



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA**

JOÃO ANDRADE DOS REIS JÚNIOR

**ESTUDO DE PLUMA DE CONTAMINAÇÃO POR COMBUSTÍVEL
COM O MÉTODO GPR E DESENVOLVIMENTO DE SIMULADOR
GEOFÍSICO PARA FINS EDUCATIVOS**

**BELÉM
2009**

JOÃO ANDRADE DOS REIS JÚNIOR

**ESTUDO DE PLUMA DE CONTAMINAÇÃO POR COMBUSTÍVEL
COM O MÉTODO GPR E DESENVOLVIMENTO DE SIMULADOR
GEOFÍSICO PARA FINS EDUCATIVOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará - UFPA, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Métodos Elétricos e Eletromagnéticos.

Orientadora: Profa. Dra. Lúcia Maria da Costa e Silva

BELÉM
2009

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação(CIP)

Biblioteca Geól. Rdº Montenegro G. de Montalvão

Reis Júnior, João Andrade dos

R553e Estudo de pluma de contaminação por combustível com o método GPR e desenvolvimento de simulador geofísico para fins educativos / João Andrade dos Reis Júnior. – 2009
172 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Programa de Pós-Graduação em Geofísica, Universidade Federal do Pará, Belém, 2009.

Orientador, Lúcia Maria da Costa e Silva.

1. GPR. 2. Radar. 3. Contaminação por hidrocarboneto. 4. Posto de Combustíveis. 5. Difusão da Geofísica. 6. Simulador geofísico. I. Universidade Federal do Pará II. Silva, Lúcia Maria da Costa e, Orient. III. Título.

CDD 20º ed.: 628.55

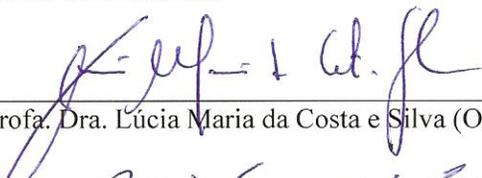
JOÃO ANDRADE DOS REIS JÚNIOR

**ESTUDO DE PLUMA DE CONTAMINAÇÃO POR COMBUSTÍVEL
COM O MÉTODO GPR E DESENVOLVIMENTO DE SIMULADOR
GEOFÍSICO PARA FINS EDUCATIVOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação
em Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade
Federal do Pará - UFPA, em cumprimento às exigências
para obtenção do título de Mestre em Geofísica.
Área de Concentração: Métodos Elétricos e
Eletromagnéticos

Data de aprovação: __/__/2009

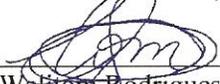
Banca Examinadora:



Prof. Dra. Lúcia Maria da Costa e Silva (Orientadora)



Prof. Dr. José Gouvêa Luiz (Membro)



Prof. Dr. Weliton Rodrigues Borges (Membro)

BELÉM
2009

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por ter me oferecido a oportunidade de cursar este mestrado, bem como por ter me dado suporte nos momentos em que não tinha onde me escorar.

Quero agradecer, ainda, em especial, a minha orientadora, Profa. Dra. Lúcia Maria da Costa e Silva, por ter me aceitado como orientando e, ainda, pela paciência e dedicação que teve no desenvolvimento desta dissertação.

Aos meus pais, que sempre acreditaram no meu sucesso, e não mediram esforços para que eu pudesse chegar até aqui.

A Profa. Dra. Ellen Gomes, pela disponibilização dos equipamentos de informática que possibilitaram a construção do simulador

Ao Prof. Dr. José Gouvêa Luiz, pelas sugestões oportunas para o enriquecimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Welitom Borges, pelo curso de processamento de dados GPR, que me possibilitou melhorar o processamento dos dados, bem como a diminuição do tempo de processamento.

Ao ex-técnico da SEMMA Wilson Oliveira, por ter disponibilizado a entrada no posto Cristal.

A Diógenes Leão Brasil e a Alberto Leandro, pela troca de idéias, pelos desenhos e sugestões que possibilitaram o planejamento do simulador.

Aos meus colegas da Pós-Graduação Clístenes Catete, Saulo Siqueira, Marcio Antunes e Diego da Costa Miranda, pela amizade e pelas trocas de idéias.

Ao Instituto de Geofísica, pela disponibilização da estrutura, bem como pela parte operacional, sendo necessário destacar o apoio da secretária Benildes Lopes.

Ao técnico Paulo Magalhães, Pompeu e Felipe Sousa, morador próximo ao Posto, pela ajuda nas coletas dos dados.

A Shirley dos Santos e Maria do Socorro, pela ajuda nas coletas de informações com os moradores vizinhos ao posto.

Ao Supermercado Belém Alimentos, representado por seu gerente Roberto Malam, por ter disponibilizado almoço durante coletas de dados no posto.

Ao CNPq, por ter me disponibilizado a bolsa de estudo, a qual me ajudou bastante a sobreviver em Belém.

Ao amigo Gustavo Alvarenga de Sousa, por ter me disponibilizado acesso gratuito a velox durante todo o mestrado, bem como por ter me liberado de pagar o aluguel no momento em que minha bolsa acabou e por ter cedido o seu notebook quando o meu queimou.

Ao colega Alex Raiol, por ter me ajudado nos primeiros passos no Surfer.

Ao prof. Dr. William Sauck pelas correções do abstract.

RESUMO

Este trabalho consistiu na investigação geofísica da possível contaminação de um posto de combustíveis em Belém-PA, bem como no desenvolvimento de um simulador geofísico para fins educativos. A investigação consistiu no levantamento de 13 perfis com o método geofísico eletromagnético *Ground Penetrating Radar* (GPR). Os radargramas obtidos, conjuntamente com os dados pré-existentes de sondagens mecânicas, *Volatile Organics Compounds* (VOC) e Benzeno-Tolueno-Etil-benzeno-Xileno (BTEX), permitiram identificar zonas de baixa reflexão do sinal eletromagnético (zonas atenuadas) em áreas com predominância de areia, o que indicaria contaminação. Como as medidas de GPR foram repetidas no período chuvoso, foi possível observar a redução da atenuação em perfil rico em areia, indicando a lixiviação dos ácidos graxos oriundos da biodegradação dos hidrocarbonetos, bem como o aumento da atenuação provocada pela argila, devido a sua elevada porosidade, e também, possivelmente, pelo aumento da biodegradação dos hidrocarbonetos que ficam retidos na argila. Este resultado constitui o primeiro caso inserido no simulador geofísico, experimento que permite mostrar o uso de diferentes métodos geofísicos. O simulador possui duas telas computacionais, a debaixo para simulação do modelo de subsuperfície escolhido e, a tela de cima, para representação da resposta geofísica obtida com o auxílio de uma unidade ótica que percorre o perfil representado na tela debaixo. Trata-se de uma modelagem analógica com recursos computacionais ainda não reportada na literatura, que permitirá mostrar diversos casos investigados constantes em dissertações e teses. O simulador poderá ser deslocado para empresas, universidades e secretarias, que fazem ou podem fazer uso da Geofísica, além de praças, escolas, etc., contribuindo de forma incisiva para a difusão da Geofísica como ferramenta na gestão de áreas contaminadas bem como para chamar a atenção da população para diferentes tipos de problemas, de modo a instruí-la sobre os mesmos.

Palavras-chaves: GPR. Radar. Contaminação por hidrocarboneto. Posto de Combustíveis. Difusão da Geofísica. Simulador geofísico.

ABSTRACT

The geophysical investigation of a possible hydrocarbon-contaminated site in Belém, Pará, state of Brazil, as well as the development of a geophysical simulator for education are described in this work. Thirteen profiles have been done with the electromagnetic geophysical method of Ground Penetrating Radar (GPR). The geophysical results together with the preexisting results from boreholes, Volatile Organics Compounds (VOC) and Benzene-Toluene-Ethylbenzene-Xylene (BTEX) had identified zones of low reflection of the electromagnetic signal (attenuated zones) in areas with dominantly sand, which could indicate the presence of contamination. The GPR profiles were repeated in the rainy period. This showed a reduction of the attenuation in zones in sand, which could indicate the leaching of the organic acids derived from the biodegradation of the hydrocarbons, as well as an increase in the attenuation in clay-rich zones, due to the high porosity of the clay and also, possibly due to the increase of the biodegradation of the hydrocarbons that are restrained in the clay. The result of this investigation is the first case used in the geophysical simulator, an experiment that allows one to show the use of different geophysical methods. The simulator has two computational screens, one for simulation of the selected subsurface model (for example the hydrocarbon-contaminated site), and a screen above the first one that shows the geophysical results obtained for the subsurface model when an optics unit is moved along the model transect. The simulator uses analog modeling with the help of computational aids that are not yet reported in the literature; one can show different studies that were done in the past and which are now parts of dissertations and theses. The simulator can be moved to companies, schools, universities and government agencies, that make or can make use of Geophysics. Additionally, it can be taken to parks and schools, in order to contribute to the dissemination of Geophysics as a tool in the management of contaminated areas. Finally, the simulator will be useful for calling the attention of the population to different types of problems, as well as to instruct them about these problems and their solutions.

Key Words: GPR. Radar. Hydrocarbon Contamination. Gasoline station. Diffusion of Geophysics. Geophysical simulator.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Nível freático, aquífero livre e aquífero confinado.....	23
Figura 2.2 – Contaminação do aquífero livre passando para o aquífero confinado através de poço mal revestido.....	24
Figura 3.1 – Zonas de biodegradação de hidrocarbonetos.....	31
Figura 3.2 – Evidencia as fases dos hidrocarbonetos.....	32
Figura 4.1– Um campo magnético variante no tempo atuando sobre uma bobina gera nesta um campo elétrico também variável.....	38
Figura 4.2 – Campo magnético sendo gerado através da passagem da corrente elétrica variável em um fio condutor.....	38
Figura 4.3 – Lei de Gauss para o campo elétrico.....	39
Figura 4.4 – Lei de Gauss para o campo magnético.....	39
Figura 4.5 – Relação entre velocidades e frequência a diferentes condutividades e relação entre atenuação e frequência a diferentes condutividades.....	49
Figura 4.6 - Aquisição de dados com perfis de reflexão com afastamento constante.....	51
Figura 4.7 – Sondagem de velocidade tipo WARR.....	51
Figura 4.8 - Sondagem de velocidade tipo CMP.....	51
Figura 4.9 – Perfil de tomografia.....	52
Figura 5.1 – Localização do posto.....	53
Figura 5.2 – Mapa do posto com a localização das seções geológicas SG01,SG02, SG03 e SG04.....	55
Figura 5.3 – Seções Geológicas. a) SG01. b) SG02. c) SG03. d) SG04. Dados extraídos de ENSR (2007).....	57
Figura 5.4 – Resultado de VOC.....	60
Figura 5.5 – Identificação dos poços de onde foram coletadas as amostras de águas.....	61
Figura 5.6 - Localização dos perfis na área do posto.....	64
Figura 5.7 – Gráfico da precipitação de Belém. Fonte: (INMET, 2009).....	65
Figura 5.8 – Frequências de corte usadas na elaboração do filtro.....	66
Figura 5.9 – Perfil01-400-50. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado.....	69

Figura 5.10 – Perfil01-200-100. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado. As linhas brancas delimitam as zonas atenuadas e as pretas pontilhadas, as camadas atenuadas.....	69
Figura 5.11 – Perfil01-200-200. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas brancas delimitam as zonas atenuadas, a azul, o nível hidrostático e as pretas pontilhadas, as camadas atenuadas	71
Figura 5.12 – Perfil02-400-50. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas pretas delimitam as concreções ferruginosas ou areia.....	73
Figura 5.13 – Perfil02-200-100. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas brancas delimitam as zonas atenuadas, as pretas pontilhadas, as camadas atenuadas, e as pretas contínuas, concreções ferruginosas ou areia. Já a sigla PM6 assinala o poço de monitoramento 6.....	75
Figura 5.14 – Perfil02-200-200. Radargramas a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas brancas delimitam as zonas atenuadas, a azul, o nível hidrostático, as pretas pontilhadas, as camadas atenuadas e as pretas contínuas, as concreções ferruginosas ou areia. Já a sigla PM6 assinala o poço de monitoramento 6.	78
Figura 5.15 – Perfil3-400-50. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas brancas delimitam as zonas atenuadas, as pretas pontilhadas, as camadas atenuadas e as pretas contínuas, as concreções ferruginosas ou areia. PM10 assinala o poço de monitoramento 10, T, tubulação e C, canaleta.....	80
Figura 5.16 – Perfil03-200-100. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas brancas delimitam as zonas atenuadas, as pretas pontilhadas, as camadas atenuadas e as pretas contínuas, as concreções ferruginosas ou areia. T assinala tubulação e C, canaleta.	81
Figura 5.17 – Perfil3-200-200. Radargramas. a) Bbruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas brancas delimitam as zonas atenuadas, a azul, o nível hidrostático, as pretas pontilhadas, as camadas atenuadas e as pretas contínuas, as concreções ferruginosas ou areia. PM10 assinala o poço de monitoramento 10, T, tubulação e C, canaleta.....	84
Figura 5.18 – Perfil 4-400-50. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas brancas delimitam as zonas atenuadas, as pretas contínuas, concreções ferruginosas ou areia, já as pretas pontilhadas, camadas atenuadas. PM10 assinala poço de monitoramento 10, T, por sua vez, tubulação e MF, o meio fio.	86

Figura 5.19 – Perfil 4-200-100. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. A linha branca delimita a zona atenuada e as pretas contínuas, as concreções ferruginosas ou areia, já as pretas pontilhadas, camadas atenuadas. PM10 e PM3 assinalam poços de monitoramentos 10 e 3, respectivamente, T, por sua vez, tubulação e MF, o meio fio.....	87
Figura 5.20 – Perfil 4-200-200. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. A linha branca delimita a zona atenuada e a preta contínua, as concreções ferruginosas ou areia. PM10 e PM3 assinalam poços de monitoramentos 10 e 3, respectivamente, T, por sua vez, tubulação e MF, o meio fio.	90
Figura 5.21 – Perfil 5-400-50. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas brancas delimitam as zonas atenuadas e a preta pontilhada, camada atenuada. TS1, TS2, TS3, TS4, TS5 e TS6 assinalam tanques subterrâneos e T, tubulação.....	92
Figura 5.22 – Perfil 5-200-100. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado. As linhas brancas delimitam as zonas atenuadas e as pretas pontilhadas, camadas atenuadas. TS1, TS2, TS3, TS4, TS5 e TS6 assinalam tanques subterrâneos e T, tubulação.	94
Figura 5.23 – Perfil 5-200-200. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas brancas delimitam as zonas atenuadas, a azul, nível hidrostático e as pretas pontilhadas, camadas atenuadas. TS1, TS2, TS3, TS4, TS5 e TS6 assinalam tanques subterrâneos e T, tubulação.	97
Figura 5.24 – Perfil 6-400-50. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas brancas delimitam as zonas atenuadas e as pretas pontilhadas, camadas atenuadas.....	99
Figura 5.25 – Perfil 6-200-100. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas brancas delimitam as zonas atenuadas, a azul, nível hidrostático e as pretas pontilhadas, camadas atenuadas.	101
Figura 5.26 – Perfil 6-200-200. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas brancas delimitam as zonas atenuadas, a azul, nível hidrostático e as pretas pontilhadas, camadas atenuadas.	104
Figura 5.27 – Perfil 7-400-50. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas brancas delimitam as zonas atenuadas e as pretas pontilhadas, camadas atenuadas. TS6 assinala tanque subterrâneo 6 e T, tubulação.	106

Figura 5.28 – Perfil 7-200-100. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas brancas delimitam as zonas atenuadas e as pretas pontilhadas, camadas atenuadas. TS6 assinala tanque subterrâneo 6 e T, tubulação.	108
Figura 5.29 – Perfil 7-200-200. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas brancas delimitam as zonas atenuadas, a azul, nível hidrostático e as pretas pontilhadas, camadas atenuadas. TS assinala tanque subterrâneo 6 e T, tubulação.....	111
Figura 5.30 – Perfil 8-400-50. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. A linha branca delimita a zona atenuada e as pretas pontilhadas, camadas atenuadas. T assinala tubulação e C, canaleta.....	113
Figura 5.31 – Perfil 8-200-100. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas brancas delimitam as zonas atenuadas e as pretas pontilhadas, camadas atenuadas. T assinala tubulação e C, canaleta.....	115
Figura 5.32 – Perfil 8-200-200. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas brancas delimitam a zona atenuada, a azul, o nível hidrostático e as pretas pontilhadas, camadas atenuadas. T assinala tubulação e C, canaleta.	118
Figura 5.33 – Perfil 9-400-50. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas brancas delimitam a zona atenuada e as pretas pontilhadas, camadas atenuadas. T assinala tubulação e C, canaleta.....	120
Figura 5.34 – Perfil 9-400-50. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas brancas delimitam as zonas atenuadas e as pretas pontilhadas, camadas atenuadas. T assinala tubulação e C, canaleta.....	122
Figura 5.35 – Perfil 9-200-200. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas brancas delimitam as zonas atenuadas, a azul, nível hidrostático e as pretas pontilhadas, camadas atenuadas. T assinala tubulação e C, canaleta.	125
Figura 5.36 – Perfil 10-400-50. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. A linha branca delimita a zona atenuada e a preta pontilhada, camada atenuada. TS2 assinala o tanque subterrâneo 2 e C, canaleta.....	127
Figura 5.37 – Perfil 10-200-100. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas brancas delimitam as zonas atenuadas, a vermelha, área do tanque 2, e as pretas pontilhadas, camadas atenuadas. TS2 assinala o tanque subterrâneo 2 e C, canaleta.	129

Figura 5.38 – Perfil 10-200-100. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas brancas delimitam as zonas atenuadas, a azul, nível hidrostático, a vermelha, área do tanque 2, e as pretas pontilhadas, camadas atenuadas. TS2 assinala tanque subterrâneo 2 e C, canaleta.....	132
Figura 5.39 – Perfil 11-400-50. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. A linha branca delimita a zona atenuada e as pretas pontilhadas, camadas atenuadas. TS1 assinala o tanque subterrâneo 1, T, tubulação e C, canaleta.....	134
Figura 5.40 – Perfil 11-200-100. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas brancas delimitam as zonas atenuadas, a azul, nível hidrostático, a vermelha, área do tanque 1, e as pretas pontilhadas, camadas atenuadas. TS assinala tanque subterrâneo e C, canaleta.....	136
Figura 5.41 – Perfil 11-200-200. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas brancas delimitam as zonas atenuadas, a azul, nível hidrostático, a vermelha, área do tanque 1, e as pretas pontilhadas, camadas atenuadas. TS assinala tanque subterrâneo e C, canaleta.....	139
Figura 5.42 – Perfil 12-400-50. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. A linha branca delimita a zona atenuada e as pretas pontilhadas, camadas atenuadas. TS1 assinala o tanque subterrâneo 1 e C, canaleta.....	141
Figura 5.43 – Perfil 12-400-50. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas brancas delimitam as zonas atenuadas, a vermelha, área do tanque 1, e as pretas pontilhadas, camadas atenuadas. TS assinala tanque subterrâneo e C, canaleta.....	143
Figura 5.44 – Perfil 12-400-50. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas brancas delimitam as zonas atenuadas, a azul, nível hidrostático, a vermelha, área do tanque 1, e as pretas pontilhadas, camadas atenuadas. TS assinala tanque subterrâneo e C, canaleta.....	146
Figura 5.45 – Perfil 13-400-50. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. C assinala a canaleta.	148
Figura 5.46 – Perfil 13-200-100. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. A linha branca delimita a zona atenuada, a azul, o nível hidrostático e as pretas pontilhadas, camadas atenuadas. C assinala a canaleta.	150

Figura 5.47 – Perfil 13-200-200. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. A linha branca delimita a zona atenuada, a azul, o nível hidrostático e as pretas pontilhadas, camadas atenuadas. C assinala a canaleta.	153
Figura 5.48 - Mapa de atenuações medidas com a antenna de 200 MHz em dezembro de 2009. a) Atenuações para 1 m de profundidade. b) Atenuações para 2 m de profundidade. c) Atenuações para 3 m de profundidade.....	157
Figura 5.49 - Mapa de atenuações medidas com a antena de 200 MHz em março de 2009. a) Atenuações para 1 m de profundidade. b) Atenuações para 2 m de profundidade. c) Atenuações para 3 m de profundidade.....	158
Figura 6.1 - Visão frontal do simulador.....	159
Figura 6.2 – Seqüência de telas mostradas na simulação.....	161

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	GEOFÍSICA AMBIENTAL.....	22
3	CARACTERIZACAO DOS COMBUSTÍVEIS EM SUBSUPERFÍCIE	27
3.1	MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CONTAMINANTES.....	29
3.1.1	Advecção.....	29
3.1.2	Dispersão hidrodinâmica	29
3.1.3	Atenuação	29
3.1.4	Sorção	30
3.1.5	Biodegradação dos hidrocarbonetos.....	30
3.2	FASES DE CONTAMINAÇÃO.....	31
3.2.1	Fase residual.....	32
3.2.2	Fase livre.....	33
3.2.3	Fase dissolvida	33
3.2.4	Fase vaporizada	33
3.3	EFEITOS NA SAÚDE	34
4	O MÉTODO GEOFÍSICO GPR.....	35
4.1	HISTÓRICO	35
4.2	PRINCÍPIOS FÍSICOS.....	36
4.2.1	As equações de Maxwell e as Relações Constitutivas da Matéria	37
4.2.2	Propagação de ondas eletromagnéticas.	41
4.2.3	Lei de Snell-Decartes e Equações de Fresnell	46
4.3	AQUISICAO DE DADOS	49
4.4	PROCESSAMENTO DE DADOS.....	50
5	ESTUDO DE UM POSTO EM BELÉM	53
5.1	CARACTERIZACAO DA ÁREA.....	53
5.1.1	Geologia.....	53
5.1.2	Hidrogeologia.....	58
5.1.3	Outros Estudos	58
5.2	AQUISIÇÃO DE DADOS	63

5.3	PROCESSAMENTO DOS DADOS	65
5.4	INTERPRETAÇÃO DOS DADOS	67
5.4.1	Perfil 1	68
5.4.2	Perfil 2	72
5.4.3	Perfil 3	79
5.4.4	Perfil 4	85
5.4.5	Perfil 5	91
5.4.6	Perfil 6	98
5.4.7	Perfil 7	105
5.4.8	Perfil 8	112
5.4.9	Perfil 9	119
5.4.10	Perfil 10.....	126
5.4.11	Perfil 11.....	133
5.4.12	Perfil 12.....	140
5.4.13	Perfil 13.....	147
5.5	INTEGRAÇÃO DOS RESULTADOS	154
6	O SIMULADOR GEOFÍSICO	159
7	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES FINAIS	162
	REFERÊNCIAS	164

1 INTRODUÇÃO

Uma das principais preocupações atuais da humanidade refere-se aos problemas que degradam a qualidade ambiental, entre eles, a contaminação do subsolo e dos recursos hídricos.

De acordo com o art. 3º da Lei 6.938/81 que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, a degradação da qualidade ambiental e a alteração adversa das características do meio ambiente são resultantes de atividades que, direta ou indiretamente: i) prejudiquem a saúde, a segurança e o bem estar da população; ii) criem condições adversas às atividades sociais e econômicas; iii) afetem desfavoravelmente a biota; iv) afetem as condições estéticas ou sanitárias do meio ambiente e v) lancem matérias ou energias em desacordo com os padrões estabelecidos (BRASIL, 1981).

Contaminação de uma área, por sua vez, diz respeito à comprovada introdução de quaisquer substâncias ou resíduos nocivos ao meio ambiente que nela tenham sido depositados, acumulados, armazenados, enterrados ou infiltrados de forma planejada, acidental ou até mesmo natural (CETESB, 2001).

Entre as diversas fontes ou atividades potencialmente geradoras da degradação da qualidade ambiental, destacam-se os postos de combustíveis. A contaminação do meio físico por combustíveis (gasolina, álcool e diesel) pode ocorrer através de derramamentos superficiais durante a operação de armazenamento do combustível no tanque bem como o abastecimento dos veículos e, mais perigosamente, através de vazamentos subsuperficiais de tanques corroídos e da tubulação que conecta tanques às bombas de combustíveis. A fuga de combustíveis pode provocar incêndios, explosões e contaminações do solo, do subsolo e da água superficial e subterrânea, causando problemas de saúde e segurança às populações próximas a esses empreendimentos comerciais.

Grande parte dos tanques de abastecimento subterrâneos (TAS) encontrados nos postos de combustíveis mais antigos é construída de aço, sem revestimento que os protejam contra corrosão. No mundo inteiro tem havido mudanças na legislação de modo a aumentar a segurança dos postos, entre as quais se destaca a exigência de tanques duplamente jaquetados.

Em 1995, Bratberg e Hopkings destacavam que, nos Estados Unidos, a Agência de Proteção Ambiental Norte-Americana (EPA) estimava que existissem mais de 1,5 milhões de tanques subterrâneos de armazenamento de gasolina, sendo que, deste total, 400.000 já teriam se adequaram à legislação federal que entrou em vigor no final de 1998. Ainda em função da legislação, mais de 250.000 casos de vazamentos haviam sido identificados e mais de 97.000 remediações completadas. Semanalmente, mais de 1000 novos vazamentos eram encontrados em todo o território norte-americano (BRATBERG; HOPKINS, 1995).

No Brasil, a partir da Resolução CONAMA 273 de novembro de 2000, que estabelece critérios para que os postos obtenham a sua licença de funcionamento, passou-se a cobrar a utilização de tanques duplamente jaquetados (BRASIL, 2000).

A preocupação com o estado dos tanques subterrâneos é grande, devido ao aumento do número de postos no Brasil instalados a partir dos anos 70 (CORSEUIL, 1997), pois a vida útil dos tanques utilizados é de aproximadamente 25 anos (COLE, 1994; BLACKMAN JR., 1996) e muitos ainda não foram trocados pelos tanques duplamente jaquetados.

Na região Amazônica, pode-se esperar o agravamento do problema, devido ao clima que aceleraria o processo de corrosão dos tanques, podendo diminuir o seu tempo de uso.

Segundo dados da Agência Nacional do Petróleo (ANP), em 2007 existiam 35.017 postos de combustíveis autorizados no Brasil (ANP, 2008). Isto indica que, se em média cada posto possui 60 mil litros de combustível armazenados em tanques subterrâneos, havia aproximadamente 2.1 bilhões de litros armazenados em subsuperfície.

No Pará, existem 1.128 postos de combustíveis cadastrados na ANP, que podem ser uma grande ameaça ao solo e a água subterrânea, porque muitos deles possuem tanques subterrâneos com mais de 20 anos de uso (ANP, 2008).

No Brasil, 20 a 30% dos postos apresentam problemas com vazamentos, sendo que, na grande maioria dos casos, os vazamentos só foram percebidos depois da descoberta dos seus efeitos (TIBURTIUS et al. 2004). De acordo com a CETESB, os postos respondem por 63% das áreas contaminadas em São Paulo (TEIXEIRA, 2009). Como os vazamentos ocorrem com baixas vazões em subsuperfície, demandam tempo até seus efeitos serem percebidos. Com frequência, até essa ocasião, uma grande quantidade de combustível já foi derramada no subsolo, o que agrava bastante o problema.

A detecção rápida de vazamentos de hidrocarbonetos em subsuperfície é muito importante, a fim de que se possa reduzir os impactos causados pela contaminação, evitando-se assim que maiores transtornos sejam ocasionados pelo seu espalhamento no meio ambiente e sejam minimizados os custosos procedimentos de limpeza do subsolo.

As investigações ambientais de fuga de combustíveis têm sido tipicamente conduzidas por métodos diretos de prospecção, através da execução de sondagens mecânicas em malha e coletas de amostras para análise geoquímica. Essas investigações, contudo, têm custos elevados e são demoradas.

Com o aumento dos casos de contaminações causados pelos postos de combustíveis, a demanda por investigações e mapeamentos de áreas contaminadas por estes empreendimentos aumentou consideravelmente. Conseqüentemente, aumentou também a procura por novas ferramentas de estudo eficazes, não invasivas e mais rápidas, o que conduziu ao uso dos métodos geofísicos para estas aplicações com comprovado êxito, como mostram Azambuja et al. (2000), Atekwana et al. (2000), Braga e Cardinali (2005), Sauck et al.(1998), Sauck (2000), Vickery e Hobbs, (1998) e vários outros.

Segundo Daniels et al., (1995), as propriedades físicas dos hidrocarbonetos que podem ser identificadas no subsolo são: a permissividade elétrica e a condutividade elétrica. Os hidrocarbonetos modificam as propriedades elétricas do subsolo, causando contrastes com o background, pois a permissividade e a condutividade dos hidrocarbonetos são baixas em relação às rochas do subsolo e à água subterrânea.

A detecção dos hidrocarbonetos em subsuperfície pode ser feita, contudo, tanto pelo aumento, como pela redução na resistividade elétrica do ambiente. No início da contaminação, os hidrocarbonetos apresentam alta resistividade, no entanto, com o passar do tempo, esses compostos orgânicos sofrem a ação de bactérias que provocam a sua biodegradação, produzindo ácidos que tornam o ambiente menos resistivo (SAUCK, 2000; ATEKWANA et al., 2000; SAUCK et al., 1998).

O contraste existente com o background, seja ele condutivo ou resistivo, torna possível a aplicação do método eletromagnético Ground Penetration Radar (GPR) de forma bastante satisfatória, como comprovado por vários trabalhos voltados à detecção de plumas contaminantes de hidrocarbonetos realizados com o método GPR e outros métodos geofísicos elétricos e

eletromagnéticos concomitantemente (BREWSTER; ANNAN, 1994; KRÜGER, 2002; ORTEGA, 2006; ARAÚJO, 1997; DEHAINI, 2001; MARQUES, 2007; BREWSTER et al., 1992; CARCIONE et al., 2000; CASTRO; BRANCO, 2003 e PEDROSA, 2004, entre outros).

As vantagens do uso do método GPR em estudos ambientais são: facilidade na aquisição dos dados, permitindo perfis contínuos em áreas urbanas, rapidez da aquisição e, especialmente, alta resolução. A utilização do GPR em relação a outras técnicas de investigações possibilita redução significativa da razão custo/benefício.

Neste trabalho, foi estudado com o GPR uma área possivelmente contaminada por hidrocarbonetos por um posto de Belém-PA, localizado no km 5 da rodovia Augusto Montenegro, segundo denúncias de moradores do Parque Verde a Secretaria Municipal de Meio Ambiente (SEMMA) e vários outros órgãos.

A contaminação do posto teria começado, segundo os moradores há cerca de 10 anos atrás. Durante todo esse tempo, a água permaneceu com sabor amargo e odor de combustível, sentidos com destaque na estação chuvoso (período de janeiro a junho) e se tornando dificilmente perceptível na estação seca (período de julho a dezembro).

No início de 2008, o problema intensificou-se. Várias pessoas começaram a apresentar: coceiras pelo corpo; queda de cabelos; alergias respiratórias e cutâneas; náuseas; dores abdominais; ardência nos olhos, garganta e narinas; dores de cabeça, etc., sintomas típicos de áreas contaminadas por hidrocarbonetos, o que levou á denúncia dos moradores, amplamente acompanhada pelos veículos de comunicação (por exemplo, O LIBERAL, 2008; TV LIBERAL, 2009; RECORD, 2009; SBT, 2009, entre outras¹).

Com o objetivo de verificar possíveis contaminações provenientes de vazamentos do Posto, a empresa Enviromental Services (ENRS) já havia realizado a investigação ambiental detalhada e análise de risco da área. A SEMMA, representada pelo geólogo Wilson Oliveira, organizou o levantamento gratuito com o método GPR do posto e de suas imediações pela UFPA, além de análises de amostras de águas de poços de abastecimento próximas à área do posto pelo laboratório da CEIMIC Análises Ambientais.

¹ Notícias sobre o posto mencionando as investigações da equipe de Geofísica da UFPA.

Apesar da Geofísica apresentar-se como uma boa alternativa para investigações ambientais, além de vários outros fins (petróleo, minerais-minério, água subterrânea, estruturas geológicas, geotecnia, arqueologia, forense, etc.), ela ainda é uma ferramenta pouco conhecida no Brasil, inclusive por profissionais envolvidos com problemas ambientais.

Pesquisa realizada pelo Programa de Extensão “Divulgando Geofísica” do Instituto de Geociências da UFPA com algumas centenas de alunos do último ano do 2º grau no final de 2009, por ocasião de campanha de divulgação do Curso de Graduação em Geofísica da UFPA como opção para o vestibular, apontou que praticamente a totalidade deles responderam questionário mencionando que não sabiam o que faz a Geofísica. É interessante notar que, como resultado da campanha de divulgação e conseqüente compreensão por parte do vestibulando da profissão geofísica, o número de alunos por vaga no vestibular cresceu 2,3 vezes (pulou de 4,5 candidatos por vaga para 10,5), superando os cursos de Engenharia Elétrica, Engenharia Civil, Engenharia da Computação e muitos outros (SBGF, 2007).

Esse resultado dá uma idéia de como a divulgação da Geofísica é necessária, com linguagem e formato acessíveis para não geofísicos, demonstrando suas aplicações. Ao revelar a subsuperfície, a Geofísica facilita a integração do estudo ambiental e tantos outros, sendo fundamental para a compreensão da Terra segundo uma visão holística.

Para divulgar o problema ambiental de contaminação por postos de combustíveis, problema ambiental mais freqüente em grandes cidades, e a importância da Geofísica como tecnologia de ponta na gestão dessas áreas contaminadas, tomando-se como exemplo os resultados obtidos com o método GPR no posto de Belém, foi desenvolvido um experimento que se denominou simulador geofísico (SGF).

A idéia do simulador surgiu da experiência do autor durante os 3 anos de monitoria no Laboratório de Demonstrações da UFPA (LABDEMON), fomentada pela experiência da orientadora na chefia no Laboratório de Modelagem Eletromagnética do Departamento de Geofísica da UFPA, com o apoio do professor de Física Diógenes e do engenheiro MC Alberto Melo.

A princípio pensou-se em confeccionar experimentos de modelagem analógica eletromagnética que simulassem problemas ambientais como o do posto. No entanto, o experimento, dependente do derramamento de contaminante, exigiria a limpeza periódica do

tanque com o solo simulado e, também, ganharia dimensões que prejudicariam sua portabilidade. Ademais, o experimento se referiria a apenas um tipo específico de aplicação da Geofísica, mas há várias aplicações que devem ser divulgadas e estão fechadas nas prateleiras de dissertações e teses das bibliotecas.

Para sanar estes problemas, foi pensada a construção de um experimento analógico com recurso virtual, em que a reprodução de diversos problemas e da investigação geofísica pudesse ser realizada tantas vezes quanto fosse de interesse de forma simples a custo baixo. Desta forma, surgiu o simulador de Geofísica.

Esta dissertação, portanto, abrange o estudo por meio do GPR do posto do km 5 e o desenvolvimento de um recurso, o simulador geofísico, de divulgação dos resultados encontrados. Em seu capítulo 2 é brevemente abordada a Geofísica Ambiental, bem como os principais métodos geofísicos utilizados para fins de investigação ambiental. No capítulo 3 são apresentadas as características dos hidrocarbonetos em subsuperfície e seus efeitos sobre os seres humanos. Já no capítulo 4 é feita uma descrição do método GPR. No capítulo 5, por sua vez, é feita a interpretação dos radargramas integrada com informações geológicas e de concentrações de VOC. No capítulo 6 é apresentado o experimento simulador de Geofísica e suas principais características. Finalmente, no capítulo 7, estão reunidas as conclusões e recomendações derivadas deste trabalho.

2 GEOFÍSICA AMBIENTAL

A água é imprescindível para a vida na Terra. A sua presença ou escassez determina a distribuição e a densidade da biomassa vegetal, animal e humana nas diversas regiões do planeta.

A Terra é coberta por cerca de dois terços de água, no entanto, esta abundância não se refere à água potável, pois esta é menos de 3% da água existente no planeta. A maior parte dessa água, 69%, está retida nas calotas polares sob a forma de geleiras e não podem ser utilizadas, apenas 0,3% forma rios e lagos e quase 30% constituem lençóis de água subterrânea (SHIKLOMANOV, 1999).

Estudos relevam que, até 2025, a falta de água potável poderá atingir 41 países, além de outros, parcialmente. Este colapso no abastecimento será vivido por 2/3 da população mundial, o que poderá gerar uma migração sem precedentes, formando contingentes enormes de refugiados ambientais (SHIKLOMANOV, 1999; SALATI et al., 1999).

Diante desta realidade de escassez de água potável, a água subterrânea passou a merecer especial atenção como fonte de água para consumo humano. A qualidade da água subterrânea, devido ao processo natural de filtragem que ocorre no subsolo e à sua proteção da ação antrópica pelo subsolo, é superior à qualidade das águas retiradas de rios, lagos e represas após os processos artificiais de tratamento.

As águas subterrâneas estão presentes em aquíferos constituídos por formações geológicas formadas por rochas porosas e permeáveis, que permitem tanto o armazenamento, como o movimento das águas. Os aquíferos podem se apresentar tanto próximos, quanto distantes da superfície; quanto mais profundos, mais preservada a água neles contida.

Com relação à profundidade os aquíferos se dividem em livres e confinados (Figura 2.1). Já com relação ao material saturado, os aquíferos se dividem em porosos, fissurados (ou fraturados) e aquíferos cársticos.

O aquífero livre é uma formação geológica permeável e superficial que se apresenta limitado em sua base por uma camada impermeável. O nível da água destes aquíferos varia diretamente com a intensidade das chuvas. Os poços furados em aquíferos livres apresentam o nível da água correspondente ao nível do aquífero, pois a água está com a mesma pressão que a

pressão atmosférica. O nível da água é designado então de nível freático. É o aquífero mais superficial, portanto, o mais sujeito à contaminação.

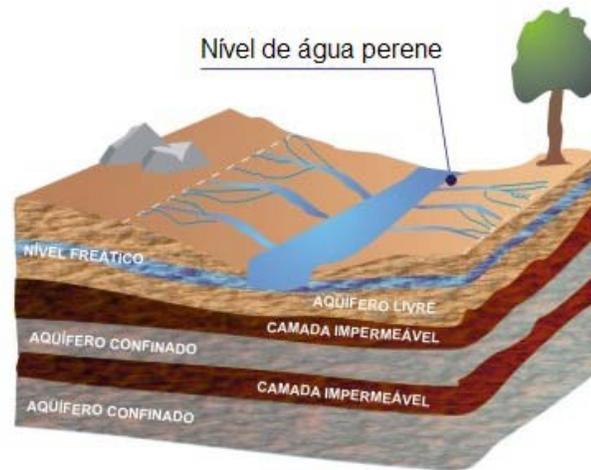


Figura 2.1 – Nível freático, aquífero livre e aquífero confinado.
Fonte: ABAS (2008).

Já o aquífero confinado é constituído por camadas permeáveis, confinadas entre duas outras camadas impermeáveis ou semipermeáveis. Os aquíferos confinados formam-se em locais onde ocorrem rochas sedimentares (bacias sedimentares). A sua recarga é feita através das chuvas, principalmente em locais onde a formação geológica que o constitui aflora à superfície. A pressão nestes aquíferos, devido ao peso das camadas confinantes subjacentes, pode causar artesianismo, ou seja, as águas dos poços subirem acima do teto do aquífero.

As águas subterrâneas, mesmo isoladas da superfície por camadas geológicas, são frequentemente contaminadas nos grandes centros urbanos, devido ao aumento populacional urbano desordenado, através de ocupações sem saneamento em áreas de mananciais de rios e lagos, falta de tratamento de esgotos, construções inapropriadas de depósitos de lixo e vários outros resíduos, inclusive cemitérios, e, ainda, instalações de postos de combustíveis sem o devido cuidado com vazamentos. São os vazamentos de combustíveis, o mais frequente dos problemas ambientais que atingem a subsuperfície e os aquíferos ali presentes (TEIXEIRA, 2009).

Os lençóis de águas subterrâneas próximos à superfície são os mais sujeitos à ação de agentes contaminantes. No entanto, como mostra a Figura 2.2, poço que atinge o aquífero próximo à superfície construído sem revestimento (poço A na Figura 2.2) leva a contaminação do aquífero mais superficial para o mais profundo (captado pelo poço B na figura).

Uma vez que a pluma de contaminação alcance os aquíferos, livre ou confinado, ela pode se estender a quilômetros de distância de onde foi formada.

A preservação da água subterrânea (e do solo) torna-se, portanto, imprescindível.

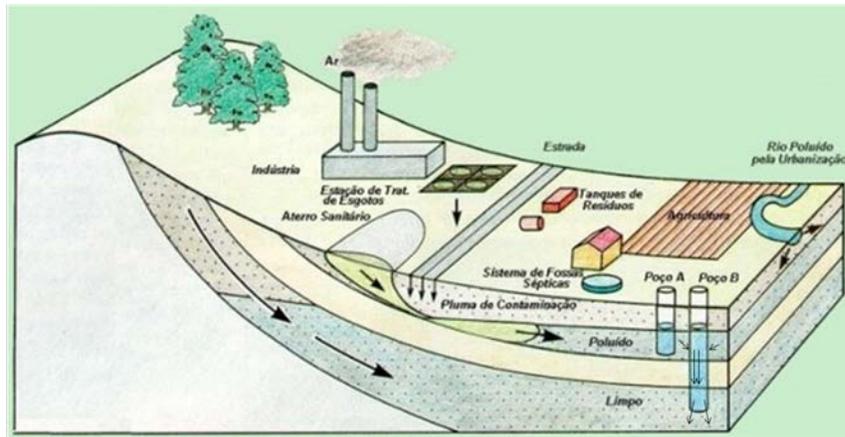


Figura 2.2 – Contaminação do aquífero livre passando para o aquífero confinado através de poço mal revestido.

Fonte: UNESCO (1992).

Nas últimas décadas, cresce o reconhecimento da Geofísica como uma importante ferramenta útil seja para apontar os locais mais propícios à descoberta de água subterrânea, seja para detectar e rastrear plumas contaminantes com economia de tempo e custos. Trata-se de uma ciência que possui várias metodologias não destrutivas e sequer invasivas do terreno, em outras palavras, que não afeta e não destrói as camadas selantes naturais ou artificiais, portanto, tecnologia ambientalmente correta.

A geofísica aplicada à localização de áreas contaminadas utiliza propriedades dos materiais em subsuperfície, tais como: condutividade elétrica, permissividade elétrica, susceptibilidade magnética, radioatividade, densidade e velocidade de propagação de ondas mecânicas e eletromagnéticas. Estas propriedades variam conforme a constituição mineralógica

da subsuperfície e o alvo, quantidade de água presente, fraturamento, porosidade, salinidade e outros.

É através dos contrastes entre as propriedades físicas que se podem localizar, de forma indireta, determinados materiais como tambores enterrados contendo produtos tóxicos, vazamentos de canos de distribuição de água, plumas de contaminações provenientes de postos de combustíveis, entre outros.

Vários trabalhos exemplificam o sucesso da Geofísica aplicada a problemas ambientais.

Carvalho Jr. e Silva (1996), através dos métodos potencial espontâneo e da eletrorresistividade, comprovaram que o fluxo de água subterrânea, abaixo do cemitério do Benguí em Belém do Pará, deslocava-se para residências vizinhas. Este estudo causou um grande impacto, culminando no fechamento do cemitério.

Marques (2007) utilizou quatro métodos geofísicos (eletrorresistividade, polarização induzida, GPR e o eletromagnético - Slingram) em um posto de combustível com histórico de vazamento, com o objetivo de detectar a pluma de contaminação, bem como identificar qual desses métodos apresentaria o melhor resultado para a localização da pluma contaminante. A autora constatou que a eletrorresistividade e a polarização induzida deram os melhores resultados em comparação com os métodos GPR e eletromagnético (slingram). Segundo a autora, o GPR não deu bons resultados devido à pequena profundidade de 3 m alcançada com antena usada (antena de 200 MHz), em comparação com a profundidade de 5 m do nível hidrostático.

Pedrosa (2007) aplicou o método GPR em 20 postos no município de Fortaleza para a identificação de possíveis áreas contaminadas por hidrocarbonetos. Com os dados de GPR, a autora mapeou em subsuperfície áreas contaminadas provenientes de vazamentos de tanques de combustível subterrâneos. A análise hidrogeoquímica de amostras de água coletada em piezômetros juntos aos postos comprovou resultados do levantamento geofísico. Foram identificados quatro postos comprovadamente impactados, nove suspeitos de contaminação e sete sem contaminação.

Cavalcanti et al. (2000) realizaram sondagens elétricas verticais de resistividade, seções de polarização induzida e medidas superficiais de potencial espontâneo para avaliar as condições hidrológicas subterrâneas na região do novo aterro sanitário de Salvador, Bahia, antes de sua efetiva utilização. Com os dados geofísicos, foi construído o quadro hidrológico-petrofísico da

área, que permitirá verificar os eventuais danos ambientais futuros relacionados à disposição de lixo urbano na área.

Nunes e Luiz (2006) desenvolveram um estudo com eletrorresistividade, potencial espontâneo, eletromagnético (slingram) e GPR, na área da indústria de Couro do Norte, Bairro de Maracacuera, no Distrito Industrial de Icoarací em Belém do Pará. Esse estudo indicou a direção e sentido do fluxo subterrâneo, bem como uma pluma de contaminação rasa na área do estudo causada, provavelmente, pelo despejo dos efluentes do curtume Couro do Norte.

Silva et al (2007) aplicaram o método da eletrorresistividade na zona urbana da cidade de Ji-Paraná, Estado de Rondônia, com o objetivo de determinar a extensão da contaminação do nitrato proveniente das inúmeras fossas negras e sépticas existentes no local. No presente estudo foram delimitadas as possíveis áreas contaminadas, as quais foram relacionadas a baixas resistividades apresentadas nos perfis próximos as residências.

Na Tabela 3.1 tem-se um resumo dos principais métodos geofísicos aplicados a problemas ambientais.

Tabela 2.1 - Principais métodos geofísicos usados em problemas ambientais.

Métodos Geofísicos	Aplicações Ambientais
Ground Penetrating Radar (GPR)	Identificação de dutos, tambores enterrados, localização de plumas de contaminações causadas por vazamentos de hidrocarbonetos e outro produtos químicos.
Eletromagnético (EM)	Localização de objetos condutivos e localização de plumas de contaminação.
Eletrorresistividade	Mapeamento hidrológico e localização de plumas de contaminação.
Polarização Induzida (IP)	Localização de pluma de contaminação.
Potencial Espontâneo (SP)	Modelo hidrológico, fluxo da água, infiltração em represas, etc..
Magnético	Localização de objetos magnéticos (tambores metálicos).
Radioatividade	Localização de objetos radioativos.
Gravimetria	Mapeamento da topografia do topo rochoso sob a qual foram depositados resíduos.

3 CARACTERIZACAO DOS COMBUSTÍVEIS EM SUBSUPERFÍCIE

Hidrocarbonetos são compostos orgânicos constituídos de hidrogênio e carbono, podendo ainda ter oxigênio, nitrogênio e enxofre em sua constituição. Existem muitos produtos constituídos por hidrocarbonetos, entre os quais estão os derivados de petróleo bruto, como a gasolina e o óleo diesel, e também o álcool combustível (etanol).

Tanto a gasolina como o diesel passam por vários processos, como a destilação, o refinamento e a aditivação, até poderem ser utilizados. É no processo da destilação, que há a concentração dos hidrocarbonetos benzeno, tolueno, etil-benzeno e xilenos, conhecidos como BTEX, que neste trabalho merecem especial atenção por serem de elevada toxicidade.

A gasolina é pouco solúvel em água, quando presente em subsuperfície. Contudo, em contato com a água subterrânea, dissolve-se parcialmente, sendo os compostos BTEX, que são seus constituintes mais solúveis em água, os primeiros a atingirem o lençol freático (CORSEUIL, 1992).

A gasolina vendida no Brasil é bastante diferente da gasolina vendida no mundo, pois é acrescida de 22% de etanol. As interações que ocorrem entre o etanol e os compostos BTEX diferenciam a pluma de derramamento daquelas que ocorrem onde é utilizada gasolina pura (CORSEUIL; MARTINS, 1997). As diferenças da pluma com etanol são:

- 1) solubilidade elevada do BTEX em água,
- 2) aumento da mobilidade do BTEX dissolvido na água e
- 3) biodegradação natural do BTEX dificultada, o que aumenta a persistência destes compostos na água subterrânea (FERNANDES; CORSEUIL, 1996; SANTOS et al, 1996, POWERS et al, 2001).

Nunes e Corseuil (2007) estudaram, durante 6,5 anos e meio, um derramamento controlado de gasolina brasileira em água subterrânea no campo experimental da Ressacada em Florianópolis (Santa Catarina). Aos 32 meses de monitoramento ocorreu a completa exaustão do etanol e aos 79 meses, a redução de mais de 90% da massa máxima dos compostos BTEX dissolvidos no meio. Os autores observaram, ainda, que a biodegradação do etanol permitiu a formação de uma biobarreira natural que, só após a sua completa degradação, permitiu a

aceleração da taxa de biodegradação dos compostos BTEX, impedindo o avanço da pluma com estes contaminantes.

Já o óleo diesel, por sua vez, é composto por vários hidrocarbonetos, porém com mais átomos de carbono do que a gasolina. Os compostos BTEX também estão presentes, no entanto, numa proporção menor do que na gasolina. Embora o volume de óleo diesel consumido no Brasil seja aproximadamente o dobro do volume de gasolina, o óleo diesel é menos preocupante na contaminação do solo e da água subterrânea, devido a sua menor mobilidade no meio poroso e por possuir compostos tóxicos em menor quantidade na sua composição do que as quantidades encontradas na gasolina (PEDROSA, 2004).

Os hidrocarbonetos, quando presentes em subsuperfície como contaminantes, são denominados de líquidos de fase não aquosa, Nonaqueous Phase Liquids (NAPL) e são divididos nas categorias leves e densos. Os light nonaqueous phase liquids (LNAPLs) são líquidos mais leves do que a água e os dense nonaqueous phase liquids (DNAPLs), mais densos que a água. A maioria dos combustíveis flutua na água subterrânea caracterizando-se como LNAPLs (MARQUES, 2007).

Segundo a American Petroleum Institute (API², 1972, apud MARQUES, 2007), os principais tipos de LNAPL são: a gasolina, destilados médios (diesel e querosene) e combustíveis pesados e óleos lubrificantes.

Em contaminações causadas por hidrocarbonetos, os LNAPLs descem pela zona vadosa devido às forças gravitacional e capilar, podendo sofrer desvios lateralmente devido à presença de camadas de condutividade hidráulica horizontal distinta que podem funcionar como caminho preferencial para sua migração. Estas camadas podem ser representadas por heterogeneidades geológicas e, muito frequentemente, por tubulações de águas, esgotos, águas pluviais, telefonia, eletricidade, etc. (OLIVEIRA, 1992).

² SIMMONS, G.; STRANGWAY, D. W.; BANNISTER, L.; BAKER, R.; CUBLEY, D.; LA TORRACA, G.; WATTS, R. The surface electrical properties experiment. Lunar Geophysics, p. 258-271. 1972.

3.1 MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CONTAMINANTES

Para se analisar o comportamento dos LNAPLs durante sua migração em subsuperfície, é necessário o entendimento de alguns processos físico-químicos (advecção, dispersão hidrodinâmica, atenuação e sorção), bem como biológicos (degradação anaeróbica e aeróbica).

3.1.1 Advecção

Na advecção, os contaminantes migram com o fluxo da água subterrânea, seguindo os vetores de fluxo e guardam uma relação direta com a velocidade de percolação no solo.

3.1.2 Dispersão hidrodinâmica

É o processo responsável pela diminuição da concentração dos contaminantes dissolvidos na água subterrânea, podendo se dar através de dois processos: dispersão mecânica e difusão molecular.

A dispersão mecânica (Figura 3.1) acontece pela diminuição da velocidade do fluxo nos poros, influenciados basicamente pela: variação da velocidade através dos poros, tortuosidade e fricção no interior dos poros do arcabouço (FERNANDES, 2002).

A difusão molecular é o fenômeno de diluição dos componentes. A movimentação de um soluto pelo processo de dispersão hidrodinâmica ocorrerá da área de maior concentração para a área de menor concentração, sendo o deslocamento proporcional à concentração inicial do mesmo (FETTER, 1998).

3.1.3 Atenuação

A atenuação refere-se à redução dos contaminantes transportados pela advecção ou diluição através de reações químicas ou físico-químicas. A atenuação química é mais intensa em

solos com maior capacidade de troca catiônica e atua reduzindo componentes das fases livres e adsorvidas.

3.1.4 Sorção

Os contaminantes dissolvidos na água subterrânea aderem aos grãos do material presente na subsuperfície no processo de sorção, resultando em retardo da migração em relação à velocidade do fluxo da água subterrânea. Desta forma, ocorre a redução das concentrações do contaminante. Este processo é diretamente influenciado pela quantidade de matéria orgânica e da argilominerais presentes.

3.1.5 Biodegradação dos hidrocarbonetos

A biodegradação dos hidrocarbonetos em subsuperfície ocorre através da ação de microorganismos nativos (fungos e bactérias), que os transformam em compostos menos tóxicos e reduzem sua massa em subsuperfície. Ela depende de fatores como: pH, temperatura, umidade, nutrientes, aeração, composição química do contaminante, concentração e toxicidade do contaminante, densidade microbiana, salinidade, presença de aceptores e capacidade metabólica dos microorganismos (BAESSA, 2007).

Na biodegradação dos hidrocarbonetos ocorre essencialmente uma reação de oxi-redução, em que o hidrocarboneto é oxidado (doa elétrons) e um receptor elétrico é reduzido (recebe elétrons) (MOREIRA, 2005).

Nas reações em condições aeróbicas, o oxigênio (O_2) atua como receptor de elétrons, enquanto que, em reações anaeróbicas, os receptores podem ser o nitrato (NO_3^-), o manganês (Mn^{4+}), o ferro (Fe^{3+}) e o sulfato (SO_4^{2-}). A biodegradação por via aeróbica pode ser representada pela seguinte reação (BAESSA op. cit.):



Apesar de estas reações serem termodinamicamente mais favoráveis, as concentrações de oxigênio tendem a diminuir, podendo chegar a zero em função do aumento da população de microorganismos e, conseqüentemente, do aumento da sua taxa de respiração (DUARTE, 2003).

Após isso, iniciam-se as reações de degradação mediadas por microorganismos facultativos e anaeróbicos sob baixa tensão ou mesmo ausência de O₂.

Nos ambientes anóxicos, a seqüência de reações depende dos microorganismos presentes, do pH e do potencial redox. Termodinamicamente, a ordem de ocorrência das reações é mostrada a seguir e ilustrada na Figura 3.2 (BAESSA, 2007):

redução de nitrato > redução de Mn⁴⁺ > redução de Fe³⁺ > redução de sulfato > metanogênese.



Figura 3.1 – Zonas de biodegradação de hidrocarbonetos.
Fonte: Modificada de Suthersan (2001).

3.2 FASES DE CONTAMINAÇÃO

A análise da migração e dispersão de contaminantes provenientes de derramamentos de hidrocarbonetos em subsuperfície é complexa, no entanto, durante sua migração, o hidrocarboneto passa por quatro fases de contaminação, como exemplificado na Figura 3.2.

Normalmente, um vazamento de combustível em um tanque de abastecimento promove diferentes fases de contaminação.

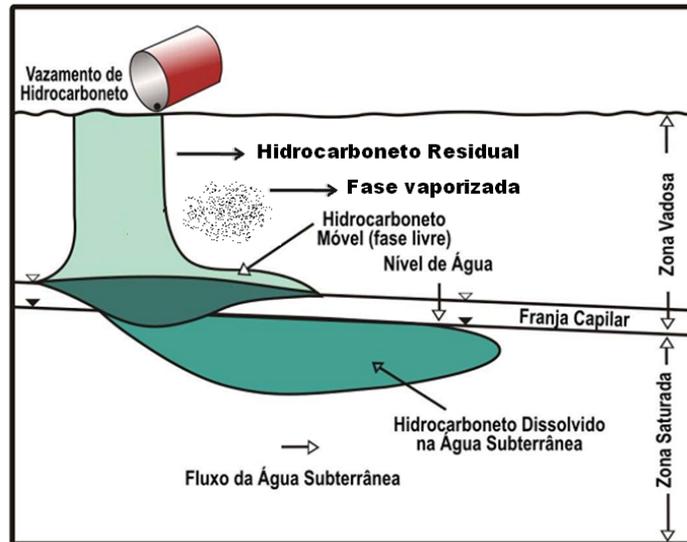


Figura 3.2 – Evidencia as fases dos hidrocarbonetos.
Fonte: Modificado de Suthersan (2001).

3.2.1 Fase residual

A fase residual, também denominada de fase adsorvida ou retida, ocorre em consequência da descida vertical dos hidrocarbonetos. Ela é caracterizada pela retenção do contaminante na superfície dos grãos ou interstícios do corpo geológico, devido a processos de sorção, adsorção química, absorção e ligações fracas. Nesta fase, o contaminante pode ser encontrado tanto na zona não saturada como na saturada. As flutuações verticais do nível de água subterrânea provocam um espalhamento do produto, podendo criar fase residual em áreas distantes de onde ocorreu o vazamento.

Nesta fase, a resistividade do solo tende a aumentar, principalmente em solos argilosos e se a contaminação é recente. No entanto, devido à biodegradação dos hidrocarbonetos em ambiente óxido ser rápida, pode ocorrer a formação de ácidos orgânicos e a lixiviação de sais, o que diminui consideravelmente o contraste elétrico (AZAMBUJA et al., 2000).

3.2.2 Fase livre

Na fase livre ou móvel, o LNAPL deposita-se nos poros das camadas geológicas, ficando sobrenadante à franja capilar. Segundo Sauck (2000), 50 % dos vazios do solo são ocupados por hidrocarbonetos, já os outros 50% são ocupados por água e ar. O deslocamento da fase livre é tanto vertical como horizontal, seguindo as flutuações naturais do nível d'água. A advecção é o processo predominante na formação e mobilização da fase livre dos hidrocarbonetos.

Com relação às características geelétricas, nesta fase o hidrocarboneto costuma ter contraste resistivo significativo com o background, em especial em solos argilosos (AZAMBUJA et al., 2000).

3.2.3 Fase dissolvida

A fase dissolvida é caracterizada pela solubilização dos hidrocarbonetos na água subterrânea. A solubilidade dos hidrocarbonetos depende de seus constiuintes. No caso da gasolina brasileira, a solubilidade é aumentada em função da adição do etanol. Esta fase é mais importante para fluidos menos viscosos como a gasolina.

A difusão molecular é o principal processo formador da fase dissolvida, responsável pela maior mobilidade dos contaminantes.

Com relação às características geelétricas, nesta fase não ocorre alteração significativa na resistividade do solo.

3.2.4 Fase vaporizada

É caracterizada pela presença da fase gasosa dos componentes voláteis dos combustíveis, ocupando os vazios do solo ou das rochas, sendo mais importante para os hidrocarbonetos de menor ponto de vaporização, como os que compõem a gasolina.

3.3 EFEITOS NA SAÚDE

O contato com os compostos BTEX, mesmo que por pouco tempo, pode ser muito perigoso.

Entre os BTEX, o benzeno é reconhecidamente o mais tóxico. A Agência Internacional de Pesquisa de Câncer da Organização Mundial da Saúde e a Agência Norte-Americana de Saúde e Segurança Ocupacional incluem o benzeno em suas listas de produtos cancerígenos. No Brasil, a ação cancerígena do benzeno foi reconhecida oficialmente a partir de 1994, pela portaria da Secretaria de Segurança e Saúde no Trabalho (SSST N.º 3), de 10 de março de 1994 (TIBURTIUS et al, 2004). Entre os cânceres, as leucemias são as mais freqüentes, em especial, as mais agudas. Brito et al. (2005) relata que uma exposição aguda (altas concentrações em curtos períodos) por inalação ou ingestão pode levar uma pessoa a óbito.

A inalação de tolueno ou xileno pode acarretar distúrbios no modo de falar, na visão, na audição, no controle dos músculos e outros. A associação entre benzenos e xilenos, por sua vez, pode provocar o surgimento de tumores cerebrais (TIBURTIUS et al., 2004).

O padrão de potabilidade para consumo humano dos compostos BTEX, segundo a portaria nº 518/2004 do Ministério da Saúde são mostrados na Tabela 3.1 (BRASIL, 2004). O padrão de potabilidade estabelecido para o benzeno, por exemplo, é de 0,005 mg/l. No entanto, quando uma certa quantidade de gasolina entra em contato com a água, a quantidade de benzeno pode chegar a 30mg/l (OLIVEIRA et al., 1990).

Tabela 3-1 – Padrão de potabilidade para consumo humano de acordo com a Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde.

Parâmetro	Valor Máximo Permitido -VMP (mg/l)
Benzeno	0,005
Tolueno	0,2
Etil-benzeno	0,17
Xileno	0,3

Fonte: Brasil (2004).

4 O MÉTODO GEOFÍSICO GPR

Radar de penetração do solo GPR (Ground Penetration Radar) é a nomenclatura geral aplicada as técnicas que empregam ondas de rádio, normalmente entre 10 a 2500 MHz, produzidas por meio de antena emissora próxima à superfície. Neste capítulo é apresentado uma breve revisão sobre o método GPR baseado em TOPP et al. (1980), DANIELS (1996), ANNAN (2002),

As ondas emitidas para a subsuperfície, ao atingirem interfaces com contrastes de propriedades eletromagnéticas, sofrem reflexões, refrações e difrações. Parte da energia do pulso retorna à superfície, sendo detectada, enquanto outra parte da energia se propaga na subsuperfície. A energia refletida é captada na mesma antena ou em outra antena. O sinal eletromagnético é, então, registrado em função do tempo de chegada, amplificado, digitalizado e gravado. Após o processamento dos dados o resultado obtido é uma imagem de alta resolução da subsuperfície rasa. O GPR é um método, por conseguinte, que se destaca pela sua utilidade para aplicações rasas, bem como pelo grande volume de dados que permite adquirir em um pequeno intervalo de tempo.

4.1 HISTÓRICO

O registro da primeira metodologia usando sinais eletromagnéticos para a localização de objetos enterrados em subsuperfície teria sido de autoria de Christian Hülsmeier (aos 22 anos de idade) em 1904. Somente em 1910, Gotthelf Leimbach e Heinrich Löwy publicaram a primeira utilização desta metodologia empregando sinais eletromagnéticos para detectar artefatos enterrados (DANIELS, 1996).

Já em 1926, Hülsenbeck registrou a primeira patente do uso do radar de pulsos para investigar estruturas soterradas (DANIELS, op. cit.). Em 1929, foi realizada na Áustria a primeira investigação com o GPR, cuja finalidade era determinar a espessura de uma geleira (OLHOEFT, 1996).

Passados 20 anos, em 1950, aviões da Força Aérea Americana com equipamentos com o princípio do GPR foram utilizados para verificar a espessura e as zonas de ruptura de geleiras na Groenlândia (OLHOEFT, 1996).

Stern, em 1967, desenvolveu um sistema de sondagem glacial, o qual foi utilizado no programa “Experimento das Propriedades Elétricas da Superfície Lunar da Apollo 17” (SIMMONS³ et al., 1972, apud OLHOEFT, op. cit.).

A disponibilização do GPR para fins comerciais só surgiu em 1970 quando Rex Morey e Art Drake criaram a Geophysical Survey System Inc. e iniciaram a venda comercial do sistema do radar de penetração do solo. Antes disso, os equipamentos eram construídos pelos próprios usuários (MOREY⁴, 1974, apud LIMA, 2006). Após o surgimento desta empresa, outras surgiram comercializando o GPR, como a A-Cube Inc. Geological Survey (DAVIS; ANNAN, 1989)

A partir da década de 80, com o avanço da eletrônica, aumentou a portabilidade dos equipamentos, facilitando a aquisição de dados e minimizando seus custos. Em consequência, aumentou consideravelmente o volume de pesquisas nas mais diferentes áreas, tais como: Arqueologia, Geologia, Engenharia, Criminalística Forense e em Meio-Ambiente (DANIELS, 2004).

4.2 PRINCÍPIOS FÍSICOS

A formulação e a aplicação da teoria de propagações de ondas eletromagnéticas remetem à formulação da base teórica do eletromagnetismo clássico proposta pelo físico Maxwell, em 1864, através de suas equações do eletromagnetismo.

³ SIMMONS, G.; STRANGWAY, D. W.; BANNISTER, L.; BAKER, R.; CUBLEY, D.; LA TORRACA, G.; WATTS, R. The surface electrical properties experiment. *Lunar Geophysics*, p. 258-271. 1972.

⁴ MOREY, R. M. Continuous subsurface profiling by impulse radar. In: *Engineering Foundation Conference on Subsurface Exploration for Underground Excavation and Heavy Construction*, Henniker. Proceedings. Henniker: American Society of Civil Engineers, p.213-232, 1974.

4.2.1 As equações de Maxwell e as Relações Constitutivas da Matéria

No século XIX, várias tentativas foram realizadas a fim de unificar os fenômenos elétricos, magnéticos e óticos conhecidos na época. A proposta de Maxwell foi aceita, justamente pela sua simplicidade e versatilidade, tanto do ponto de vista teórico como prático. As equações propostas por Maxwell eram um total de vinte equações, as quais, após sua morte aos 48 anos de idade, foram reescritas por Heaviside em apenas oito, que deram origem às quatro equações de Maxwell como conhecidas hoje (RIJO, 2001):

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (4.1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \quad (4.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = q \quad e \quad (4.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0, \quad (4.4)$$

em que \vec{E} é vetor campo elétrico, \vec{B} é o vetor densidade de fluxo magnético, \vec{D} é o vetor deslocamento elétrico, \vec{H} é o vetor intensidade de campo magnético, \vec{J} é o vetor densidade de corrente induzida (no caso, ôhmica) que flui dentro do meio onde o campo eletromagnético se propaga e q é a densidade de carga elétrica.

A equação 4.1 expressa a Lei de Faraday. Michael Faraday percebeu experimentalmente que um campo magnético variando no tempo, aplicado perpendicularmente sobre um corpo condutor, provoca a movimentação de cargas elétricas mediante a geração de um campo elétrico paralelo a esta corrente e ortogonal ao campo magnético variável (Figura 4.1). A equação 4.2, por sua vez, corresponde à Lei de Ampère. Ela evidencia que em um condutor percorrido por uma corrente elétrica variável possui ao seu redor um campo magnético (Figura 4.2).

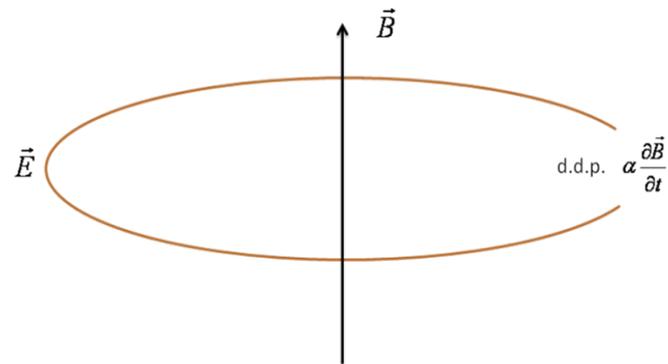


Figura 4.1– Um campo magnético variante no tempo atuando sobre uma bobina gera nesta um campo elétrico também variável.

Fonte: Modificada de ANNAN (1992).



Figura 4.2 – Campo magnético sendo gerado através da passagem da corrente elétrica variável em um fio condutor.

Fonte: Modificada de ANNAN (1992).

A equação 4.3 é a representação da lei de Gauss para o campo elétrico. Ela mostra que o fluxo elétrico para fora de uma superfície fechada é proporcional à carga contida na superfície fechada (Figura 4.3). Finalmente, a equação 4.4 descreve a lei de Gauss para o campo magnético. Ela mostra que para qualquer região fora de qualquer superfície fechada, o fluxo magnético será sempre igual à zero, ou seja, o fluxo magnético incidente sobre o pólo sul sempre será igual ao fluxo magnético emitido pelo pólo norte (logo, refere-se à inexistência de monopólos isolados magnéticos) (Figura 4.4).

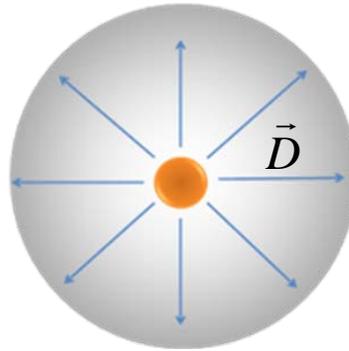


Figura 4.3 – Lei de Gauss para o campo elétrico.

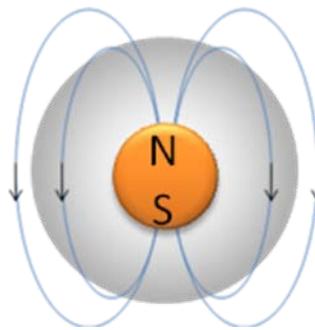


Figura 4.4 – Lei de Gauss para o campo magnético.

As equações 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 não fornecem as características físicas do meio, as quais são fundamentais. Para isso, torna-se necessário adequá-las, inserindo as relações constitutivas.

As relações constitutivas possibilitam entender a interação entre os campos eletromagnéticos com um determinado meio, através das seguintes propriedades físicas: condutividade elétrica (σ), permissividade dielétrica (ε) e permeabilidade magnética (μ). Elas representam a quantificação macroscópica do comportamento médio de elétrons, moléculas e íons, quando submetidos a campos eletromagnéticos externos (ANNAN, 2001).

A primeira relação constitutiva,

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}, \quad (4.5)$$

relaciona o vetor densidade de corrente de condução ao vetor campo elétrico, através de um fator de proporcionalidade, denominado condutividade elétrica (σ), expresso em Siemens/metro (S/m). A condutividade expressa a facilidade com que um corpo conduz corrente elétrica. O inverso da condutividade é a resistividade elétrica. Vários fatores contribuem para a variação da condutividade, tais como, quantidade de água, porosidade, concentração de sais dissolvidos, argilas e minerais condutivos (KELLER, 1987).

A segunda relação constitutiva relaciona o vetor deslocamento elétrico \vec{D} ao vetor campo elétrico \vec{E} , através da permissividade dielétrica (ϵ):

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}. \quad (4.6)$$

Nas aplicações com o GPR, é freqüente o uso de um parâmetro adimensional conhecido como permissividade dielétrica relativa ou constante dielétrica ϵ_r , definido por: $\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0$, em que ϵ_0 é o valor da permissividade dielétrica no vácuo ($\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$). A constante dielétrica expressa a quantidade de energia elétrica armazenada, quando uma substância é submetida a campos elétricos externos variáveis (OLHOEFT, 1996).

Finalmente, a terceira relação constitutiva relaciona o vetor de indução magnética \vec{B} ao vetor campo magnético \vec{H} , através da permeabilidade magnética μ :

$$\vec{B} = \mu \vec{H}. \quad (4.7)$$

É conveniente nas aplicações com o GPR, usar a permeabilidade magnética relativa $\mu_r = \mu / \mu_0$, em que μ_0 é a permeabilidade do vácuo ($\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ H/m}$).

A permeabilidade magnética, assim como a permissividade dielétrica, é uma grandeza física que expressa o acúmulo de energia, com a diferença que a permeabilidade magnética é consequência da indução magnética.

Para medidas realizadas na terra, a variação da permeabilidade magnética não é considerada, pois é assumido que esta não varia consideravelmente em relação à permeabilidade magnética do espaço livre (OLHOEFT, 1981; KELLER, 1987). Porém, segundo (ANNAN, 2001), permeabilidades magnéticas muito fortes causam efeitos que não podem ser totalmente desprezados na aplicação do método GPR.

4.2.2 Propagação de ondas eletromagnéticas.

Para se analisar a propagação de ondas eletromagnéticas, torna-se necessário a manipulação algébrica das leis de Faraday (equações 4.1) e a de Ampère (equação 4.2).

Substituindo-se as relações constitutivas (equações 4.5, 4.6 e 4.7), nas equações 4.1 e 4.2, obtém-se:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial(\mu\vec{H})}{\partial t}. \quad (4.8)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \sigma\vec{E} + \frac{\partial(\epsilon\vec{E})}{\partial t}. \quad (4.9)$$

Aplicando-se o operador rotacional na equação 4.8, tem-se que:

$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial(\vec{\nabla} \times \vec{H})}{\partial t}. \quad (4.10)$$

Comparando-se a equação 4.10 com a identidade vetorial

$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{E} = \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) - (\nabla^2 \cdot \vec{E}), \quad (4.11)$$

obtém-se :

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu \frac{\partial(\nabla \times \vec{H})}{\partial t} \quad (4.12)$$

Finalmente, substituindo-se a equação 4.9 na equação 4.12, pode-se escrever:

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu \frac{\partial}{\partial t} \left[\sigma \vec{E} + \frac{\partial(\epsilon \vec{E})}{\partial t} \right]. \quad (4.13)$$

De modo análogo obtém-se a equação semelhante para o campo magnético, mas, para os propósitos deste trabalho, trabalhar-se-á apenas com o campo elétrico.

Adotando-se que os campos variam harmonicamente, sob a forma

$$\vec{E} \propto E_0 e^{i\omega t} \text{ e} \quad (4.14)$$

$$\vec{H} \propto \vec{H}_0 e^{i\omega t}, \quad (4.15)$$

sendo a frequência angular $\omega = 2\pi f$, (com f como a frequência da antena transmissora do GPR),

tem-se as seguintes derivadas temporais

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = i\omega E_0 e^{i\omega t} \text{ e} \quad (4.16)$$

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = -\omega^2 E_0 e^{i\omega t}. \quad (4.17)$$

Para aplicações no GPR, considera-se que grande parte do campo elétrico é paralelo ao comprimento das antenas (DANIELS, 1996). Isto simplifica a manipulação algébrica dos campos, pois o campo elétrico tem a direção x e o campo magnético, a direção y , ou seja,

$$\vec{E} = (E_x, 0, 0) \text{ e } \vec{H} = (0, H_y, 0),$$

propagando-se a onda na direção z .

Substituindo-se as equações 4.16 e 4.17 na equação 4.13, obtém-se a equação de Helmholtz:

$$\frac{\partial^2 \vec{E}_x}{\partial z^2} = [-i\omega\mu(\sigma + i\varepsilon\omega)]\vec{E}_x. \quad (4.18)$$

O termo que multiplica \vec{E}_x na equação 4.18 é chamado de número de onda k^2 ; neste termo estão associadas todas as características elétricas e magnéticas de um meio qualquer:

$$k^2 = \omega^2 \mu \varepsilon - i\omega\mu\sigma, \quad (4.19)$$

o número de onda pode ser representado como,

$$k = \alpha + i\beta, \quad (4.20)$$

sendo α sua parte real e β sua parte imaginária. Elevando-se a equação anterior ao quadrado e comparando-se as partes real e imaginária obtidas com as partes real e imaginária da equação 4.19, pode-se escrever um sistema de equações cuja solução fornece:

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)^2} - 1 \right)} \quad (4.21)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)^2} + 1 \right)}. \quad (4.22)$$

A equação de Helmholtz (4.18) tem a seguinte solução:

$$E_x(z, t) = E_0^+ e^{(-kx + \omega t)} + E_0^- e^{(kx + \omega t)}, \quad (4.23)$$

simbolizando E_x a componente do campo elétrico na direção x , paralela à antena transmissora, e E_0^+ o campo elétrico que se propaga perpendicularmente ao eixo x , na direção da subsuperfície no sentido de z e E_0^- , o campo elétrico que se propaga na mesma direção, mas em sentido oposto ao eixo z .

Para o estudo da propagação em subsuperfície, considera-se somente o primeiro termo da equação 4.23, ou seja, o termo que corresponde à propagação da onda em subsuperfície. Substituindo-se nesta, a expressão de k dada por 4.20, tem-se que:

$$E_x(z, t) = E_0^+ e^{-\alpha z} e^{(\omega t - \beta z)}. \quad (4.24)$$

A equação 4.24 traduz um movimento harmônico simples de frequência angular ω que sofre um deslocamento de fase βz , sendo β , por isto, chamada de constante de fase. A amplitude da onda é atenuada segunda uma função exponencial dependente de αz , daí α ser chamada constante de atenuação.

No caso do GPR,

$$k^2 \approx \omega^2 \mu\epsilon, \quad (4.25)$$

pois é assumido que é satisfeita a seguinte relação:

$$\omega^2 \mu \epsilon \gg |i\omega\mu\sigma| \quad (4.26)$$

que caracteriza o chamado meio dielétrico de baixa perda.

De acordo com ANNAN (2001), para o regime radiante do GPR gerado pela sua alta frequência de operação, as equações 4.21 e 4.22 são então simplificadas como segue:

$$\alpha = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad e \quad (4.27)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\mu \epsilon} \quad (4.28)$$

A velocidade da onda eletromagnética no meio, por sua vez, passa a ser dada por:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad , \quad (4.29)$$

em que “c” é a velocidade da luz no vácuo ($\approx 0,3$ m/ns).

Para a análise de resolução é usado o comprimento de onda λ , dado por:

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_r}}. \quad (4.30)$$

A resolução do GPR varia de acordo com a frequência da antena: quanto maior a frequência, maior será a resolução vertical (menor o comprimento de onda – equacao 4.30) e menor a profundidade de investigação.

4.2.3 Lei de Snell-Decartes e Equações de Fresnell

Quando a onda eletromagnética atinge interfaces que apresentam propriedades eletromagnéticas contrastes com as do meio ocorrem fenômenos regidos pela Ótica, entre os quais destaca-se a reflexão das ondas em subsuperfície, uma vez que é através deste fenômeno físico que os objetos e estruturas geológicas são identificados. Para isso, torna-se necessário conhecer a lei de Snell-Decartes e as equações de Fresnel.

A lei de Snell – Descartes recebeu este nome em homenagem aos cientistas Snell e Descartes, que, apesar de terem trabalhado independentemente, chegaram à mesma conclusão sobre a dependência entre os ângulos de incidência, reflexão e refração da onda eletromagnética em interfaces planas das propriedades elétricas que caracterizam os meios por onde as ondas se propagam e relaciona-os com as velocidades de propagação das ondas nos meios. O ângulo de reflexão é igual ao de incidência da onda.

Já as equações de Fresnel, possibilitam quantificar as amplitudes dos campos elétricos transmitidos nas interfaces planas-paralelas. A antena receptora do GPR registra os pulsos eletromagnéticos refletidos nessas interfaces, possibilitando localizá-las.

Os coeficientes de reflexão são definidos de acordo com a incidência de um campo elétrico qualquer na interface, que pode ser decomposto em duas partes, uma, conhecida como modo TE (Transverse Electric Mode - Modo Transversal Elétrico), em que E_y é transversal à direção z , e outra, como modo TM (Transverse Magnetic Mode - Modo Transversal Magnético), em que H_y é transversal à direção z .

Os coeficientes de reflexão de Fresnel R_{TE} e R_{TM} para os modos TE e TM, são dados, respectivamente, por (LIMA, 2006):

$$R_{TE} = \frac{\cos(\theta_i) - \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}} \sqrt{1 - \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}\right) \text{sen}^2(\theta_i)}}{\cos(\theta_i) + \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}} \sqrt{1 - \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}\right) \text{sen}^2(\theta_i)}} \quad \text{e} \quad (4.31)$$

$$R_{TM} = \frac{-\cos(\theta_i) + \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}} \sqrt{1 - \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}\right) \text{sen}^2(\theta_i)}}{\cos(\theta_i) + \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}} \sqrt{1 - \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}\right) \text{sen}^2(\theta_i)}}, \quad (4.32)$$

em que θ_i é o ângulo de incidência da onda eletromagnética.

Segundo Annan (2001), quando a separação das antenas transmissora e receptora do GPR é relativamente pequena, o ângulo $\theta_i \approx 0$ e as equações 4.31 e 4.32 reduzem-se à

$$R_{TE} = R_{TM} = R = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}}, \quad (4.33)$$

ou ainda em

$$R = \frac{v_2 - v_1}{v_2 + v_1}, \quad (4.34)$$

em que ε_1 e ε_2 representam as constantes dielétricas das camadas do meio superior e inferior respectivamente, assim como v_1 e v_2 são as respectivas velocidades de propagação do pulso nas camadas. Em todos os casos, a magnitude de R varia de ± 1 .

A equação 4.33 mostra que, quanto maior o contraste entre as camadas, maior será a quantidade de energia refletida. Na Tabela 4.1 percebe-se que a permissividade dielétrica relativa da água é muito maior que a dos materiais geológicos secos. A resposta do GPR é, portanto, extremamente sensível ao conteúdo de água no meio.

Tabela 4-1 - Constante dielétrica (ϵ_r), condutividade elétrica (σ), velocidade (v) e atenuação (α) de alguns materiais.

Material	ϵ_r	σ (mSm)	v (m/ns)	α (dB/m)
Ar	1	0	0,3	0
Água destilada	80	0,01	0,033	2×10^{-3}
Água pura	80	0,5	0,033	0,1
Água do mar	80	3×10^4	0,01	10^3
Areia seca	3-5	0,01	0,15	0,01
Areia saturada	20-30	0,1-1	0,06	0,03-0,3
Calcáreo	4-8	0,5-2	0,12	0,4-1
Folhelho	5-15	1-100	0,09	1-100
Silte	5-30	1-100	0,07	1-100
Argilas	5-40	2-1000	0,06	1-300
Solo argiloso saturado	15	50	0,07 - 0,09	21
Solo argiloso seco	2.4	0,27	0,19	0,28
Granito	4-6	0,01-1	0,13	0,01-1
Sal seco	5-6	0,01-1	0,13	0,01-1
Gelo	3-4	0,01	0,16	0,01
Concreto	4-10	1-0,1	0,1	0,5-2,5
Metal	300	10^{10}	0,017	$9,5 \times 10^8$
PVC	3-3	0	0,11	-
Gasolina	1,94	10^7	0,22	-
Benzeno	2,28	10^7	0,2	-
Metanol	32,6	34	0,052	-
DNAPL	2,3	10^7	0,19	-

Fonte: Modificada de Davis e Annan (1989); Zeng e Mcmechan (1997).

Camadas argilosas saturadas em água absorvem as ondas eletromagnéticas de tal forma, que são virtualmente opacas ao radar. Já o lençol freático é um grande refletor das ondas e pode ser facilmente localizado com o GPR, uma vez que grande parte da energia é refletida de volta à superfície, porém, por este motivo, pode prejudicar a visualização das camadas logo abaixo dele.

Outro fator significativo sobre a influência de camadas saturadas de água é o fenômeno da relaxação molecular, que ocorre próximo à frequência de 10 GHz. A Figura 4.5 mostra a relação entre a velocidade e a frequência e a atenuação e a frequência para diferentes valores de condutividade.

Na Figura 4.5 observa-se que, na faixa de 10 à 1000 Mhz, a velocidade da onda permanece essencialmente constante e não é dispersa para condutividades menores do que 100mS/m. Por isso, os sistemas GPR operam nessa faixa de frequências. A velocidade aumenta para frequências maiores que 1000MHz devido à relaxação da molécula de água (DAVIS; ANNAN, 1989).

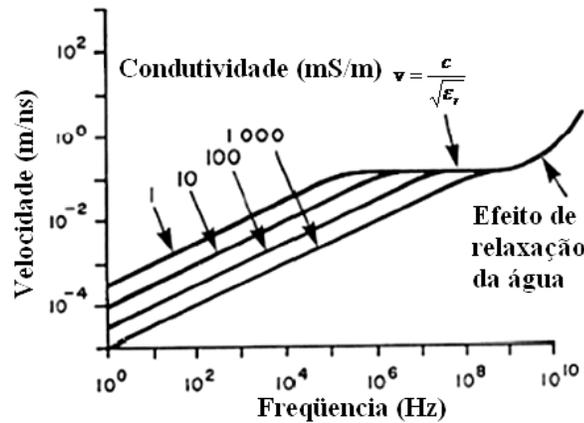


Figura 4.5 – Relação entre velocidades e frequência a diferentes condutividades e relação entre atenuação e frequência a diferentes condutividades.

Fonte: Adaptada de (DAVIS; ANNAN, 1989).

4.3 AQUISICAO DE DADOS

Os dados de GPR podem ser adquiridos por meio de perfis de reflexão com afastamento constante, sondagens de velocidade (CMP e WARR) e tomografia.

Os perfis de reflexão com afastamento constante utilizam uma antena mono-estática ou então um par de antenas bi-estáticas afastadas por uma distância fixa (offset comum) que é transportado passo a passo nos perfis (Figura 4.6). O resultado é uma imagem com o eixo horizontal mostrando as posições ocupadas pelas antenas e o eixo vertical, o tempo de ida da onda da superfície até as interfaces com contrastes de propriedades dielétricas onde sofreu reflexão até sua volta.

Com o arranjo WARR uma das antenas é mantida fixa enquanto a outra é sucessivamente afastada da primeira (Figura 4.7). Com o arranjo CMP, por sua vez, a abertura entre as antenas (transmissora e receptora) é crescente em sentidos opostos, partindo-se de um ponto central fixo (Figura 4.8). As sondagens de velocidade WARR e CMP servem para estimar a velocidade da onda eletromagnética no meio, pois sabendo-se a velocidade, pode-se converter o tempo duplo dos perfis de reflexão em profundidade e verificar se a reflexão proveio de um alvo geológico ou de interferências superficiais.

A tomografia consiste em colocar a antena transmissora em um poço e a receptora em outro poço ou mesmo colocar uma antena em um poço e a outra na superfície do terreno (Figura 4.9).

4.4 PROCESSAMENTO DE DADOS

O processamento dos dados compreende, resumidamente, as seguintes etapas:

Pré-processamento – Nesta etapa é feita a edição do radargrama, que permite a correção de erros de cabeçalho, mudança nas cores dos radargramas e ajuste do tempo zero e correção de topografia;

Aplicação de ganhos – devido à atenuação natural da onda no subsolo, pode ser necessário aplicar ganhos aos dados para evidenciar as amplitudes correspondentes aos refletores em maiores profundidades; indesejáveis e filtros no domínio da frequência, eliminar as ondas com comprimentos de ondas mais longos, destacando a continuidade lateral dos refletores;

Filtragem digital – Etapa em que são reduzidos ou mesmo eliminados os ruídos dos dados por meio de vários filtros;

Migração – Corpos pontuais geram difrações, sendo registrados como hipérboles, enquanto estruturas planares que mergulham, aparecem deslocadas de suas posições verdadeiras com semi-hipérboles em suas extremidades, mas por meio da migração, as hipérboles são colapsadas e os refletores inclinados levados às suas corretas posições.

Dados processados facilitam o trabalho final, a interpretação da subsuperfície investigada, o que é feito de modo qualitativo.

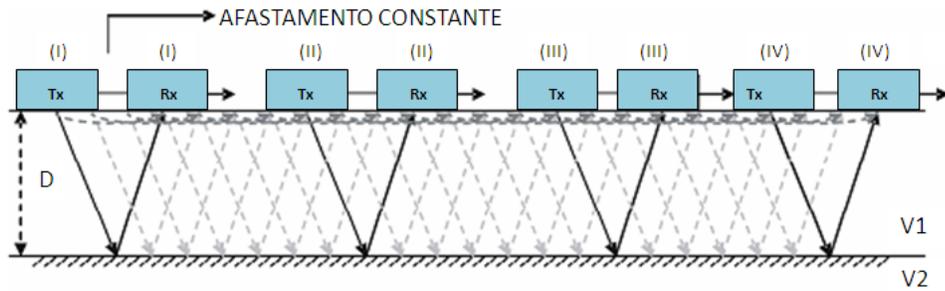


Figura 4.6 - Aquisição de dados com perfis de reflexão com afastamento constante.
Fonte: Modificada de REYNOLDS (1997).

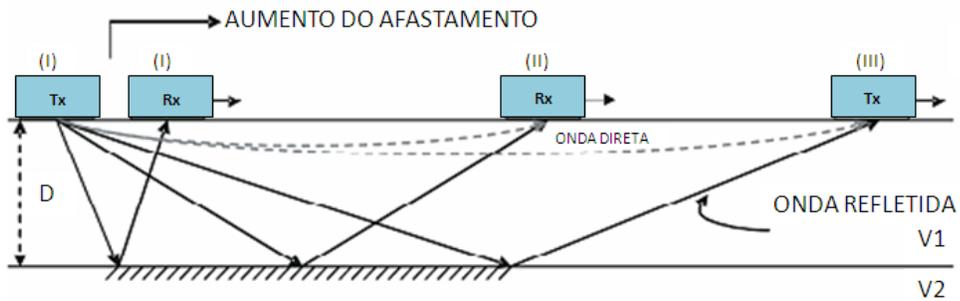


Figura 4.7 – Sondagem de velocidade tipo WARR.
Fonte: Modificada de REYNOLDS (1997).

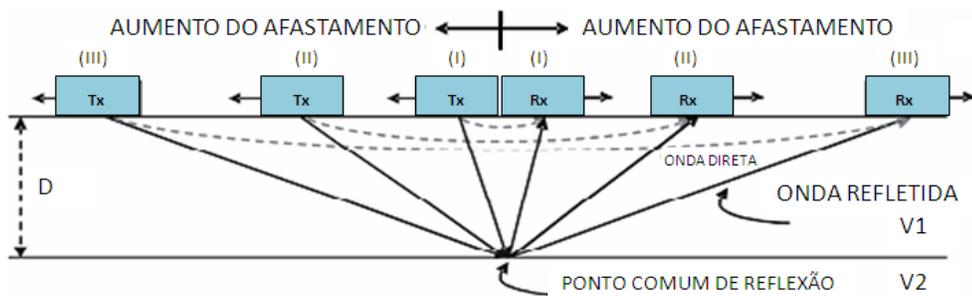


Figura 4.8 - Sondagem de velocidade tipo CMP.
Fonte: Modificada de REYNOLDS (1997).

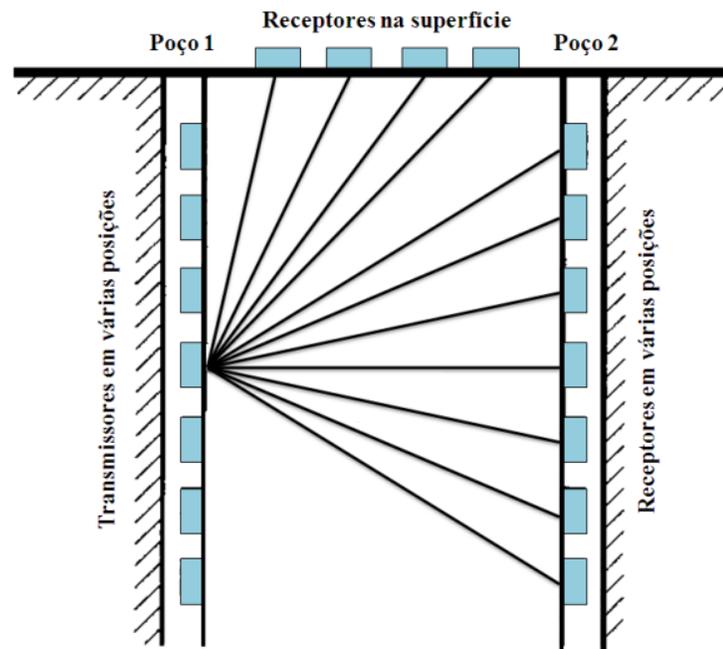


Figura 4.9 – Perfil de tomografia.
Fonte: Modificada de (REYNOLDS, 1997).

5 ESTUDO DE UM POSTO EM BELÉM

5.1 CARACTERIZACAO DA ÁREA

5.1.1 Geologia

A presente pesquisa foi realizada na área de 3.600 m² de um Posto localizado em Belém do Pará (Figura 5.1).

A cidade de Belém está assentada, quase que totalmente, sobre a unidade Pós-Barreiras do Quaternário, sobreposta ao Grupo Barreiras do Terciário (MATTA, 2002).



Figura 5.1 – Localização do posto.

A unidade Pós-Barreiras é caracterizada por sedimentos inconsolidados, arenosos, variando de tonalidade entre o amarelo e o totalmente branco, com alguma porcentagem de argila de granulometria variando entre fina e média, sem estrutura sedimentar aparente. Também se encontra nessa unidade seixos milimétricos de quartzo leitoso, dispostos caoticamente, e concreções ferruginosas (MATTA, 2002).

A Formação Barreiras é representada por sedimentos continentais argilosos, arenosos e conglomeráticos, de coloração amarelada à alaranjada com níveis de arenito ferruginosos, pouco consolidados, com estruturas sedimentares como estratificações e, ainda, microfraturas e microfalhas (MATTA op. cit.).

Na área do posto, até a profundidade de 6,5 m, foi encontrado solo constituído por aterro; solo arenoso, solo arenoso com fragmentos de rocha, solo argilo arenoso, solo argiloso e solo argilo arenoso com fragmentos de rocha (ENSR, 2007).

A Figura 5.2 mostra a planta do Posto com a localização de quatro seções geológicas, SG01 (na direção E-W), SG 02 (N-S), SG 03 (NW-SE) e SG-04 (aproximadamente E-W), construídas com dados extraídos dos poços de monitoramento realizados pela empresa ENRS em 2007. Finalmente, a Figura 5.3 reúne as seções geológicas.

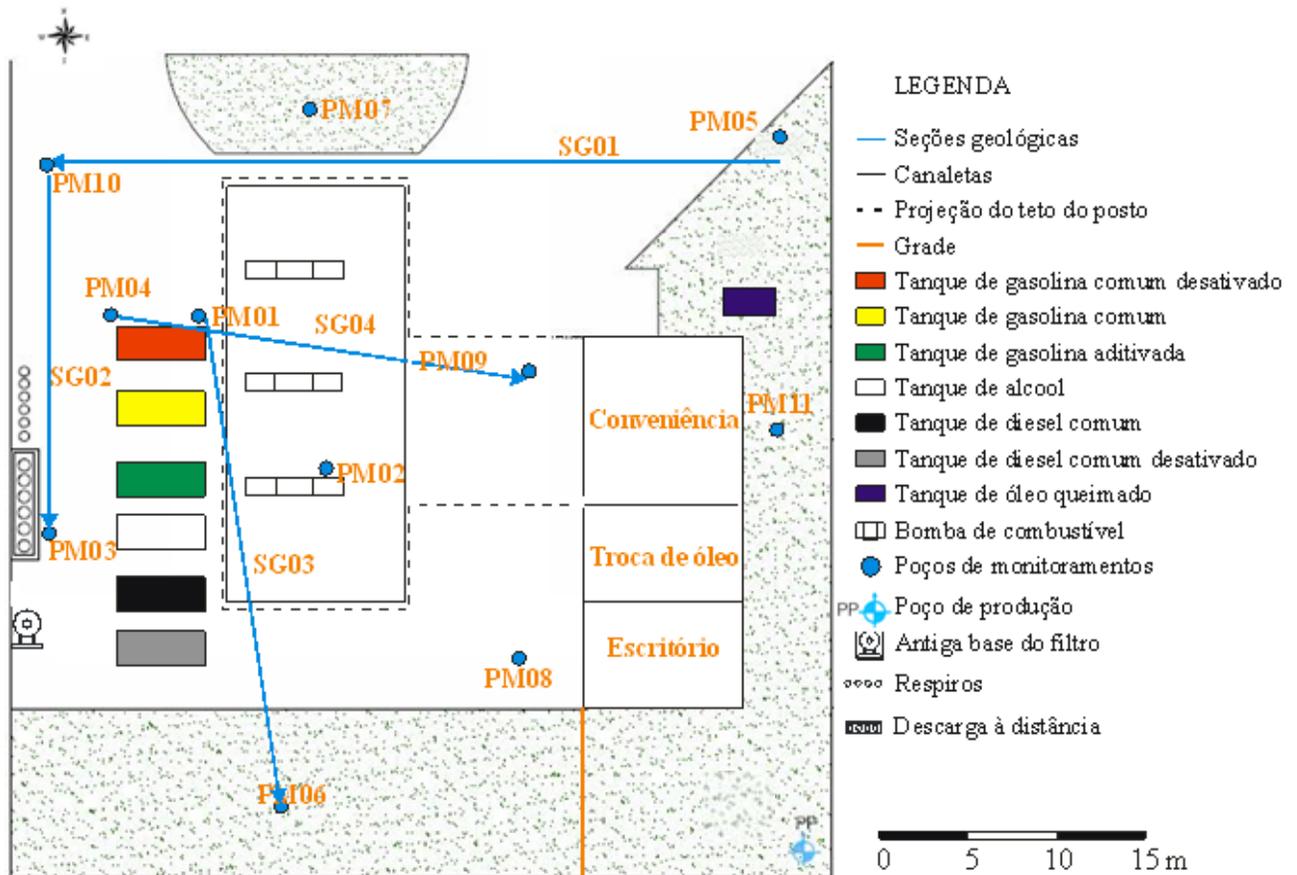


Figura 5.2 – Mapa do posto com a localização das seções geológicas SG01,SG02, SG03 e SG04.

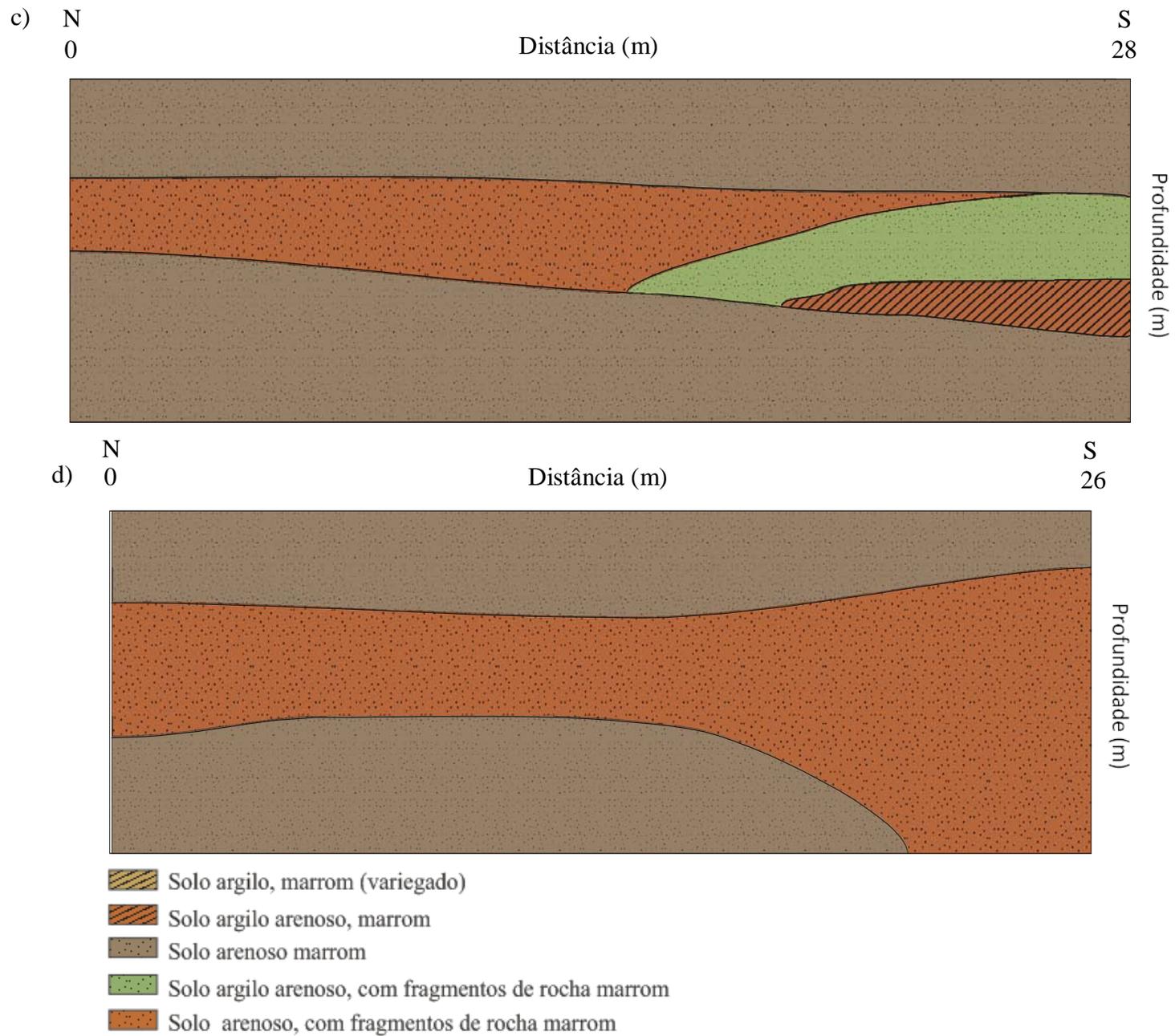


Figura 5.3 – Seções Geológicas. a) SG01. b) SG02. c) SG03. d) SG04. Dados extraídos de ENSR (2007).

5.1.2 Hidrogeologia

A geomorfologia da área e seus arredores é caracterizada por baixa declividade. A profundidade do nível hidrostático é, em média, 4,75 m, variando de acordo com a época do ano; o sentido do fluxo das águas subterrâneas é Oeste/Sudoeste; a condutividade hidráulica é $2,27 \times 10^{-5}$ cm/s e a porosidade efetiva para o sedimento argilo-arenoso é 7% (ENSR, 2007).

5.1.3 Outros Estudos

Entre 30 de junho e 4 de julho de 2007, a pedido da Shell Brasil Ltda., foi realizado um estudo de campo no posto, como parte de investigação ambiental e análise de risco conduzido pela empresa Enviromental Services Internacional Brasil (ENSR).

Neste estudo foram realizadas as análises abaixo resumidas, sendo que as amostras de solo foram retiradas de 4 m de profundidade por meio de furos.

1) VOLÁTEIS

1.1) Compostos orgânicos voláteis (Volatile Organic Compounds - VOC) – das quarenta e seis análises realizadas, três pontos apresentaram concentrações de VOC variando entre 40 ppm e 840 ppm, indicando a presença da fase vaporizada de hidrocarbonetos no solo nas proximidades do tanque um (Figura 5.4), (ENSR, 2007);

2) SOLO

2.1) Hidrocarbonetos totais de petróleo na faixa do diesel (Total Petroleum Hydrocarbon-Diesel Range Organic - TPH-DRO) – a análise de uma única amostra de sondagem selecionada (SO-05, sem observação sobre a sua localização, mas provavelmente perto de PM-05, a NE), não apontou concentração detectável.

2.2) Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (Polycyclic Aromatic Hydrocarbon – PAH) – a análise de 12 amostras mostraram concentrações detectáveis em S-07 e S-08 (obtidas pelos poços

PM-07 e PM 08 mostrados na Figura 5.2) apenas para o composto naftaleno (0,00872 e 0,00974 mg/kg, respectivamente) dos 16 compostos considerados.

3) ÁGUA SUBTERRÂNEA

3.1) BTEX – a análise de 12 amostras água subterrânea indicaram a presença de benzeno (0,00775 mg/l) e tolueno (0,02471 mg/l) e xileno (0,02236 mg/l) apenas no PM-04, perto do tanque um (Figura 5.2), identificando a presença de pluma de fase dissolvida de BTEX, a qual se encontraria delimitada e restrita à área do empreendimento (ENSR, 2007).

3.2) TPH-DRO – a análise de 12 amostras não apontou concentração detectável.

3.3) PAH – idem ao anterior.

Segundo ainda esta pesquisa, não foram encontrados hidrocarbonetos de petróleo em fase livre, no entanto foi identificada a presença de pluma de fase dissolvida de BTEX, a qual se encontrava delimitada e restrita a área do empreendimento (ENSR, 2007), nas proximidades do tanque 1. Esse e os demais tanques haviam sido instalados em 1990, exceto o tanque 6, que foi instalado em 1997.

No modelo de exposição conceitual do local não foram consideradas as seguintes vias: i) ingestão e contato dermal com a água subterrânea por receptores residenciais, pois a região seria abastecida pela rede pública e não havia informação de poços no entorno do posto e ii) inalação de vapores orgânicos em ambientes fechados

O relatório conclui que a “água subterrânea está impactada e existe um poço de abastecimento doméstico, produzindo a partir do aquífero impactado, situado a uma distância alcançada após alguns anos, considerando a velocidade de deslocamento da água subterrânea”. Resumindo, como assinalado no relatório, Classe 3 da classificação ASTM E1739-95 (ENSR, 2007).

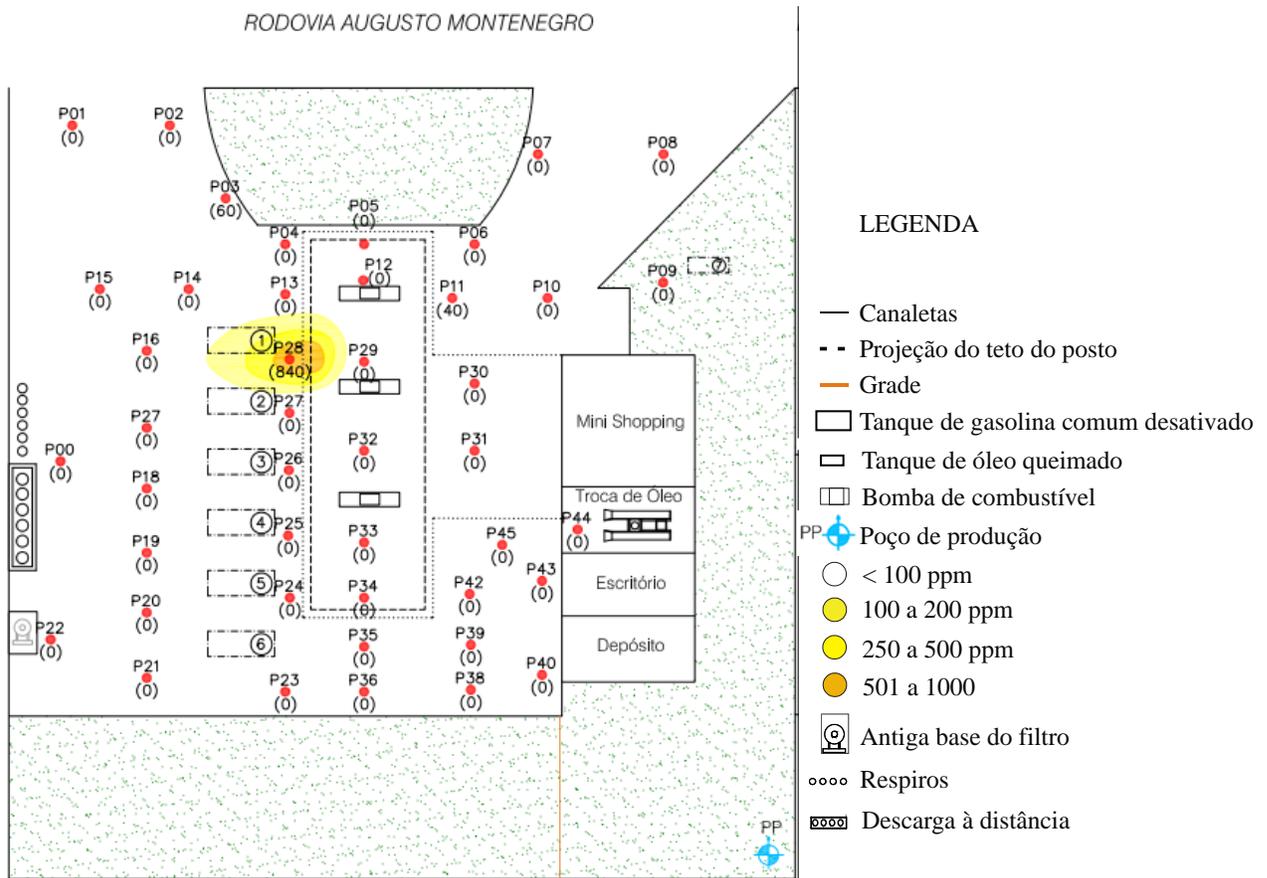


Figura 5.4 – Resultado de VOC
Fonte: (ENSR, 2007).

Em meados de 2008, a denúncia de moradores insatisfeitos com o odor forte e com o gosto amargo da água dos poços existentes em suas residências fomentou a análise da qualidade da água de poços tubulares nas proximidades do posto. O primeiro teste foi realizado por técnicos da DEMA e não mostrou sinais de contaminação. O segundo teste, contudo, realizado pela UFPA com amostras coletadas no dia 14 de outubro, a pedido de dono de supermercado próximo ao posto, apresentou BTEX nas amostras de água. Finalmente, no dia 7 de janeiro de 2009, novas amostras foram coletadas em oito poços próximos ao posto (Figura 5.5) para análise pela firma CEIMIC – ANÁLISES AMBIENTAIS de São Paulo. Nestas novas análises, as águas de seis poços apresentaram concentrações de compostos BTEX muito acima do padrão de potabilidade estabelecido pelo Ministério da Saúde (Tabela 3.1). A amostra 7, por exemplo, apresenta cerca de: 191 vezes o valor máximo permitido para o benzeno, 18 vezes o permitido para o tolueno, 2,8

vezes o valor para o etil-benzeno e 15 vezes o permitido para o xileno (Vide tabela 5.1, observando que 1 mg/l = 1 ppm).

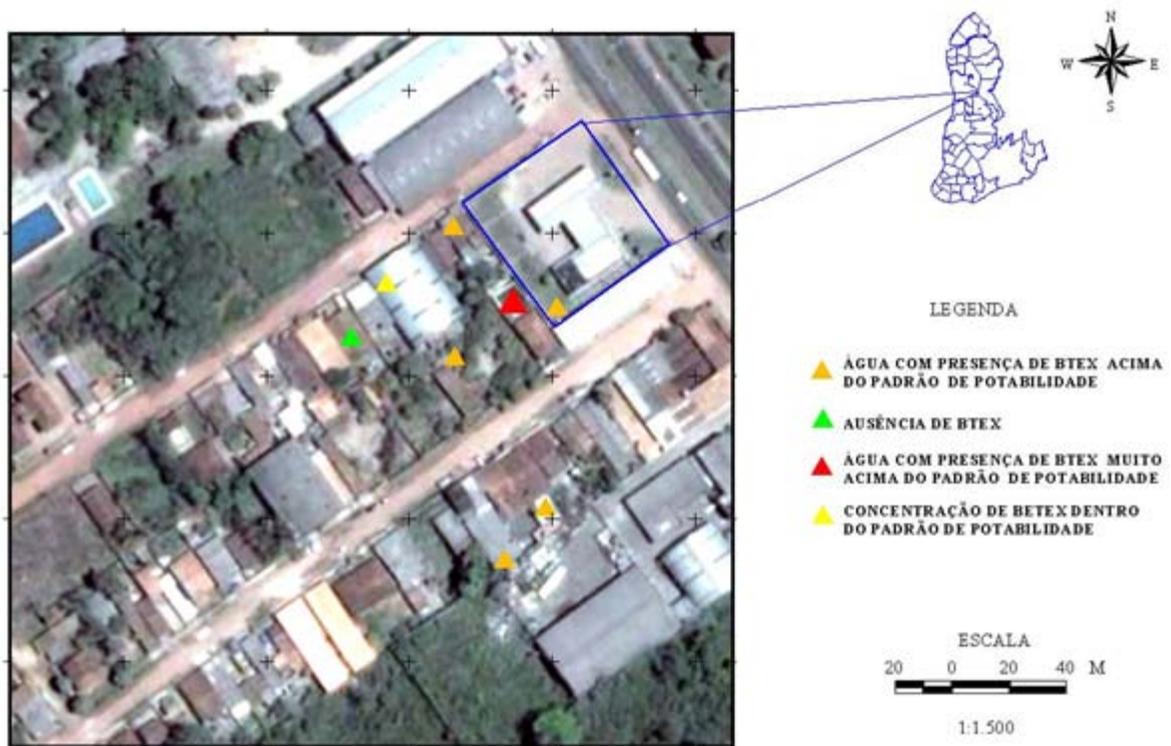


Figura 5.5 – Identificação dos poços de onde foram coletadas as amostras de águas.

Em novembro de 2008, a empresa Tecnologia e Planejamento Ambiental (TECPAM), realizou a pedido da proprietária do posto, um teste de estanqueidade do sistema de armazenamento subterrâneo de combustível. Segundo a TECPAM (2008), os testes se mostraram negativos para vazamentos nos tanques e nas tubulações. Esse resultado sugere que a causa de um provável vazamento já teria sido eliminada.

Tabela 5-1 - Resultados das análises da água dos poços coletadas em 07/01/2009.

Amostra	Local de coleta	Hora da coleta	Coordenadas do poço	Prof. poço (m)	Resultados da análise (ppm)
01 AM-0536-0801	Al. José Custódio de Almeida, 3 Resid. Sr. Mauro Roberto F. Dos Santos	11:15	S 01° 21,862' W 48° 26,993'	12,0	Benzeno 0,331 Tolueno 0,492 Etilbenzeno 0,057 m, p- Xilenos 0,637 o-Xilenos 0,363 Xilenos total 0,999
02 AM-0536-08-02	Al. José Custódio de Almeida, 11 Resid. Sr. Carlos Cardoso Pinho	11:32	S 01° 21,883' W 48° 27,017'	14,0	Benzeno ND Tolueno ND Etilbenzeno ND m, p- Xilenos ND o-Xilenos ND Xilenos total ND
03 AM-0536-08-03	Al. José Custódio de Almeida, 6 ISOAAMAZON Ind. E Comércio de Art. Plástico	11:40	S 01° 21,860' W 48° 27,010	12,0	Benzeno 0,003 Tolueno 1 Etilbenzeno ND m, p- Xilenos ND o-Xilenos ND Xilenos total ND
04 AM-0536-08-04	Al. Hélio Pinheiro, 40 Resid. Sra Maria do Socorro de Araújo	11:58	S 01° 21,881' W 48° 26,993'	9,0	Benzeno 0,332 Tolueno 0,511 Etilbenzeno 0,031 m, p- Xilenos 0,554 o-Xilenos 0,325 Xilenos total 0,879
05 AM-0536-08-05	Al. Hélio Pinheiro, n.º 07 Resid. Sr. Valmir Castro	12:07	S 01° 21,906' W 48° 26,978'	14,0	Benzeno 0,278 Tolueno 0,389 Etilbenzeno 0,014 m, p- Xilenos 0,628 o-Xilenos 0,378 Xilenos total 1,006
06 AM-0536-08-06	Al. Hélio Pinheiro, 9 Resid. Sra. Maria de Fátima França Nascimento/ Oficina mecânica	12:24	S 010 21,914' W 480 26,982'	?	Benzeno 0,578 Tolueno 1,414 Etilbenzeno 0,118 m, p- Xilenos 1,915 o-Xilenos 1,001 Xilenos total 2,916
07 AM-0536-08-07	Al. Hélio Pinheiro, 43 Resid. Sra. Júlia Teixeira do Amaral	12:38	S 010 21,867' W 480 26,981'	14,0	Benzeno 0,957 Tolueno 3,765 Etilbenzeno 0,491 m, p- Xilenos 3,302 o-Xilenos 1,406 Xilenos total 4,708
08 AM-0536-08-08	Rod. Augusto Montenegro Km 05, s/n Posto Cristal Com. E Deriv. De Petróleo	12:41	S 010 21,869' W 480 26,973'	?	Benzeno 0,327 Tolueno 0,790 Etilbenzeno 0,073 m, p- Xilenos 1,117 o-Xilenos 0,599 Xilenos total 1,716

Fonte: CEIMIC (2009).

5.2 AQUISIÇÃO DE DADOS

Para a aquisição dos dados de GPR foi utilizado o equipamento GPR modelo SIR System-3000 fabricado pela empresa Geophysical Survey Systems Inc (GSSI). Foram utilizadas as antenas de 400 MHz e 200 MHz com janela de tempo de 50 ns para a de 400 MHz e 100 ns e 200 ns para a antena de 200 MHz. Também foi testada uma antena de 80 MHz que, apesar de investigar mais profundamente, não apresentou resolução satisfatória para detectar as plumas contaminantes, conforme constataram outros trabalhos (CASTRO; CASTELO BRANCO, 2003; PEDROSA, 2004). A amostragem foi feita no modo tempo com inserção de marcas no registro a cada 2 m.

As primeiras medidas foram realizadas com as antenas de 400 MHz no dia 17 de novembro de 2008. No dia 15 de dezembro foram realizadas novas medidas com as antenas de 80 e 200 MHz. A Tabela 5.2 mostra as características de cada perfil e a Figura 5.6, a localização dos perfis.

Tabela 5.2 – Caracterização dos perfis

Perfil	Tamanho (m)	Observação
1	12	área gramada
2	32	área gramada
3	46	área gramada no início, seguida de área com bloquetes e, finalmente, área acimentada no meio
4	40	área com bloquetes, seguida de área gramada
5	26	área de bloquetes, perpendicular aos tanques, sobre os mesmos
6	26	área com bloquetes, perpendicular aos tanques, entre estes e as bombas
7	28	área de bloquetes, paralela ao tanque 6
8	26	área de bloquetes, acimentada no meio, paralela às bombas 3 e 2
9	26	idem à anterior mais para o Norte
10	26	idem à anterior
11	26	área de bloquetes, acimentada no meio, paralela às bombas 2 e 1 sobre o tanque 1.
12	26	área de bloquetes, acimentada no meio, paralela às bombas 2 e 1.
13	26	idem à anterior mais para o Norte

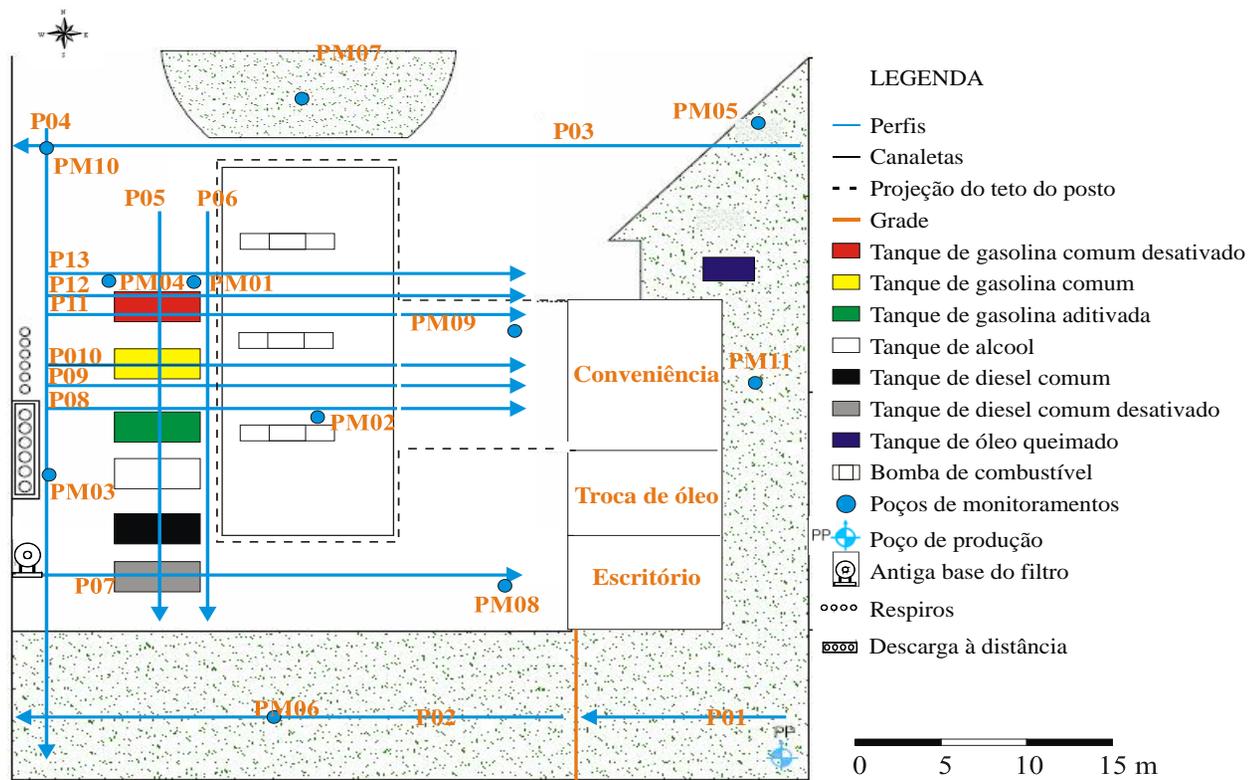


Figura 5.6 - Localização dos perfis na área do posto.

Para ajudar na interpretação dos dados, bem como observar a modificação causada pelas chuvas (Figura 5.7), foram realizadas novas medidas no dia 5 de março de 2009 com a antena de 200 MHz, porém com a janela de tempo aumentada para 200 ns, para se observar mais profundamente. No entanto, mesmo com a janela aumentada, as informações dos perfis ficaram restritas a quatro metros, devido à alta atenuação do sinal eletromagnético causada pela presença de camadas argilosas abaixo de 3 m no local.

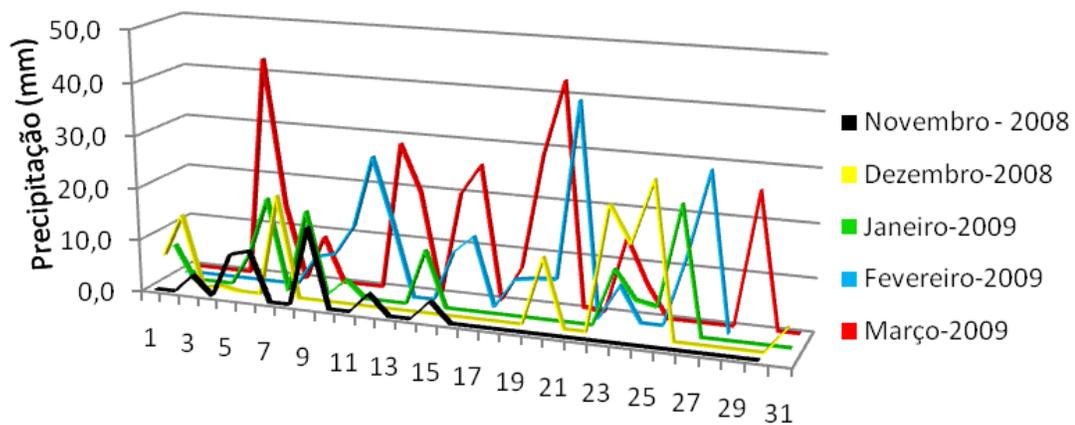


Figura 5.7 – Gráfico da precipitação de Belém.
Fonte: (INMET, 2009).

5.3 PROCESSAMENTO DOS DADOS

Os dados adquiridos foram processados com o *software* REFLEXW versão 4.2 fabricado por Sandmeier, utilizando-se a sequência de processamento descrita a seguir.

Markerinterpol – interpolação de marcadores de distância ao longo do perfil manual ou automaticamente. Marcas a mais ou a menos ou sem o espaçamento correto podem, então, ser corrigidas. Foi utilizado o valor do incremento de traço 0,02 m.

Set time zero – remoção de ondas diretas (ar e solo).

Subtract-mean (Dewow) – remoção das ondas de baixas frequências. Foi utilizado o valor de 5 ns na janela de tempo para o processamento dos dados adquiridos com as duas antenas.

Energy decay – recuperação da energia dissipada e maximização dos contrastes, para maior nitidez das mudanças de propriedades da subsuperfície.

BandpassFrequency – eliminação de ruídos, bem como reverberações. A faixa do filtro é ajustada através de quatro valores de frequência obtidos após vários testes com diversas frequências (BRANDWOOD, 2003), de forma que os valores das frequências formem um trapézio e a frequência central (FC) da antena fique entre os valores de F2 e F3 (Figura 5.8).

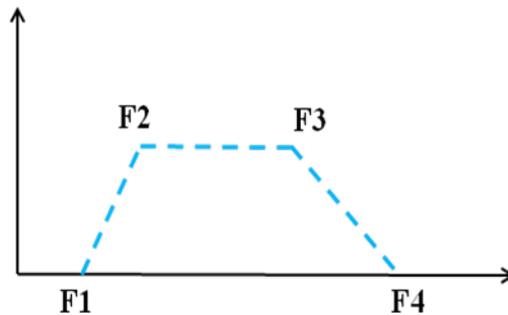


Figura 5.8 – Frequências de corte usadas na elaboração do filtro. Adaptado de Brandwood (2003).

Running average – obtenção da média dos traços para melhorar a resolução dos refletores atenuados mais profundamente. Usado o valor escalar 5.

Time-Depth Conversion – conversão da escala de tempo para a escala de profundidade, usando o valor da velocidade da onda do local igual a 0,085 m/ns, que é obtida por meio do ajuste da hipérbole e permite visualizar os tanques na profundidade que estão enterrados.

Migração diffraction stack – colapso de difrações e retirada de possíveis eventos cruzados, para localizar os objetos em suas posições reais e, ainda, realçar os refletores horizontais. Para a realização da migração é necessário conhecer a velocidade da onda, a qual pode ser estimada através de ajustes hiperbólicos. Para isso é recomendado utilizar a hipérbole de menor abertura, para evitar ruído no processo de migração (YILMAZ, 1987; CLAERBOUT; BLACK, 2005). A abertura da migração utilizada foi 40 e a velocidade 0,085 m/ns.

5.4 INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

Na análise dos radargramas obtidos em cada um dos perfis, procurou-se localizar contrastes de zonas condutivas com o background da região, pois em um vazamento de combustível, no primeiro instante, são observados valores elevados de resistividade, no entanto, a pluma contaminante tanto na fase residual, quanto dissolvida (observada desde o relatório da ENSR), pode sofrer processos bioquímicos que causam o aumento na condutividade da zona afetada. Isso pode ser especialmente o caso durante o período chuvoso amazônico.

Segundo Sauck (2000), o processo de biodegradação produz ácidos orgânicos com alto poder de lixiviação dos sais presentes no solo. A ação das bactérias presentes no local do derramamento sobre o dióxido de carbono aumenta gradativamente este processo, acarretando também a geração de ácidos no entorno da camada insaturada, que resulta na lixiviação dos sais inorgânicos desta região.

Através deste processo, substâncias resistivas, como é o caso da gasolina e do diesel, quando presentes na zona não saturada ou mesmo na zona vadosa, acabam sofrendo a biodegradação por ação de microorganismos, diminuindo consideravelmente a resistividade do contaminante como observado em Atekwana et al. (2000), Dehaini (2001), Pedrosa (2004) e Ortega (2006). É importante ressaltar que as respostas elétricas e eletromagnéticas dos contaminantes orgânicos dependem, portanto, da idade da contaminação.

Para cada perfil são apresentados três radargramas: o superior é o radargrama obtido com os dados brutos, o do meio, o radargrama construído com os dados processados, e o inferior, o radargrama migrado e interpretado. Nos radargramas aparece no eixo vertical, tanto tempo da chegada das ondas, como a profundidade.

Foi adotada a seguinte nomenclatura: PX-200-100 para os perfis com as antenas de 200 MHz e janela de amostragem de 100 ns; PX-400-50 para os perfis com as antenas de 400 e janela de amostragem de 50 ns e PX-200-200 para os perfis com as antenas de 200 MHz e janela de amostragem de 200 ns, sendo X o número do perfil.

5.4.1 Perfil 1

O perfil 1 tem direção E-W e está localizado na porção mais ao Sul do posto próximo ao escritório e do poço de abastecimento, paralelo à av. Augusto Montenegro, em uma área coberta com grama, e é o perfil mais afastado das tubulações e tanques de combustíveis (Figura 5.6). Possui 12 m de comprimento. Os radargramas obtidos nesse perfil foram reunidos nas Figuras 5.9, 5.10 e 5.11.

O radargrama mostrado na Figura 5.9c não mostra nenhum refletor sugestivo para esta dissertação, devido à pequena profundidade de investigação.

Já no radargrama apresentado na Figura 5.10c percebe-se a presença de zonas e camadas atenuadas consideravelmente, aproximadamente entre 1 e 5 m e entre 6 e 11 m, localizadas a cerca de 3 m de profundidade.

Na Figura 5.11c, estas mesmas zonas são vislumbradas, porém há um contraste menor entre elas, devido à blindagem da energia pelas chuvas dos meses de novembro a fevereiro (Figura 5.7). O nível hidrostático (NH) é visualizado a aproximadamente 3,5 m de profundidade, como um longo refletor horizontal.

As zonas de atenuação podem estar relacionadas a áreas contaminadas por hidrocarbonetos em consequência da elevação do NH, que provoca o surgimento de fase residual, ou mesmo pelo enriquecimento local de argila.

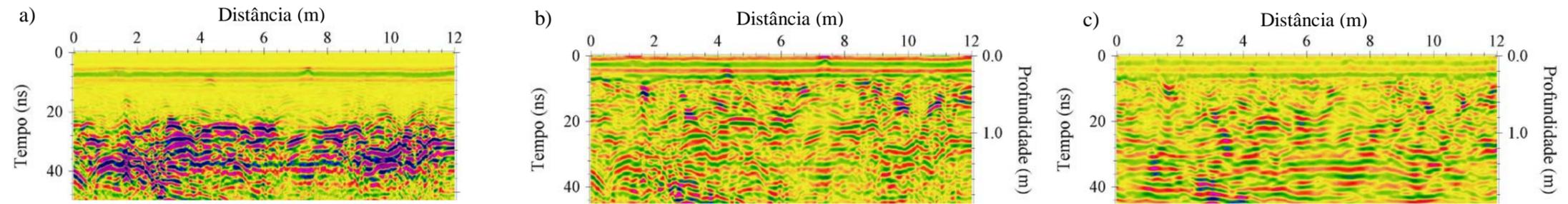


Figura 5.9 – Perfil01-400-50. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado.

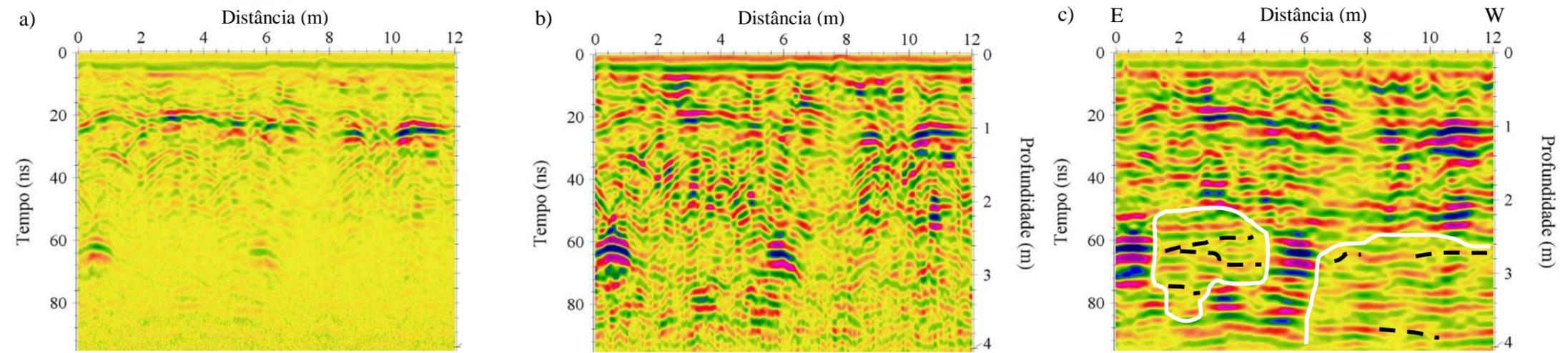
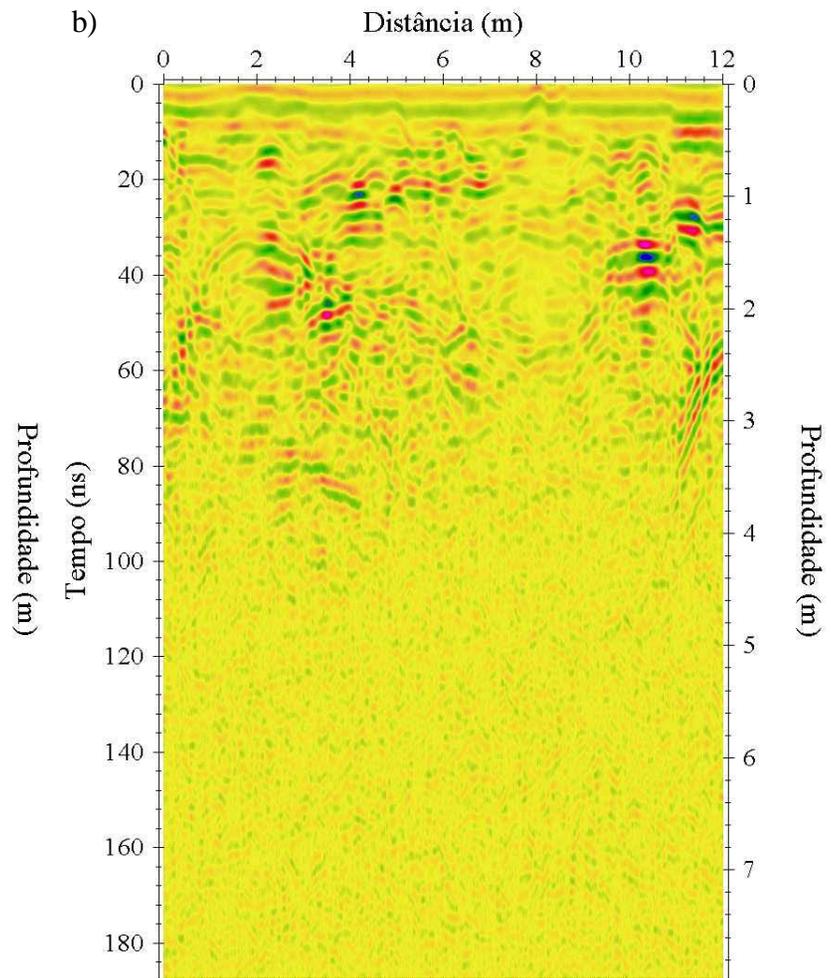
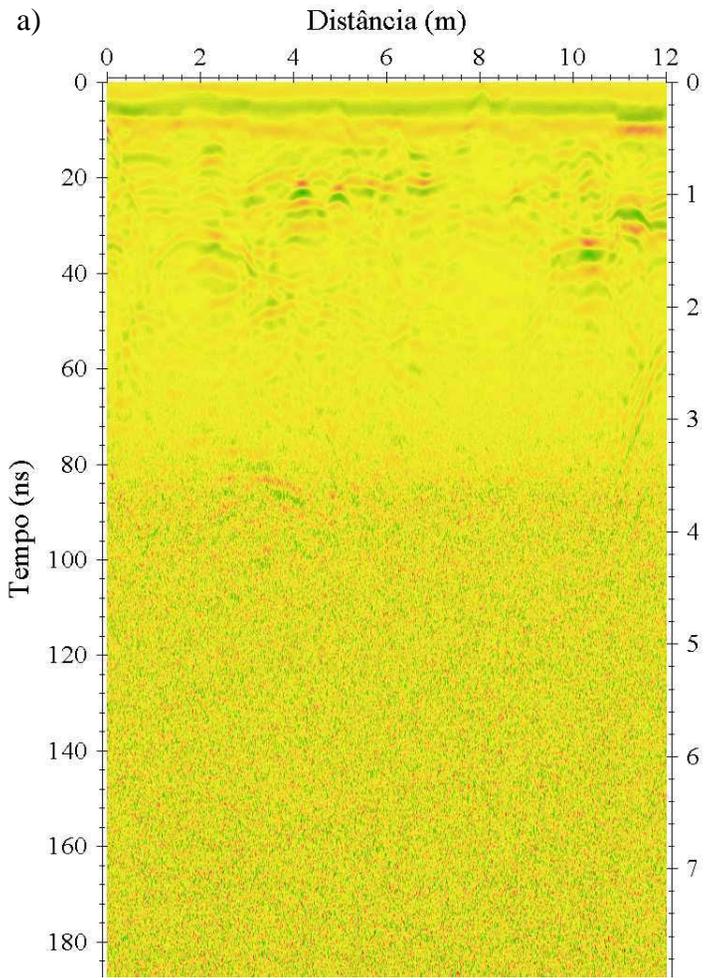


Figura 5.10 – Perfil01-200-100. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado. As linhas brancas delimitam as zonas atenuadas e as pretas pontilhadas, as camadas atenuadas.



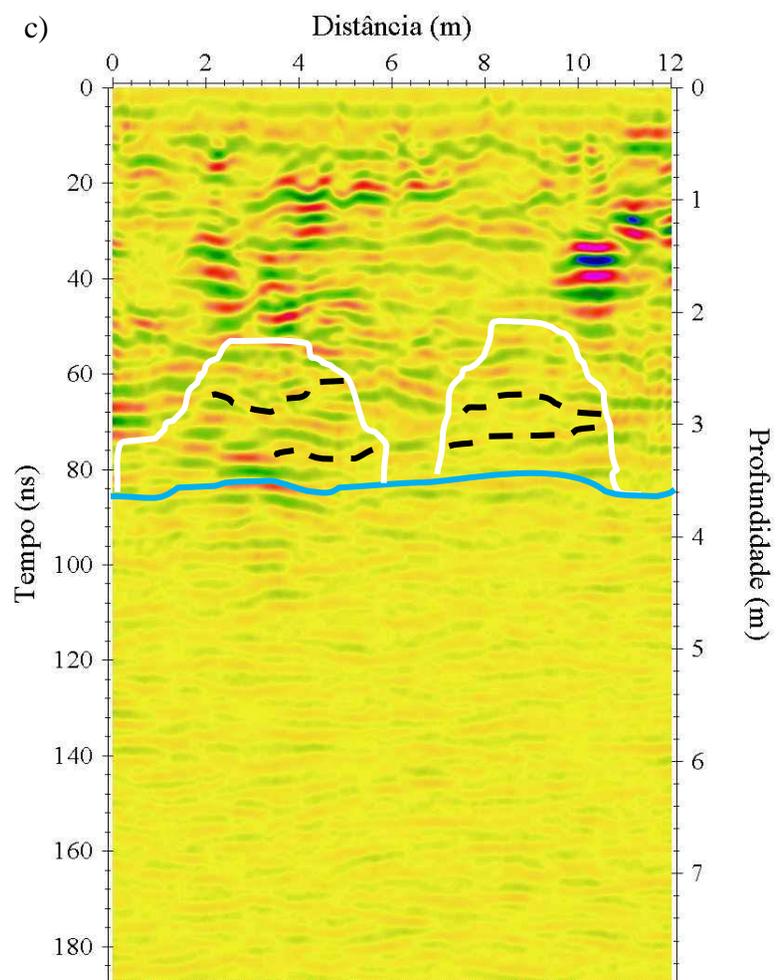


Figura 5.11 – Perfil01-200-200. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas brancas delimitam as zonas atenuadas, a azul, o nível hidrostático e as pretas pontilhadas, as camadas atenuadas

5.4.2 Perfil 2

O perfil 2 é uma continuação do perfil 1 dando continuidade E-W ao perfil 1e se estende 32 m por uma área coberta com grama no extremo Sul do Posto (Figura 5.6). As Figuras 5.12 5.13 e 5.14 mostram os radargramas obtidos no perfil 2.

O radargrama visualizado na Figura 5.12c mostra uma zona condutiva na porção central delimitada por uma zona resistiva de 0 a 5 m e outra entre 28 e 32 m, a aproximadamente 1 m de profundidade, causadas, possivelmente, por concreções ferruginosas ou mesmo por areia.

Já na Figura 5.13c notam-se as mesmas zonas resistivas e condutivas, contudo, estas se estendem ainda mais profundamente. Nota-se, ainda, um refletor a 15 m do início do perfil, associado ao poço de monitoramento 6 (PM6), o qual não pôde ser visualizado na Figuras 5.12c, devido a um pequeno deslocamento das medidas obtidas em novembro com a antena de 400 MHz em relação às medidas realizadas em dezembro e março com a antena de 200 MHz. As zonas condutivas, atenuadas, aparecem entre 5 e 12 m e entre 16 e 30 m. As zonas condutivas indicariam a presença de argila, como sugere a parte final do perfil geológico (Figura 5.3c).

O radargrama mostrado na Figura 5.14c mostra todos os refletores localizados nas Figuras 5.12c e 5.13c, bem como um refletor horizontal a 3,5 m de profundidade, ocasionado, possivelmente, pelo NH. É importante ressaltar que com as medidas realizadas com a antena de 400 MHz não foi possível visualizar o PM6, devido a um pequeno deslocamento lateral da antena no perfil, com relação às medidas realizadas com a antena de 200 MHz em dezembro e março.

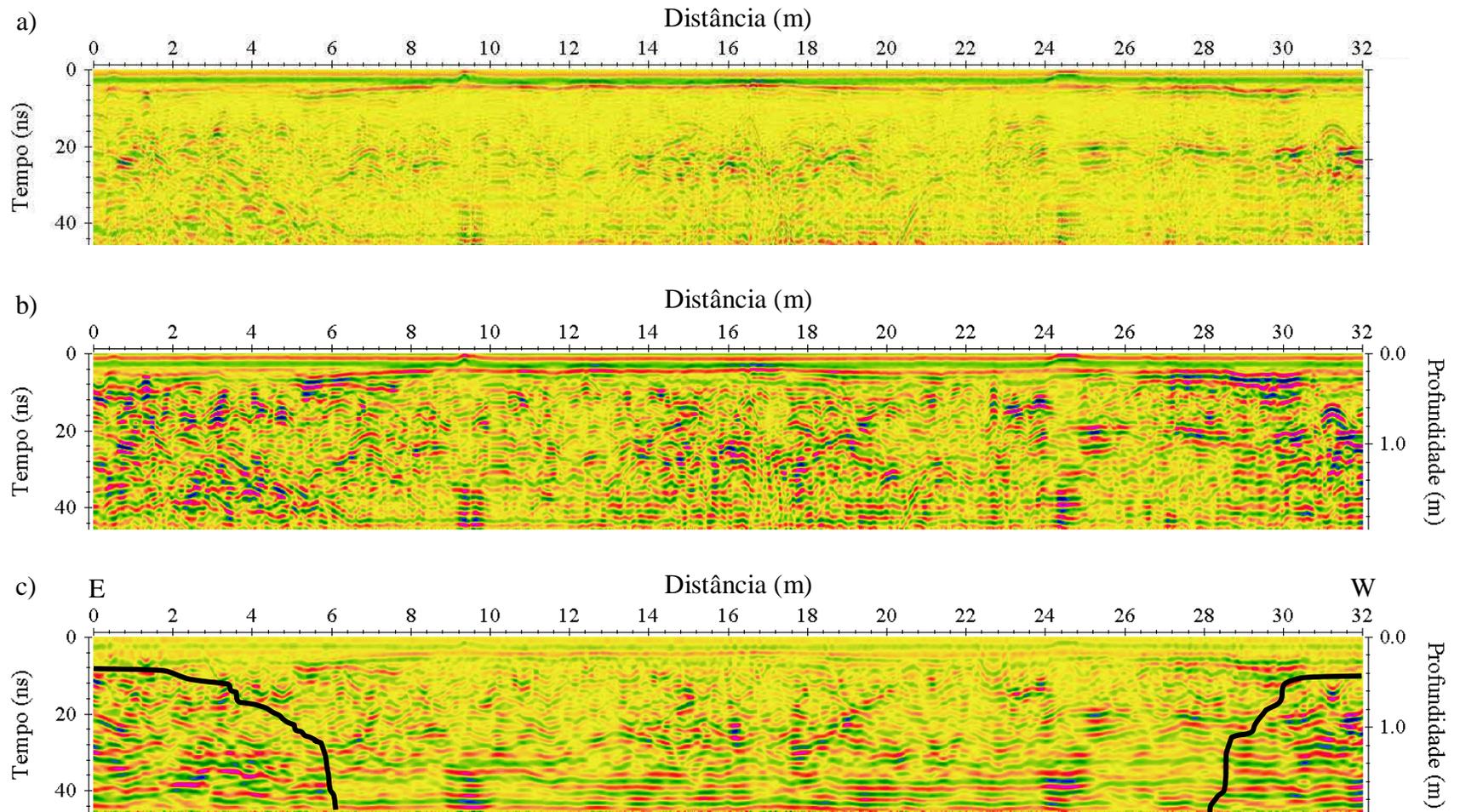
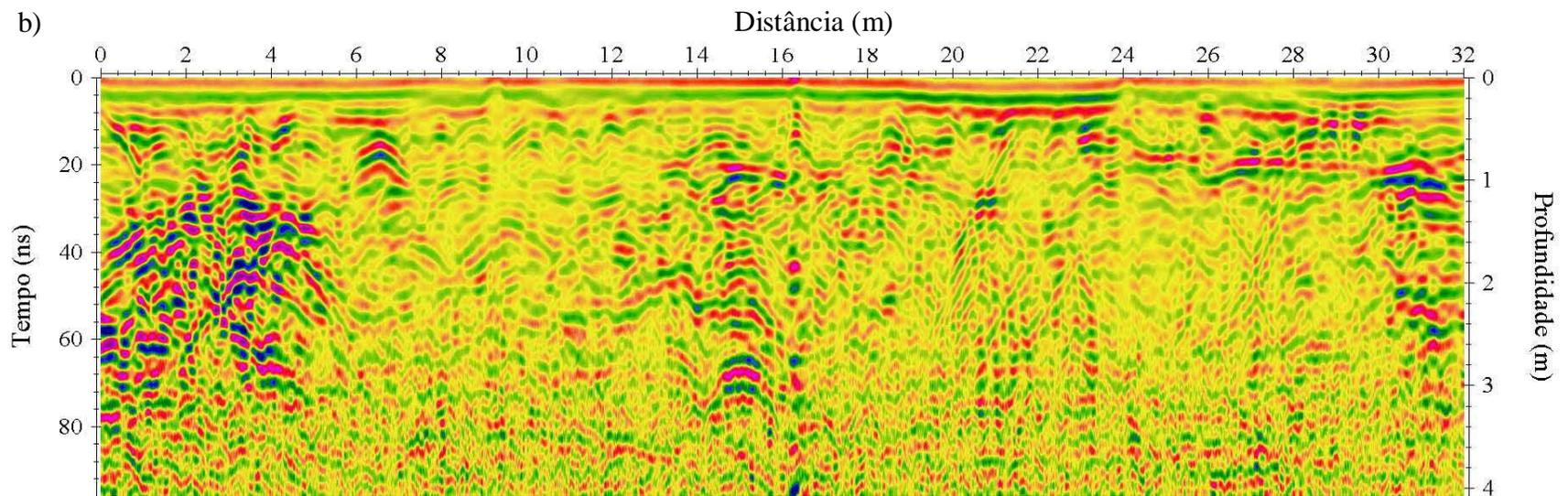
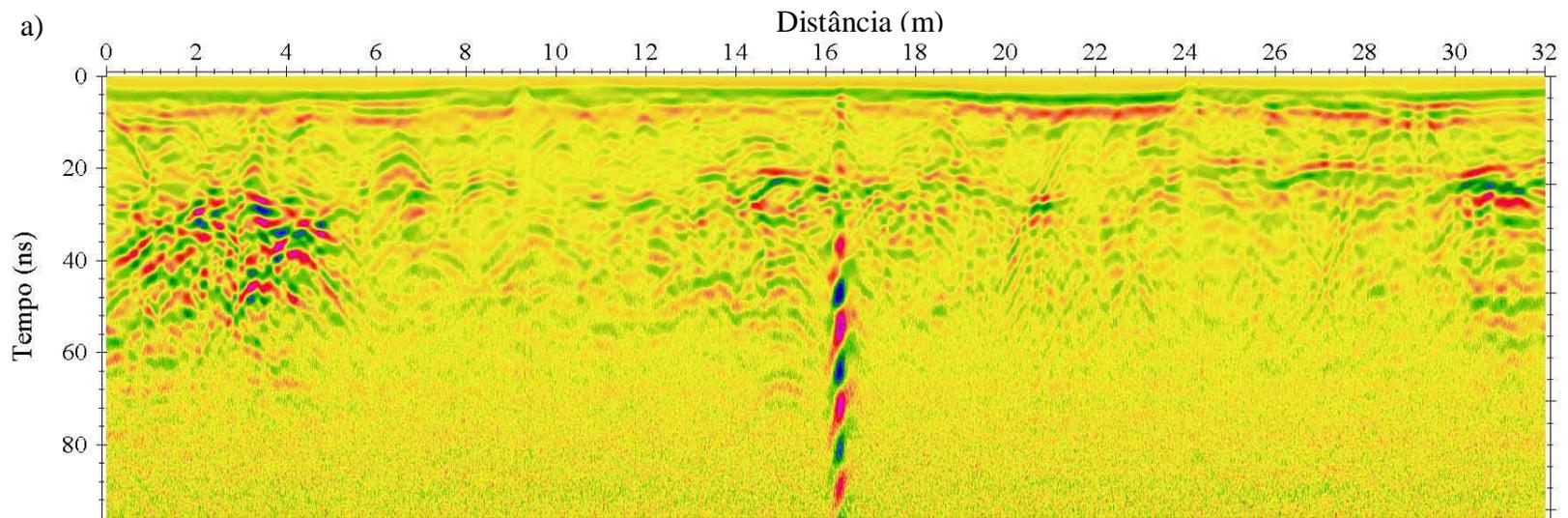


Figura 5.12 – Perfil02-400-50. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas pretas delimitam as concreções ferruginosas ou areia.



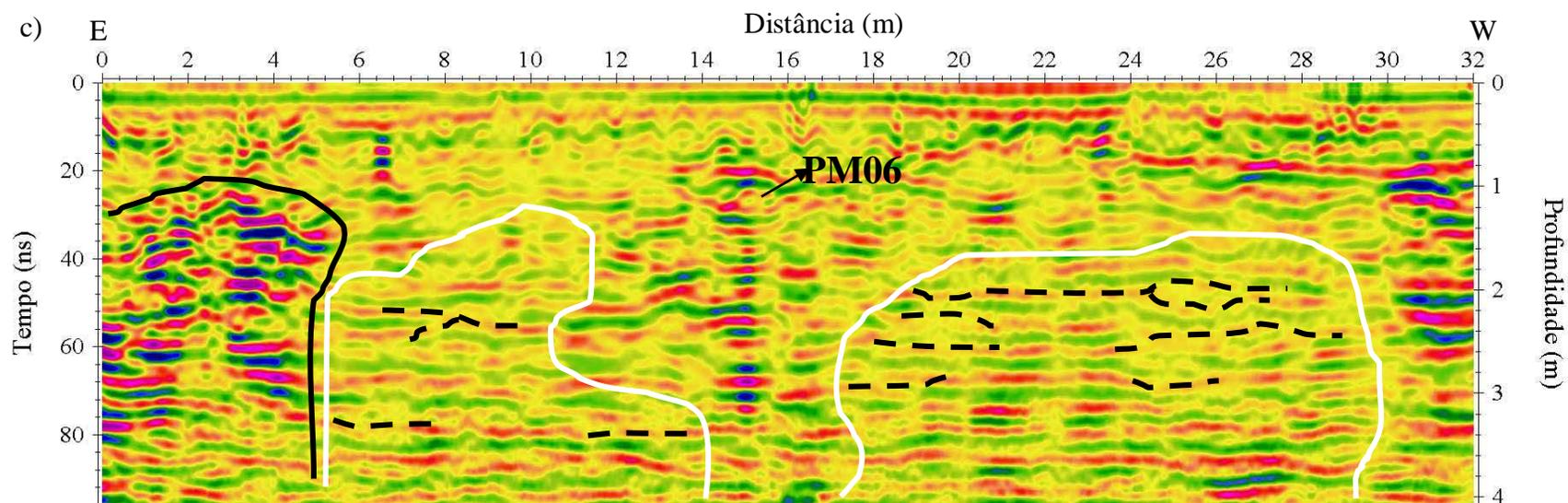
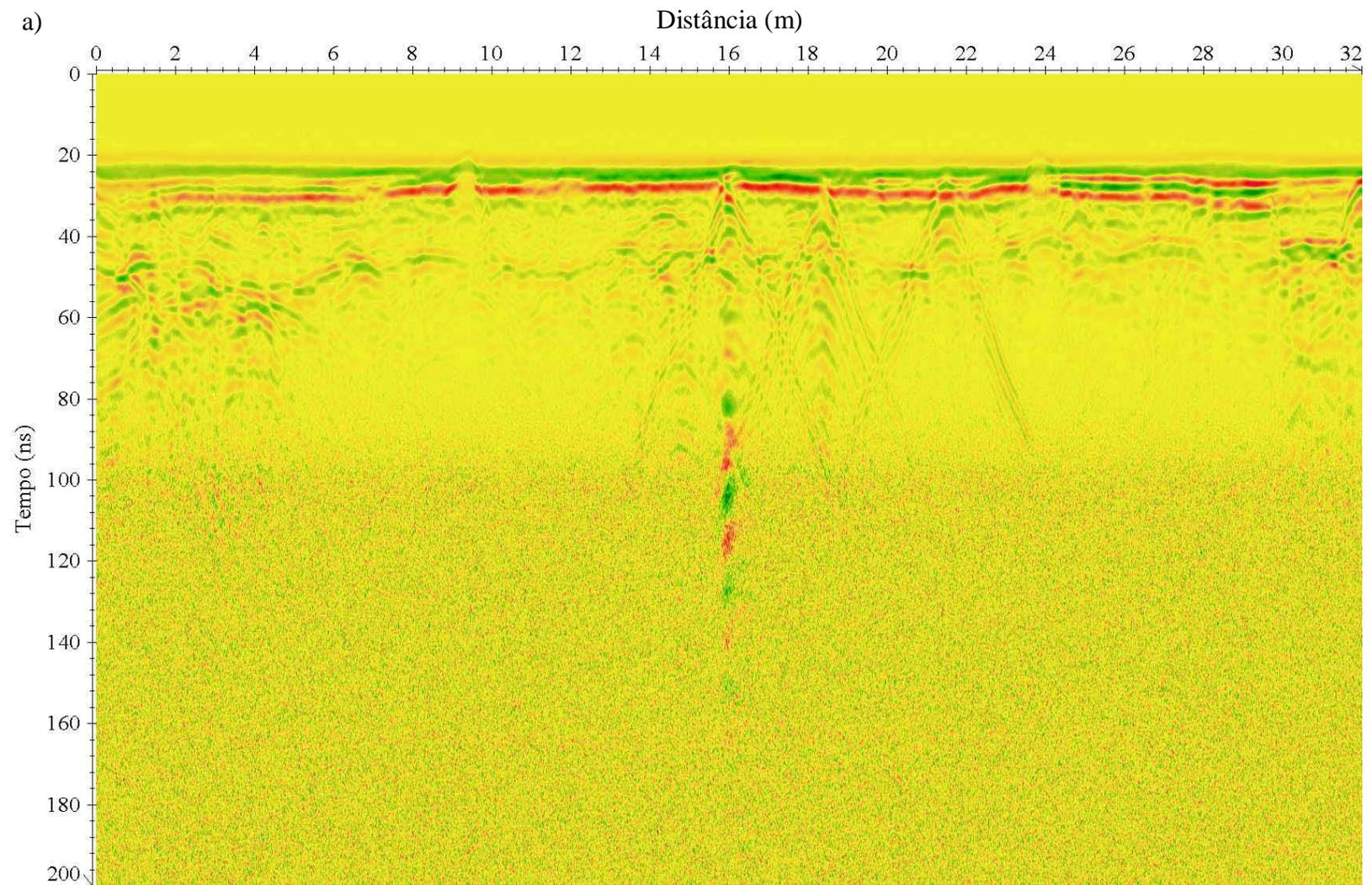
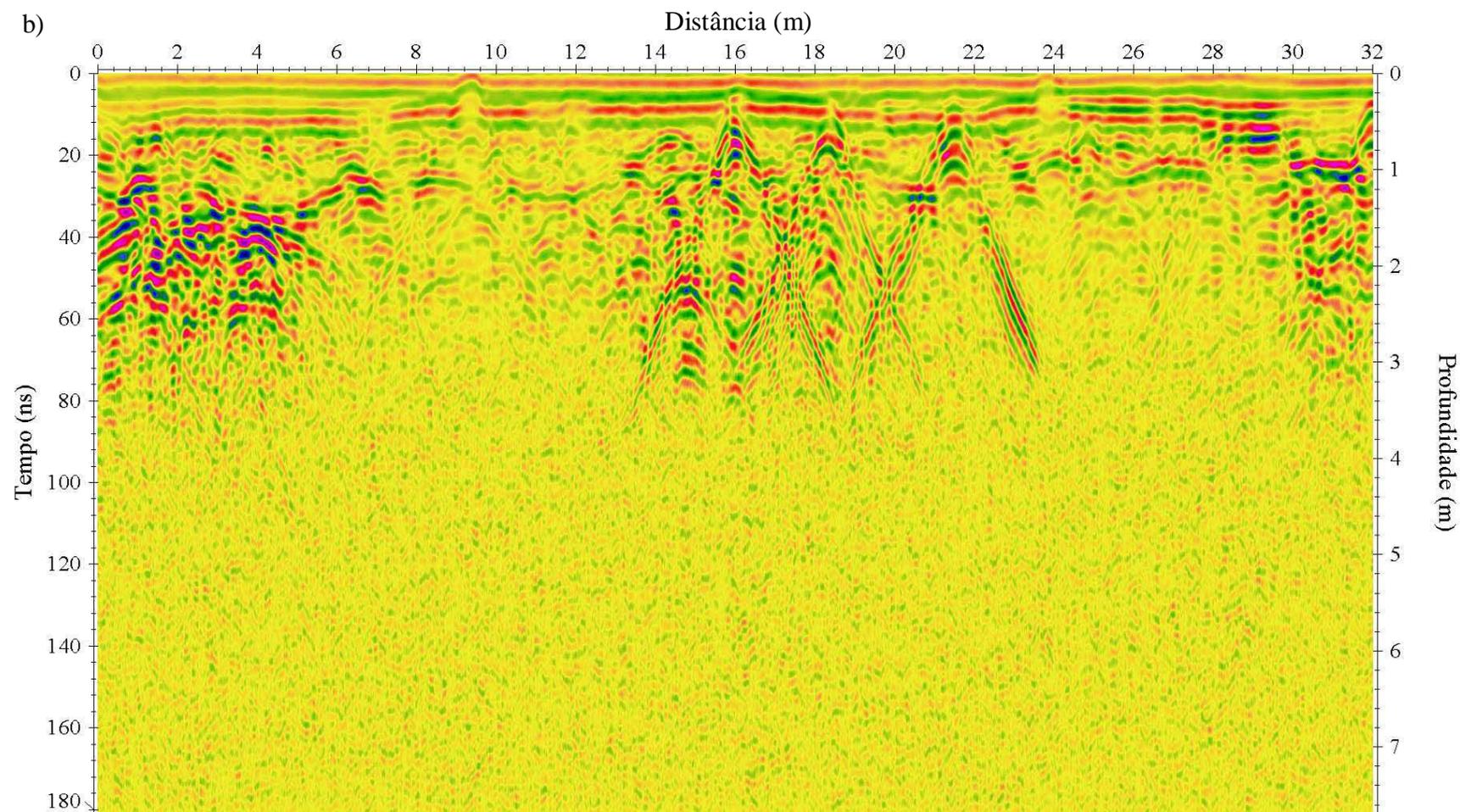


Figura 5.13 – Perfil02-200-100. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas brancas delimitam as zonas atenuadas, as pretas pontilhadas, as camadas atenuadas, e as pretas contínuas, concreções ferruginosas ou areia. Já a sigla PM6 assinala o poço de monitoramento 6.

a)





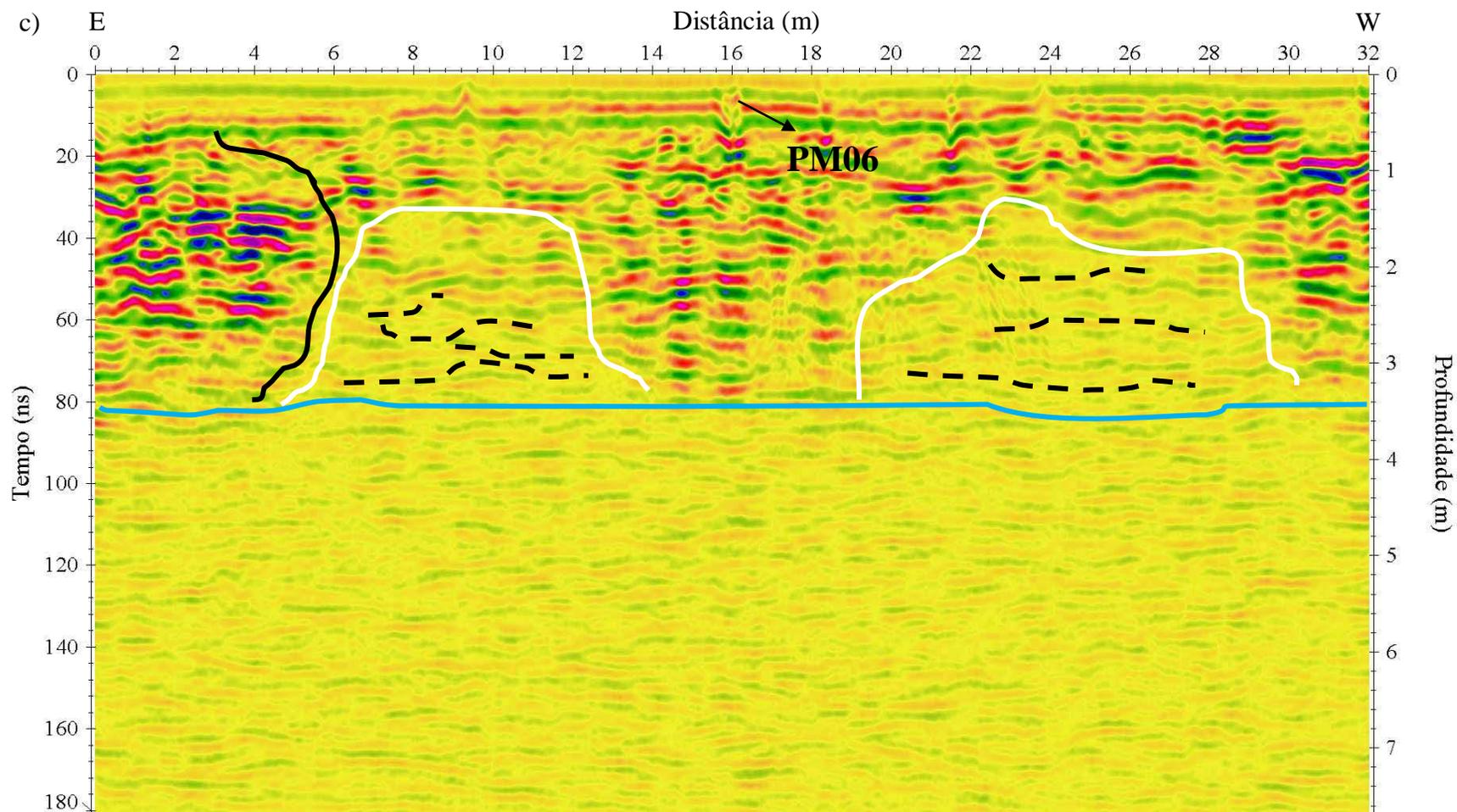


Figura 5.14 – Perfil02-200-200. Radargramas a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas brancas delimitam as zonas atenuadas, a azul, o nível hidrostático, as pretas pontilhadas, as camadas atenuadas e as pretas contínuas, as concreções ferruginosas ou areia. Já a sigla PM6 assinala o poço de monitoramento 6.

5.4.3 Perfil 3

O perfil 3, por sua vez, estende-se 46 m de comprimento na direção E-W, paralelo à rodovia Augusto Montenegro, na porção mais ao norte do posto que é a porção mais próxima àquela rodovia. É coberto com grama, cimento e bloquetes (Figura 5.6). As Figuras 5.15, 5.16 e 5.17 mostram os radargramas para esse perfil.

Notam-se, na Figura 5.15c, zonas atenuadas entre 9.5 e 24 m e entre 34 e 46 m ocasionadas pela presença de argilas no local, como mostrado no perfil geológico (Figura 5.3a). Estas zonas são separadas por uma área mais resistiva marcada por dois refletores superficiais localizados aproximadamente a 25 e a 35 m do início do perfil. Estes refletores demarcam o piso coberto por cimento e, ainda, indiretamente a própria cobertura do posto, porque tanto o piso como a cobertura protegem a área da infiltração superficial das chuvas, o que possivelmente aumenta a resistividade dessa região em comparação a áreas cobertas por bloquetes e não protegidas das chuvas.

Percebe-se, ainda: entre as posições 0 e 5,5 m do perfil, uma zona resistiva, causada possivelmente por concreções ferruginosas ou mesmo por areia. Já a 18 m do início do perfil, observa-se um refletor que corresponde à tubulação e a 40 m, um outro refletor, que assinala a presença do poço de monitoramento 10 (PM10).

Na Figura 5.16c notam-se as mesmas zonas resistivas e condutivas, bem como as reflexões causadas pela possível tubulação. Não se percebe a presença do poço PM10, devido à medida com a antena de 200 MHz, realizada no mês de dezembro, não ter passado exatamente em cima deste, como as demais medidas. O radargrama mostra que as zonas resistivas e condutivas se estendem ainda mais profundamente.

Já o radargrama apresentado na Figura 5.17c mostra todos os elementos observados nos radargramas anteriores. O NH aparece a aproximadamente 3,5 m de profundidade.

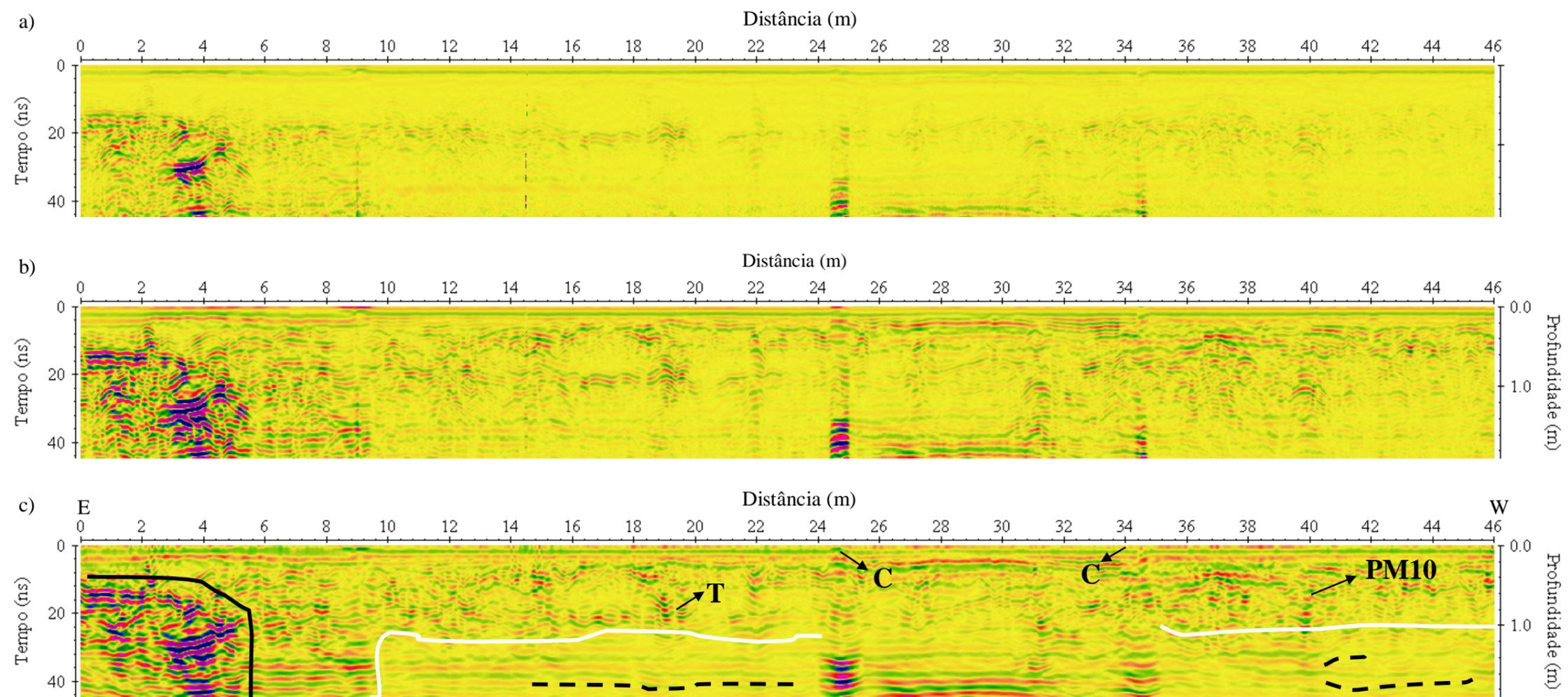


Figura 5.15 – Perfil3-400-50. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas brancas delimitam as zonas atenuadas, as pretas pontilhadas, as camadas atenuadas e as pretas contínuas, as concreções ferruginosas ou areia. PM10 assinala o poço de monitoramento 10, T, tubulação e C, canaleta.

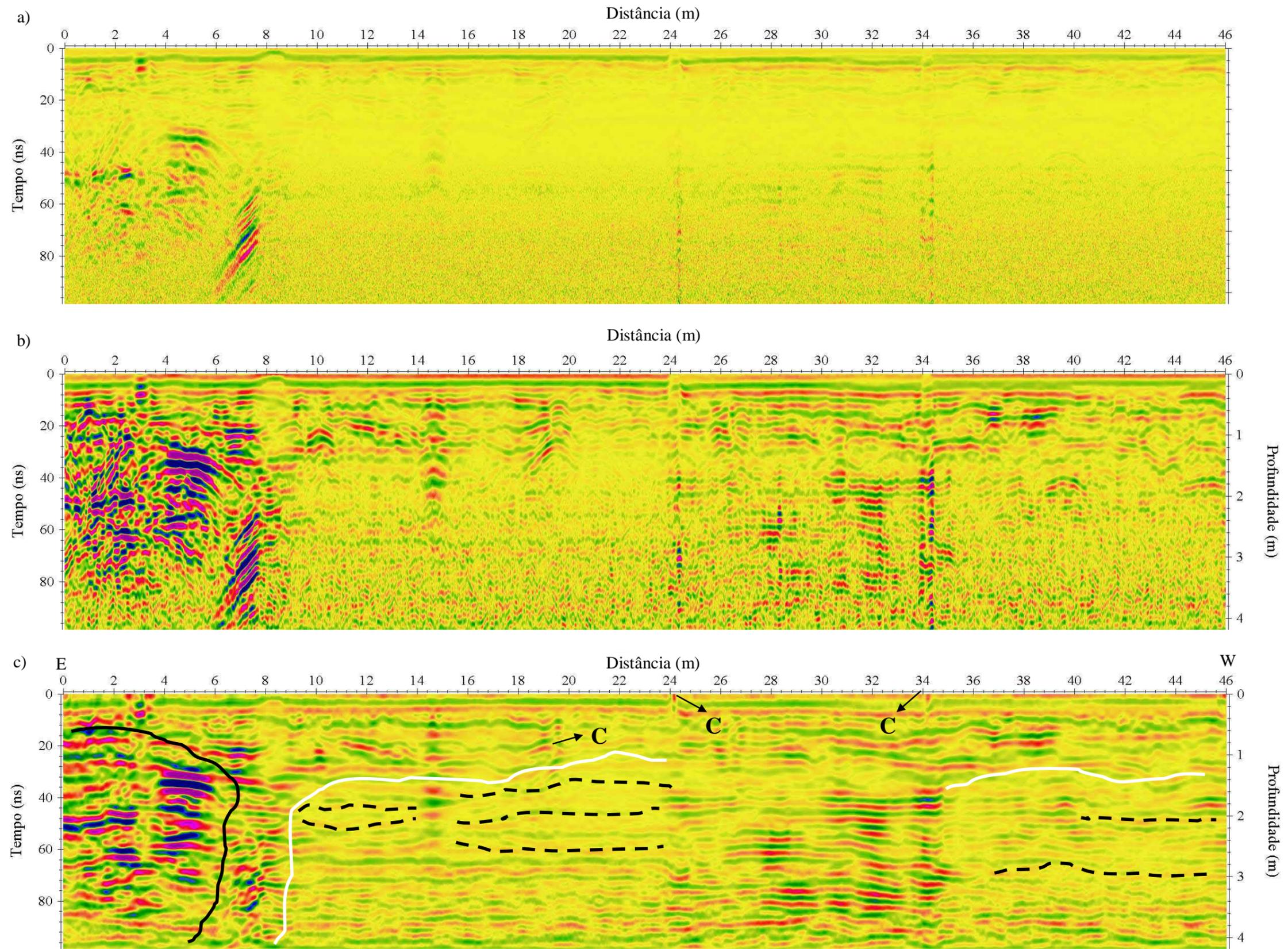
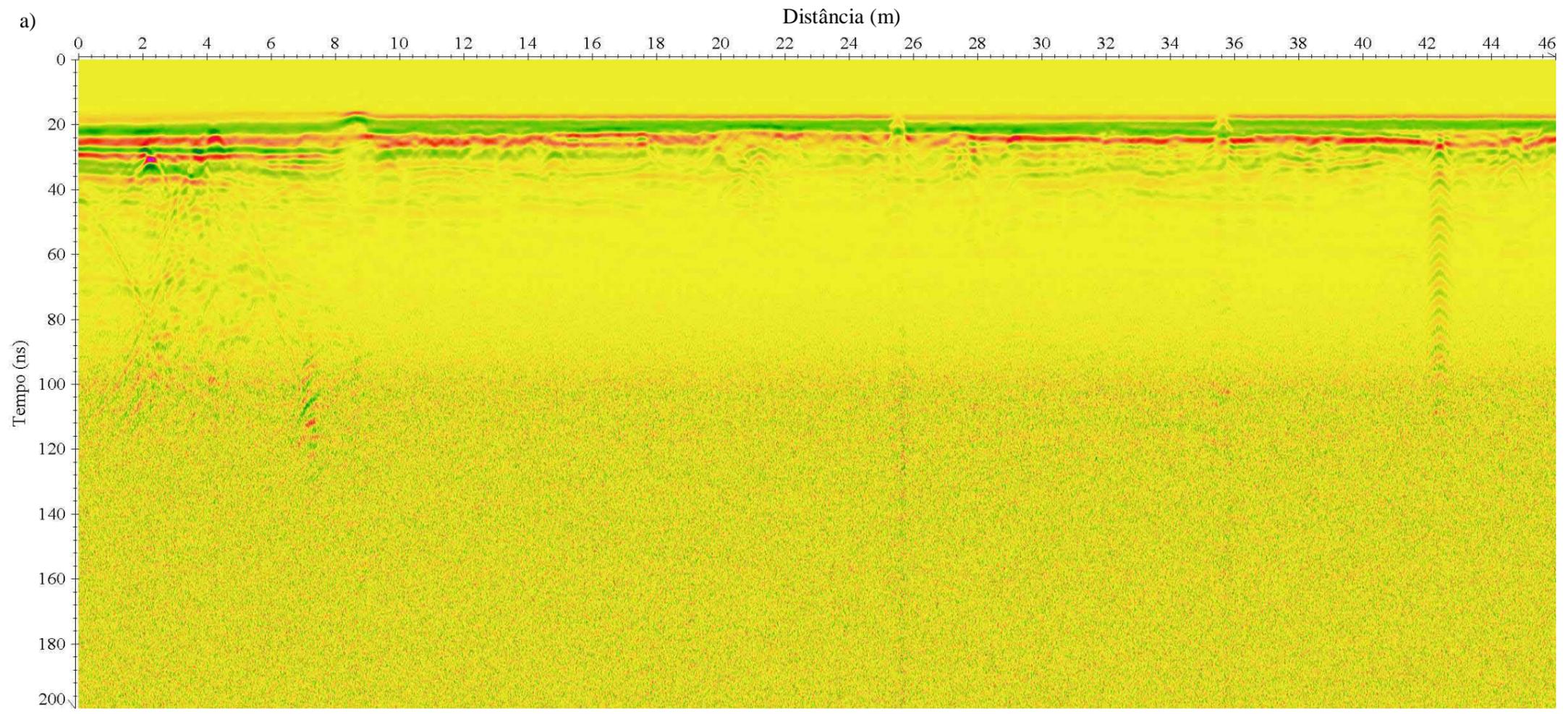
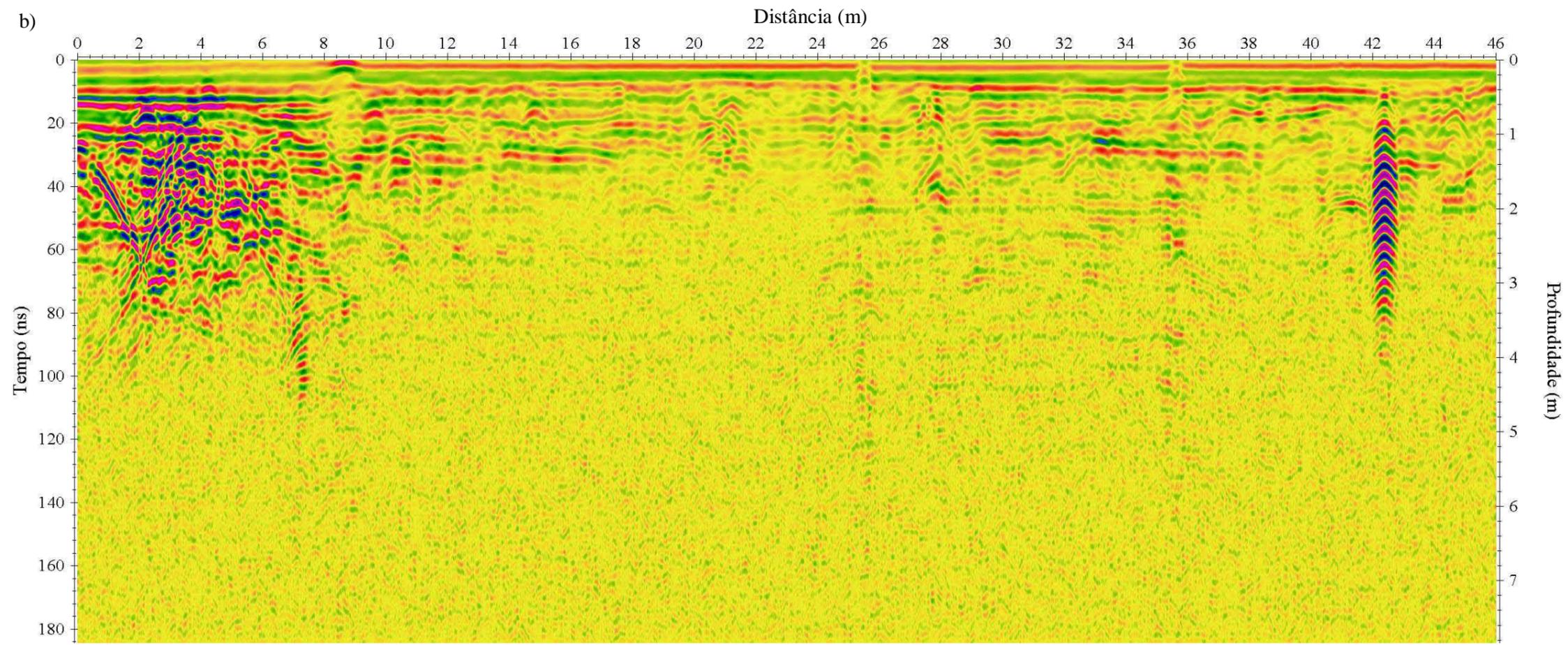


Figura 5.16 – Perfil03-200-100. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas brancas delimitam as zonas atenuadas, as pretas pontilhadas, as camadas atenuadas e as pretas contínuas, as concreções ferruginosas ou areia. T assinala tubulação e C, canaleta.





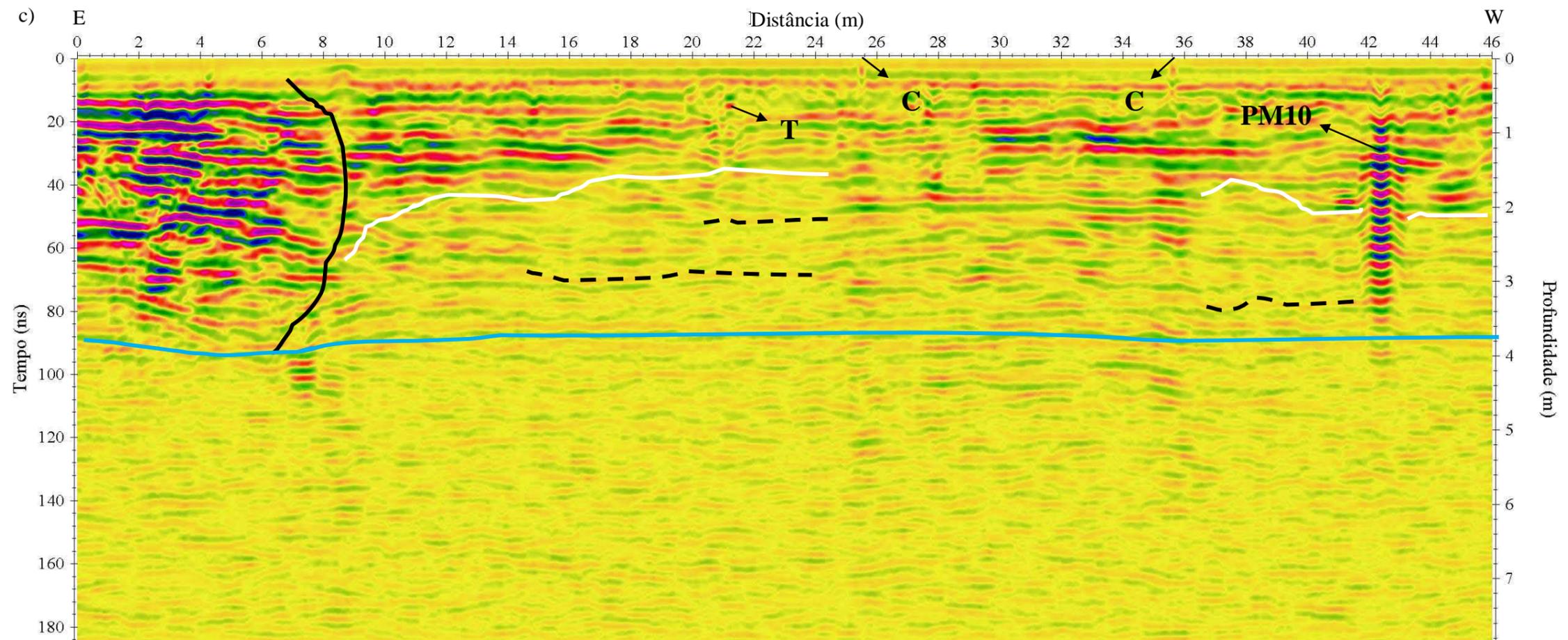


Figura 5.17 – Perfil3-200-200. Radargramas. a) Bbruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas brancas delimitam as zonas atenuadas, a azul, o nível hidrostático, as pretas pontilhadas, as camadas atenuadas e as pretas contínuas, as concreções ferruginosas ou areia. PM10 assinala o poço de monitoramento 10, T, tubulação e C, canaleta.

5.4.4 Perfil 4

O perfil 4 estende-se N-S por 40 m na porção mais a oeste do posto, próximo à travessa Custódio de Almeida e paralelo a esta, sendo coberto com bloquetes e grama (Figura 5.6). Os radargramas obtidos nesse perfil foram reunidos nas Figuras 5.18, 5.19 e 5.20.

Na Figura 5.18c nota-se uma grande zona atenuada abaixo de 1 m de profundidade, se estendendo de 0 a 32 m de extensão. Esta atenuação é provocada por uma extensa camada de argila, como mostrado na secção geológica (Figura 5.3b). Já entre 32 e 40 m, percebe-se uma zona bem resistiva, causada provavelmente por concreções ferruginosas ou por areia.

Percebem-se, ainda, reflexões causadas pelos: PM's 10 e 3 localizados a 1 e 27 m do início do perfil, respectivamente; meio fio (MF), a 33 m e tubulações, a 14, 17, 18,50, 19,50, 21 e 23,50 m.

Na Figura 5.19c notam-se as mesmas zonas resistivas e condutivas estendendo-se mais profundamente, bem como as reflexões causadas pelo MF e pelas tubulações. O NH não pôde ser visualizado em consequência de estar abaixo do campo de visualização alcançado por este radargrama, que foi de aproximadamente 3,8 m. A baixa profundidade alcançada foi provocada, possivelmente, pela grande quantidade de argila no local deste perfil (Figura 5.3b).

Já na Figura 5.20c percebe-se todos os refletores vistos nas Figuras 5.18c e 5.19c. O NH pôde ser visualizado a 3,5 m de profundidade.

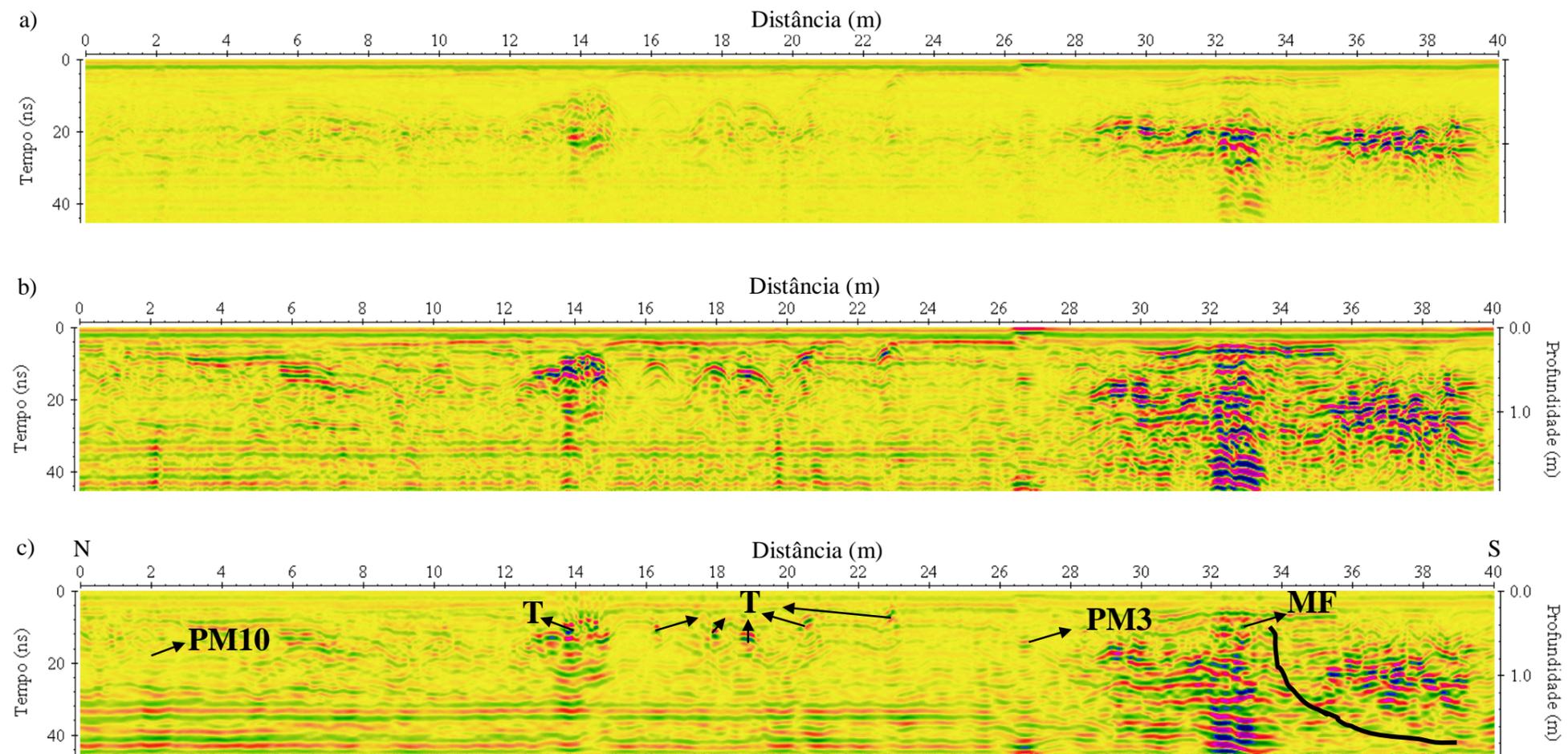


Figura 5.18 – Perfil 4-400-50. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas brancas delimitam as zonas atenuadas, as pretas contínuas, concreções ferruginosas ou areia, já as pretas pontilhadas, camadas atenuadas. PM10 assinala poço de monitoramento 10, T, por sua vez, tubulação e MF, o meio fio.

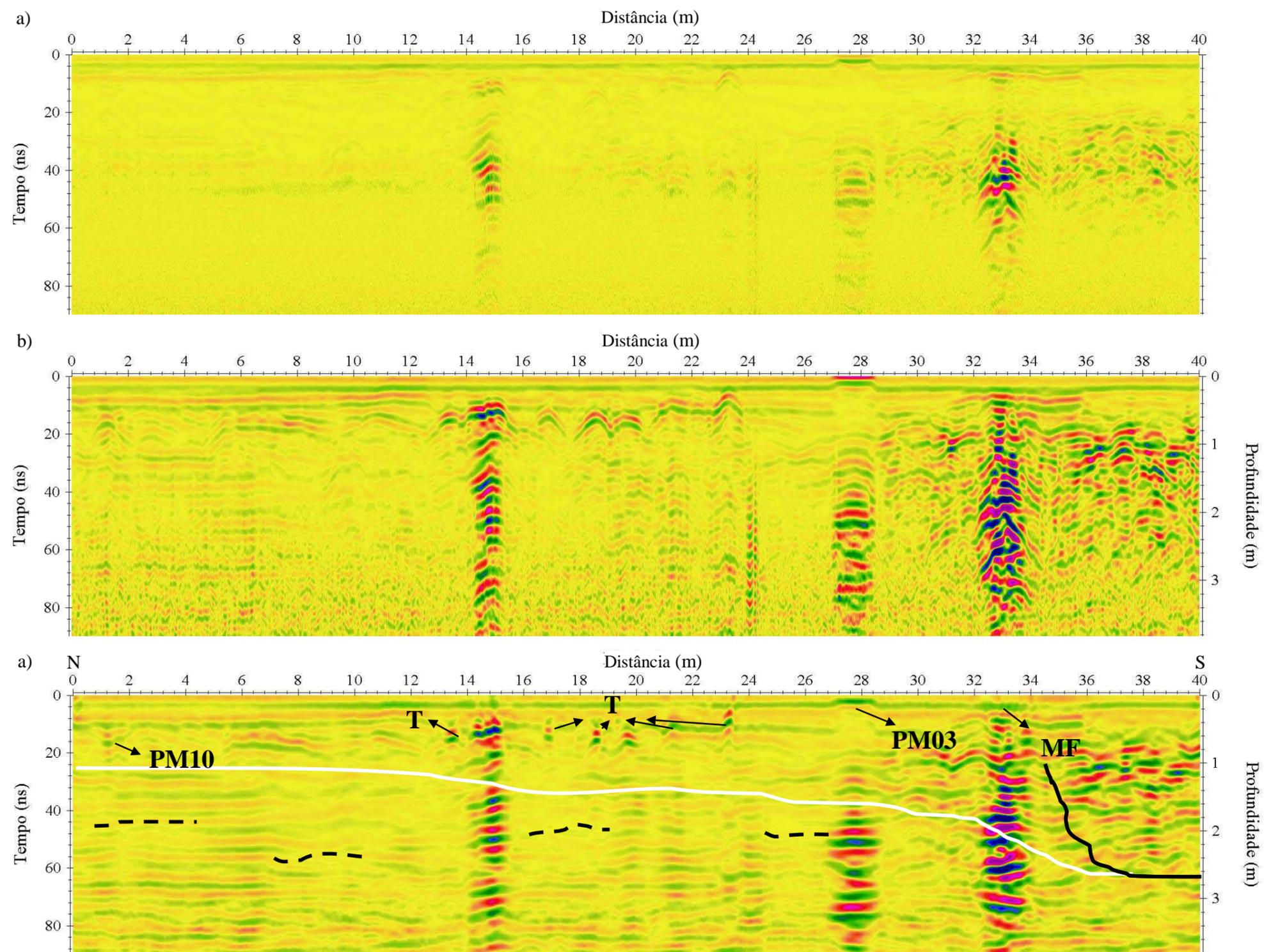
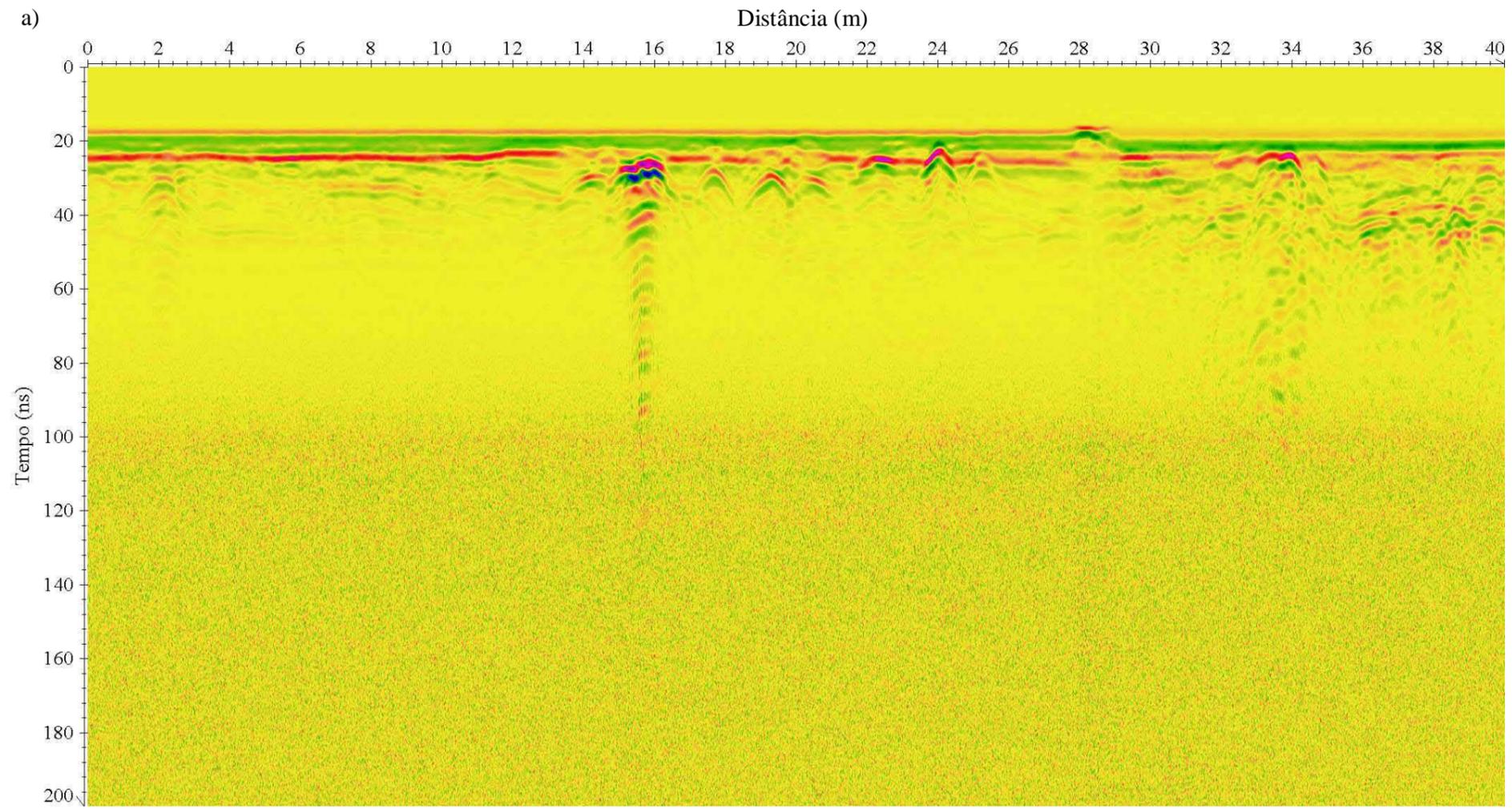
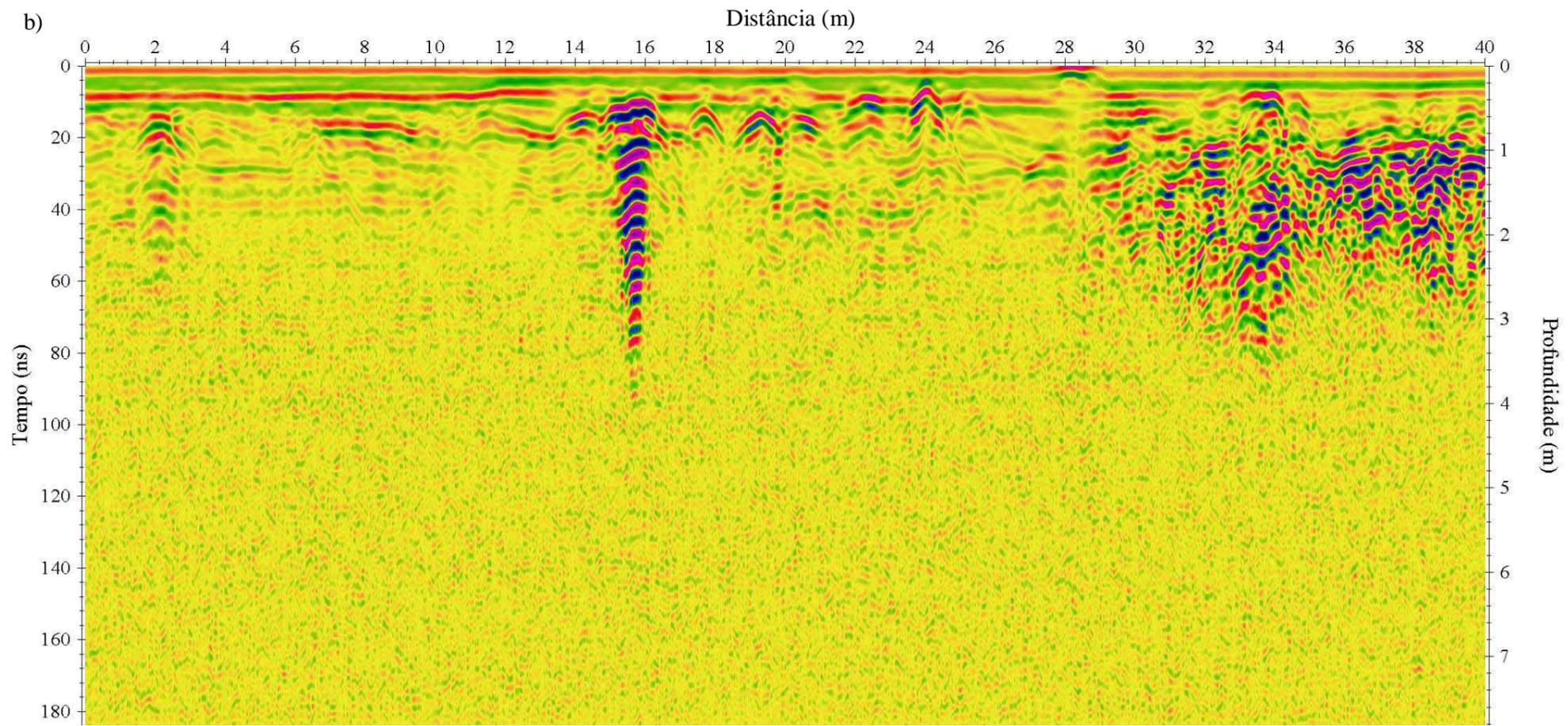


Figura 5.19 – Perfil 4-200-100. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. A linha branca delimita a zona atenuada e as pretas contínuas, as concreções ferruginosas ou areia, já as pretas pontilhadas, camadas atenuadas. PM10 e PM3 assinalam poços de monitoramentos 10 e 3, respectivamente, T, por sua vez, tubulação e MF, o meio fio.





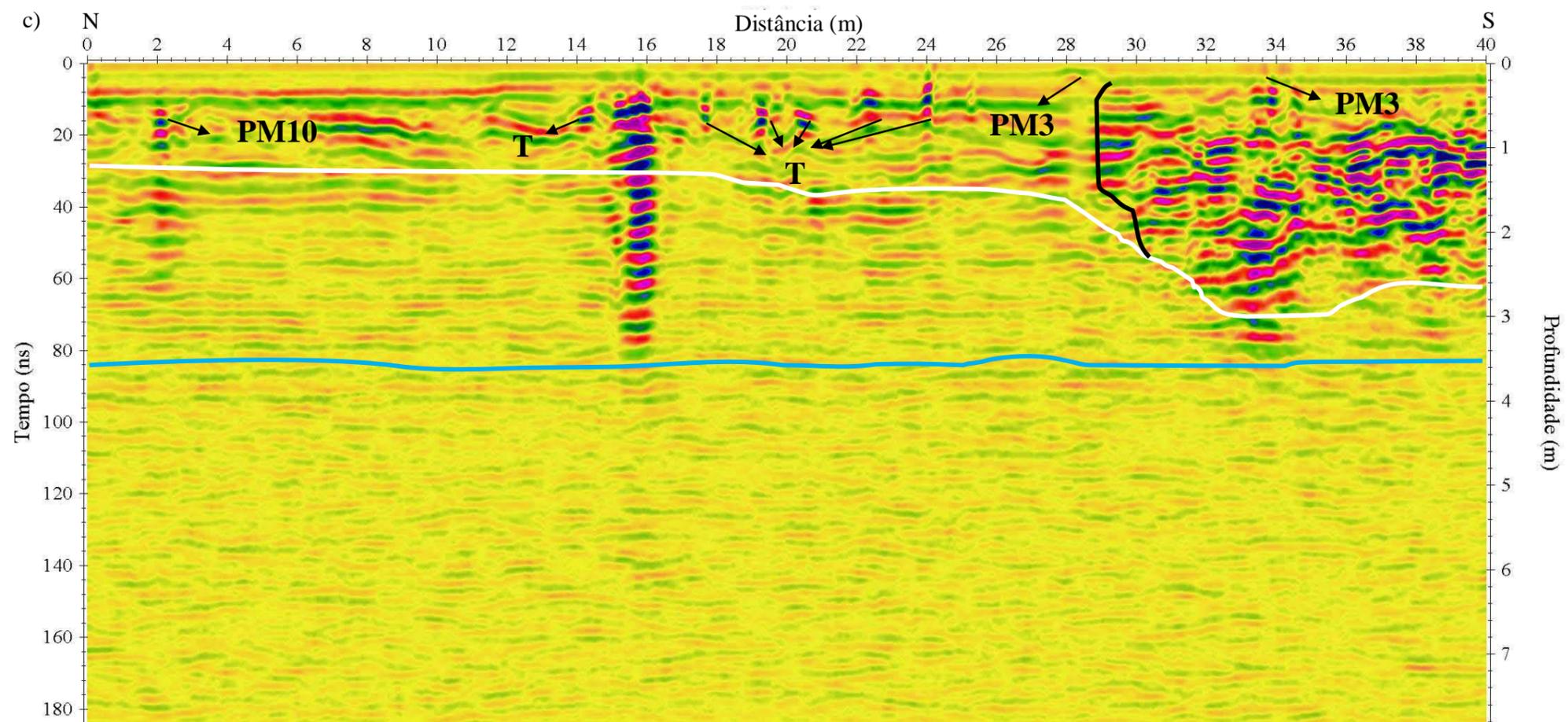


Figura 5.20 – Perfil 4-200-200. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. A linha branca delimita a zona atenuada e a preta contínua, as concreções ferruginosas ou areia. PM10 e PM3 assinalam poços de monitoramentos 10 e 3, respectivamente, T, por sua vez, tubulação e MF, o meio fio.

5.4.5 Perfil 5

O perfil 5 estende-se N-S por 26 m, passando em cima dos 6 tanques subterrâneos (TS) cobertos por bloquete (Figura 5.6). As Figuras 5.21, 5.22 e 5.23 apresentam os radargramas para o perfil.

Na Figura 5.21c notam-se alguns pontos com zonas e camadas atenuadas acima dos tanques, a aproximadamente 1 m de profundidade, entre 8 e 10 m, 11 e 15 m e entre 18 e 22 m. É possível, ainda, localizar os 6 TS's através de seis refletores vistos em: 9, 13, 16,5, 20,5, 23,5 e 25,5 m, bem como a presença de duas tubulações localizadas em 14,5 e 23 m.

Já na Figura 5.22c notam-se as mesmas zonas atenuadas, bem como as reflexões causadas pelos TS's e pelas tubulações. Percebe-se, ainda, um deslocamento de aproximadamente 2 m na localização de todos os refletores com relação à Figura 5.21c, ocasionado pela diferença entre o ponto inicial das medidas realizadas em março e aquelas realizadas em novembro e dezembro, com as antenas de 200 e 400 MHz, respectivamente.

Chama a atenção, também, nesse radargrama, o contraste abaixo do tanque mais ao N (tanque 1), entre cerca de 1 e 2 m de profundidade, que é precedido por uma zona bastante atenuada na sua lateral Norte (entre 6 m e 2 m) que, por sua vez, é precedida por zona com contraste (0 a 1 m). Essa iluminação abaixo do único tanque que estava ativo por ocasião da investigação da ENSR pode denotar fuga de combustível na sua fase resistiva, mais recente, em condições de menor biodegradação. Alguma iluminação de contraste aparece também abaixo dos tanques 2, 4 e 6, mas a iluminação do tanque 6 mais ao Sul decorre do fato dele ser o único ecológico, feito não de aço como os demais, mas de PDAG (não absorve as ondas).

Já na Figura 5.23c é possível visualizar todos os refletores mostrados nas Figuras 5.21c e 5.22c, no entanto, os refletores encontram-se deslocados em 3 m com relação aos mostrados na Figura 5.21c. O NH, por sua vez, pôde ser visto a 3,5 m de profundidade por causa do inverno amazônico.

Todas as zonas atenuadas podem ter sido causadas pela biodegradação de hidrocarbonetos na fase residual (SAUCK, 2000), e, em parte, pela absorção da energia pelos tanques de aço.

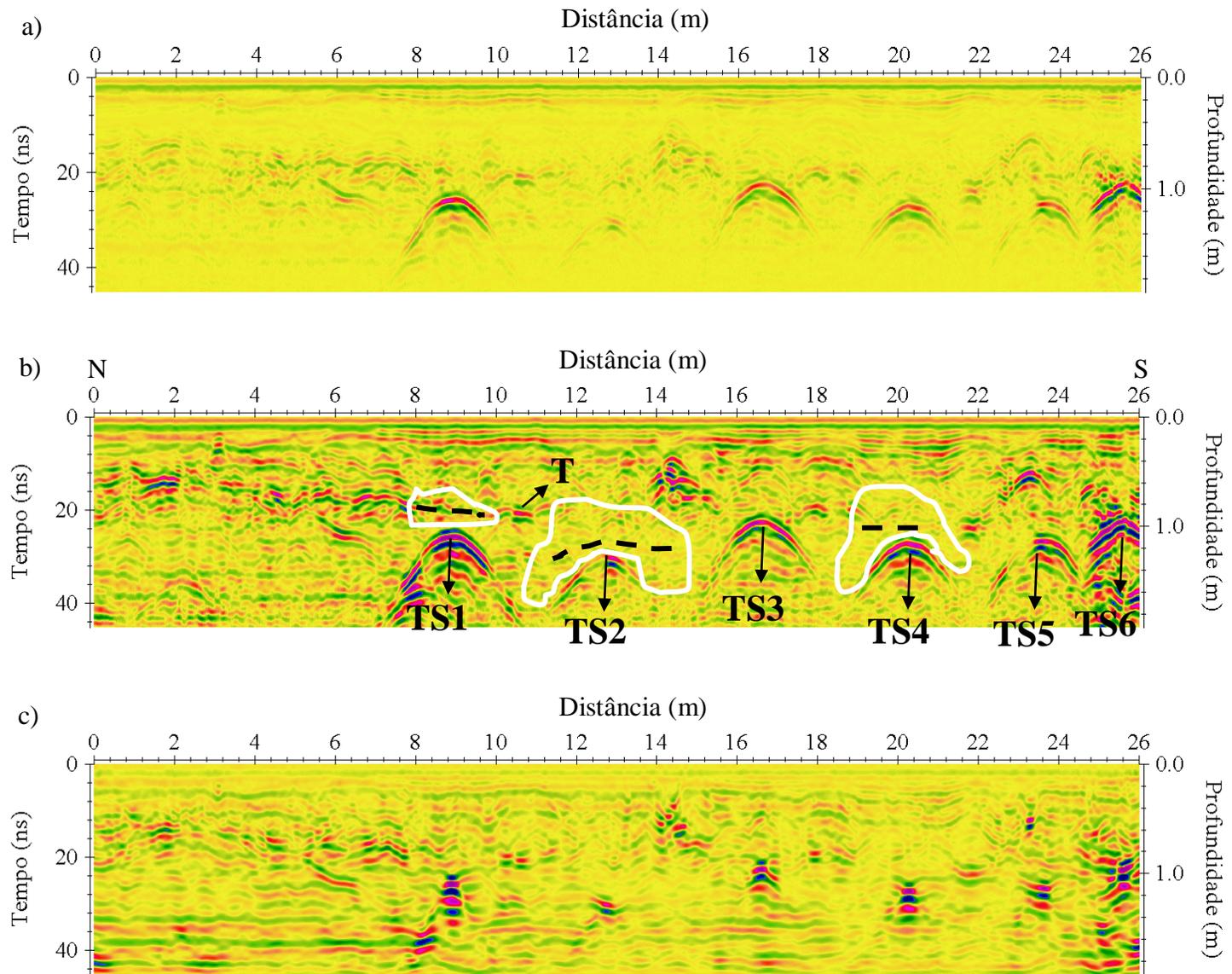
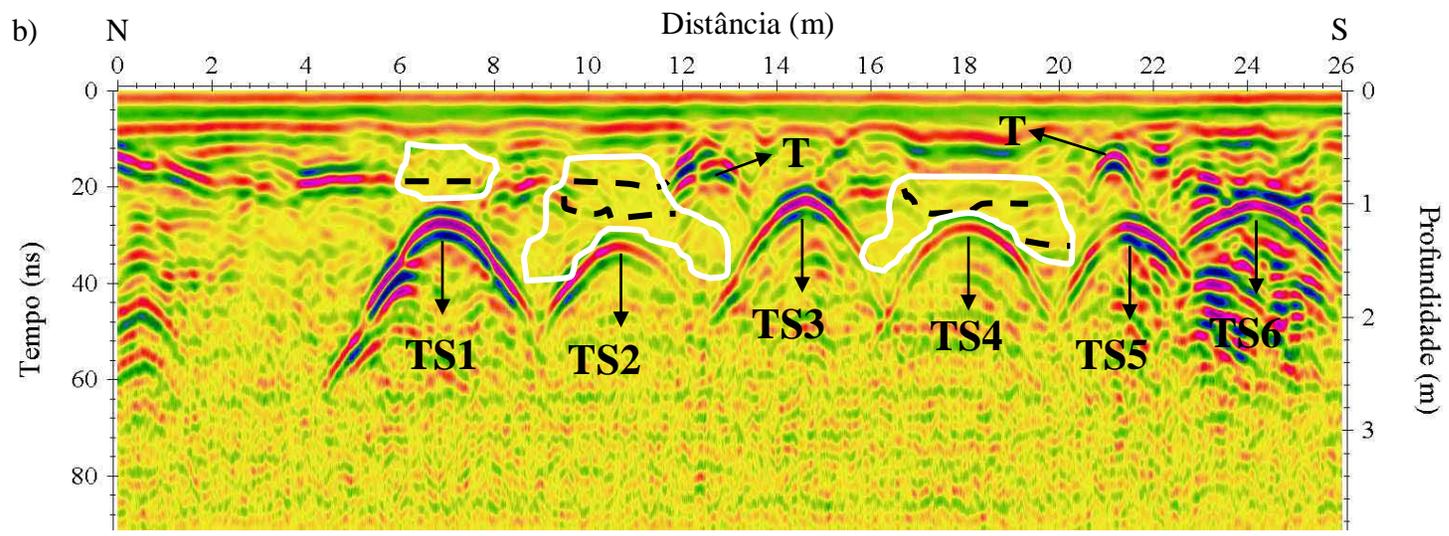
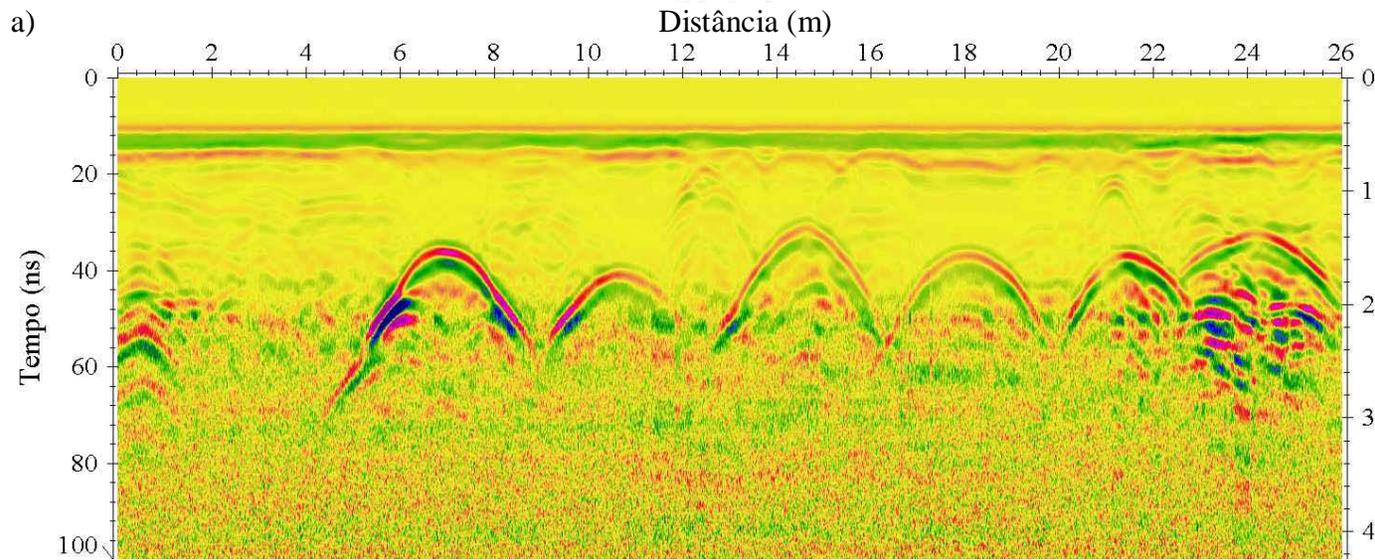


Figura 5.21 – Perfil 5-400-50. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas brancas delimitam as zonas atenuadas e a preta pontilhada, camada atenuada. TS1, TS2, TS3, TS4, TS5 e TS6 assinalam tanques subterrâneos e T, tubulação.



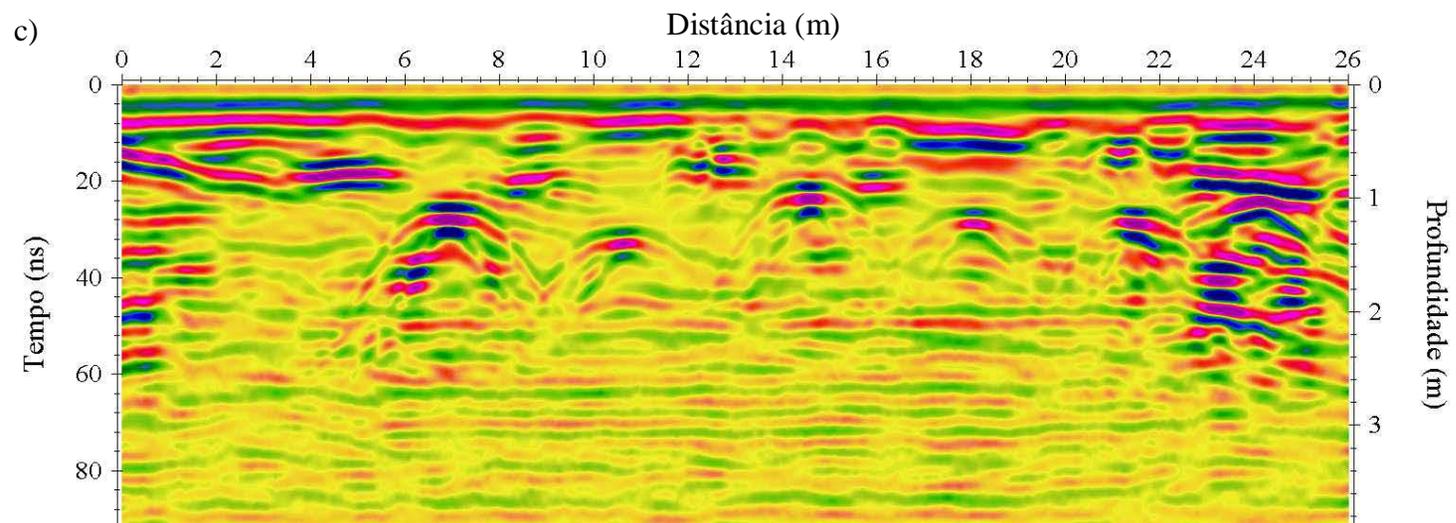
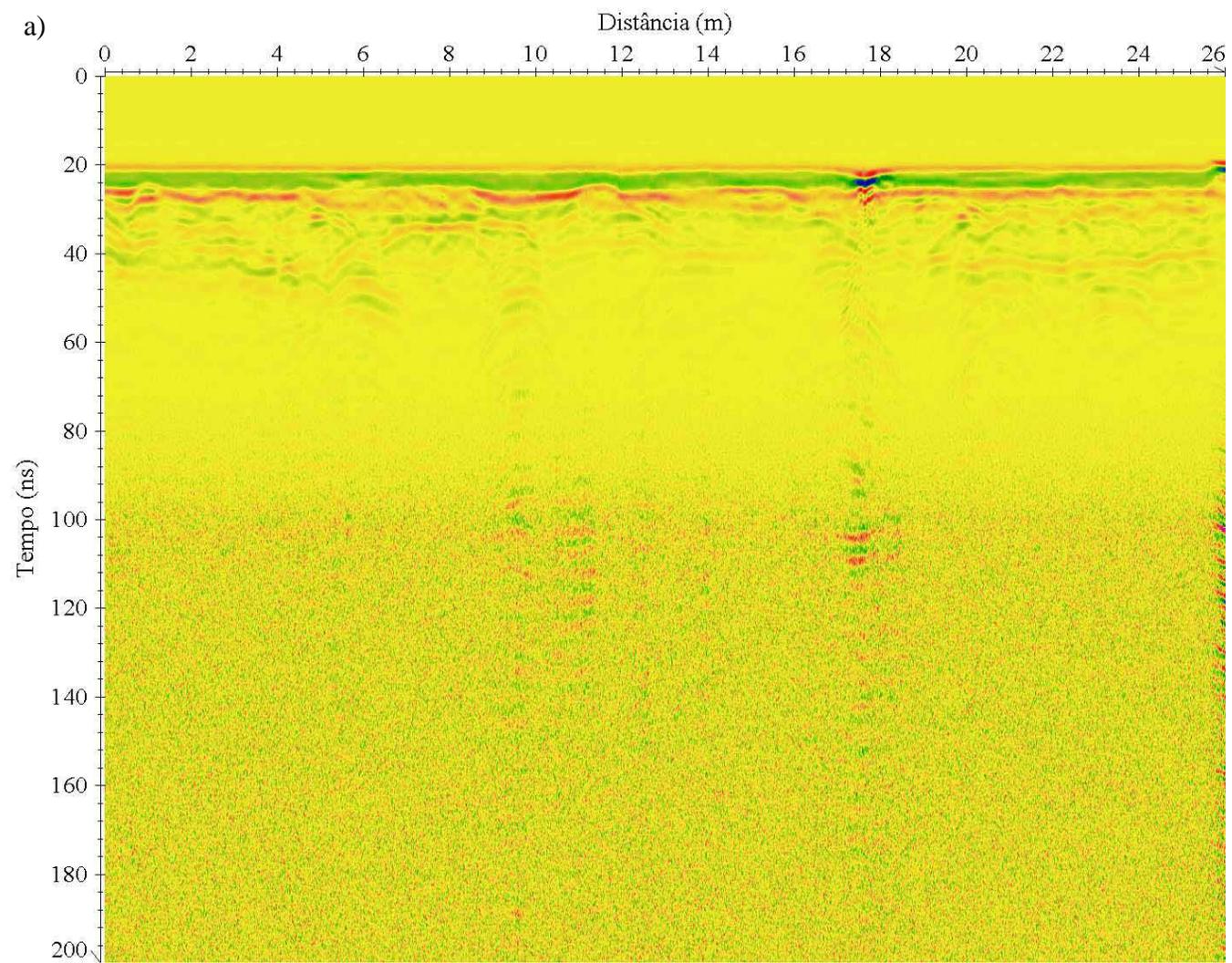
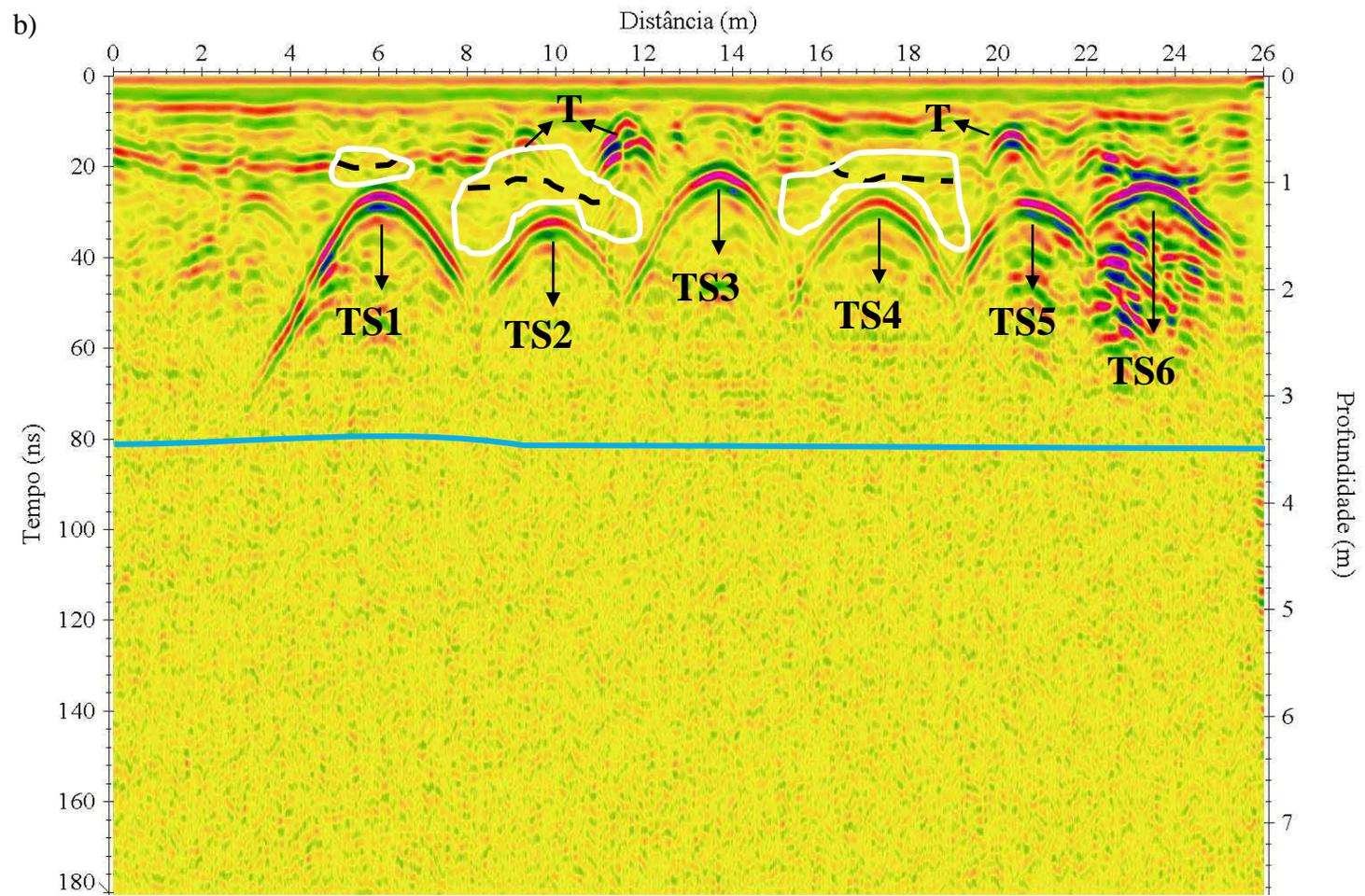


Figura 5.22 – Perfil 5-200-100. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado. As linhas brancas delimitam as zonas atenuadas e as pretas pontilhadas, camadas atenuadas. TS1, TS2, TS3, TS4, TS5 e TS6 assinalam tanques subterrâneos e T, tubulação.





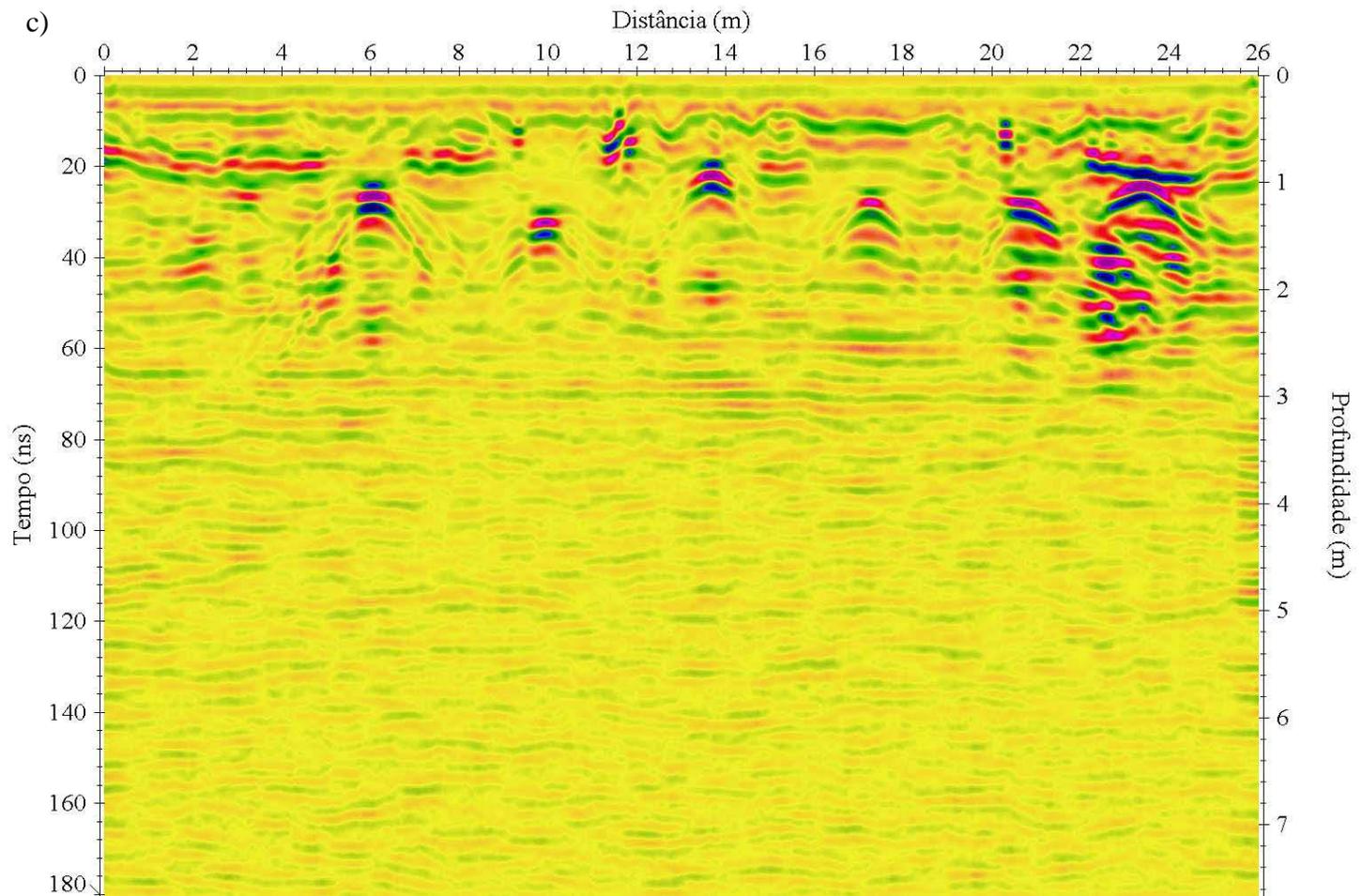


Figura 5.23 – Perfil 5-200-200. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas brancas delimitam as zonas atenuadas, a azul, nível hidrostático e as pretas pontilhadas, camadas atenuadas. TS1, TS2, TS3, TS4, TS5 e TS6 assinalam tanques subterrâneos e T, tubulação.

5.4.6 Perfil 6

O perfil 6 tem 28 m na direção N-S, logo é paralelo e próximo ao perfil 5 que passa por cima dos tanques, entre os 6 tanques e as 3 ilhas de bombas de combustíveis (Figura 5.6), por onde foram encontradas as maiores concentrações de VOC (Figura 5.4) (ENRS, 2007). O piso é de bloquetes. Os radargramas obtidos aparecem reunidos nas Figuras 5.24, 5.25 e 5.26.

A Figura 5.24c mostra duas zonas com camadas atenuadas, uma superior, a 1 m de profundidade, entre 9 e 19,5 m, e uma menor, mais profunda, a 1,8 m de profundidade, entre 10,5 e 16,5 m.

A Figura 5.25c evidencia uma redução da zona atenuada mais superior mostrada na Figura 5.24c, que se divide em duas novas, uma entre 10,5 e 13 m, e outra em 15 e 17 m, aproximadamente. A zona atenuada inferior, contudo, se estende ainda mais profundamente, estendendo-se de 7 a 26 m que, pelo formato, caracterizaria a presença de combustível deslocando-se preferencialmente para Sul; a presença de argila, uma explicação possível, é descartada pelo relatório da ENSR, que descreve para a zona a presença de areia (Figura 5.3c). Notam-se, ainda, duas outras zonas, uma maior, entre 0 e 4 m, a cerca de 1,8 m de profundidade, e outra menor, entre 20 e 22 m, a 2 m de profundidade.

Já na Figura 5.26c nota-se uma considerável redução nas zonas e camadas atenuadas em comparação às Figuras 5.24c e 5.25c. Essa redução pode ter sido causada pela inserção das águas das chuvas de novembro a março, causando a lixiviação dos ácidos graxos decorrentes da biodegradação dos hidrocarbonetos, o que aumentaria a resistividade do solo, já que o mesmo nesta área é formado por camadas de areias (Figura 5.3c). Caso fosse argila, ocorreria o contrário, ou seja, a atenuação aumentaria com as chuvas, devido a sua maior porosidade e menor permeabilidade do que a areia. As zonas atenuadas podem ser vistas: entre as extensões 7 e 9,5 m a 1,5 m de profundidade; entre 6 e 9,5 m a 3,5 m; entre 18 e 26 m a 3,5 m de profundidade e entre 10 e 16 m a partir de 1 m de profundidade.

O NH pôde ser visualizado a 3.5 m de profundidade.

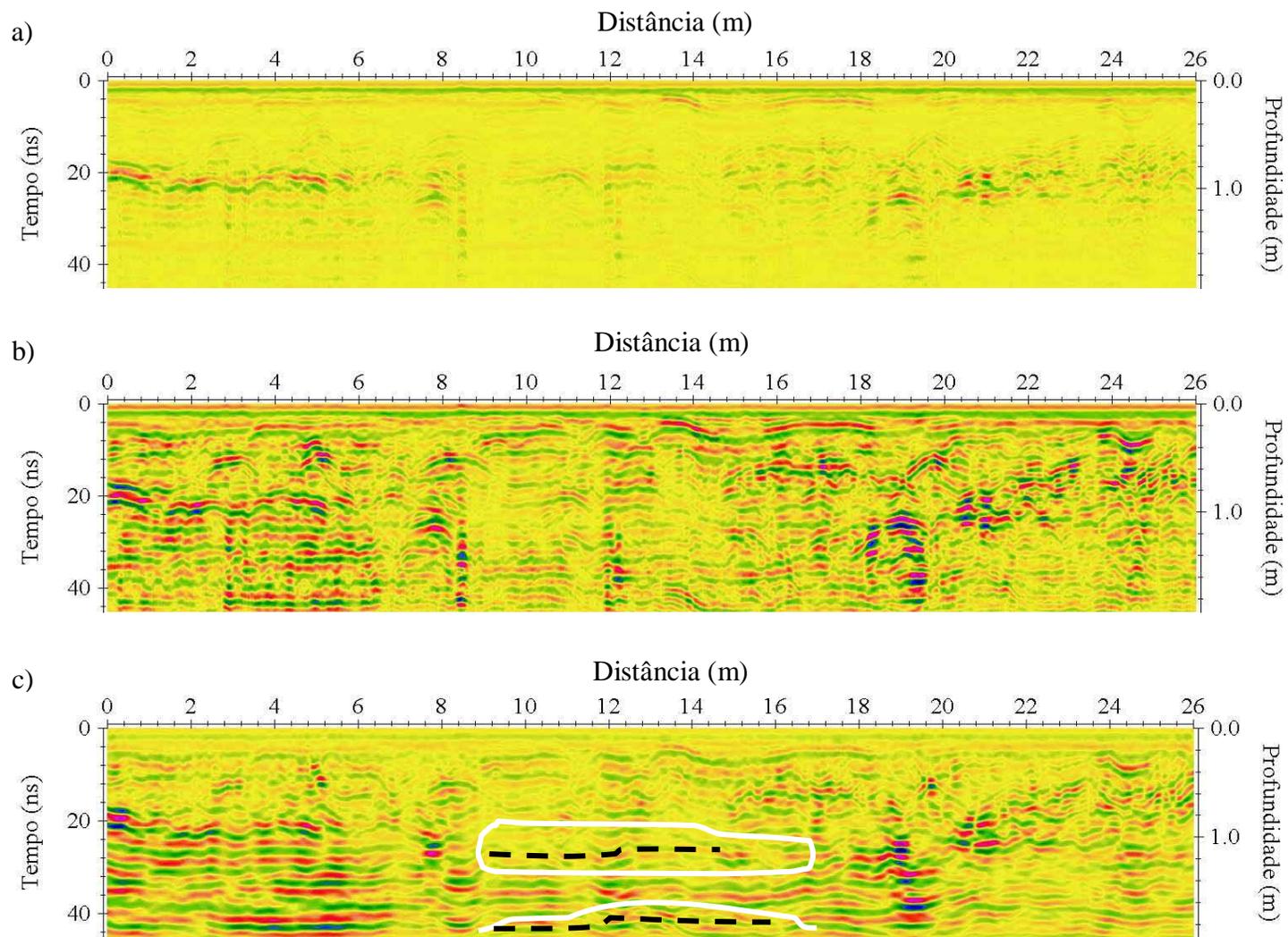
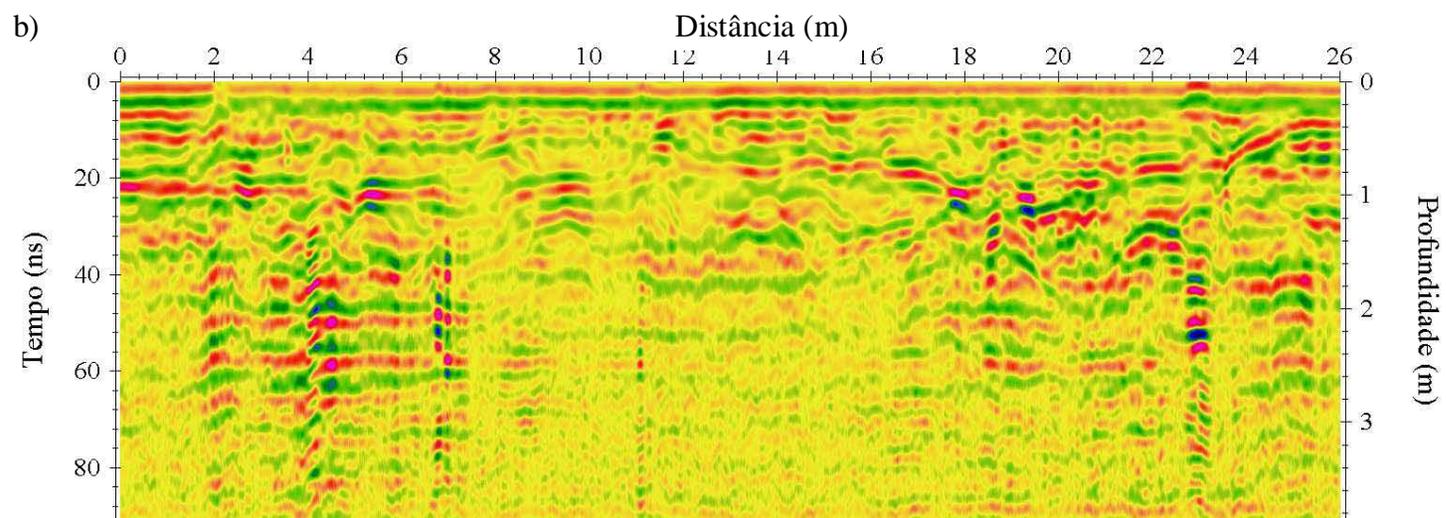
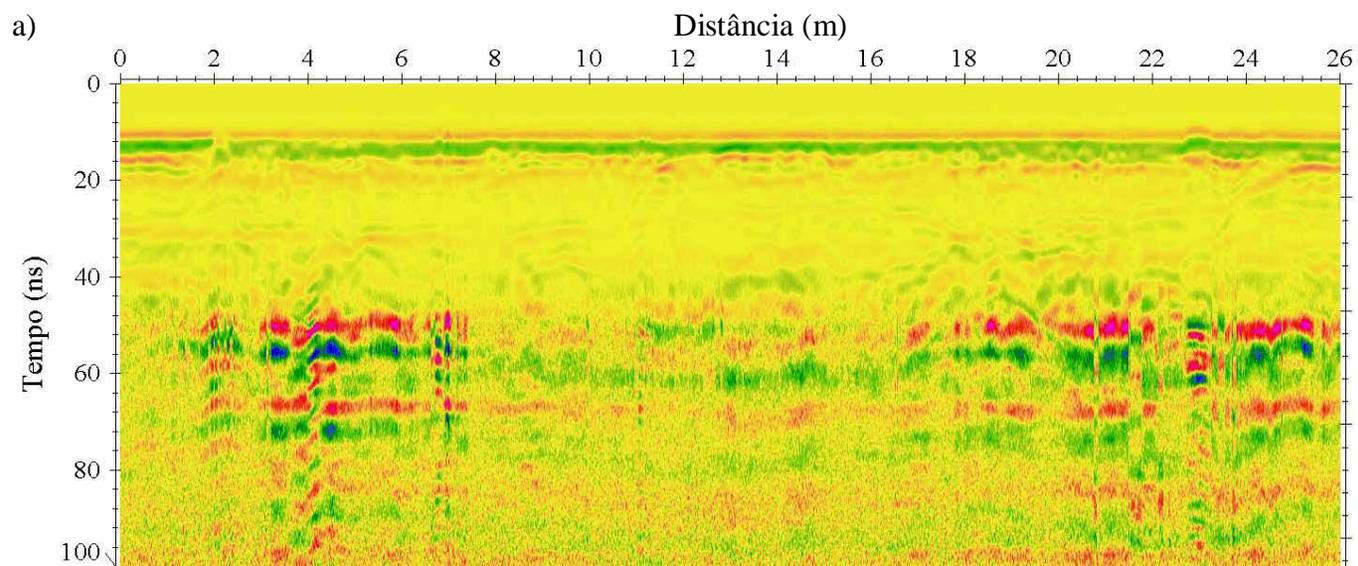


Figura 5.24 – Perfil 6-400-50. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas brancas delimitam as zonas atenuadas e as pretas pontilhadas, camadas atenuadas.



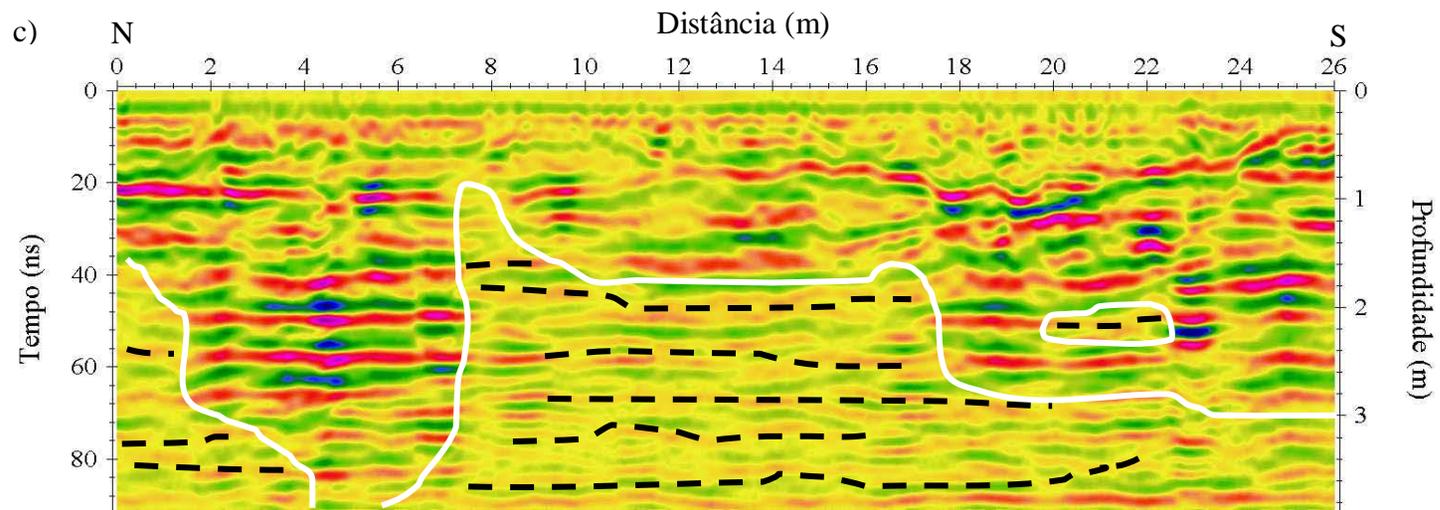
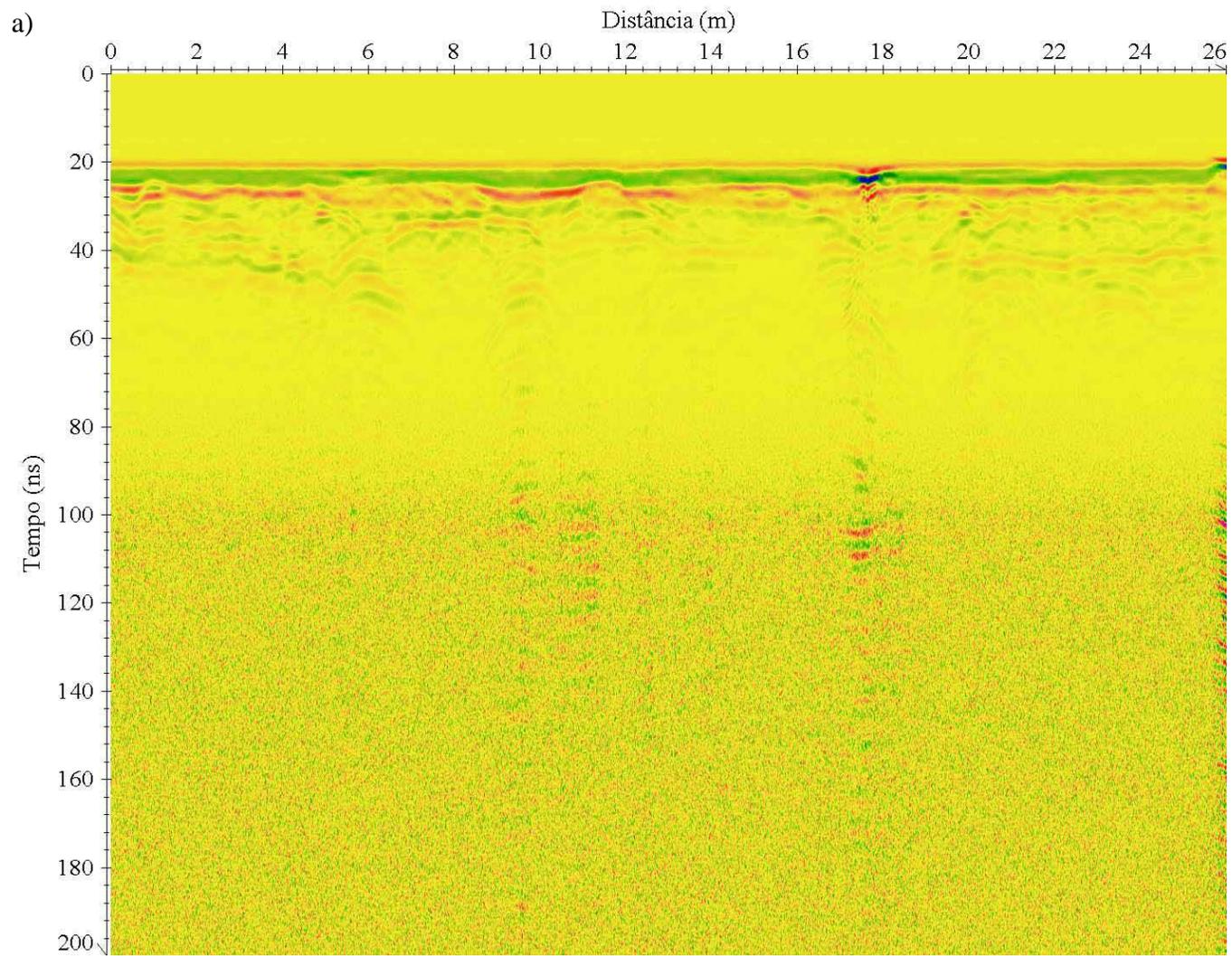
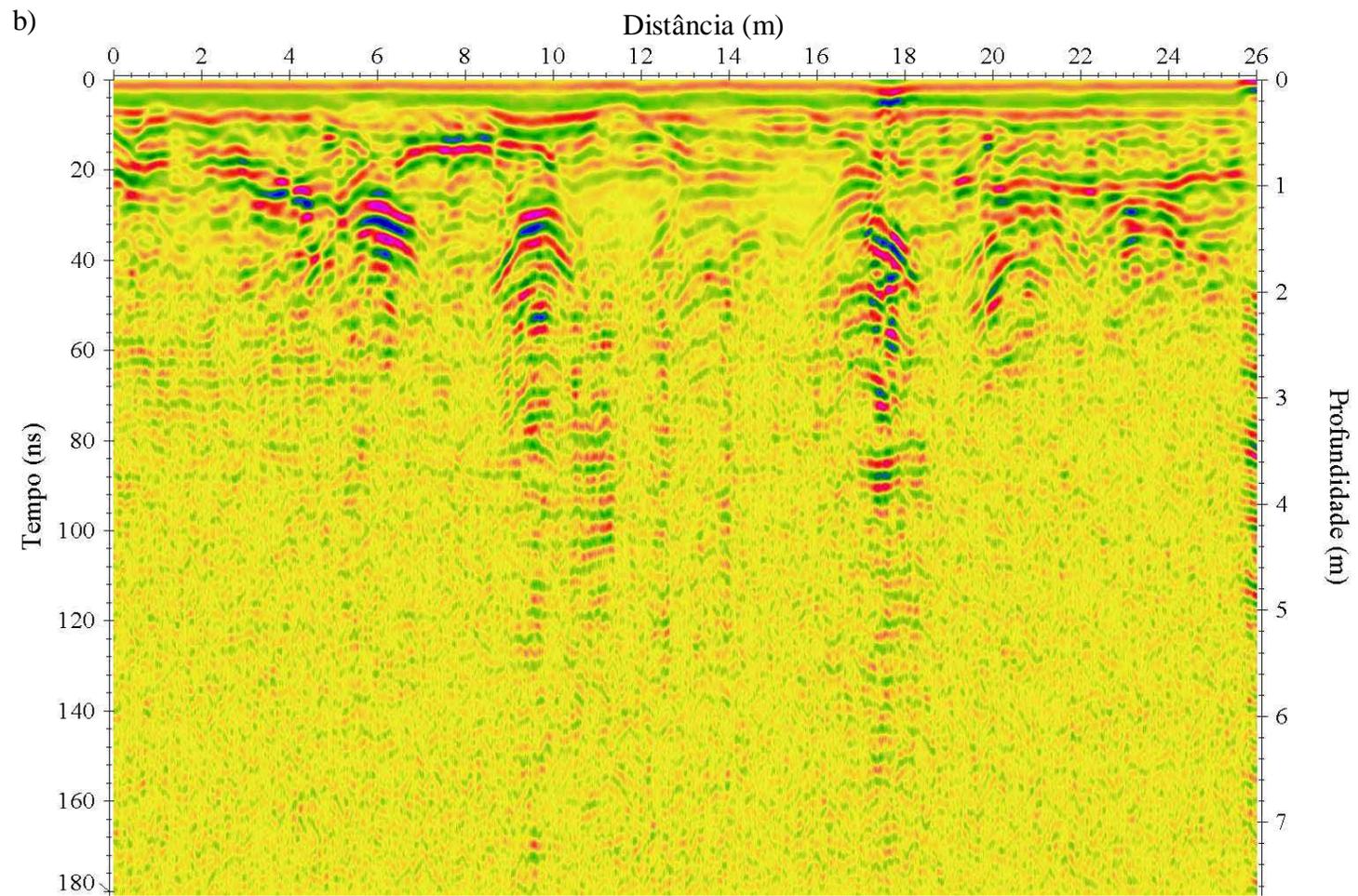


Figura 5.25 – Perfil 6-200-100. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas brancas delimitam as zonas atenuadas, a azul, nível hidrostático e as pretas pontilhadas, camadas atenuadas.





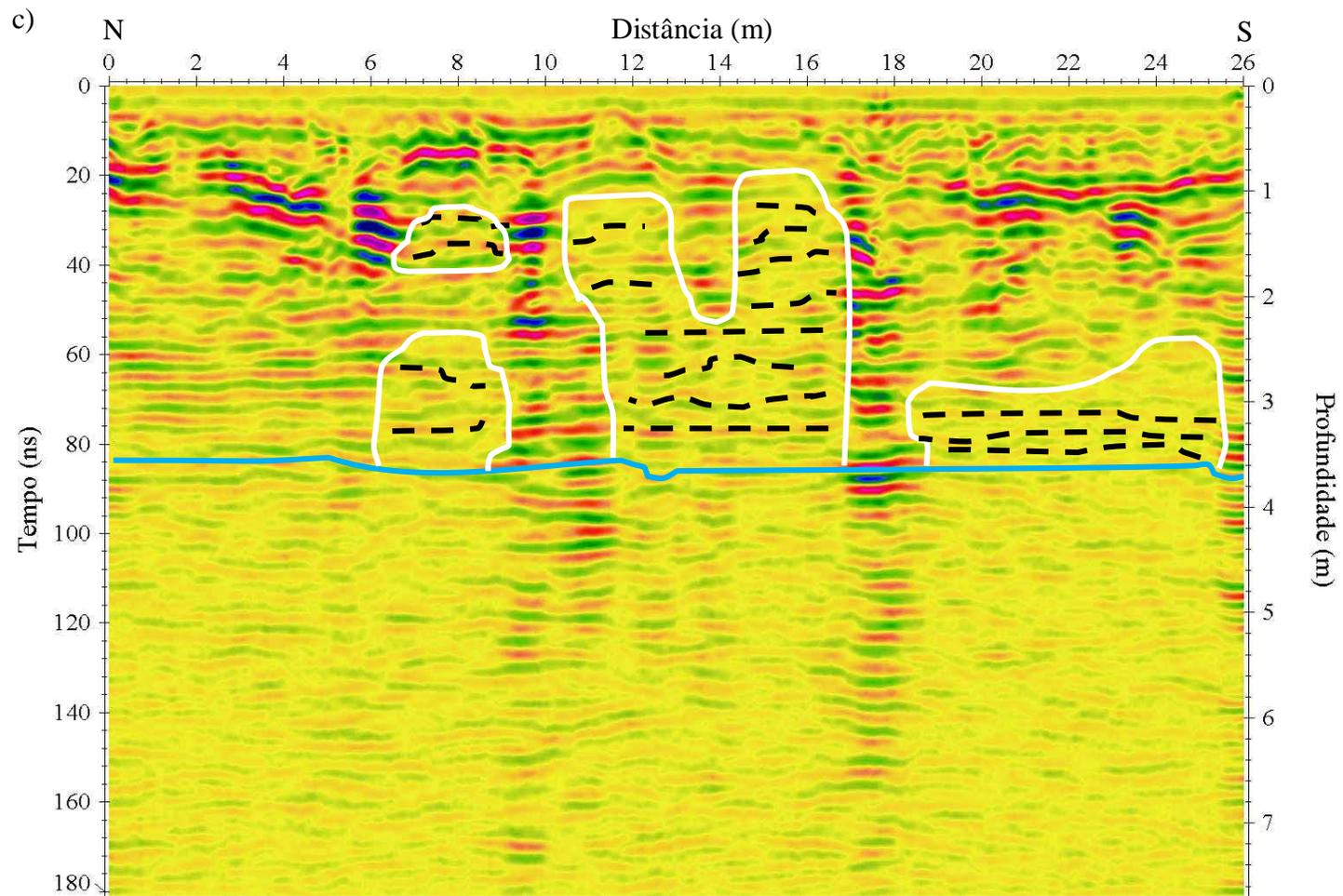


Figura 5.26 – Perfil 6-200-200. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas brancas delimitam as zonas atenuadas, a azul, nível hidrostático e as pretas pontilhadas, camadas atenuadas.

5.4.7 Perfil 7

O perfil 7, realizado sobre o tanque 6, estende-se W-E ao longo de 28 m, passando perpendicularmente à extensão do TS6 (Figura 5.6). O piso é de bloquete. Os radargramas obtidos são mostrados nas Figuras 5.27, 5.28 e 5.29.

Na Figura 5.27c notam-se duas zonas atenuadas, uma entre 10 e 12,5 m, e outra, entre 22 e 27 m, as duas localizadas a aproximadamente 1 m de profundidade. É possível, ainda, visualizar: um refletor cujo centro está localizado a 6 m do início do perfil, a 1 m de profundidade, que corresponde ao TS6, bem como duas tubulações vistas a aproximadamente à distância de 14 m do início do perfil, a 20 cm de profundidade.

Já a Figura 5.28c mostra os mesmos refletores e zonas atenuadas, contudo, observa-se um pequeno aumento na zona atenuada entre 21 e 26 m.

Finalmente, na Figura 5.29c, notam-se os mesmos alvos vistos nas Figuras 5.27c e 5.28c, no entanto, observa-se uma grande área atenuada, ocasionada pelas chuvas de novembro a fevereiro (Figura 5.7).

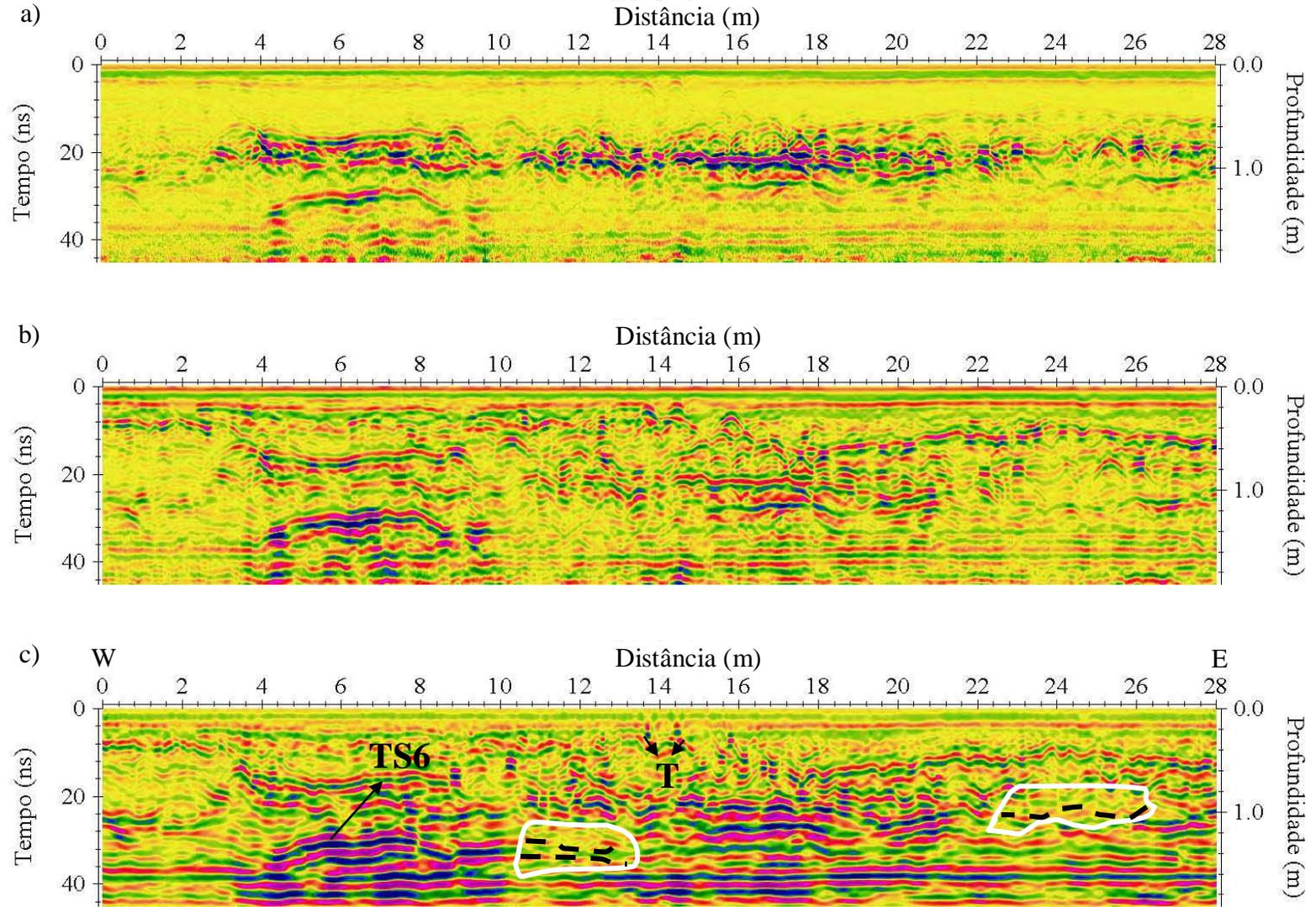
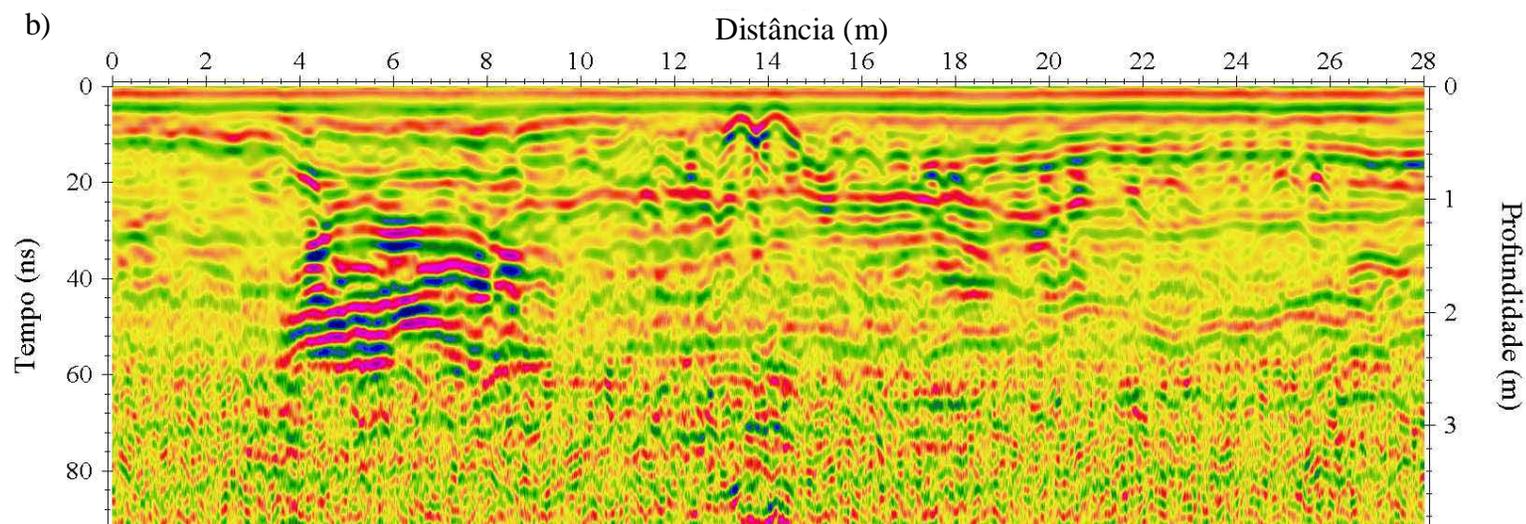
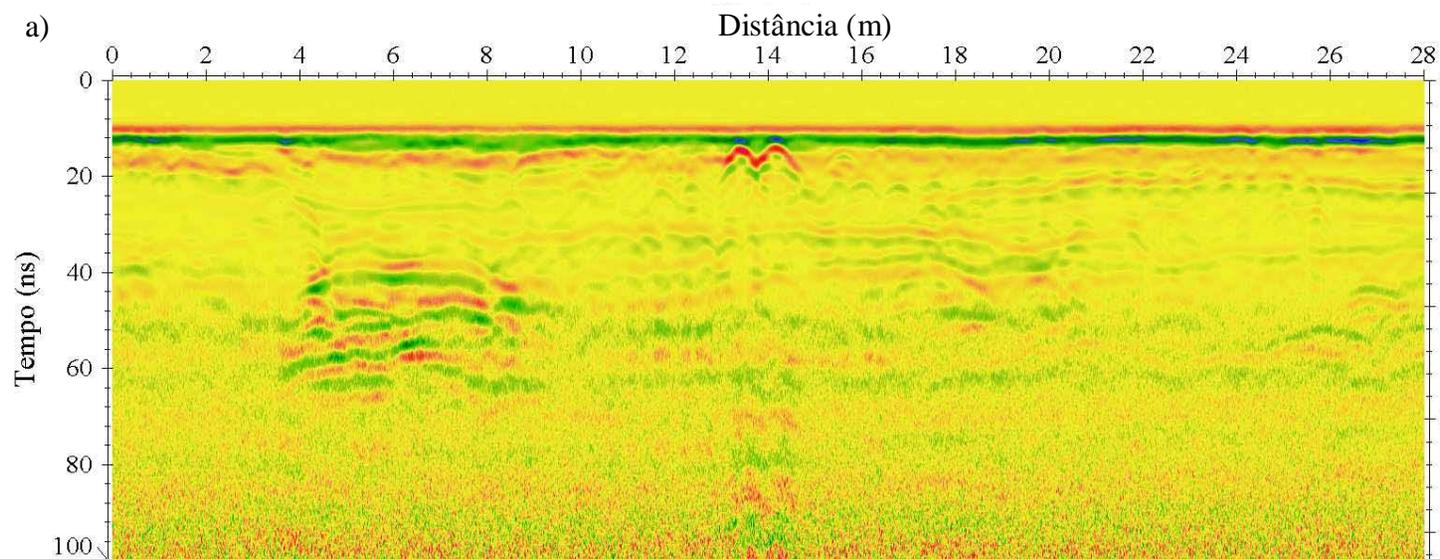


Figura 5.27 – Perfil 7-400-50. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas brancas delimitam as zonas atenuadas e as pretas pontilhadas, camadas atenuadas. TS6 assinala tanque subterrâneo 6 e T, tubulação.



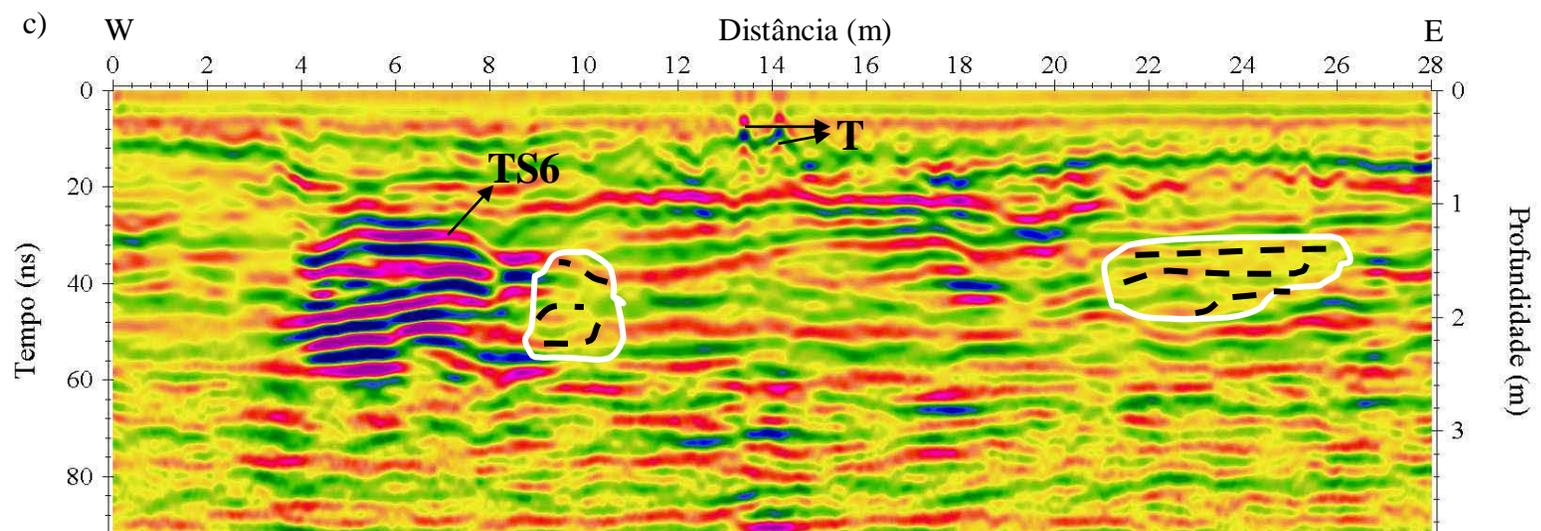
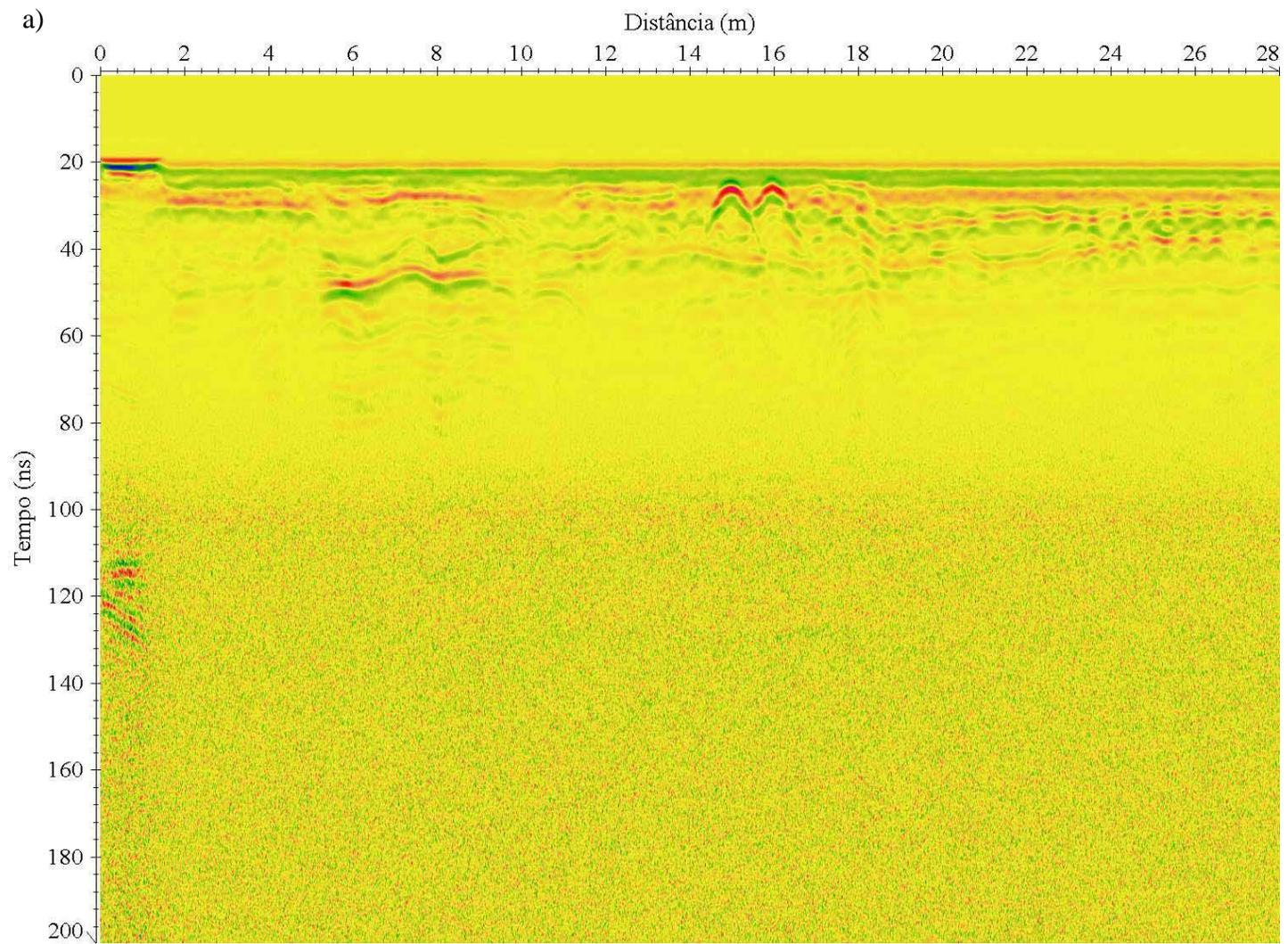
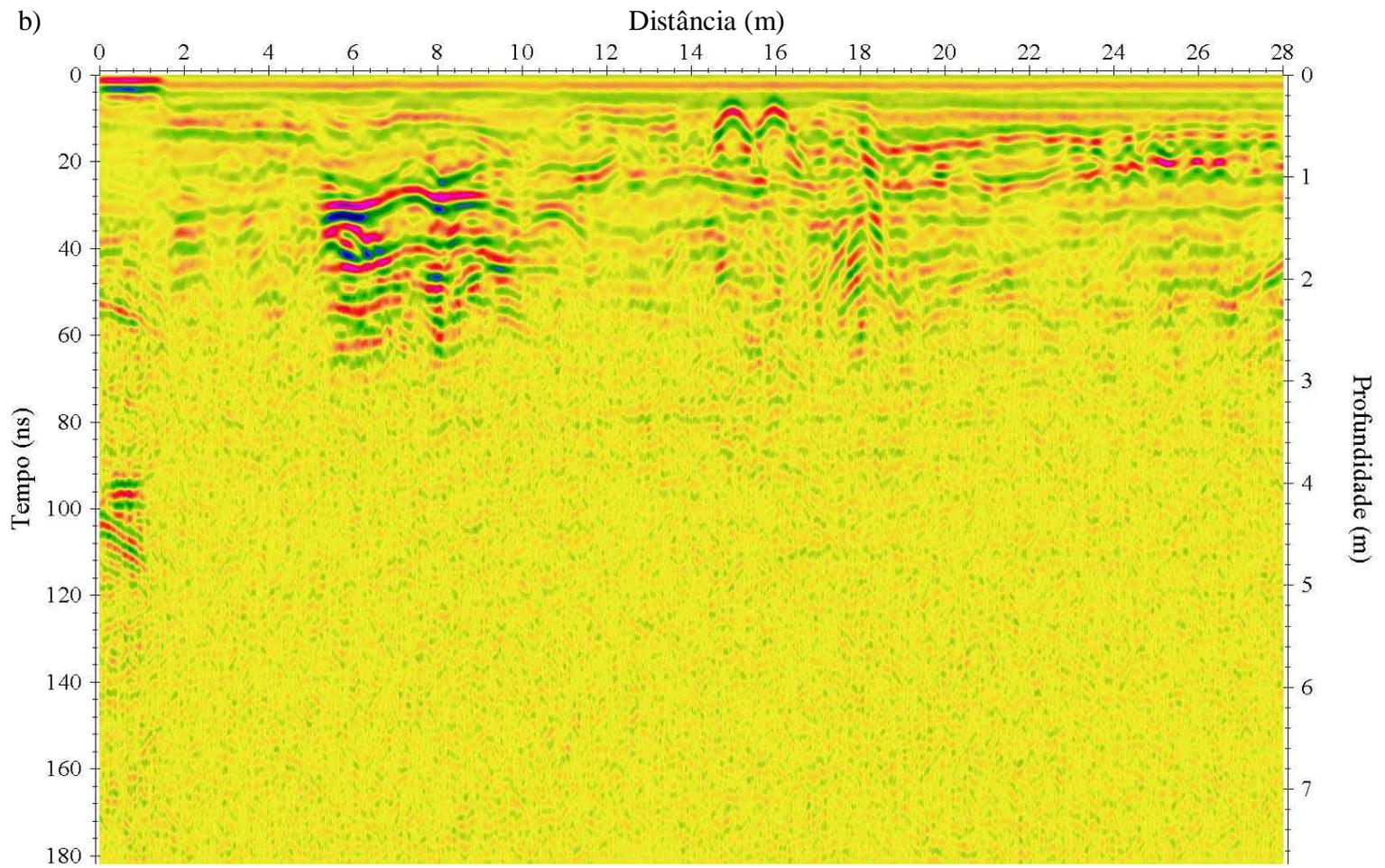


Figura 5.28 – Perfil 7-200-100. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas brancas delimitam as zonas atenuadas e as pretas pontilhadas, camadas atenuadas. TS6 assinala tanque subterrâneo 6 e T, tubulação.





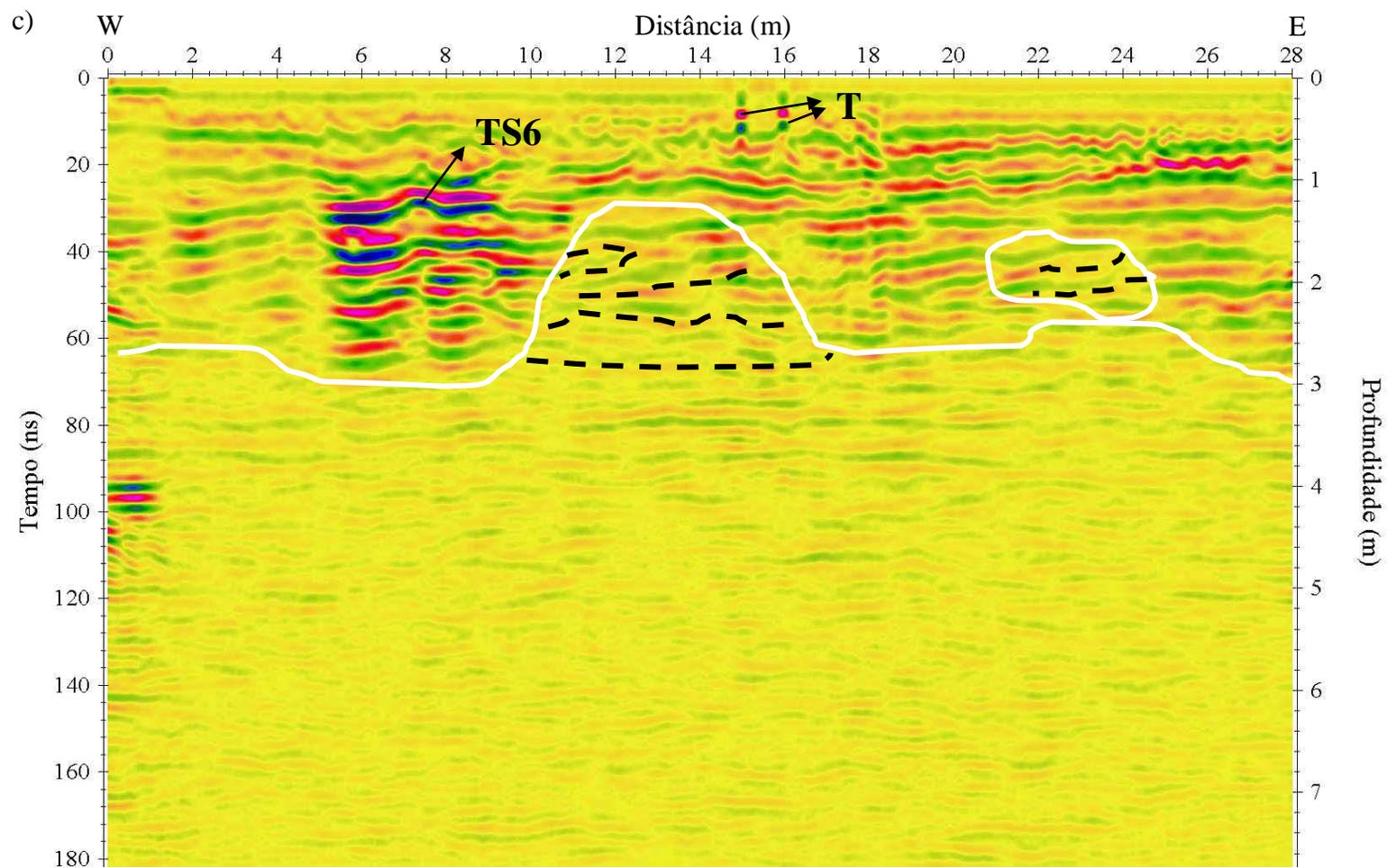


Figura 5.29 – Perfil 7-200-200. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas brancas delimitam as zonas atenuadas, a azul, nível hidrostático e as pretas pontilhadas, camadas atenuadas. TS assinala tanque subterrâneo 6 e T, tubulação.

5.4.8 Perfil 8

O perfil 8 possui 28 m de extensão W-E. Está localizado entre as BC1 e BC2 e ainda entre os tanques 3 e 4 (Figura 5.6). Nesta região, o solo é coberto por bloquetes e por cimento. Os radargramas obtidos são mostrados nas Figuras 5.30, 5.31 e 5.32.

Na Figura 5.30c nota-se uma zona com camada atenuada, localizada entre 8 e 11 m a 1 m de profundidade. Percebem-se, ainda, três refletores, um, causado por uma tubulação, localizado a cerca de 9 m a 0,5 m de profundidade, acima da zona com camada atenuada, e dois outros, causados por canaletas, localizados entre 11 e 21 m. As canaletas, como mostrado no perfil 3, delimitam uma zona mais resistiva protegida das chuvas. Essa área estende-se de 11 a 21 m.

Na Figura 5.31c percebe-se a presença dos refletores vistos na Figura 5.30c causados pelas canaletas e por uma tubulação, bem como a zona mais resistiva delimitada pelas canaletas. Já a zona atenuada marcada na Figura 5.30c aparece mais ampla, estendendo-se de 4 a 15 m a cerca de 1 m de profundidade.

Há, ainda, a presença de duas outras zonas atenuadas que não puderam ser vistas na Figura 5.30c, porque o topo das mesmas começa à profundidade de 2 m. Essas zonas ocorrem entre 0 e 10 m e entre 22 e 28 m e refletem, possivelmente, presença de argila no local.

Finalmente, o radargrama da Figura 5.32c mostra todos os refletores visualizados nos outros radargramas (Figura 5.30c e Figura 5.31c) e as zonas atenuadas. O NH tem a profundidade aproximada de 3,5 m.

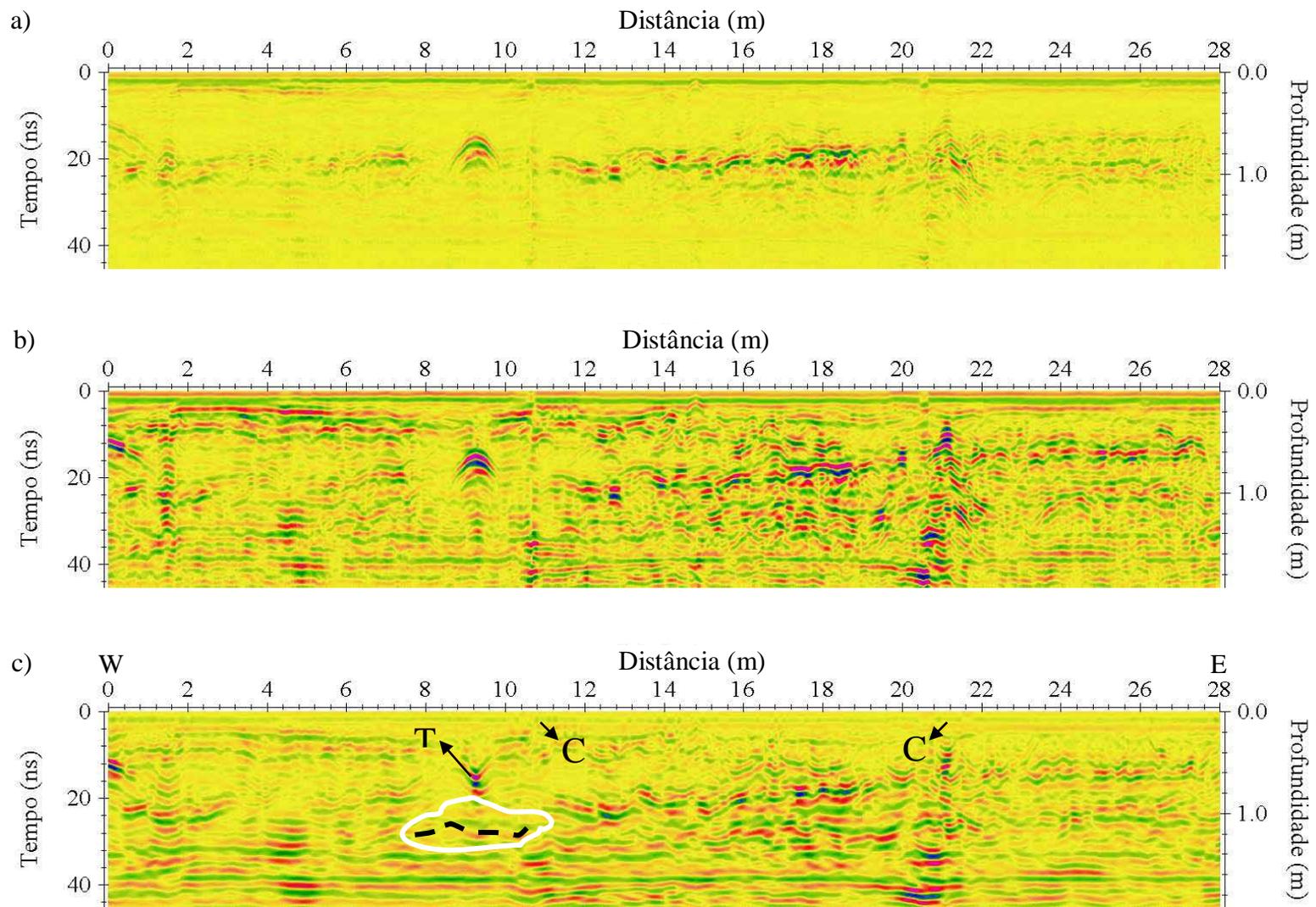
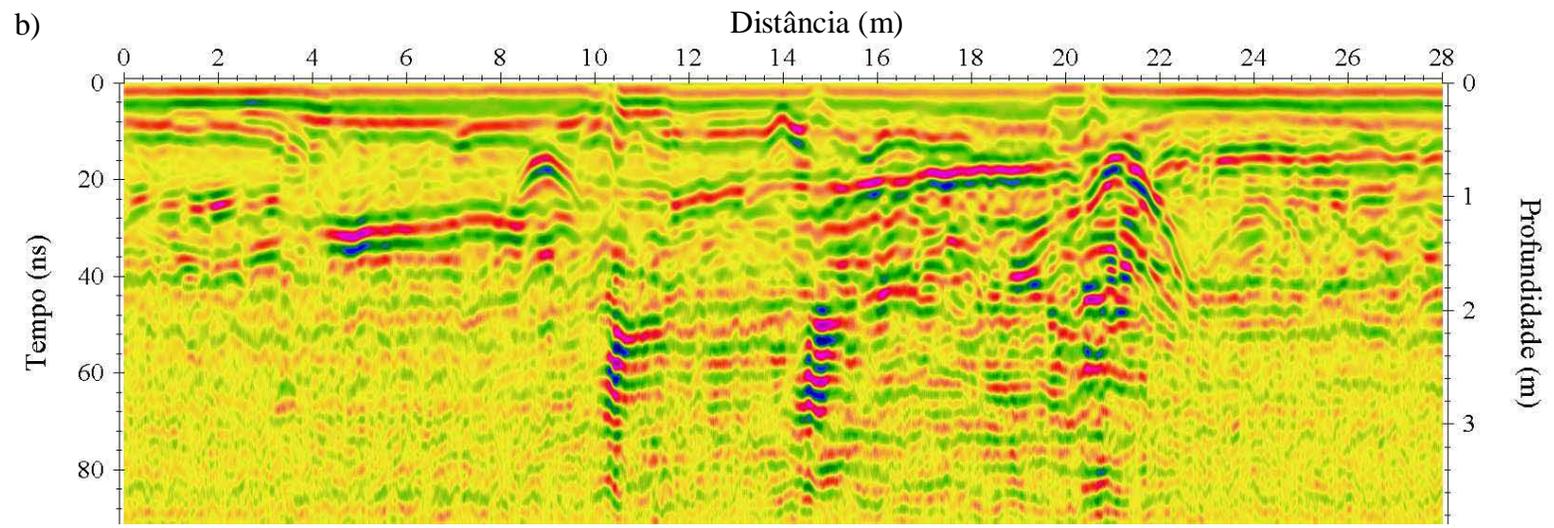
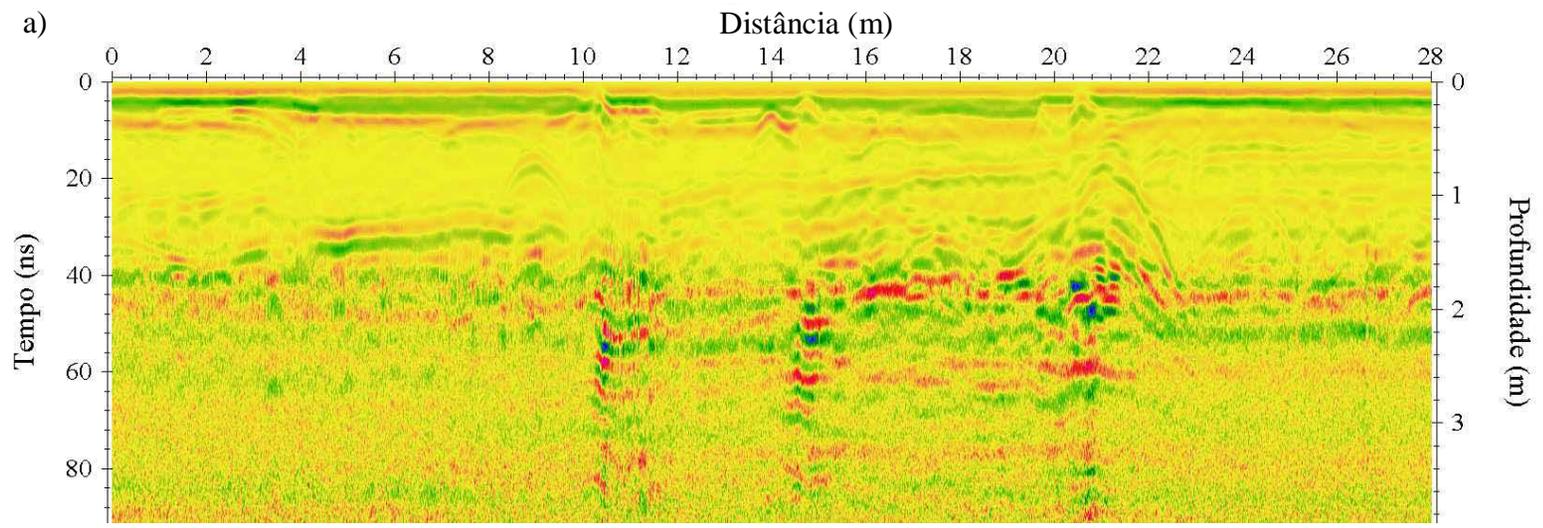


Figura 5.30 – Perfil 8-400-50. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. A linha branca delimita a zona atenuada e as pretas pontilhadas, camadas atenuadas. T assinala tubulação e C, canaleta.



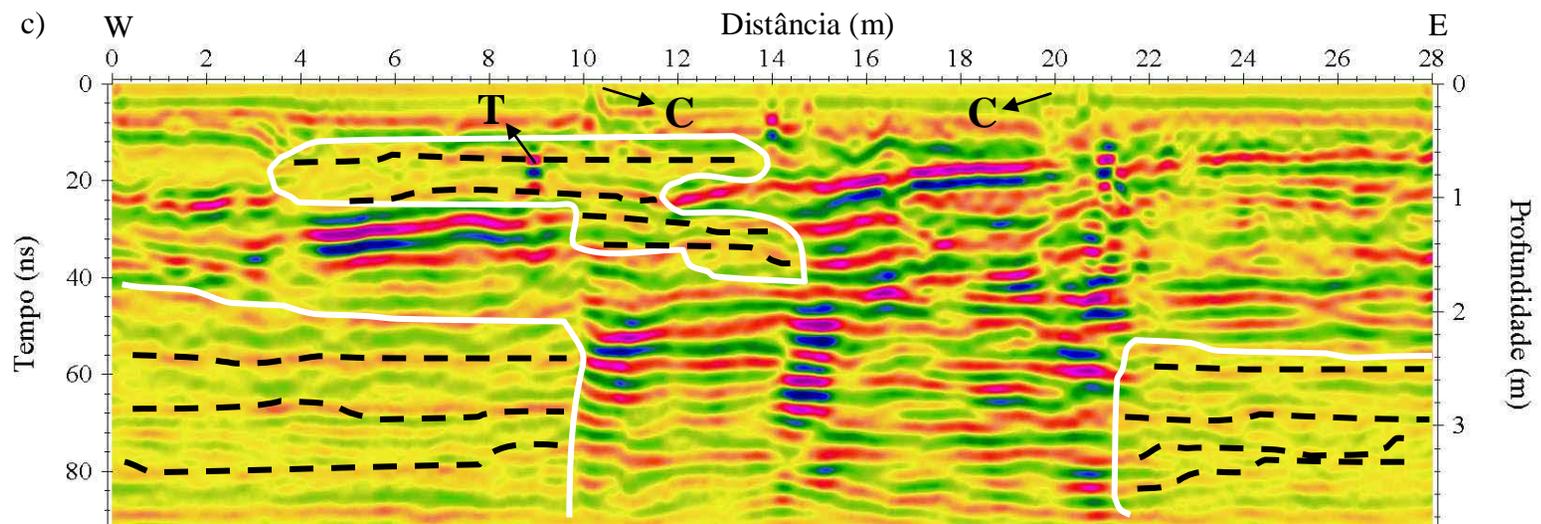
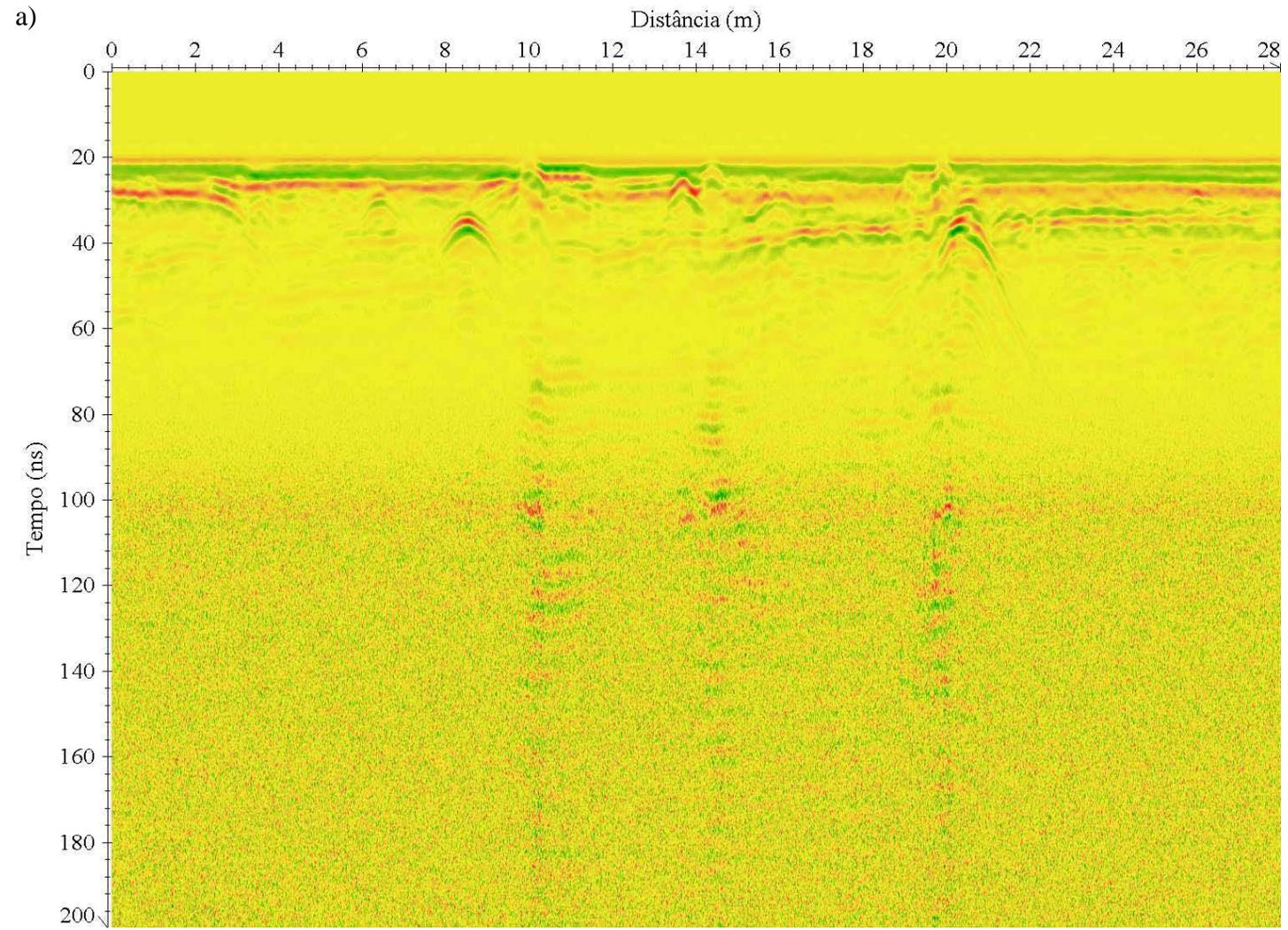
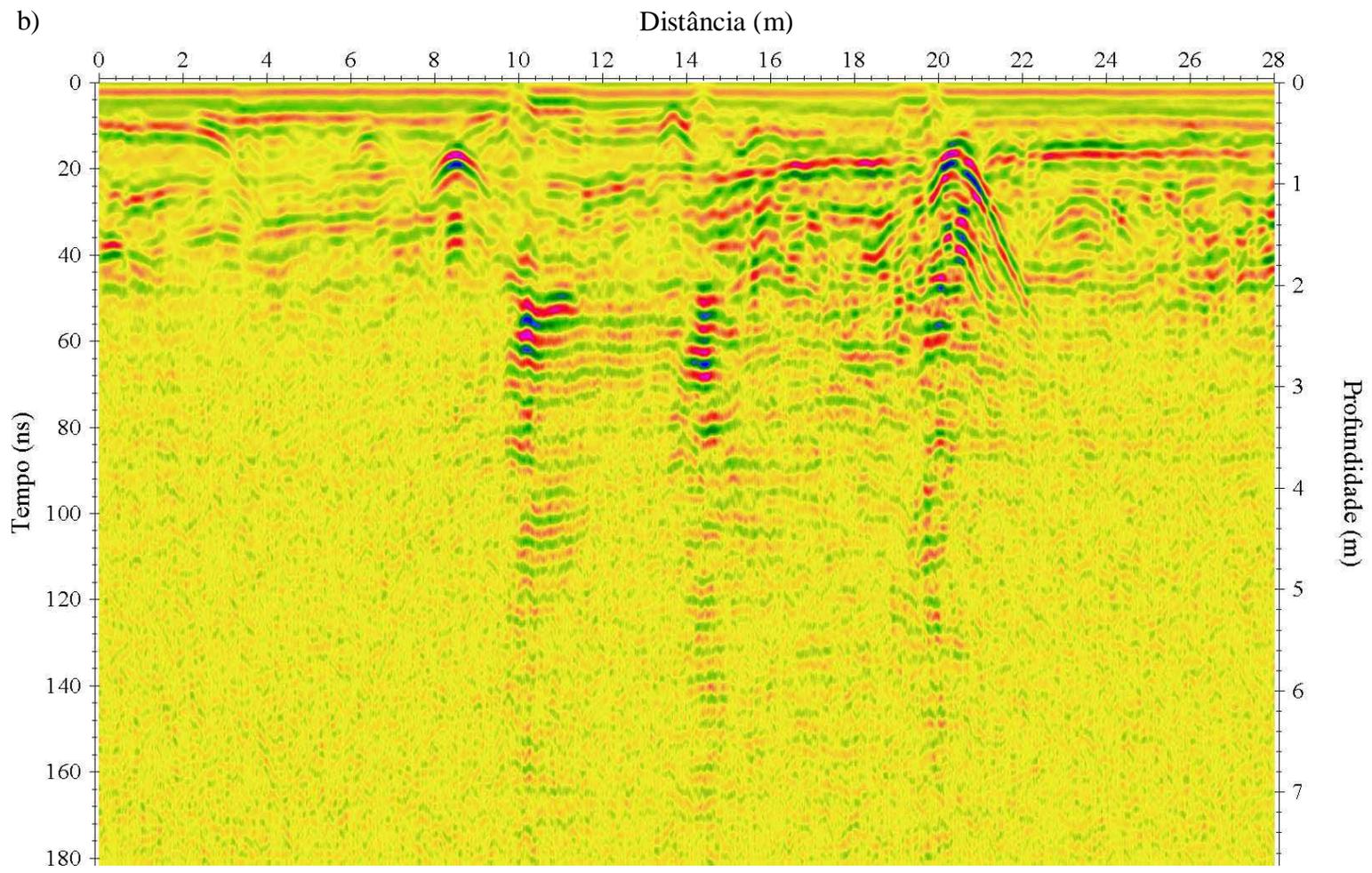


Figura 5.31 – Perfil 8-200-100. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas brancas delimitam as zonas atenuadas e as pretas pontilhadas, camadas atenuadas. T assinala tubulação e C, canaleta.





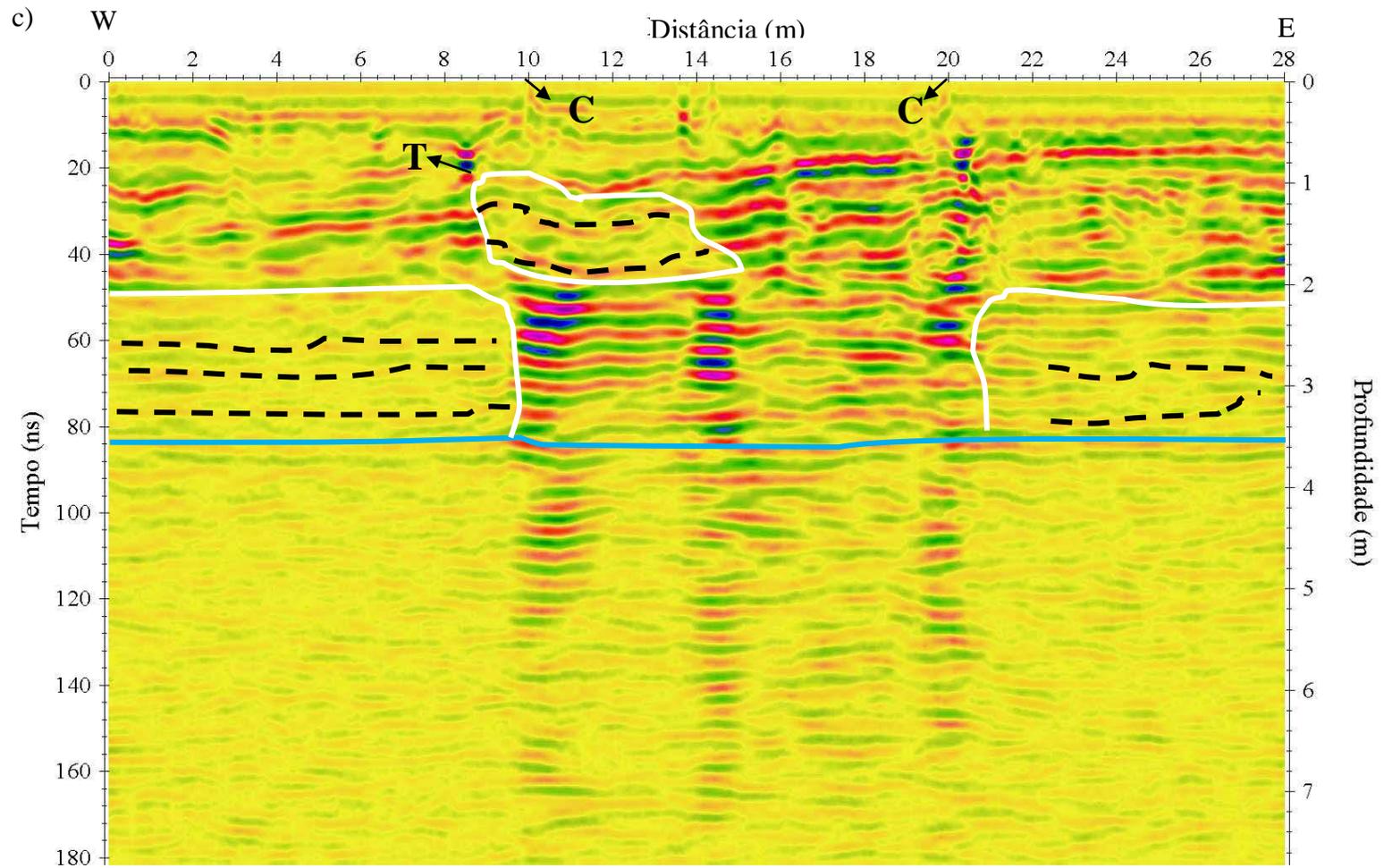


Figura 5.32 – Perfil 8-200-200. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas brancas delimitam a zona atenuada, a azul, o nível hidrostático e as pretas pontilhadas, camadas atenuadas. T assinala tubulação e C, canaleta.

5.4.9 Perfil 9

O perfil 9 possui 28 m de comprimento na direção W-E. Está localizado entre as BC1 e BC2 e ainda entre os tanques 4 e 5, como o perfil 8, do qual é muito próximo (Figura 5.6). O piso é de bloquetes e de cimento. Os radargramas obtidos no perfil são mostradas nas Figuras 5.33, 5.34 e 5.35.

Na Figura 5.33c, devido à proximidade com o perfil 8, também nota-se uma zona com camada atenuada a 1 m de profundidade, localizada, no entanto, entre 6,5 e 15 m, bem como os três refletores, um causado por uma tubulação, localizada a 9 m com 0,5 m de profundidade e dois outros, causados por canaletas, localizados a aproximadamente 10,5 e 20,5 m, e, ainda, a área mais resistiva, estendendo-se de 11 a 21 m.

Na Figura 5.34c é possível ver os mesmos elementos mostrados na figura anterior, mas a zona atenuada a 1 m de profundidade é um pouco maior, indo de 2 a 16 m aproximadamente. Notam-se, ainda, três zonas atenuadas abaixo de cerca de 2 m, entre 0 e 10 m, 11 e 19 m e 22 a 28m.

Já no radargrama da Figura 5.35c, observam-se as feições descritas nos radargramas das Figuras 5.33c e 5.34c, com as seguintes diferenças: a zona atenuada mais superficial (1 m de profundidade) tem localização mais restrita, entre 10 e 13,3 m; das zonas atenuadas que pareciam mais profundamente, a cerca de 2m, mantêm-se aquela entre 0 e cerca de 10 m, torna-se relativamente iluminada aquela entre 11 e 19 m e praticamente desaparece a zona atenuada que existia entre 22 a 28 m. Zonas não iluminadas pela energia eletromagnética, ou seja, atenuadas, devido a argila tornam-se mais atenuadas no período chuvoso. O NH é visualizado a cerca de 3.5 m de profundidade.

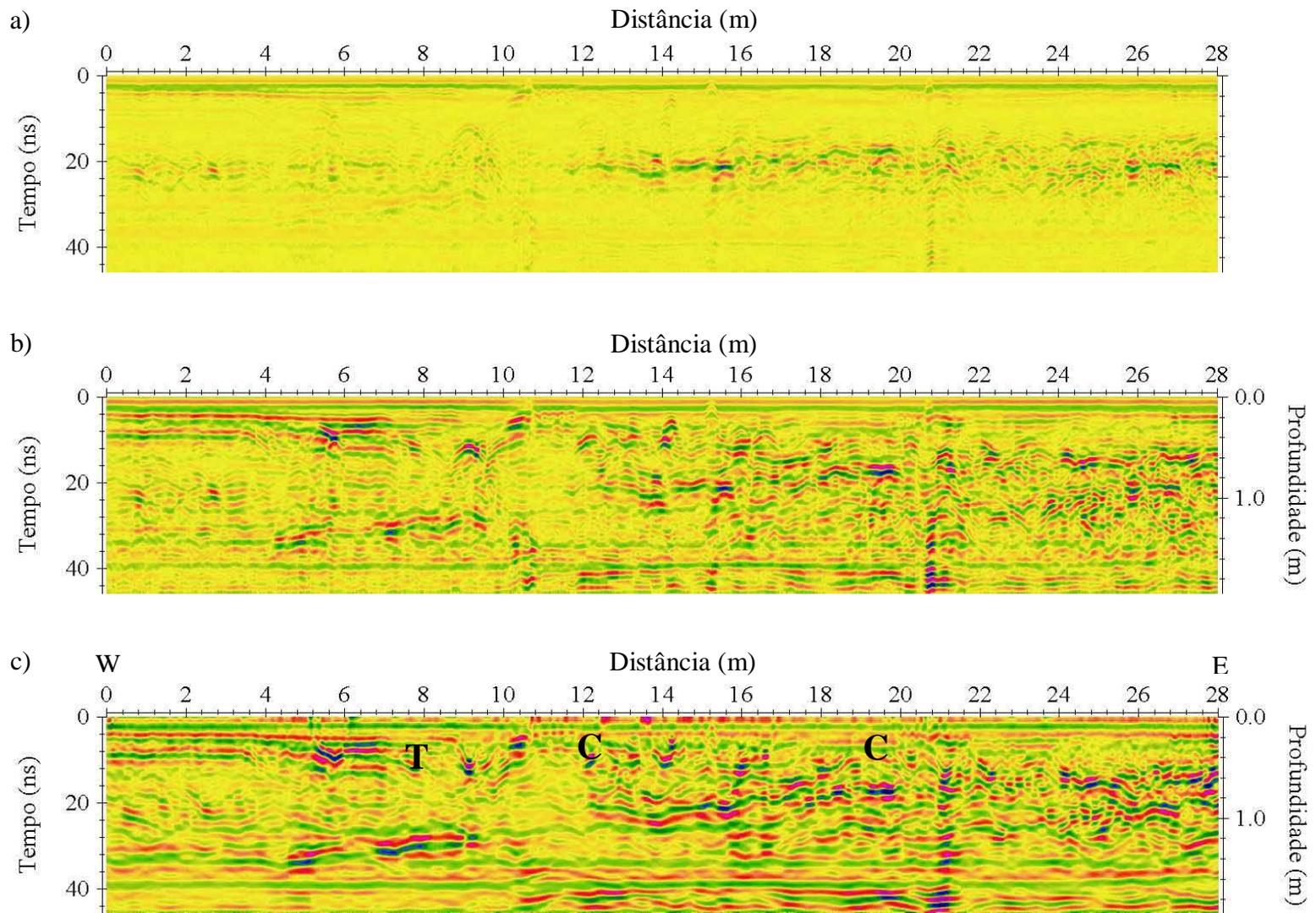
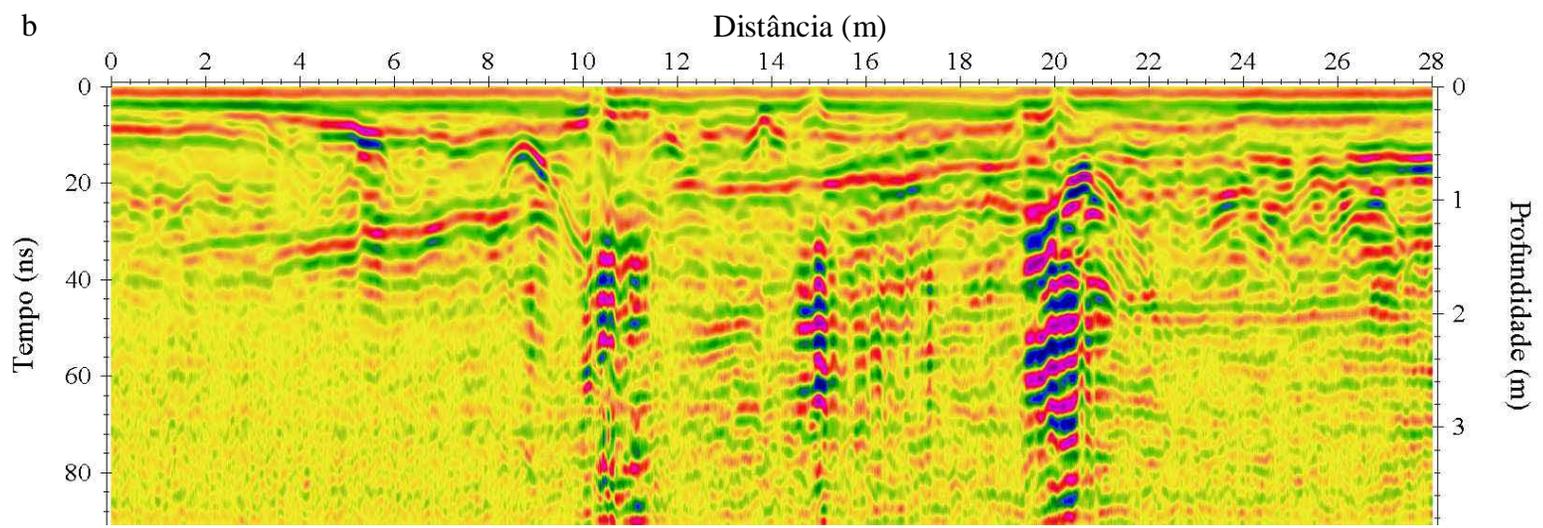
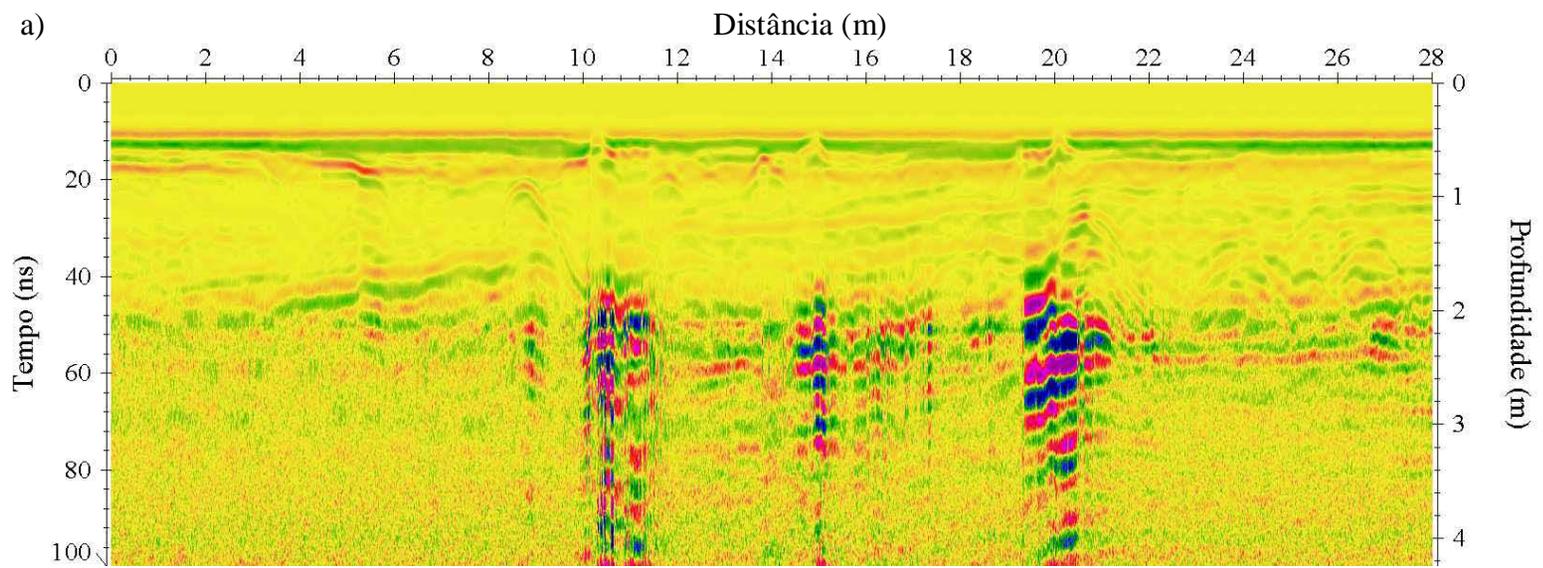


Figura 5.33 – Perfil 9-400-50. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas brancas delimitam a zona atenuada e as pretas pontilhadas, camadas atenuadas. T assinala tubulação e C, canaleta.



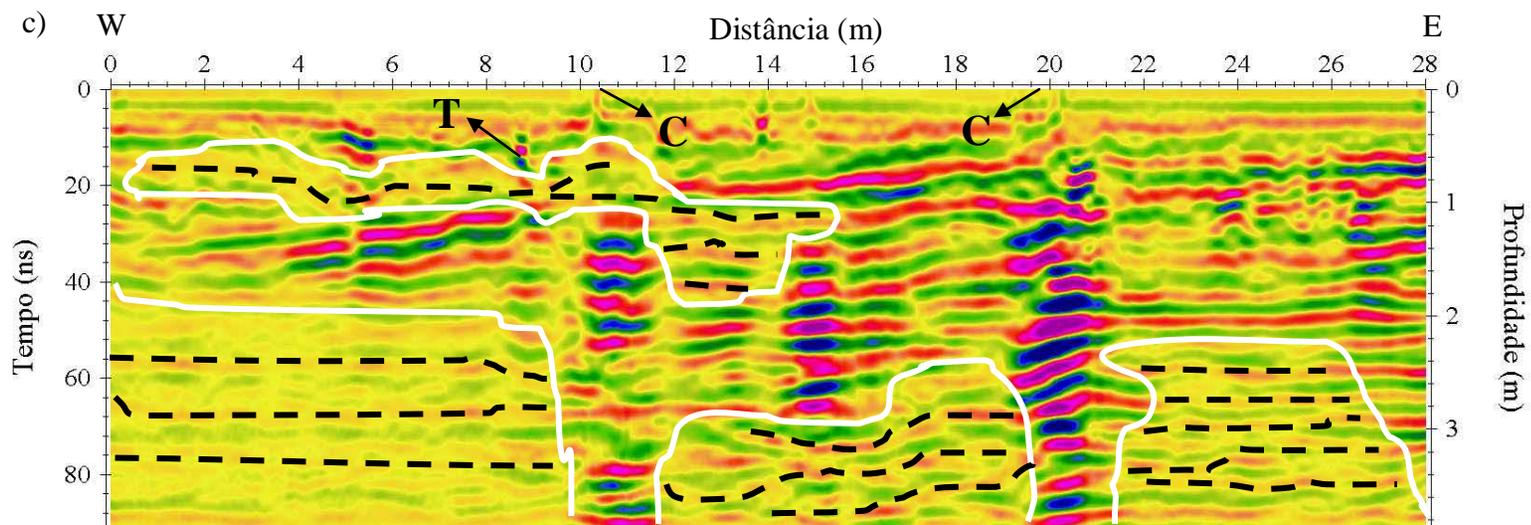
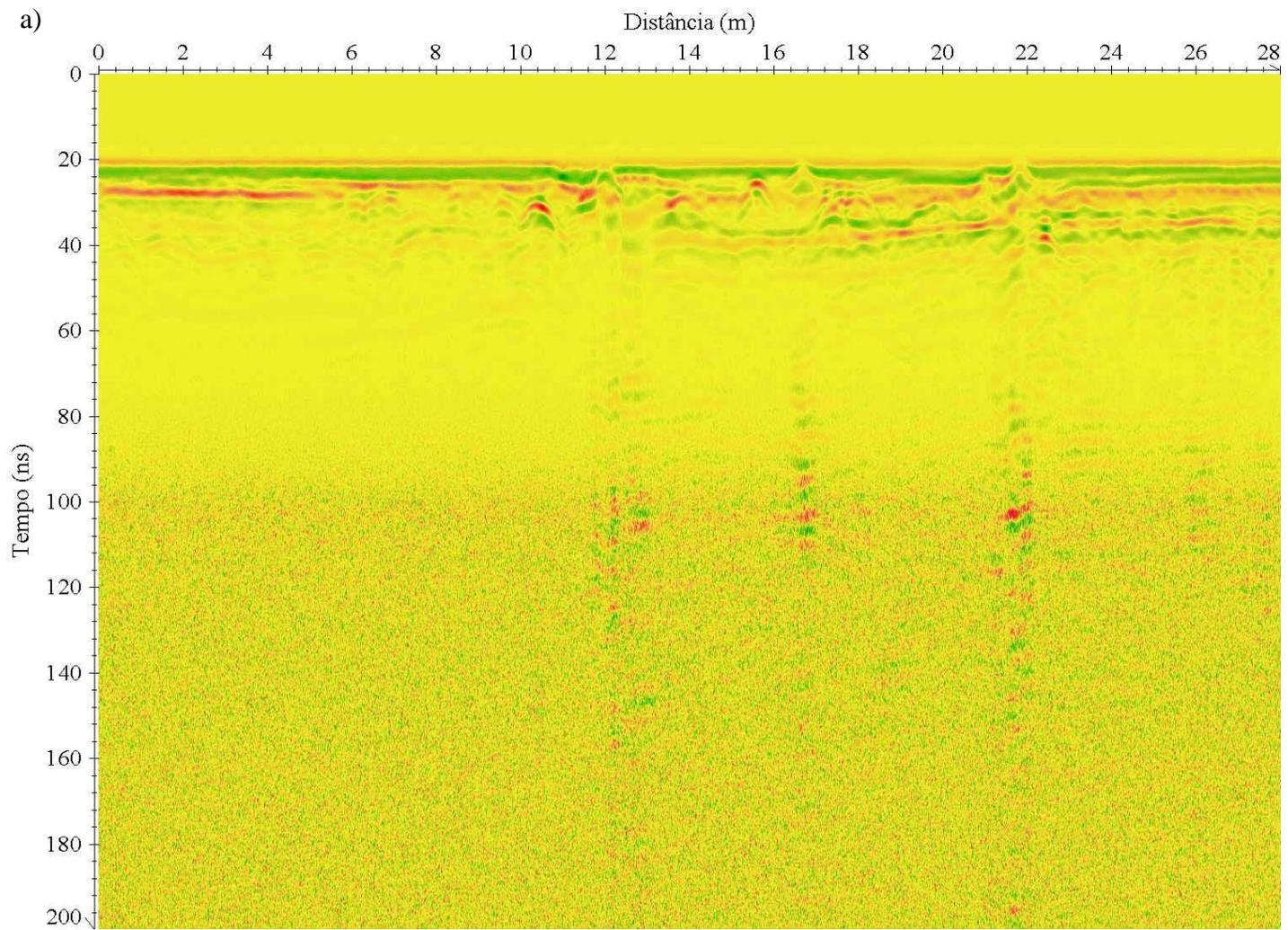
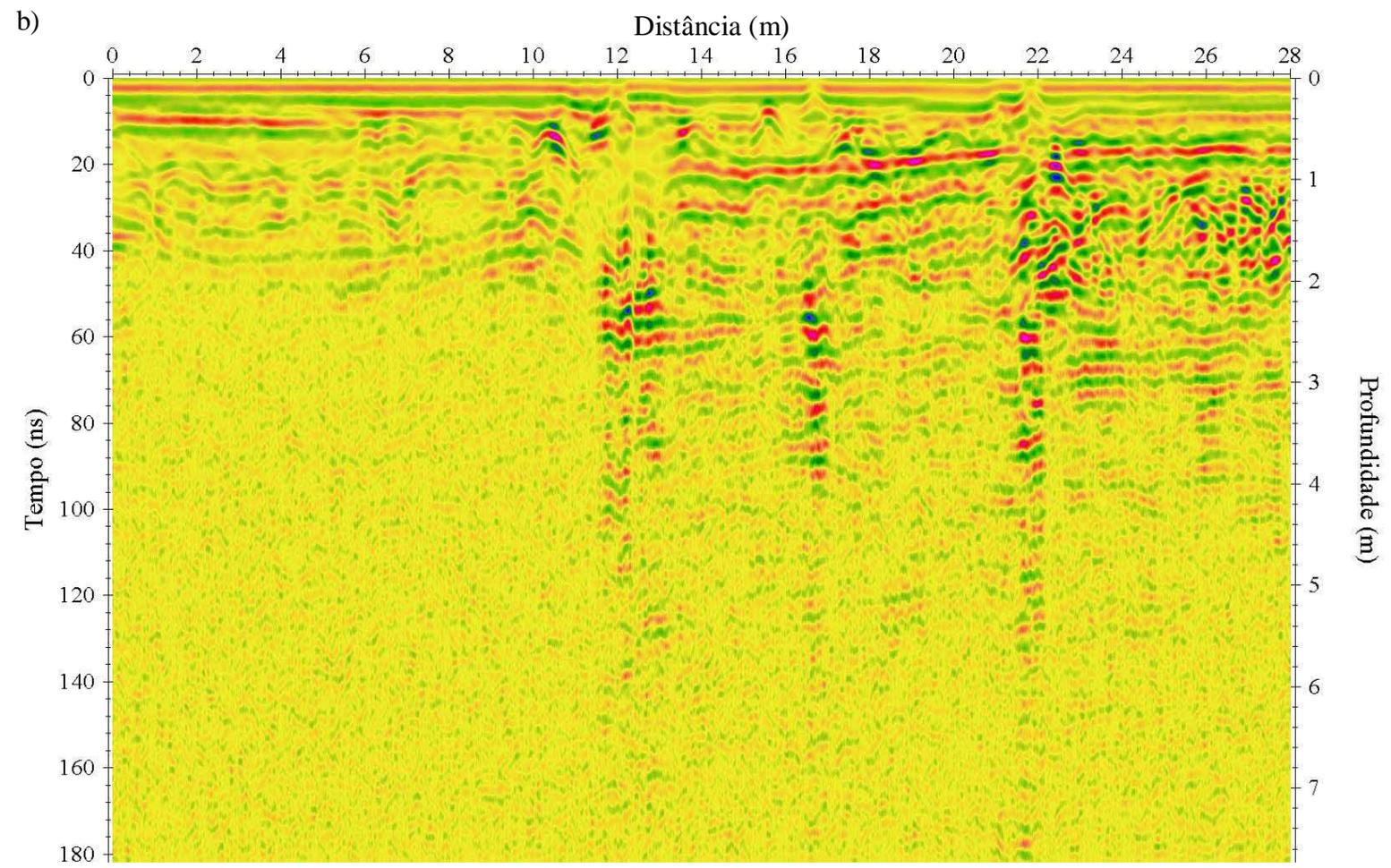


Figura 5.34 – Perfil 9-400-50. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas brancas delimitam as zonas atenuadas e as pretas pontilhadas, camadas atenuadas. T assinala tubulação e C, canaleta.





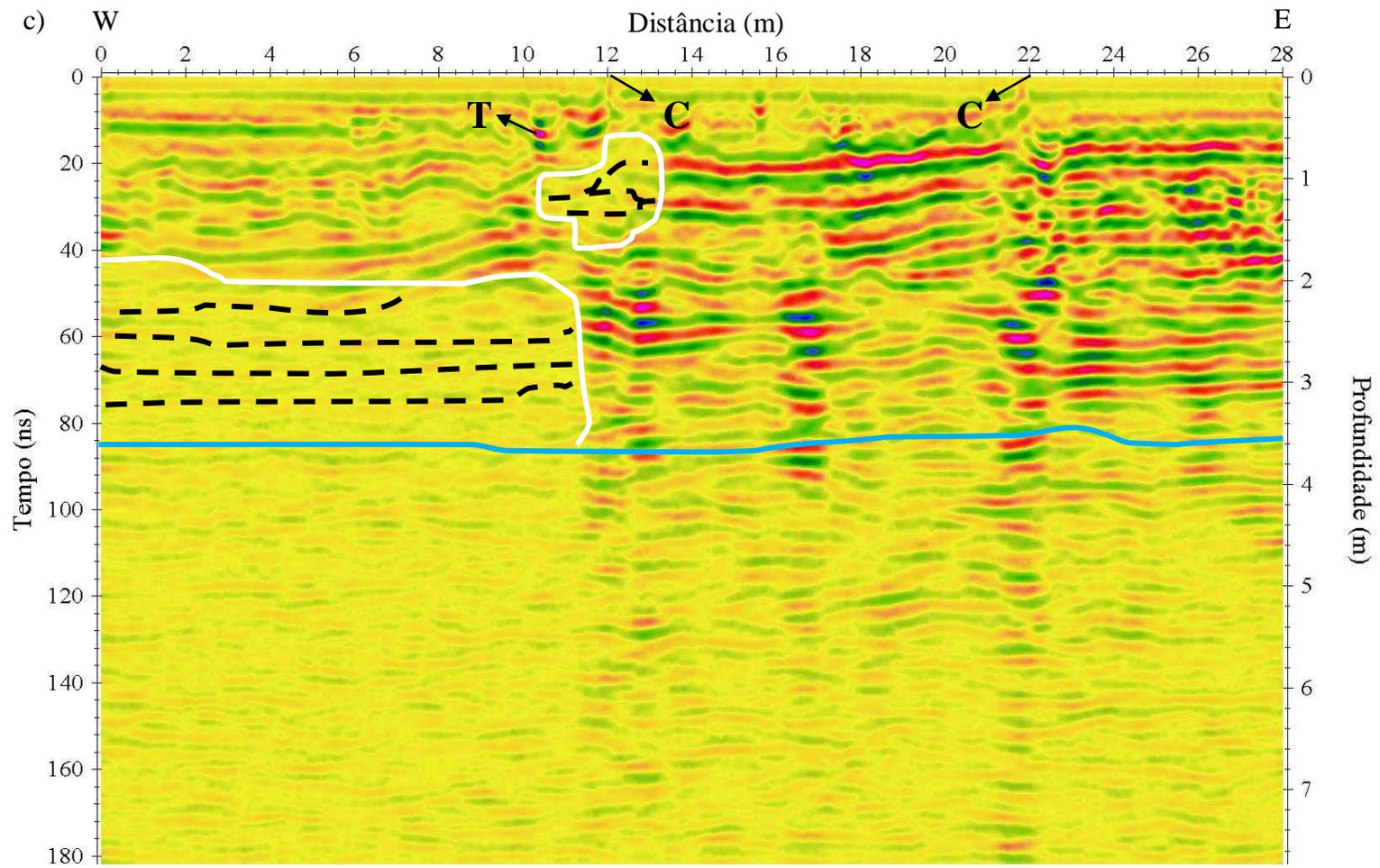


Figura 5.35 – Perfil 9-200-200. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas brancas delimitam as zonas atenuadas, a azul, nível hidrostático e as pretas pontilhadas, camadas atenuadas. T assinala tubulação e C, canaleta.

5.4.10 Perfil 10

O perfil 10 possui 28 m de comprimento e direção W-E. Assim como os perfis 8 e 9, também está localizado entre as BC1 e BC2, mas passa sobre o TS 2 (Figura 5.6). O piso possui bloquetes e cimento. Os radargramas para esse perfil estão agrupados nas Figuras 5.36, 5.37 e 5.38.

Na Figura 5.36c é possível observar a presença de uma zona com camada atenuada entre 3,5 e 10,5 m a 1 m de profundidade, acima do TS2, bem como a presença de um refletor causado pelo TS2 e dois outros refletores causados por canaletas a 10,5 e 20,5 m, aproximadamente.

Na Figura 5.37c notam-se três zonas com camadas atenuadas: uma entre 3,5 e 12 m, também visualizada na Figura 5.36c a 1 m de profundidade, no entanto um pouco maior; outra entre 12 e 17,5 m, a aproximadamente 1,5 m de profundidade, e, por último, uma zona entre 0 e 10 m, a partir de cerca de 2 m de profundidade, ocasionada, provavelmente, devido à absorção do sinal pelo TS2, o qual é visto a 1,5 m de profundidade, através de uma forte reflexão, e, mais remotamente, pela presença de argila no local (Figura 5.3d).

Há, ainda, dois refletores causados por canaletas localizadas a 10,5 m e 20,5 m. A primeira reflexão demarca uma zona mais resistiva, iniciada em 10,5 e indo até o final do perfil. Esta zona, como supracitado no perfil 3, neste caso específico, estende-se bem mais que a zona mostrada nos perfis 3, 8 e 9, devido à cobertura do posto se estender até o final deste perfil, até às proximidades da loja de conveniências (Figura 5.6).

Já na Figura 5.38c aparecem todos os refletores, bem como as zonas atenuadas vistas nas Figuras 5.36 e 5.37c, no entanto, as duas zonas atenuadas a 1 m de profundidade mostrada na 5.37c aparecem integradas. O NH pôde ser visualizado a 3,5 m de profundidade, através de um longo refletor horizontal.

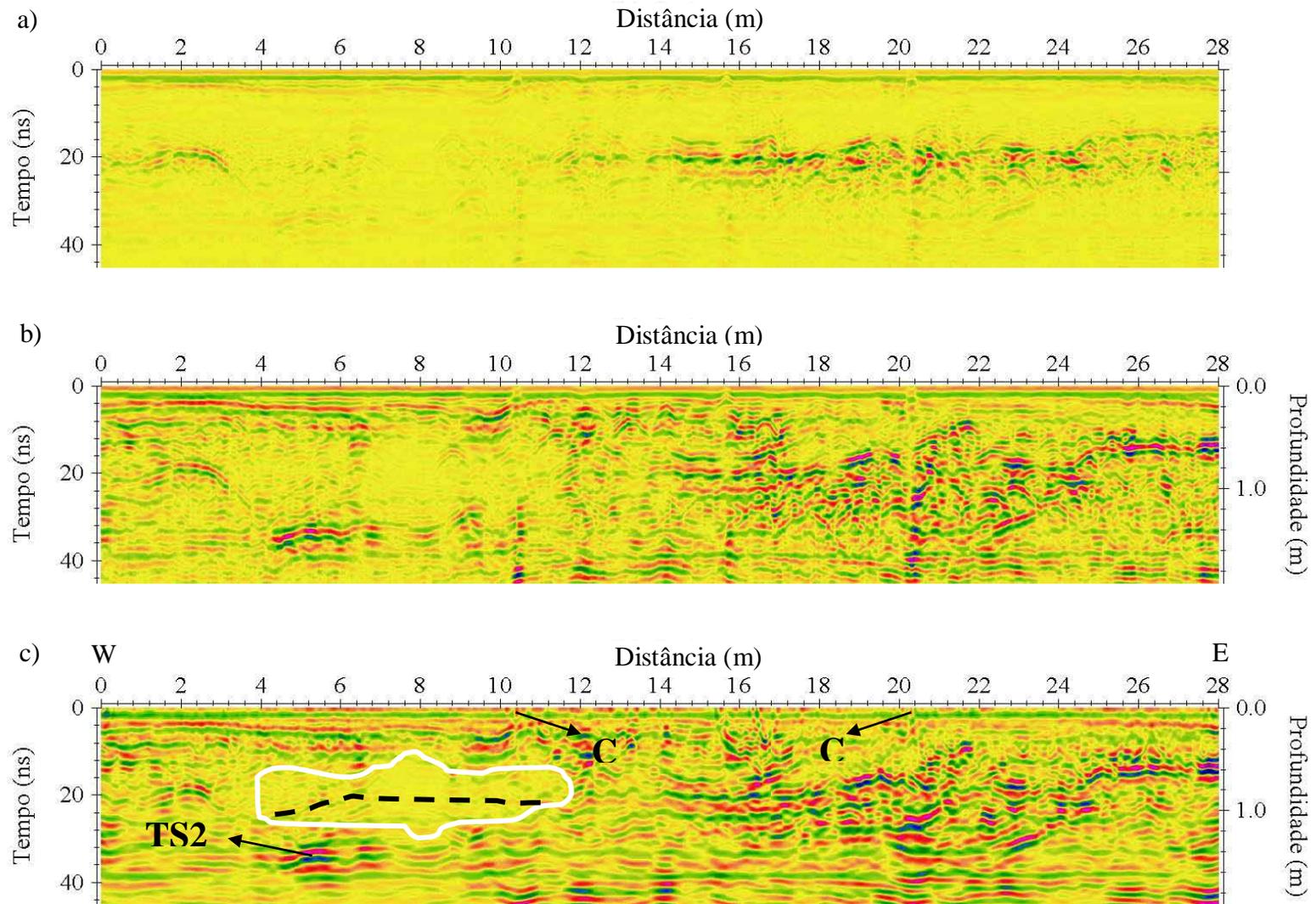
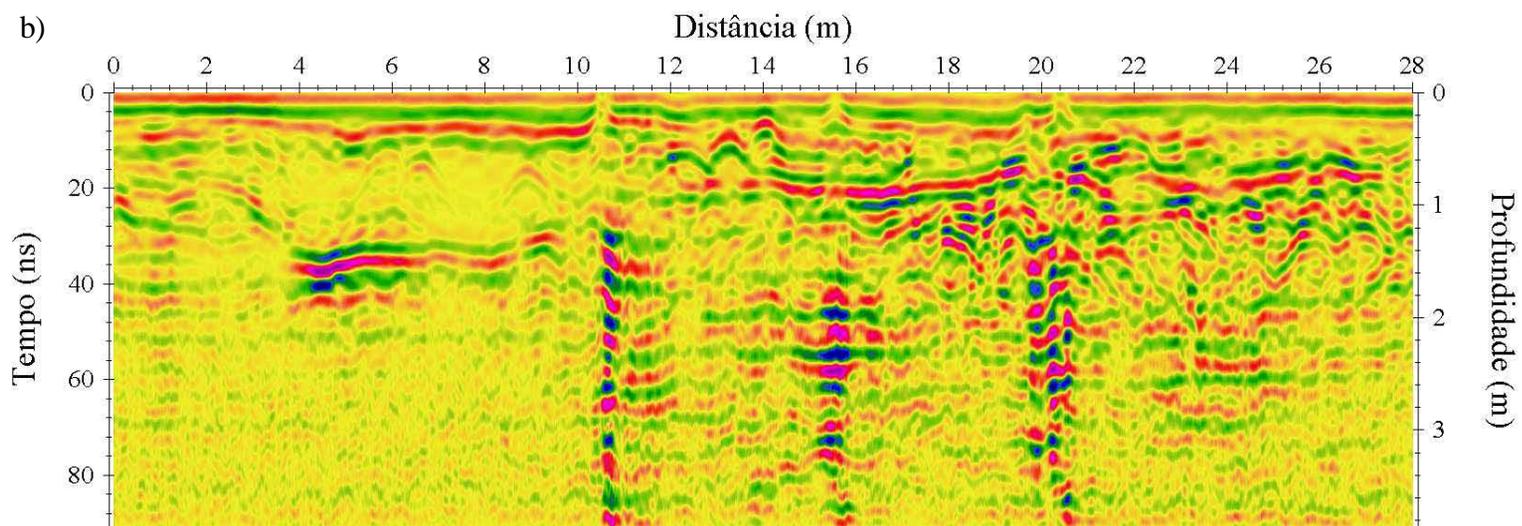
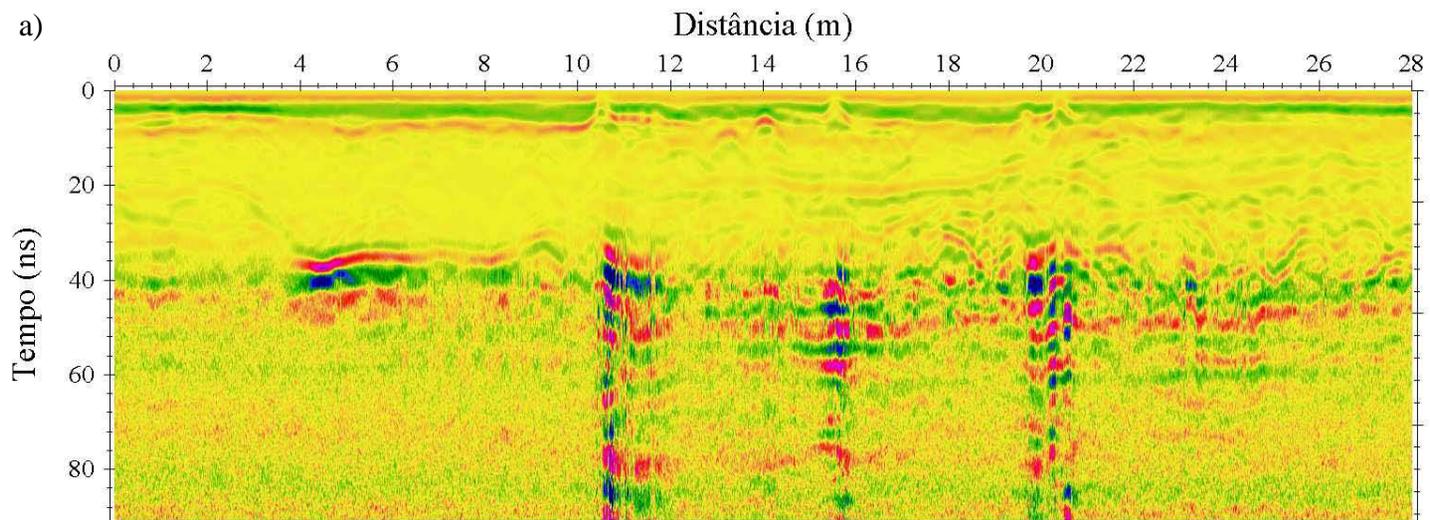


Figura 5.36 – Perfil 10-400-50. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. A linha branca delimita a zona atenuada e a preta pontilhada, camada atenuada. TS2 assinala o tanque subterrâneo 2 e C, canaleta.



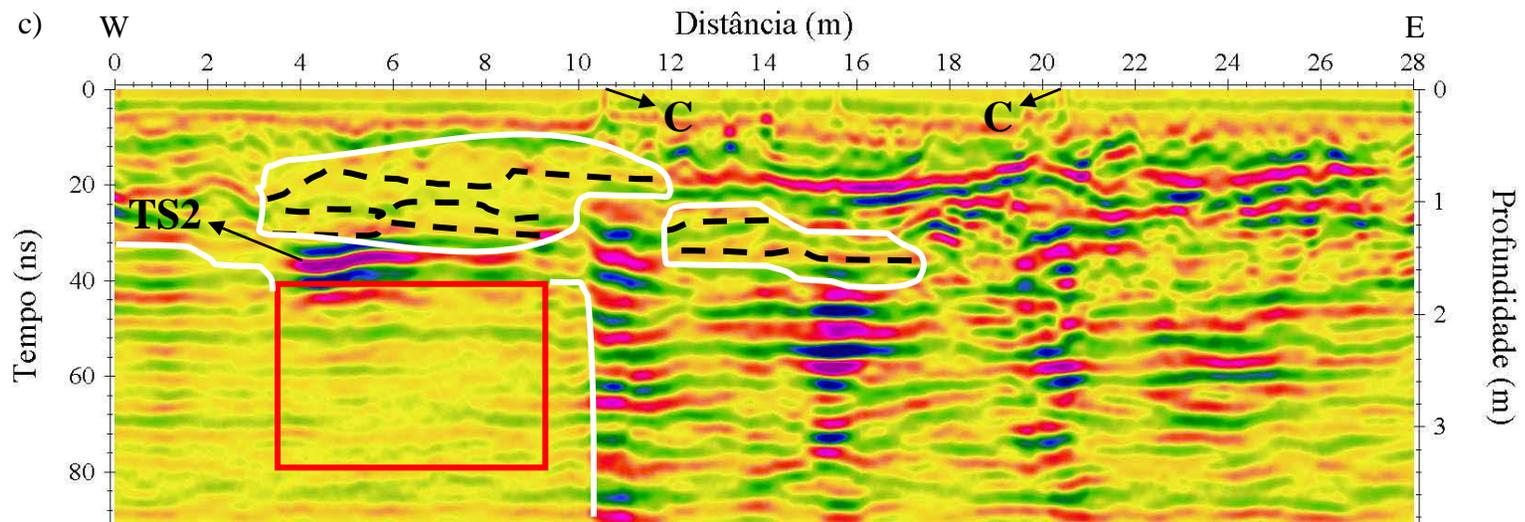
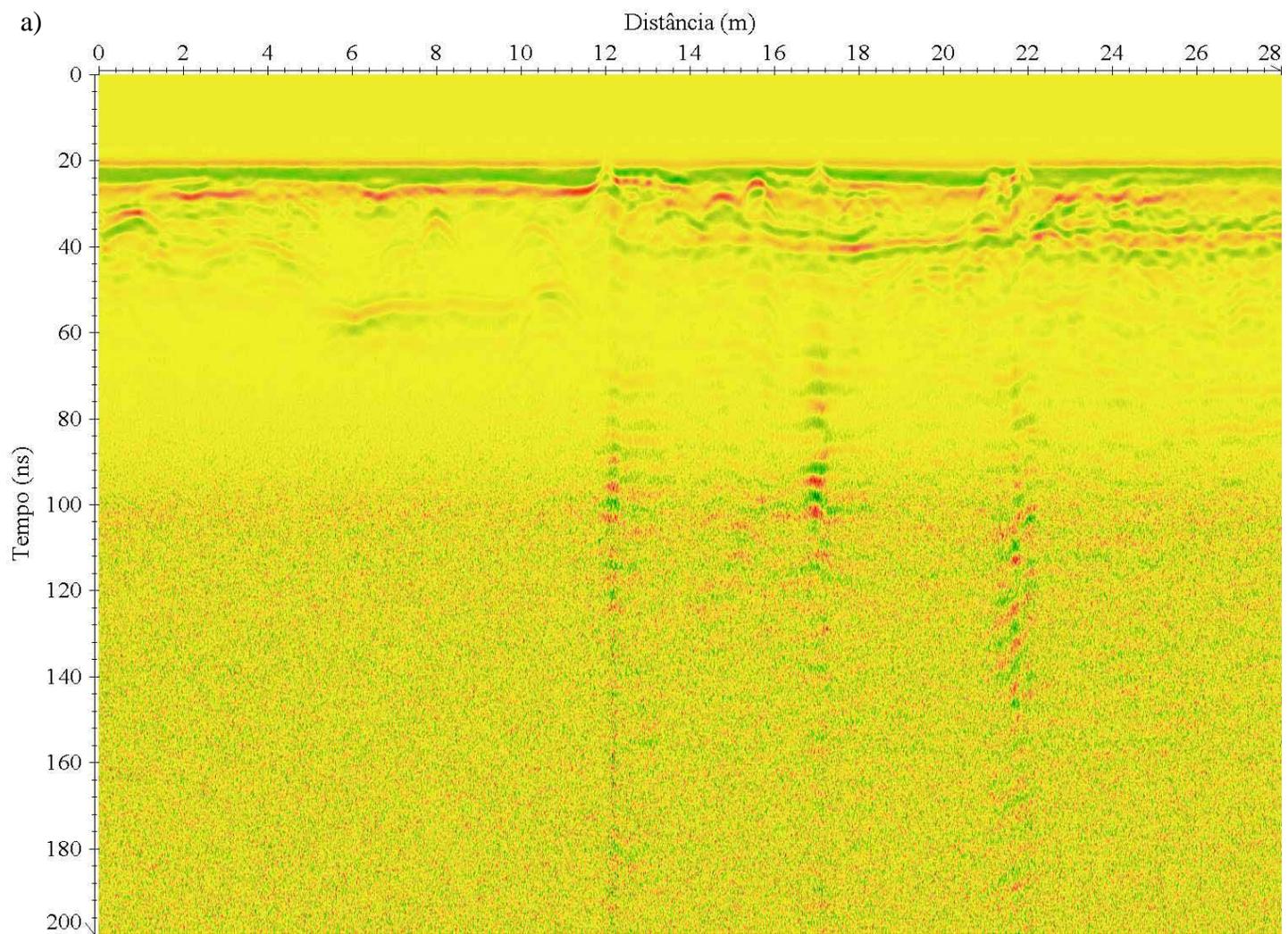
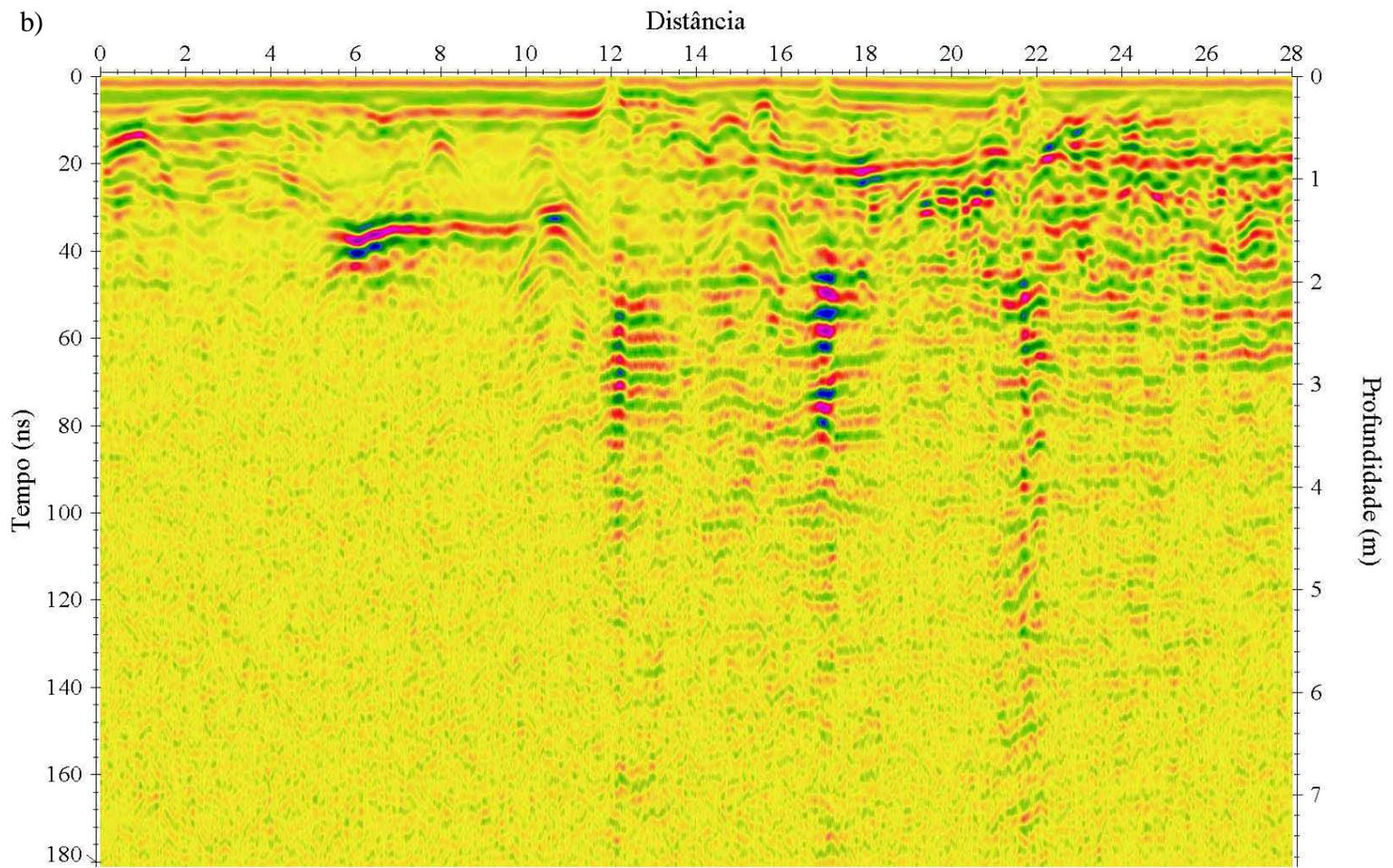


Figura 5.37 – Perfil 10-200-100. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas brancas delimitam as zonas atenuadas, a vermelha, área do tanque 2, e as pretas pontilhadas, camadas atenuadas. TS2 assinala o tanque subterrâneo 2 e C, canaleta.





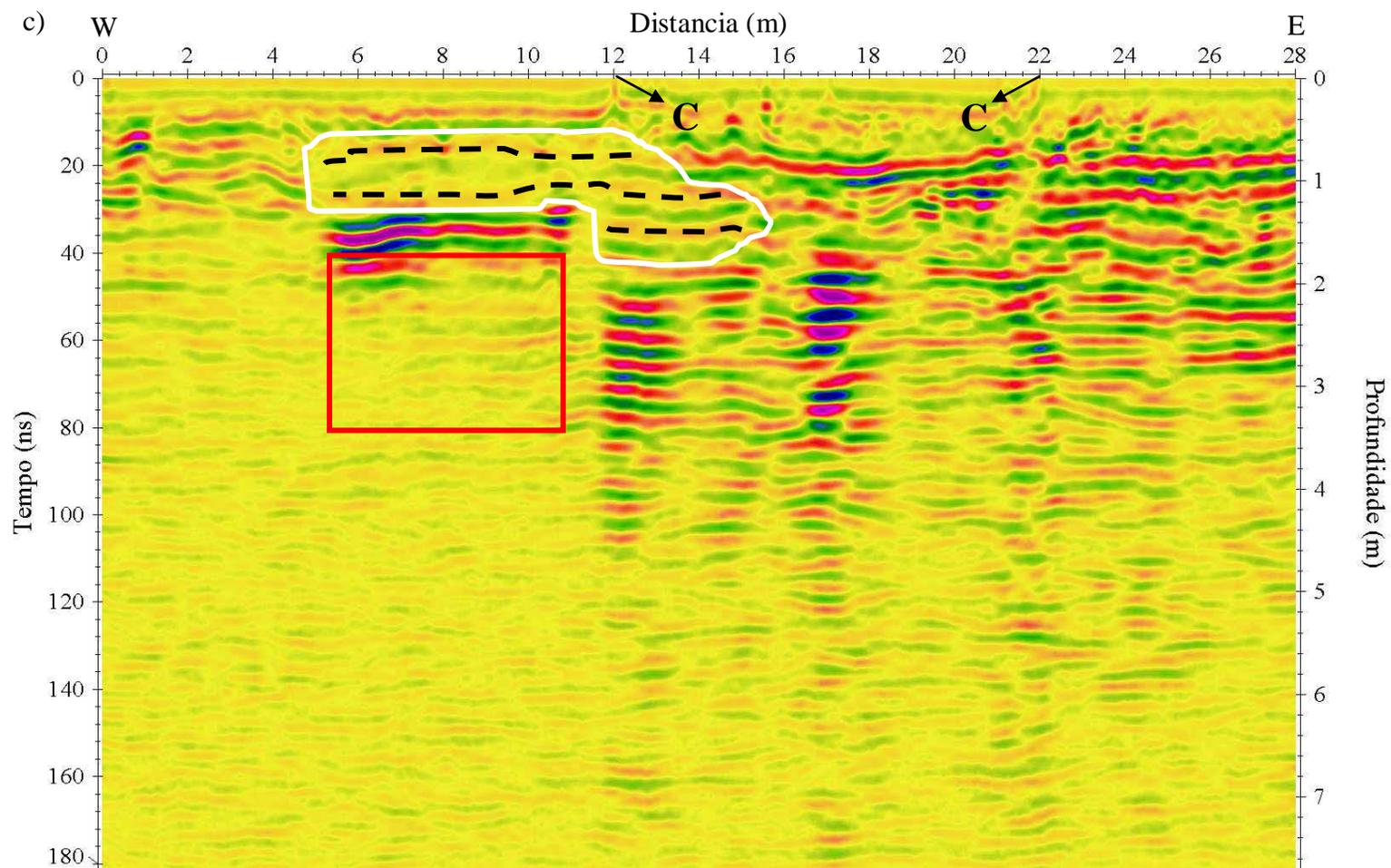


Figura 5.38 – Perfil 10-200-100. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas brancas delimitam as zonas atenuadas, a azul, nível hidrostático, a vermelha, área do tanque 2, e as pretas pontilhadas, camadas atenuadas. TS2 assinala tanque subterrâneo 2 e C, canaleta.

5.4.11 Perfil 11

O perfil 11 tem 28 m de comprimento W-E e está localizado entre as BC2 e BC3, passando por cima do tanque 1 (Figura 5.6). Também está em uma região coberta por bloquetes e cimento. As Figuras 5.39, 5.40 e 5.41 mostram os radargramas obtidos.

A Figura 5.39c mostra: uma zona atenuada entre 9 e 16 m, a 1 m de profundidade, bem como quatro refletores: um, localizado por volta de 8 m, a cerca de 1,40 m de profundidade, causado pela superfície do TS1, dois refletores causados por canaletas, localizadas a 10 e 20 m, e um por volta de 10 m, a cerca de 1 m de profundidade.

Na Figura 5.40c visualiza-se tanto a zona atenuada mostrada na Figura 5.39c, quanto uma outra mais abaixo, localizada entre 0 e 9,5 m, a cerca de 2 m de profundidade (como mencionado no perfil 10). Observa-se, ainda, a reflexão causada pela superfície do TS1 e três outras, uma causada por tubulação e outras duas causadas por canaletas. Novamente, nota-se uma área mais resistiva como descrito no perfil 10.

Já na Figura 5.41c percebem-se todos os refletores e zonas atenuadas visualizadas nas Figuras 5.39c e 5.40c. No entanto, observa-se um deslocamento de aproximadamente 2 m na localização dos refletores e zonas atenuadas, provocado pela diferença no início dos perfis. Nota-se, ainda, um aumento na zona atenuada em comparação à visualizada nas Figuras 5.39c e 5.40c, localizada entre 10,5 e 17,5 m, bem como uma certa atenuação da zona resistiva por causa das chuvas. O NH pôde ser visualizado a 3.5 m de profundidade.

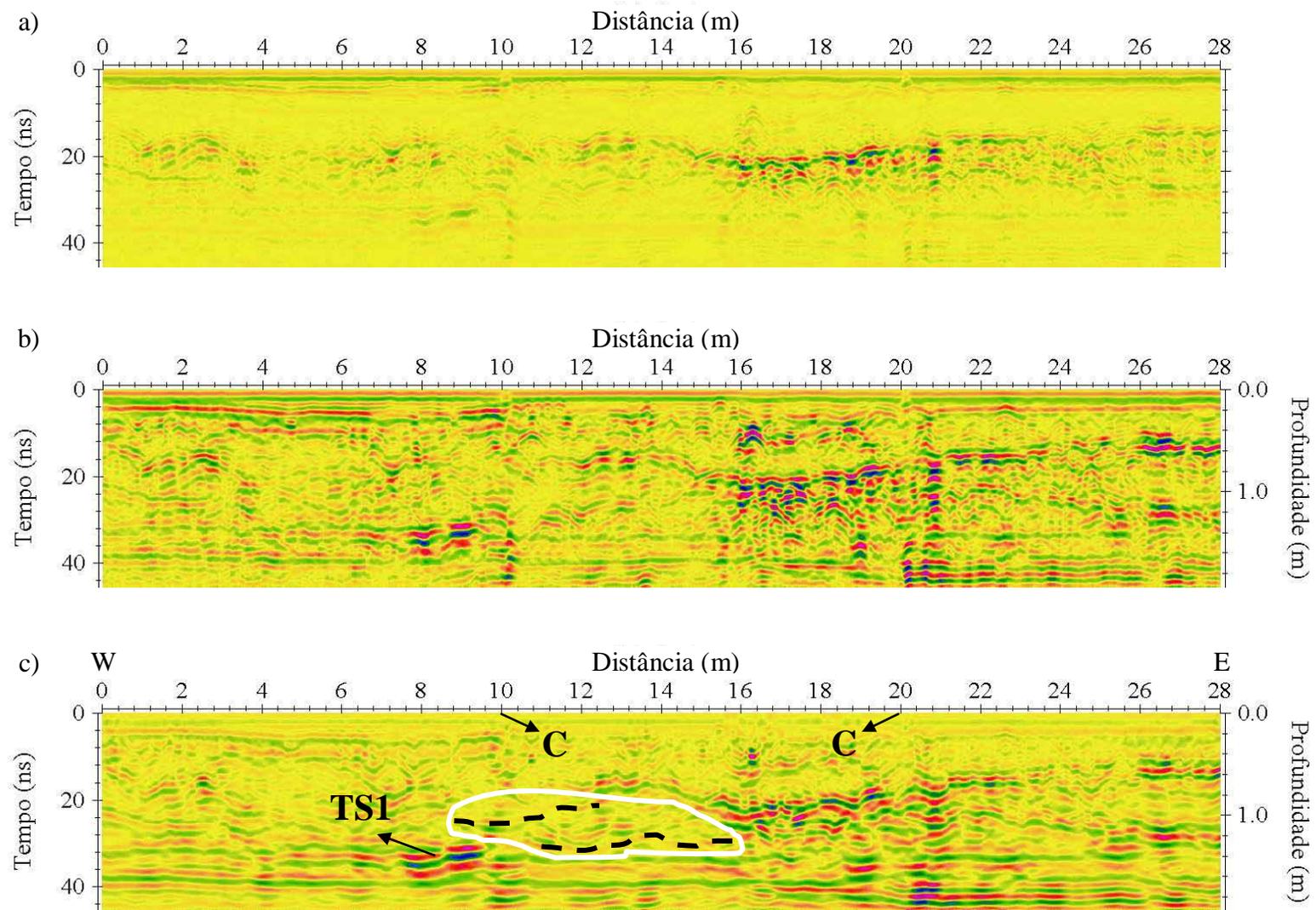
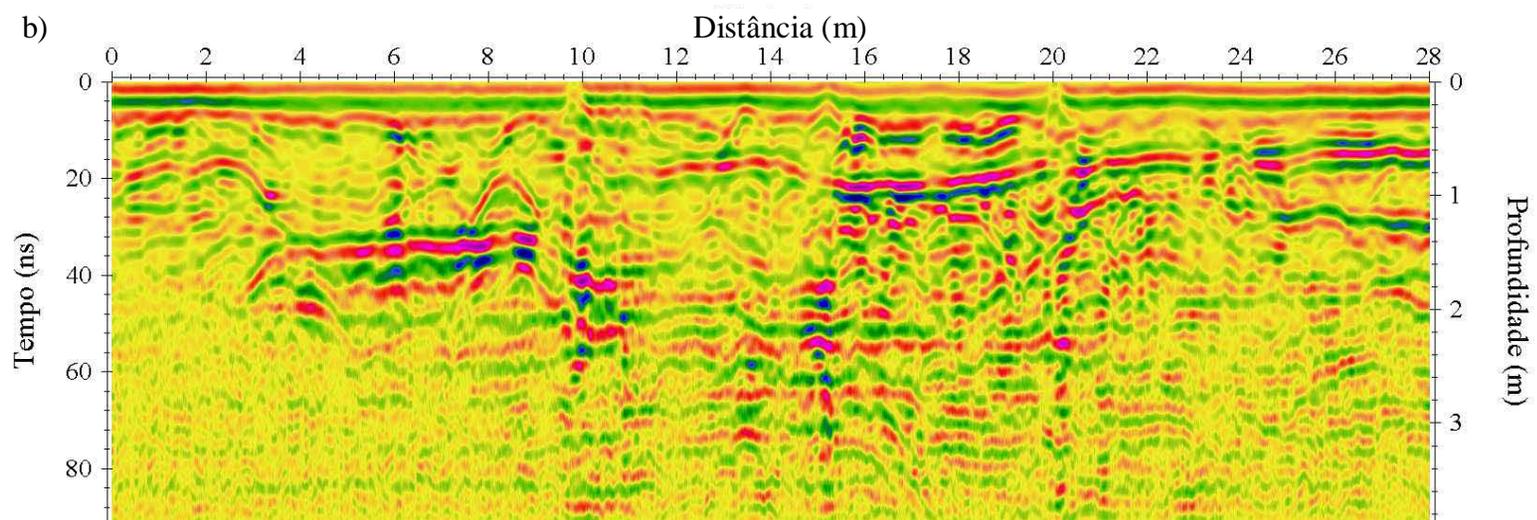
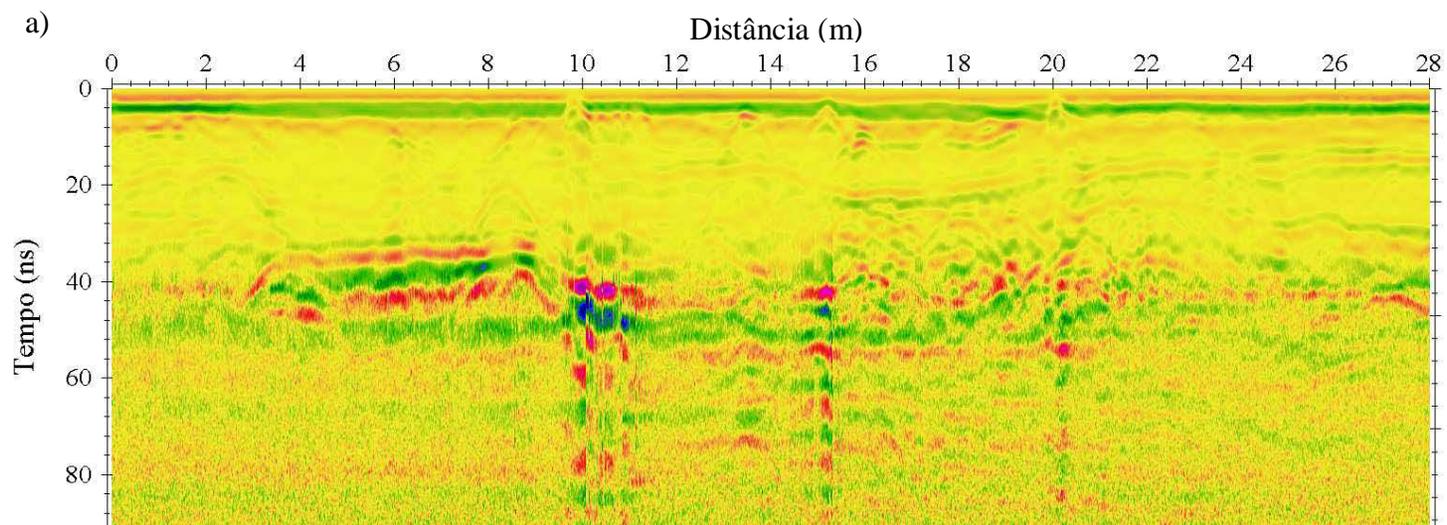


Figura 5.39 – Perfil 11-400-50. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. A linha branca delimita a zona atenuada e as pretas pontilhadas, camadas atenuadas. TS1 assinala o tanque subterrâneo 1, T, tubulação e C, canaleta.



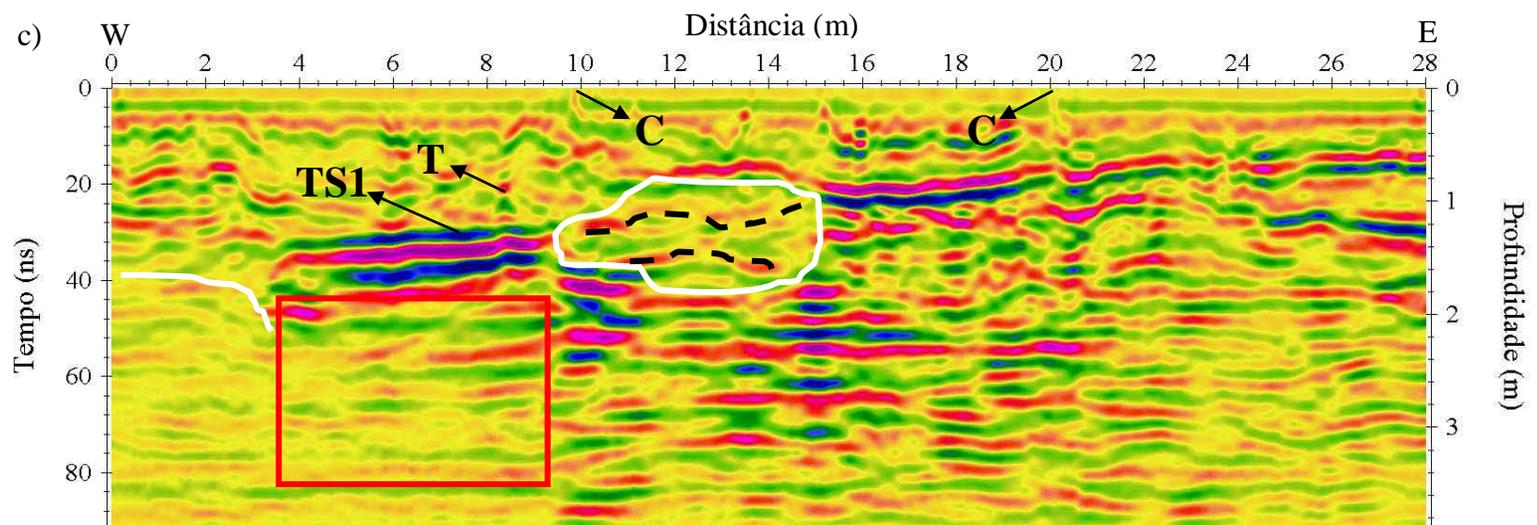
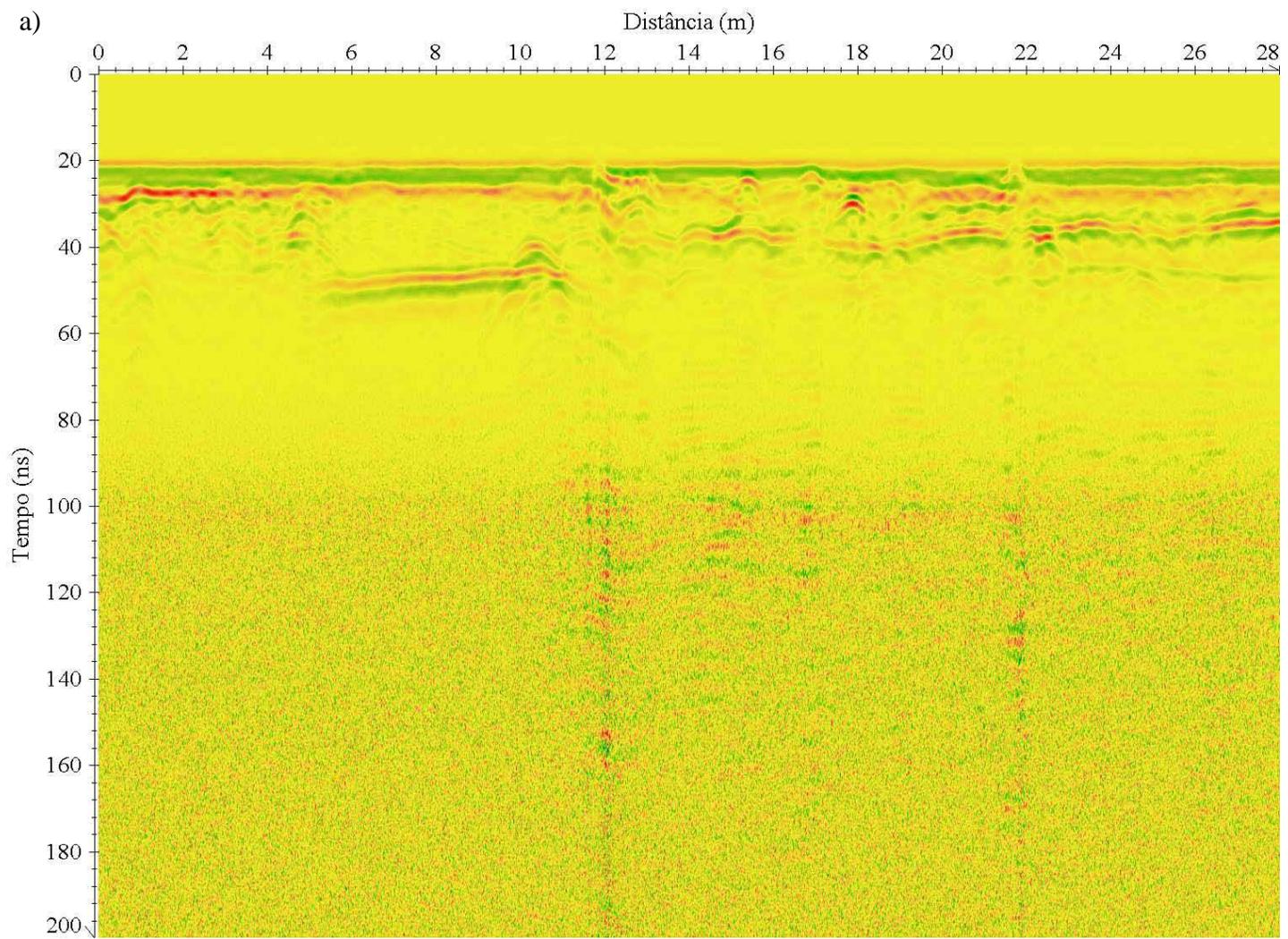
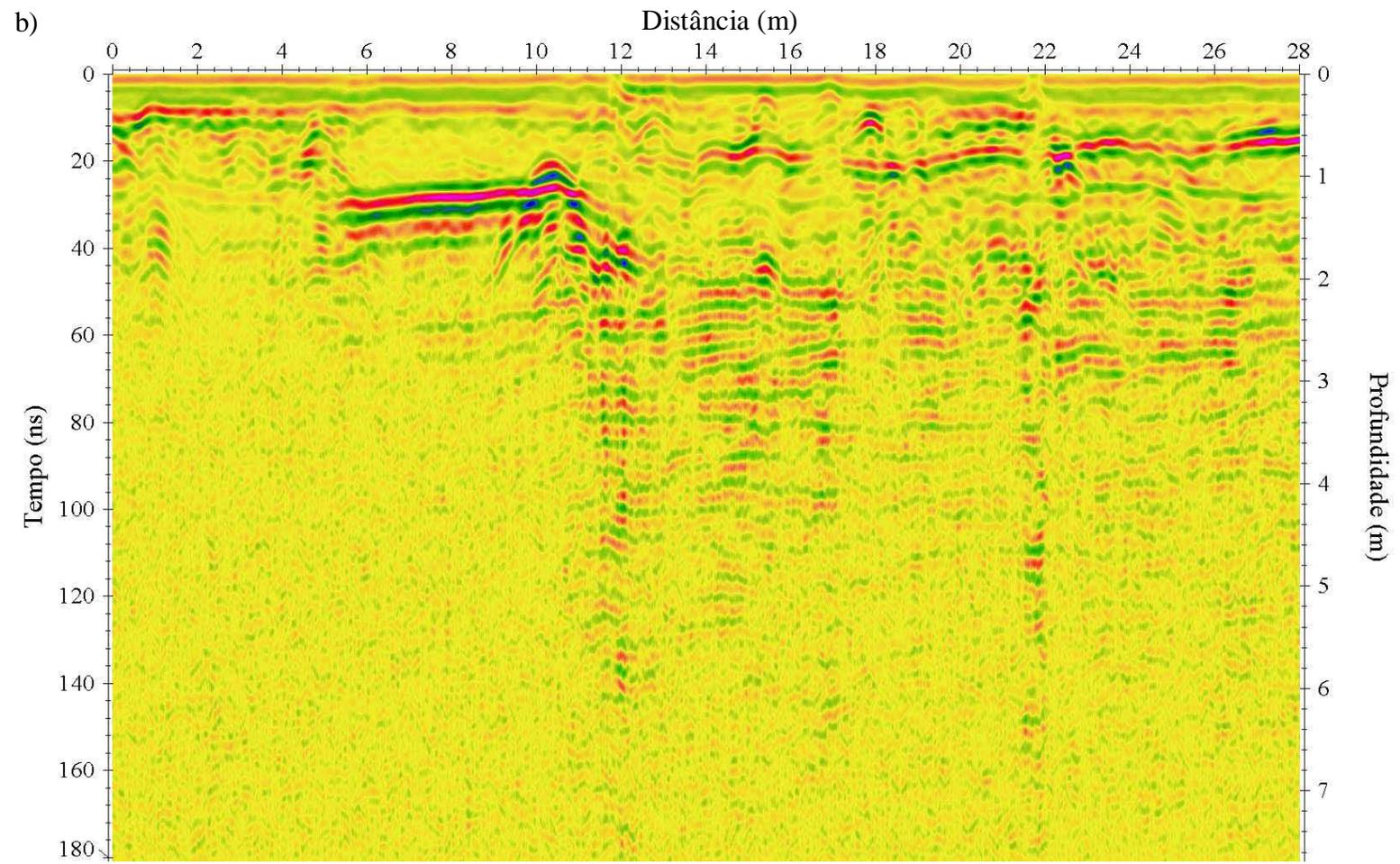


Figura 5.40 – Perfil 11-200-100. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas brancas delimitam as zonas atenuadas, a azul, nível hidrostático, a vermelha, área do tanque 1, e as pretas pontilhadas, camadas atenuadas. TS assinala tanque subterrâneo e C, canaleta.





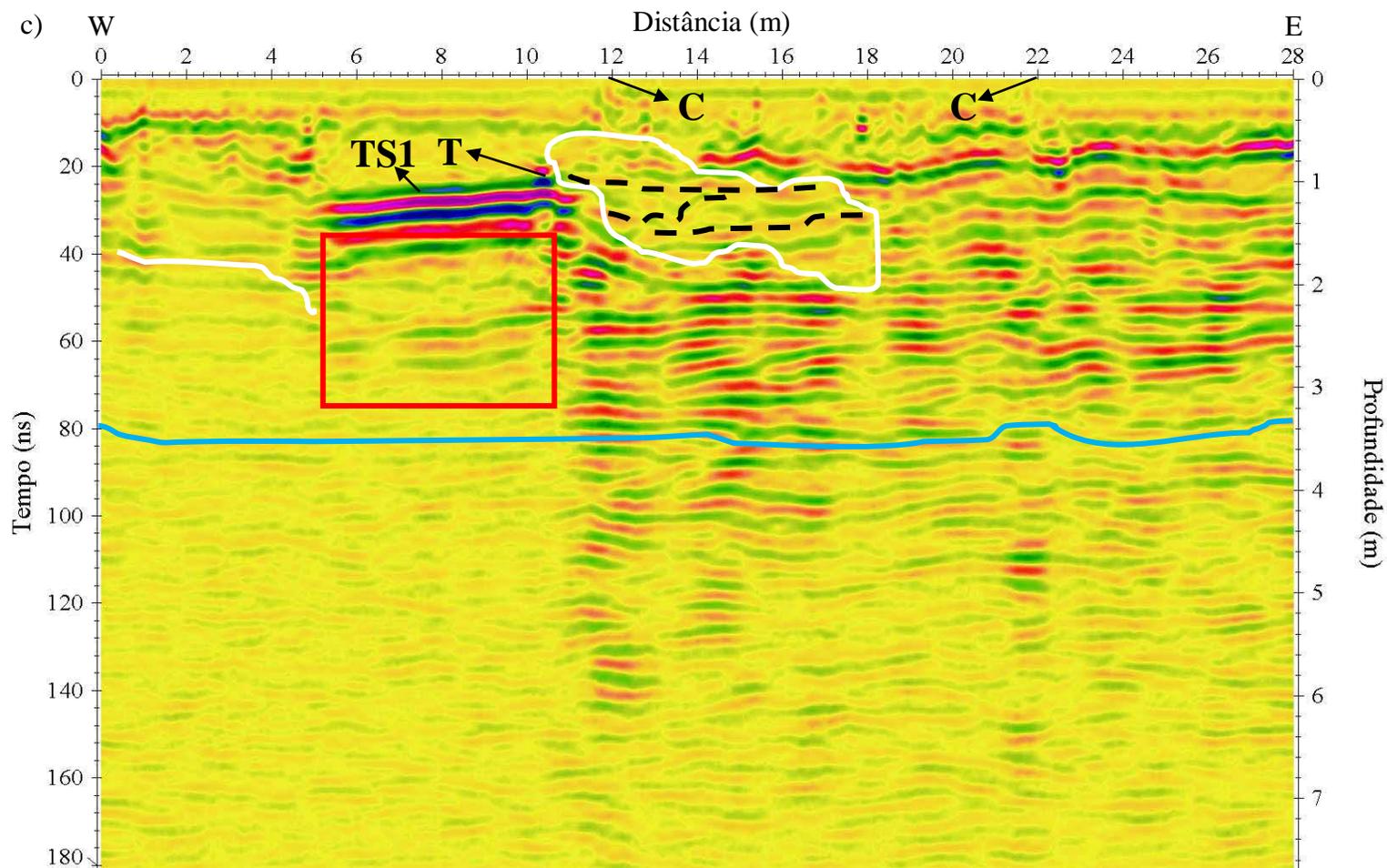


Figura 5.41 – Perfil 11-200-200. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas brancas delimitam as zonas atenuadas, a azul, nível hidrostático, a vermelha, área do tanque 1, e as pretas pontilhadas, camadas atenuadas. TS assinala tanque subterrâneo e C, canaleta.

5.4.12 Perfil 12

O perfil 12 apresenta 28 m de extensão W-E. Assim como o perfil 11 está localizado entre as BC2 e BC3 e passa em cima do TS 1 (Figura 5.6). O piso é de bloquetes e cimento. Os radargramas obtidos foram reunidos nas Figuras 5.42, 5.43 e 5.44.

Observa-se, na Figura 5.42c, uma pequena zona com camada atenuada, localizada entre 12 e 16 m, a 1 m de profundidade, bem como três refletores causados por: TS, aproximadamente a 9 m do início do perfil, a 1 m de profundidade, e duas canaletas localizadas em 10 e 20 m na superfície.

Na Figura 5.43c notam-se esses mesmos refletores: o TS1 na profundidade de cerca de 1,4 m e as duas canaletas a 10 e 20 m. No entanto, é possível visualizar três zonas com camadas atenuadas, uma não tão intensa, acima do TS6, a qual não era visível no radargrama obtido com a antena de 400 MHz (Figura 5.42c), localizada entre 3,5 e 9,5 m, a cerca de 1 m de profundidade; outra mais profunda, identificada entre 0 e 10 m, a cerca de 2 m de profundidade, e outra profunda, entre 15,5 e 26 m, na profundidade de 4 m. Já a zona atenuada visualizada na Figura 5.42c não sofreu mudanças significativas, estando esta localizada entre 10 e 15 m, a 1,4 m de profundidade.

Já na Figura 5.44c são vistos todos os refletores e zonas com camadas atenuadas observadas nas Figuras 5.42c e 5.43c, entretanto, a zona atenuada presente no TS1 não é visualizada, provavelmente devida à lixiviação causada pelas chuvas de novembro a fevereiro, o que corrobora com a hipótese de fuga de combustível. Outra observação importante é a diminuição da camada atenuada mais profunda, entre 18 e 22 m a 3 m de profundidade, ocasionada possivelmente pelo mesmo motivo descrito acima. O NH é visualizado a 3.5 m de profundidade.

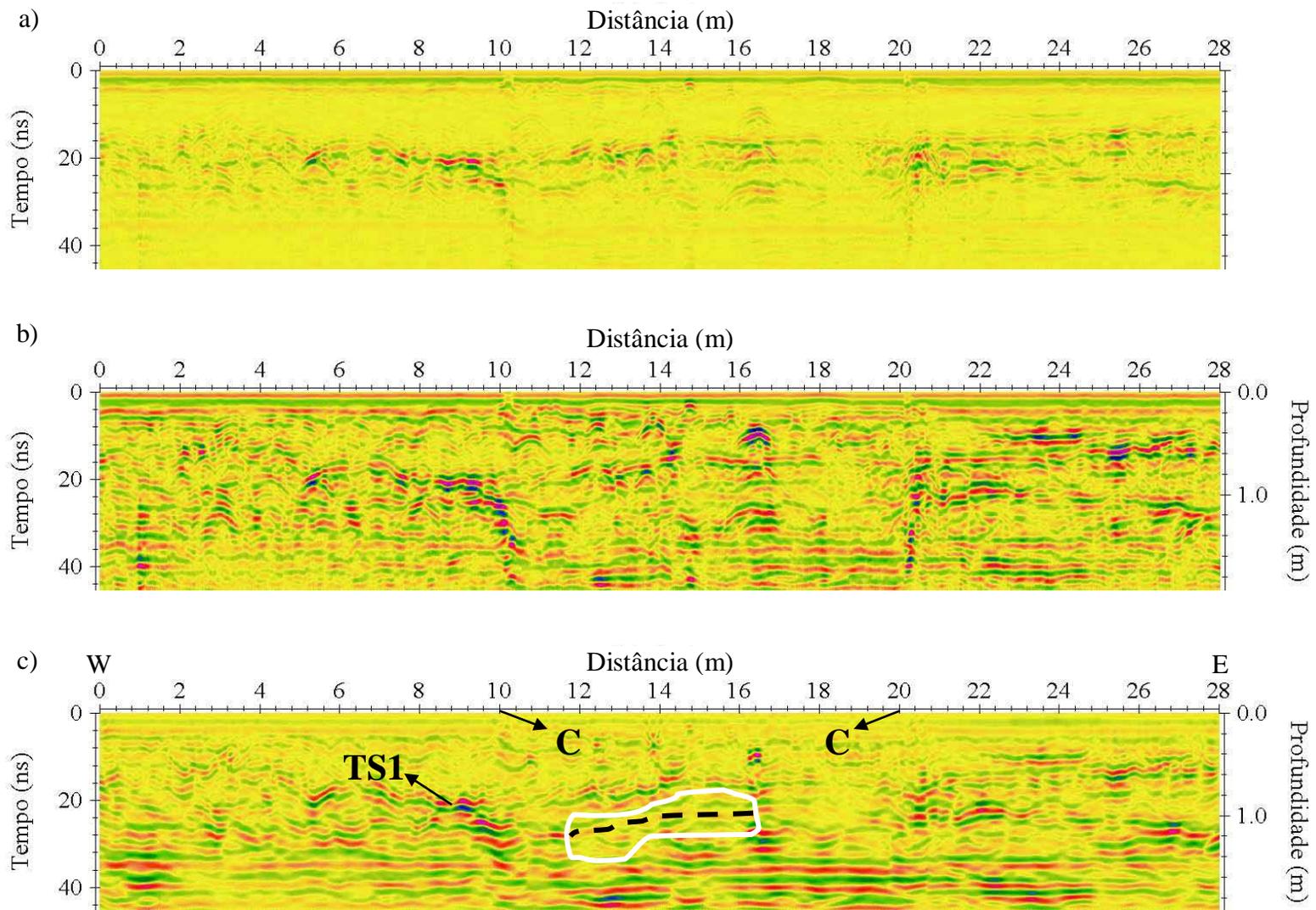
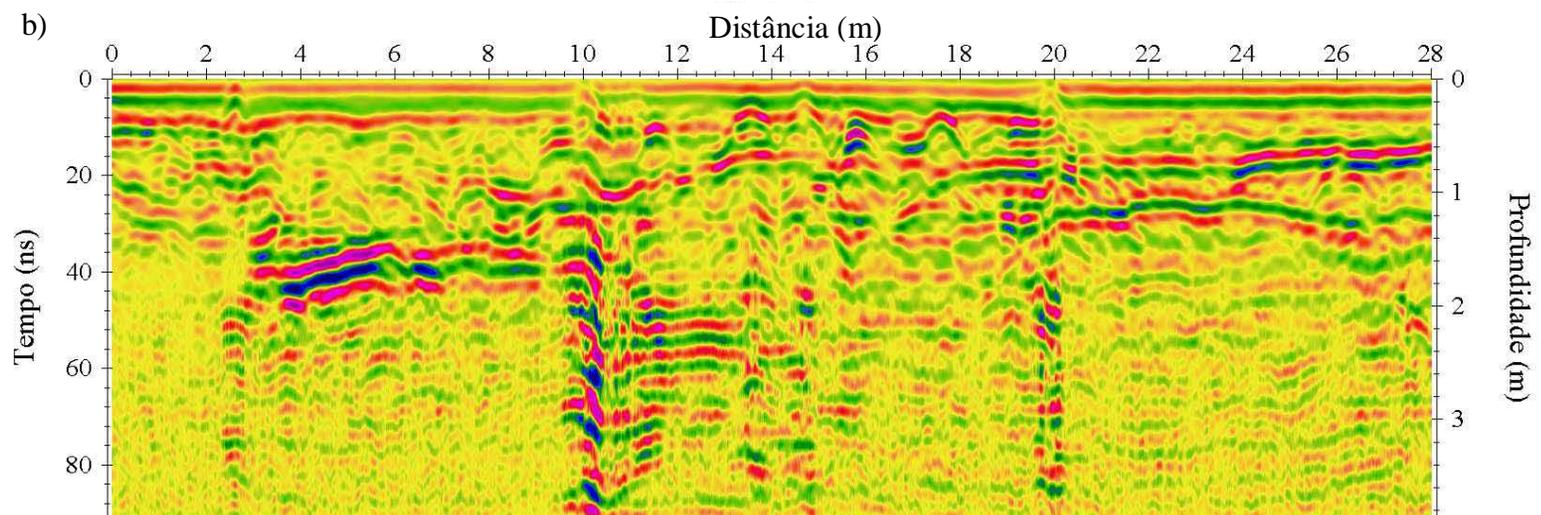
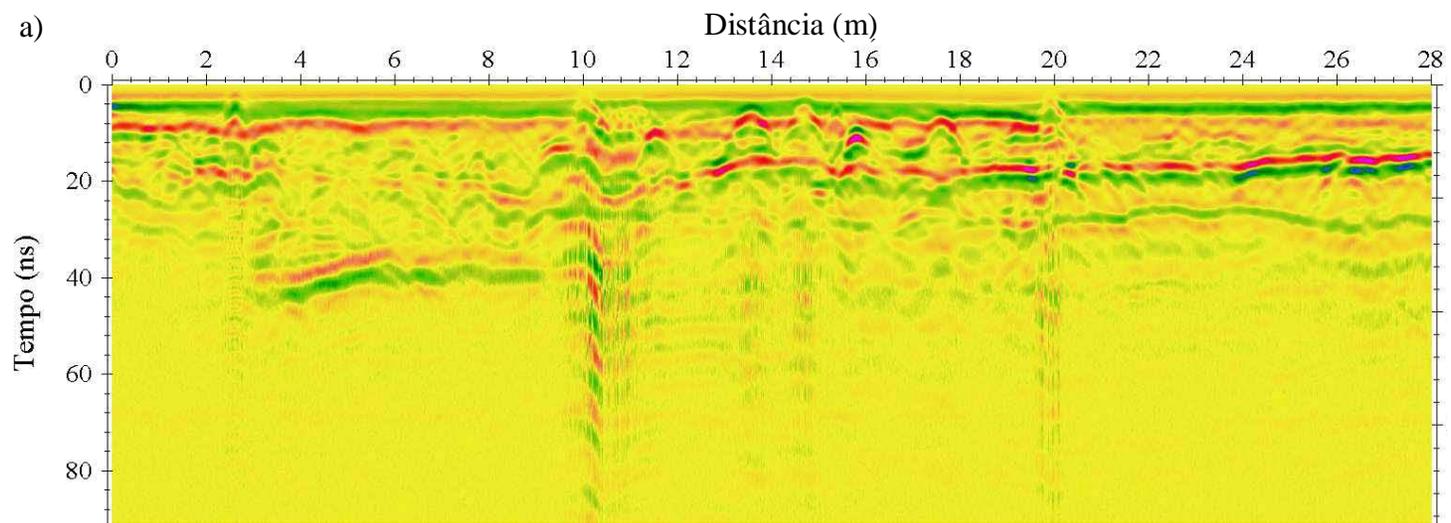


Figura 5.42 – Perfil 12-400-50. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado A linha branca delimita a zona atenuada e as pretas pontilhadas, camadas atenuadas. TS1 assinala o tanque subterrâneo 1 e C, canaleta.



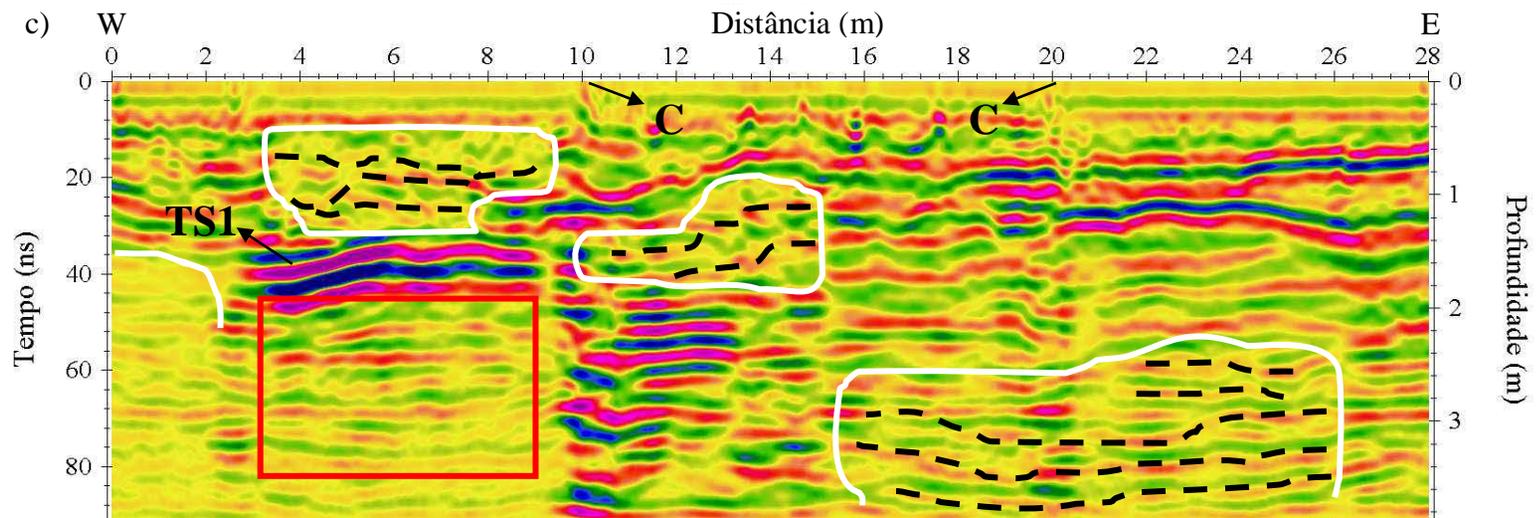
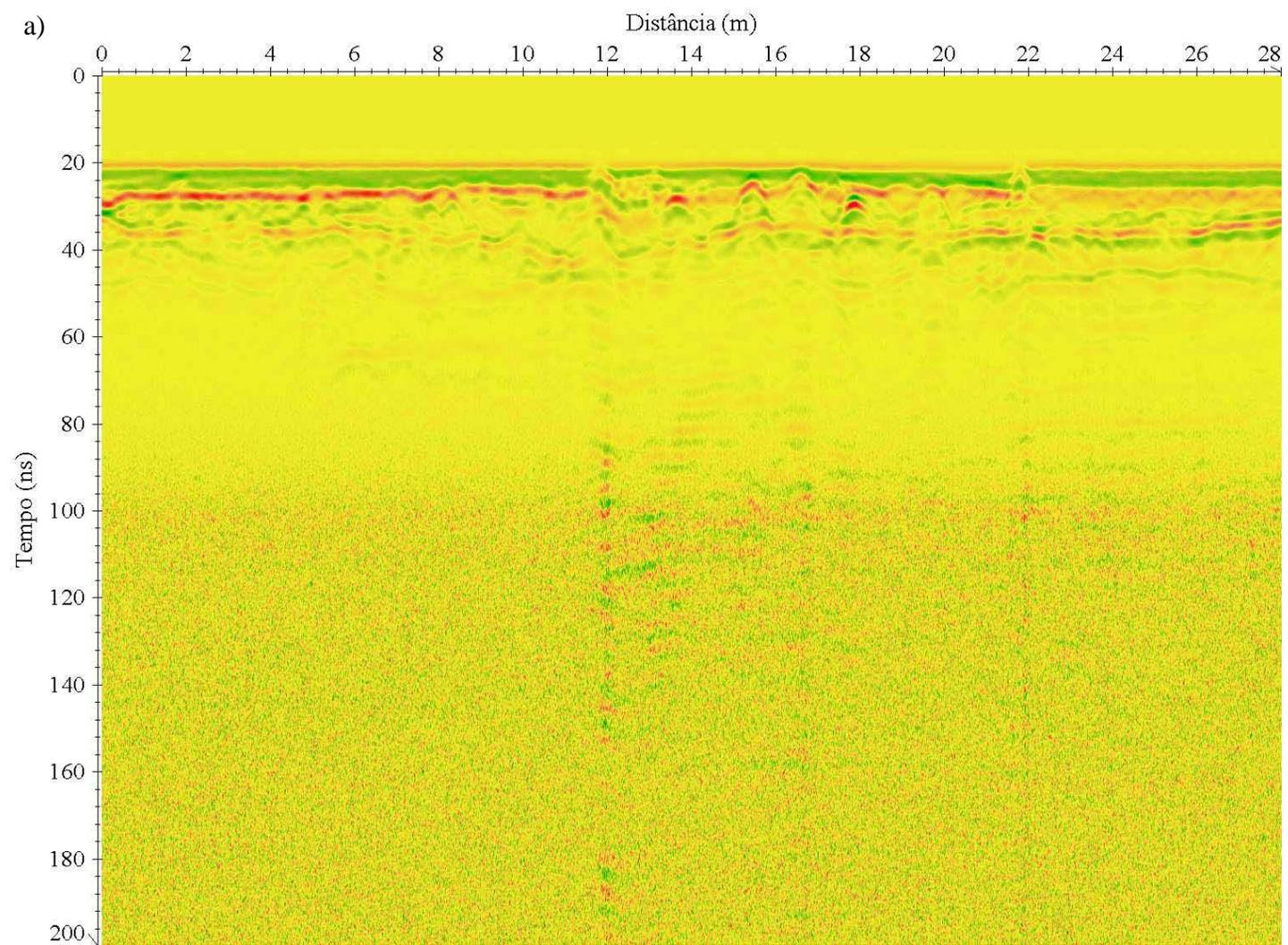
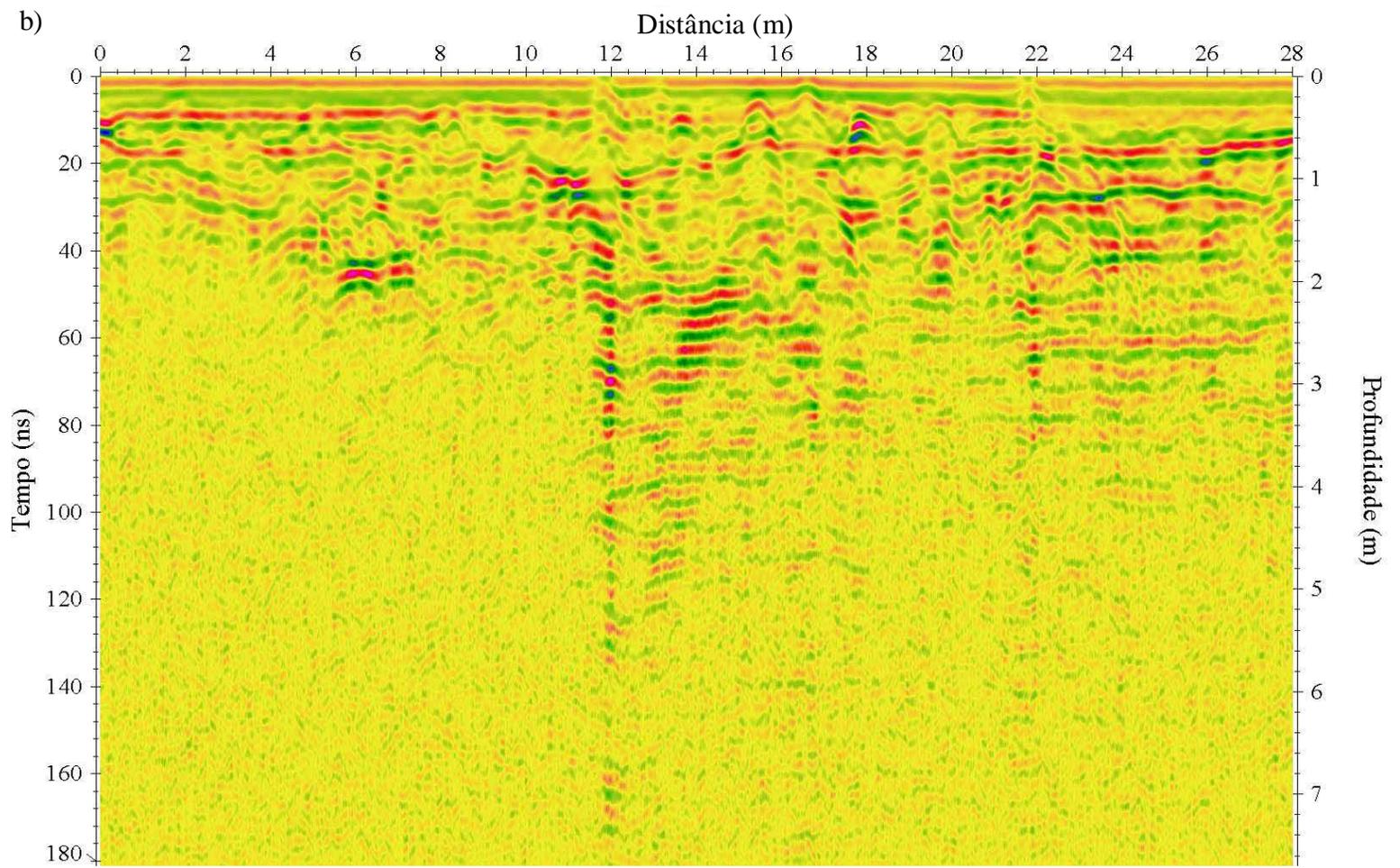


Figura 5.43 – Perfil 12-400-50. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas brancas delimitam as zonas atenuadas, a vermelha, área do tanque 1, e as pretas pontilhadas, camadas atenuadas. TS assinala tanque subterrâneo e C, canaleta.





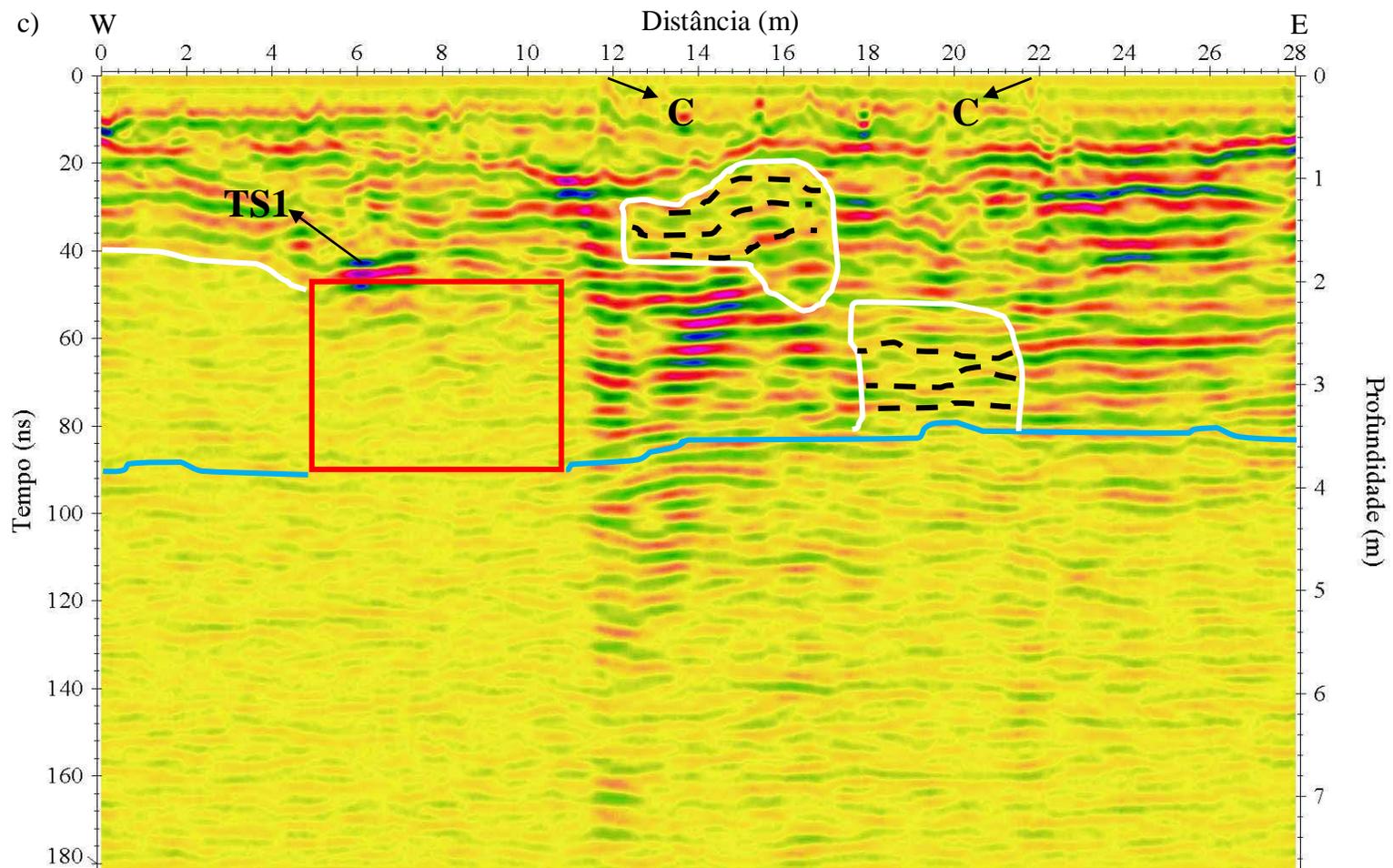


Figura 5.44 – Perfil 12-400-50. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. As linhas brancas delimitam as zonas atenuadas, a azul, nível hidrostático, a vermelha, área do tanque 1, e as pretas pontilhadas, camadas atenuadas. TS assinala tanque subterrâneo e C, canaleta.

5.4.13 Perfil 13

Finalmente, o último perfil 13 levantado, possui 28 m de comprimento ao longo da direção W-E e, assim como os perfis 11 e 12, também está localizado entre as BC2 e BC3 (Figura 5.6). O piso, por sua vez, é de bloquetes e cimento. Os radargramas aparecem nas Figuras 5.45, 5.46 e 5.47.

Na Figuras 5.45c observam-se apenas as canaletas localizadas a 10 e 20 m.

A Figura 5.46c possibilita visualizar as canaletas também a 10 e 20 m. É possível, ainda, localizar uma zona com camada atenuada entre 4 e 10 m, a cerca de 3 m de profundidade. Ocorre também atenuação a partir de 2 m entre 15 e 24 m do início do perfil.

Já na Figura 5.47c notam-se os mesmo refletores causados pelas canaletas, no entanto com um deslocamento de 2 m com relação às Figuras 5.45c e 5.46c, devido à diferença no início nas medidas. Percebe-se, também, um aumento na zona atenuada vista na Figura 5.46c, vista agora entre 0 e 11,5 m. O radargrama, como um todo, mostra-se mais atenuado por causa das chuvas de dezembro a fevereiro, de modo que a atenuação a partir de 2 m entre 15 e 24 m do início do perfil deixa de ser individualizada, algo que ocorre também em outros radargramas. O NH é observado a 3,5 m de profundidade.

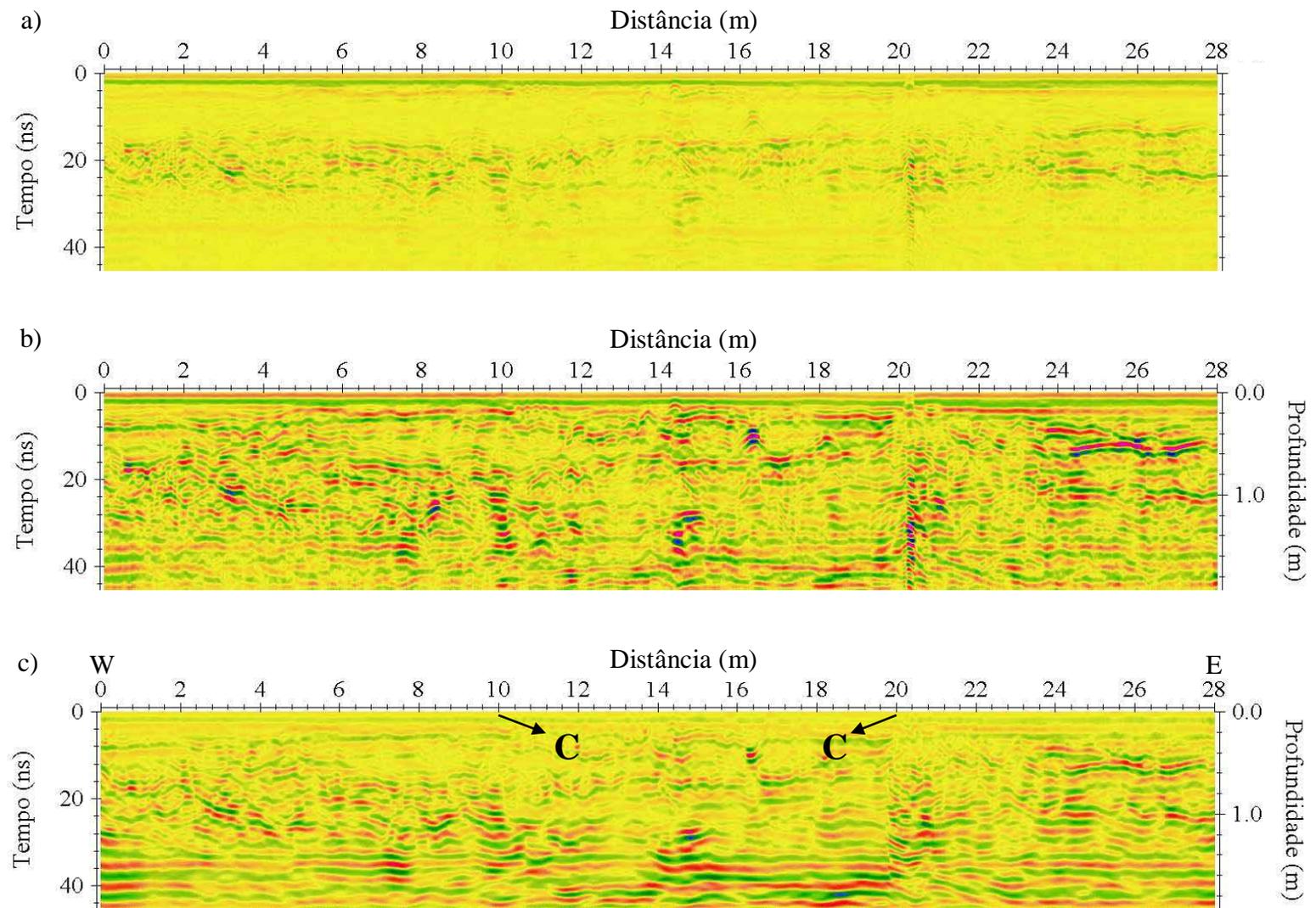
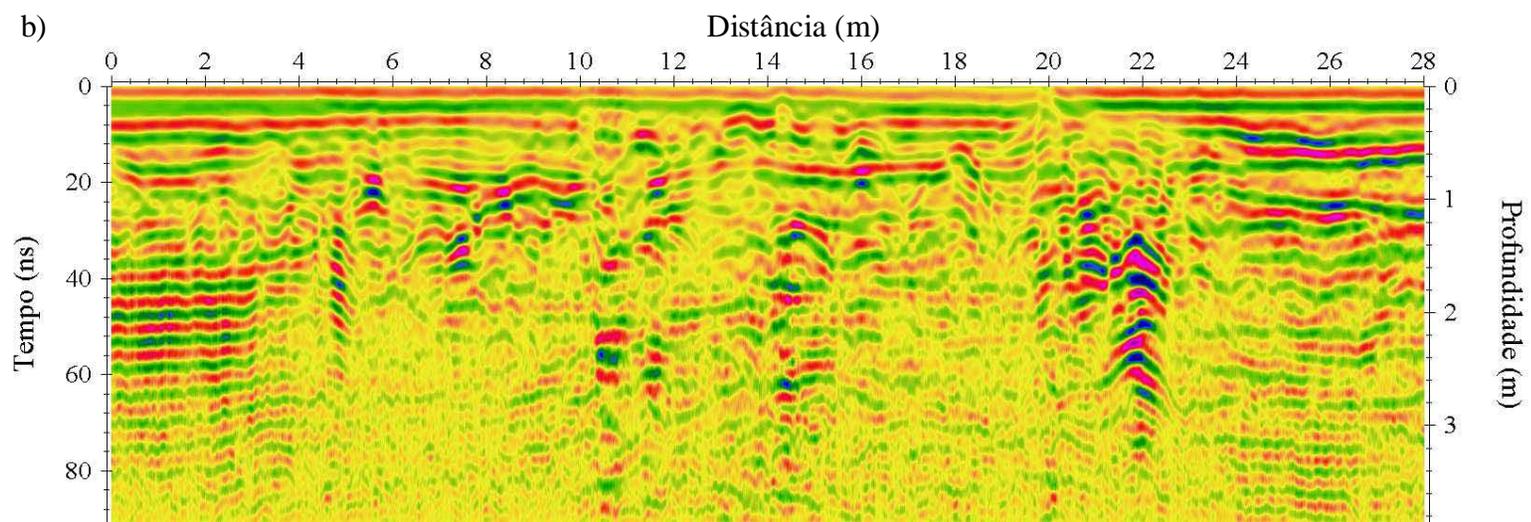
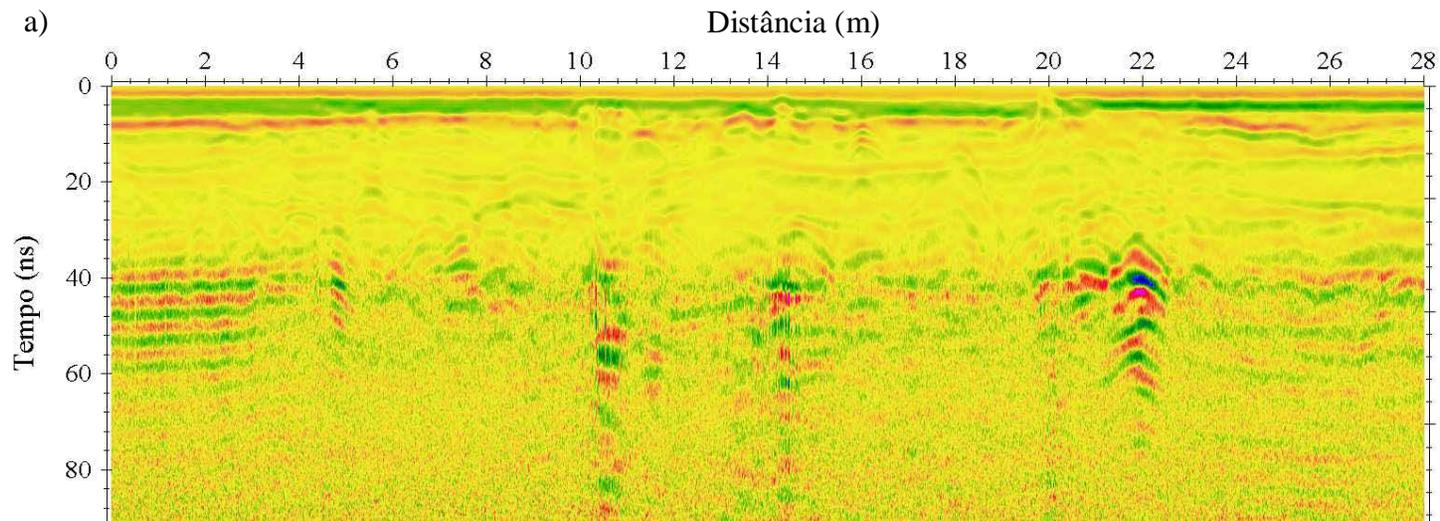


Figura 5.45 – Perfil 13-400-50. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. C assinala a canaleta.



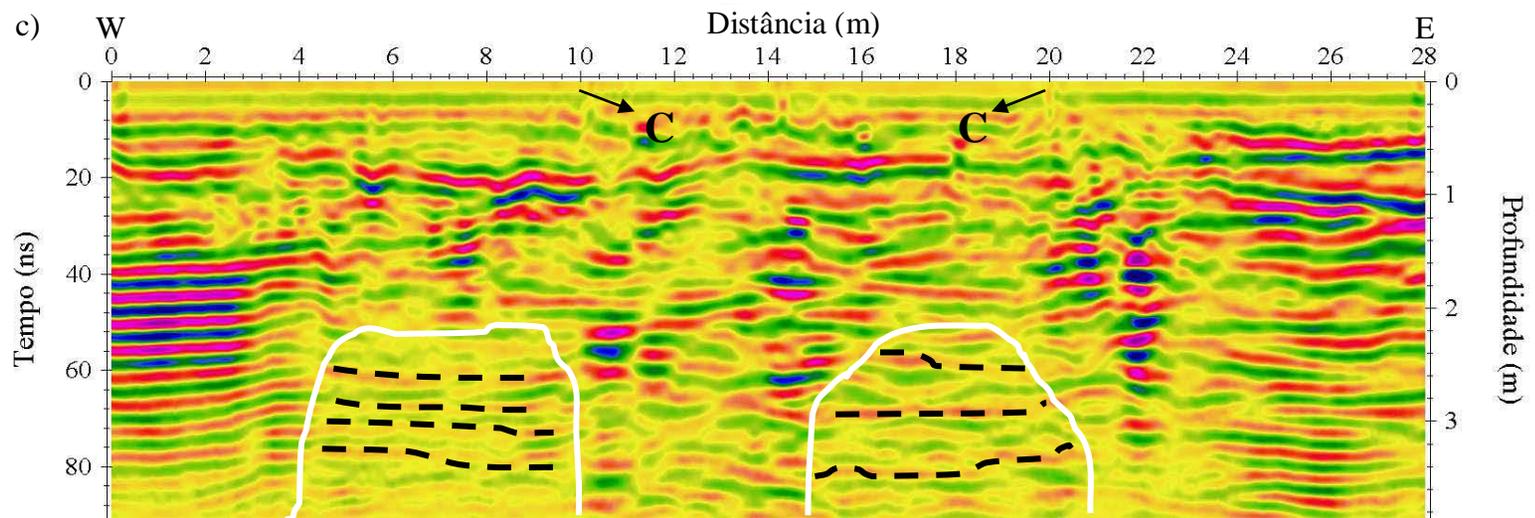
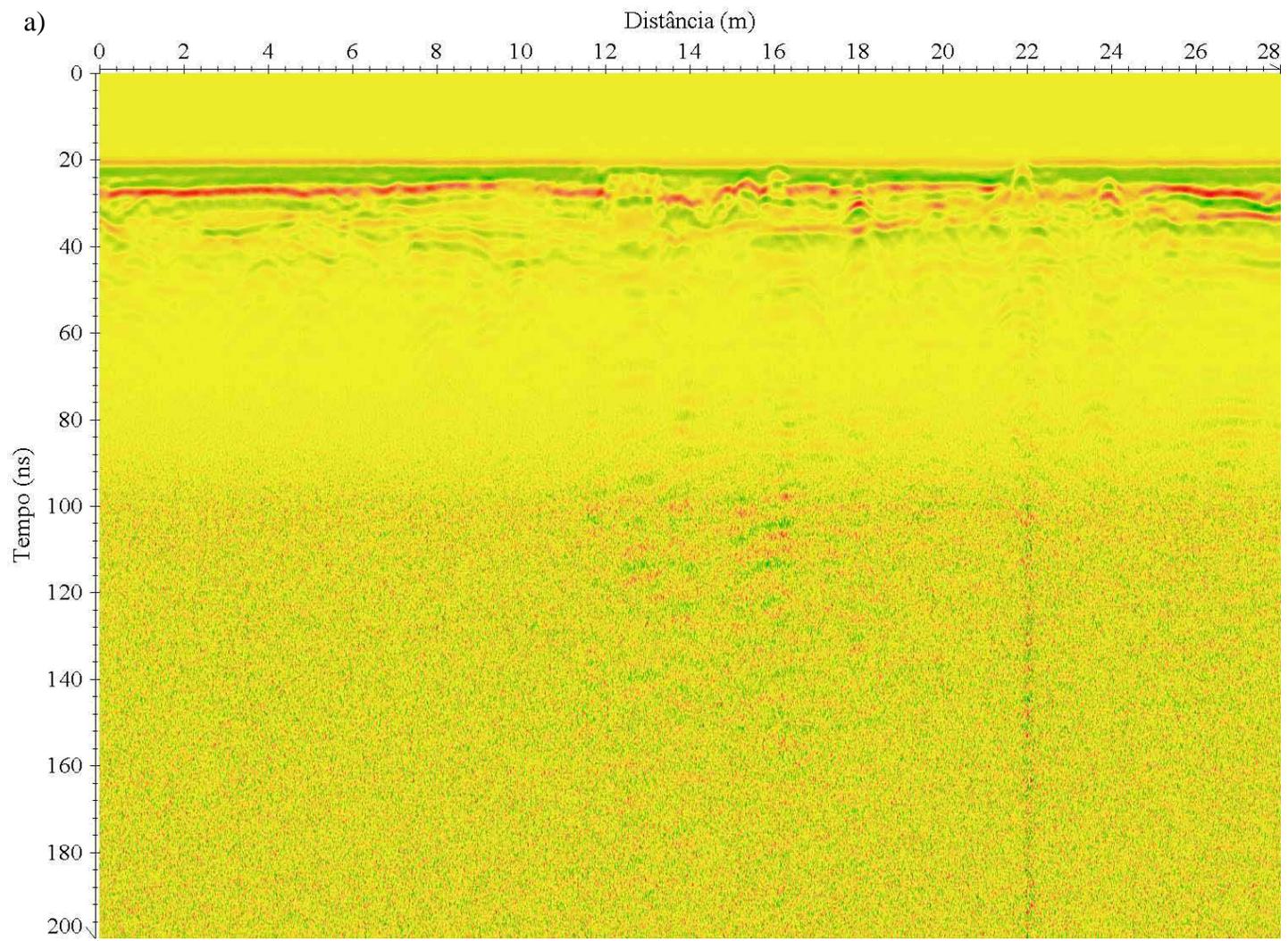
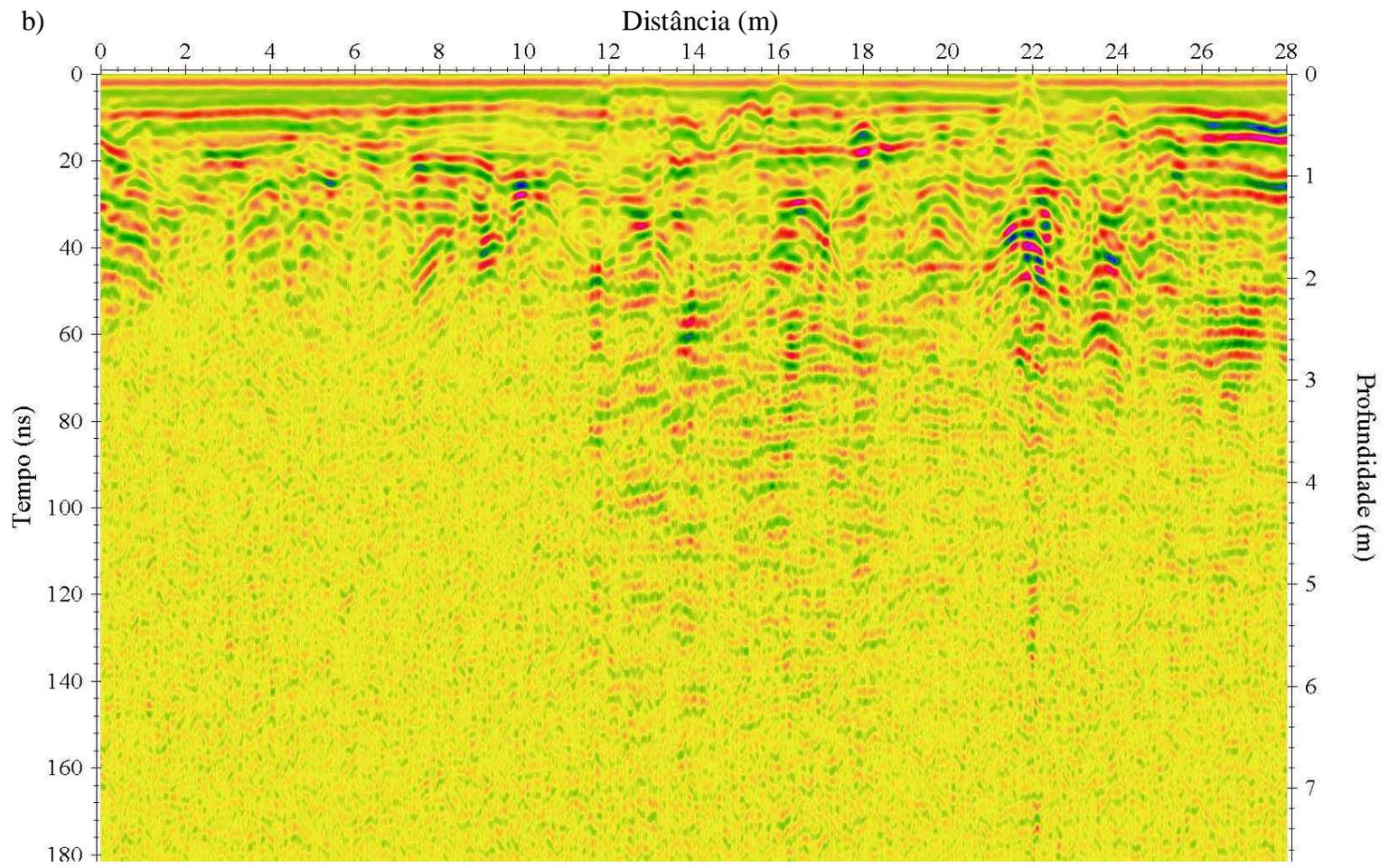


Figura 5.46 – Perfil 13-200-100. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. A linha branca delimita a zona atenuada, a azul, o nível hidrostático e as pretas pontilhadas, camadas atenuadas. C assinala a canaleta.





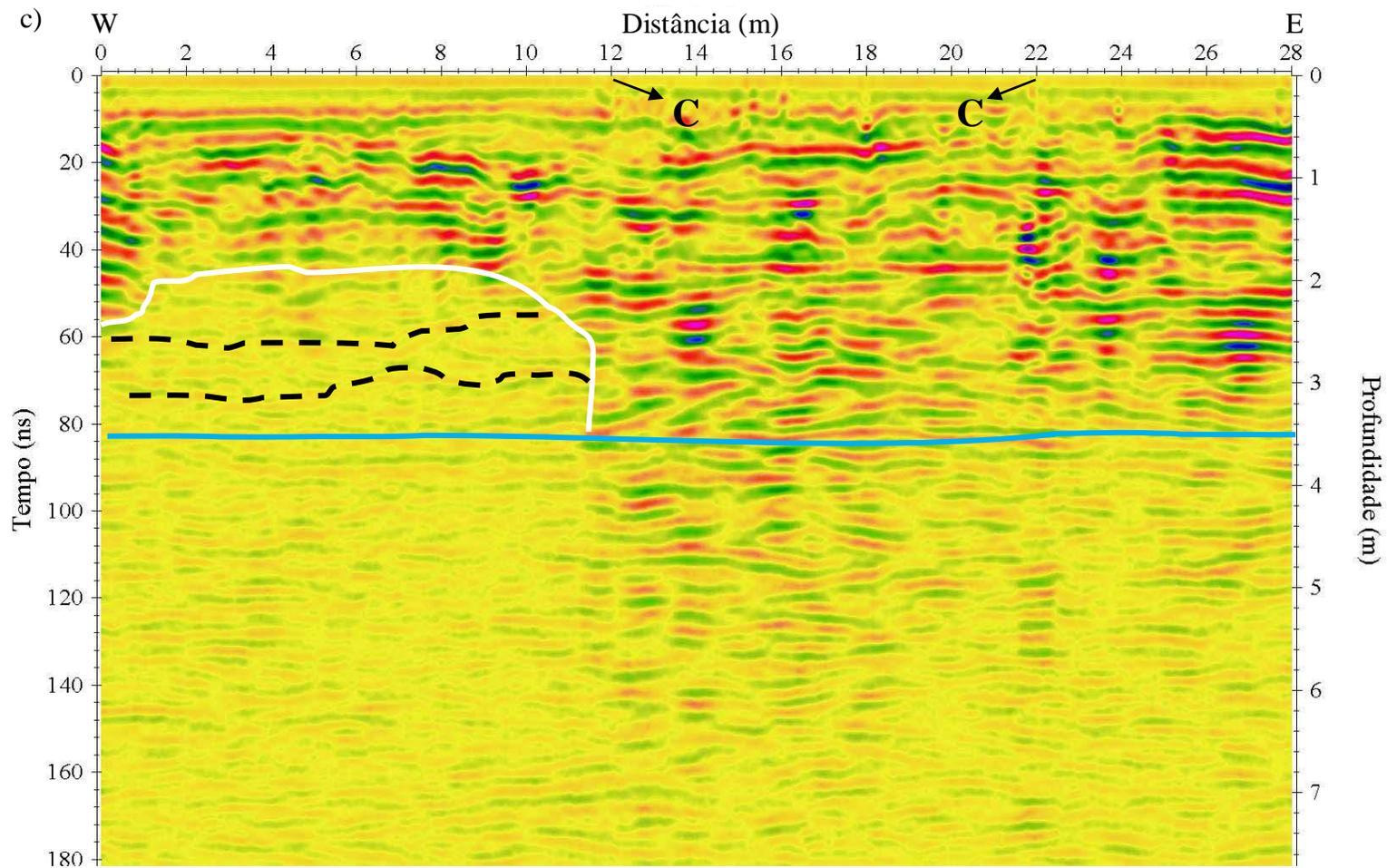


Figura 5.47 – Perfil 13-200-200. Radargramas. a) Bruto. b) Processado. c) Migrado e interpretado. A linha branca delimita a zona atenuada, a azul, o nível hidrostático e as pretas pontilhadas, camadas atenuadas. C assinala a canaleta.

5.5 INTEGRAÇÃO DOS RESULTADOS

Para a integração dos resultados observados nos radargramas foram construídos mapas de atenuação do sinal eletromagnético para três profundidades, 1, 2 e 3 m. As zonas atenuadas mostradas nos 13 perfis realizados com as antenas de 200 MHz medidas em dezembro de 2008 (final do período seco) e em março de 2009 (final do período chuvoso), esta última após as chuvas de dezembro a março, foram classificadas em uma escala interpretativa, com os índices 0, 0,5, 1, 1,5 e 2, em que o valor 0 corresponde a zonas de não atenuação do sinal eletromagnético e 2 corresponde à máxima atenuação encontrada para prováveis contaminações, não entrando nestes mapas, as atenuações provocadas pela presença de argilas, de acordo com os perfis geológicos construídos com os dados da ENSR(2007) (Figura 5.3). O mapa de atenuação das medidas obtidas ao final do período seco é mostrado na Figura 5.48 e o mapa para o final do período chuvoso, na Figura 5.49.

Ao final do período seco, a 1 m de profundidade (Figura 5.48a) foram detectadas fortes atenuações com centro, uma, entre o tanque 1 e a bomba de combustível 2 e, a outra, entre os tanques 2, 3 e 4. Estas zonas, em especial a primeira, estão relacionadas às zonas onde ocorreram as maiores concentrações de VOC (Figura 5.4). Estas zonas podem ter sido provocadas pela biodegradação de hidrocarbonetos, como descrito em SAUCK (2000) oriundos, possivelmente, por vazamentos de um ou mais tanques ou de uma ou mais tubulações ou ambos. Podem, também, refletir derramamentos por ocasião do abastecimento dos tanques.

Nota-se, ainda, a 1 m de profundidade, uma zona de atenuação menos intensa, em frente ao local onde ocorria a troca de óleo, que pode ter sido provocada pelo acúmulo de hidrocarbonetos nesta área.

Estas zonas atenuadas se estendem com menos intensidade a 2 m de profundidade (Figura 5.48b).

Finalmente, a 3 m de profundidade (Figura 5.48c), a zona atenuada próxima aos tanques mostra uma extensão preferencial para E-S. Já a zona de atenuação localizada próxima à troca de óleo passa a se confundir com atenuação do sinal sofrido a esta profundidade não tendo sido lançado no mapa de atenuação. Contudo, há o aparecimento de outra zona, próximo ao poço de

produção, na extremidade sudeste do posto, causada, possivelmente, pelo levantamento do nível hidrostático pretérito, o que pode causar o surgimento de fase residual.

Ao final do período chuvoso, percebe-se, a 1 m de profundidade (Figura 5.49a), que as zonas atenuadas próximas aos tanques ficaram maiores. Este aumento pode ser explicado pela presença de água no subsolo ou mesmo pelo aumento da biodegradação do hidrocarboneto no local. Nota-se, ainda, o desaparecimento da zona próxima onde ocorria a troca de óleo, porque ela ocorre abaixo da cota de 1 m.

A 2 m de profundidade (Figura 5.49b), também se observa aumento nas zonas atenuadas no período chuvoso em relação ao período de seca. É interessante observar que os isocontornos mostram a extensão preferencial para E-S. Há provavelmente na zona atenuada mais ao Norte, uma tendência à extensão na direção N.

A 3 m de profundidade (Figura 5.49c), a zona atenuada entre os tanques desloca-se mais para Sul e para Leste em relação às medidas de dezembro. Observa-se, ainda, um leve aumento na zona próximo ao poço de produção, causado ou pelo aumento de água nesta área ou mesmo pela biodegradação do hidrocarboneto.

As zonas de atenuação provavelmente são manifestações de mais de um evento de fuga de combustível, em diferentes épocas, daí a dificuldade na sua interpretação. Isso explicaria porque os radargramas são caracterizados por alternância constante de iluminação das camadas (porções com maior ou menor contraste nas propriedades), de modo que é raro um trecho longo mostrando um mesmo comportamento para o subsolo.

Muito provavelmente, as zonas de atenuação possuem algum vínculo de conexão. Isto não aparece nos mapas, que delimitam apenas as zonas com atenuação notória, que não podem necessariamente ser explicadas pelo enriquecimento em argila. Outro paradigma seria seguir as zonas bem iluminadas que não podem ser explicadas pelo enriquecimento local na fração areia, porque, dependendo da fase do combustível, do solo e do clima e, especialmente, da idade da fuga de hidrocarbonetos, as zonas contaminadas podem mostrar excelente contraste. Esse segundo tipo de situação não foi considerado predominante, porque a fuga de combustível é um evento que já vem sendo sentido pelos usuários de águas de poços faz tempo.

As zonas de atenuação devem formar dutos que levam o(s) possível(eis) vazamento(s) para o lençol de água subterrânea livre que, a partir deste, pode(m) se estender para as

ocorrências de água superficial bem como poços de abastecimento a partir de aquíferos confinados, pelos motivos explicados no capítulo 2, Figura 2.2.

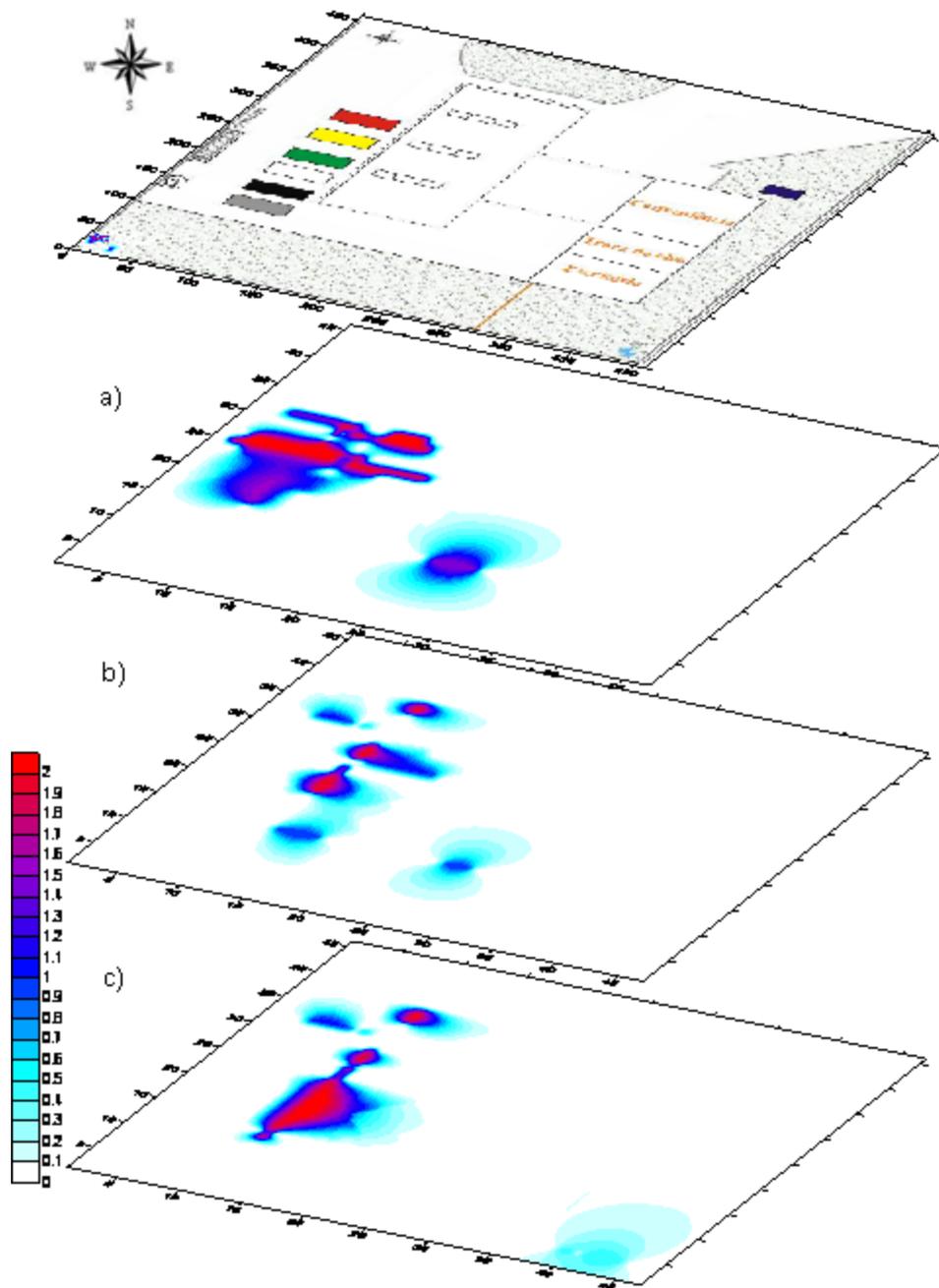


Figura 5.48 - Mapa de atenuações medidas com a antenna de 200 MHz em dezembro de 2009. a) Atenuações para 1 m de profundidade. b) Atenuações para 2 m de profundidade. c) Atenuações para 3 m de profundidade.

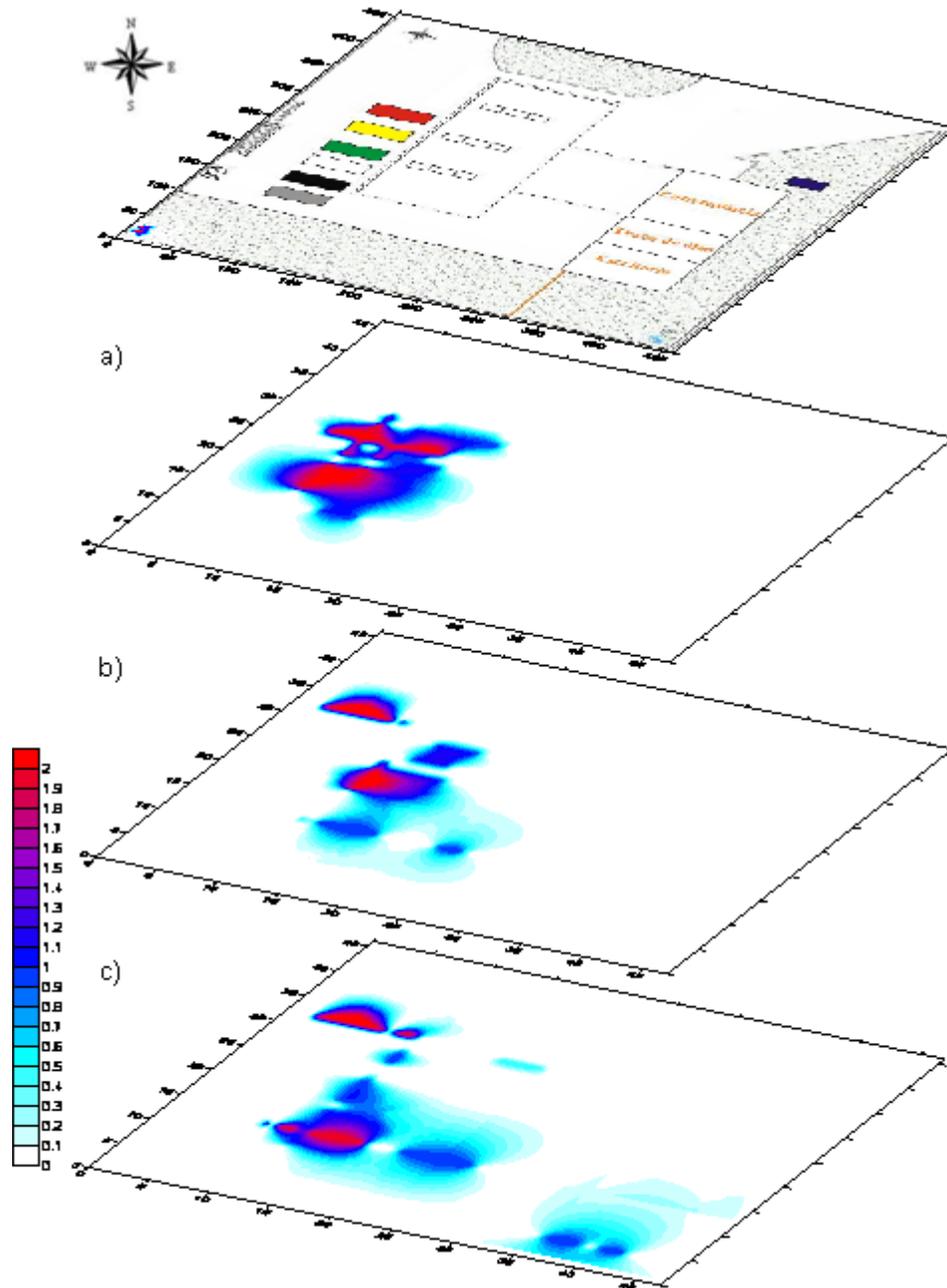


Figura 5.49 - Mapa de atenuações medidas com a antena de 200 MHz em março de 2009. a) Atenuações para 1 m de profundidade. b) Atenuações para 2 m de profundidade. c) Atenuações para 3 m de profundidade.

6 O SIMULADOR GEOFÍSICO

O experimento simulador de Geofísica consiste basicamente de duas telas computacionais de LCD, uma CPU e um mouse ótico, dispostos em uma estrutura única compacta como mostra a Figura 6.1. Na parte lateral da estrutura encontram-se os botões que dão o comando de seleção do problema real e do método geofísico usado.

Na tela de LCD disposta na parte inferior da estrutura é simulado o subsolo com animação mostrando, no caso de vazamento de posto de gasolina, a penetração do agente contaminante. Na tela de LCD superior, são repassadas informações diversas, e, especialmente, à medida que a unidade ótica do mouse é deslocada pelo visitante na mini maquete entre as duas telas, reproduzidas medidas com o método geofísico utilizado para a investigação do problema real previamente selecionado. Em outras palavras, é simulado o trabalho de campo com as medidas que seriam obtidas sobre a subsuperfície que é vista na tela de baixo lançadas na tela de cima, à medida que o mouse, que simularia o percurso do equipamento sobre a terra, é movido.



Figura 6.1 - Visão frontal do simulador.

A Figura 6.2 mostra a seqüência de telas que informam ao usuário as ações que ele deve seguir, tomando como exemplo o caso do posto estudado.

A primeira tela do monitor disposto na parte de cima da estrutura é reservada para a propaganda dos possíveis patrocinadores.

A tela dois pede ao usuário para selecionar a aplicação desejada.

As telas três e quatro fornecem, respectivamente, informações sobre o problema ambiental escolhido (histórico, como ocorre a contaminação e suas possíveis conseqüências) e o método a ser usado (princípio de funcionamento e outras aplicações). Durante a projeção da tela três no monitor superior, aparece uma animação no monitor disposto na parte debaixo da estrutura mostrando o subsolo e a penetração do agente contaminante.

Na tela cinco, o usuário é informado sobre o que deve fazer para obter as medidas com o método escolhido, ou seja, movimentar o mouse.

Na tela seis aparecem as medidas à medida que o mouse é movimentado, simulando o levantamento de campo do perfil; as medidas são reais e referem-se ao problema real escolhido.

Na tela sete podem ser dadas informações adicionais, por exemplo, sobre o tratamento dos dados. Finalmente, a tela oito informa o final do procedimento.

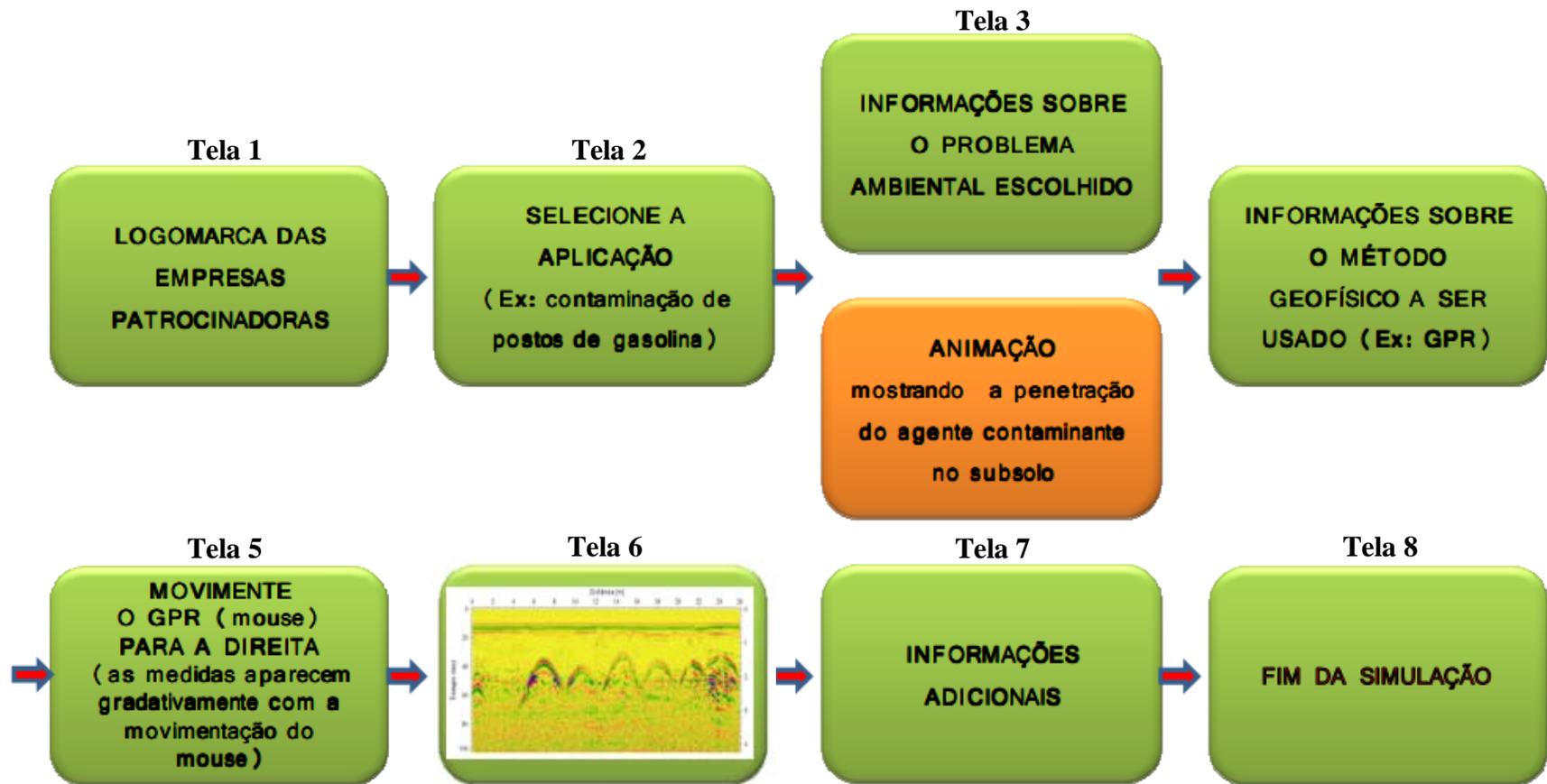


Figura 6.2 – Sequência de telas mostradas na simulação.

7 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos com o GPR correlacionados aos demais permitiram identificar áreas atenuadas dentro do posto que podem estar relacionadas com a contaminação antiga de hidrocarbonetos. Elas são vistas em várias profundidades, variando de 1 a 4 m de profundidade, próximas: aos 6 tanques de combustíveis; ao ambiente onde ocorria a troca de óleo e, ainda, ao poço de produção, no lado sudoeste do posto.

Neste último caso, o resultado do GPR decorre, provavelmente, do bombeamento de água no poço, o que é mais um indício que a pluma já faz parte da água subterrânea e que a pluma contaminante migrou, pelo menos, no sentido Sudoeste. Há indícios nos mapas de atenuação de movimento da pluma nessa direção e, possivelmente, também para o Norte. No entanto, devido à presença de álcool na gasolina brasileira, os efeitos da fuga de vazamento deverão se fazer sentir não somente na área do posto, mas também nas redondezas.

A classificação para esse tipo de cenário-estudo se faz por meio de quatro classes da ASTM E1739-95 (ASTM INTERNATIONAL, 2009):

Classe 1 - Dano imediato à saúde ou segurança humana ou de outros receptores sensíveis;

Classe 2 - Dano em curto prazo (0 a 2 anos) para a saúde ou segurança humana ou de outros receptores sensíveis;

Classe 3 - Dano em longo prazo (mais de 2 anos) para a saúde ou segurança humana ou de outros receptores sensíveis e

Classe 4 - Nenhum dano demonstrável em longo prazo para a saúde ou segurança humana ou de outros

A análise de risco da ENSR em 2007 colocou o posto na classe 3 da ASTM E1739-95 com a seguinte observação: “Água subterrânea está impactada e existe um poço de abastecimento doméstico, produzindo a partir do aquífero impactado, situado a uma distância maior de 2 anos, considerando a velocidade de deslocamento da água subterrânea” (ENSR 2007).

A integração dos resultados sugere que a atual classe é a 1 ou a 2. Há várias diferenças entre essas classes, a diferença que pode ser ressaltada aqui entre ambas as classes seria: “A água

subterrânea está contaminada e existe poço de uso público ou doméstico localizado no mesmo aquífero a menos de 2 anos da distância projetada de migração da pluma”, no caso da classe 2, enquanto no caso da classe 1, “poços de abastecimento público de água em atividade, linhas de abastecimento público ou tomadas públicas de água superficial contaminada ou imediatamente ameaçada”.

Vários estudos podem ser feitos na área, inclusive furos de sondagem, análises diversas, monitoramento com o GPR, mas, urgente são os serviços de remediação da área.

Os resultados para a área caracterizam-na como um caso com mérito suficiente para demonstração no simulador geofísico desenvolvido por dois motivos. O primeiro é que a divulgação dos resultados geofísicos obtidos possibilita o reconhecimento da Geofísica no Brasil como ferramenta útil na gestão desses tipos de contaminação. O outro motivo, mais importante, é que o caso permite chamar a atenção da população para esse tipo de problema ambiental, muito freqüente, de modo a instruí-la.

Vários outros trabalhos ilustram a aplicação da Geofísica, mas estão restritos aos profissionais da área e às bibliotecas. Além disso, esses trabalhos não se apresentam de uma forma atrativa ao leigo, pois usam linguagem científica. O simulador de geofísica é um recurso inédito para popularizar esse conhecimento, que pode ser deslocado, possibilitando seu uso fora do espaço da Geofísica na UFPA, em outras unidades do campus de Belém bem como nos campi da UFPA do interior do estado, em escolas de ensino fundamental e médio, bem como locais como praças, parques e também em secretarias.

O simulador será, portanto, também uma excelente ferramenta de divulgação da Geofísica e do profissional em Geofísica, como sugerido pela pesquisa sobre Diagnóstico Geofísica conduzida com o apoio da SBGF (Ussami, 2006).

REFERÊNCIAS

- ABAS (2008) – Associação Brasileira de Águas Subterrânea. Disponível em <<http://www.abas.org/educacao.php>> Acesso em 30/11/2008.
- ANNAN, A. P. **Ground penetration radar workshop notes**. Sensors & Software, Inc., Internal Report, p. 130, 2001.
- ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO. Postos de serviços revendedores. Disponível em: <<http://www.anp.gov.com.br>> Acesso em 8 de fevereiro de 2009.
- ARAÚJO, F. F. S. **Uso de GPR e IP-espectral na avaliação da contaminação industrial numa área do pólo petroquímico de Camaçari**. 1997. 86 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Universidade Federal da Bahia, Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Geofísica, Bahia, 1997.
- ART ENGINEERING LLC. Lake Trafford Critical Restoration Project – AquaScan Radar Survey Report, Art Engineering LLC. EUA, Relatório Interno. 2004.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E1739 - 95(2002) Standard Guide for Risk-Based Corrective Action Applied at Petroleum Release Sites**. Disponível em: <<http://www.astm.org/Standards/E1739.htm>> Acesso em 27/09/2009.
- ATEKWANA, E.A.; SAUCK, W.A.; WERKEMA JR., D.D. **Investigations of geoelectrical signatures at a hydrocarbon contaminated site**. Journal of Applied Geophysics, Amsterdam, v. 44, n.2, p. 167-180, 2000.
- AZAMBUJA, E.; COSTA, A.F.U.; NANNI, A.S.; SCHMIDT, A.. **O emprego da prospecção geofísica na avaliação de plumas de contaminação por hidrocarbonetos**. In: XXVII CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2000, Porto Alegre. XXVII CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2000.
- Balanço Geral. Belém: RECORD, 5 de março de 2009. Programa de TV.
- BLACKMAN, JR. W. C. Basic hazardous waste management. 2nd ed. Boca Raton, FL, USA: Lewis Publishers, 1996. 397f.
- BRAGA, A. C. O.; CARDINALI, M. T., 2005. **Aplicação da resistividade e cargabilidade em estudos de contaminação de sedimentos por derivados de hidrocarbonetos**. Revista Brasileira de Geofísica, Vol. 23, n.2:181-190.

BREWSTER, N.L.; ANNAN; A.P.REDMAN, J.D., 1992. **GPR monitoring of DNAPL migration in a sandy aquifer**. 4th International Conference on Ground Penetrating Radar, Rovaniemi- Finland, Special Paper 16, 185-190.

BRASIL. Lei nº 6.938, 31 de agosto de 1981. **Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências.**

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução 273. Publicada em 29 de novembro de 2000.

BRASIL. Lei nº 6.938, 31 de agosto de 1981. **Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências.** Diário Oficial da República Federativa do Brasil, DF, 02 set. 1981, p.16509. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/CCIVIL_03/Leis/L6938.htm>. Acesso em: 08/08/2009.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução 273. Publicada em 29 de novembro de 2000.

BRANDWOOD, D. **Fourier Transforms in Radar and Signal Processing**. London: Artech House. 2003. 212 p.

BRATBERG, D., HOPKINS, L. **Risk Based Corrective Action and Risk Assessment Procedures in the United States: a 1995 Survey**. In: Proceedings of the 1995 Petroleum Hydrocarbon and Organic Chemicals in Ground Water: Prevention, Detection, and Restoration Conference, Houston, Texas. Nov. p. 25-31.

BREWSTER, N.L.; ANNAN; A.P.REDMAN, J.D., 1992. **GPR monitoring of DNAPL migration in a sandy aquifer**. 4th International Conference on Ground Penetrating Radar, Rovaniemi- Finland, Special Paper 16, 185-190.

BREWSTER, M. L.; ANNAN, P. **Ground-penetrating radar monitoring of a controlled DNAPL release: 200 MHz radar**. Geophysics, v. 57 n. 8, p. 1211-1221, ago. 1994.

BRITO et al 2005. **Estudo da Contaminação de Águas Subterrâneas por BTEX oriundas de postos de distribuição no Brasil**. In 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás.

CARCIONE, J. M., MARCAK, H., SERIANE, G. & PADOAN, G., 2000. **GPR modeling study in a contaminated area of Krzywa Air Base (Poland)**. Geophysics, v 65, p 521-525.

CARVALHO Jr., M. A. F.; SILVA, L. M. C. - 1996 - **Métodos Geofísicos aplicados ao Estudo do Fluxo da Água Subterrânea sob Cemitério**. In: WORKSHOP DE GEOFÍSICA APLICADA AO MEIO AMBIENTE, 1, Belém, 1996. Resumos Expandidos Belém: SBGf, 1996, p. 47-49.

CASTRO, D. L.; BRANCO, R.M.G.C. **4-D ground penetrating radar monitoring of a hydrocarbon leakage site in Fortaleza (Brasil) during its remediation process: a case history**. Journal of Applied Geophysics, Amsterdam, v. 54, n 1-2, p. 127-144, 2003.

CAVALCANTI, S. S. ; SATO, H. K. ; LIMA, O. A. L. **Geofísica Elétrica na Caracterização da Hidrologia Subterrânea na Região do Aterro Metropolitano Centro, Salvador, Bahia**. Revista Brasileira de Geofísica, Rio de Janeiro, v. 19, p. 155-167, 2002.

CETESB. **Manual de gerenciamento de áreas contaminadas**. CETESB, GTZ. 2.ed. São Paulo: CETESB, 2001.

COLE, G. M. Assessment and remediation of petroleum contaminated sites. Boca Raton, FL, USA: Lewis Publishers, 1994. 360p.

CORSEUIL, H. X. **Enhanced degradation of monoaromatic hydrocarbons in sandy aquifer materials by inoculation using biologically active carbon reactors**. Ann. Arbor; University Microfilms International, 1992. Dissertação (Mestrado).

CORSEUIL, H. X., MARINS, M. D. M. **Contaminação de Águas Subterrâneas por Derramamentos de Gasolina: O Problema é Grave?**. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 2, n. 2, p. 50-54, 1997.

CORSEUIL, H.X., MARINS, M. D.M. **Efeitos causados pela mistura de gasolina e álcool em contaminações de águas subterrâneas**. Bol. téc. PETROBRAS, v.41, n.3/4, p.133-138, 1998.

CLAERBOUT, J. F.; BLACK, J. L. Basic Earth Imagins (Version 2.4). Blackwell Scientific Publications, 2005. 236 p.

Diário Oficial da República Federativa do Brasil, DF, 02 set. 1981, p.16509. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/CCIVIL_03/Leis/L6938.htm>. Acesso em: 08/08/2009.

Divulgando a Geofísica para todos. Publicação da Sociedade Brasileira de Geofísica, N. 6, 2007. Disponível em:

<http://www.sbgf.org.br/publicacoes/boletins/boletim6_2007.pdf> Acesso em 16 de agosto de 2009.

DAVIS, J.L.; ANNAN, A.P., 1989. **Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy.** *Geophysical Prospecting*, v.37, p.531-551.

DANIELS, D. J. **Ground penetrating radar 2nd edition.** London: The Institution of Electrical Engineers. 2004. 761 p.

_____. **Surface penetrating radar.** The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom, 300f., 1996.

DANIELS, D.J.; ROBERTS, R.; VENDL, M. A. **Ground penetrating radar for the detection of liquid contaminants.** *Journal of Applied Geophysics*, v.33, p 195-207. 1995.

DEHAINI, J. **Detecção de plumas contaminantes de hidrocarbonetos em subsuperfície pelo método de radar de penetração.** 2001. 100p. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) - Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, São Paulo, 2001.

DUARTE, K.S. **Avaliação do risco relacionado à contaminação dos solos por hidrocarbonetos no Distrito Federal.** Tese (Doutorado) - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil. Distrito Federal. 259p. 2003.

(ENRS). Environmental Services. **Investigação Ambiental Detalhada e Análise de Risco Tier 1.** Belém, 2007.

FETTER, C.W. **Contaminant Hydrogeology.** Macmillan Publishing Company, New York, 1998. 458p.

FERNANDES, M., CORSEUIL, H.X. **Contaminação de Águas Subterrâneas por Derrramento de Gasolina: Efeito Cossolvência.** In: 3º Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental (SIBESA), Gramado, junho/96.

JORNAL LIBERAL 1ª EDIÇÃO. Belém: TV Liberal, 19 de novembro de 2009. Programa de TV. 19/11/2008 LIBERAL

KELLER, G.V. **Rock and mineral properties. Investigations in Geophysics,** nº 3. *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics.* Society of Exploration Geophysicists, Ed. Misac N. Nabighian, v.1, p.13-51, 1987.

MARQUES, S. G. **Metodologia Geofísica para contaminação por hidrocarbonetos – Estudo de caso em posto de combustíveis.** 2007. 113 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências. São Paulo. 2007.

NUNES, Lana Patrícia Martins ; LUIZ, J. G. **Caracterização geométrica de área de curtime localizada no Distrito Industrial de Icoaraci, Belém-Pará.** Revista Brasileira de Geofísica, v. 24, p. 467-481, 2006.

PEDROSA, T. R. M. A. M. **Caracterização de plumas contaminantes de hidrocarbonetos em postos de abastecimento em Fortaleza, usando o método eletromagnético radar de penetração do solo (GPR).** 2004. 149 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal do Ceará, Departamento de Geologia. Fortaleza. 2004.

POWERS, S. E.; et al. **The Transport and Fate of Ethanol and BTEX in Groundwater Contaminated by Gasohol.** Critical Reviews in Environmental Science and Technology, v. 31, n. 1, p. 79–123, 2001.

SALATI, E.; LEMOS, H. M., 1999. **Água e o desenvolvimento sustentável.** In: REBOUÇAS, A. C., BRAGA, B. TUNDISI, J. G. (Orgs.). As águas doces no Brasil. Escrituras. São Paulo. p. 39–64.

SANTOS, R.F., MONTENEGRO, M.A.P, LUZ, L.B., CORSEUIL, H.X. **Influência do Etanol da Biodegradação do Benzeno em Aquíferos Contaminados com Derramamentos de Gasolina.** In: 3º Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental (SIBESA), Gramado, 1996.

SAUCK, W.A. **A model for the resistivity structure of LNAPL plumes and their environs in sandy sediments.** Journal of Applied Geophysics, v. 44, p. 151-165, 2000.

SAUCK, W.A.; ATEKWANA, E.A.; NASH, M.S. **Elevated conductivities associated with an LNAPL plume imaged by integrated geophysical techniques.** Journal of Environmental and Engineering Geophysics, v. 2, p. 203-212, 1998.

SBT Pará. Belém: SBT, 5 de março de 2009. Programa de TV.

Shiklomanov, I. A. 1999. **World water resources at the beginning of the 21st century.** St. Petesburg: SHI/UNESCO. Disponível em: <<http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/shiklomanov/summary/html/summary.html>>. Acesso em: 21.03.2008.

SILVA, A. C. ; DOURADO, J. C. ; MOREIRA, C. A. . **Estudo de contaminação de águas subterrâneas em Ji-Paraná - Rondônia pelo método da eletrorresistividade.** In: 10th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, 2007, Rio de Janeiro. 10th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Rio de Janeiro : Sociedade Brasileira de Geofísica, 2007.

Jornal Liberal 1^a edição. Belém: TV Liberal, 19 de novembro de 2009. Programa de TV. 19/11/2008 LIBERAL

Lençol de água pode ter sofrido contaminação. O LIBERAL, Belém, 25 out. 2008. Atualidades, p.6.

MALAGUTTI FILHO, W. M.; MOURA, H. P. **Emprego de métodos geofísicos na caracterização geoambiental do aterro controlado de Piracicaba/SP.** In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 8. Anais eletrônicos. Rio de Janeiro: Technical Papers, SBFg, 2003. CD-ROM.

MARQUES, S. G. **Metodologia Geofísica para contaminação por hidrocarbonetos – Estudo de caso em posto de combustíveis.** 2007. 113 f. Dissertação (Mestrado em Recursos

MARINA, S. M. **Geofísica Aplicada à Arqueologia: Investigação no Sítio Histórico Engenho Murutucu, em Belém, Pará.** 2007. 87 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Belém, 2007.

Minerais e Hidrogeologia) – Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências. São Paulo. 2007.

MARQUES, S. G. **Metodologia Geofísica para contaminação por hidrocarbonetos – Estudo de caso em posto de combustíveis.** 2007. 113 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) - Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências. São Paulo. 2007.

MATTA, M. A. S. **Fundamentos Hidrogeológicos para a Gestão Integrada dos Recursos Hídricos da Região Metropolitana de Belém/Ananindeua – Pará, Brasil.** 2002. 292 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2002.

MOREIRA, C.A. **Aplicação do método eletromagnético transiente em área contaminada sob atenuação natural.** Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro – SP, 2005. 161 f.

NUNES, C. C., CORSEUIL, X. C. **Importância do etanol na atenuação natural de águas subterrâneas impactadas por gasolina.** Rio de Janeiro, Brasil. Engenharia Sanitária e Ambiental, 12, n.3, 2007. Disponível em:

< http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522007000300005>

OLIVEIRA, E. **Contaminação de Aquíferos por Hidrocarbonetos Provenientes de Vazamentos de Tanques de Armazenamento Subterrâneo.** 1992. 112 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, São Paulo. 1992.

ORTEGA, R. A. **Localização e Delineamento de Pluma de Contaminação por Hidrocarbonetos através dos Métodos GPR e Tomografia Elétrica.** 2006. 114 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Universidade de São Paulo, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, São Paulo, 2006.

KRÜGER, M. M. **Monitoramento de áreas contaminadas por hidrocarbonetos Exemplo de uma área urbana em Curitiba-Br.** 2002. 145p. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal do Paraná. Paraná. 2002.

RIJO, L. **Notas de Aulas das disciplinas de Eletromagnetismo e de Métodos Elétricos e Eletromagnéticos.** Belém: Universidade Federal do Pará, 2009. 658 p.

(TECPAM). Tecnologia e Planejamento Ambiental. **Certificado de estanqueidade do sistema de armazenamento subterrâneo de combustível** – CESASC. Belém, 2008.

TEIXEIRA, R. M. **Postos de combustíveis - contaminação de aquíferos e solos por vazamento em tanques subterrâneos.** Disponível: <http://www.cenedcursos.com.br/postos-de-combustiveis-contaminacao-de-aquiferos.html> Acesso em 16 de agosto de 2009.

Teste vai aferir se posto de gasolina contaminou água no Parque Verde. Jornal Liberal. Belém, 7 de novembro de 2008. Atualidades. Disponível em: <<http://www.orm.com.br/oliberal/interna/default.asp?modulo=247&codigo=380912>>

TIBURTIUS, E.R.L., ZAMORA, P.P., LEAL, E.S. **Contaminação de águas por BTEX e processos utilizados na remediação de sítios contaminados.** Quim. Nova, v 27, n 3, p 441-446, 2004.

TOPP, G. C.; DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P., 1980. **Eletromagnetic determination of soil water content:** measurements in coaxial transmission lines. Water resources research, v.16, n. 3, p. 534 – 582.

LIMA, R. S. **Otimização de perfis de reflexão GPR sobre manilhas de concreto e tubulações de PVC instaladas no sítio controlado de Geofísica rasa do IAG/USP.** 2006. 130 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Universidade de São Paulo, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, São Paulo, 2006.

OLHOEFT, G. R. **Application of Ground Penetrating Radar:** in Proceedings of the 6th Int'l. Conf. on Ground Penetrating Radar, GPR'96, Sendai. 1996. 4 p.

PORSANI, J. L. **Método GPR: Aplicações em Geologia, Geotecnia, Meio Ambiente e Arqueologia** (Minicurso). In: III SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOFÍSICA - SBGF, Belém, 2008.

RIJO, L. **Notas de Aulas das disciplinas de Eletromagnetismo e de Métodos Elétricos e Eletromagnéticos.** Belém: Universidade Federal do Pará, 2009. 658 p.

UNESCO. **Ground Water. Environment and Development** - Briefs. No. 2. 1992

USSAMI, N., 2006. Diagnostico Geofísica. Publicação da Sociedade Brasileira de Geofísica, N. 3. Disponível em: < <http://www.sbgf.org.br/diagnostico2006/>> Acesso em 30/11/2008

VICKERY, A.C.; HOBBS, B.A., 1998. Contributions of surface geophysics to environmental site investigation of former oil distribution terminals. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, vol. 3, n. 3, 101-109.

ZENG, X.;MCMECHAN, G. A., 1997. **GPR characterization of buried tanks and pipes,** *Geophysics*, v.62, n.3, p.797-806