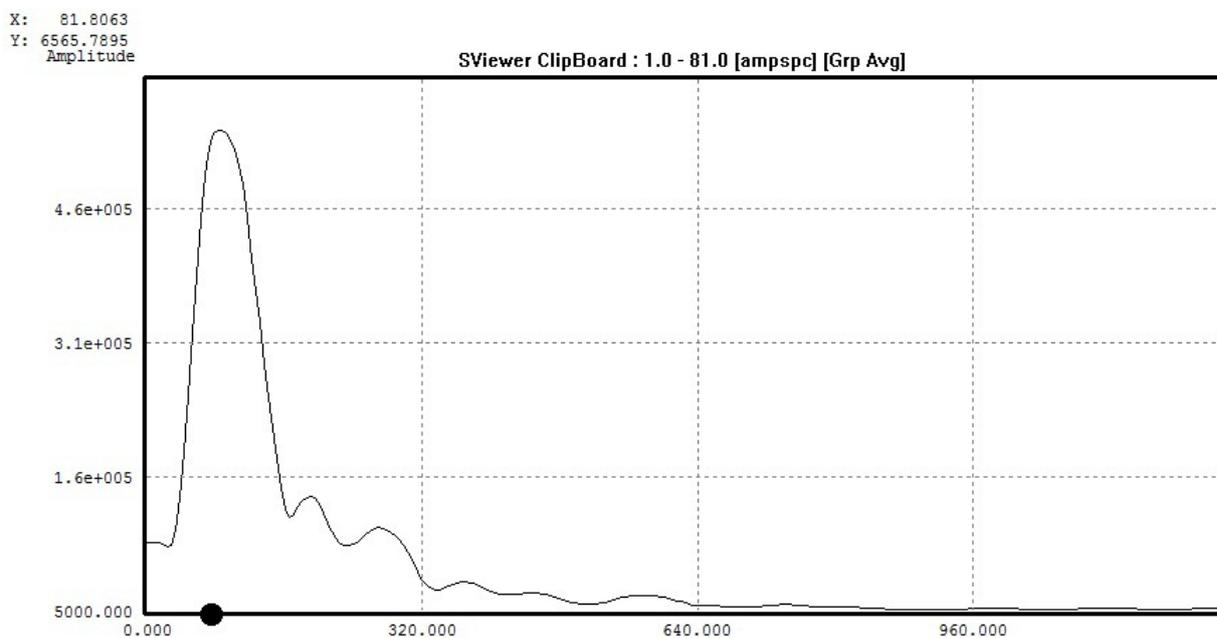


Figura 7.3: Espectro de Amplitude da Seção #10 Pós-Injeção Sentido N/S crua de processamentos. Reparar a frequência central em X = 81 MHz. Fonte: Reis, T. P.

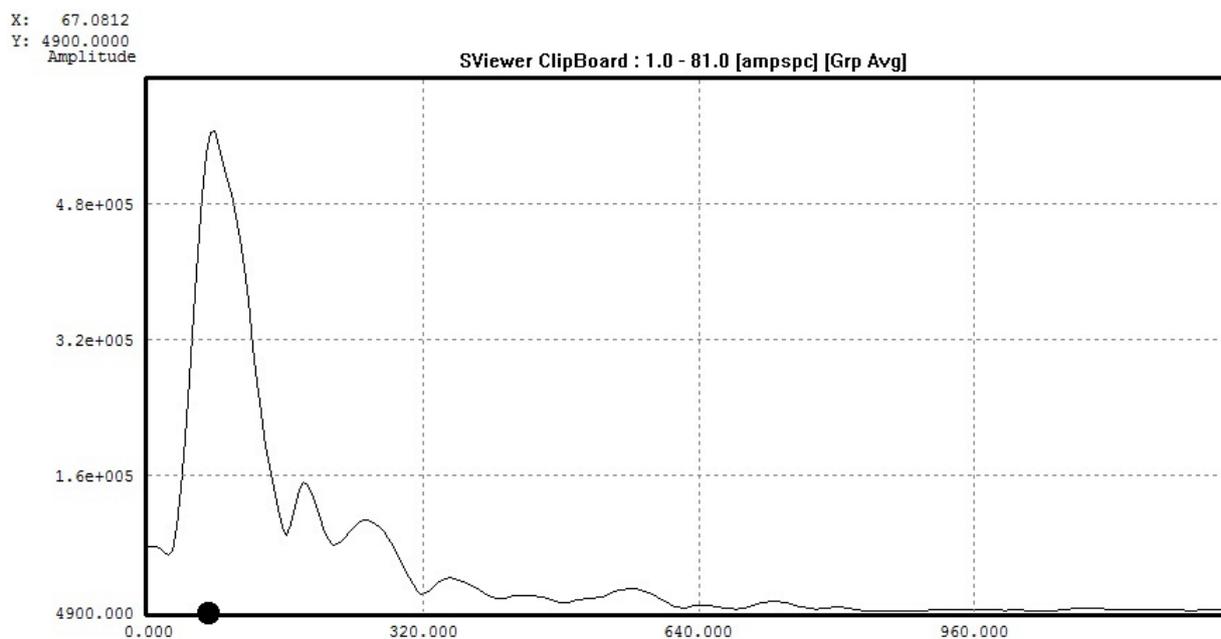


Figura 7.4: Espectro de Amplitude da Seção #18 Pós-Injeção Sentido N/S crua de processamentos. Reparar a frequência central em X = 67 MHz. Fonte: Reis, T. P.

em dados de GPR, com base na influência que têm estes efeitos no espectro do sinal, e como e quanto às seções atingidas pelas difrações poderiam melhorar sua qualidade de imageamento, a partir destas correções que se basearão na hipótese de que a utilização de procedimentos que promovam uma melhoria na distribuição de frequências no espectro do sinal do GPR também promoverá melhoramentos nos efeitos de propagação (Xavier Neto & Medeiros, 2003).

Com base no fato de que a propagação produz mudanças significativas apenas no espectro de frequências, praticamente inalterando a fase do sinal, é possível que, com a utilização integrada de ferramentas como ganho e balanceamento espectral, possa ser efetuada a correção desejada dos efeitos de propagação.

O balanceamento espectral principal ferramenta escolhida por este trabalho para que se alcancem os aprimoramentos de propagação desejados, consequentes de realocações nas amplitudes do espectro procura compensar o efeito seletivo da atenuação das altas frequências, e seu mecanismo teórico será apresentado adiante. Outros trabalhos (Xavier Neto & Medeiros 2003, Plumb et al. 1998, Young & Deng 1995, e Sun & Young 1999) utilizaram-se com sucesso do balanceamento espectral para melhoria da resolução vertical de dados do GPR.

Os sistemas de GPR atuais geram um pulso de duração finita  $T$ , cuja transformada de Fourier corresponde a uma determinada largura de faixa de frequência  $\Delta f$ , que costuma ser caracterizada por uma frequência central  $f_c$  (Ver Figura 7.5).

Como os espectros gerados neste trabalho, não seguem o padrão teórico, descrito na Figura 7.5, utilizamos, na tentativa de correção dos efeitos de propagação que os modificaram, ferramentas muito comuns ao processamento sísmico: a SEC (Correção Esférica e Exponencial) e o Spectral Whitenining (Balanceamento Espectral), descritas a seguir.

Segundo Ylmaz, 1987, a SEC (*Spherical and Exponential Correction*), atua através de uma função de ganho linear para corrigir a diminuição de energia com o afastamento da fonte (espalhamento geométrico), além de uma função exponencial que visa compensar o efeito de perda de amplitude por absorção. A SEC, porém, atua da mesma forma em todo o espectro, não corrigindo a perda seletiva de frequências.

Segundo Claerbout, 1975, O *Spectral Whitenning* (ou *Balancing*), corrige os efeitos da atenuação de forma seletiva, por faixas de frequências, e promove uma deconvolução parcial nos dados, sem alterações relevantes em sua fase (Ver Figura 7.6).

A parte A da Figura 7.6 representa um traço GPR composto pelas frequências  $f_1$ ,  $f_2$  e  $f_3$  e cada uma dessas possui atenuação específica  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  e  $\alpha_3$  ficando visível que as componentes de mais altas frequências são mais fortemente (rapidamente) atenuadas.

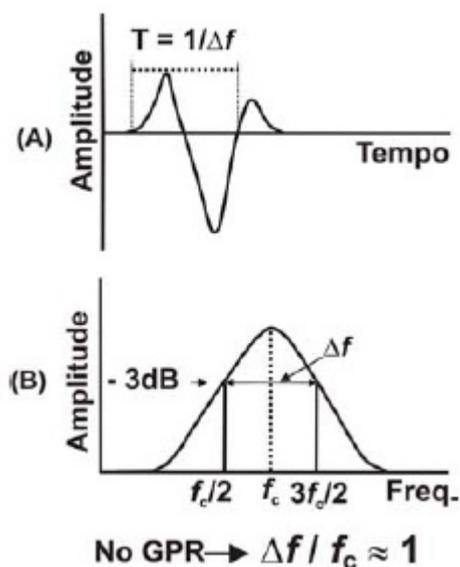


Figura 7.5: Representação do sinal GPR nos domínios: (A) Tempo; (B) Frequência. Fonte: Xavier Neto & Medeiros.

Uma série de filtros passa-banda são então aplicados ao sinal original, com a intenção de separar de melhor maneira possível as diferentes frequências que compõem o traço. Identificadas as frequências define-se função da curva de atenuação (ou envelope do traço) de cada uma de forma isolada. Os inversos destas funções envelope serão multiplicados por sua respectiva faixa de frequências, e em seguida somam-se os resultados gerados para cada faixa de frequências, balanceando-se então o traço inicial.

Explicitados os mecanismos de funcionamento de cada ferramenta, será então, descrito o fluxo de processamento utilizado nos dados, na busca pelo reajuste do espectro de frequências dos dados, e na tentativa de retirada do *reverb*:

Até onde haviam sido tratados, os dados encontravam-se no formato de extensão SU *Seismic Un\*x*. Com o intuito de identificação das difrações, voltou-se aos dados crus (para que se garantisse que não haveria corrupção de amplitudes pelo processamento anterior), apenas com DEWOW e *Time-Shift* (selecionado da primeira quebra até 195 ns) no formato .su.

Como o fluxo teoricamente proposto para correção das amplitudes no espectro (SEC, Balanceamento Espectral, Passa-Banda Trapezoidal e Ganho AGC, Ver Figura 99) é de simples aplicação no software SPW *Seismic Processing Workshop*, da *Parallel Geosciencie Corp.*, com a qual a UFF tem acordo de licença, fez-se necessária a conversão dos dados dos formatos .su para .spw.

Através do *software open source SeiSee*, que converte arquivos .su em arquivos .SEG Y, tornou-se possível abrir o dados de GPR no SPW, pelo comando IO convertendo novamente

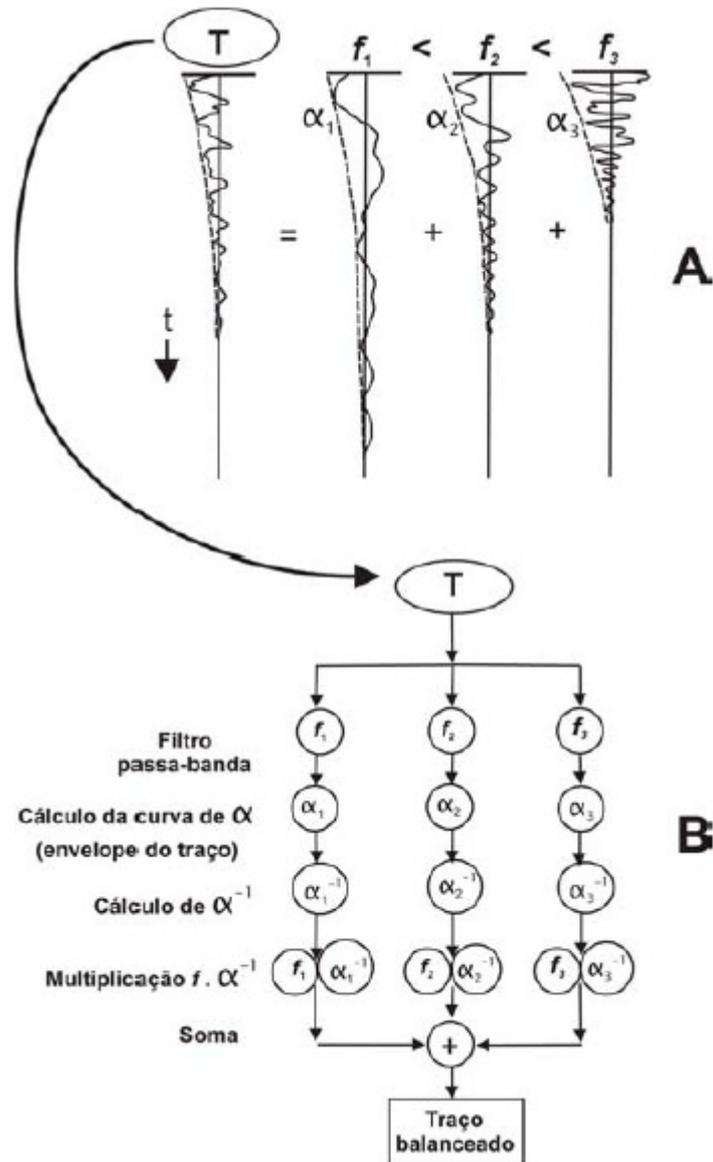


Figura 7.6: Representação esquemática do balanceamento espectral. Fonte: Xavier Neto & Medeiros.

agora, extensões .SEGY em .SPW.

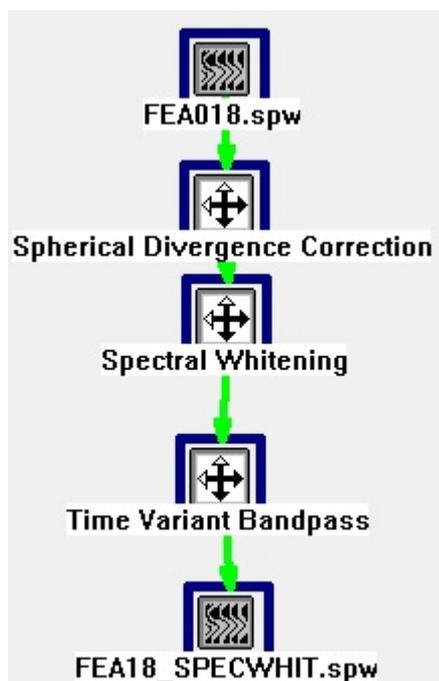


Figura 7.7: Fluxo de Correção de Amplitudes no Espectro, realizado através do SPW. Lembrar que o AGC é aplicado durante a visualização. Fonte: Reis, T. P.

Os parâmetros de cada etapa do fluxo foram os seguintes:

- Para o SEC, o parâmetro de exponencial adotado foi 2, o parâmetro multiplicador foi 1;
- Para o Balanceamento Espectral, a região de filtragens ficou entre 100 e 360 MHz, e a janela de ganho ficou definida em 20 ns;
- As extremidades do Filtro Passa-Banda Trapezoidal correspondem respectivamente às frequências 15, 90, 350 e 520 MHz;
- O Ganho AGC aplicado durante a visualização teve janela de 5 ns.

A seguir estão as seções as quais receberam tratamento nas amplitudes, antes e depois do processamento aplicado:

A partir de uma análise comparativa entre as seções acima, torna-se evidente a melhoria na qualidade das imagens. Porém as melhorias não se dão somente nas seções. A seguir, estão dispostos os espectros das seções apresentadas anteriormente, visivelmente mais bem balanceados em relação à posição de suas frequências centrais (apesar das frequências centrais não estarem posicionada em 200 MHz, comparativamente houve significativa melhora de posição Ver Figuras: 7.16, 7.17, 7.18 e 7.19).

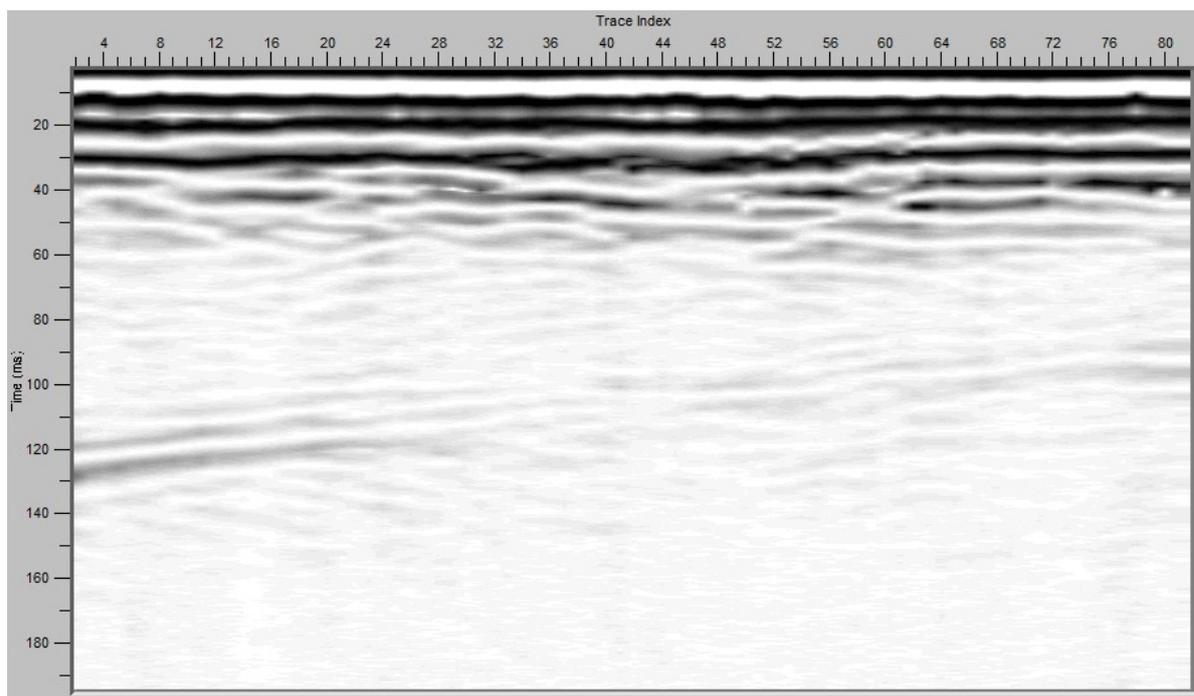


Figura 7.8: *Background* do Sentido N/S, apenas com ganho AGC. Fonte: Reis, T. P.

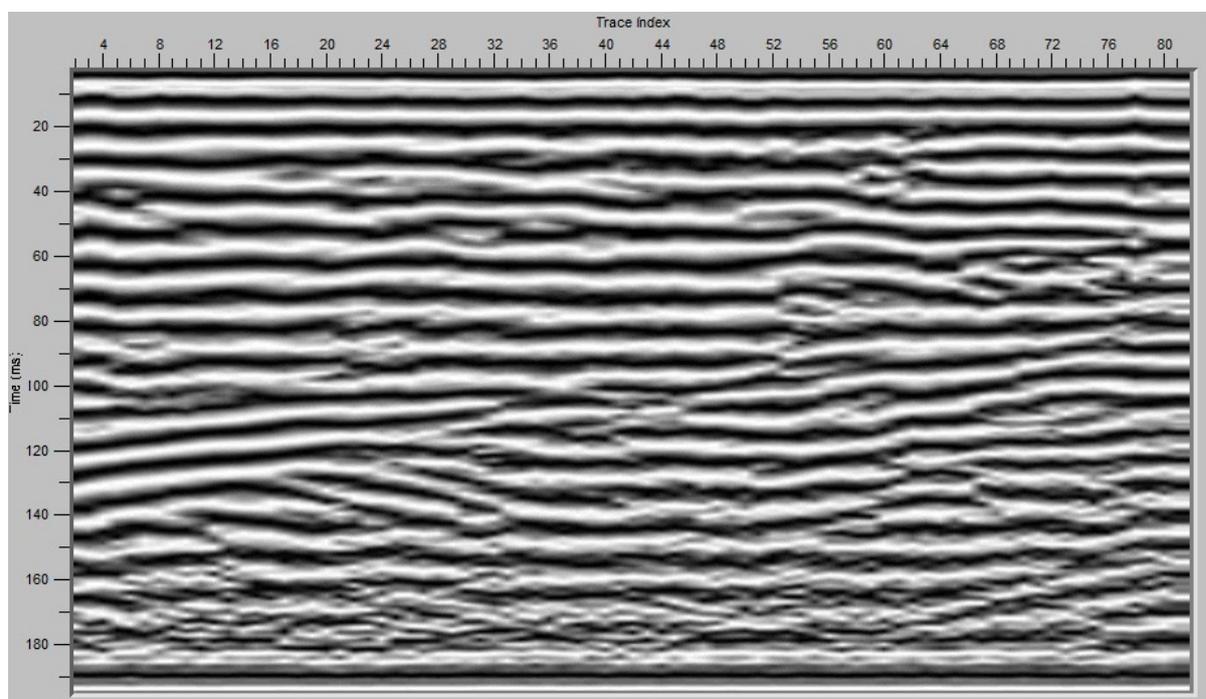


Figura 7.9: *Background* do Sentido N/S, com tratamento de amplitude mais o ganho AGC. Fonte: Reis, T. P.

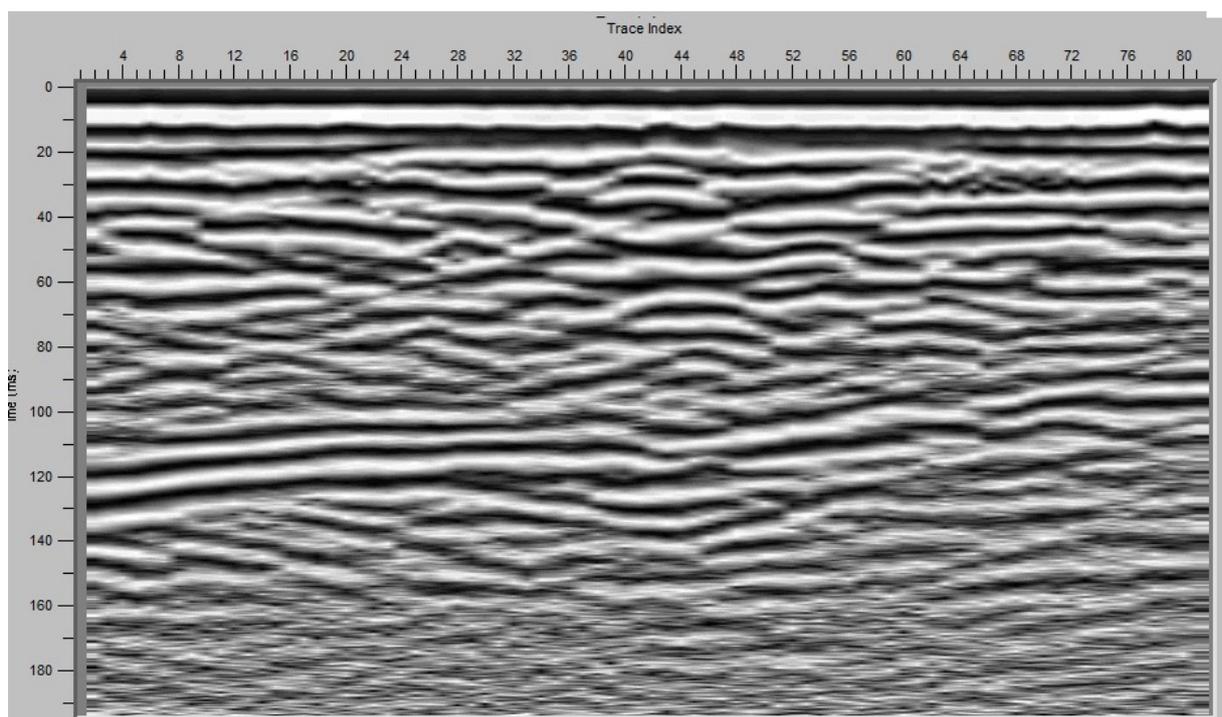


Figura 7.10: Seção Pós-Injeção #01 do Sentido N/S, apenas com ganho AGC. Fonte: Reis, T. P.

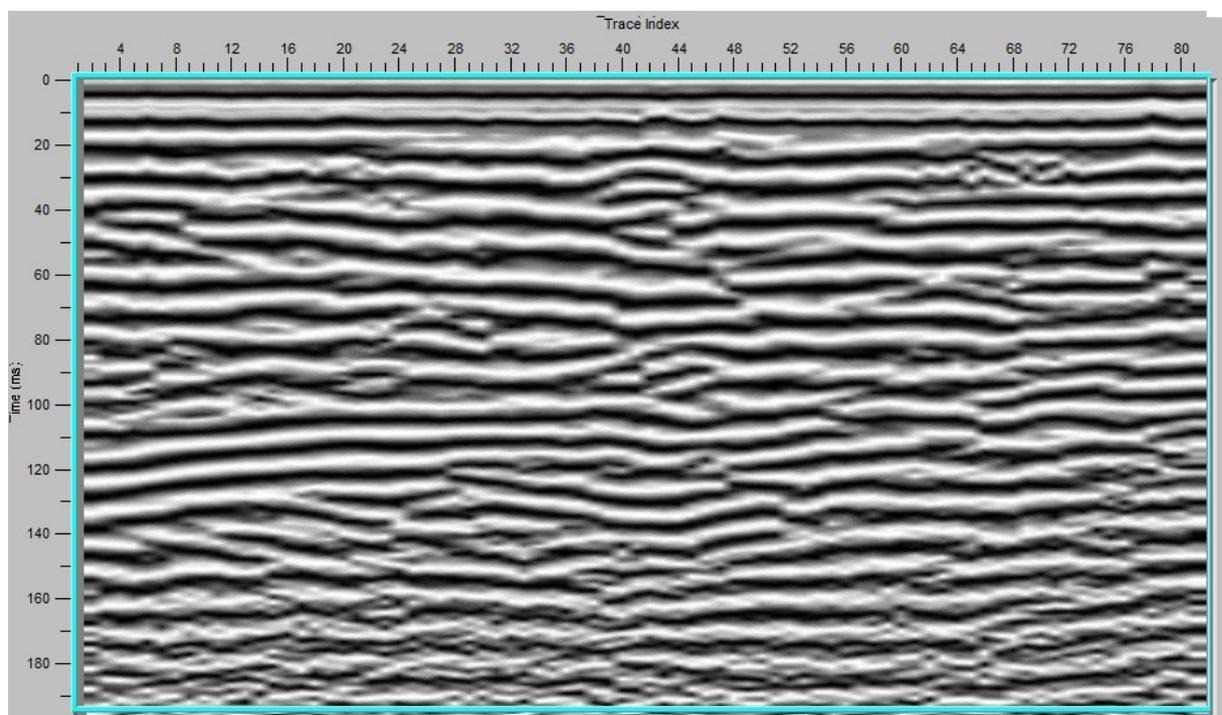


Figura 7.11: Seção Pós-Injeção #01 do Sentido N/S, com tratamento de amplitude mais o ganho AGC. Fonte: Reis, T. P.

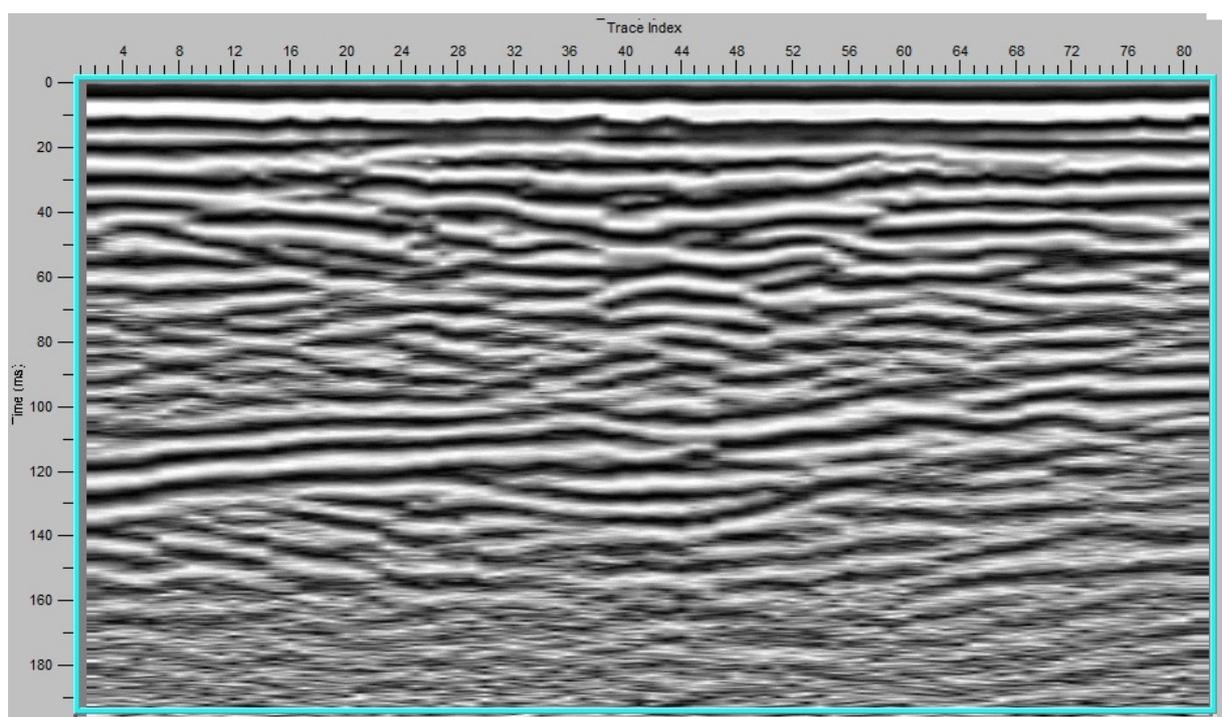


Figura 7.12: Seção Pós-Injeção #10 do Sentido N/S, apenas com ganho AGC. Fonte: Reis, T. P.

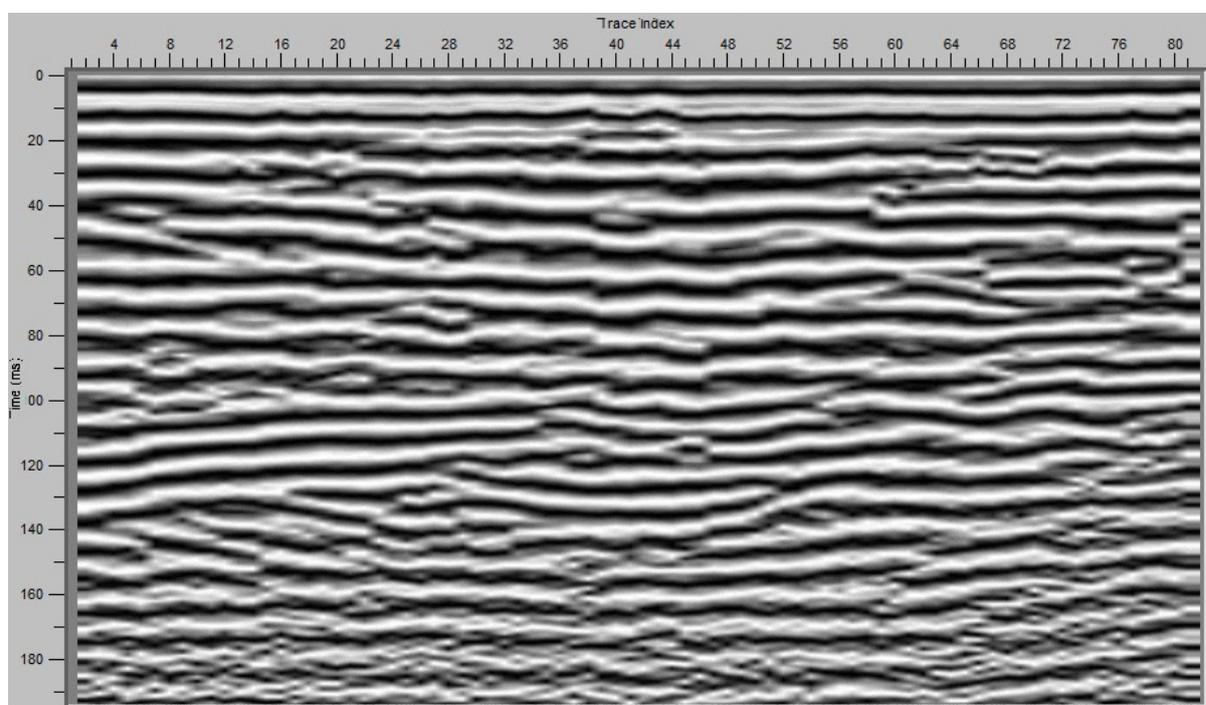


Figura 7.13: Seção Pós-Injeção #10 do Sentido N/S, com tratamento de amplitude mais o ganho AGC. Fonte: Reis, T. P.

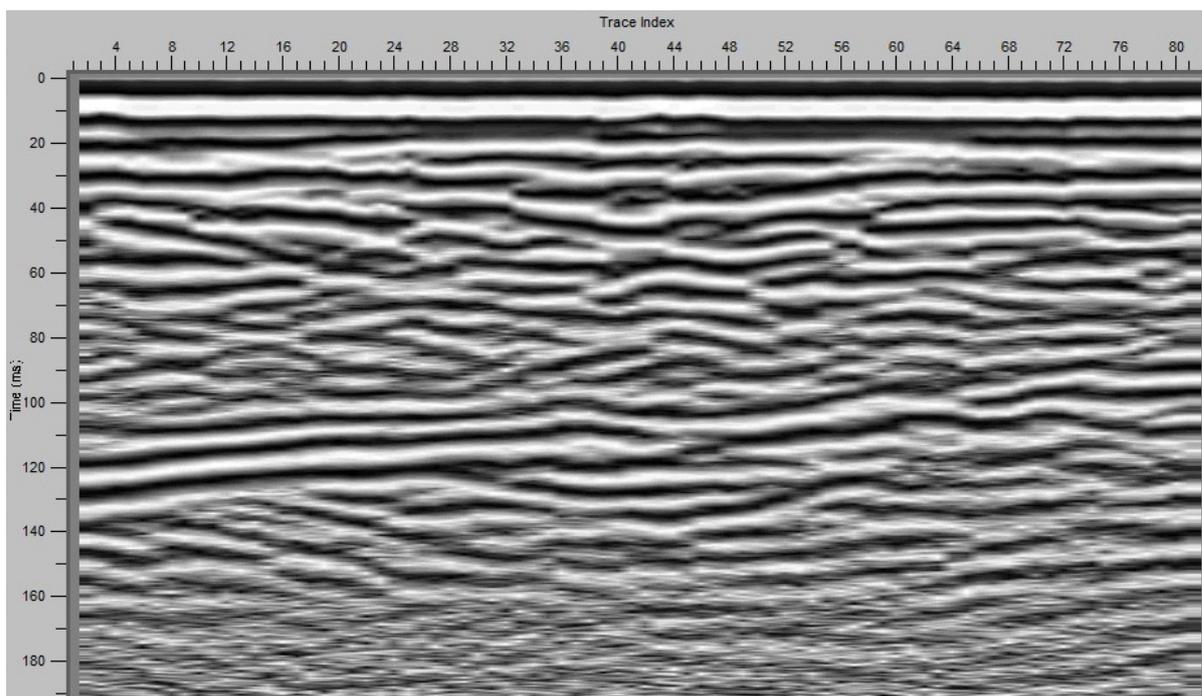


Figura 7.14: Seção Pós-Injeção #18 do Sentido N/S, apenas com ganho AGC. Fonte: Reis, T. P.

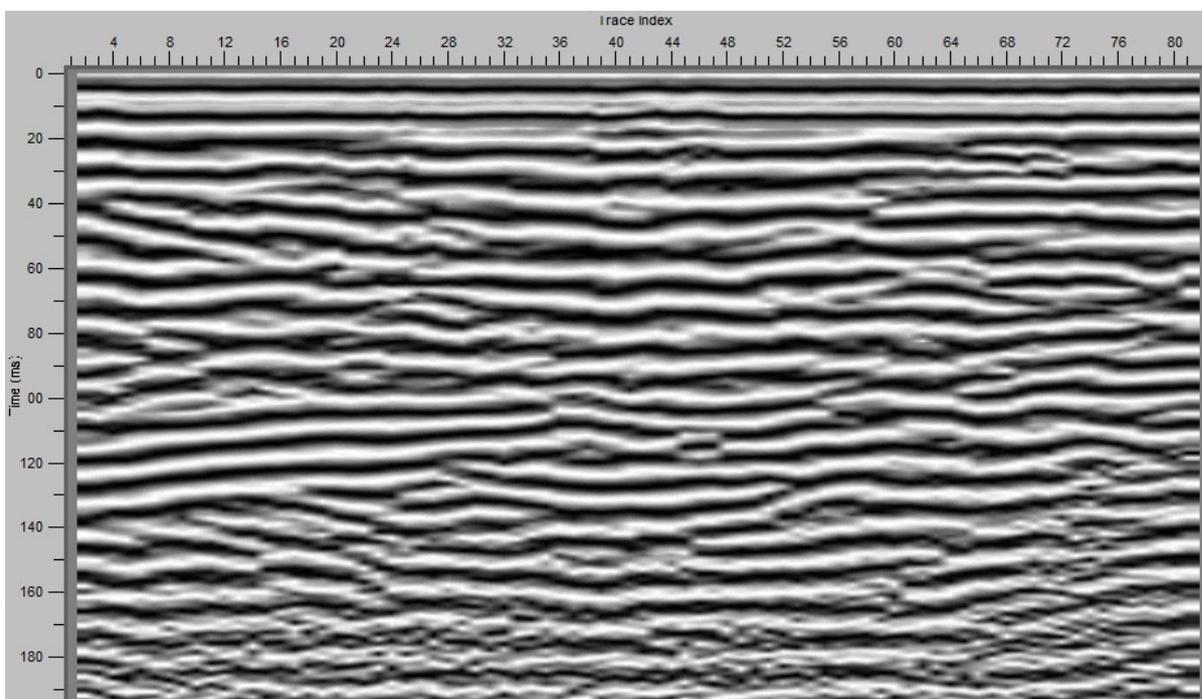


Figura 7.15: Seção Pós-Injeção #18 do Sentido N/S, com tratamento de amplitude mais o ganho AGC. Fonte: Reis, T. P.

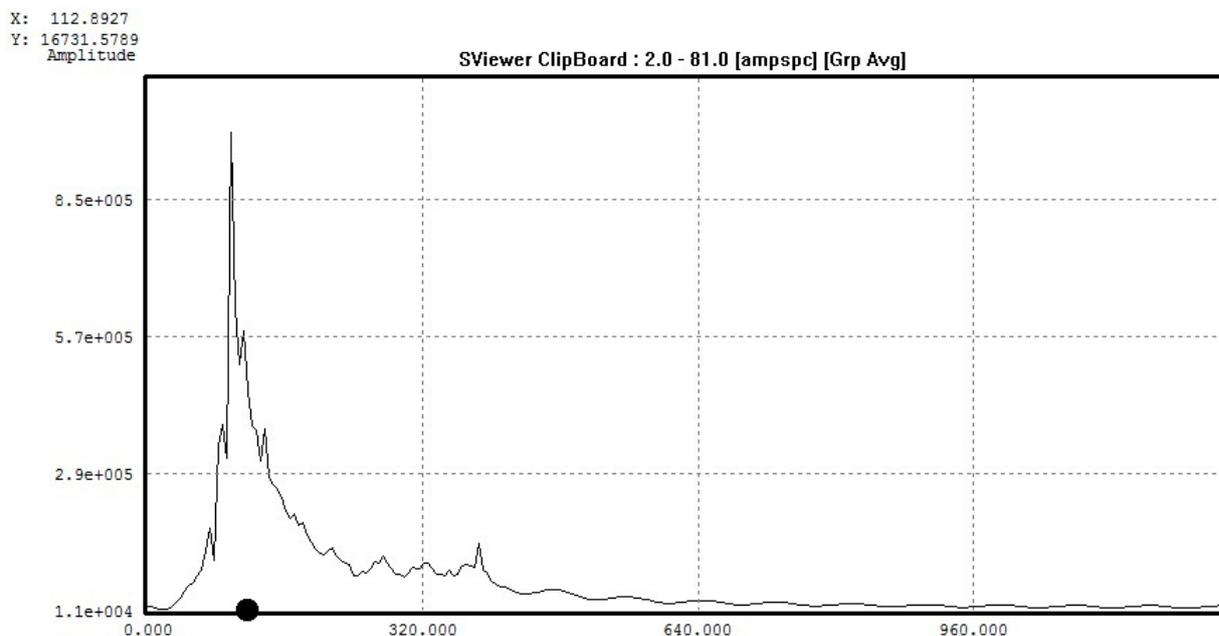


Figura 7.16: Espectro de Amplitude da Seção *Background* Sentido N/S balanceada em seu espectro. Reparar o pico de amplitude em  $X = 112$  MHz, e distribuição mais adequada em relação ao lado esquerdo do pico. Fonte: Reis, T. P.

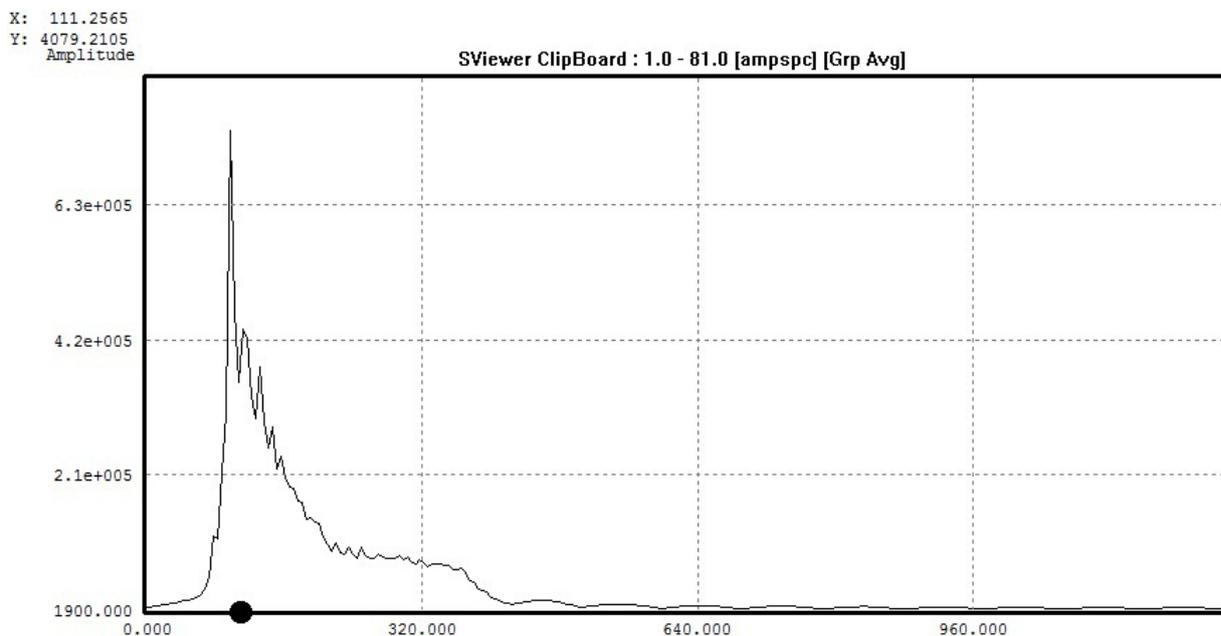


Figura 7.17: Espectro de Amplitude da Seção #01 Pós-Injeção Sentido N/S balanceada em seu espectro. Reparar o pico de amplitude em  $X = 111$  MHz, e distribuição mais adequada em relação ao lado esquerdo do pico. Fonte: Reis, T. P.

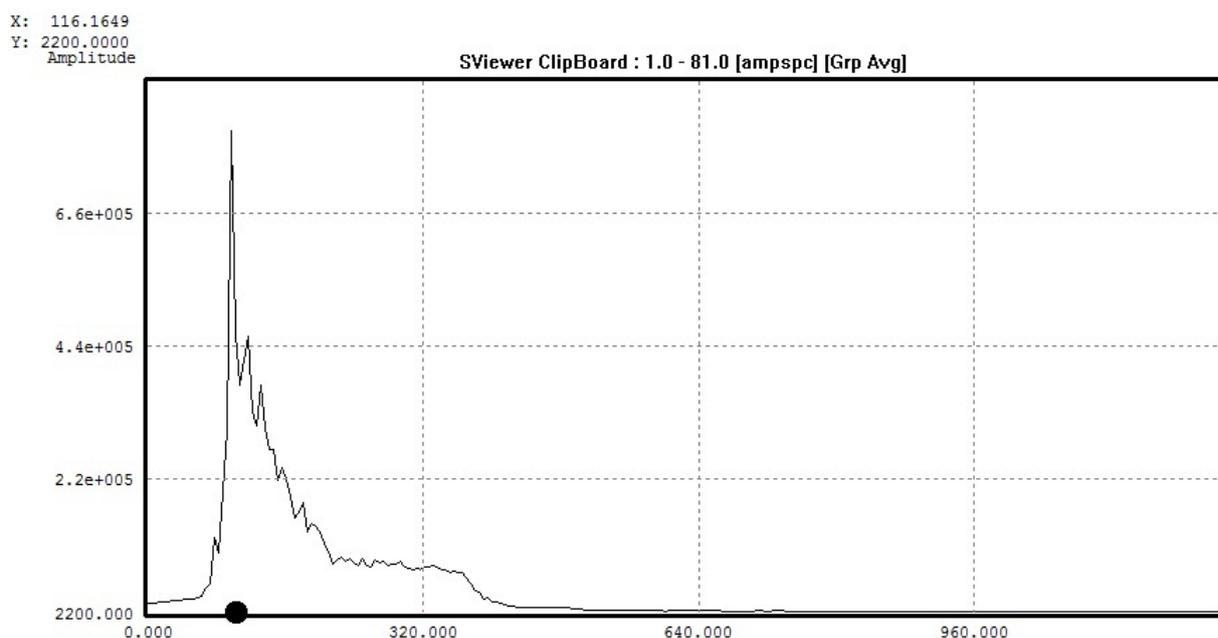


Figura 7.18: Espectro de Amplitude da Seção #10 Pós-Injeção Sentido N/S crua balanceada em seu espectro. Reparar o pico de amplitude em  $X = 116$  MHz, e distribuição mais adequada em relação ao lado esquerdo do pico. Fonte: Reis, T. P.

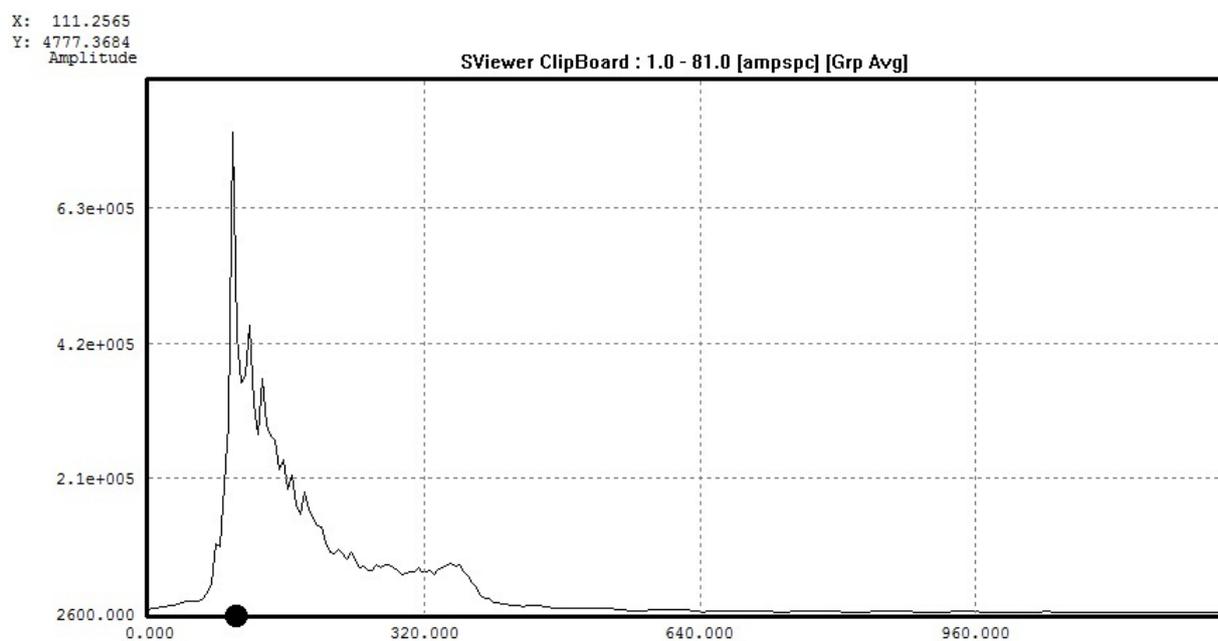


Figura 7.19: Espectro de Amplitude da Seção #18 Pós-Injeção Sentido N/S balanceada em seu espectro. Reparar o pico de amplitude em  $X = 111$  MHz, e distribuição mais adequada em relação ao lado esquerdo do pico. Fonte: Reis, T. P.

Infelizmente, mesmo após a melhoria da resolução vertical das seções, de um reposicionamento bem mais adequado (apesar de não-ideal) da frequência central no espectro, as subtrações entre as seções continuaram, pouco ou nada revelando, ainda com a presença do *reverb*, porém atenuado em relação ao processamento anterior (Ver Figura 7.20).

A frustração nas análises *time-lapse* por diferenças agregou a este projeto de pesquisa, a necessidade de uma nova vertente de análises *time-lapse*, a qual será discutida nas Considerações Finais do trabalho.

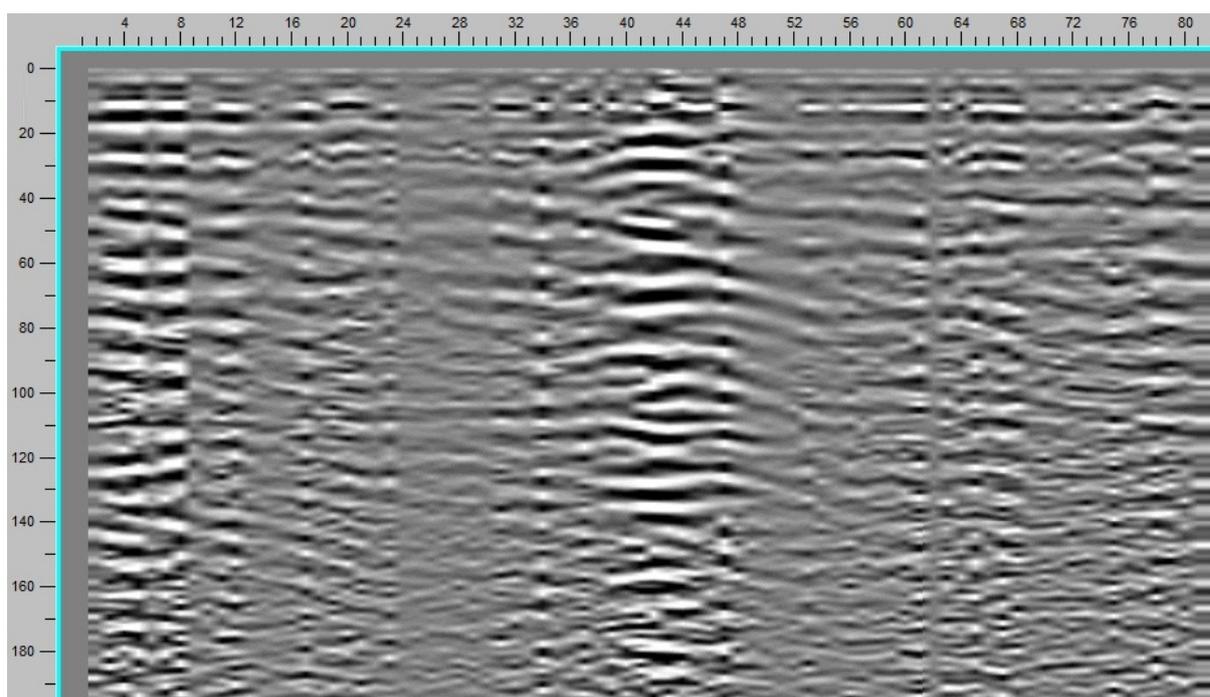


Figura 7.20: Diferença entre duas seções *foreground* obtida após tratamento com *Spectral-Whitening*. Pouca ou nenhuma melhoria aparente Fonte: Reis, T. P.

## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A melhoria significativa das seções com o tratamento espectral, descrito no capítulo anterior, aliada a tentativa frustrada de que, mesmo com tal aprimoramento, a análise em lapso-de-tempo por diferenças manteve-se ineficaz, resultou em uma nova busca de análises. Baseada no trabalho de Enders, Clement & Rudolph, 2000, desenvolveu-se uma análise em lapso-de-tempo qualitativa, que, em relação ao *Background*, é capaz de monitorar o escoamento do fluxo injetado bem como, as variações temporais da saturação, e ao mesmo tempo pudesse se utilizar da melhoria da qualidade das seções, em função do processamento descrito no tópico passado.

Os passos para esta análise qualitativa se dão em função de que o *background* não sofre os atrasos nos tempos de chegada da onda EM, causados pela lâmina de água injetada (Huisman et al., 2003, propuseram que a lâmina de água infiltrada, pode causar confinamento do sinal GPR, a sendo origem de difrações e reverberações).

Para todas as seções que participaram da correção espectral, marcaram-se o refletor mais próximo da zona de transição (interface zona vadosa / lençol freático) e novamente o refletor situado dois horizontes abaixo do primeiro marcado, através de *picks* (um por traço) no SPW, com o cuidado de que o mesmo refletor fosse marcado em todas os radargramas (Ver Figuras 8.1, 8.2).

As seções picadas no SPW geram um arquivo de texto, com o tempo do *pick* e o traço referente ao *pick* (o estudo foi continuado apenas nas seções amostras: *background* N/S, pós-injeção#01 N/S, pós-injeção#10 N/S e pós-injeção#18 N/S).

A partir do arquivo de texto com os tempos dos *picks* e seus respectivos traços, foi possível reparar o visual atraso em tempo das seções injetadas em relação às seções pré-teste, nos pontos de mesma posição. Além disso, foi possível também gerar um gráfico de comparação do tempo de atraso de chegada do sinal, em relação à chegada do sinal do *background* para cada um destes dois horizontes picados nas seções (Ver Figuras 8.3 e 8.4).

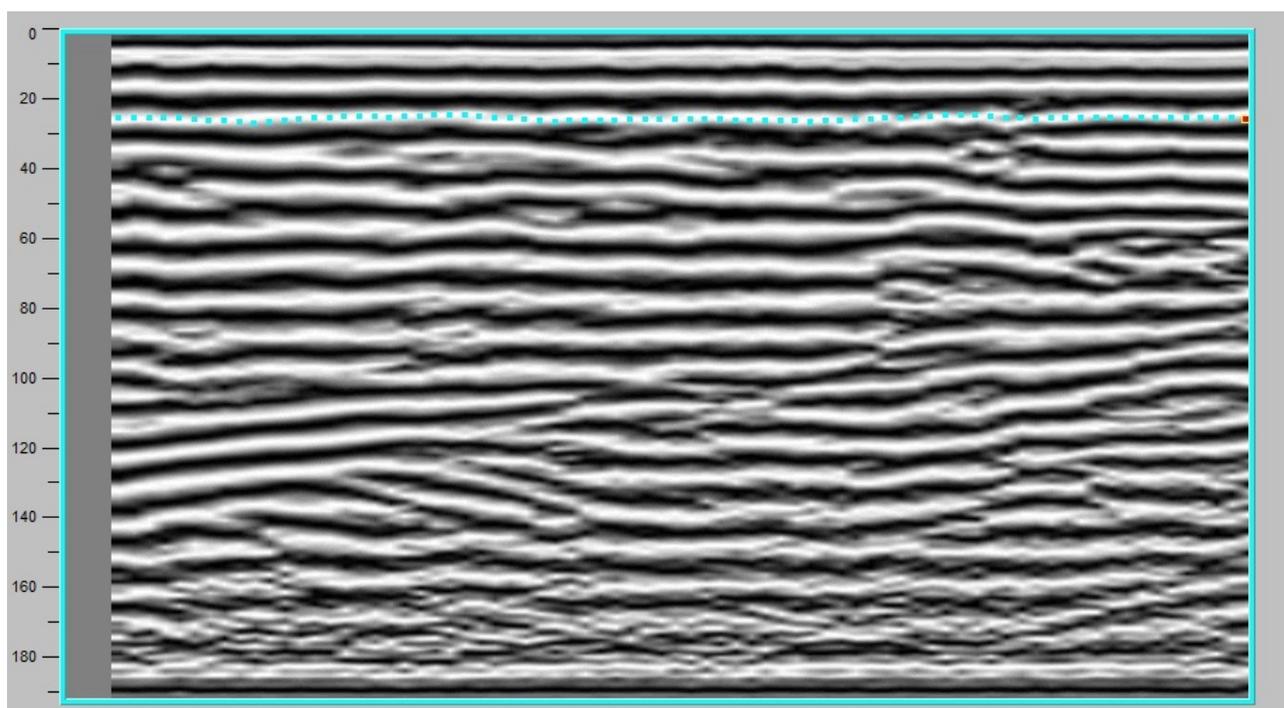


Figura 8.1: Seção *background* N/S picada no horizonte interface vadosa/freático. O mesmo processo de *picks* neste mesmo horizonte se repetiu para as seções pós-injeção #01, #10 e #18. Fonte: Reis, T. P.

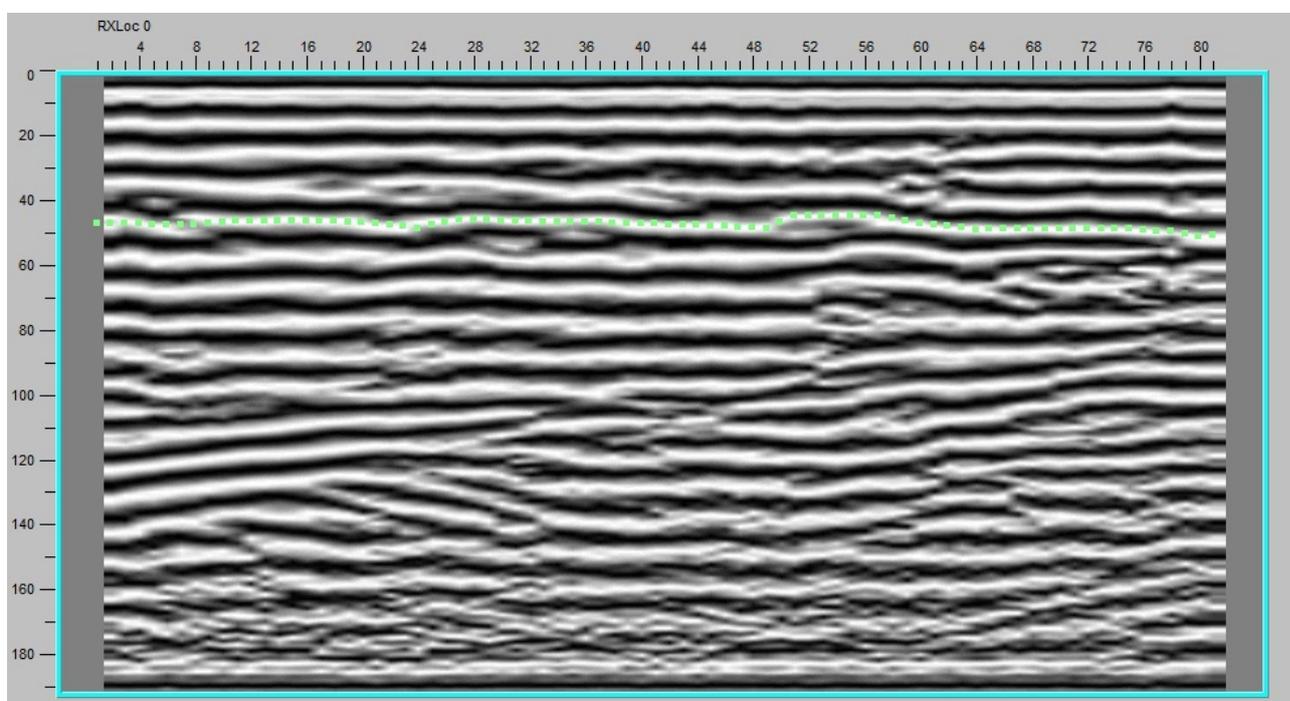


Figura 8.2: Seção *background* N/S picada a dois horizontes abaixo da interface vadosa/freático. O mesmo processo de *picks* neste mesmo horizonte se repetiu para as seções pós-injeção #01, #10 e #18. Fonte: Reis, T. P.

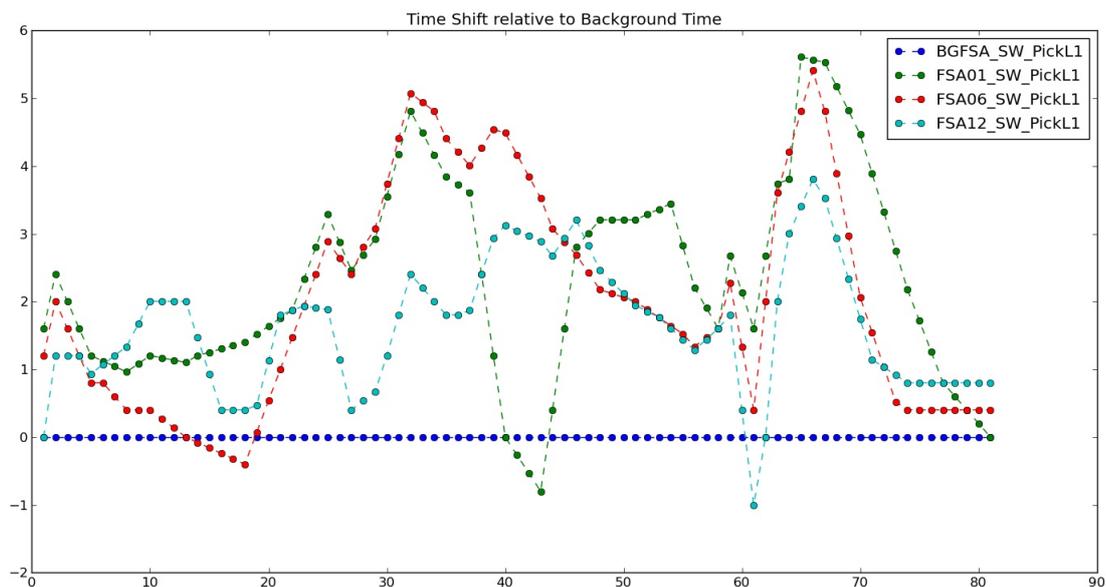


Figura 8.3: Gráfico da variação do tempo de atraso na recepção do sinal, no horizonte picado 1 - interface vadosa/lençol - entre as seções pós-injeção, comparadas com a seção pré-injeção (ou *background*). Fonte: Reis, T. P.

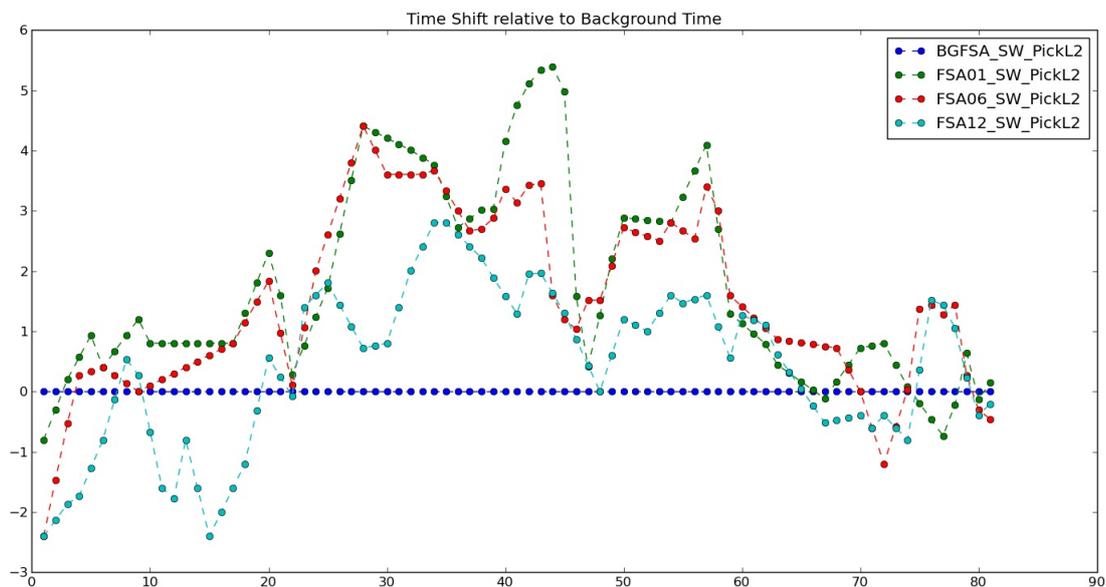


Figura 8.4: Gráfico da variação do tempo de atraso de recepção do sinal, no horizonte picado 2 - dois horizontes abaixo da interface vadosa/lençol - entre as seções pós-injeção, comparadas com a seção pré-injeção (ou *background*). Fonte: Reis, T. P.

A análise destes já gráficos poderia permitir conclusões qualitativas relevantes como as que Endres et al., 2000, tiraram a partir de gráficos gerados em estudo semelhante (porém a injeção em seus estudos se deu de maneira contínua e durante a aquisição GPR). Suas conclusões foram (de absoluta pertinência também para este trabalho):

- Os *picks* em azul claro, os da seção mais distante (em tempo) do fim da injeção de água, possuem aumento de atraso menos acentuado (menor curva), ou seja, revelam a tendência óbvia de escoamento da água injetada em direção ao lençol. No trabalho de Enders, ao contrário deste caso, as curvas aumentavam em razão da injeção foi ininterrupta.
- Os tempos mais baixos que o tempo do *background*, em azul escuro, representariam uma região drenada, abaixo de uma região saturada, originado um *pull-up* de velocidades nestas interfaces.

Entretanto, neste trabalho foi desenvolvida uma análise mais apropriada para os atrasos nos tempos de chegada do sinal causados pela injeção.

A partir da sobreposição de cada curva de atraso (sob a forma de uma barra de escala de cores referenciada, em leve transparência) sobre suas respectivas camadas de picagem original, revelou-se por seção e por camada picada, as variações no atraso nos tempos de chegada do sinal (presença de água), sempre em relação ao *background* (inalterado em relação ao imageamento, Ver Figuras 8.5, 8.6, 8.7 e 8.8) caracterizando uma análise *time-lapse* qualitativa capaz de monitorar variações de saturação.

A seção escolhida para sobreposição das barras de escala de atraso de tempo foi justamente a seção *background*, por esta possuir geologia real, ou não distorcida pelas alterações de propagação, facilitando interpretações futuras.

Ao analisarem-se as seções *background* com as barras de transparências referentes ao tempo de atraso na chegada do sinal, com relação à chegada do próprio *background*, para cada seção picada, pôde-se extrair as considerações finais mais relevantes com relação às variações temporais e subsuperficiais qualitativas da saturação:

- A intensidade das cores decresce da seção pós-injeção 01 até a seção 18, o que é esperado, pois a tendência é de fato, o escoamento da água para o lençol freático (antes dos levantamentos *foreground* a injeção foi interrompida e a diferença temporal entre as seções pós-injeção 01 e 18, é de aproximadamente 6 horas).

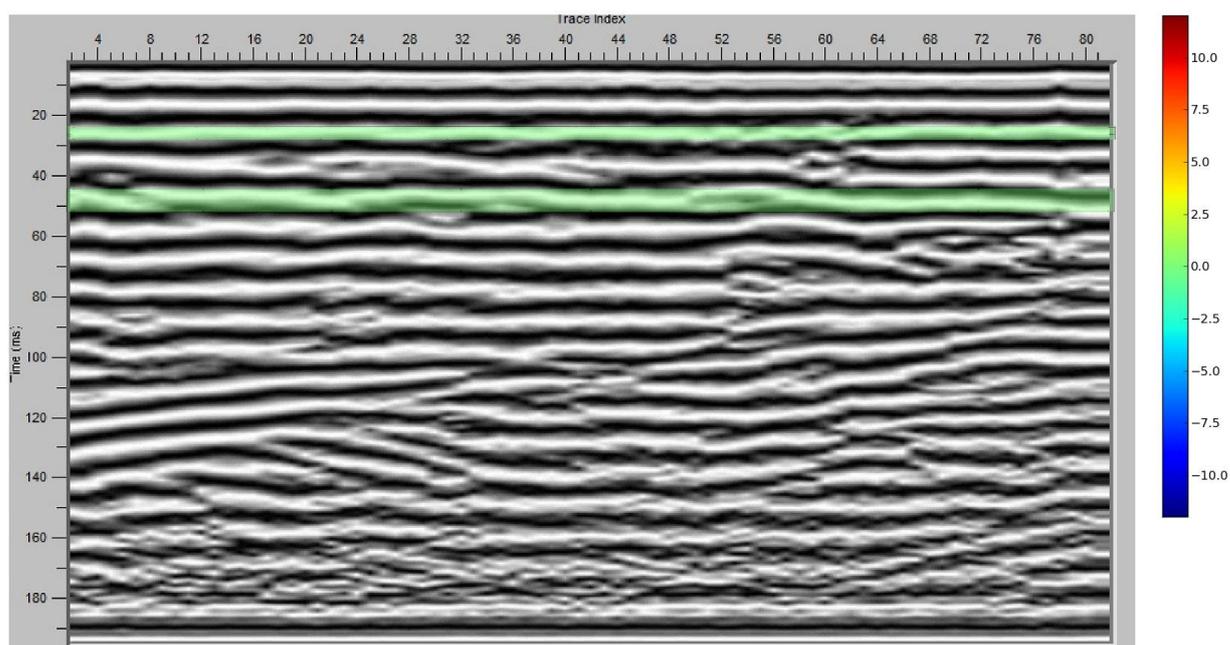


Figura 8.5: Seção *background* com barra de cores nos horizontes picados 1 e 2, representando os atrasos nos tempos de chegada entre as seções *Background x Background*, ou seja *delay zero*.  
Fonte: Reis, T. P.

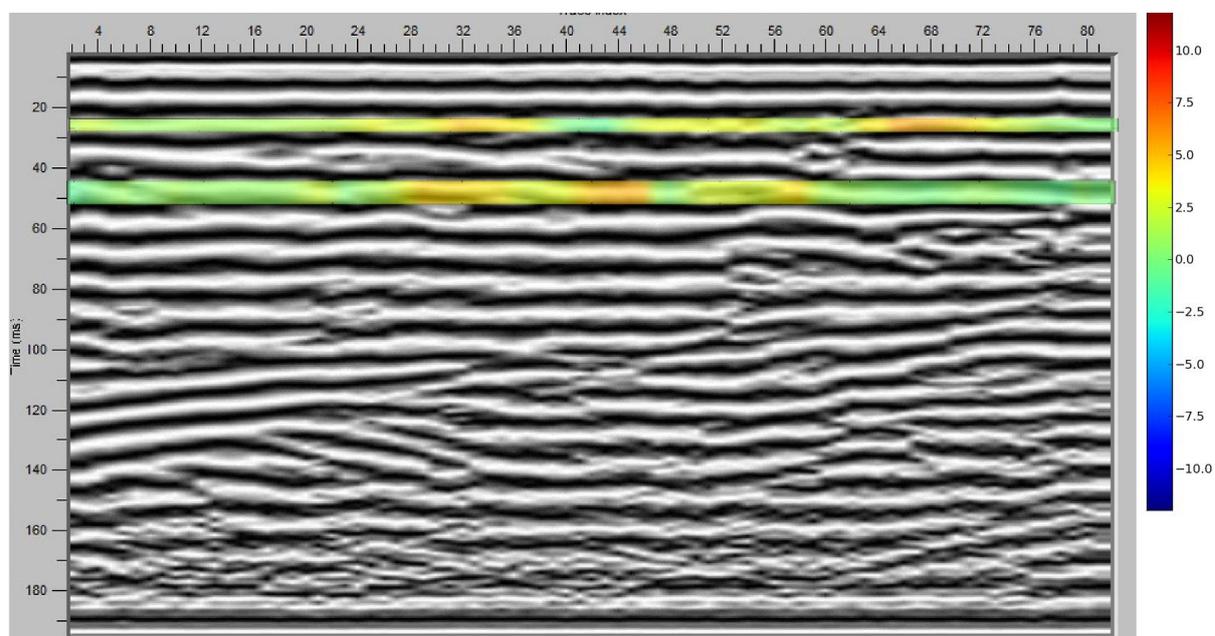


Figura 8.6: Seção *background* com barra de cores nos horizontes picados 1 e 2, representando os atrasos nos tempos de chegada entre as seções *Background x Pós-Injeção#01*. Fonte: Reis, T. P.

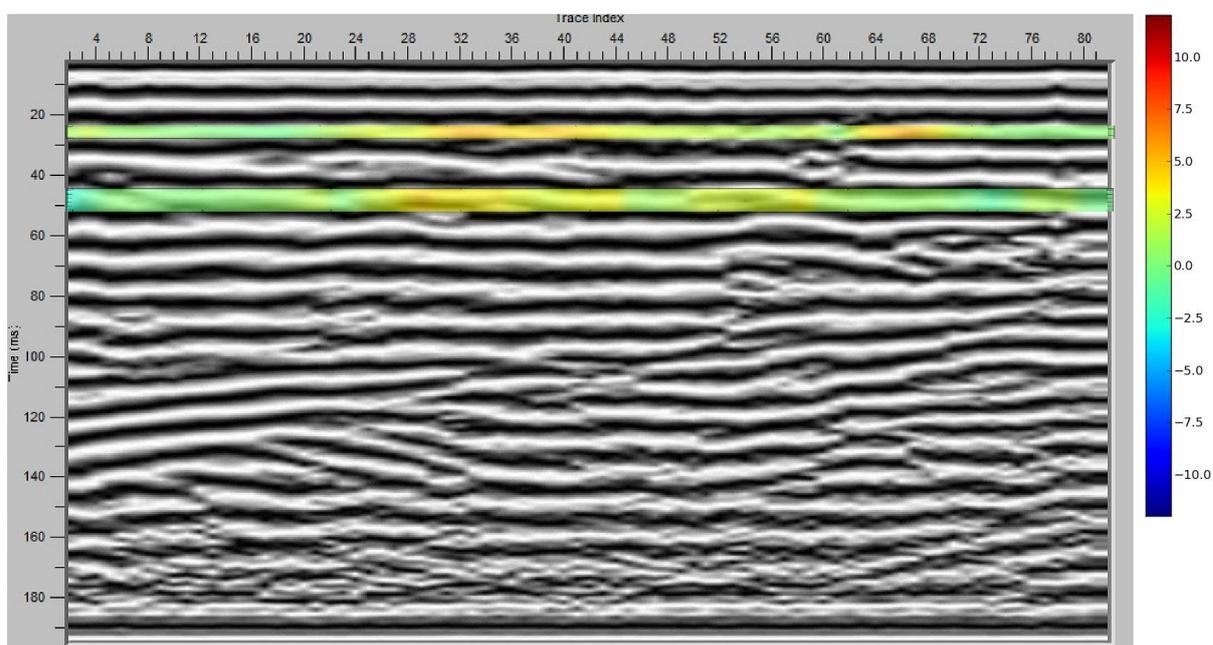


Figura 8.7: Seção *background* com barra de cores nos horizontes picados 1 e 2, representando os atrasos nos tempos de chegada entre as seções *Background* x Pós-Injeção#10. Fonte: Reis, T. P.

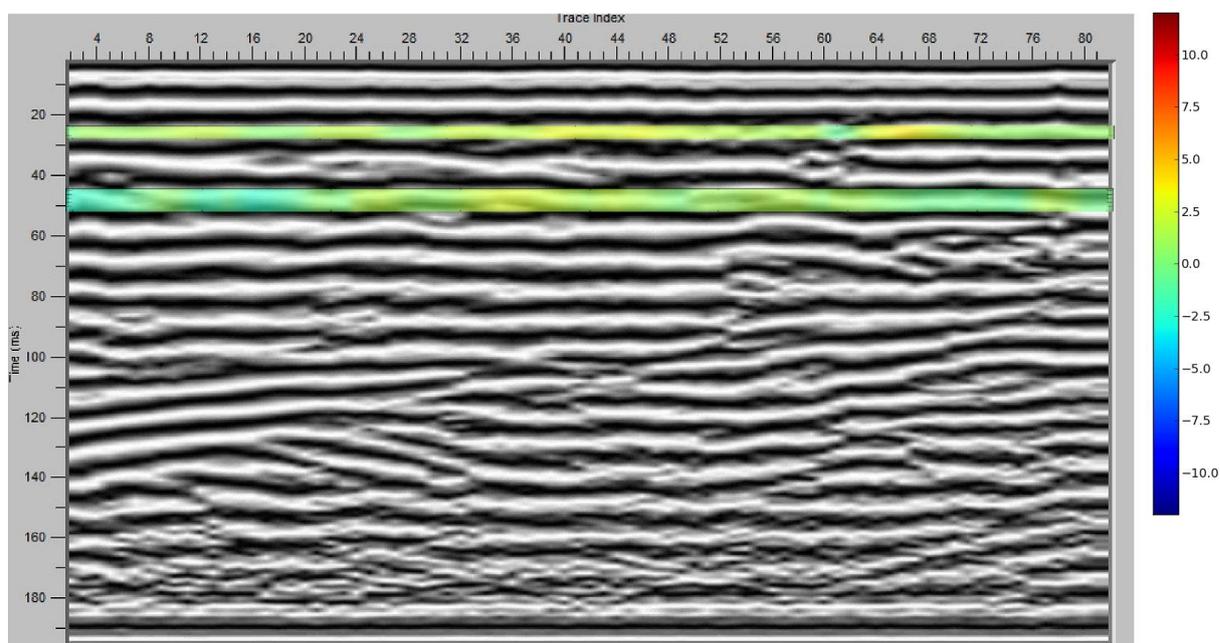


Figura 8.8: Seção *background* com barra de cores nos horizontes picados 1 e 2, representando os atrasos nos tempos de chegada entre as seções *Background* x Pós-Injeção#18. Fonte: Reis, T. P.

- Por se tratar de uma escala micro-geologica (as seções tem aproximadamente 6 metros de profundidade) devem ser tratadas, as fraturas interpretadas, como micro-falhas. Torna-se evidente, entretanto, que essas micro-falhas têm atuação fundamental no escoamento da água infiltrada, pela presença contínua de tonalidades mais fortes sobre as mesmas.
- Apesar dos tempos de atraso na curva da seção pós-injeção 18 (curva de *delay* em relação aos tempos no *background*) serem menos acentuados (cores mais suaves), é possível observar, que quase não existem mais cores nulas ou negativas em seu horizonte destacado (principalmente a barra superior). Isso pode significar que, apesar de ter escoado bastante, reduzindo a intensidade das cores, há espalhamento da água ao longo da camada em questão.

## 9 ANEXO

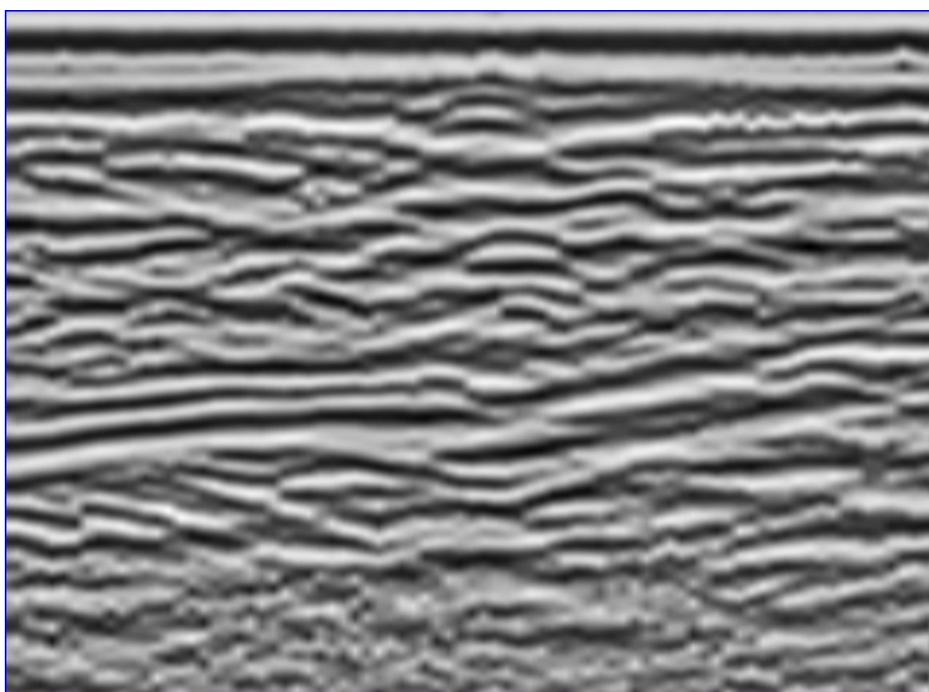


Figura 9.1: Seção 1 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido N/S, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar na parte superior da seção e em comparação com o *Background* N/S, a presença do *Pull-down* causado pela região de baixa velocidade em função da água injetada. Fonte: Reis, T. P

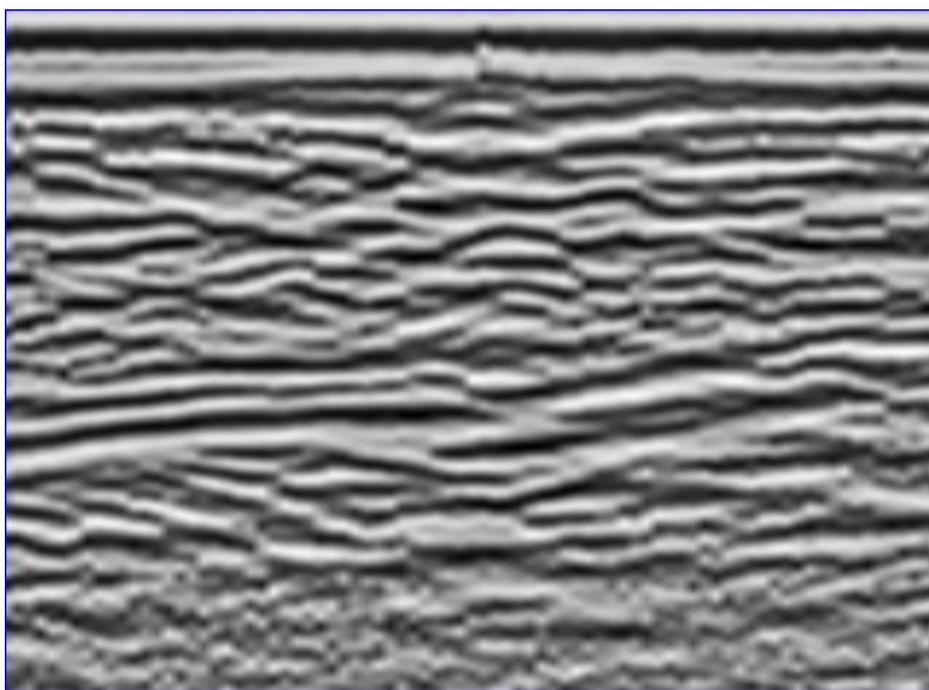


Figura 9.2: Seção 2 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido N/S, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do *Pull-down*. Fonte: Reis, T. P.

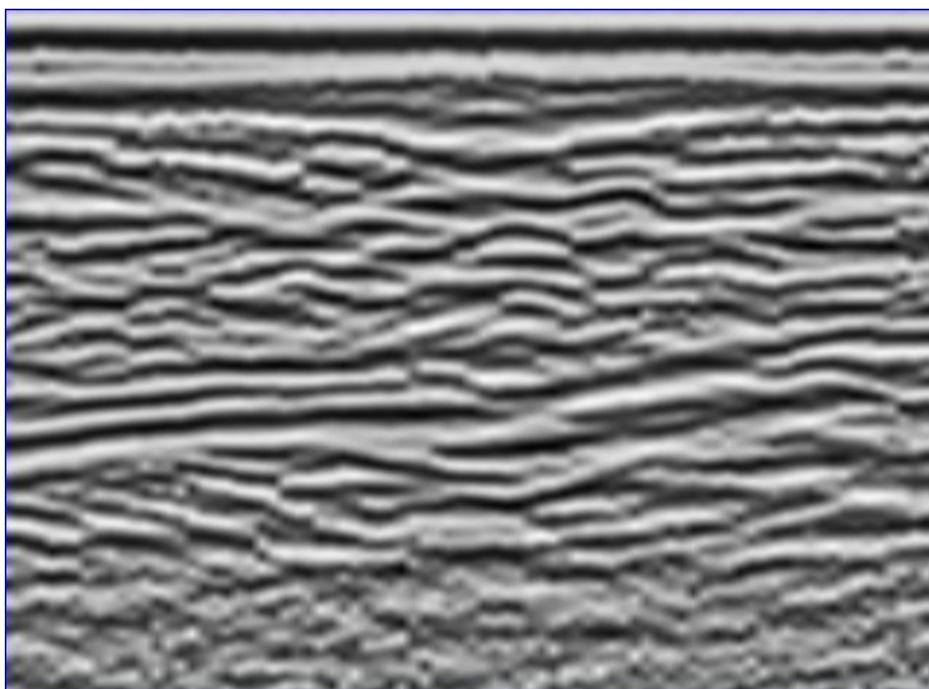


Figura 9.3: Seção 3 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido N/S, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do *Pull-down*. Fonte: Reis, T. P.

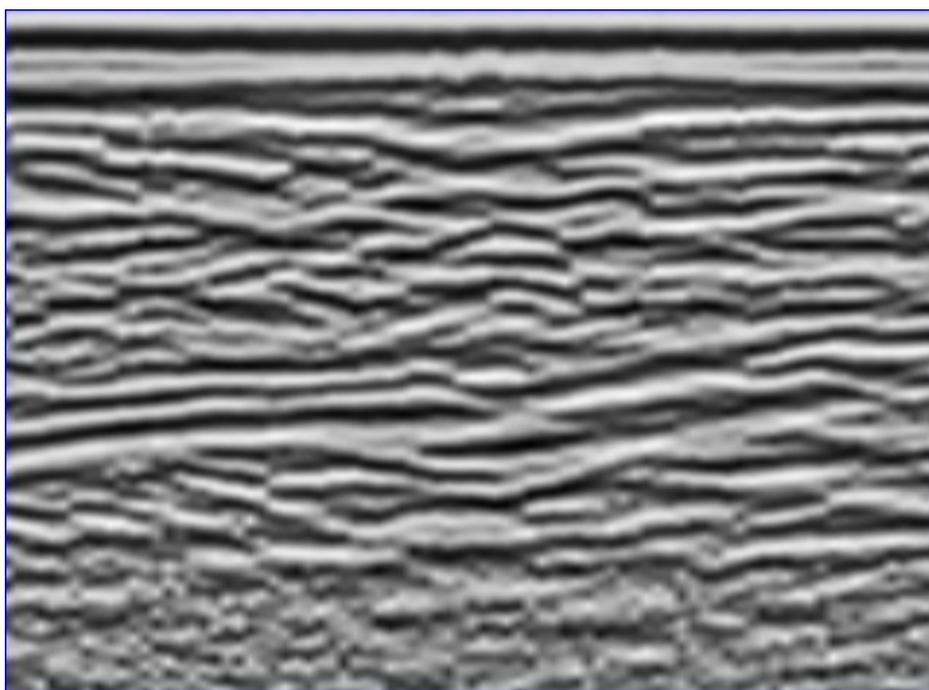


Figura 9.4: Seção 4 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido N/S, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do *Pull-down*. Fonte: Reis, T. P.

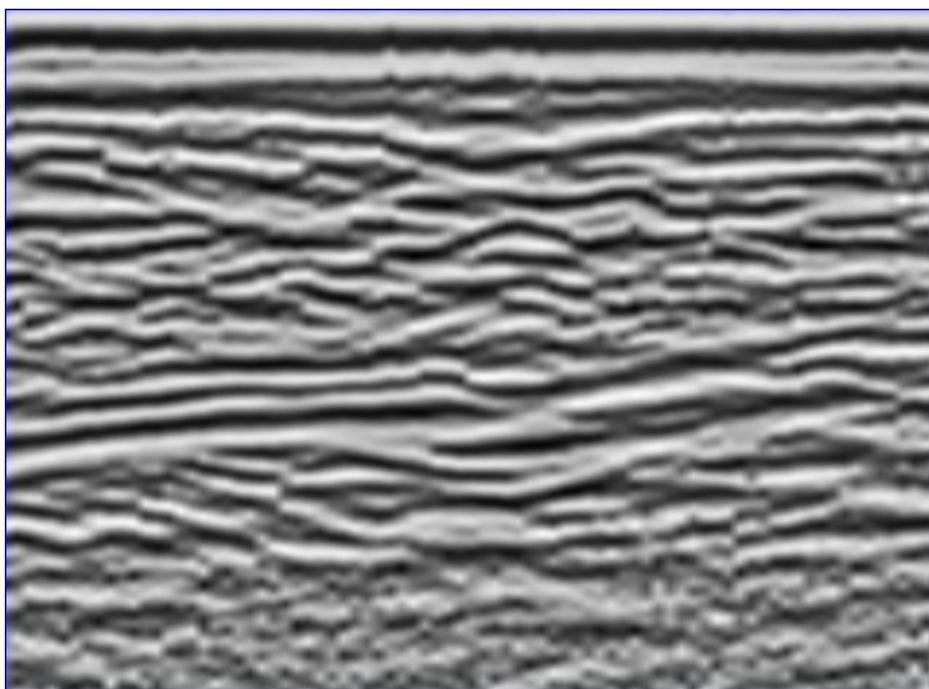


Figura 9.5: Seção 5 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido N/S, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do *Pull-down*. Fonte: Reis, T. P.

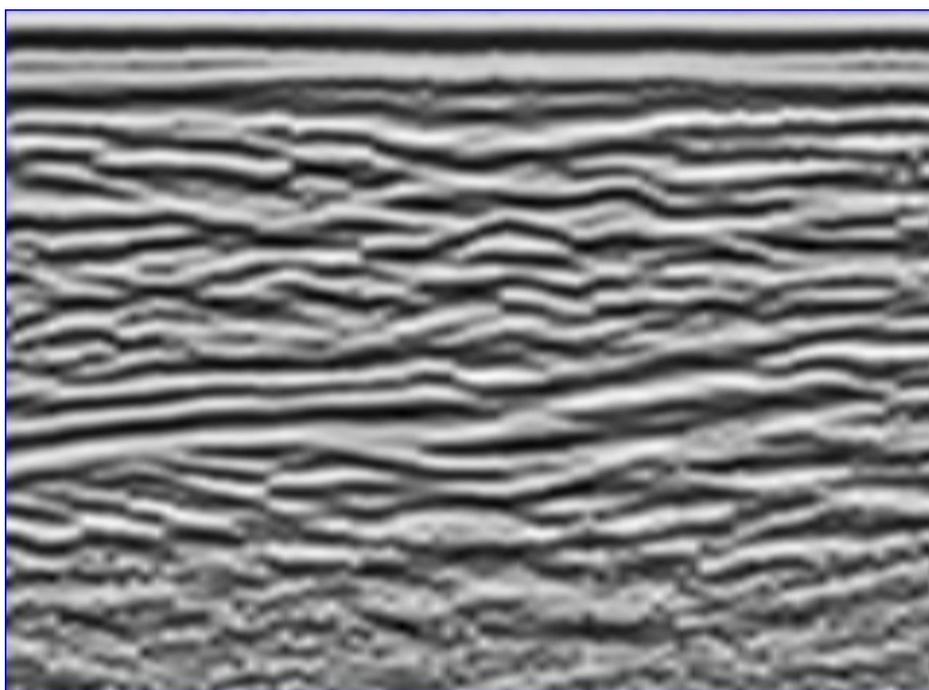


Figura 9.6: Seção 6 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido N/S, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do *Pull-down*. Fonte: Reis, T. P.

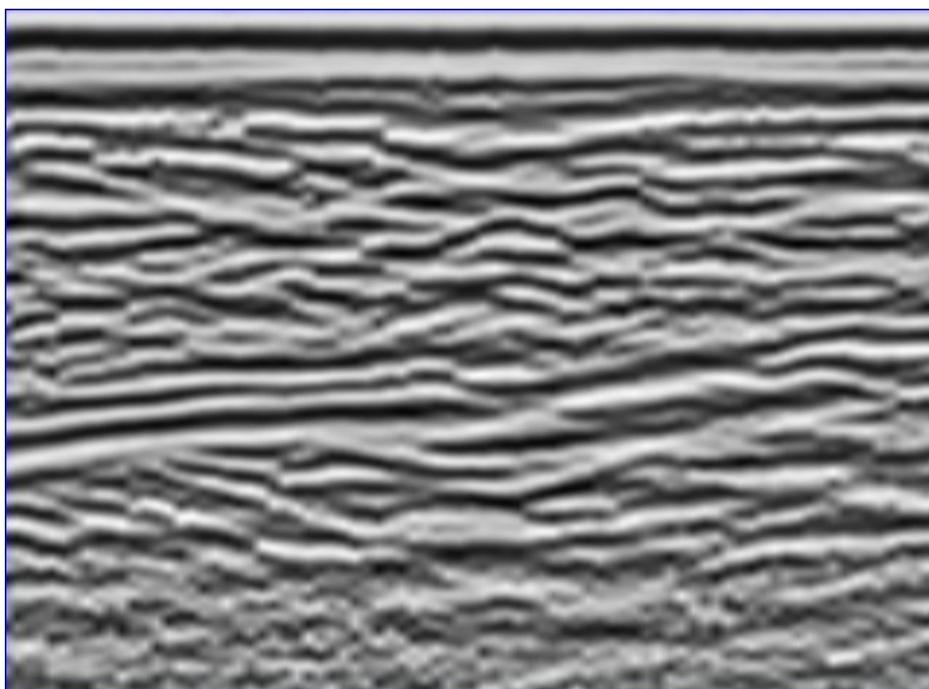


Figura 9.7: Seção 7 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido N/S, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do *Pull-down*. Fonte: Reis, T. P.

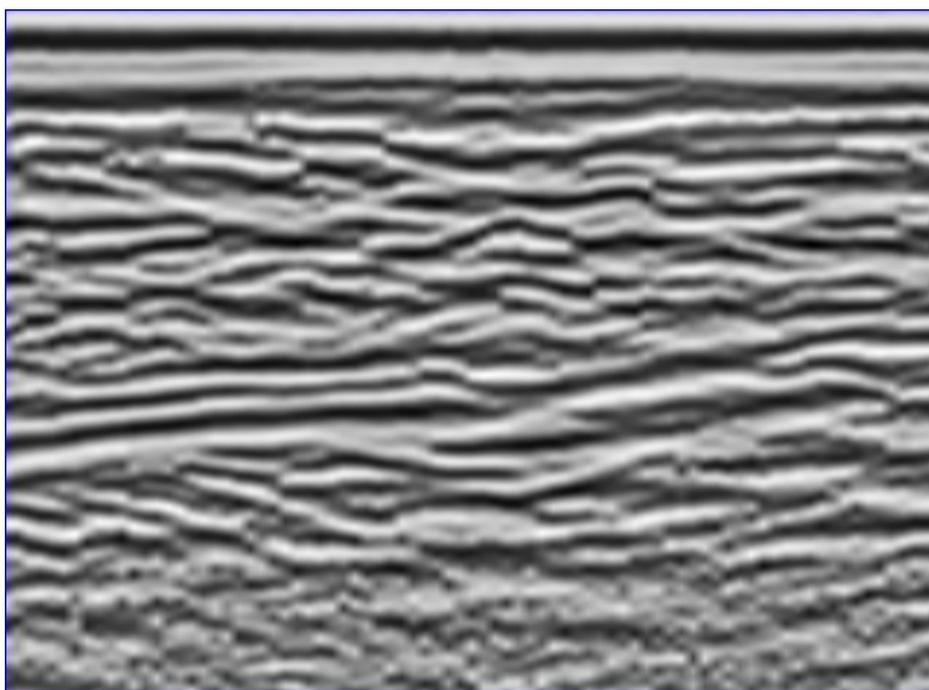


Figura 9.8: Seção 8 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido N/S, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do *Pull-down*. Fonte: Reis, T. P.

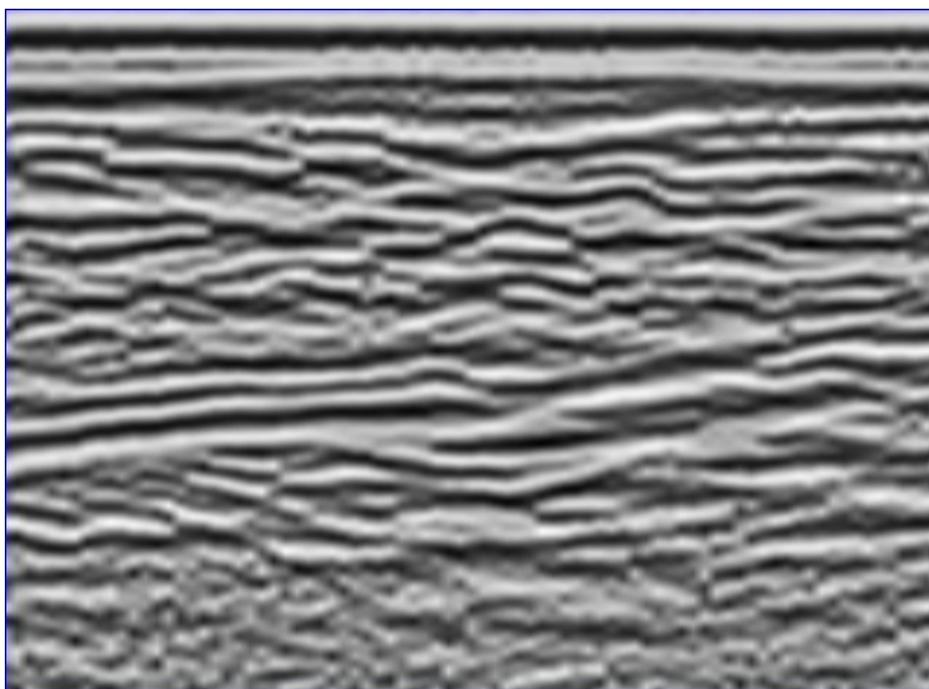


Figura 9.9: Seção 9 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido N/S, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do *Pull-down*. Fonte: Reis, T. P.

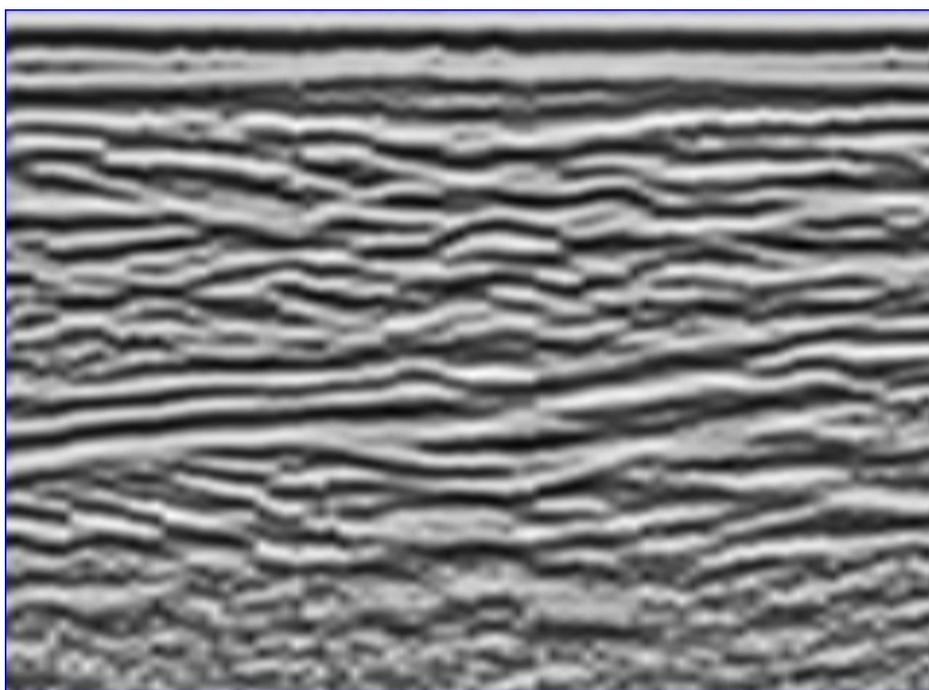


Figura 9.10: Seção 10 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido N/S, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do *Pull-down*. Fonte: Reis, T. P.

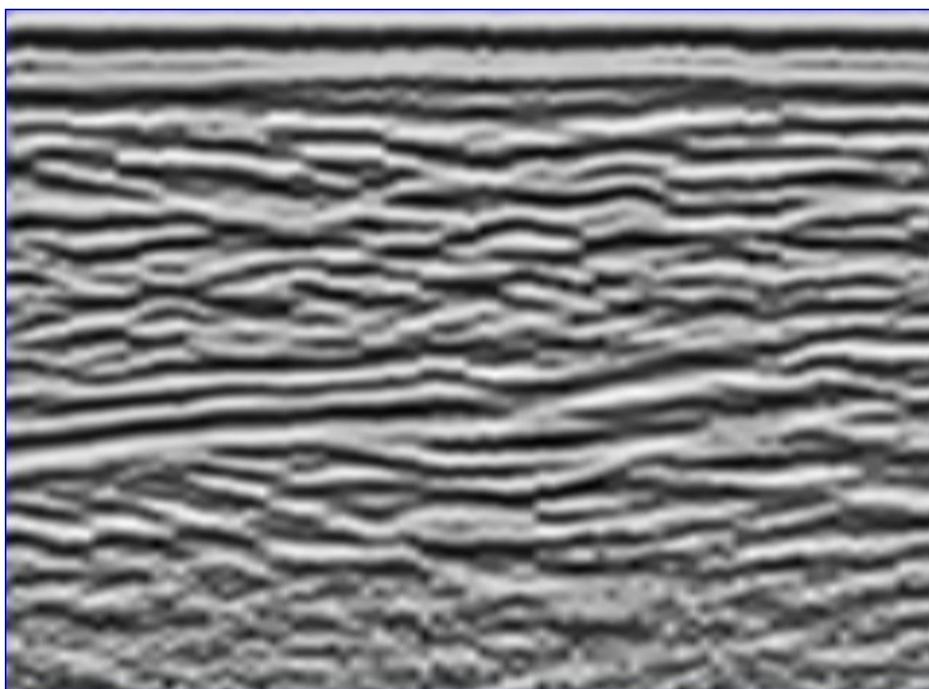


Figura 9.11: Seção 11 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido N/S, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do *Pull-down*. Fonte: Reis, T. P.

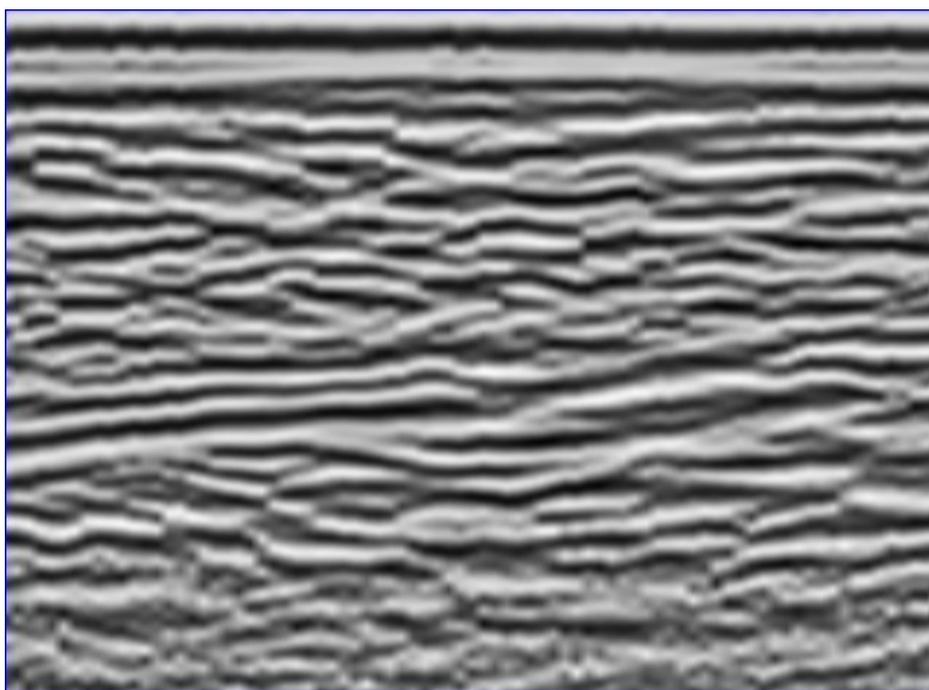


Figura 9.12: Seção 12 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido N/S, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do *Pull-down*. Fonte: Reis, T. P.

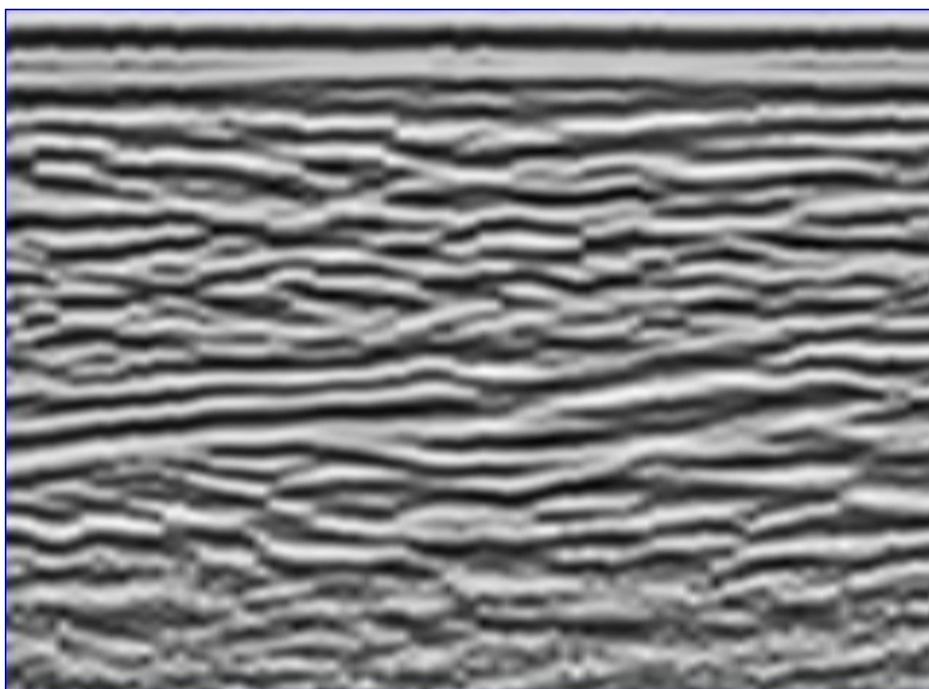


Figura 9.13: Seção 13 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido N/S, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do *Pull-down*. Fonte: Reis, T. P.

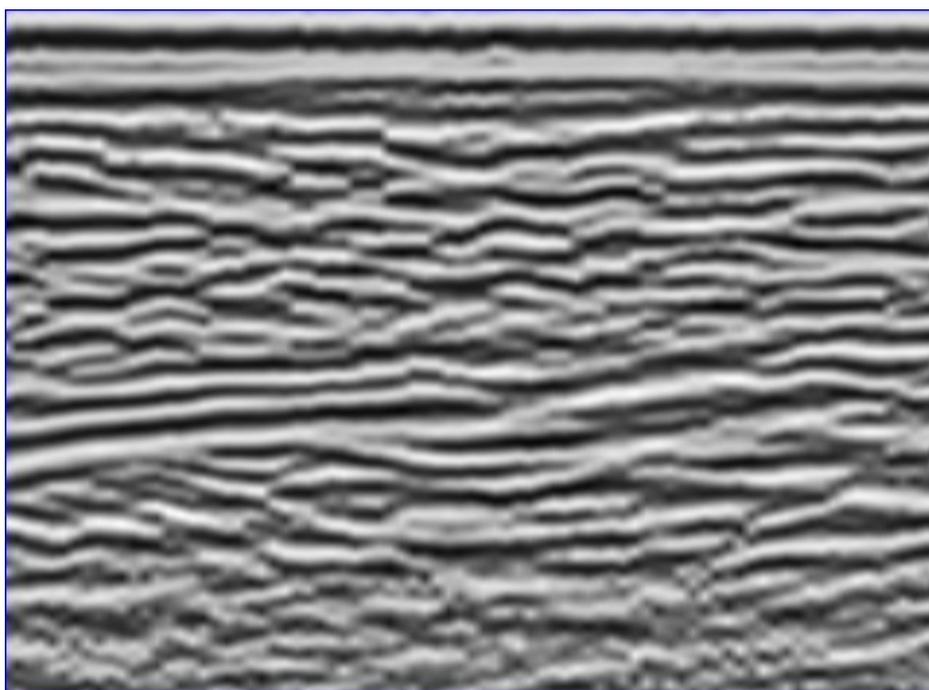


Figura 9.14: Seção 14 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido N/S, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do *Pull-down*. Fonte: Reis, T. P.

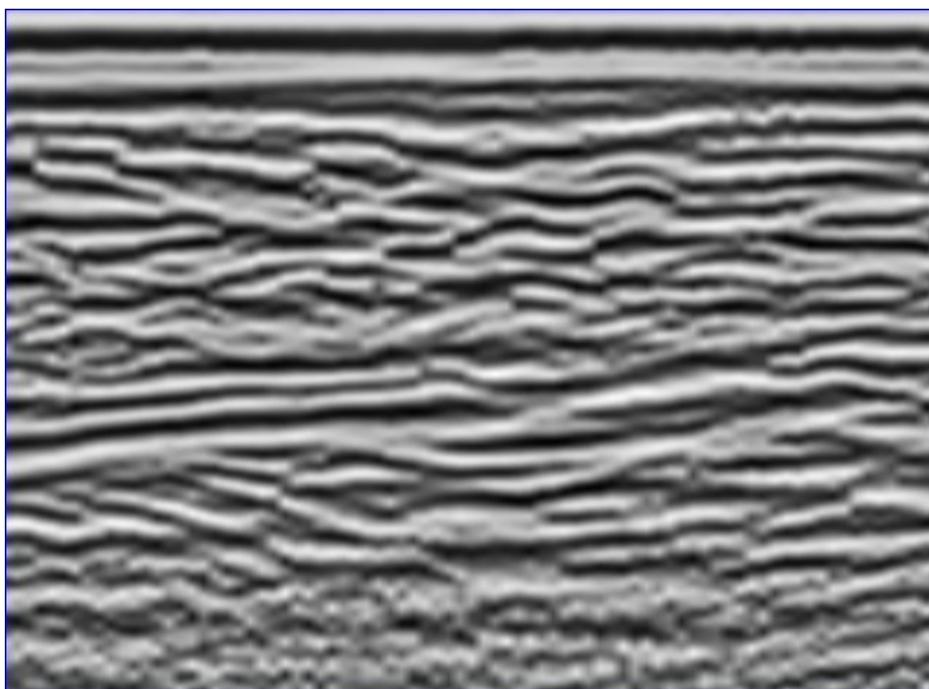


Figura 9.15: Seção 15 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido N/S, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do *Pull-down*. Fonte: Reis, T. P.

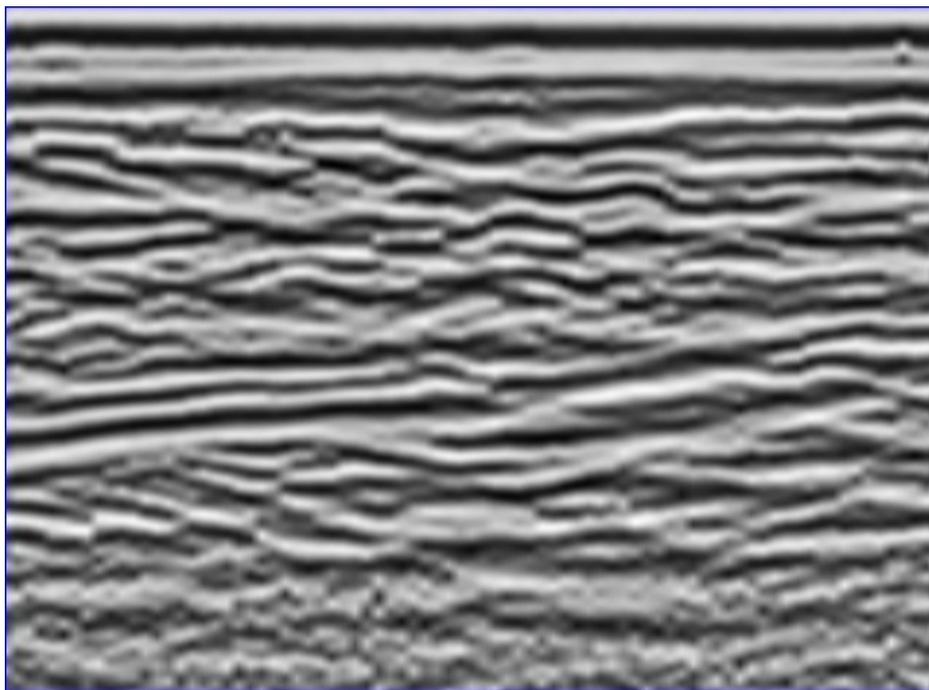


Figura 9.16: Seção 16 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido N/S, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do *Pull-down*. Fonte: Reis, T. P.

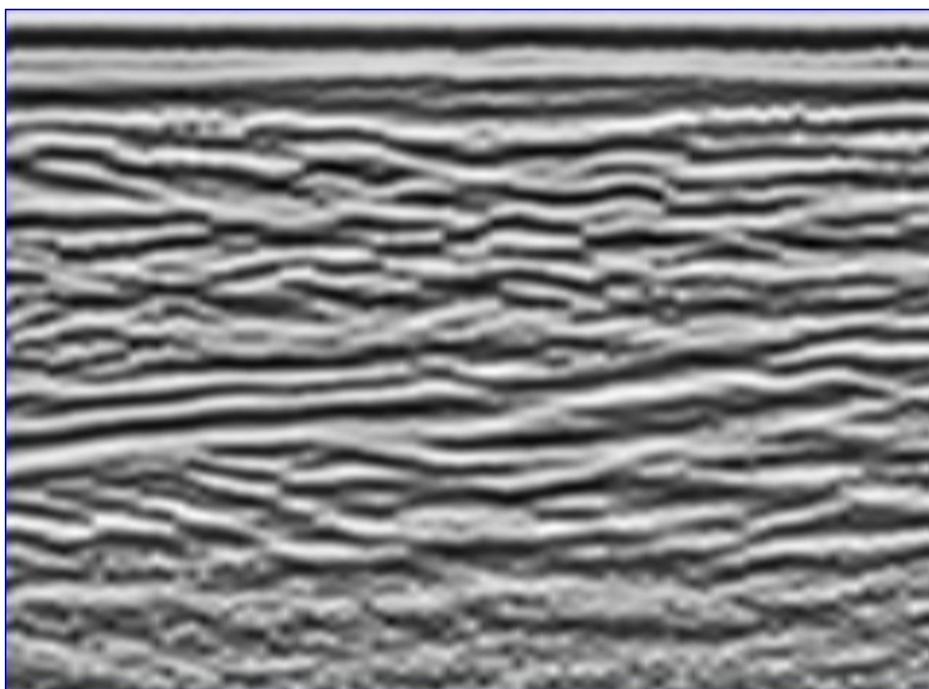


Figura 9.17: Seção 17 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido N/S, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do *Pull-down*. Fonte: Reis, T. P.

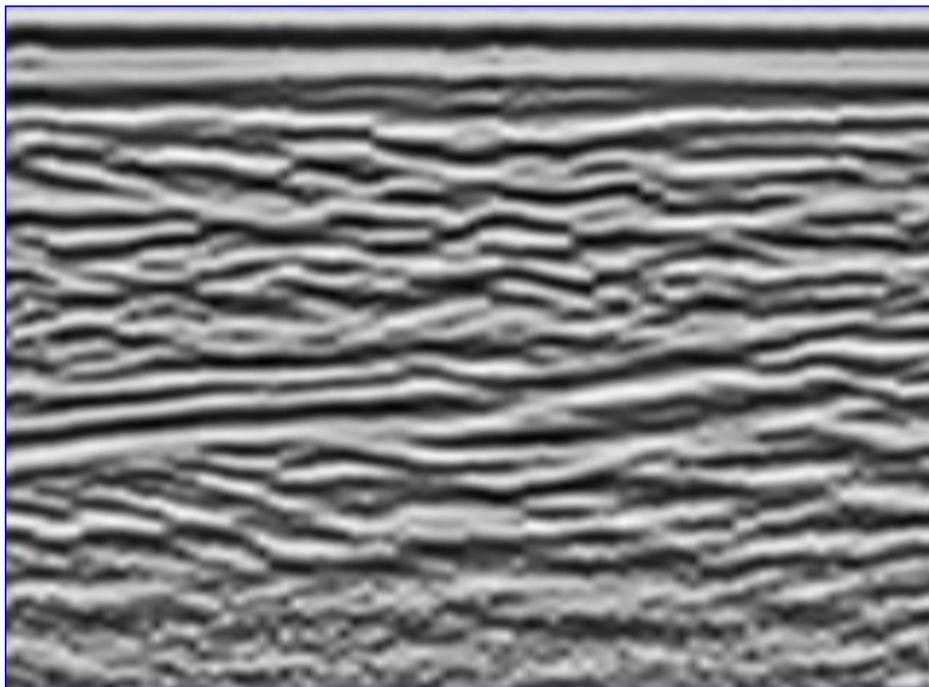


Figura 9.18: Seção 18 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido N/S, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do *Pull-down*. Fonte: Reis, T. P.

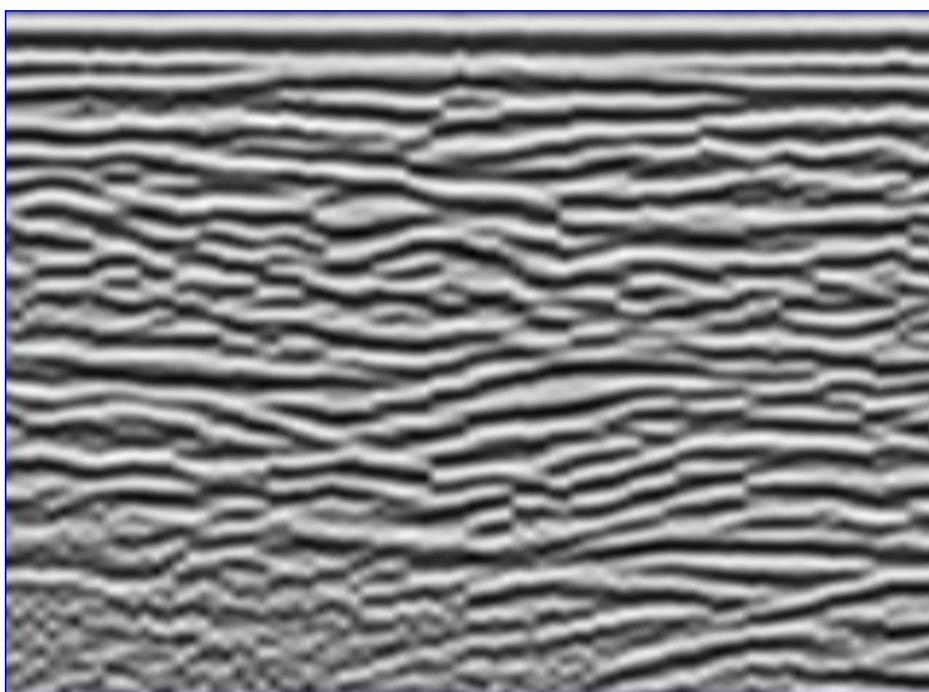


Figura 9.19: Seção 1 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido L/O, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar na parte superior da seção e em comparação com o *Background N/S*, a presença do *Pull-down* causado pela região de baixa velocidade em função da água injetada. Fonte: Reis, T. P.

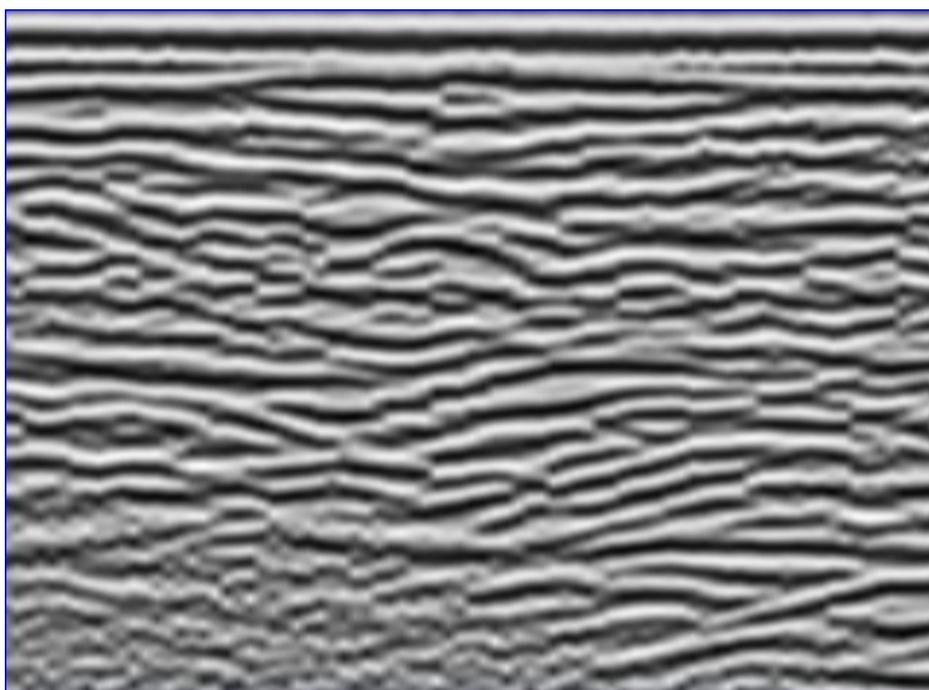


Figura 9.20: Seção 2 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido L/0, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do *Pull-down*. Fonte: Reis, T. P.

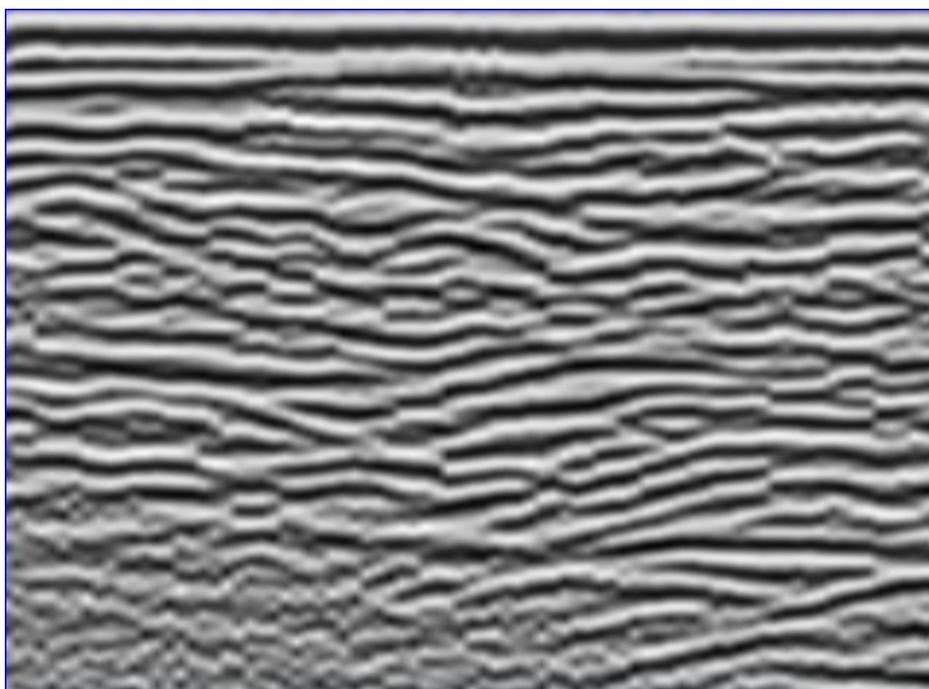


Figura 9.21: Seção 3 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido L/0, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do *Pull-down*. Fonte: Reis, T. P.

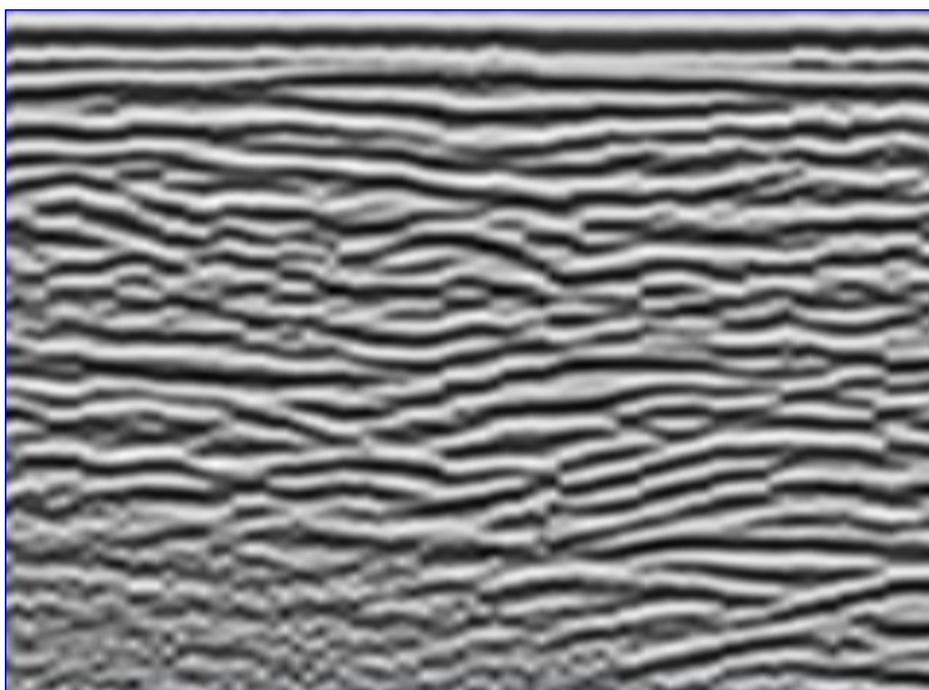


Figura 9.22: Seção 4 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido L/0, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do *Pull-down*. Fonte: Reis, T. P.

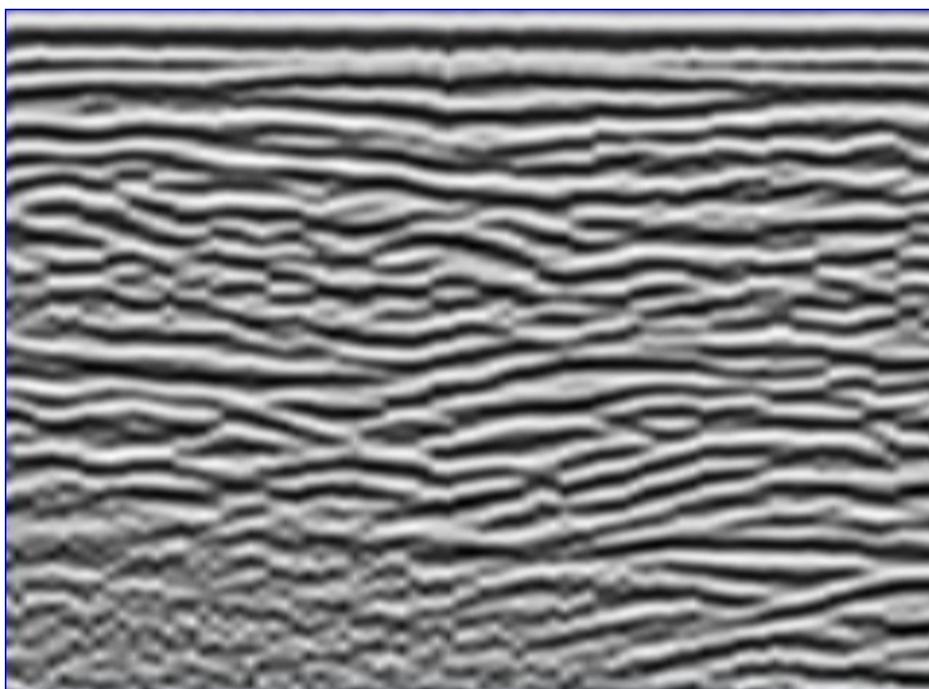


Figura 9.23: Seção 5 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido L/0, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do *Pull-down*. Fonte: Reis, T. P.

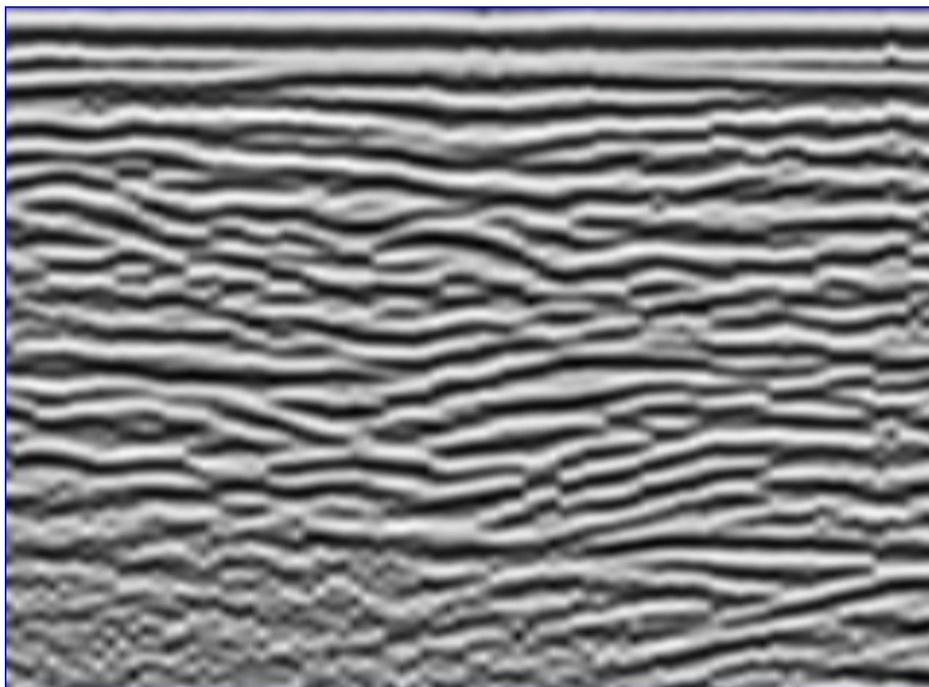


Figura 9.24: Seção 6 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido L/0, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do *Pull-down*. Fonte: Reis, T. P.

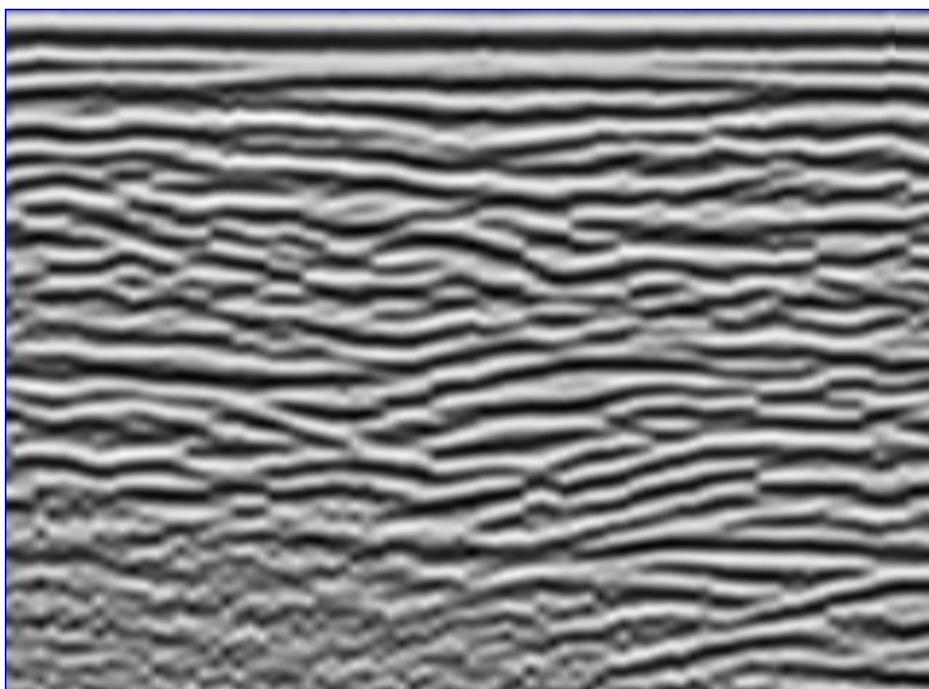


Figura 9.25: Seção 7 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido L/0, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do *Pull-down*. Fonte: Reis, T. P.

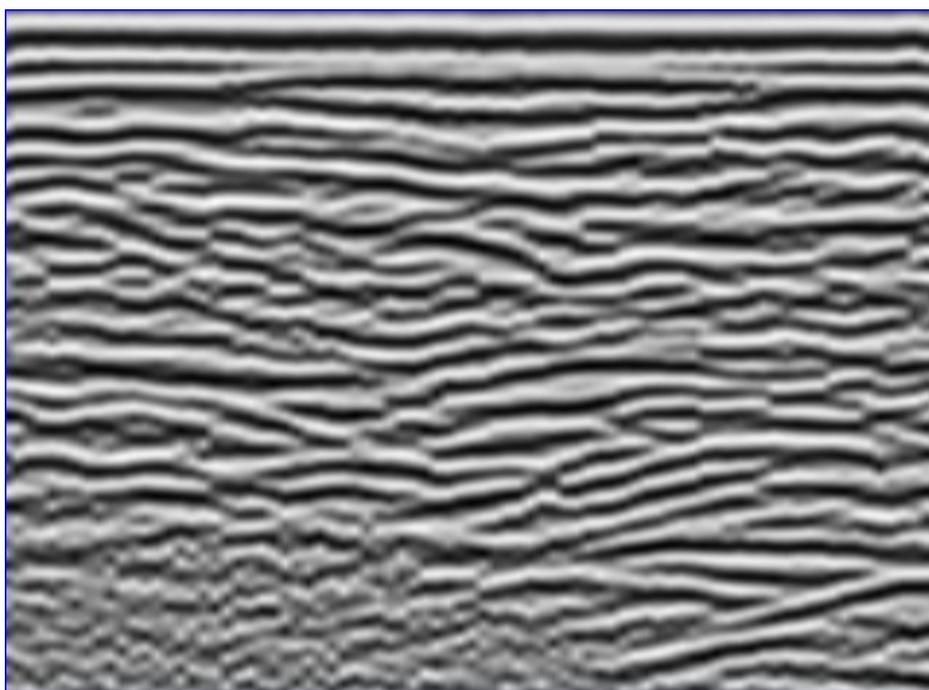


Figura 9.26: Seção 8 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido L/0, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do *Pull-down*. Fonte: Reis, T. P.

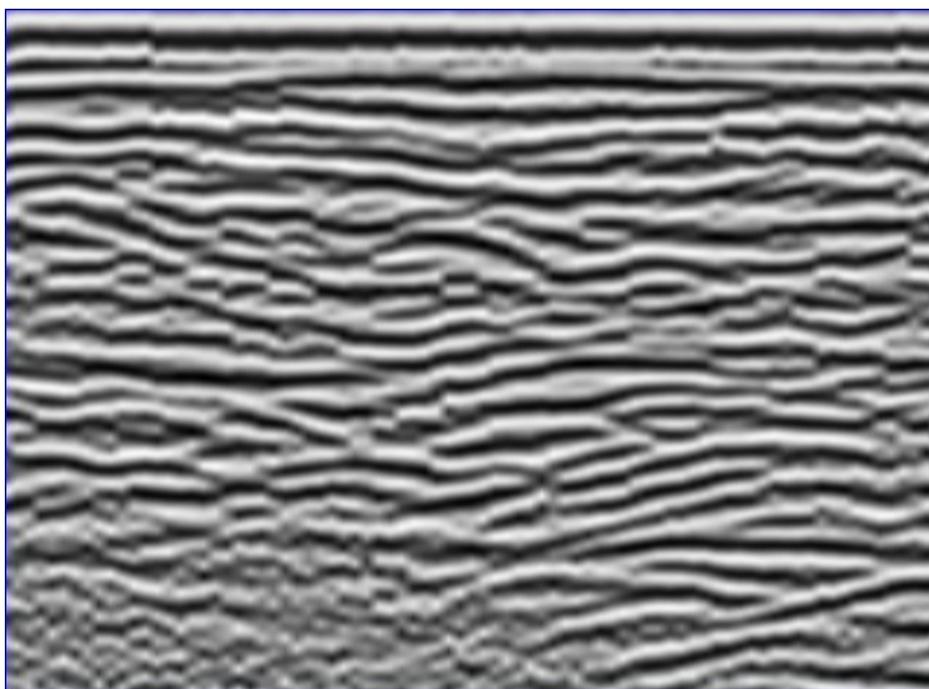


Figura 9.27: Seção 9 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido L/0, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do *Pull-down*. Fonte: Reis, T. P.

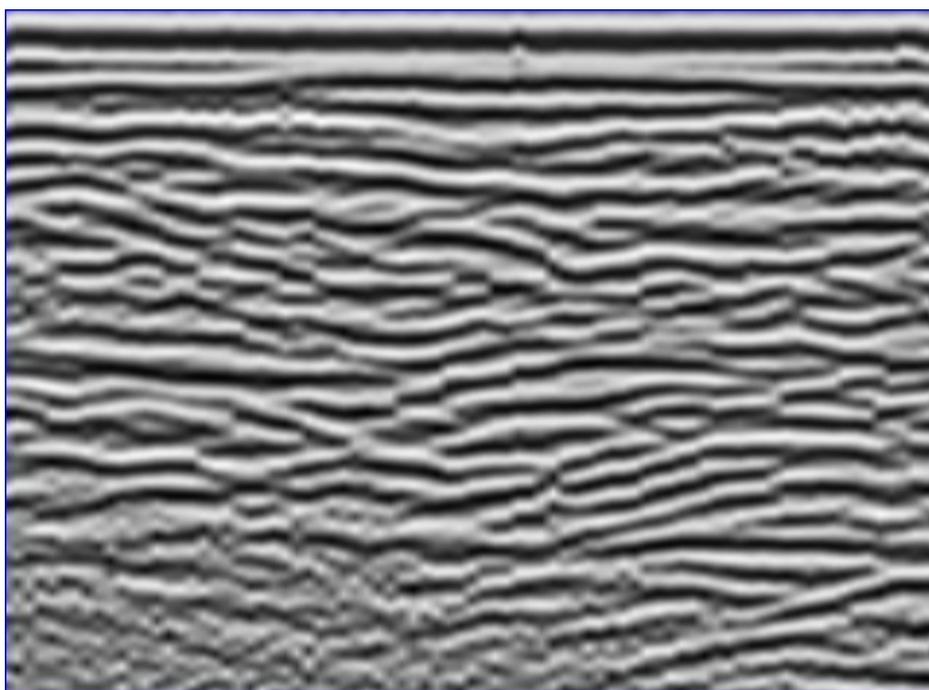


Figura 9.28: Seção 10 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido L/0, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do *Pull-down*. Fonte: Reis, T. P.

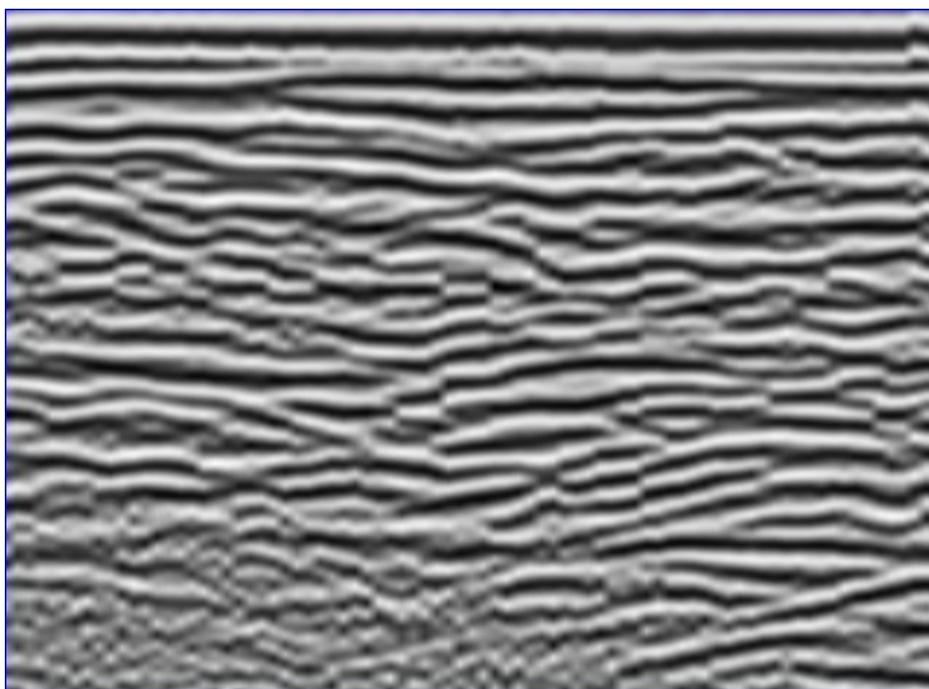


Figura 9.29: Seção 11 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido L/0, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do *Pull-down*. Fonte: Reis, T. P.

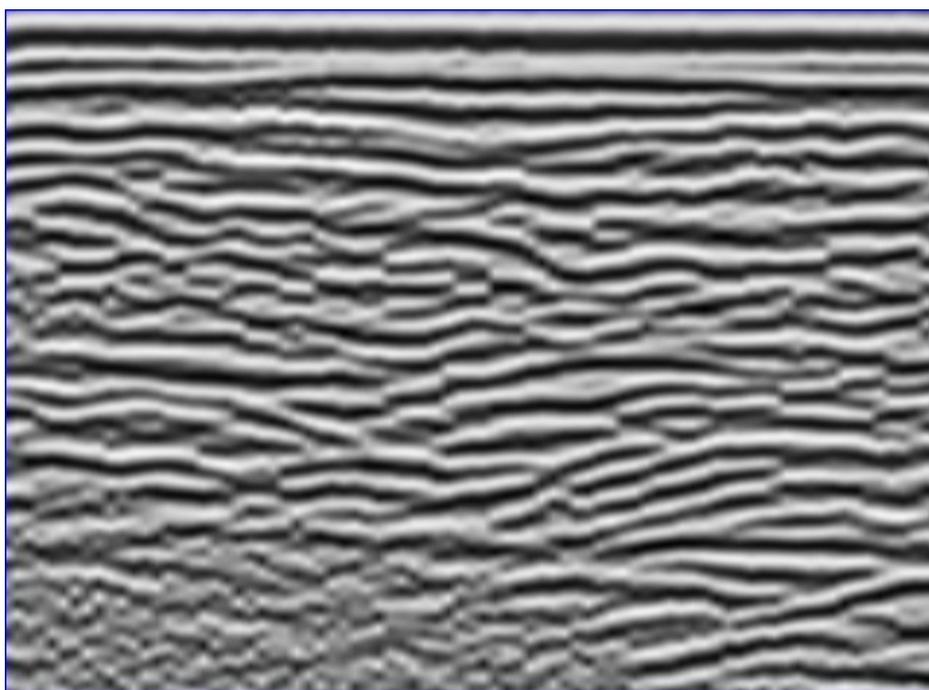


Figura 9.30: Seção 12 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido L/0, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do *Pull-down*. Fonte: Reis, T. P.

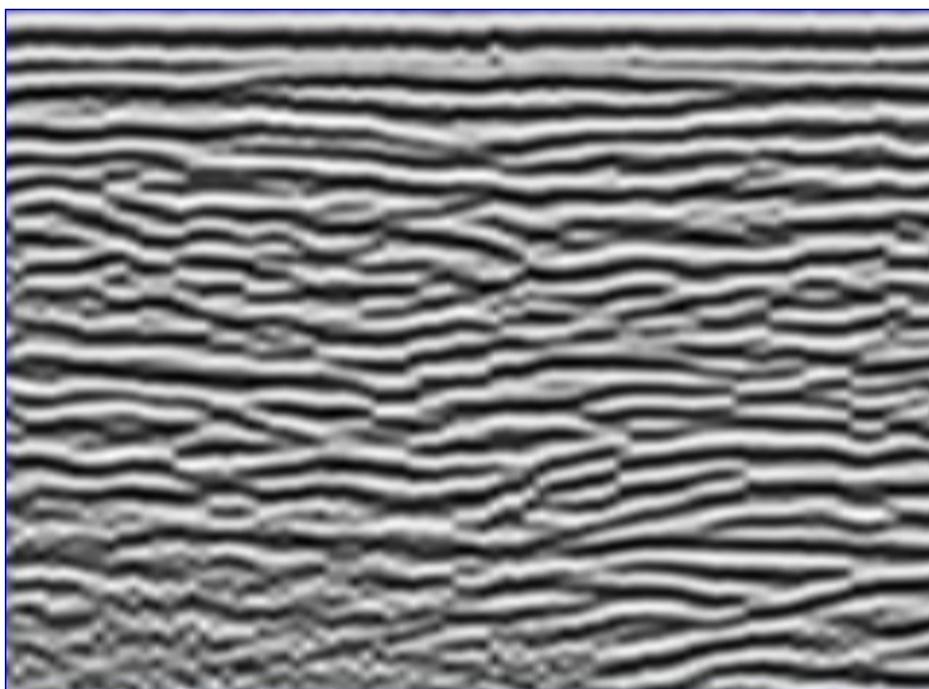


Figura 9.31: Seção 13 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido L/0, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do *Pull-down*. Fonte: Reis, T. P.

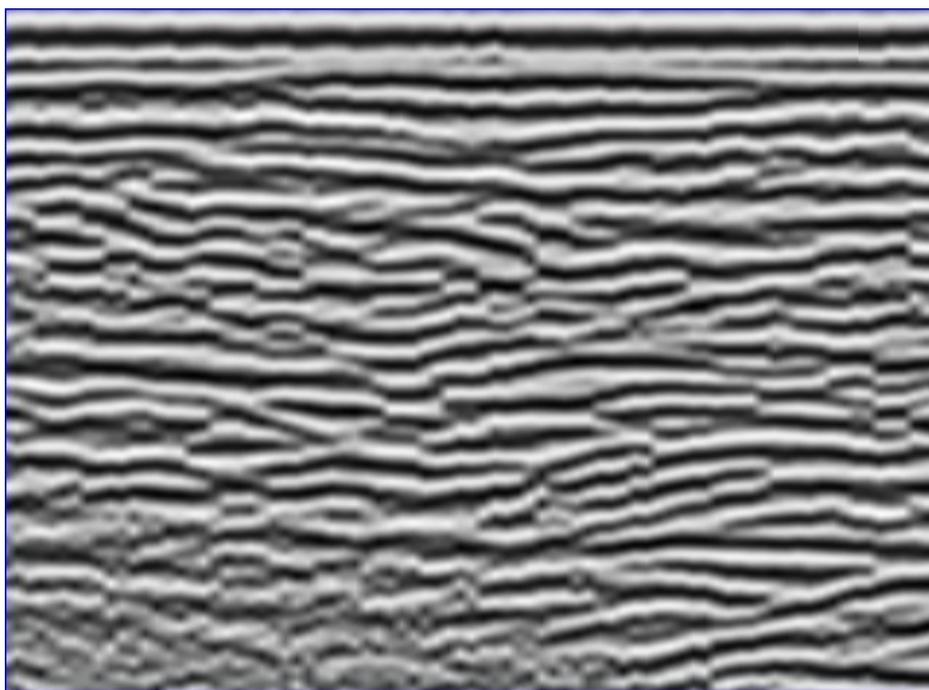


Figura 9.32: Seção 14 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido L/0, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do *Pull-down*. Fonte: Reis, T. P.

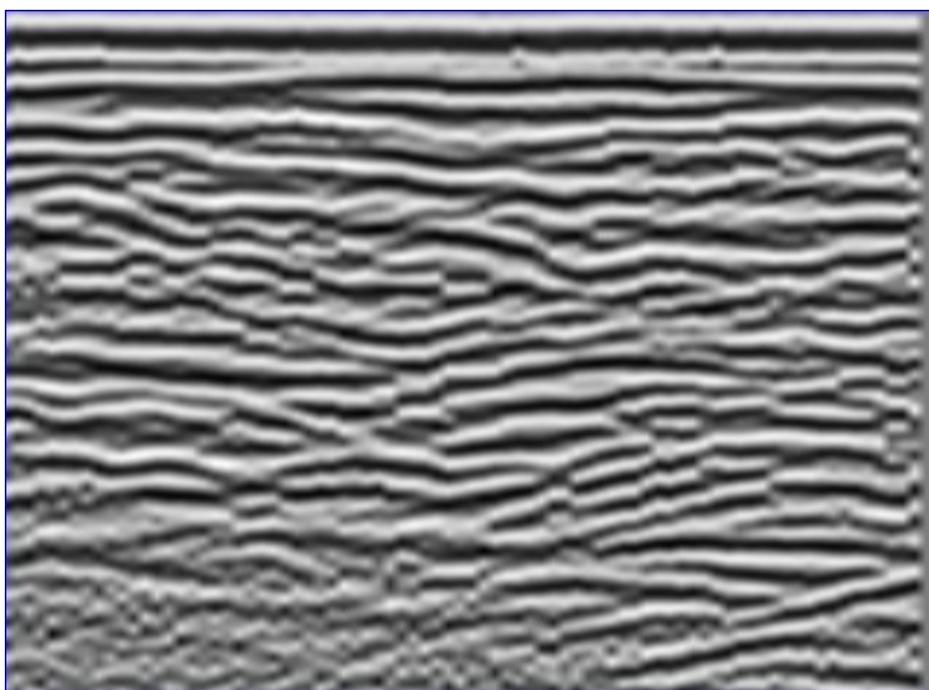


Figura 9.33: Seção 15 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido L/0, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do *Pull-down*. Observar que esta seção foi completada com traços nulos em seus últimos traços Fonte: Reis, T. P.

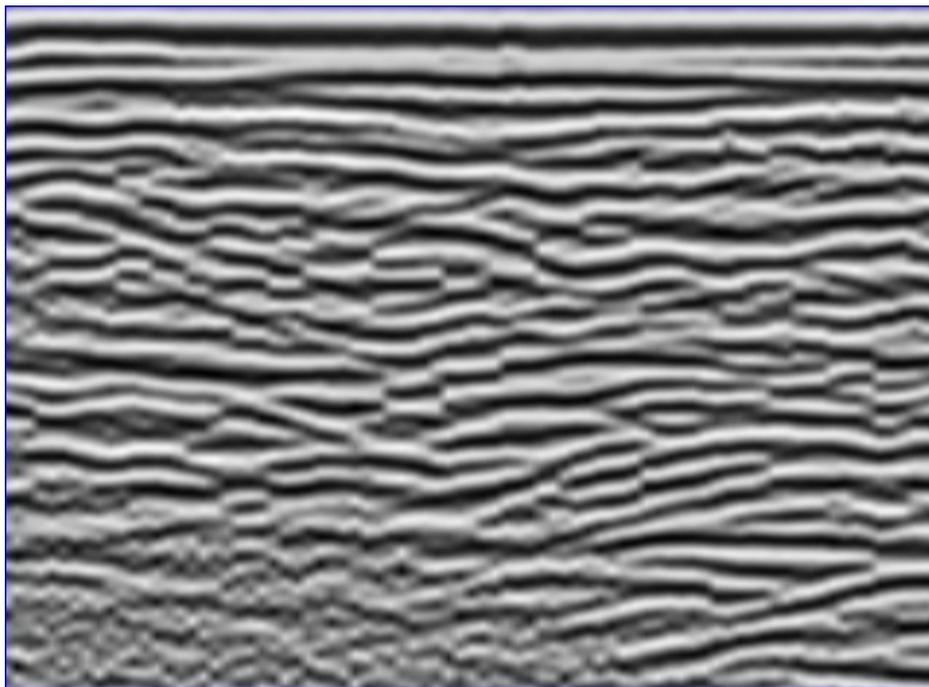


Figura 9.34: Seção 16 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido L/0, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do *Pull-down*. Fonte: Reis, T. P.

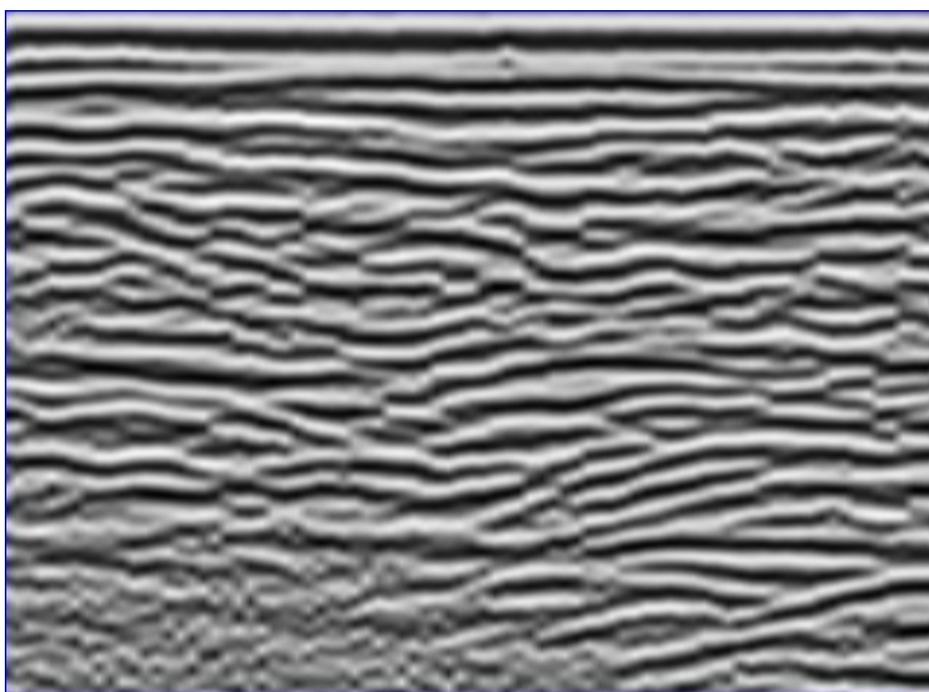


Figura 9.35: Seção 17 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido L/0, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do *Pull-down*. Fonte: Reis, T. P.

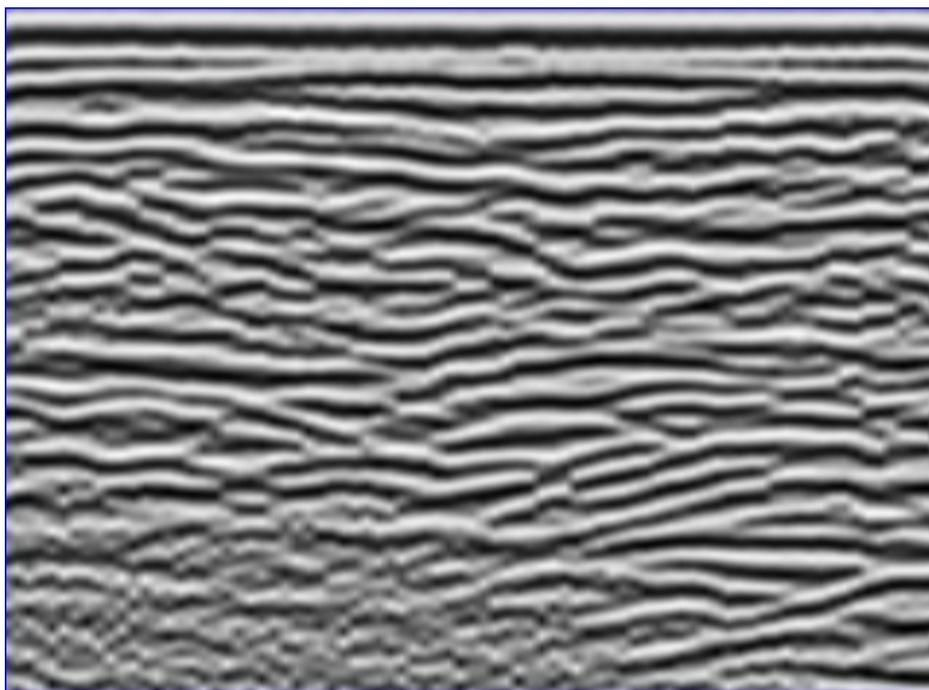


Figura 9.36: Seção 18 dos levantamentos pós-injeção realizados no sentido L/0, processada seguindo os parâmetros do item 5.2. Observar a evolução do *Pull-down*. Fonte: Reis, T. P.

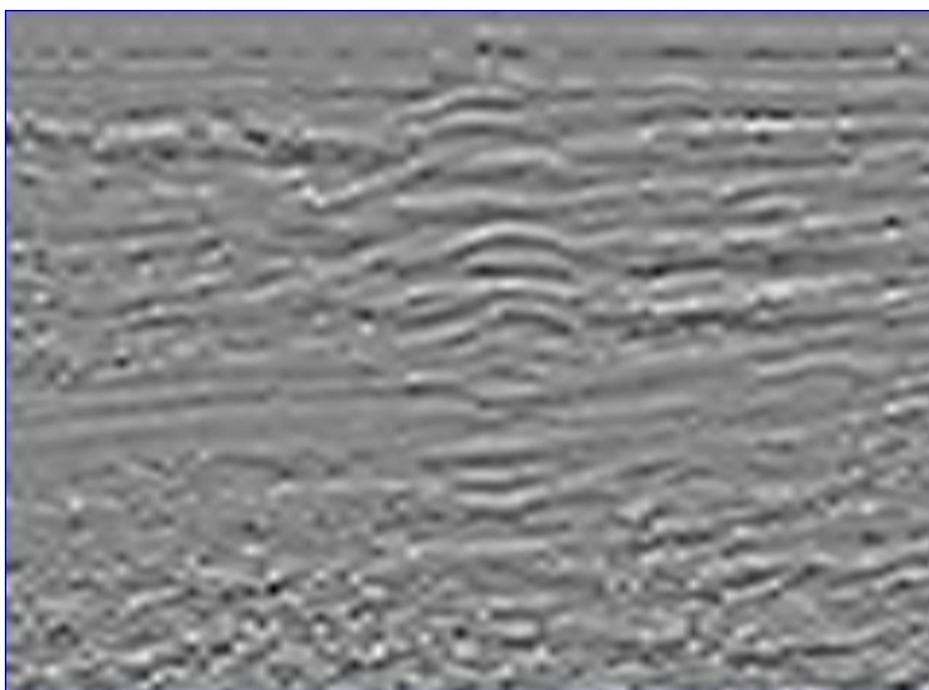


Figura 9.37: Seção *Time Lapse* 1, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 2 do sentido N/S. Observar que existem poucas diferenças entre as seções. Ver também que na região onde situava-se o *Pull-down* nas seções anteriores, agora há um padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P.

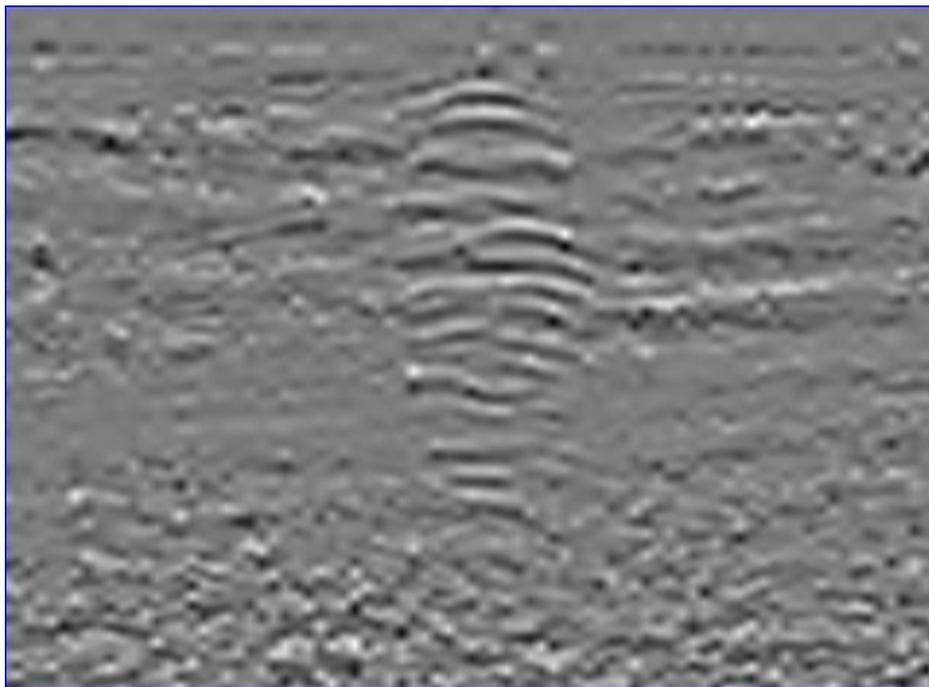


Figura 9.38: Seção *Time Lapse* 2, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 3 do sentido N/S. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P.

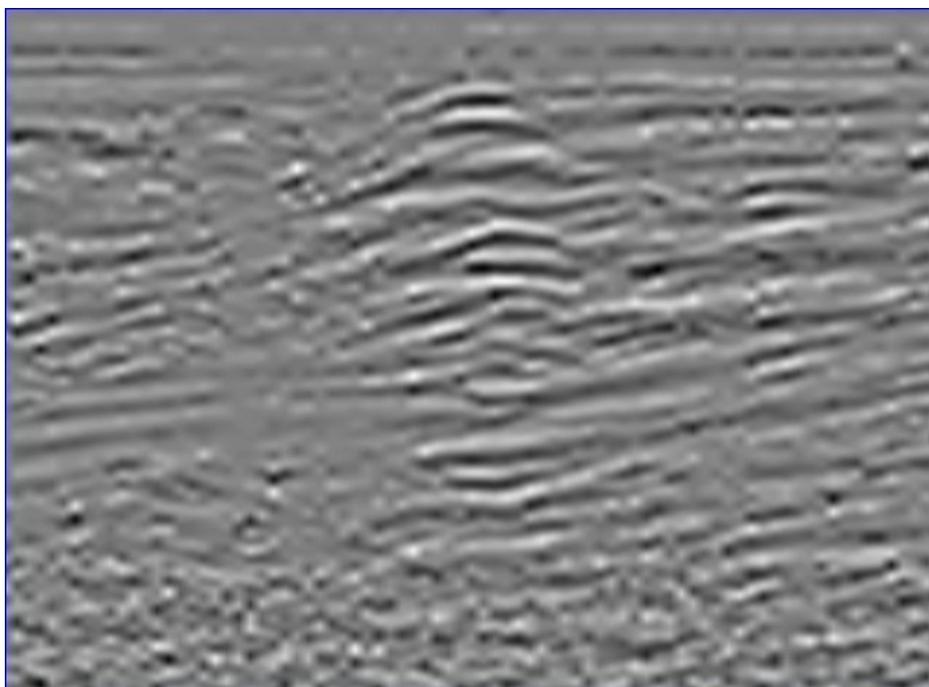


Figura 9.39: Seção *Time Lapse* 3, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 4 do sentido N/S. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P.

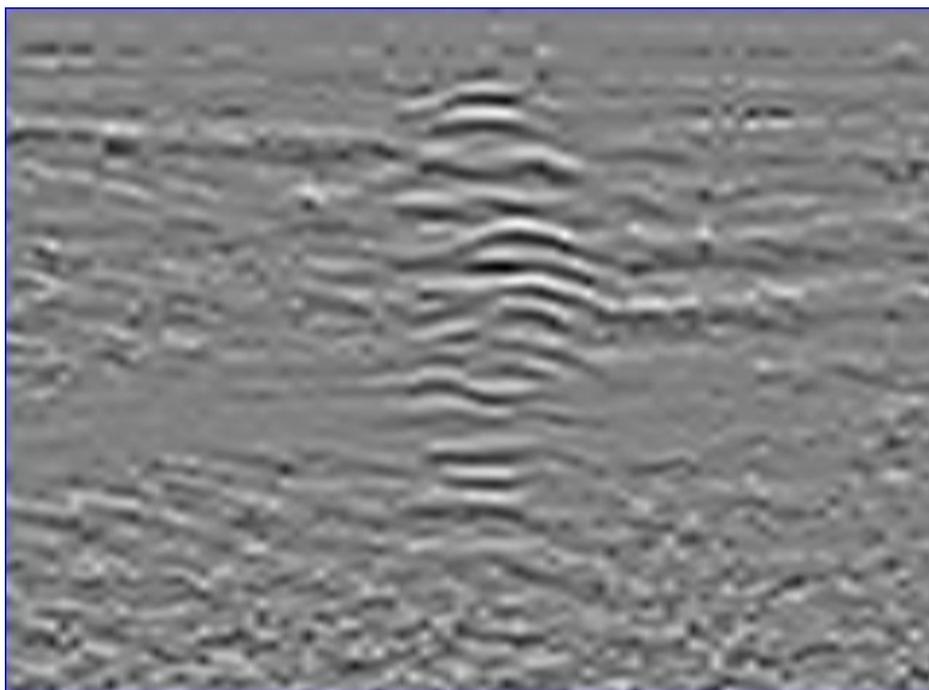


Figura 9.40: Seção *Time Lapse* 4, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 5 do sentido N/S. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P.

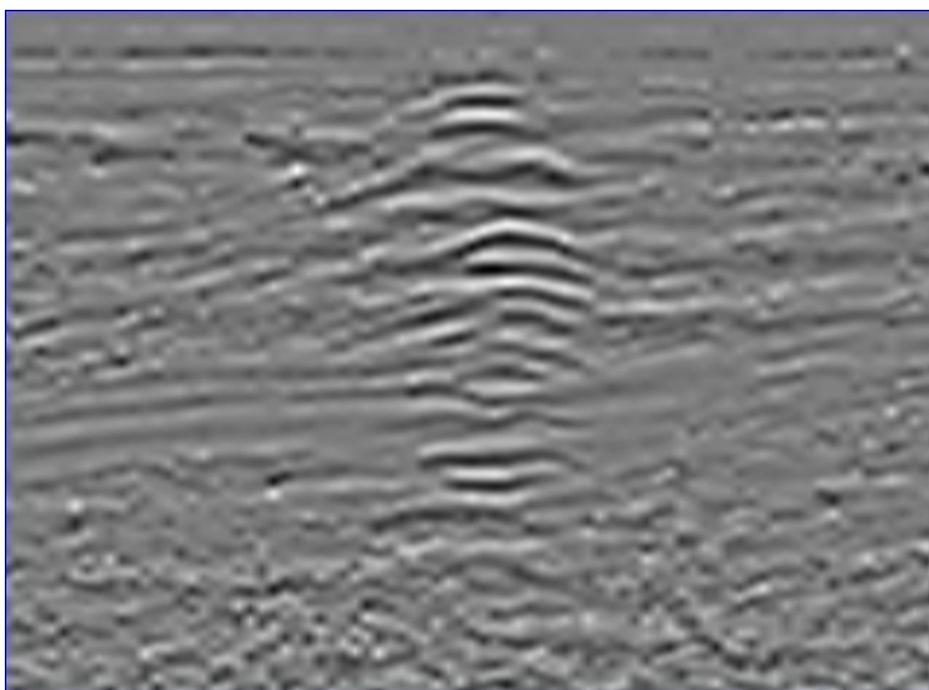


Figura 9.41: Seção *Time Lapse* 5, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 6 do sentido N/S. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P.

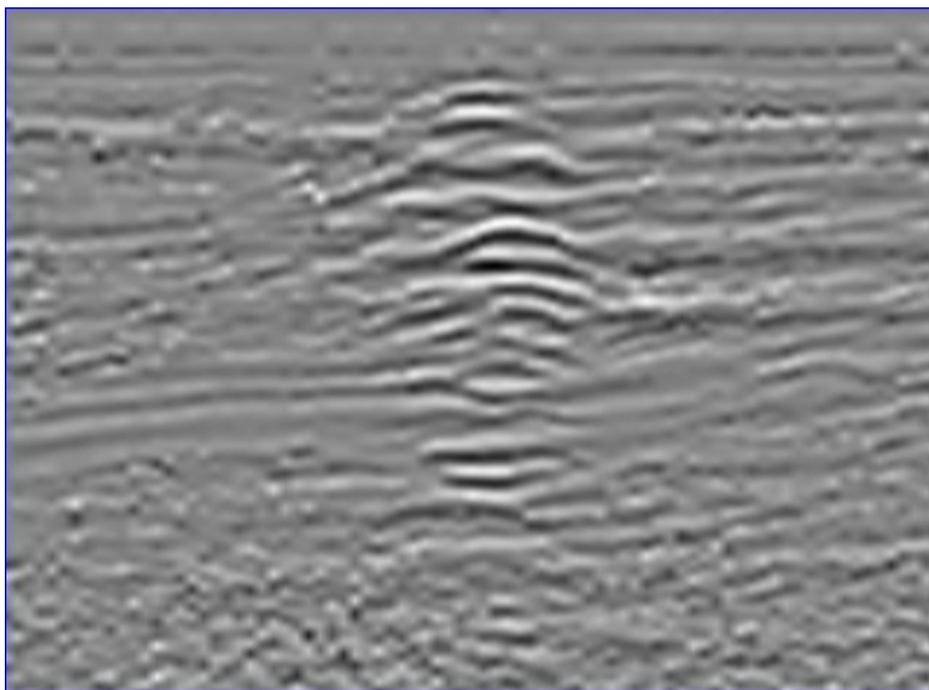


Figura 9.42: Seção *Time Lapse* 6, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 7 do sentido N/S. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P.

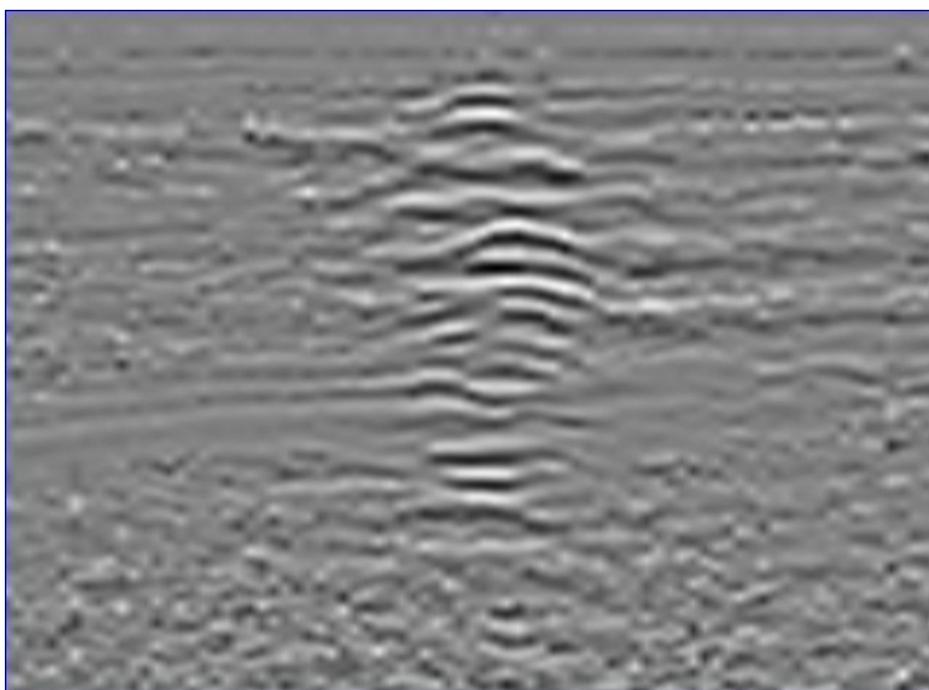


Figura 9.43: Seção *Time Lapse* 7, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 8 do sentido N/S. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P.

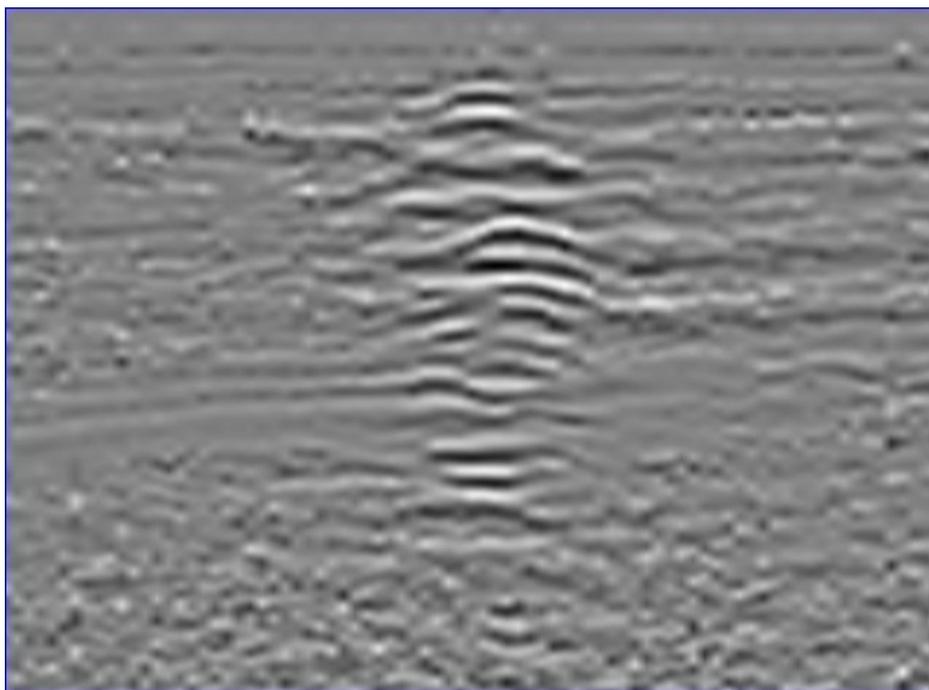


Figura 9.44: Seção *Time Lapse* 8, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 9 do sentido N/S. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P.

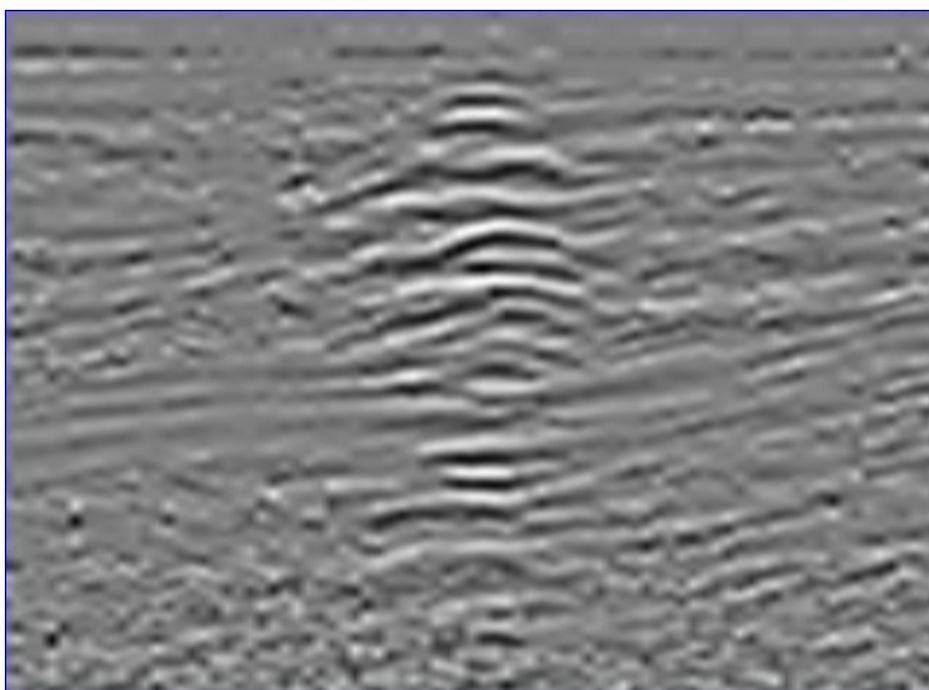


Figura 9.45: Seção *Time Lapse* 9, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 10 do sentido N/S. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P.

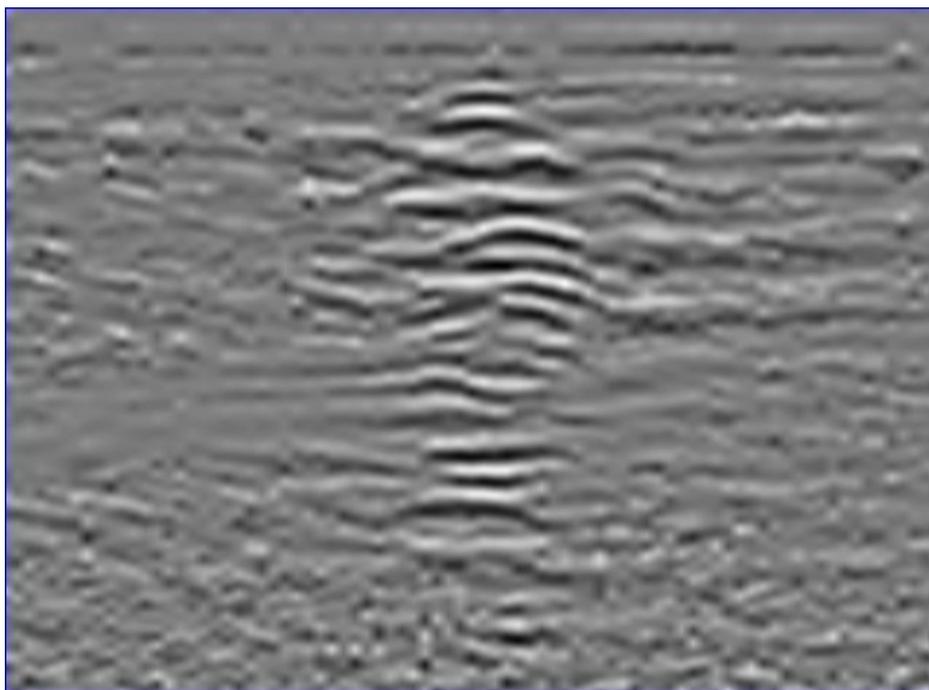


Figura 9.46: Seção *Time Lapse* 10, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 11 do sentido N/S. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P.

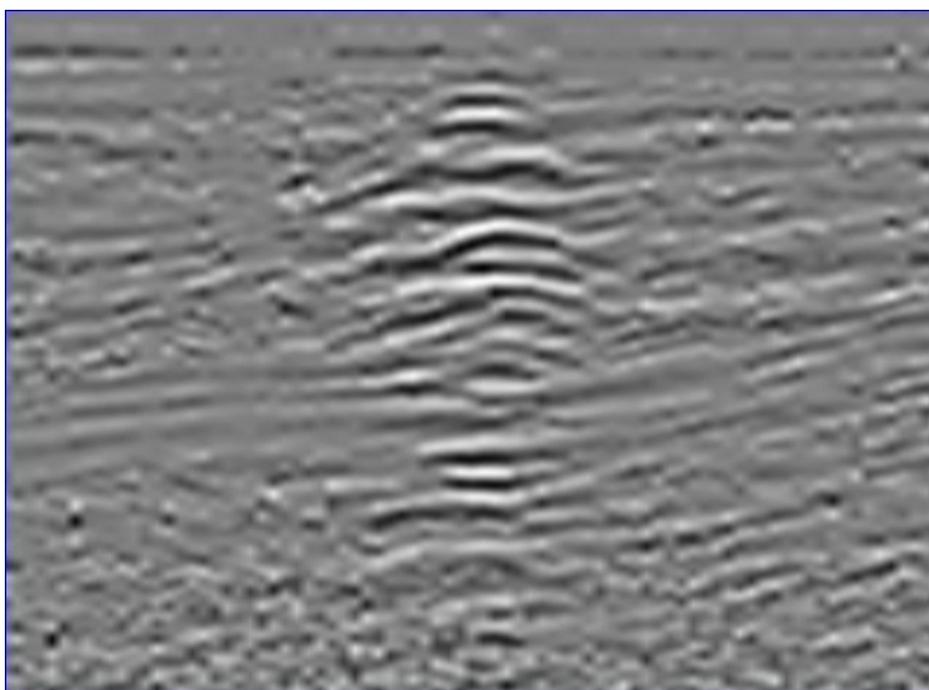


Figura 9.47: Seção *Time Lapse* 11, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 12 do sentido N/S. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P.

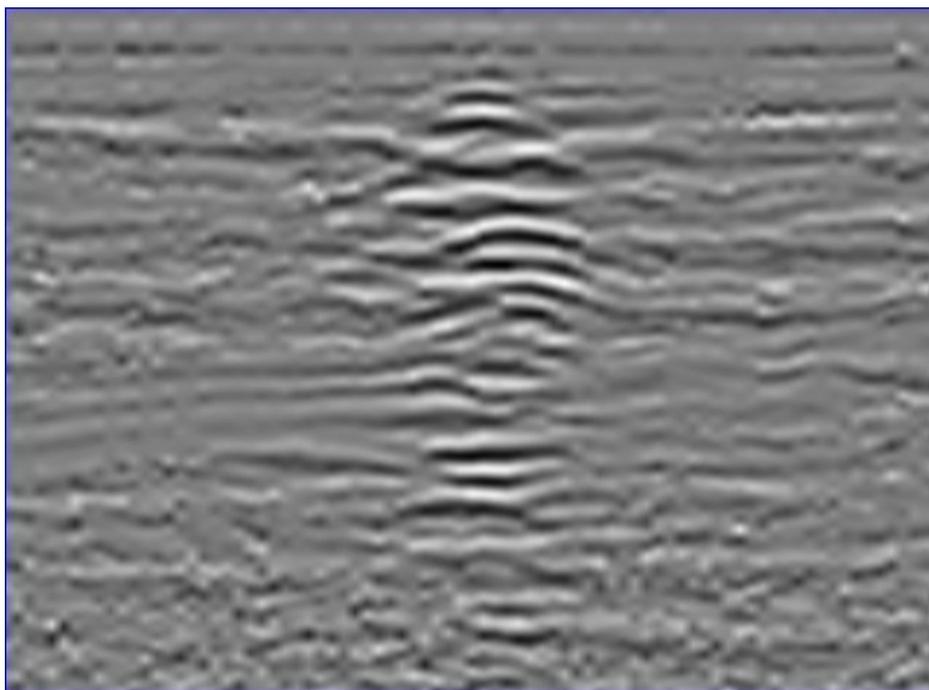


Figura 9.48: Seção *Time Lapse* 12, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 12 do sentido N/S. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P.

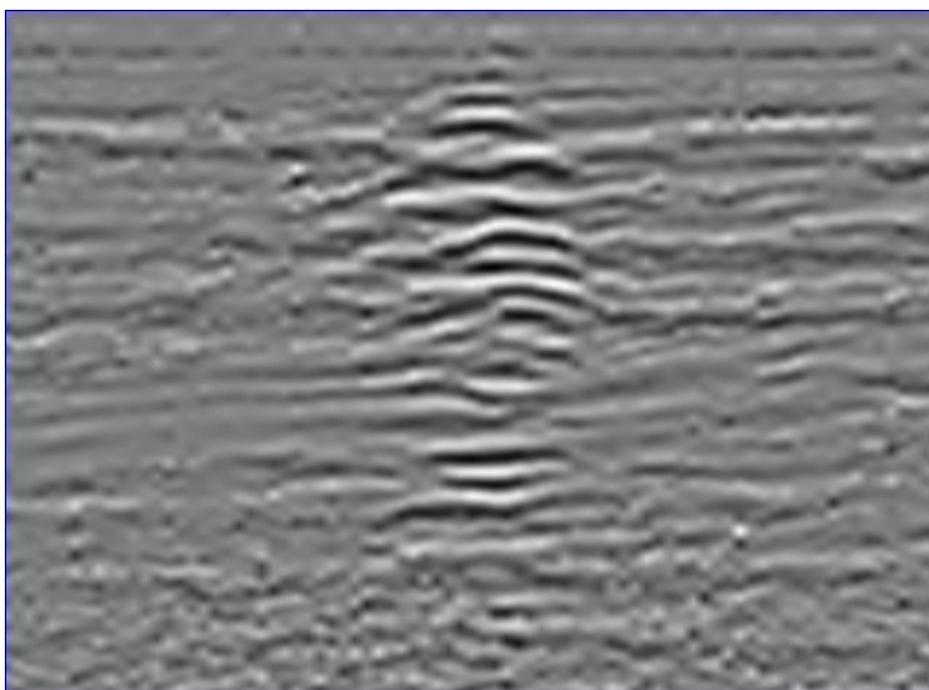


Figura 9.49: Seção *Time Lapse* 13, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 14 do sentido N/S. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P.

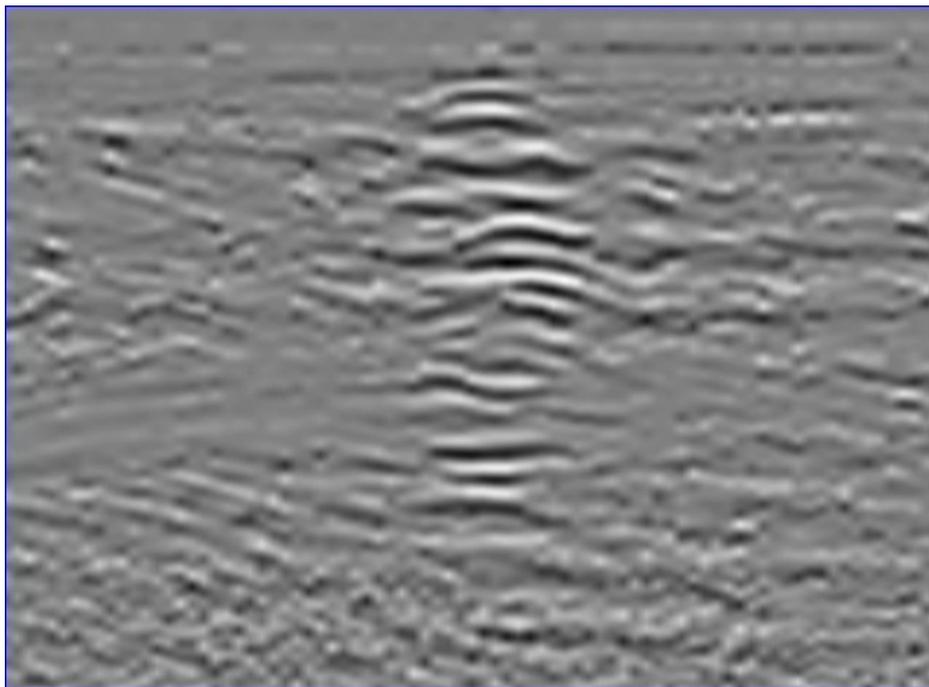


Figura 9.50: Seção *Time Lapse* 14, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 15 do sentido N/S. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P.

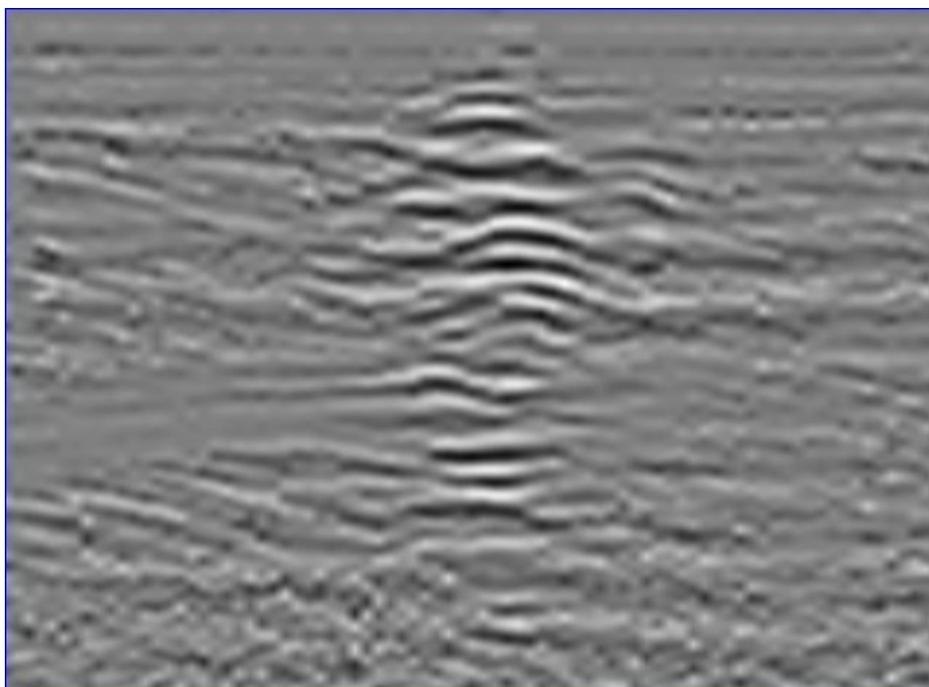


Figura 9.51: Seção *Time Lapse* 15, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 16 do sentido N/S. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P.

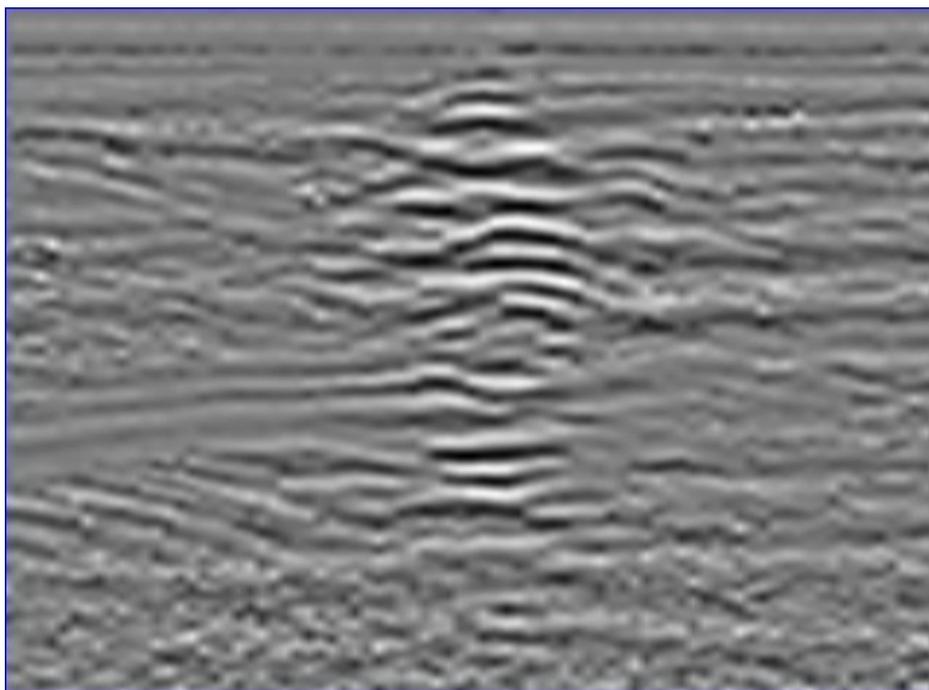


Figura 9.52: Seção *Time Lapse* 16, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 17 do sentido N/S. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P.

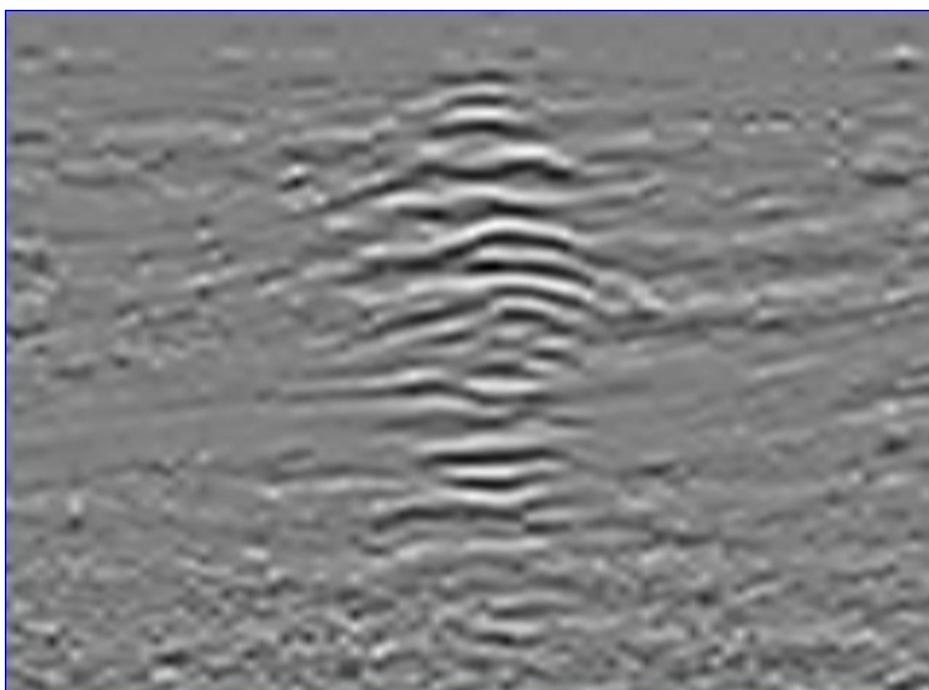


Figura 9.53: Seção *Time Lapse* 17, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 18 do sentido N/S. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P.

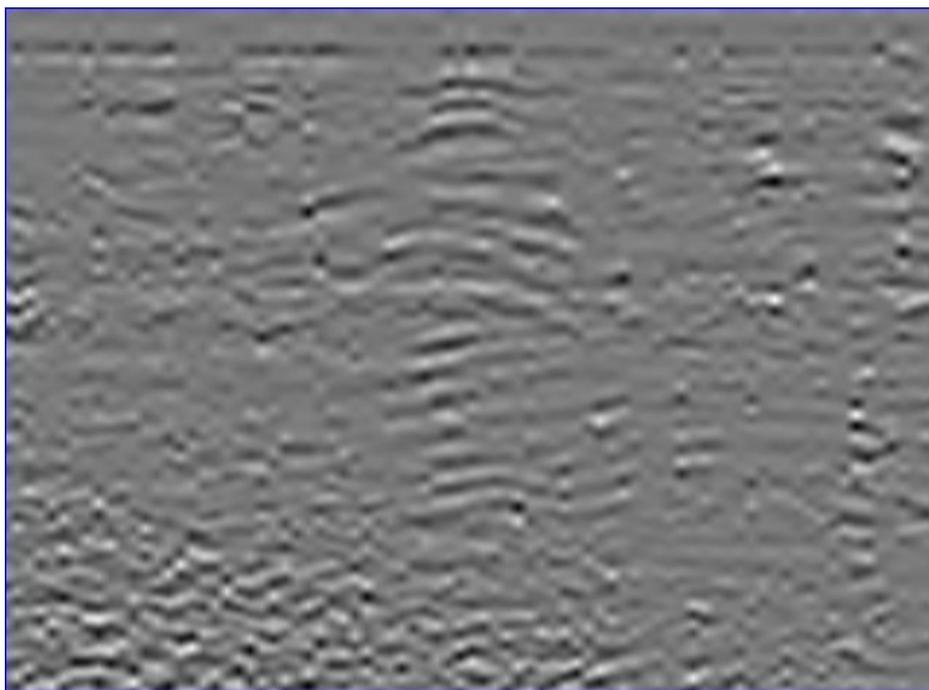


Figura 9.54: Seção *Time Lapse* 1, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 2 do sentido L/O. Observar que existem poucas diferenças entre as seções. Ver também que na região onde situava-se o *Pull-down* nas seções anteriores, agora há um padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P.

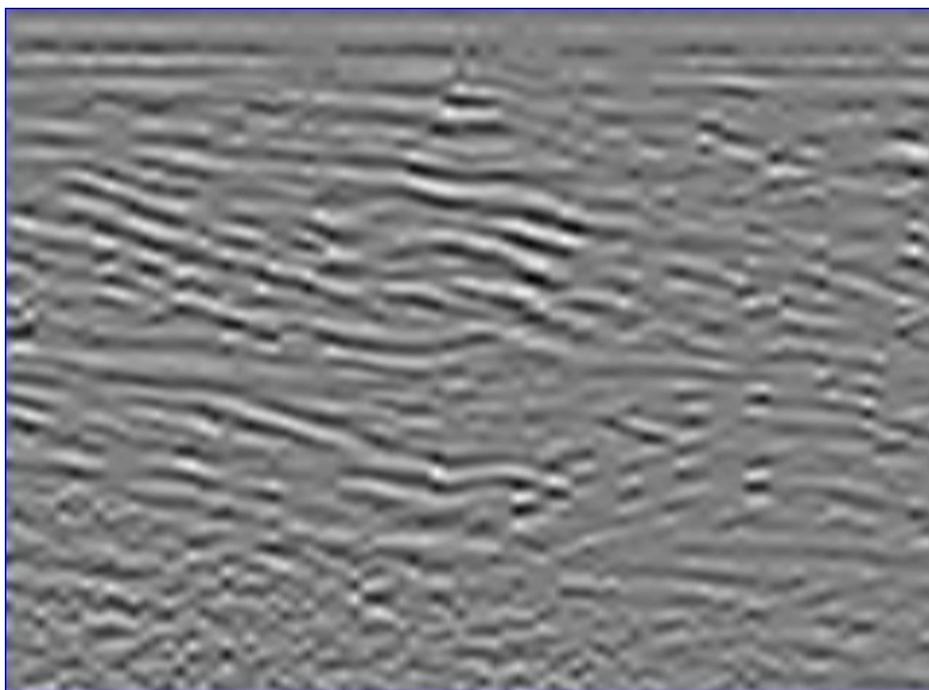


Figura 9.55: Seção *Time Lapse* 2, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 3 do sentido L/O. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P.

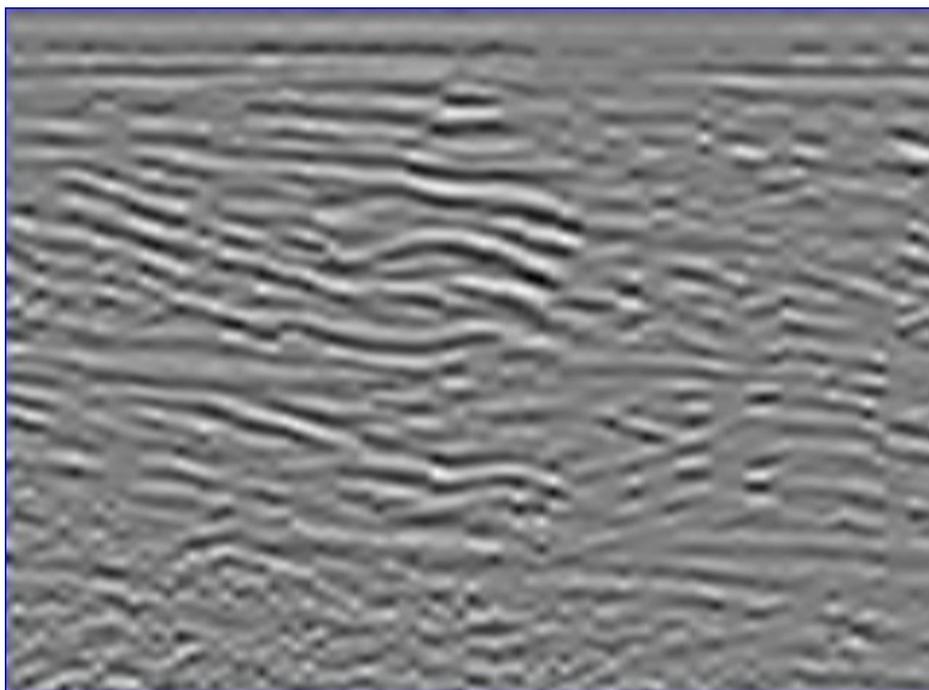


Figura 9.56: Seção *Time Lapse* 3, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 4 do sentido L/O. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P.

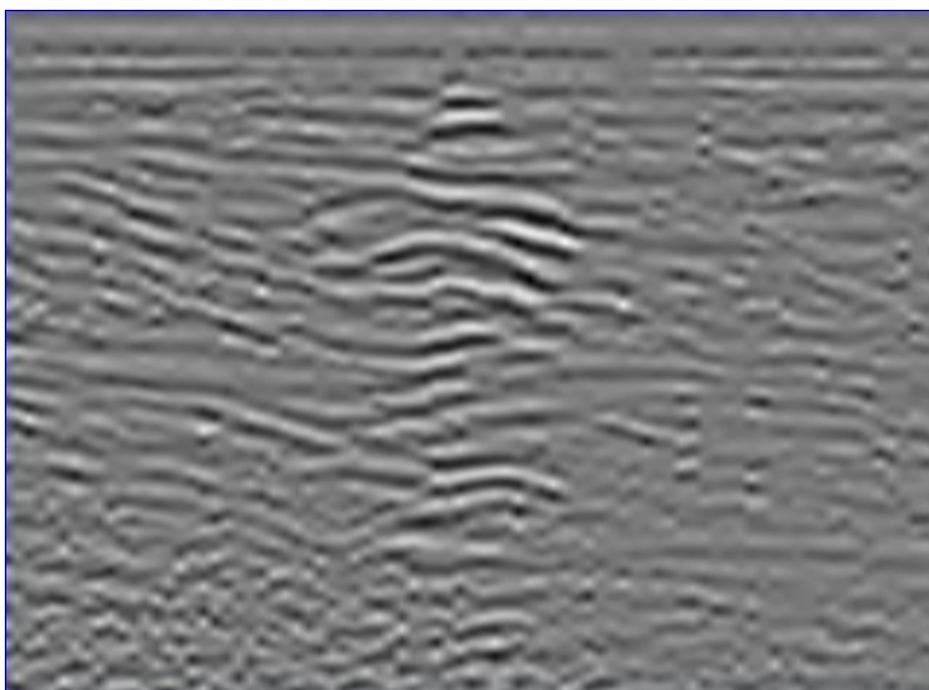


Figura 9.57: Seção *Time Lapse* 4, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 5 do sentido L/O. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P.

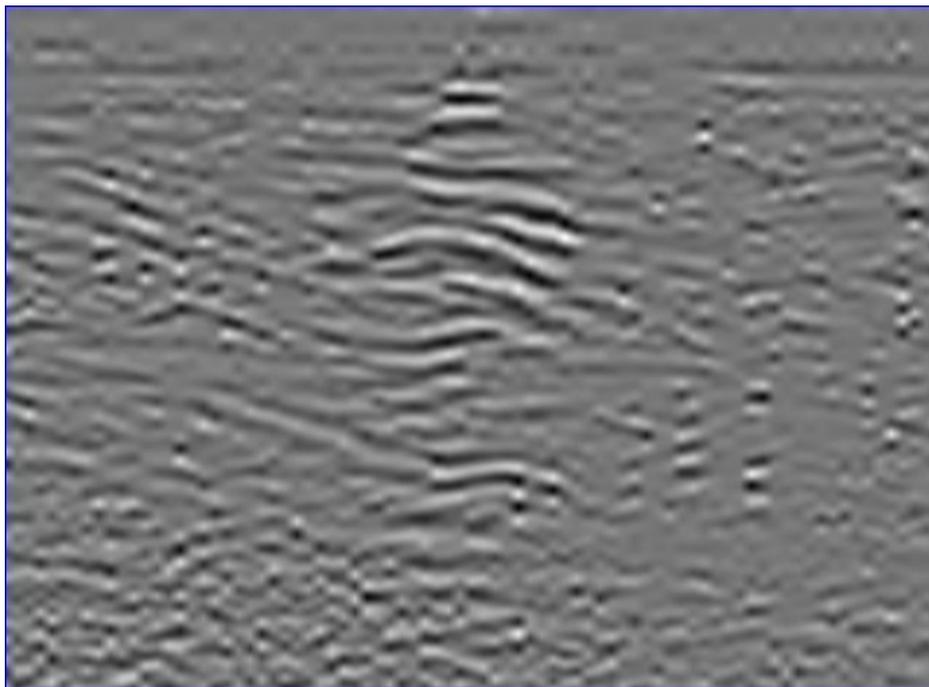


Figura 9.58: Seção *Time Lapse* 5, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 6 do sentido L/O. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P.

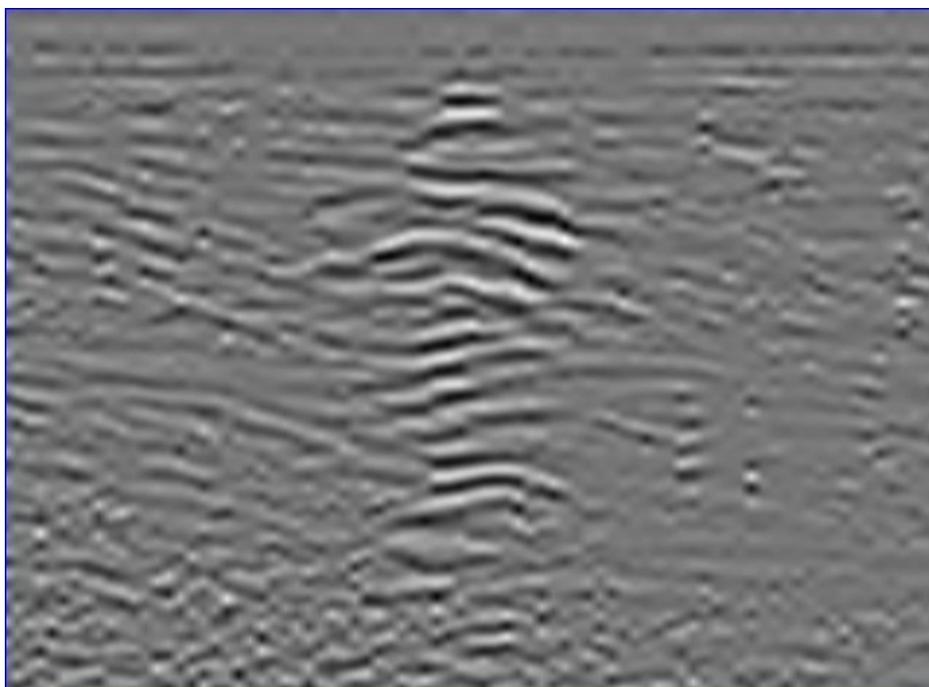


Figura 9.59: Seção *Time Lapse* 6, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 7 do sentido L/O. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P.

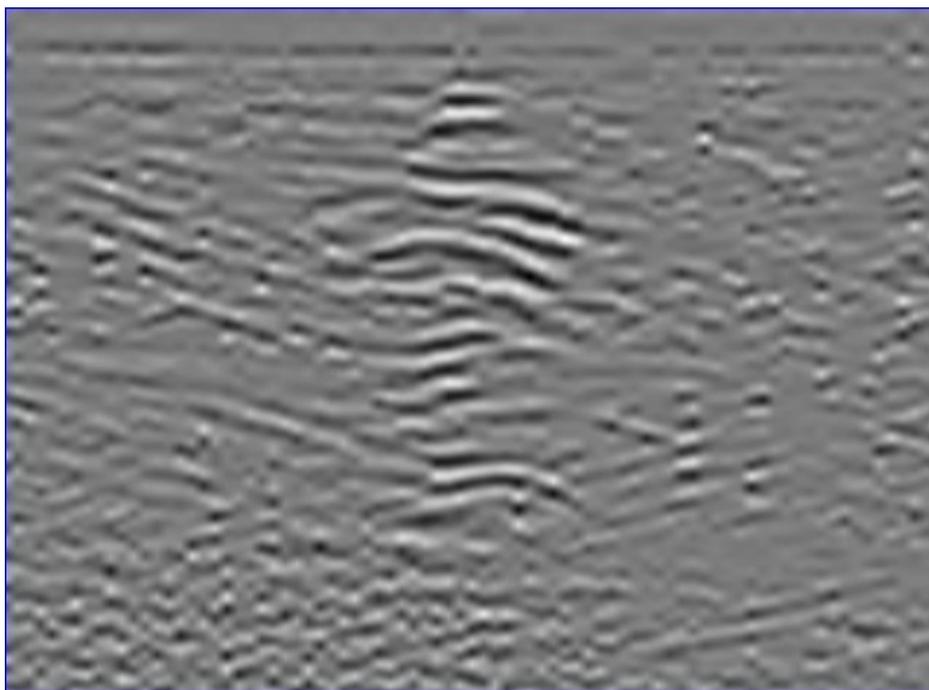


Figura 9.60: Seção *Time Lapse* 7, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 8 do sentido L/O. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P.

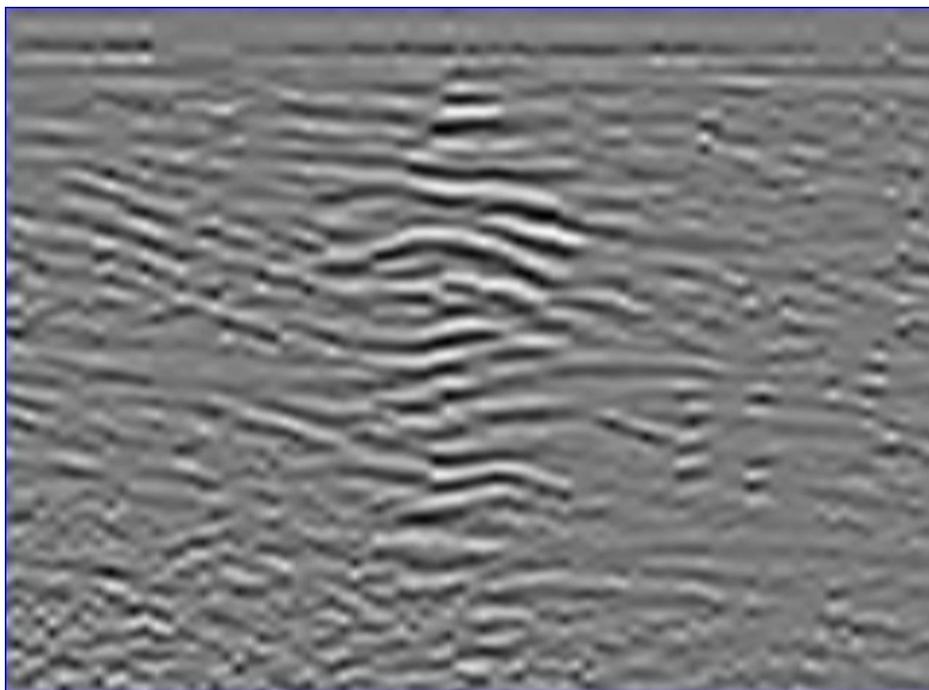


Figura 9.61: Seção *Time Lapse* 8, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 9 do sentido L/O. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P.

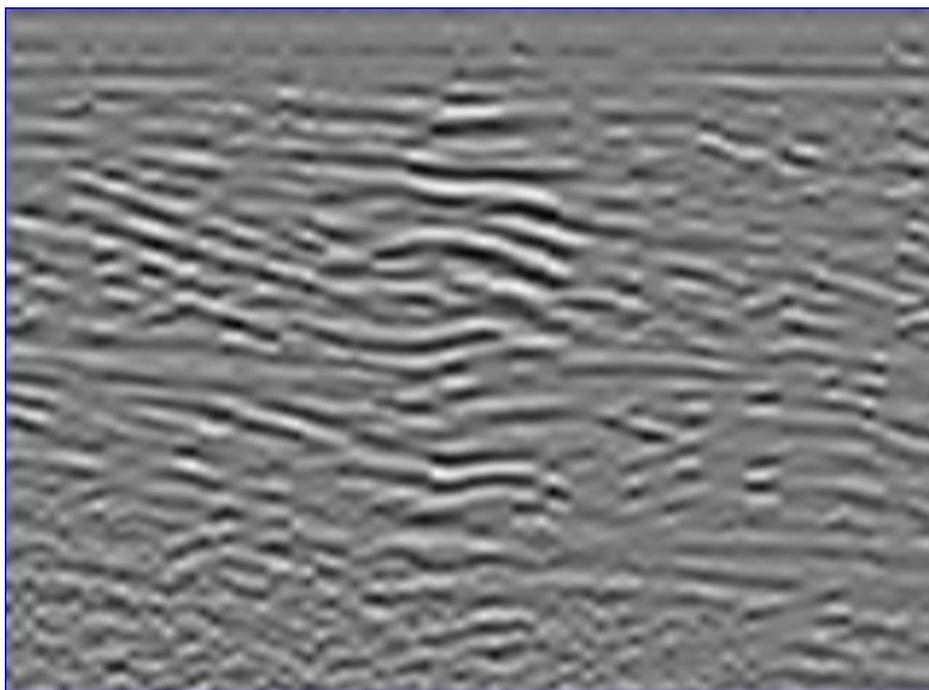


Figura 9.62: Seção *Time Lapse* 9, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 10 do sentido L/O. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P.

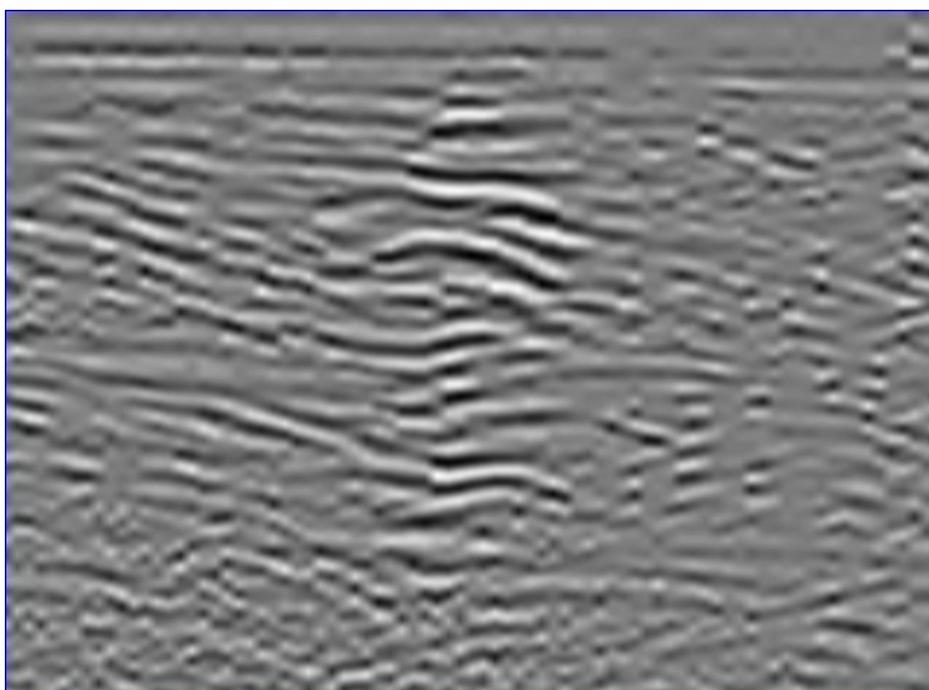


Figura 9.63: Seção *Time Lapse* 10, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 11 do sentido L/O. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P.

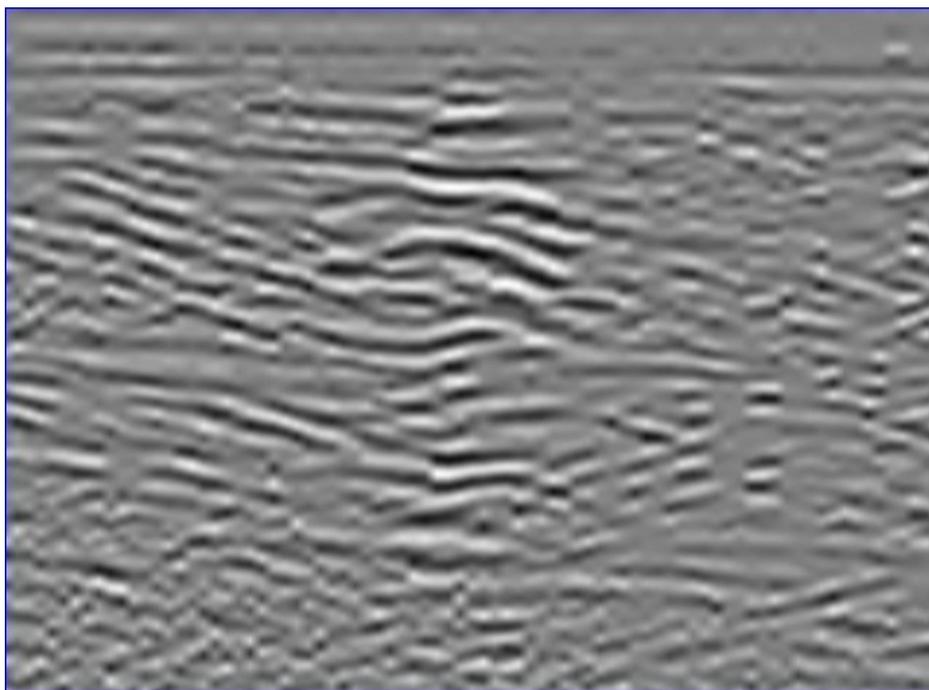


Figura 9.64: Seção *Time Lapse* 11, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 12 do sentido L/O. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P.

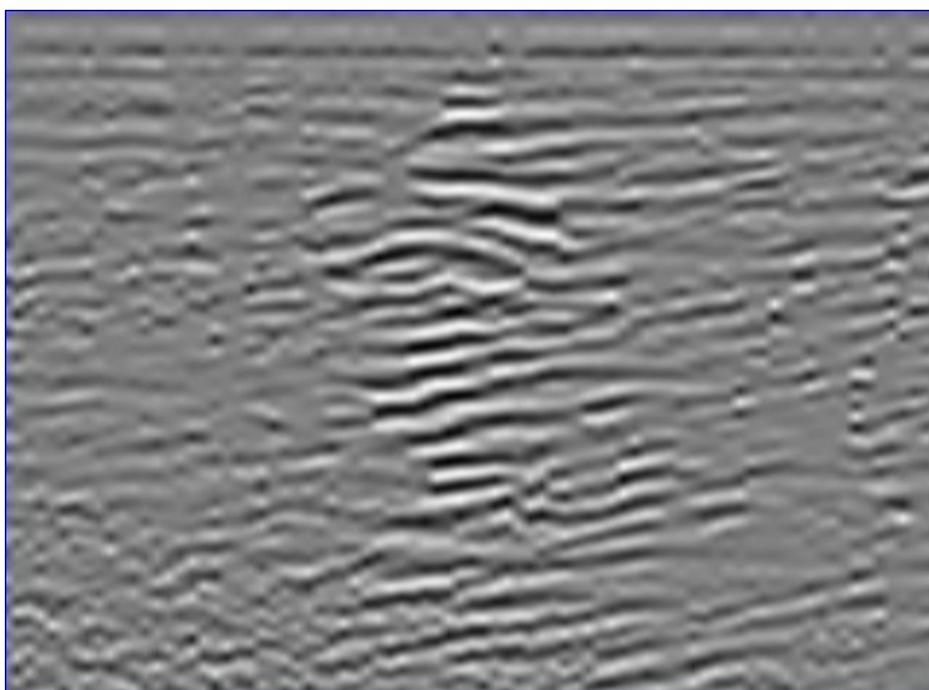


Figura 9.65: Seção *Time Lapse* 12, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 13 do sentido L/O. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P.

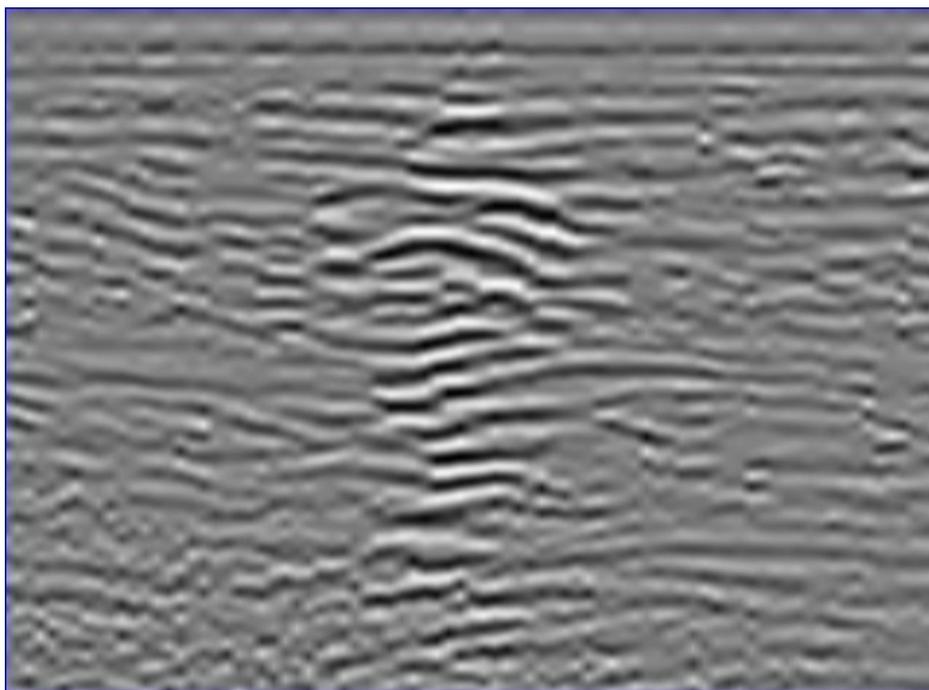


Figura 9.66: Seção *Time Lapse* 13, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 14 do sentido L/O. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P.

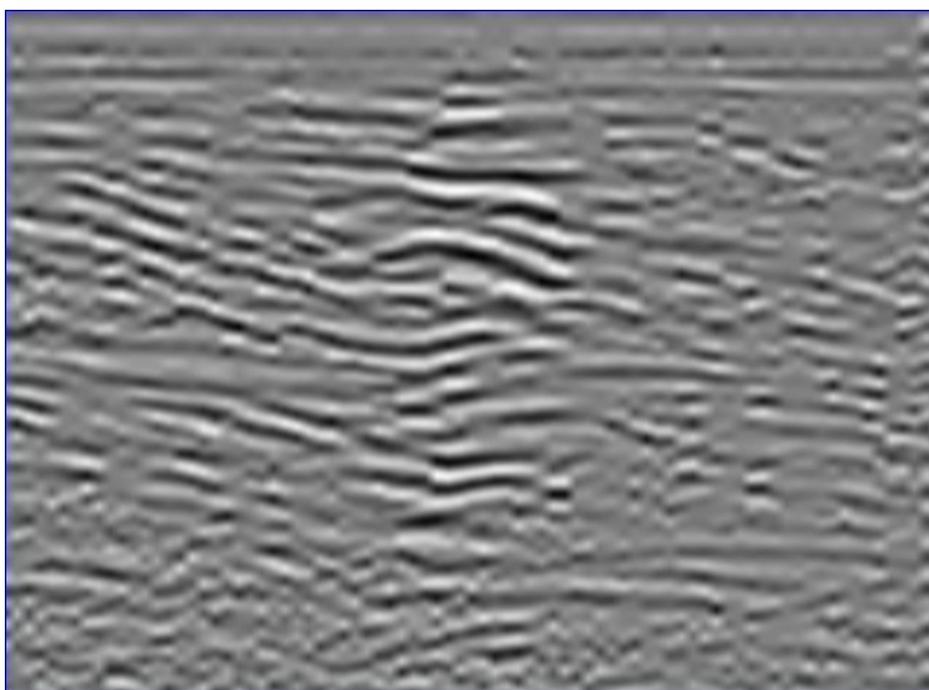


Figura 9.67: Seção *Time Lapse* 14, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 15 do sentido L/O. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P.

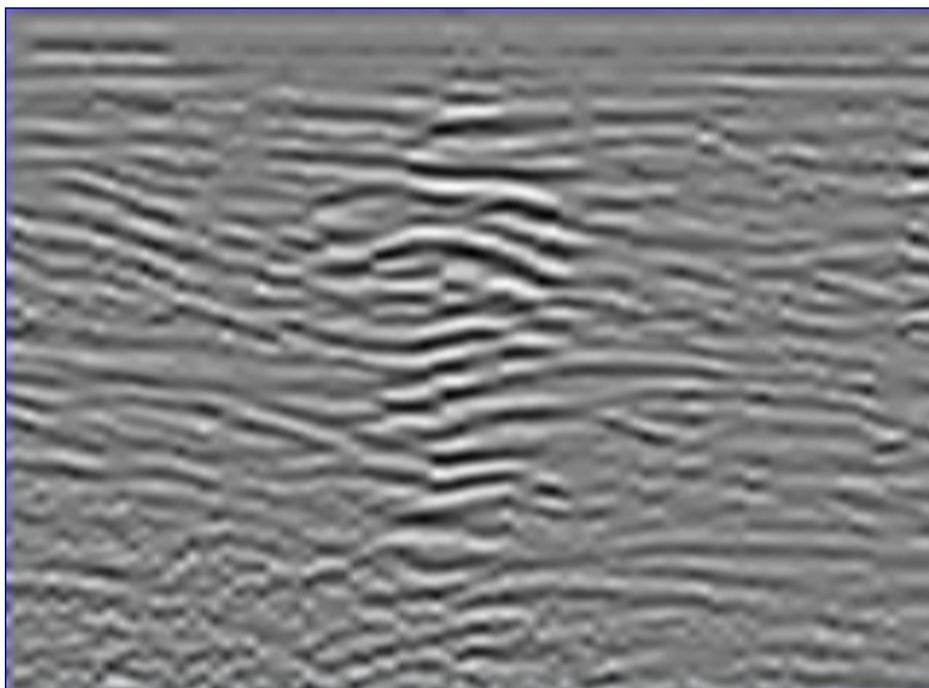


Figura 9.68: Seção *Time Lapse* 15, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 16 do sentido L/O. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P.

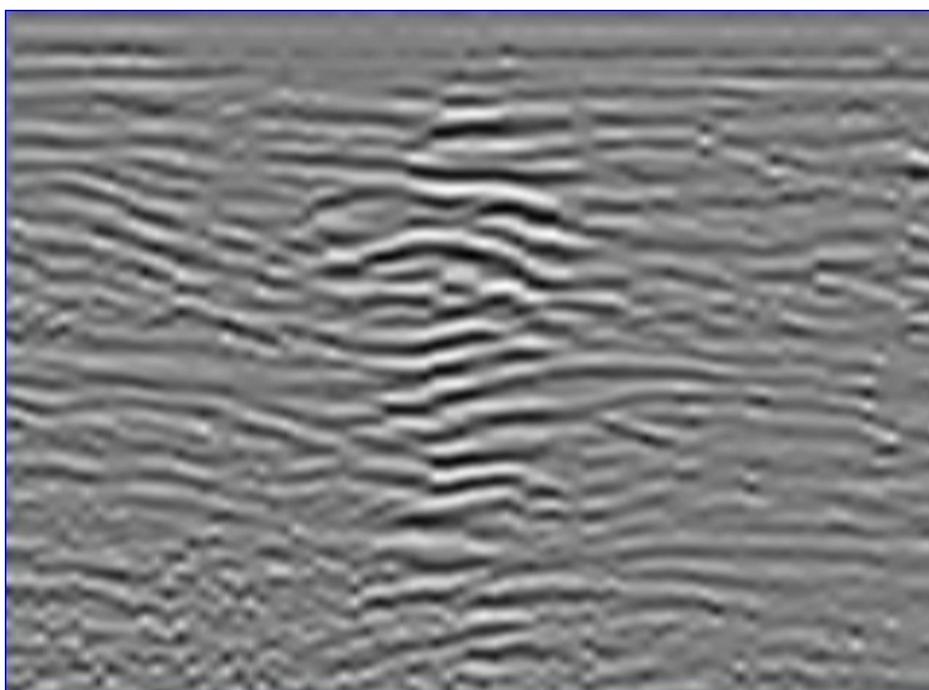


Figura 9.69: Seção *Time Lapse* 16, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 17 do sentido L/O. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P.

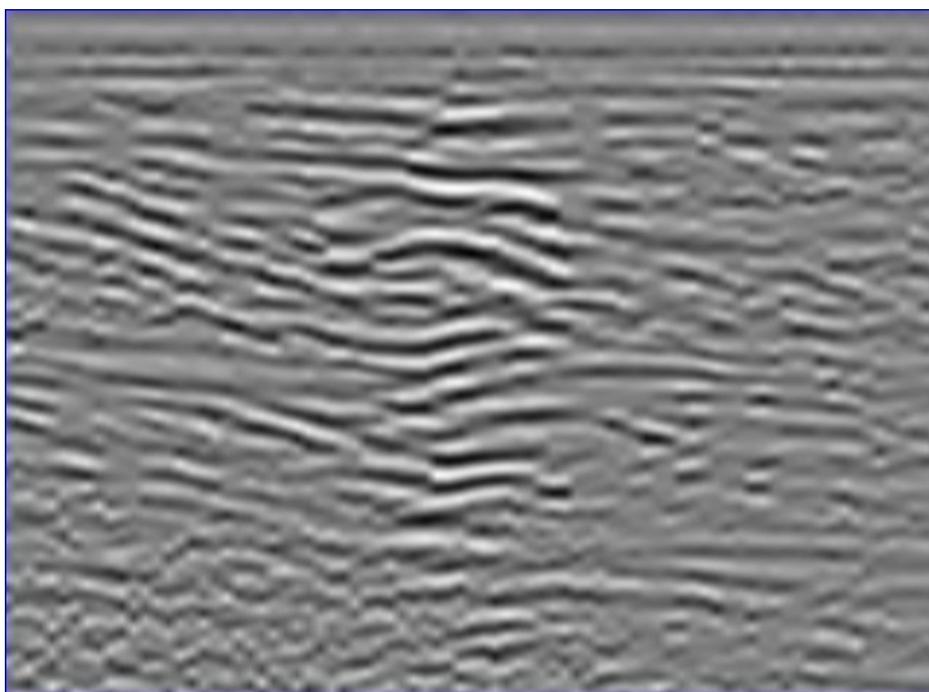


Figura 9.70: Seção *Time Lapse* 17, gerada pela diferença entre a seção 1 e a seção 18 do sentido L/O. Observar que as diferenças entre as seções tornam-se mais intensas na região do padrão de reverberações. Fonte: Reis, T. P.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANNAN, A.; DAVIS, J. Impulse radar sounding in permafrost. *Radio Science*, v. 11, n. 4, p. 383–394, 1976.
- ANNAN, A.P. & CHUA, L. Ground penetrating radar performance predictions. *The Geological Survey of Canada, Paper 90-4*, pp. 5-13., 1992.
- A.P., A. Sensors & software ground penetrating radar workshop notes. *1091 Brevik Place - Mississauga, Ontario - LAW3R7 - Canada, radar@sensoft.ca.*, 2001.
- CARUSO JR, F.; AWDZIEJ, J. Mapa geológico da ilha de santa catarina. *Brasilia, Brasil: UFRGS, DNPM, PETROBRAS, scale*, v. 1, n. 100,000, p. 1, 1993.
- CLAERBOUT, J. Spectral balancing. *Stanford Exploration Project*, v. 7, p. 172–182, 1975.
- DAVIS, J.; ANNAN, A. Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical prospecting*, v. 37, n. 5, p. 531–551, 1989.
- ENDRES, A.; CLEMENT, W.; RUDOLPH, D. Ground penetrating radar imaging of an aquifer during a pumping test. *Ground Water*, v. 38, n. 4, p. 566–576, 2000.
- FARMANI, M.; KEERS, H.; KITTEROD, N. Time-lapse gpr tomography of unsaturated water flow in an ice-contact delta. *Vadose Zone Journal*, v. 7, n. 1, p. 272, 2008.
- GALAGEDARA, L.; PARKIN, G.; REDMAN, J.; VON BERTOLDI, P.; ENDRES, A. Field studies of the gpr ground wave method for estimating soil water content during irrigation and drainage. *Journal of Hydrology*, v. 301, n. 1-4, p. 182–197, 2005.
- GAPLAN/SC. Atlas de santa catarina. *Rio de Janeiro, Aerofoto Cruzeiro, 173p.*, 1986.
- GAWTHORPE, R.; COLLIER, R.; ALEXANDER, J.; BRIDGE, J.; LEEDER, M. Ground penetrating radar: application to sandbody geometry and heterogeneity studies. *Geological Society, London, Special Publications*, v. 73, n. 1, p. 421–432, 1993.

- GODFREY, M.; BANNISTER, M.; NOBES, D.; SLETTEN, R. 3d time-lapse imaging of polygonal patterned ground in the mcmurdo dry valleys of antarctica. *Birmingham, UK: 12th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR2008)*, p. 15–19, 2008.
- HAENI, F.; HALLEUX, L.; JOHNSON, C.; LANE JR, J. Detection and mapping of fractures and cavities using borehole radar, 2005.
- HUISMAN, J.; HUBBARD, S.; REDMAN, J.; ANNAN, A. Measuring soil water content with ground penetrating radar: A review. *Vadose Zone Journal*, v. 2, n. 4, p. 476, 2003.
- KÖPPEN, W. Climatologia. méxico. *Fundo de Cultura Econômica.*, 1948.
- KURODA, S.; JANG, H.; KIM, H. Time-lapse borehole radar monitoring of an infiltration experiment in the vadose zone. *Journal of Applied Geophysics*, v. 67, n. 4, p. 361–366, 2009.
- LI, J.; CHEN, X.; ZHAO, W.; ZHANG, Y. Purposeless repeated acquisition time-lapse seismic data processing. *Petroleum Science*, v. 5, n. 1, p. 31–36, 2008.
- LUMLEY, D. Time-lapse seismic reservoir monitoring. *Geophysics*, v. 66, n. 1, p. 50, 2001.
- MCMECHAN, G.; GAYNOR, G.; SZERBIAK, R. Use of ground-penetrating radar for 3-d sedimentological characterization of clastic reservoir analogs. *Geophysics*, v. 62, n. 3, p. 786–796, 1997.
- NETO, P.; DE MEDEIROS, W. Uma abordagem prática para corrigir os efeitos de propagação no sinal do gpr, e sua importância na melhoria da qualidade do imageamento., 2003.
- ORSELLI, L. Climatologia. *GAPLAN-SC. Atlas de Santa Catarina*, p. 38–39, 1986.
- PLUMB, R.; NOON, D.; LONGSTAFF, I.; STICKLEY, G. A waveform-range performance diagram for ground-penetrating radar. *Journal of applied geophysics*, v. 40, n. 1-3, p. 117–126, 1998.
- STOCKWELL, J.W. & COHEN, J. The new seismic un\*x users manual, version 4.0. *SEG, Center of Wave Phenomena, Colorado School of Mines, CO 80401, USA*, 2008.
- STRAHLER, A. Geografia física. *Barcelona, Omega*, 767 p., 1977.
- TOMAZOLLI, E.; PELLERIN, J. Aspectos geológico-geomorfológicos do sul da ilha de santa catarina. *Anais 8º Encontro de Geógrafos da América Latina*, v. 3, p. 8–14, 2001.

- TRAVASSOS, J.M. & SILVA, J. R. Time-lapse gpr measurements of water injection., 2006.
- TRAVASSOS, J. M., P. K. J. R. . O. C. M. V. Time-lapse gpr measurements of fluid movements in the subsurface. *Anais do I Simpósio de GPR*, 2004.
- VAN DAM, R.; SCHLAGER, W. Identifying causes of ground-penetrating radar reflections using time-domain reflectometry and sedimentological analyses. *Sedimentology*, v. 47, n. 2, p. 435–449, 2000.
- VAN OVERMEEREN, R. Radar facies of unconsolidated sediments in the netherlands: A radar stratigraphy interpretation method for hidrology. *Journal of Applied Geophysics* 40, 1-18., 1998.
- YILMAZ, Ö.; DOHERTY, S. Seismic data processing, 1987.
- YOUNG, R. A. & SUN, J. Revealing stratigraphy in gpr data using domain filtering. *Geophysics*, v. 64-2, p. 435–442, 1999.
- YOUNG, R.; DENG, Z.; SUN, J. Interactive processing of gpr data. *The Leading Edge*, v. 14, p. 275, 1995.