



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

GUSTAVO NOGUEIRA DIAS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ESTUDO GEOFÍSICO SOBRE A EROSÃO FLUVIAL DO RIO GUAMÁ NA ORLA DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, BELÉM (PA)

BELÉM

2011



GUSTAVO NOGUEIRA DIAS

ESTUDO GEOFÍSICO SOBRE A EROSÃO FLUVIAL DO RIO GUAMÁ NA ORLA DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, BELÉM (PA)

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

Área de Concentração: Métodos Elétricos e Eletromagnéticos.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Lúcia Maria da Costa e Silva.

BELÉM

2011

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação(CIP)  
Biblioteca Geól. Rdº Montenegro G. de Montalvão

Dias, Gustavo Nogueira

Estudo geofísico sobre a erosão fluvial do rio Guamá na orla da  
Universidade Federal do Pará, Belém (PA). – 2011  
110f. : il.

Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Programa de Pós-  
Graduação em Geofísica, Instituto de Geociências,  
Universidade Federal do Pará – Belém, 2011.

Orientadora: Lúcia Maria da Costa e Silva.

1. Erosão Fluvial. 2. Geofísica. 3. GPR. 4. SLINGRAM. 5. Ele-  
trorresistividade. 6. Potencial Espontâneo. 7. Geotecnia. 8. Orla da  
UFPA. I. Universidade Federal do Pará. II. Silva, Lúcia Maria da  
Costa e, Orient. III. Título.

CDD

GUSTAVO NOGUEIRA DIAS

ESTUDO GEOFÍSICO SOBRE A EROSÃO FLUVIAL DO RIO GUAMÁ NA ORLA DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, BELÉM (PA)

Dissertação apresentada ao programa de Pós-graduação em Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará (UFPA), em cumprimento às exigências para a obtenção do grau de Mestre em ciências.

Área de Concentração: Métodos Elétricos e Eletromagnéticos.

DATA DE APROVAÇÃO: \_\_\_/\_\_\_/ 2011

BANCA EXAMINADORA:

---

Prof<sup>a</sup>, Dr<sup>a</sup>. Lúcia Maria da Costa e Silva (Orientadora) – UFPA (PA)

---

Prof. Dr. Welitom Rodrigues Borges – UNB (DF)

---

Prof. Dr. Prof. Leonardo Augusto Lobato Bello – UNAMA (PA)

BELÉM

2011

## AGRADECIMENTOS

Quero agradecer a Deus por ter me dado saúde e inteligência o suficiente para cursar a pós-graduação em Geofísica.

À UFPA por ter me dado essa oportunidade dentre tantos alunos que disputaram essa vaga ao curso de mestrado.

À Escola Ten. Rêgo Barros por ter me liberado de todas as atividades para que pudesse me dedicar integralmente ao curso em questão.

À SEDUC, por ter me liberado de todas as atividades escolares e por ter me concedido uma bolsa de estudo para desenvolvimento do curso de mestrado.

À prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Lúcia Costa e Silva pela paciência e dedicação ao orientar este trabalho.

Aos colegas de pós-graduação Gildenilson, Alex Raiol, Catete e Jerry, pela dedicação, ajuda e suporte nos momentos de incerteza.

Ao colega de pós-graduação Diógenes, pelo ensinamento do processamento 2D e 3D do software REFLEX.

Ao colega de pós-graduação Erik, pela ajuda na coleta de dados e possíveis interpretações nos levantamentos feitos.

Ao Prof. Dr. Welitom Borges, pela utilização e manipulação do software REFLEX e suporte a interpretações.

Ao Prof. Nélio, pelos esclarecimentos na parte do método Eletrorresistividade e na operação do equipamento geofísico Imageador.

À prefeitura do Campus da UFPA, por ter colaborado em todos os momentos para a perfeita coleta de dados.

À Faculdade de Geofísica do Instituto de Geociência, por oferecer um espaço físico estruturado e toda parte operacional, sendo necessário destacar o apoio do técnico Paulo Magalhães.

Ao Laboratório de Sedimentologia, Minerais Pesados e Paliobiologia da Faculdade de Geologia do Instituto de Geociências da UFPA, destacando o apoio do técnico João Lopes Filho.

Ao Laboratório de Análise e Imagens do Tropical Úmido (LAIT), destacando o apoio do técnico Lourival Gomes da Silva Junior.

Para concluir, agradeço as pessoas mais importantes de minha vida, a minha mãe Iara Ailete Dias, por ter me dado força em todos os momentos para que conseguisse concluir o curso em questão, minha esposa Helen do Socorro Rodrigues Dias, pela compreensão nos momentos de ausência e pela colaboração na coleta de dados deste trabalho.

## RESUMO

Este trabalho apresenta estudo geofísico de parte de orla fluvial sujeita à erosão, com o objetivo primordial de avaliar o seu uso na detecção de áreas degradadas pela erosão em estágio crítico, antes de seu desmoronamento. Esta área está situada ao longo de 600 m à margem do rio Guamá, entre a ponte do rio Tucunduba e o Porto de Canoagem, dentro do *campus* da Universidade Federal do Pará (UFPA), na cidade de Belém no Estado do Pará (Brasil). Conta, em alguns trechos, com diferentes tipos de contenção de erosão, entre os quais muro de concreto e sacos de cimento. A área é conseqüentemente, um laboratório para se testar a eficiência da Geofísica em detectar as zonas em que a ação da erosão, embora ainda não observável em superfície, atue, de modo a auxiliar obras de contenção da orla antes do seu colapso. Foram utilizados quatro métodos geofísicos: Potencial Espontâneo (SP), Eletrorresistividade, Slingram (LIN) e Radar de Penetração do Solo (GPR). As medidas foram levantadas durante a maré baixa e a maré alta na tentativa de mapear os caminhos preferenciais subsuperficiais para a entrada de água trazida pela maré alta e, por esse meio, para o trabalho erosivo. O efeito global da maré é aumentar as oscilações nas medidas de SP, Eletrorresistividade e LIN e aumentar a intensidade das reflexões obtidas com o GPR em relação às medidas obtidas com maré baixa. Na maré alta, as medidas mostram, em relação às medidas obtidas na maré baixa: I) Em zona com erosão, a redução da voltagem obtida com o método SP, a diminuição da resistividade obtida com imageamento realizado com o método da Eletrorresistividade, o aumento da condutividade LIN bem como tanto o aumento da intensidade das reflexões como a perturbação da continuidade dos refletores obtidos com o Método GPR II) Em zona com contenção, o aumento da voltagem SP, o aumento da resistividade obtida com Eletrorresistividade, a diminuição da condutividade LIN e, finalmente, a atenuação de reflexões obtidas com o GPR e redução do efeito global da maré. Apesar das dificuldades, os resultados demonstram que a Geofísica pode ser uma ferramenta auxiliar na previsão de locais onde a queda erosiva do terreno provocado por ela está prestes a ocorrer bem como na análise da eficácia da obra de contenção realizada.

Palavras Chaves: Erosão Fluvial. SP. Eletrorresistividade. Slingram. LIN. GPR. Geotecnia. Orla da UFPA.

## ABSTRACT

The present work is a geophysical study of a riverbank exposed to erosion and it aims to evaluate its use for detecting areas degraded by critical erosion stage before they collapse. The studied area is situated 600m alongside Guamá River – between Tucunduba River Bridge and Canoeing Pier at Federal University of Pará. The area has different kinds of erosion contentions along its way such as cement walls and cement bags. Therefore the place is considered a laboratory to test geophysics expertise in detecting areas affected by imperceptible process so that it can act before they erode. The following four geophysical methods were used: spontaneous potential –SP; electroresistivity; Slingram – LIN and ground penetration radar – GPR. The measures were taken during both low and high tides in order to map the preferable sub-superficial paths the water runs through. In general, tides increase oscillations in SP measures, electroresistivity and LIN as well as increase the reflections intensity from GPR compared to low tide measures and during high tide, measures show compared to low tide: I) In erosion affected area there is a voltage decrease in SP, a resistivity decrease in electroresistivity, a conductive increase in LIN as well as an intensity increase of the reflections and a continuity disturbance in GPR. II) In contained areas there is an increase of the SP voltage, an increase of the resistivity from electroresistivity, a decrease of the LIN conductivity and an ease in the reflections from the GPR and a reduction of tides global effects. Despite the difficulties, the results show Geophysics can be a useful tool not only on preventing affected areas from collapsing but also on analyzing the effectiveness of previous contention works.

Key words: riverbank erosion. SP. Electroresistivity. Slingram. LIN. GPR. Geotechnique.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Área de estudo no Campus da UFPA.....	15
Figura 2.2	Imagem do Perfil AB e o contorno da orla.....	16
Figura 2.3	Representação do índice pluviométrico em Belém em 2010.....	16
Figura 2.4	Detalhe do trecho da margem Rio Guamá e UFPA.....	17
Figura 2.5	Representação da secção geológica.....	18
Figura 2.6	Resultado da análise granulométrica nível 1.....	19
Figura 2.7	Resultado da análise granulométrica nível 2.....	19
Figura 2.8	Resultado da análise granulométrica nível 3.....	19
Figura 2.9	Resultado da análise granulométrica nível 4.....	20
Figura 2.10	Resultado da análise granulométrica nível 5.....	20
Figura 2.11	Variação de maré dos fluxos de enchente e vazante.....	21
Figura 2.12	Erosão na orla do rio Guamá na UFPA.....	22
Figura 2.13	Foto mostrando o detalhe da erosão na orla da UFPA.....	23
Figura 2.14	Foto mostrando o desmoronamento da pista.....	23
Figura 2.15	Foto mostrando muro de contenção.....	24
Figura 3.1	Eletrofiltração.....	26
Figura 3.2	Configuração do Método dos Potenciais.....	27
Figura 3.3	Foto ilustrando a configuração dos eletrodos e bobina, SP.....	27
Figura 3.4	Foto mostrando eletrodo em solução e voltímetro.....	28
Figura 3.5	Gráfico do Potencial Espontâneo.....	30
Figura 3.6	Gráfico do Potencial Espontâneo Residual MB-MA.....	31
Figura 3.7	Disposição do Arranjo Dipolo- Dipolo.....	36
Figura 3.8	Localização dos perfis de Eletrorresistividade.....	37
Figura 3.9	Equipamento Utilizado no Levantamento (Imageador).....	38
Figura 3.10	Detalhe na Aquisição de Dados.....	38
Figura 3.11	Pseudo-seção – Maré Baixa 104-170NE.....	41
Figura 3.12	Pseudo-seção – Maré Alta 104-170NE.....	42
Figura 3.13	Pseudo-seção – Maré Baixa 215-253NE.....	43
Figura 3.14	Pseudo-seção – Maré Alta 215-253NE.....	44
Figura 3.15	Pseudo-seção – Maré Baixa 430-492NE.....	45
Figura 3.16	Pseudo-seção – Maré Alta 430-492NE.....	46
Figura 3.17	Pseudo-seção – Maré Baixa 554-592NE.....	47
Figura 3.18	Pseudo-seção – Maré Alta 554-592NE.....	48
Figura 4.1	Funcionamento do SLINGRAM.....	50
Figura 4.2	Dipolo Vertical (a) Dipolo Horizontal (b).....	53
Figura 4.3	Representação do EM34-3.....	54
Figura 4.4	Foto mostrando a aquisição dos dados (SLINGRAM).....	54
Figura 4.5	Gráfico do Método SLINGRAM com o ajuste de curva.....	56
Figura 4.6	Gráfico do Método SLINGRAM com o ajuste de curva, após filtragem.....	57
Figura 4.7	Princípio básico de operação do GPR e Radargrama.....	58
Figura 4.8	Arranjo (afastamento constante).....	60
Figura 4.9	Antena de 200 MHZ e a CPU de comando, usados no levantamento.....	61
Figura 4.10	Foto indicando procedimento para o cálculo da velocidade.....	61
Figura 4.11	Segmentação do perfil AB na investigação GPR 2D.....	62
Figura 4.12	Localização da investigação GPR 3D.....	63
Figura 4.13	Foto indicando a direção do levantamento PX.....	63
Figura 4.14	Foto indicando a lateral do bloco PX com as demarcações.....	64
Figura 4.15	Foto indicando a área PX vista lateralmente.....	64



Figura 4.16 Foto indicando a área PY com a direção do levantamento.....	65
Figura 4.17 Foto indicando a direção do levantamento PZ.....	65
Figura 4.18 Foto indicando rachaduras na área PX.....	66
Figura 4.19 Foto indicando rachaduras na área PX.....	66
Figura 4.20 Foto indicando rachaduras na área PY.....	67
Figura 4.21 Perfil do Cálculo da velocidade.....	68
Figura 4.22 Radargramas trecho 0 -100 NE.....	70
Figura 4.23 Radargramas trecho 100 -180 NE.....	71
Figura 4.24 Radargramas trecho 180 - 230 NE.....	72
Figura 4.25 Radargramas trecho 230 - 280 NE.....	73
Figura 4.26 Radargramas trecho 280 - 380 NE.....	74
Figura 4.27 Radargramas trecho 380 - 460 NE.....	75
Figura 4.28 Radargramas trecho 460 - 550 NE.....	76
Figura 4.29 Radargramas trecho 560 - 600 NE.....	77
Figura 4.30 Blocos diagramas, PX, PY e PZ, com profundidade 0 m.....	80
Figura 4.31 Blocos diagramas, PX, PY e PZ, com profundidade 0,25 m.....	81
Figura 4.32 Blocos diagramas, PX, PY e PZ, com profundidade 0,50 m.....	82
Figura 4.33 Figura da área PX em 3 dimensões.....	83
Figura 4.34 Figura da área PY em 3 dimensões.....	84
Figura 4.35 Figura da área PZ em 3 dimensões.....	85
Figura 4.36 Blocos diagramas, PX, PY e PZ, com profundidade 0,75 m.....	86
Figura 4.37 Blocos diagramas, PX, PY e PZ, com profundidade 1,0 m.....	87
Figura 4.38 Blocos diagramas, PX, PY e PZ, com profundidade 1,25 m.....	88
Figura 4.39 Blocos diagramas, PX, PY e PZ, com profundidade 1,5 m.....	89

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
2. ÁREA SOB ESTUDO.....	14
2. ÁREA SOB ESTUDO.....	14
2.1 Localização.....	14
2.2 Relevo.....	14
2.3 Clima.....	14
2.4 Hidrografia.....	14
2.5 Geologia.....	16
2.6 Análise Granulométrica.....	19
2.6 Influência das Marés.....	20
2.7 Erosão.....	21
2.8 Levantamentos Geofísicos Realizados.....	22
3. MÉTODOS ELÉTRICOS.....	25
3.1 Potencial Espontâneo.....	25
3.1.1 Potencial de Fluxo.....	25
3.1.2 Método dos Potenciais.....	26
3.1.3 Aquisição dos Dados.....	27
3.1.4 Interpretação.....	28
3.2 Método da Eletrorresistividade.....	32
3.2.1 Princípios de Eletrorresistividade.....	32
3.2.2 Arranjos.....	35
3.2.3 Aquisição dos Dados.....	36
3.2.4 Interpretação.....	39
4. MÉTODOS ELETROMAGNÉTICOS.....	49
4.1 Método Slingram.....	49
4.1.1 Princípios.....	49
4.1.2 Arranjos.....	53
4.1.3 Aquisição dos Dados.....	54
4.1.4 Interpretação.....	55
4.2. Método GPR.....	58
4.2.1 Princípios.....	58

4.2.2 Arranjos .....	60
4.2.3 Aquisição dos Dados .....	61
4.2.4 Processamento .....	67
4.2.5 Interpretação .....	69
4.2.5.1 Radargramas (2D) .....	69
4.2.5.2 Blocos Diagramas (3D) .....	78
5. INTEGRAÇÃO DE RESULTADOS E CONCLUSÕES .....	90
6. RECOMENDAÇÕES .....	93
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	94
ANEXO .....	98

## 1. INTRODUÇÃO

Inaugurado em 13 de agosto de 1968, o campus pioneiro da Universidade Federal do Pará (UFPA) inseriu-se dentro da filosofia adotada nas universidades brasileiras, na década de 1960, de definição de um território universitário capaz de centralizar as atividades de administração, pesquisa, ensino e extensão. No caso da UFPA, essas atividades eram, até então, realizadas em unidades isoladas, instaladas em prédios localizados em diferentes pontos de Belém (PINTO, 2007).

Tendo como um dos limites o rio Guamá, esse campus homônimo goza de uma orla de 3 km de extensão que lhe empresta uma especial beleza. Nos últimos vinte anos, contudo, a orla do Campus vem suportando um processo de erosão fluvial marcante. As tentativas de contenção do problema, como a colocação de sacos de cimento nas regiões de erosão mais acentuada, têm se mostrado frustrantes, porque apenas atenuaram o problema em parte, sendo, conseqüentemente, esperadas obras de grande porte.

A área é, conseqüentemente, um laboratório para se testar a eficiência da Geofísica em detectar as zonas em que a ação da erosão, embora ainda não observável em superfície, atue, de modo a auxiliar obras de contenção da orla antes do seu desmoronamento.

O objetivo deste trabalho é investigar a eficiência dos Métodos Elétricos do Potencial Espontâneo (SP) e da Eletrorresistividade e dos Métodos Eletromagnéticos Slingram (LIN) e Radar de Penetração do Solo (GPR) na detecção de áreas degradadas pela erosão mais suscetíveis ao seu desmoronamento da orla do Campus do Guamá da UFPA.

O método do Potencial Espontâneo (SP do inglês *Self Potential*) baseia-se na medição de uma diferença de potencial entre dois eletrodos introduzidos no terreno na ausência de qualquer campo elétrico criado artificialmente. Uma das fontes desse potencial é a movimentação de água em subsuperfície, que pode ajudar na detecção da direção e sentido do fluxo d'água do aquífero livre. Carvalho Jr.(1997) e Carvalho Jr. & Silva (1996) mostram mapa de SP revelando a direção e o sentido da água no aquífero livre no Cemitério do Bengui em Belém (PA).

O método Eletrorresistividade tem como princípio a injeção de corrente artificial no solo por meio de um par de eletrodos e a medição de uma diferença de potencial entre outro par de eletrodos. Carvalho Jr. (1997) e Carvalho Jr. & Silva, (1996) mostram que, por meio da Eletrorresistividade, detecta-se a direção e o sentido do fluxo d'água do aquífero livre, além da sua profundidade. Damasceno (2001) chega a conclusões idênticas trabalhando no Cemitério do Tapanã, em Belém (PA). Xavier (2006), por outro lado, mostra a aplicação da Eletror-

resistividade à Geotecnia, ao investigar a estabilidade de taludes em Joinville (SC) em que se destaca a detecção de planos de movimentação.

No método Slingram usam-se duas bobinas geralmente circulares, sendo uma bobina transmissora e uma bobina receptora, que são conectadas por um cabo transmissor e deslocadas em conjunto ao longo do perfil, com uma separação constante entre elas. O equipamento Slingram pode ser construído de modo a, em condições específicas, fornecer uma leitura direta da condutividade aparente, técnica conhecida como LIN (do inglês *Low Induction Number*). O LIN pode ser eficaz para a detecção de tubos hidráulicos e tubos elétricos subterrâneos colapsados ou não (GEONICS 2010). A detecção de variações laterais de condutividade pode, por outro lado, indicar zonas preferenciais ao movimento de água e, conseqüentemente, do processo de erosão.

O método Radar de Penetração do Solo (GPR do inglês *Ground Penetrating Radar*) emprega a radiação de ondas eletromagnéticas a partir de uma antena transmissora colocada próxima à superfície do terreno, as quais se propagam nos materiais da subsuperfície sofrendo reflexão, refração e difração. As ondas refletidas retornam à superfície, sendo detectadas na mesma antena transmissora ou em antena receptora colocada próximo da antena transmissora. O radar vem sendo aplicado para fins diversos, como: meio ambiente, geologia, geotecnia, arqueologia, planejamento urbano, etc. (NUNES, 2005). O radar pode ajudar na detecção de tubos hidráulicos e tubos elétricos subterrâneos presentes na orla, bem como de zonas desagregadas e propensas à erosão. Xavier (2006) apresenta resultados GPR obtidos no campo de petróleo de Fazenda Belém, Bacia Potiguar (CE), com o objetivo de entender os mecanismos de geração de colapsos do terreno associados à existência de um substrato carbonático intensamente fraturado. Augustin & Aranha (2001) estudaram na cidade de Gouvêa (MG) a detecção de dutos naturais subterrâneos (pipes) presentes no processo de erosão com o GPR, com ou sem a ocorrência de colapso do teto.

**b**

## 2. ÁREA SOB ESTUDO

### 2.1 Localização

A área sob estudo está localizada no interior do Campus do Guamá da UFPA, que ocupa 450 ha entre a Av. Augusto Correa e a Av. Perimetral no bairro do Guamá da cidade de Belém (PA), à beira do Rio Guamá, entre a ponte do rio Tucunduba e a Sede da Canoagem, distando cerca de 3 km do centro de Belém (Figura 2.1).

Os pontos de localização foram obtidos com o GPS Geodésico, modelo EGM96, e com o GPS de navegação, modelo GARMIN MAP 76CSX, apresentando para marco inicial longitude 48°27'13,04''W (783349 WE - UTM) e latitude 1°28'34,9''S (9836654 SN - UTM), próximo à ponte do Tucunduba, e para marco final longitude 48° 26'55,57''W (783890 WE - UTM) e latitude 1° 28'25,90''S (9836930 SN - UTM), próximo à Sede do Porto de Canoagem, no dia 1° de dezembro de 2011.

### 2.2 Relevo

No município de Belém, a topografia apresenta-se pouco variável e baixa, atingindo a altitude máxima de 25 m na ilha de Mosqueiro (SEPOF, 2008). O relevo das imediações da Universidade Federal do Pará apresenta um desnível topográfico muito inferior, com 9 m a montante caindo para 3 m a jusante, segundo dados de curvas de nível fornecidos pela Prefeitura do Campus da UFPA (RIBEIRO *et al.*, 1992).

### 2.3 Clima

Na cidade de Belém, o clima é quente úmido. A precipitação média anual fica em torno de 230 mm/ano, com maior frequência de chuvas no período de janeiro a junho e menor na estação seca de julho a dezembro. A temperatura média é de 26° C, com máxima de 34° C e mínima de 18° C. A umidade relativa do ar é de 85% (INMET, 2009).

A Figura 2.3 mostra a pluviosidade média nos meses de janeiro a setembro de 2010, período dos trabalhos de campo desta dissertação.

### 2.4 Hidrografia

A rede hidrográfica do município de Belém é formada por furos, baías, rios e igarapés, que drenam inclusive o centro urbano de Belém. Os elementos hídricos de maior significado para o município são as baías do Guajará, Marajó, Sol e Santo Antônio, e os rios Guamá, Ma-

guari, Murubira, Pratiquera e Aurá, além de inúmeros igarapés que deságuam nas drenagens principais formando uma drenagem bem distribuída do tipo dendrítica (MERCÊS, 1997).

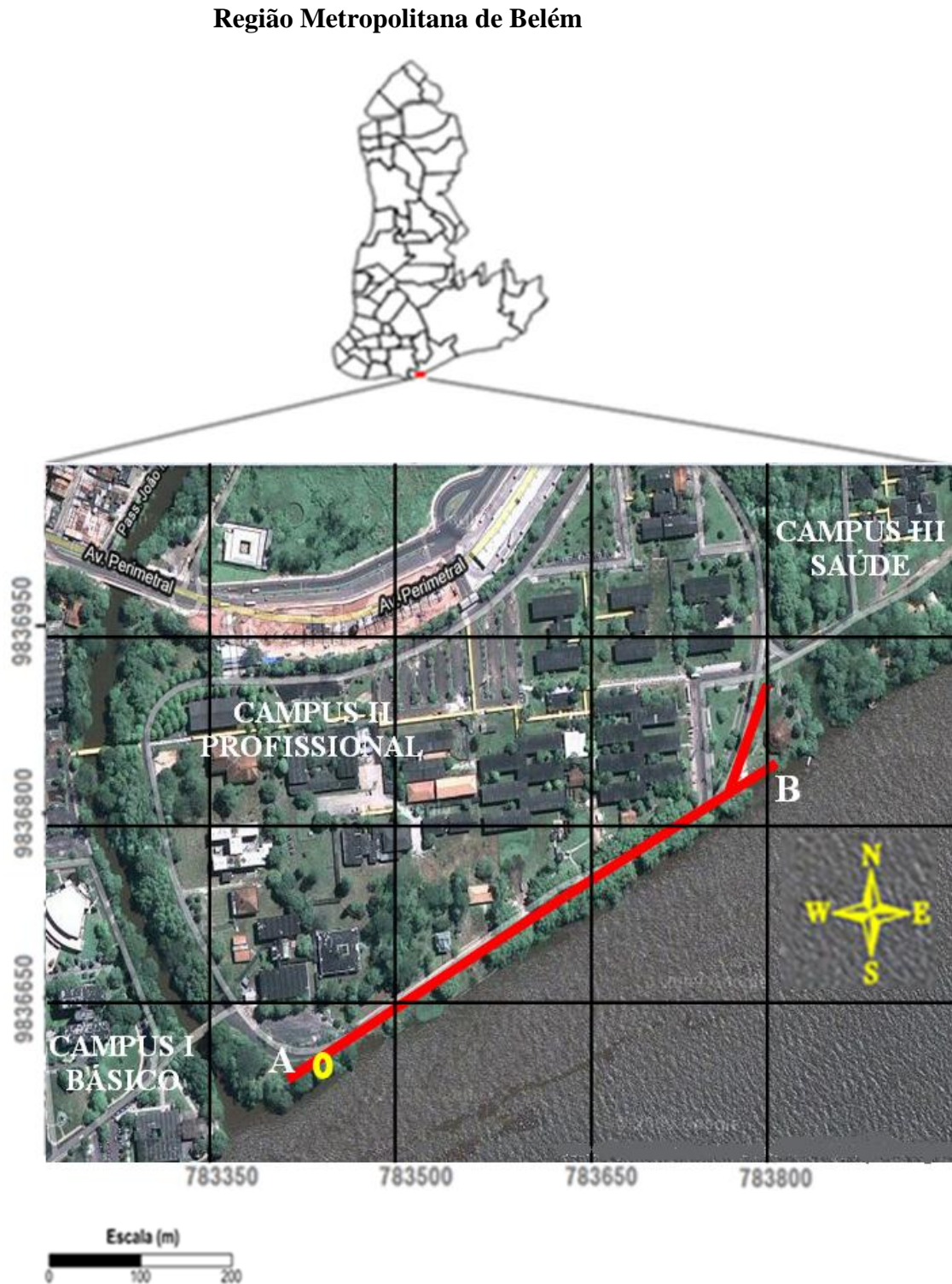


Figura 2.1 Área sob estudo no Campus da UFPa, nas imediações do perfil AB (GOOGLE, 2010). O círculo amarelo identifica local onde foi descrita seção geológica.

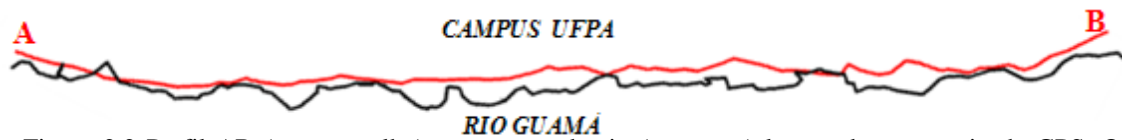


Figura 2.2 Perfil AB (em vermelho) e contorno do rio (em preto) levantados por meio de GPS. O levantamento GPS ocorreu em 1/12/2011, enquanto o trabalho de campo findou em 3/09/2010, antes do desmoronamento de alguns trechos da orla.

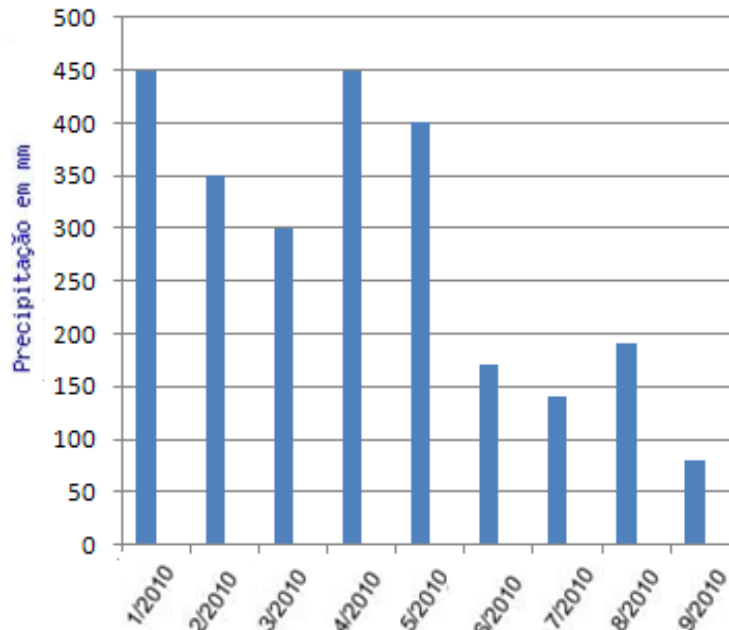


Figura 2.3 Representação do índice pluviométrico em Belém durante os trabalhos de campo em 2010 (INMET, 2010).

A Baía de Guajará, parte do estuário do rio Pará, foz do rio Amazonas, tem forma alongada e estreita, apresentando continuidade na baía de Marajó a Norte. Situa-se a Oeste da cidade de Belém e recebe as águas dos rios Pará, Acará e Guamá. Suas águas são barrentas e, no período de baixa pluviosidade na região, ficam salobras devido à influência das águas oceânicas (PINHEIRO, 1987).

A Figura 2.4 fornece informações sobre a baía do Guajará e a localização da UFPA.

## 2.5 Geologia

A cidade de Belém é coberta pela unidade Pós-Barreiras, que compreende sedimentos recentes representados por areias de granulometria fina a média, marrons, inconsolidadas, com predominância de grãos de quartzo.

As areias são intercaladas por argilas escuras, com restos vegetais, distribuídos nas orlas dos rios e igarapés; por sedimentos continentais do Grupo Barreiras, composto por arenitos ferruginosos, areias finas a médias, siltosas e argilosas e por sedimentos pertencentes à Formação Pirabas (SAUMA FILHO, 1996 e MATTA, 2002). A Formação Pirabas é constituída por calcários diversificados intercalados com arenitos calcíferos, argilas negras e folhelhos



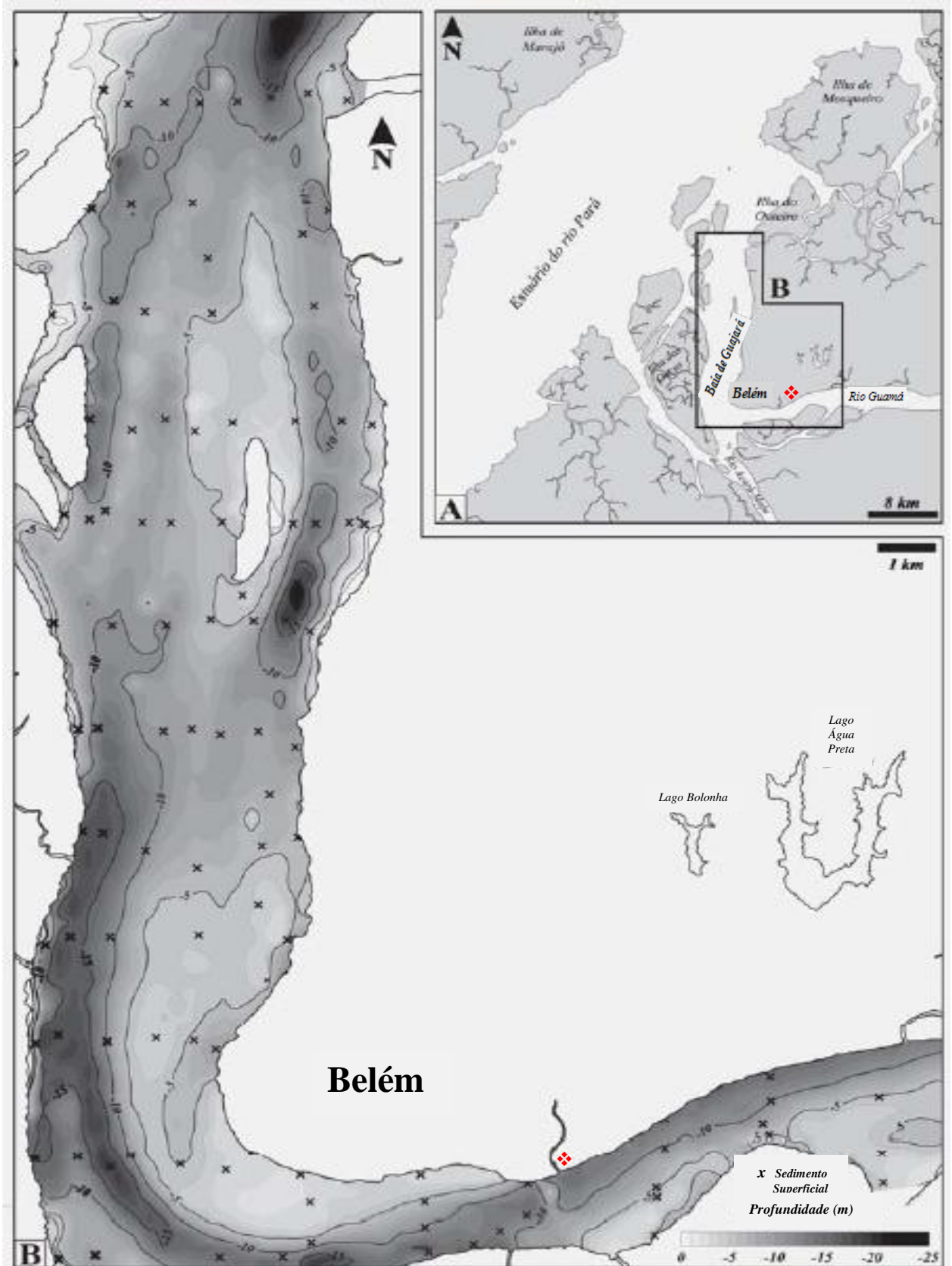


Figura 2.4 A) Trecho da margem direita do estuário do rio Pará onde se localiza a baía do Guajará. B) Trecho do Rio Guamá. ♦ Área sob estudo. A profundidade varia de acordo com a tonalidade mais escura, como indicado no canto inferior direito (GREGÓRIO e MENDES, 2009).

rítmicos. Apresenta um variado conteúdo macro e microfossífero animal e vegetais piritizados (ROSSETI *et al.*, 2001).

Pelo menos parte do campus do Guamá foi projetada nos terrenos desapropriados de Affonso Freire, Antonio Cabral e outros. Essa área abastecia de argila uma antiga olaria que funcionava em seu interior. Os buracos deixados pela retirada de argila contribuíam para o alagamento da área, tendo sido necessária a realização de um grande trabalho de aterro hidráulico. Utilizando uma draga de sucção para a retirada de areia de granulometria grossa do leito do rio Guamá, foi realizado o aterro e a compactação do solo (PINTO, 2010).

A presença de heterogeneidades da subsuperfície nessas áreas, natural ou introduzida pela ação humana de lavra de argila e posterior aterro, pode ter gerado zonas mais susceptíveis à erosão, devido à introdução de material de maior permeabilidade.

No dia 4 de fevereiro de 2010, foi realizado um furo de sondagem a trado na estação 75 NE do perfil AB (Figura 2.1) de cerca de 1,8 m de profundidade, para descrição da seção geológica. O nível hidrostático foi observado a cerca de 0,8 m de profundidade na maré baixa. A Figura 2.5 mostra a seção geológica obtida.

Profundidade (m)	Representação	Descrição
NÍVEL 1 0,18		<b>Camada de húmus</b> Rica em raízes que ajudam na sustentação.
NÍVEL 2 0,50		<b>Camada Areno-argilosa</b> Cor amarelada
NÍVEL 3 0,67		<b>Camada de Argila e Seixos</b> Cor vermelho-alaranjada contendo concreções ferruginosas
NÍVEL 4 NH 0,8 m 0,99		<b>Camada de Silte e Argila</b> Com coloração vermelho- amarelada
NÍVEL 5 ≅ 1,45		<b>Camada Argilosa</b> Com coloração cinza claro, e espessura de pelo menos 46 cm

Figura 2.5 Seção geológica para o furo na orla da UFPA. Nível hidrostático em tracejado.

## 2.6 Análise Granulométrica

As amostras do furo de sondagem foram secas em estufa e submetidas à análise granulométrica através do processo de peneiramento, seguindo o método para análise granulométrica descrito na NBR-7181/ABNT. Os resultados são apresentados nas Figuras 2.6 a 2.10, em que os diâmetros equivalentes das partículas foram lançados nas abscissas e as percentagens retidas, nas ordenadas.

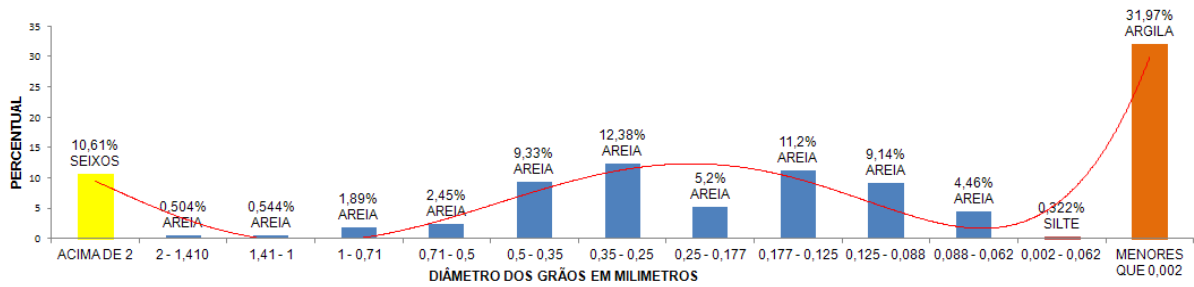


Figura 2.6 Resultado da análise granulométrica da amostra do nível 1 (0 a 18 cm) , pesando 147 gramas.

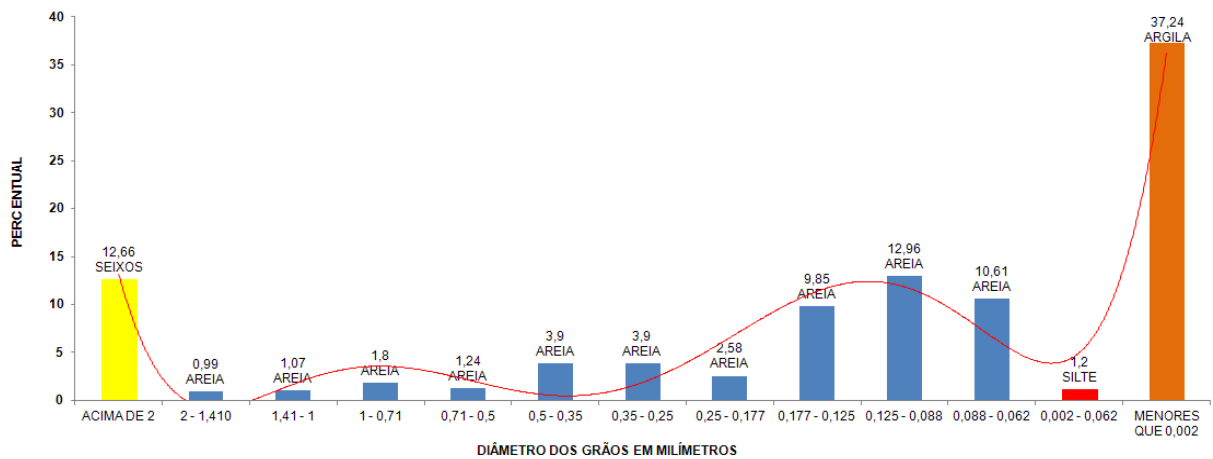


Figura 2.7 Resultado da análise granulométrica referente amostra do nível 2 (19 a 50 cm), pesando 155 gramas.

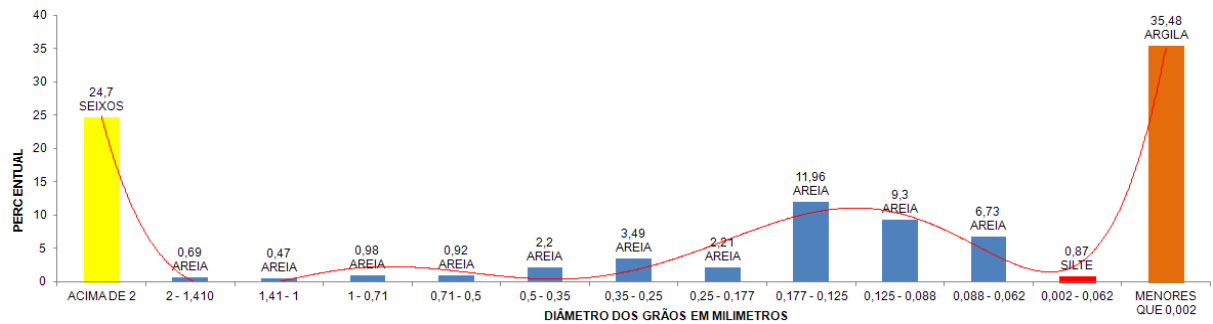


Figura 2.8 Resultado da análise granulométrica referente amostra do nível 3 (51 a 67 cm), pesando 162 gramas.

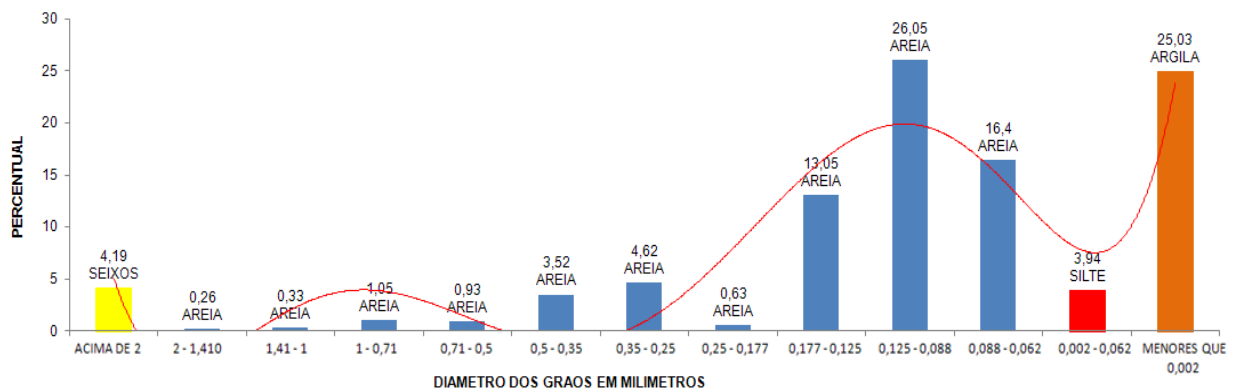


Figura 2.9 Resultado da análise granulométrica referente amostra do Nível 4 (68 a 99 cm), pesando 128 gramas.

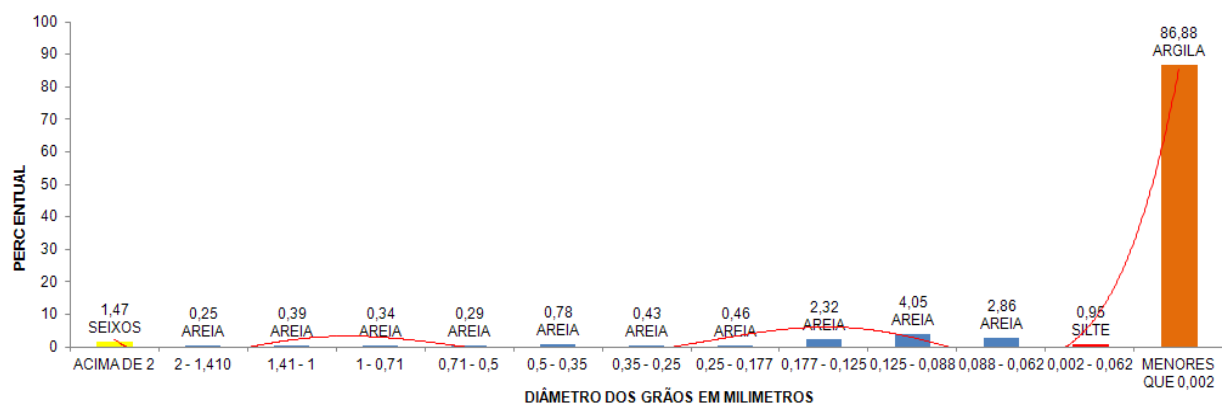


Figura 2.10 Resultado da análise granulométrica referente amostra do Nível 5 (100 a 149 cm), pesando 200 gramas.

Os gráficos mostram que o conteúdo de seixos é maior no terceiro nível e praticamente desaparece no 5º nível. O percentual em areia e silte são maiores no quarto nível. Finalmente, o percentual de argila é relativamente constante nos quatro primeiros níveis, crescendo para quase 90% no último nível.

## 2.6 Influência das Marés

A baía de Guajará apresenta um regime hidrodinâmico elevado, comprovado pelos baixos teores de argila presentes nos sedimentos de fundo. Na área de investigação, a variação da maré atinge 3,6 m em condições de sizígia (MIRANDA, 2006). Notadamente, a baixa topografia local favorece o alargamento da planície de inundação ao longo da região influenciada pela maré.

Por localizar-se em uma área de domínio fluvial sob impacto de marés, a vazante dura mais tempo que a enchente, principalmente nos períodos de sizígia (Figura 2.11), e a salinidade é muito baixa.

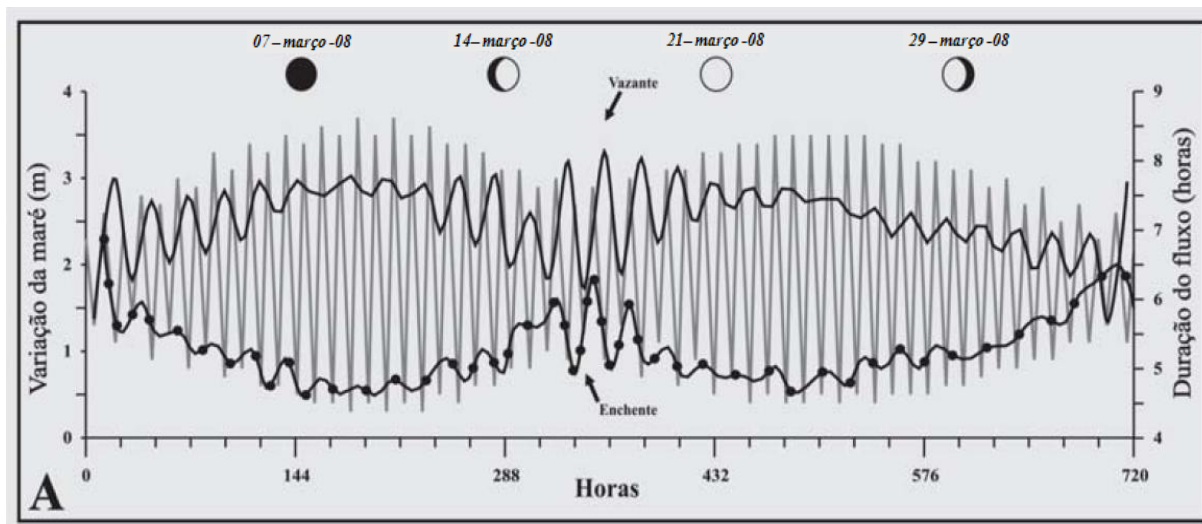


Figura 2.11 Variação da maré dos fluxos de enchente e de vazante na baía de Guajará durante 720 horas (1 a 31 de março de 2008) e as fases da lua (MARINHA DO BRASIL, 2009).

## 2.7 Erosão

Intensos processos erosivos observados na área de investigação, relacionados diretamente às correntes fluviais, causam acentuado desmoronamento da margem (SILVEIRA, 1992).

A suscetibilidade do solo em resistir aos processos erosivos, a erodibilidade, foi relacionada ao tamanho das partículas por Bovoucos em 1935, como segue:

$$k = \frac{(\text{Areia} + \text{Silte})}{\text{Argila}} 100, \quad (2.1)$$

em que  $k$  é a erodibilidade e Areia, Silte e Argila correspondem aos teores em percentagem de areia, silte e argila, respectivamente (BERTONI & LOMBARDI NETO, 1985 in MACÊDO, 2007). A relação de Bovoucos constitui uma medida do teor de material ligante das partículas, responsável pela resistência à erosão. Conseqüentemente, a erodibilidade aumenta quando os teores de areia e silte são elevados e diminui com a elevação dos teores de argila.

O resultado da análise granulométrica mostrado nas Figuras 2.6 a 2.10 foi usado para calcular o coeficiente “ $k$ ” (fator erodibilidade), reunidos na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Erodibilidade para os níveis amostrados pelo furo na orla da UFPA. Destaque em negrito do maior valor de erodibilidade encontrado para o nível 4.

ERODIBILIDADE				
NÍVEL 1	NÍVEL 2	NÍVEL 3	NÍVEL 4	NÍVEL 5
$k = \frac{57,42}{31,97} = 1,79$	$k = \frac{39,82}{35,48} = 1,12$	$k = \frac{50,1}{37,24} = 1,35$	$k = \frac{70,78}{25,03} = \mathbf{2,82}$	$k = \frac{11,65}{86,88} = 0,14$

Fazendo a comparação do fator “k” de erodibilidade, percebemos que apresenta o maior valor no nível 04, onde provavelmente ocorre a erosão.

O efeito da maré, embora ocorra mais acentuadamente na camada basal de argila, a mais sujeita à ação direta da água do rio que entra (alta mar) e que sai (baixa mar) todos os dias, é visivelmente mais acentuada no contato desta camada com a camada de cima, devido a sua maior erodibilidade em relação às demais camadas, conforme apresentado na Tabela 2.1. O topo da seção, conseqüentemente, desmorona, apesar das raízes presentes de bambuzais e gramíneas, que dão a ela maior resistência à erosão (Figuras 2.12 e 2.13).

A prefeitura do Campus testou diferentes tipos de contenção: muro de concreto (figura 2.15), sacos de concreto e malha de aço preenchidos com cascalho. Uma grande parte da mureta, a contenção mais antiga, já desabou ou está fraturada. A situação mais crítica encontra-se na área do campus profissional da UFPA, onde os desmoronamentos já alcançaram a pista asfaltada, ocasionando a interdição da área pela prefeitura do campus (Figura 2.14). Após pequena obra de contenção, que consistiu na deposição de sacos de cimento nos locais erodidos, e reasfaltamento dos trechos atingidos, a prefeitura liberou a pista em maio de 2010. Entretanto, no início de novembro de 2010, o trecho 520 a 540 NE, da linha de AB da Figura 2.1, sofreu um pequeno rebaixamento, ocasionando novamente a interdição da área.

## 2.8 Levantamentos Geofísicos Realizados

A Tabela 2.2 reúne as datas em que a área foi submetida a levantamentos geofísicos, identificando os métodos utilizados.



Figura 2.12 Foto mostrando a erosão na orla do rio Guamá no interior do Campus da UFPA.



Figura 2.13 Foto mostrando em detalhe a erosão na orla do rio Guamá na UFPA, fazendo a comparação ilustrativa com uma caneta ao centro.



Figura 2.14 Foto revelando o desmoronamento parcial da pista no trecho entre 520 a 540NE, da linha AB identificada na Figura 2.1.



Figura 2.15 Foto mostrando contenção da erosão fluvial com muro de concreto na orla do Campus da UFPA.

Tabela 2.2 - Levantamentos geofísicos realizados na orla da UFPA.

PERÍODO NO ANO DE 2010	MÉTODOS
27/Fevereiro (treinamento) 1,2,3,9,12 e 30/Março	SLINGRAM
6,7,10 e 11/Junho	SP
14 e 15/Março 8 e 16/Junho	GPR
24,25,26,27,29,30 e 31/Agosto 1,2 e 3/Setembro	ELETORRESISTIVIDADE



### 3. MÉTODOS ELÉTRICOS

Neste trabalho utilizaram-se dois Métodos Elétricos: o Método do Potencial Espontâneo (SP) e o Método da Eletrorresistividade.

#### 3.1 Potencial Espontâneo

O Método do Potencial Espontâneo envolve a medição do potencial elétrico associado a correntes elétricas naturais que fluem pela subsuperfície. O SP já era conhecido no século XIX, mas só se tornou comercial em 1913, quando Schlumberger descobriu um jazimento de sulfetos com o método (ORELLANA, 1974).

O fenômeno do SP não é só provocado por corpos metálicos como corpos de sulfetos. Também o movimento de fluidos na subsuperfície causa o fenômeno, bem como a atividade bioelétrica de materiais orgânicos, a corrosão e os gradientes térmicos, entre outros. Neste trabalho, o interesse recai na movimentação de fluidos resultantes das chuvas e, especialmente, da mudança de maré em zonas preferenciais da subsuperfície, que seriam por isso mesmo, zonas preferenciais de erosão.

##### 3.1.1 Potencial de Fluxo

O potencial gerado pela movimentação de fluidos em subsuperfície é conhecido como Potencial de Fluxo ou Eletrofiltração. A movimentação do eletrólito através de uma membrana porosa produz uma diferença de potencial entre os dois lados da mesma. Considerando a porosidade do substrato como uma rede de capilares por onde percolam as águas da superfície, então o comportamento do substrato pode ser visto como uma membrana. Os ânions são adsorvidos pelas paredes dos capilares e irão atrair os cátions, estabelecendo-se uma dupla camada elétrica. Desta maneira os cátions são movidos através dos capilares pelos fluxos ali presentes ao passo que os ânions permanecem fixos. A partir daí surge uma diferença de potencial  $\Delta V$  entre o ponto inicial e o final do percurso, que obedece a equação de Helmholtz:

$$\Delta V = \frac{\xi \varepsilon P}{\eta \sigma}, \quad (3.1)$$

em que  $\xi$  é a diferença de potencial da dupla camada,  $\varepsilon$  é a constante dielétrica da solução,  $P$  é a diferença de pressão hidrostática entre os extremos do capilar,  $\eta$  é a viscosidade da solução e  $\sigma$  é a sua condutividade (ORELLANA, 1974).

O potencial de fluxo mais importante é o *per descensum* (SCHLUMBERGER, 1975 apud ORELLANA, 1974), provocado pela infiltração d'água da chuva em terrenos permeá-

veis ou ao longo de falhas e fraturas. Os cátions são removidos pela água e, nos locais topograficamente mais elevados, surgem núcleos eletricamente negativos (Figura 3.1).

A investigação neste trabalho está voltada para o potencial de fluxo *per descensum*, mais o potencial de fluxo provocado pelo movimento das marés.

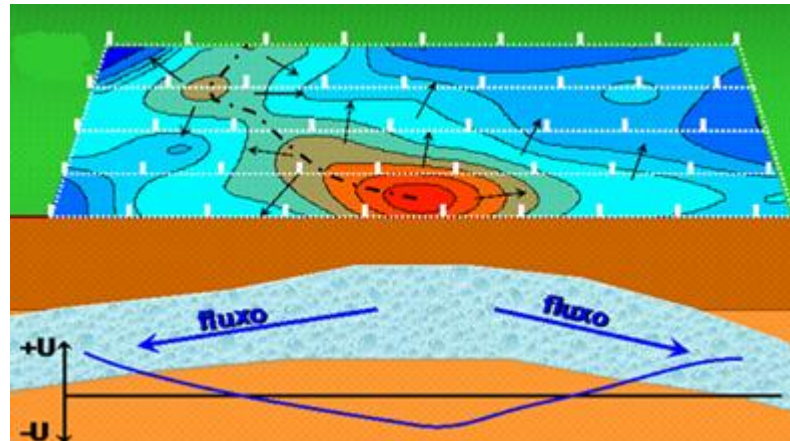


Figura 3.1 Eletrofiltração (BRAGA, 2008).

### 3.1.2 Método dos Potenciais

O método dos potenciais requer que um dos eletrodos seja mantido fixo em uma estação-base no infinito, tipicamente a de seis vezes no mínimo a distância entre dois eletrodos, enquanto o outro percorre os pontos de medidas nos perfis de levantamento (Figura 3.2). O levantamento é efetuado conectando-se um dos pólos do instrumento de medidas à base fixa, enquanto o outro pólo do instrumento é conectado ao eletrodo móvel que é deslocado. As posições N, N' e N'' referem-se às sucessivas posições do eletrodo itinerante. O deslocamento do eletrodo móvel é realizado por meio de um cabo, contido em uma bobina, que é desenrolada à medida que avança o levantamento.

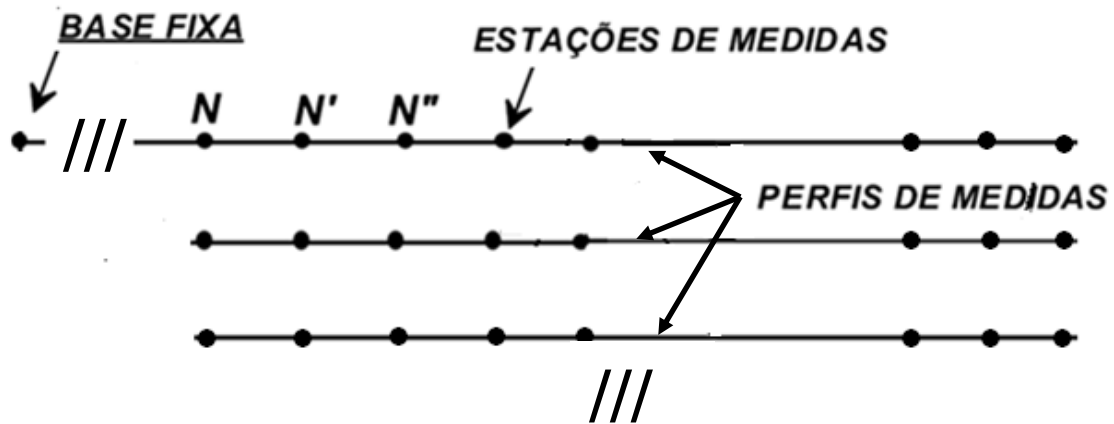


Figura 3.2 Esquema de aquisição de dados de SP através do Método dos Potenciais.

### 3.1.3 Aquisição dos Dados

O levantamento dos dados de Potencial Espontâneo foi realizado ao longo do perfil AB com 600 m (Figura 2.1), em estações espaçadas de 2 m, totalizando 212 estações. Os dados foram adquiridos nos dias 6 e 7 de junho de 2010, período de maré baixa, e nos dias 10 e 11 de junho de 2010, período de maré alta.

As estações de medidas foram preparados de modo a se ter pequenos orifícios da ordem de 5 cm de profundidade livres de grama e de raízes superficiais, feitos com draga do início da ponte do Tucunduba até 30 m antes do Porto de Canoagem (Figura 3.3). Alguns orifícios não foram feitos, pois a erosão já havia atingido o local, impedindo desta forma a instalação de estações de medida.



Figura 3.3 A - Foto ilustrando o posicionamento do eletrodo usado no levantamento, livre de raízes e grama.  
B - Bobina, contendo o cabo que acompanha o deslocamento do eletrodo pelas estações de medição.

Foram empregados eletrodos não polarizáveis de cobre em solução saturada de sulfato de cobre ( $\text{Cu-Cu}_2\text{SO}_4$ ) e um voltímetro de elevada impedância de entrada (da ordem de  $10^{14}$  ohms) construído pelo Prof. Geraldo Alves da UFPA (Figura 3.4).

As medidas foram realizadas com o método de potenciais com o eletrodo da base fixa colocado a 6 m do início da primeira estação, próxima à pista lateral, enquanto o segundo eletrodo percorreu as estações no sentido SW a NE, realizando as medidas até a estação 478 NE. Outra base fixa foi disposta a 6 m da última estação, enquanto o segundo eletrodo percorreu as estações no sentido NE a SW, realizando as medidas da estação 600 NE até a estação 470 NE. A diferença entre as bases de referência foi de 19 mV, valor usado na correção das medidas obtidas com as diferentes bases.

O levantamento terrestre foi registrado em caderneta de campo com o dia e a hora e a identificação da maré.

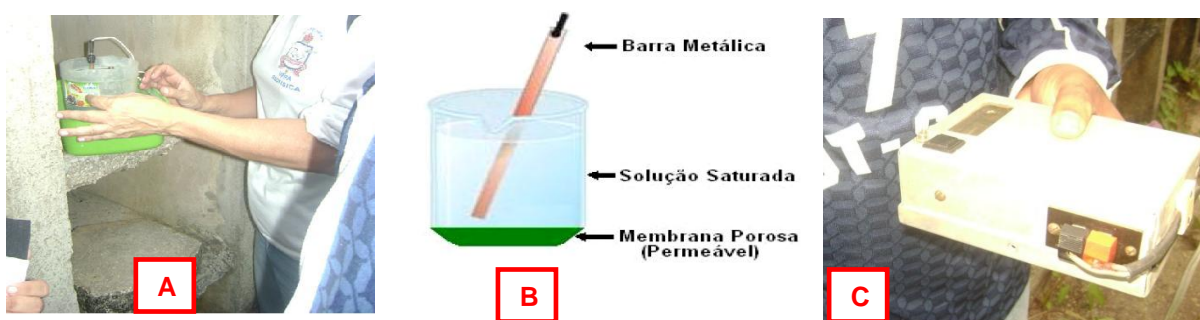


Figura 3.4 A - Foto ilustrando o eletrodo mergulhado na solução saturada de sulfato de cobre. B - Esquema ilustrativo da foto A. C - Voltímetro usado no levantamento.

### 3.1.4 Interpretação

Os dados foram submetidos às seguintes operações:

- i) correção entre as medidas adquiridas com diferentes bases;
- ii) multiplicação dos dados por -1 para que altos nos dados correspondam a posições a partir das quais a água foi para os “baixios” (inverso do observado na Figura 3.1), o que simplifica a interpretação – os dados assim tratados serão chamados de voltagem espelhada;
- iii) ajuste de polinômio de grau 6 às medidas, de forma a minimizar os ruídos de baixas e intermediárias frequências espaciais existentes nos dados e,
- iv) cálculo do resíduo entre o polinômio ajustado para os dados obtidos na maré baixa e o polinômio ajustado para os dados medidos com maré alta.

A Figura 3.5 apresenta os dados brutos e a polinomial ajustada tanto para a maré baixa como para a maré alta. Em todos os gráficos observa-se uma quantidade considerável de ruídos (oscilações bruscas dos dados pontuais ou quase pontuais) que podem ter sido provocados pela própria operação de levantamento de dados, raízes, árvores, bambuzal, postes de energia, etc.

Os gráficos mostram que as medidas de SP variam com a maré, sendo muito mais ricas em oscilações na maré alta, provavelmente porque aumenta o aporte de água disponível para o fenômeno da eletrofiltração. São as medidas do perfil maré alta que mais chamam a atenção, especialmente aquelas que, apesar de oscilações, formam um alto de voltagem espelhada que representaria o “canal” ou “canais” ao longo do qual a água fluiria perpendicularmente ao perfil bem como para suas laterais. A seguir são destacadas algumas zonas do perfil SP mostrado na Figura 3.5 que mostram o padrão geral de anomalia SP gerada por potencial de fluxo (altos valores ladeados por baixos valores de voltagem espelhada).

Zona 1: As medidas em maré alta possuem muitas oscilações, mas formam um alto de voltagem espelhada ladeado por baixos em relação às medidas obtidas em maré baixa, sugerindo que a zona funcione parcialmente como um “canal”. De fato, a erosão assume um valor máximo entre 110 e 145NE, com sacos de cimento mostrados na Foto E do anexo, entre 117 e 124NE, onde ocorre uma baixa voltagem espelhada, que poderia ser indicativa do bloqueio formado pela contenção. Por outro lado, por volta de 60NE, onde ocorre um mínimo de voltagem, a erosão aproxima-se do perfil como mostra a Foto B do anexo; em dezembro de 2011, o levantamento GPS detectou o desmoronamento do local. As observações, portanto, sugerem que as zonas mais susceptíveis à erosão caracterizam-se por intensa oscilação das medidas, valores elevados e, ocasionalmente, por valores baixos, estes últimos, com frequência, relacionados a zonas com contenção. Na zona 1, por exemplo, a porção a SW de 110NE pode estar prestes ao desmoronamento.

Zona 2: Ocorre um alto de voltagens espelhadas em maré alta, coincidindo aproximadamente com a fossa, ilustrada pela foto (J) do anexo.

Zona 3: As medidas em maré alta formam valores altos de potencial espelhado em relação às medidas obtidas em maré baixa. Uma zona de prováveis ruídos culturais secciona ao meio esta zona de valores elevados espelhados. Uma diferença desta zona em relação à zona 1 é a

menor incidência de oscilações nas medidas, o que pode estar relacionado à presença de vegetação e, ainda, à distância maior do perfil à orla.

Zona 4: Neste trecho ocorrem elevações da voltagem em maré alta, guardando certa analogia com a zona 1. Aqui, também, o perfil encontra-se mais próximo à orla. Na zona existe fossa (T), mas destaca-se que ela ocorre após o término de zona de contenção.

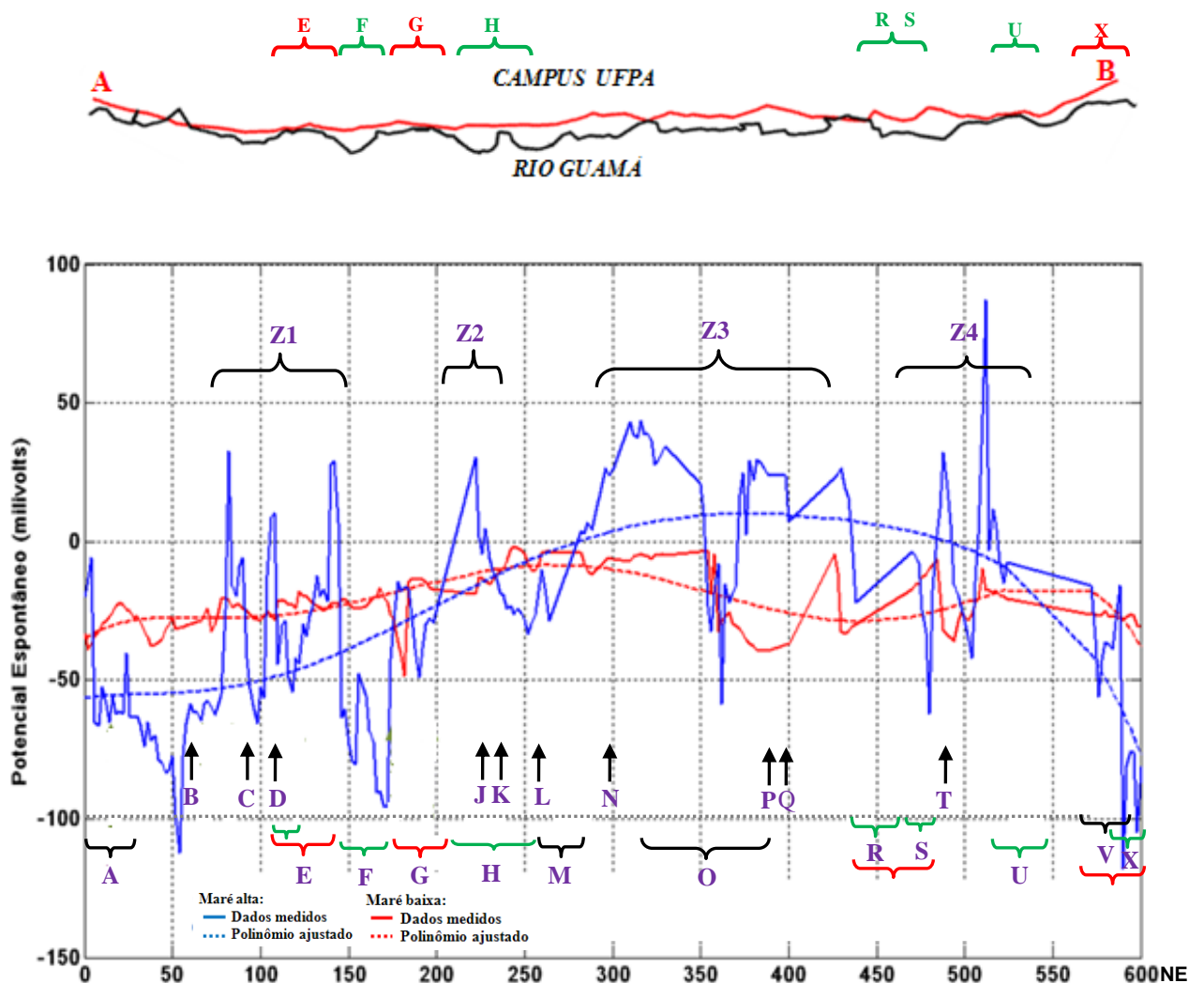


Figura 3.5 Potencial Espontâneo nas marés: alta (linha azul) e baixa (linha vermelha). Polinômiais ajustadas em tracejado (grau 6). As letras A, B, C,... mostram a localização das fotos no anexo. Abaixo – Chave verde: contenção; chave vermelha: erosão e chave preta: informações diversas (vide foto correspondente no anexo). Acima: Chaves pretas mostrando as zonas destacadas na interpretação (Z1, Z2, Z3 e Z4). Acima: linha AB (em vermelho) e contorno do rio (em preto).

A comparação entre os dados obtidos para as duas marés, Figura 3.5, mostra o que segue.

- i) De 0 até cerca de 250NE, as duas curvas polinomiais mostram a mesma tendência indicativa do fluxo da água subterrânea caminhar no sentido SW.
- ii) Entre aproximadamente 250 a 525NE, as curvas polinomiais têm comportamento diferente. Esse trecho é o mais afetado pela erosão, de modo que o aumento do SP obtido em maré alta deve ser reflexo da saturação em água, principalmente no trecho erodido entre 400 a 500NE. Esse “canal” principal permitiria o movimento da água na direção SE-NW e, secundariamente, tanto para SW como para NE.
- iii) De 525 a 600NE, as curvas passam a ter o mesmo sentido, indicando fluxo de água na direção NE.

No gráfico residual de SP mostrado na Figura 3.6, o maior crescimento da voltagem espelhada em maré alta ocorre entre 250 a 550NE. É esse trecho que funcionaria como canal principal da erosão e de onde migraria, também, água para suas laterais.

O uso de filtros que permitissem passar a frequências intermediárias permitiria, talvez, ver os demais possíveis canais (zona 1, por exemplo).

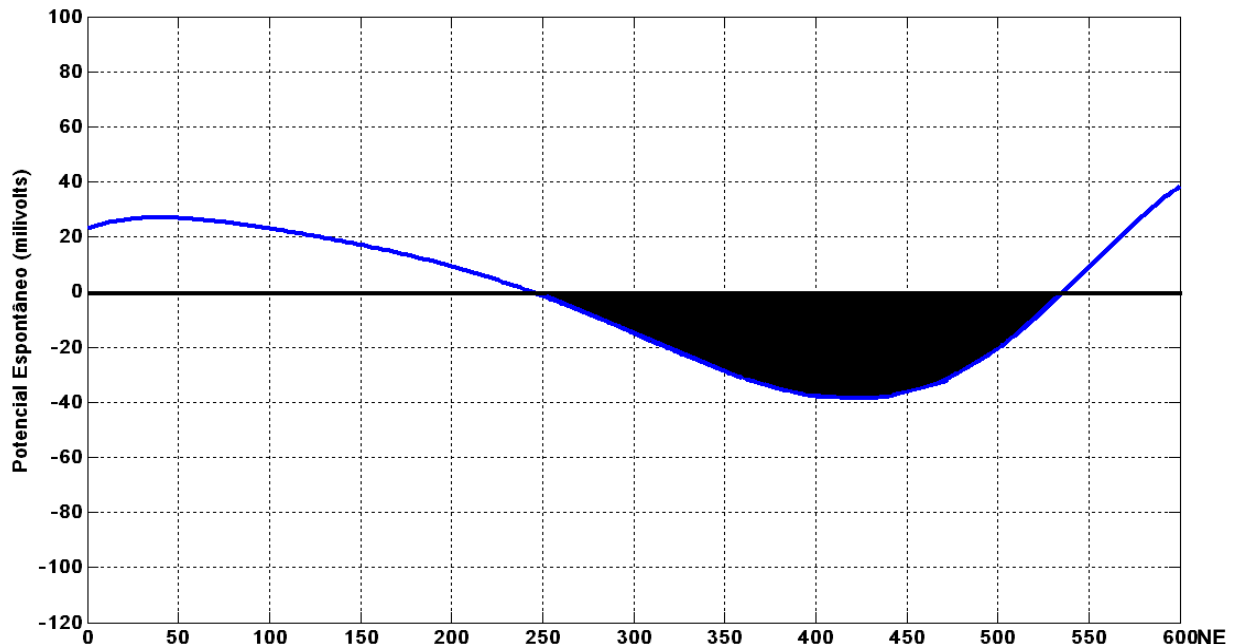


Figura 3.6 Resíduo entre as polinomiais ajustadas aos dados de maré baixa – maré alta.

### 3.2 Método da Eletrorresistividade

#### 3.2.1 Princípios de Eletrorresistividade

O método da Eletrorresistividade consiste na aplicação de uma corrente elétrica através de contatos diretos com o solo (eletrodos metálicos). A corrente trafega pelos diferentes estratos e materiais enterrados, gerando uma diferença de potenciais, que pode ser detectado por outro par de eletrodos inserido no terreno, fornecendo os valores de resistividade do subsolo (ORELLANA, 1974).

Considere uma única fonte de corrente colocada na superfície de um terreno homogêneo e isotrópico de resistividade  $\rho$ . A corrente elétrica se distribui uniformemente em todas as direções, desenvolvendo linhas de potencial semi-esféricas.

Abaixo da superfície não existem outras fontes ou sumidouros de correntes, sendo assim decorre que a equação da continuidade para a corrente é igual a zero, ou seja:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0, \quad (3.2)$$

em que  $\nabla$  é o vetor divergente,  $\mathbf{J}$  é a densidade de corrente e a razão  $\partial \rho / \partial t$  equivale à taxa de variação da densidade volumétrica de cargas com o tempo. A substituição da equação 3.2 na equação da Lei de Ohm,

$$\vec{\mathbf{J}} = \sigma \vec{\mathbf{E}}, \quad (3.3)$$

permite escrever:

$$\Delta \cdot \vec{\mathbf{E}} = 0. \quad (3.4)$$

Como 
$$\vec{\mathbf{E}} = -\nabla \vec{V}, \quad (3.5)$$

a equação 3.4 converte-se na Equação de Laplace:

$$\nabla^2 V = 0, \quad (3.6)$$

em que  $V$  é o potencial associado à corrente injetada.

A equação de Laplace (3.6) no sistema em coordenadas esféricas é dada por:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} r^2 \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \sin \theta \frac{\partial V}{\partial \theta} + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 V}{\partial \varphi^2} = 0, \quad (3.7)$$



sendo  $r$  o raio,  $\theta$  a longitude e  $\varphi$  a colatitude.

Como existe uma única fonte de corrente e o meio é homogêneo e isotrópico, o potencial não varia com os ângulos  $\theta$  e  $\varphi$ , a equação 3.6 assume a forma:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial V}{\partial r} \right) = 0, \quad (3.8)$$

cuja solução é dada por:

$$V = -\frac{C}{r} + D, \quad (3.9)$$

em que  $C$  e  $D$  são as constantes de integração que devem ser determinadas de acordo com as condições de contorno do problema.

O potencial deve diminuir em função da distância à fonte de corrente e ser nula nos pontos muito afastados, o que torna  $D$  nulo. A constante  $C$  pode ser determinada a partir da densidade de corrente  $J$ , definida como a razão entre a corrente  $i$  que foi injetada e a área que ela atravessa, que é a superfície de uma semi-esfera  $2\pi r^2$ :

$$J = \frac{i}{2\pi r^2}, \quad (3.10)$$

Substituindo-se o valor de  $J$  dado pela equação (3.3) e, ainda, considerando-se a identidade (3.5), obtém-se:

$$i = -2\pi r^2 \sigma \nabla V, \quad (3.11)$$

O gradiente do potencial  $\nabla V$  pode ser obtido derivando-se a equação (3.9) em relação a  $r$ . Assim, a equação (3.11) converte-se em:

$$i = -2\pi r \sigma C \quad (3.12)$$

Substituindo-se a condutividade  $\sigma$  pelo seu inverso, a resistividade  $\rho$ , e isolando-se a constante, chega-se a:

$$C = -\frac{\rho i}{2\pi}. \quad (3.13)$$

A substituição de  $C$  na equação (3.9), considerando-se  $D$  nulo, fornece:

$$V = \frac{\rho i}{2\pi r} , \quad (3.14)$$

Como no método da Eletrorresistividade, a corrente é injetada em dois pontos por meio de eletrodos A e B, enquanto o potencial é medido entre dois pontos, por meio de outro par de eletrodos, conhecidos como M e N. A diferença de voltagem  $\Delta V$  entre M e N é dada então por:

$$\Delta V = \rho IK , \quad (3.15)$$

sendo o fator K obtido por meio de:

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} + \frac{1}{BM}} , \quad (3.16)$$

com AM, AN, BN, e BM como as distâncias entre os eletrodos de corrente e de potencial.

Isolando-se  $\rho$ , pode-se calcular a resistividade da subsuperfície sendo conhecidos os valores da corrente injetada e a distância r entre os eletrodos:

$$\rho = \frac{\Delta VK}{i} . \quad (3.17)$$

Entretanto, a subsuperfície, normalmente, é um meio heterogêneo. A resistividade medida, portanto, não será mais a mesma de uma rocha ou camada, mas a resistividade que o meio teria se fosse homogêneo, sendo devido a isto chamada de resistividade aparente  $\rho_a$  :

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} . K . \quad (3.18)$$

Os fatores fundamentais que influenciam na alteração da resistividade elétrica dos materiais são: quantidade de água presente nos poros dos sedimentos, sólidos totais nela dissolvidos, porosidade, temperatura e a litologia (ORELLANA, 1974). A tabela 3.2 mostra valores de resistividade para alguns tipos litológicos.

Tabela 3.2 Valores de resistividade de alguns tipos litológicos (BRAGA, 1997)

<b>TIPO LITOLÓGICO</b>	<b>RESISTIVIDADE (ohm.m)</b>
Argiloso	$\leq 20$
Argilo-Arenoso	20 a 40
Areno-Argiloso	40 a 60
Siltito Argiloso	10 a 60
Siltito Arenoso	10 a 60
Arenoso	$\geq 60$
Argilito	10 a 20
Arenito	80 a 200
Basalto/Diabásio	200 a 500
Calcário	500 a 1000
Granito/Gnaisse	3000 a 5000

### 3.2.2 Arranjos

Os dados de campo de Eletorresistividade podem ser obtidos por meio de: caminhada elétrica (investigação lateral), sondagem elétrica (investigação vertical) e imageamento (investigação lateral e vertical) (Tabela 3.3). A disposição dos eletrodos, por sua vez, pode ser: Wenner, Schlumberger, dipolo-dipolo e outras.

Neste trabalho foi utilizado o arranjo dipolo-dipolo. Esse arranjo tem a vantagem de ser um arranjo simétrico de boa discriminação lateral.

Com este arranjo, os eletrodos são colocados em linha de modo que o espaçamento  $x$  entre os dipolos de corrente  $AB$  é igual ao espaçamento entre o dipolo  $MN$  onde se lê a voltagem e o espaçamento entre  $BM$  é igual a  $nx$ , sendo “ $n$ ” níveis de investigação (Figura 3.7).

À proporção que  $MN$  se separa do dipolo  $AB$ , o potencial diminui sensivelmente, tornando difícil de obter as leituras com exatidão.

Tabela 3.3 Tipos de Arranjos

ARRANJOS	OBJETIVOS
<b>Caminhamento Elétrico</b>	Investigar as variações laterais de resistividade
<b>Sondagem Elétrica Vertical (SEV)</b>	Investigar as variações em profundidade de resistividade
<b>Imageamento</b>	Conciliação das duas técnicas anteriores, com o objetivo de investigar as variações laterais e em profundidade de resistividade.

### 3.2.3 Aquisição dos Dados

O levantamento dos dados de Eletrorresistividade foi realizado ao longo de 4 trechos de 38 m do perfil AB de 600 m de extensão (Figura 3.8), no período de 24 de agosto de 2010 a 3 de setembro de 2010, em maré baixa e alta, respectivamente. A coleta de dados foi realizada nas regiões mais erodidas e em regiões não afetadas pela erosão para posterior comparação.

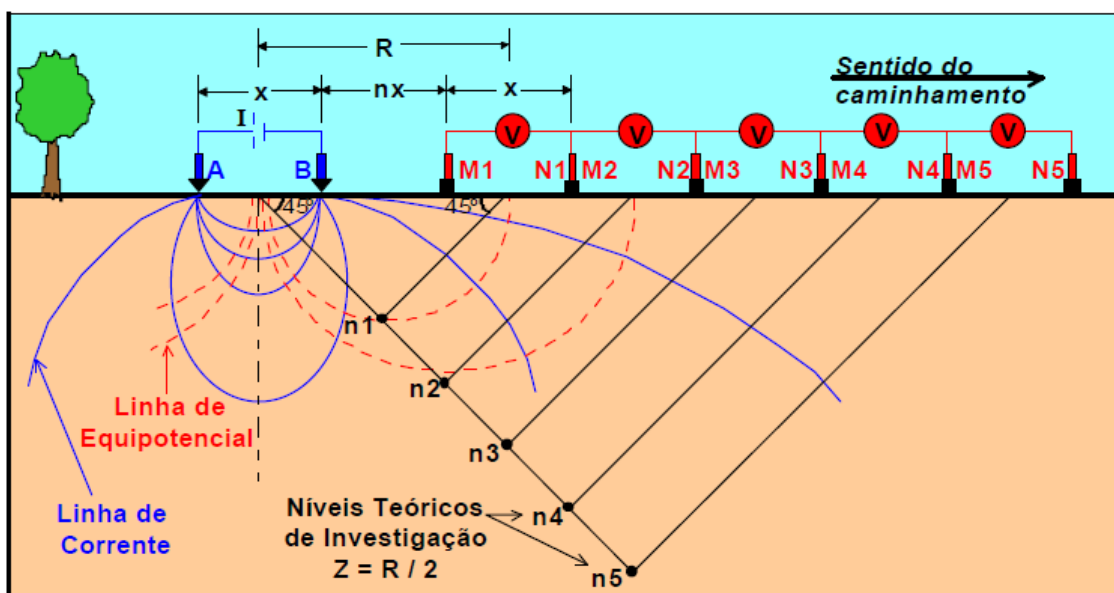


Figura 3.7 Esquema de configuração para arranjo dipolo-dipolo (BRAGA, 2007).

O levantamento foi realizado com um imageador modelo IRPI-1000, fabricado pela Geotest de 1KW e 20 eletrodos (Figuras 3.9 e 3.10)

Foram utilizados 20 eletrodos de cobre espaçados de 2 em 2 m dispostos segundo o arranjo dipolo-dipolo (Figura 3.5), imageando até 4 níveis, já que a profundidade de interesse é rasa.

Como o equipamento foi desenvolvido com apenas 20 eletrodos e o espaçamento utilizado foi o de 2 m, foi usada a técnica de *roll-along*, em que são feitas medidas com os 20 eletrodos, depois deslocado o arranjo de modo que as cinco primeiras estações de medidas coincidam com as cinco últimas estações, a fim de complementar as medidas para os 4 níveis investigados. Como foi utilizada a técnica no campo, apenas um ponto no quarto nível não foi medido, tendo seu valor sido interpolado.

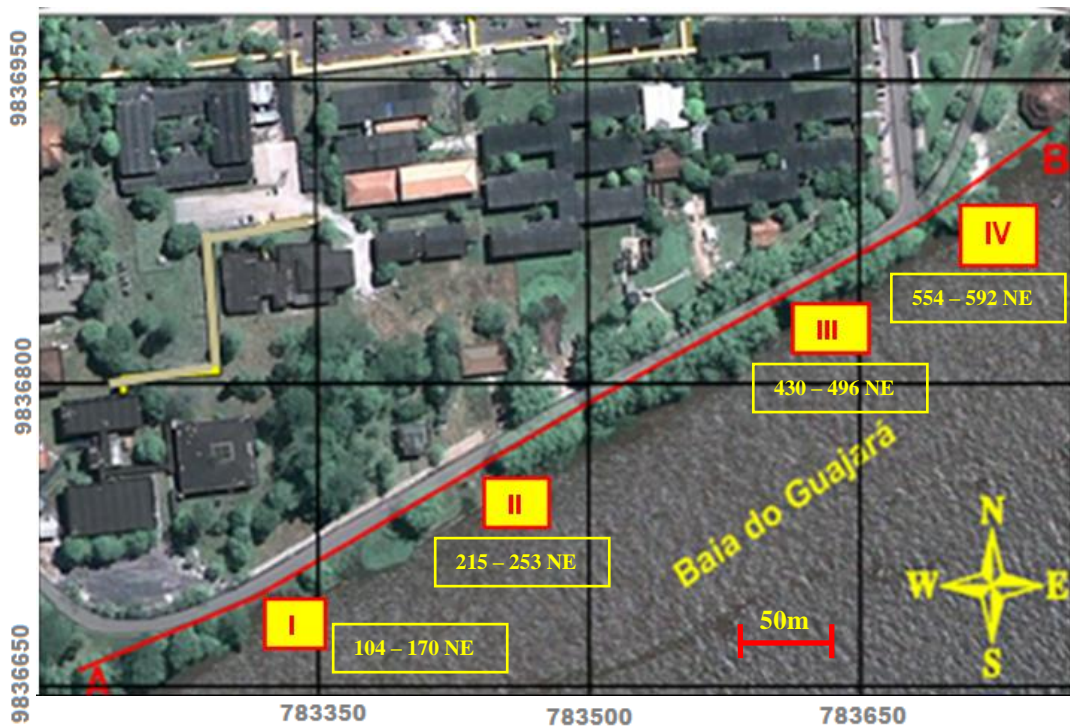


Figura 3.8 Centros dos quatro levantamentos de Eletrorresistividade.



Figura 3.9 Equipamento usado no levantamento de Eletroresistividade, Imageador IRPI – 1000 da GEOTEST.



Figura 3.10 Aquisição de dados de Eletroresistividade, com o equipamento da Geotest dentro do campus da UFPA.

### 3.2.4 Interpretação

Os dados foram interpretados por meio do software RES2DINV, fabricado pela Geotomo Software, que utiliza a inversão com o vínculo da suavidade entre a resistividade do meio. (GEOTOMO 2007).

Os valores de resistividade aparente medidas no campo e aqueles que seriam medidos com o modelo de subsuperfície obtido a partir da inversão foram reunidos sob a forma de pseudo-seções, em que as distâncias ao longo do perfil estão representadas no eixo x e a pseudo-profundidade, no eixo y, e os isovalores aparecem contornados. A escala para os contornos é a mesma para todas as pseudo-seções, para facilitar a comparação entre elas. Uma medida do ajuste entre dados medidos e dados calculados é fornecida pelo desvio padrão médio (RMS), calculado pelo programa. O modelo de seção de resistividade obtido com a inversão, por sua vez, é apresentado após as pseudo-seções. As figuras 3.9 a 3.16 mostram para cada trecho levantado do perfil as pseudo-seções de  $\rho_a$  medida e calculada e o modelo calculado.

O ajuste entre as medidas de campo e as medidas que foram obtidas com o modelo físico resultante da inversão é, contudo, em todos os casos pequeno, resultado do terreno não poder ser considerado com a distribuição de resistividade descrita pelo vínculo da suavidade. Consequentemente, a validade da interpretação aqui realizada é pequena.

**TRECHO 104-170NE** – Os resultados para o trecho de 66 m entre 104 e 170NE do perfil são apresentados nas figuras 3.11 e 3.12 para as marés baixa e alta. O trecho, representado pelas fotos E e F do anexo, atravessa zona erodida entre 110 e 145NE com contenção entre 117 e 124 NE e zona com acentuada redução da erosão entre 150 e 170NE.

Em maré baixa, a região em que a erosão foi contida com sacos de cimento, por volta de 120NE, mostra-se altamente resistiva. A corrente iônica em subsuperfície é bloqueada pelo cimento. Em maré alta, há um pequeno decréscimo da resistividade, pois a saturação do material aumenta, já que entre os sacos de cimento há pequenos espaços que ficam totalmente preenchidos no período de maré alta.

Aos 112NE ocorre uma zona condutiva onde existe uma manilha de concreto de água transversal à pista, foto D do anexo. Não há variação da condutividade com a mudança de maré.

As demais zonas condutivas, a NE, podem indicar caminhos da erosão, já que sofrem influência da maré, tornando-se maiores e mais condutivas na maré alta.

**TRECHO 215-253NE** – Os resultados para 38 m de investigação, compreendidos entre 215 a 253NE são mostrados nas figuras 3.13 e 3.14 para as marés baixa e alta, respectivamente.

Por volta de 233NE, a seção obtida em maré alta permite detectar uma fossa de concreto, mostrada na foto J do anexo, talvez porque, em maré alta, a fossa esteja mais cheia de água, e, portanto, mais condutiva.

De um modo geral há uma redução da resistividade em maré alta pela saturação do terreno, que é pouco afetado pela erosão, em parte porque já conta com obras de contenção.

**TRECHO 430-496NE** – Os resultados para o trecho entre 430 e 496NE, totalizando 66 m, são mostrados nas figuras 3.15 e 3.16, respectivamente para marés baixa e alta. Entre 462 e 496NE, cinco medidas para os 3º e 4º níveis de investigação foram interpoladas.

O trecho é caracterizado pela presença de contenção de 446 a 460NE, por meio de sacos de cimento, e entre 460 e 490NE, por meio de concreto (fotos R e S do anexo).

A contenção gera elevada resistividade na seção obtida para a maré alta em relação àquela obtida para a maré baixa. Chama a atenção que, abaixo de cerca de 1 m de profundidade, desenvolve-se uma região condutiva, sugestiva da presença de água, em especial abaixo da contenção com sacos de cimento.

As estações de 466 a 496 em maré alta apresentaram alta resistividade de contato no momento do levantamento, sendo preciso colocar água para continuar as medições.

**TRECHO 554-592NE** – Os resultados para o trecho 554-592NE, totalizando 38 m são mostrados nas figuras 3.17 e 3.18, respectivamente para maré baixa e alta.

O terreno aparenta uma relativa estabilidade, devido à presença de restos de piso de pretérita construção de SW até cerca de 570NE. De 570 a 590NE há um aumento considerável da condutividade principalmente em maré alta, nas porções mais superficiais do terreno, sugerindo infiltração da maré alta, conforme pode ser observado nas fotos V e X do anexo, embora o perfil esteja relativamente distante da orla. Isso sugere que o método da Eletrorresistividade apresenta-se bastante sensível à penetração da água, indicativa de erosão.



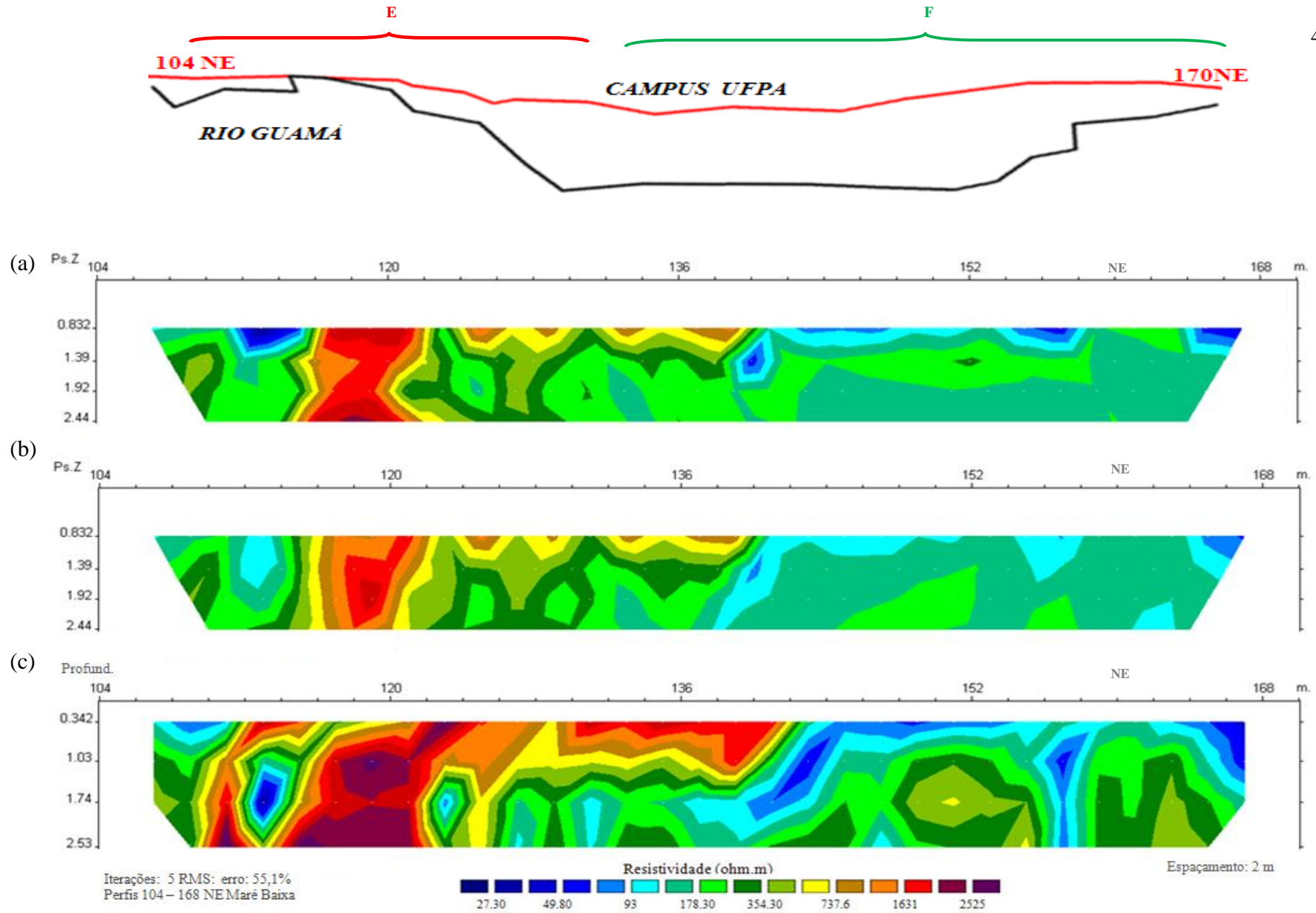


Figura 3.11 Trecho 104-170 NE. Maré baixa. Pseudo-seção: Resistividade aparente (a) medida, e (b) calculada. (c) Modelo de resistividade obtida com a inversão. Figura acima, fazendo a correlação do contorno do rio, em cor preta e a linha de investigação 104NE a 170NE, em cor vermelha, contida no perfil AB da figura 2.1, com o perfil de eletrorresistividade. Chave vermelha – erosão, chave verde – contenção.

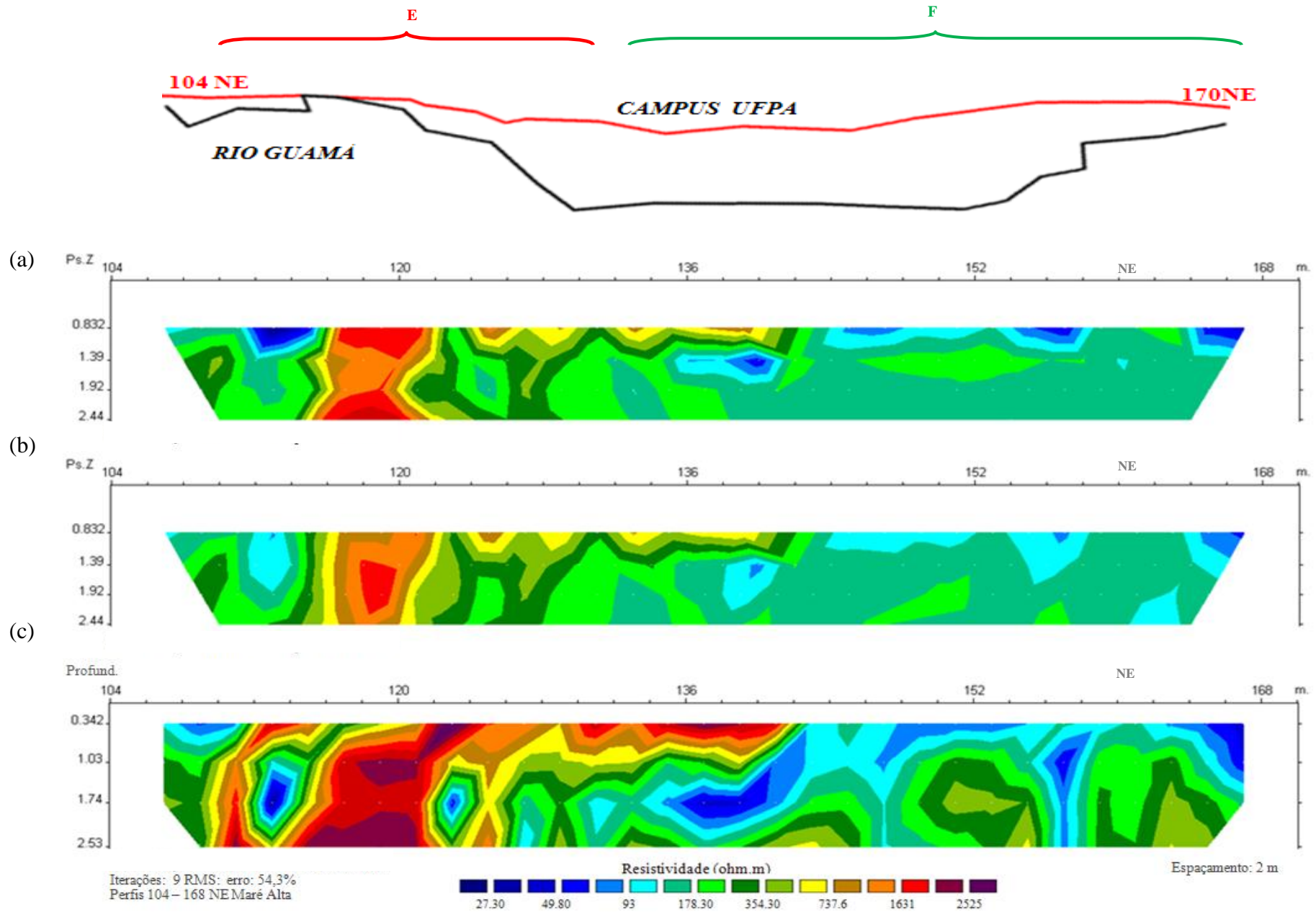


Figura 3.12 Trecho 104-170 NE. Maré alta. Pseudo-seção: Resistividade aparente (a) medida, e (b) calculada. (c) Modelo de resistividade obtida com a inversão. Figura acima, fazendo a correlação do contorno do rio, em cor preta e a linha de investigação 104NE a 168NE, em cor vermelha, contida no perfil AB da figura 2.1, com o perfil de eletrorresistividade. Chave vermelha – erosão, chave verde – contenção.

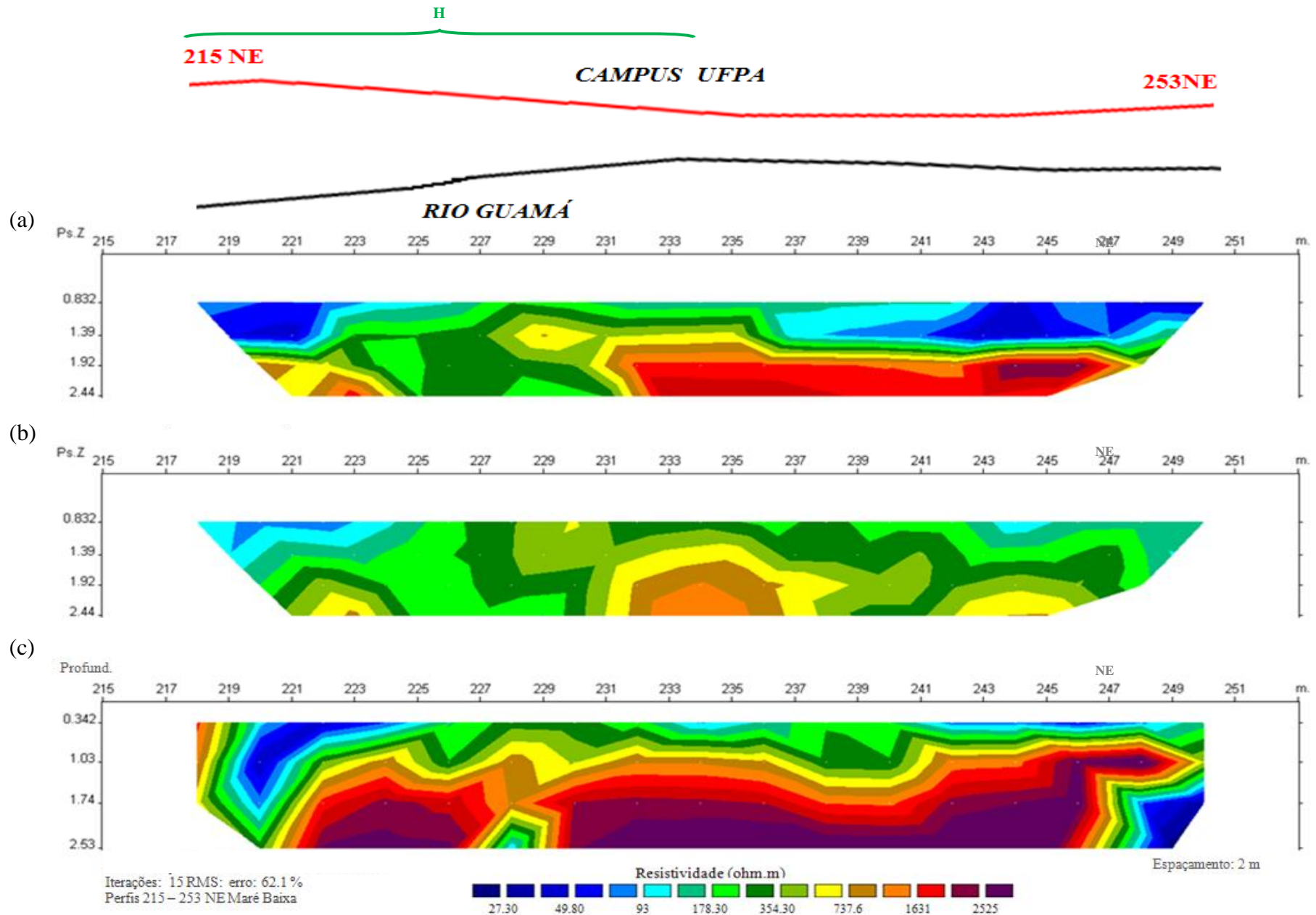


Figura 3.13 Trecho 215-253 NE. Maré baixa. Pseudo-seção: Resistividade aparente (a) medida, e (b) calculada. (c) Modelo de resistividade obtida com a inversão. Figura acima, fazendo a correlação do contorno do rio, cor preta e a linha de investigação 215NE a 253NE, em cor vermelha, contida no perfil AB da figura 2.1, com o perfil de eletrorresistividade. Chave vermelha – erosão, chave verde – contenção.

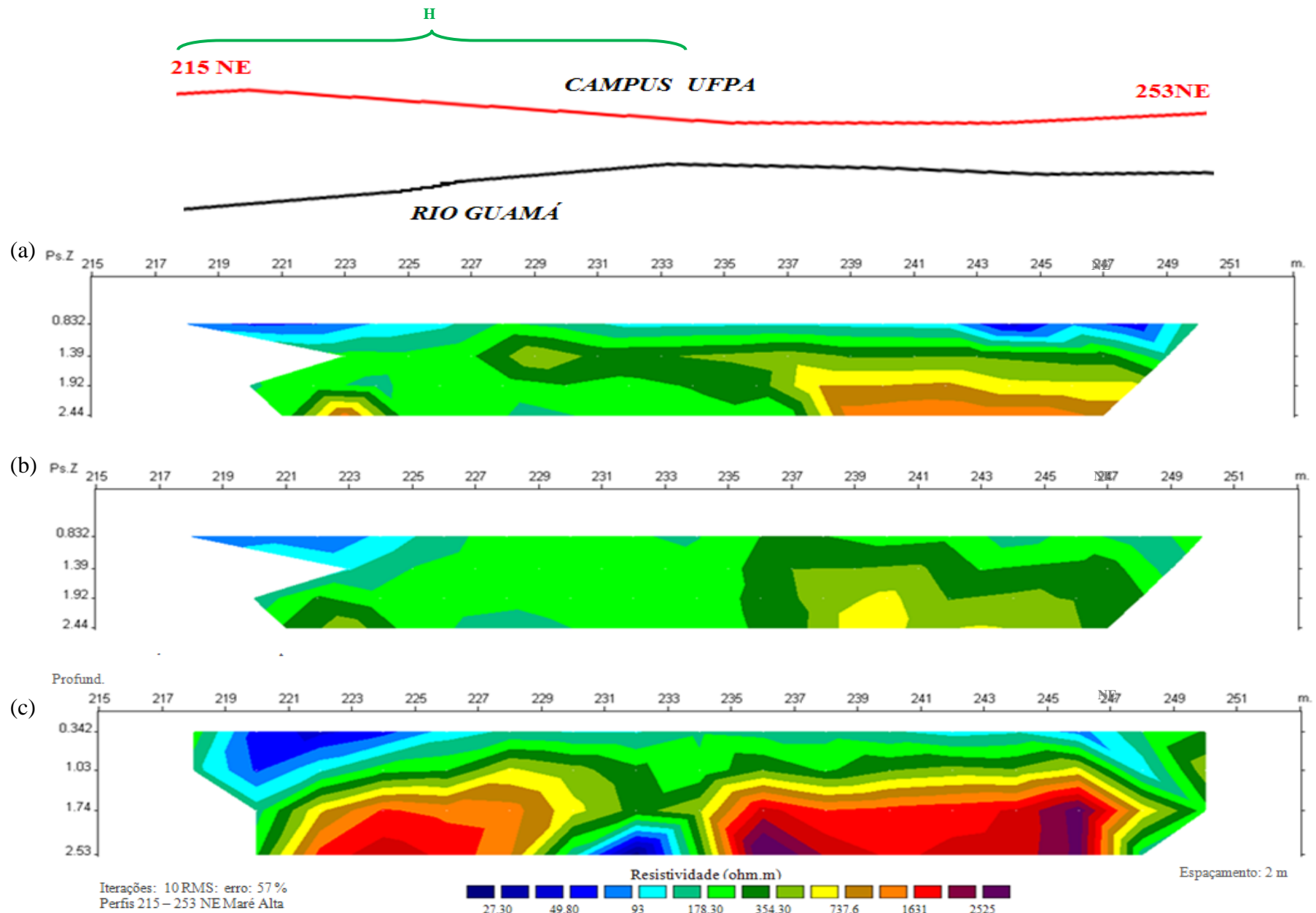


Figura 3.14 Trecho 215-253 NE. Maré alta. Pseudo-seção: Resistividade aparente (a) medida, e (b) calculada. (c) Modelo de resistividade obtida com a inversão. Figura acima, fazendo a correlação do contorno do rio, em cor preta e a linha de investigação 215NE a 253NE, em cor vermelha, contida no perfil AB da figura 2.1, com o perfil de eletrorresistividade. Chave vermelha – erosão, chave verde – contenção.

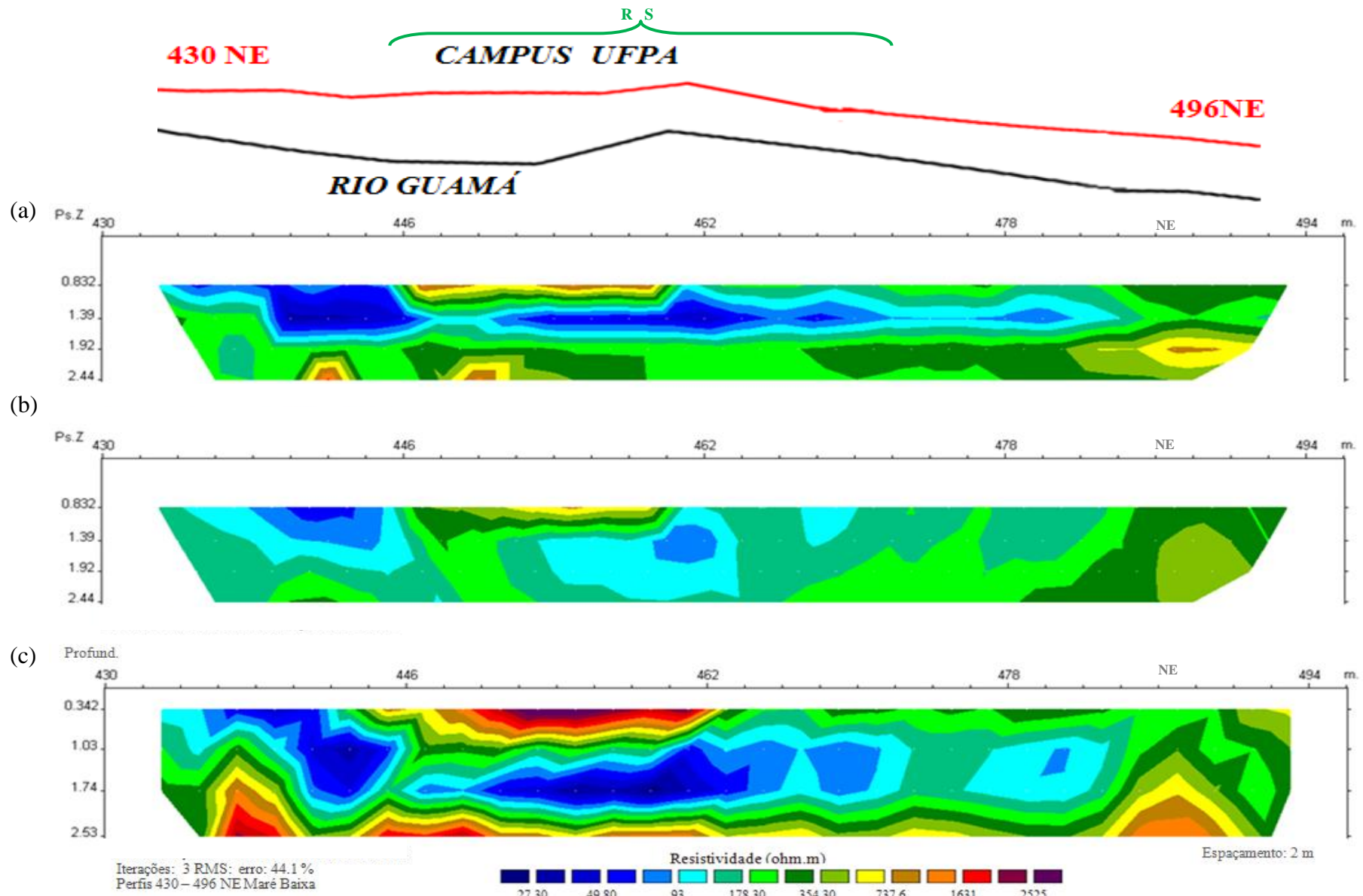


Figura 3.15 Trecho 430-492 NE. Maré baixa. Pseudo-seção: Resistividade aparente (a) medida, e (b) calculada. (c) Modelo de resistividade obtida com a inversão. Figura acima, fazendo a correlação do contorno do rio, em cor preta e a linha de investigação 430NE a 492NE em cor vermelha, contida no perfil AB da figura 2.1, com o perfil de eletrorresistividade. Chave vermelha – erosão, chave verde – contenção.

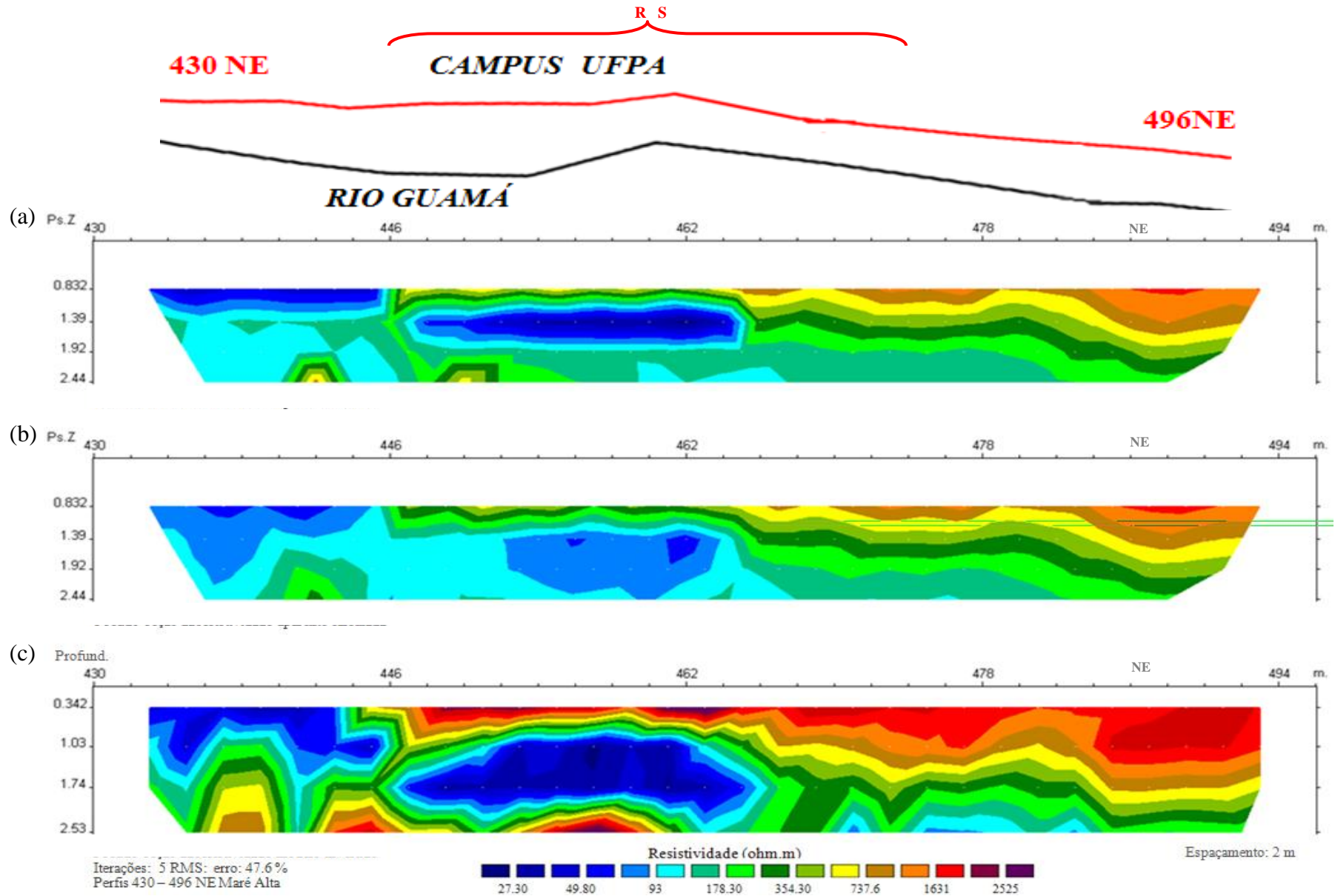


Figura 3.16 Trecho 430-492 NE. Maré alta. Pseudo-seção: Resistividade aparente (a) medida, e (b) calculada. (c) Modelo de resistividade obtida com a inversão. Figura acima, fazendo a correlação do contorno do rio, em cor preta e a linha de investigação 430NE a 492NE, em cor vermelha, contida no perfil AB da figura 2.1, com o perfil de eletrorresistividade. Chave vermelha – erosão, chave verde – contenção.

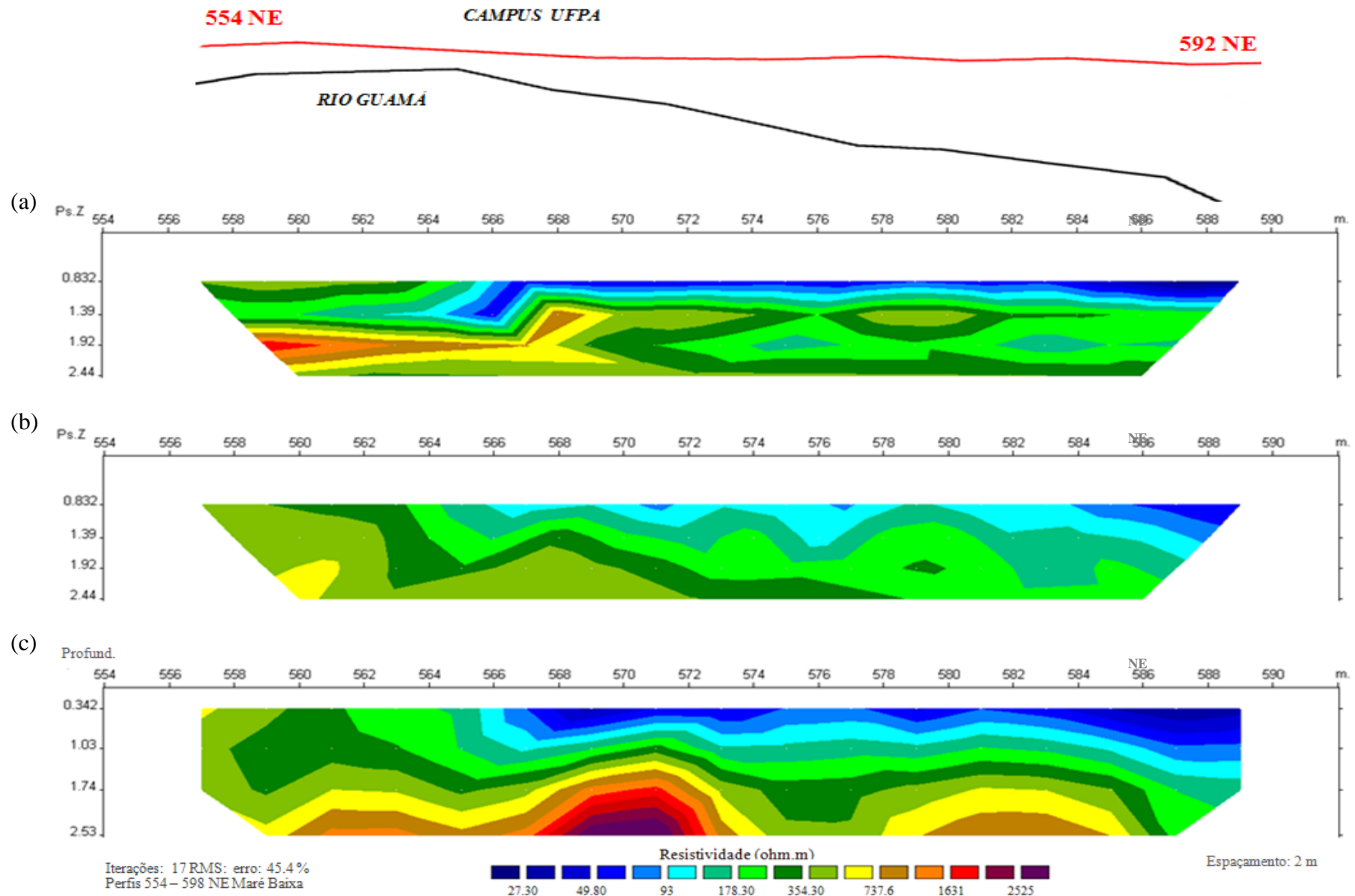


Figura 3.17 Trecho 554-592 NE. Maré baixa. Pseudo-seção: Resistividade aparente (a) medida, e (b) calculada. (c) Modelo de resistividade obtida com a inversão. Figura acima, fazendo a correlação do contorno do rio, em cor preta e a linha de investigação 554NE a 592NE, em vermelha, contida no perfil AB da figura 2.1, com o perfil de eletrorresistividade. Chave vermelha – erosão, chave verde – contenção.

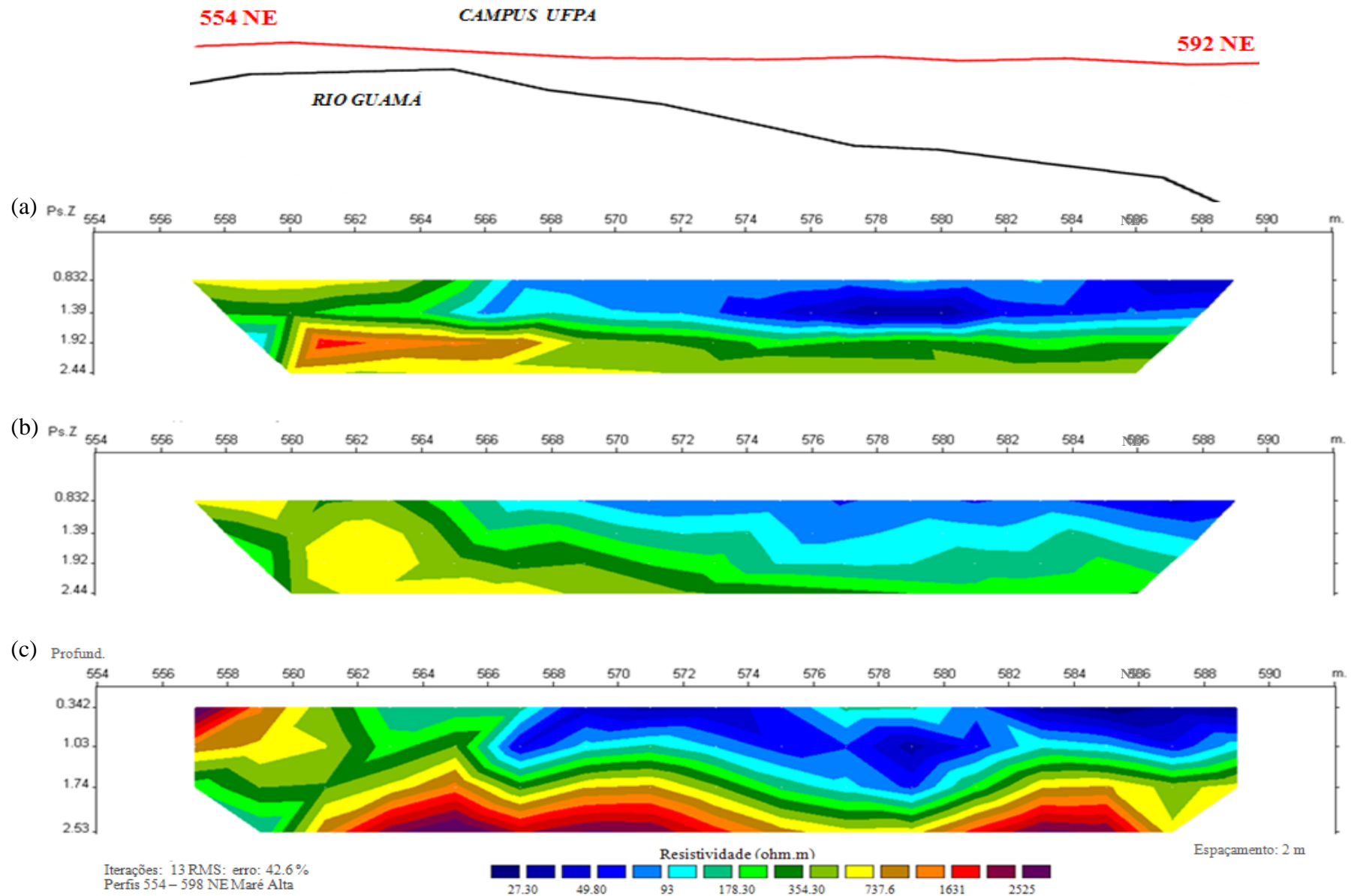


Figura 3.18 Trecho 554-592 NE. Maré alta. Pseudo-seção: Resistividade aparente (a) medida, e (b) calculada. (c) Modelo de resistividade obtida com a inversão. Figura acima, fazendo a correlação do contorno do rio, em cor preta e a linha de investigação 554NE a 592NE, em vermelha, contida no perfil AB da figura 2.1, com o perfil de eletrorresistividade. Chave vermelha – erosão, chave verde – contenção.



## 4. MÉTODOS ELETROMAGNÉTICOS

A transferência de energia eletromagnética para a subsuperfície pode ocorrer através dos processos de difusão ou propagação de uma onda eletromagnética. O processo de difusão ocorre quando se usa baixas frequências, menores do que 1 MHz, e o processo de propagação ocorre com altas frequências. Neste trabalho foram utilizados os métodos eletromagnéticos Slingram e GPR que lidam com os processos de difusão e de propagação, respectivamente.

### 4.1 Método Slingram

#### 4.1.1 Princípios

Os métodos eletromagnéticos se baseiam no fenômeno da indução eletromagnética, não exigindo contato com o terreno. Uma fonte transmissora produz uma corrente elétrica alternada de baixa frequência que, ao passar por uma bobina transmissora, cria um campo magnético primário nas imediações da bobina que induz, em qualquer condutor presente no subsolo, um fluxo de correntes secundárias (correntes de *eddy* ou correntes induzidas de Foucault). Essas correntes secundárias, por sua vez, produzem um novo campo magnético secundário que contém informações sobre o condutor. Parte deste campo magnético secundário juntamente com o campo primário, ou seja, o campo resultante da interação do primário e secundário pode ser detectado em uma bobina receptora (Figura 4.1) (PARASNIS, 1989).

Com o Slingram, contudo, um sinal de referência é enviado em geral por um cabo que conecta bobina transmissora à bobina receptora, de modo que se torne possível separar o campo magnético vertical secundário do campo primário. As medidas são dadas em termos de componentes em fase e em quadratura do campo magnético secundário em relação ao campo primário. Dessa maneira, obtém-se apenas a resposta da subsuperfície, o que explica ser o Slingram um dos métodos eletromagnéticos mais empregados. As aplicações do Slingram são inúmeras como: localização de corpos condutivos; mapeamento de estruturas geológicas, etc. (PARASNIS, 1989).

O LIN (*Low Induction Number*) ou condutímetro é uma variante do Slingram que faz a leitura direta da condutividade aparente para uma determinada profundidade.

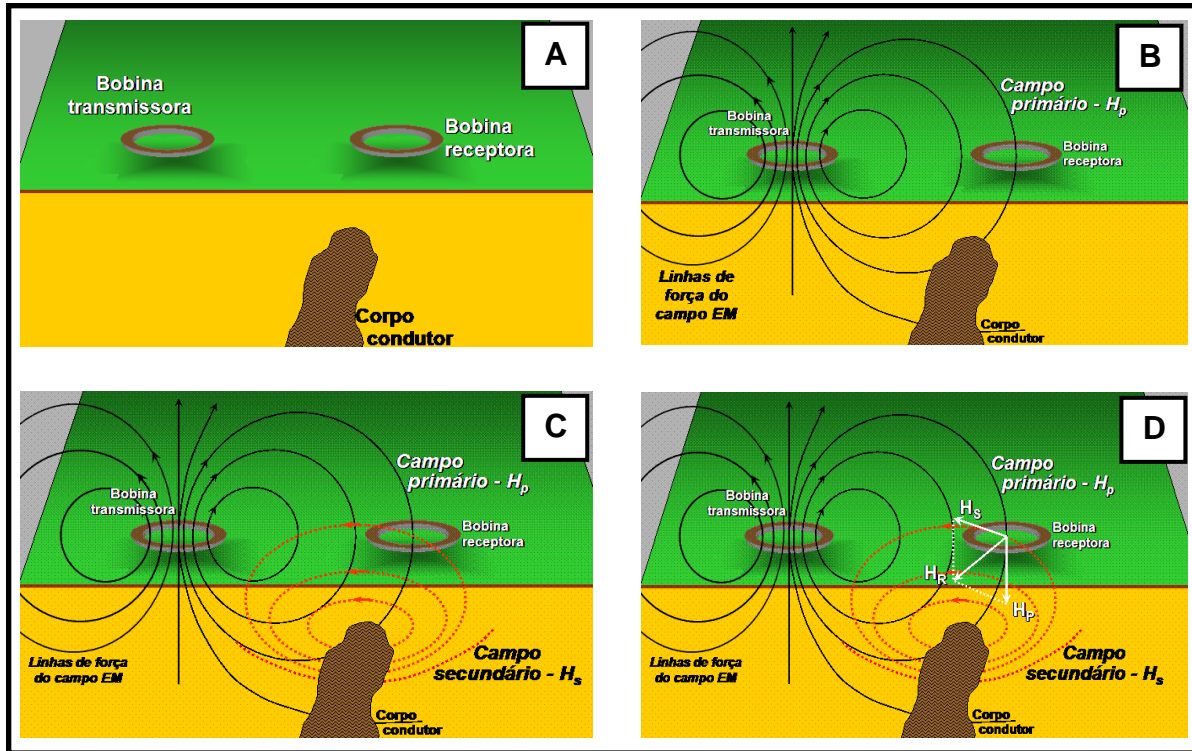


Figura 4.1 Funcionamento do Slingram: **A** Arranjo HLEM; **B** – Campo primário  $H_p$ ; **C** – Campo secundário  $H_s$ ; **D** – Campo resultante  $H_r$ , detectado pelo receptor (XAVIER, 2006).

Todos esses métodos obedecem às equações de Maxwell. A equação da onda derivada das equações de Maxwell é dada por:

$$\nabla^2 \vec{A} + \gamma^2 \vec{A} = 0, \quad (4.1)$$

em que  $\vec{A}$  representa o campo (elétrico ou magnético) e  $\gamma$  é a constante de propagação, que reúne as propriedades eletromagnéticas do meio e a frequência e é igual a:

$$\gamma^2 = i\omega\sigma\mu - \omega^2\epsilon\mu = \alpha + i\beta, \quad (4.2)$$

sendo  $\omega$  a frequência angular,  $\sigma$  a condutividade elétrica,  $\mu$  a permeabilidade magnética,  $\epsilon$  a permissividade elétrica e  $i = \sqrt{-1}$ .

As partes real e imaginária de  $\gamma$ ,  $\alpha = \omega^2\epsilon\mu$  e  $\beta = \omega\sigma\mu$ , conhecidas como constante de atenuação e constante de fase, estão relacionadas à corrente de deslocamento e à corrente de condução, respectivamente.

As equações para as constantes de atenuação e de fase são:

$$\alpha = \left( \frac{\omega\mu}{2} \right)^{1/2} \left[ (\omega^2 \varepsilon^2 + \sigma^2)^{1/2} + \omega\varepsilon \right]^{1/2} e \quad (4.3)$$

$$\beta = \left( \frac{\omega\mu}{2} \right)^{1/2} \left[ (\omega^2 \varepsilon^2 + \sigma^2)^{1/2} - \omega\varepsilon \right]^{1/2} \quad (4.4)$$

A solução geral para a equação da onda é dada por:

$$A = A_0 e^{-\alpha z} e^{i(\omega t - \beta z)}, \quad (4.5)$$

em que  $A_0$  representa a intensidade do campo elétrico inicial e  $z$  é a profundidade.

Com o Slingram e a maioria dos métodos EM, as fontes operam em baixa frequência ( $<10^5$ Hz) e  $\sigma$  varia entre  $10^{-4}$  e 1 S/m para a maioria dos materiais geológicos, consequentemente, as correntes de deslocamento são muito menores do que as correntes de condução ( $\omega^2 \varepsilon \mu \ll \omega \sigma \mu$ ) (RIJO, 2004). Logo,  $\gamma$  pode ser simplificado para:

$$\gamma^2 = i\omega\sigma\mu. \quad (4.6)$$

Para esses métodos, as constantes de atenuação e fase são iguais a:

$$\alpha = \beta = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}}. \quad (4.7)$$

A profundidade na qual a amplitude da onda se encontra atenuada de seu valor inicial de  $1/e$  ( $\approx 37\%$ ) convencionou-se chamar de *skin depth*  $\delta$ . Ela é obtida a partir do termo  $e^{-\alpha z}$  da equação (4.5). Logo, pode-se escrever

$$\delta = \frac{1}{\alpha}. \quad (4.8)$$

Para a condição de baixa frequência,

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}. \quad (4.9)$$

As medidas obtidas com os arranjos coplanar horizontal (dipolo vertical DV) e coplanar vertical (dipolo horizontal DH) (Figura 4.2) são dadas por:

$$\left( \frac{H_s}{H_p} \right)_V = \frac{2}{(\gamma L)^2} \{9 - [9 + 9\gamma L + 4(\gamma L)^3] e^{-\gamma L}\} e \quad (4.10)$$

$$\left( \frac{H_s}{H_p} \right)_H = \frac{2}{(\gamma L)^2} \{-3 + (\gamma L)^2 + [3 + 3\gamma L + (\gamma L)^2] e^{-\gamma L}\}, \quad (4.11)$$

sendo  $H_p$  o campo magnético primário gerado pela corrente na bobina transmissora e  $H_s$  o campo magnético secundário gerado pela subsuperfície e  $L$  o espaçamento entre as bobinas (KELLER & FRISCHKNECHT, 1966).

O produto  $\gamma L$  é dado por:

$$\gamma L = \frac{L}{\delta} \sqrt{2i}, \quad (4.12)$$

em que  $\frac{L}{\delta}$  é o número de indução ou parâmetro de resposta  $\lambda$  que pode ser expresso como:

$$\lambda = \frac{\gamma L}{\sqrt{2i}} = L \sqrt{\frac{\omega \mu_0 \gamma}{2}}. \quad (4.13)$$

Fazendo-se a expansão em série de potência dos termos  $e^{-\gamma L}$  que aparece na equação do dipolo magnético vertical Nascimento (2009), obtém-se como uma solução aproximada:

$$\left( \frac{H_s}{H_p} \right)_V \approx 1 + i \frac{\lambda^3}{2}, \quad (4.14)$$

que é válida para a chamada condição de baixo número de indução (*low induction number* ou abreviadamente LIN). A componente real é constante e igual a 1 e, portanto, sem interesse. A componente imaginária, contudo, vale:

$$\text{Im} \left( \frac{H_s}{H_p} \right) = \frac{\lambda^2}{2} = \frac{\omega \mu \sigma L^2}{4}, \quad (4.15)$$

o que permite obter a condutividade, que será chamada condutividade aparente  $\sigma_a$ , já que o meio não é homogêneo:

$$\sigma_a = \frac{4}{\omega \mu L^2} \text{Im} \left( \frac{H_s}{H_p} \right). \quad (4.16)$$

O subscrito V foi eliminado, porque a equação é válida também para o dipolo horizontal.

#### 4.1.2 Arranjos

Existem muitos arranjos de bobinas para o Slingram, sendo que o mais empregado é o arranjo horizontal coplanar, em que tanto a bobina transmissora como a receptora são horizontais. Devido a isto, o Slingram é comumente chamado de método *Horizontal Loop Electromagnetic System* ou, mais comumente, HLEM.

O LIN, contudo, geralmente é usado com o arranjo coplanar horizontal (dipolo vertical) e o arranjo coplanar vertical (dipolo horizontal), que permitem o maior acoplamento das bobinas (Figura 4.2). O dipolo horizontal é mais sensível às variações laterais de condutividade, entretanto, menos sensível ao desalinhamento das bobinas. O ponto da medida é o ponto central às bobinas.

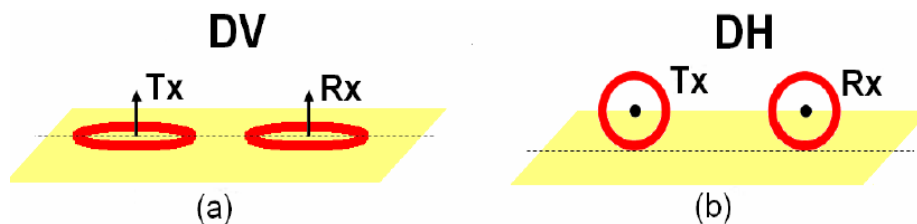


Figura 4.2 – Esquema de configuração de bobinas utilizadas no método SLINGRAM. (a) Dipolo magnético vertical (DV) (b) Dipolo magnético horizontal (DH) (NASCIMENTO, 2009).

A profundidade teórica de investigação é cerca de 1,5 vezes o espaçamento entre as bobinas com o dipolo vertical e 0,75 vezes com o dipolo horizontal. A Tabela 4.1 mostra a profundidade teórica para os espaçamentos entre as bobinas e as frequências utilizadas para os dipolos horizontal e vertical. Como a área é rica em argila e umidade, a profundidade de investigação é muito inferior à profundidade teórica. A Tabela 4.1 mostra a profundidade de investigação aparente (BARREIRA *et al*, 2008).

Tabela 4.1 Profundidade de investigação aparente (BARREIRA *et al*, 2008).

L (m) ESPAÇAMENTO ENTER AS BOBINAS	f (Hz) FREQUÊNCIA DE OPERAÇÃO	PROFUNDIDADE APARENTE (m)	
		DH	DV
10	6400	5,9	12,6
20	1600	11,8	

#### 4.1.3 Aquisição dos Dados

Neste trabalho foi utilizado o equipamento EM34-3 fabricado pela empresa *Geonics Limited* (Figura 4.3).

Trata-se de um equipamento eletromagnético que opera na condição de baixo número de indução e fornece medidas de condutividade em mS/m com os arranjos coplanar horizontal e vertical (GEONICS,2010).

O levantamento do perfil AB de 600 m (Figura 2.1) ocorreu no período de 27 de fevereiro a 30 de março de 2010, nas marés baixa e alta com o dipolo vertical e dipolo horizontal com o cabo de 10 m e dipolo horizontal com o cabo de 20 m (Figura 4.4).

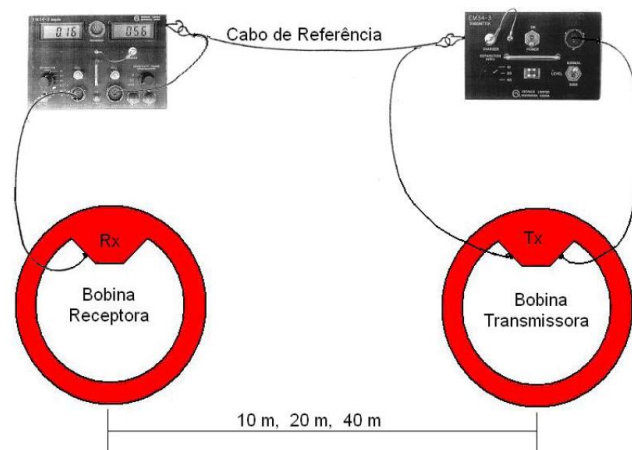


Figura 4.3 Representação do equipamento EM34-3 (NASCIMENTO, 2009).



Figura 4.4 Fotos mostrando a aquisição dos dados com A – dipolo horizontal e B – dipolo vertical.

#### 4.1.4 Interpretação

As medidas foram reunidas sob a forma de seção de perfis rebatidos em que as distâncias ao longo do perfil estão representadas no eixo das abscissas e as profundidades de investigação aparecem no eixo das ordenadas; a magnitude da condutividade aparece rebatida no eixo das ordenadas e tem como linha base 50 mS/m, pois esta magnitude apresenta a simetria média em relação as curvas dos levantamentos traçados. Uma polinomial de grau 20, a que melhor acompanhou os dados e ruídos presentes no levantamento, foi ajustada aos dados de forma a minimizar os ruídos de baixa frequência espacial. As letras no eixo dos x referem-se a feições cujas fotos foram reunidas no anexo. Os resultados obtidos em maré baixa e alta foram dispostos lado a lado para facilitar sua comparação e são apresentados na Figura 4.5.

Devido à existência de ruídos pontuais de elevada magnitude, os mesmos foram eliminados e, à posição correspondente, fornecido o valor da média entre as medidas vizinhas. A Figura 4.6 reúne os perfis após esse tratamento.

Os perfis obtidos em maré baixa são algo mais suaves do que os perfis obtidos em maré alta.

A comparação entre o conjunto de três perfis para cada maré, por sua vez, mostra que a oscilação dos valores obtidos para a condutividade é menor para o perfil obtido com DH e cabo de 10 m (mais raso) e maior para o perfil obtido com DV e cabo de 10 m. Várias dessas oscilações podem representar ruídos operacionais. O perfil obtido com cabo de 20 m, via de regra, não apresenta boa correlação com os dois demais em se tratando de anomalias de pequeno comprimento de onda espacial, talvez em função do maior volume da subsuperfície amostrado.

O equipamento utilizado permite investigações muito profundas para a presente investigação, mesmo considerando-se que a profundidade de investigação aparente de BARREIRA et al. (2008) deve ser maior do que a real, tendo em vista a presença de argila na área investigada. É, provavelmente por esse motivo, que há uma diferença muito pequena entre os dados obtidos entre as duas marés. Por exemplo, de uma maneira geral, observa-se o aumento da condutividade por volta de 150 a 500NE em ambas as marés. Esse aumento pode guardar correlação com o aumento de SP reportado entre 250 e 550 NE.

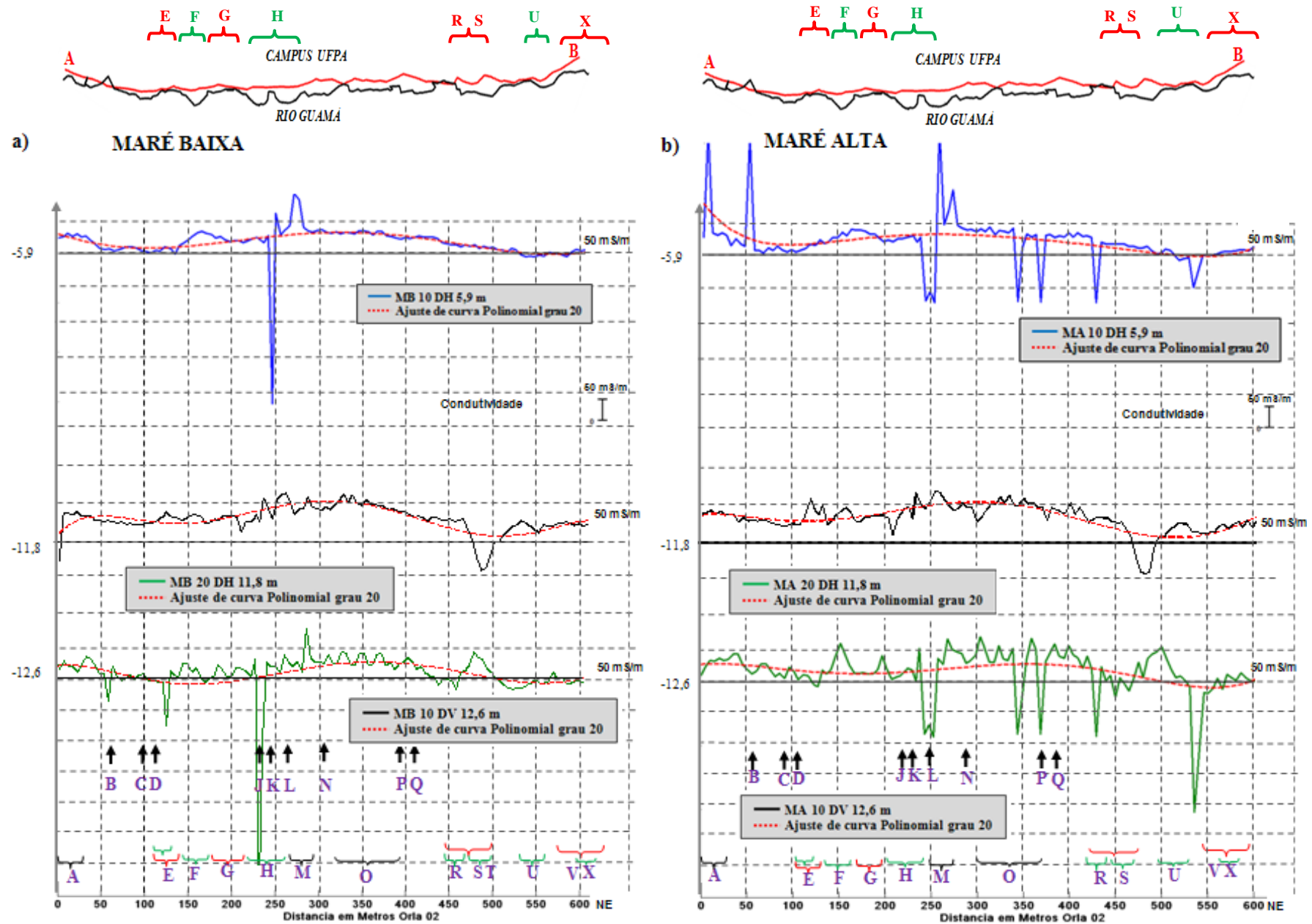


Figura 4.5 Condutividade aparente obtida em (a) Maré Baixa (MB) e (b) Maré Alta (MA) com dipolos horizontal (DH) e vertical (DV) e cabos de 10 e 20 m. As letras A, B, C, etc. indicam a posição das fotos no anexo. Dados: chave verde – contenção; chave vermelha – erosão; chave preta – informação. Figura acima, fazendo a correlação do contorno do rio e a linha AB (cor vermelha) da figura 2.1 com o perfil (cor preta) do Slingram.



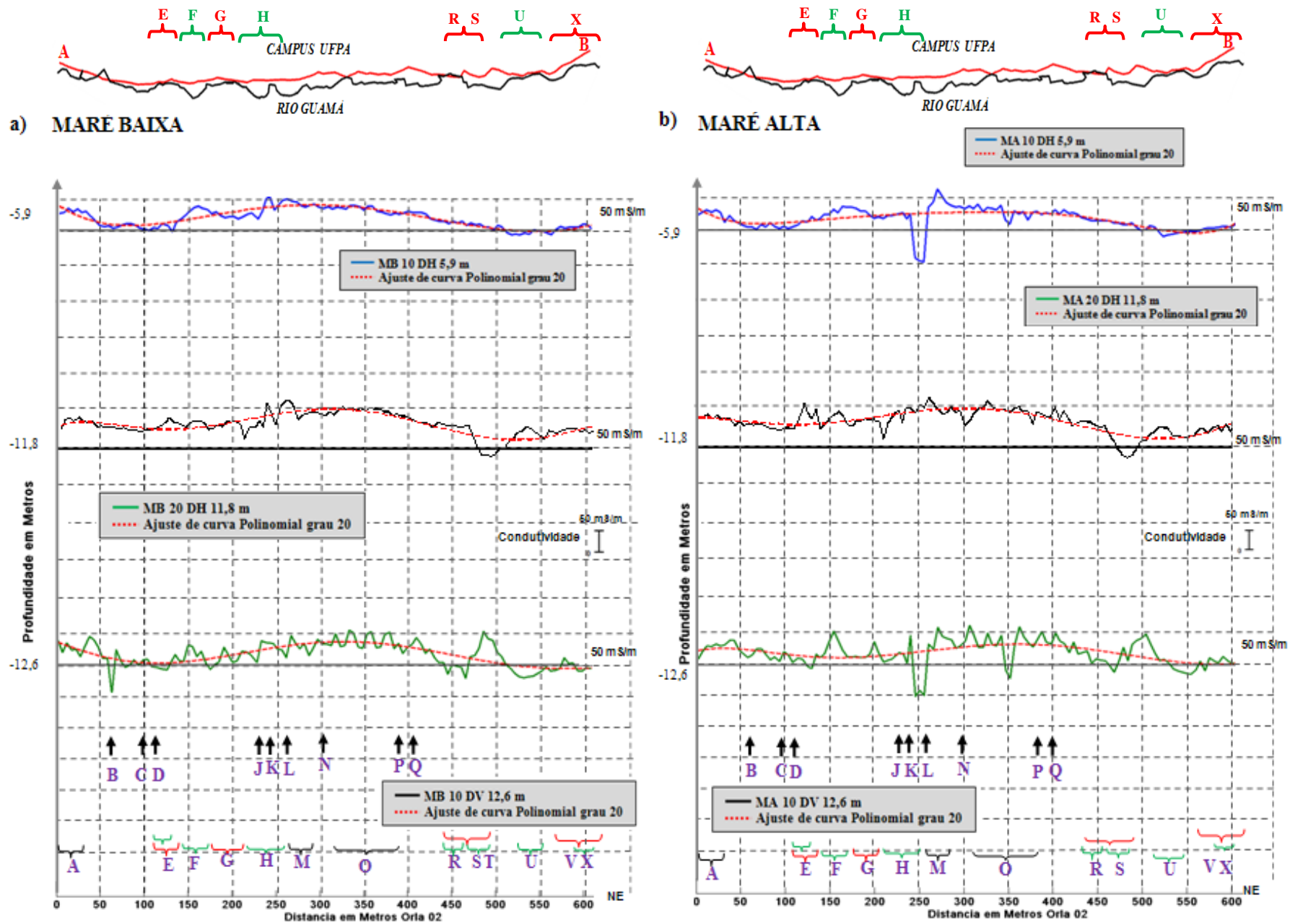


Figura 4.6 Condutividade aparente após filtragem de ruídos obtida em (a) Maré Baixa (MB) e (b) Maré Alta (MA) com dipolos horizontal (DH) e vertical (DV) e cabos de 10 e 20 m. As letras A, B, C, etc. indicam a posição das fotos no anexo. Dados: chave verde – contenção; chave vermelha – erosão; chave preta – informação. Figura acima, fazendo a correlação do contorno do rio e a linha AB (tonalidade vermelha) da figura 2.1 com o perfil (tonalidade preta) do Slingram.

## 4.2. Método GPR

### 4.2.1 Princípios

O método radar de penetração do solo ou, simplesmente, GPR, abreviatura de *ground penetrating radar*, é voltado para a detecção de parte da irradiação de ondas eletromagnéticas na faixa de frequências de 2 a 2500 MHz, geradas por uma antena transmissora, as quais se propagam na subsuperfície, sofrendo reflexão, refração e difração ao encontrarem mudanças nas propriedades eletromagnéticas do meio (resistividade elétrica, constante dielétrica e permeabilidade magnética); o sinal refletido pode ser detectado por uma antena receptora.

O tempo de chegada da onda refletida, da ordem de nano segundos, é lançado em uma escala vertical para diferentes pontos do perfil. Esse registro vertical que associa tempo e amplitude é chamado de *scan* ou traço. Uma sequência desses scans forma um radargrama. A Figura 4.7 ilustra o princípio básico de operação do GPR e um radargrama.

O sinal detectado permite estimar as profundidades das interfaces de reflexão desde que se conheça a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas.

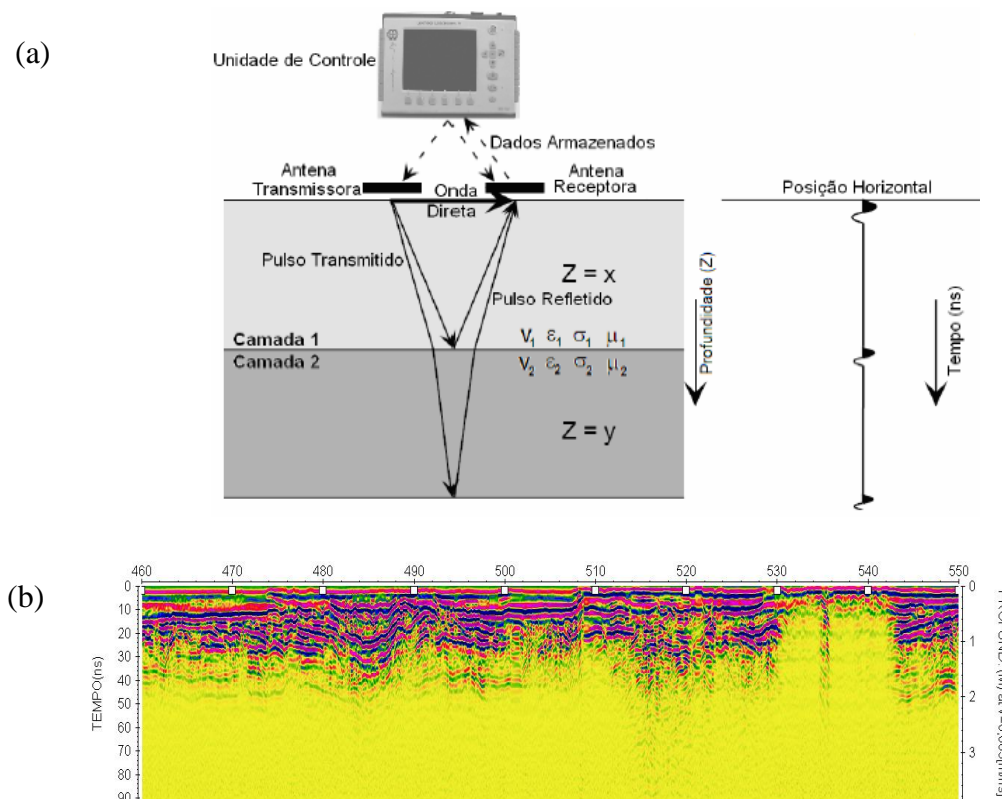


Figura 4.7 (a) Princípio básico de operação do GPR (adaptação de VAN DAM, 2001 in NASCIMENTO, 2009). (b) Radargrama obtido nos levantamentos deste trabalho.

A velocidade da onda eletromagnética ( $v$ ) depende da constante dielétrica ou permissividade elétrica relativa ( $k$ ), da permeabilidade magnética relativa ( $\mu_r$ ) e do fator de perda ( $P$ ):

$$v = \frac{c}{\left\{ \frac{k\mu_0}{2} \left[ \left( 1 + P^2 \right)^{1/2} + 1 \right] \right\}^{1/2}} \quad (4.17)$$

sendo:

$$P = \frac{\sigma}{\omega\epsilon} \quad e \quad (4.18)$$

$$k = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}, \quad (4.19)$$

com “ $c$ ” como a velocidade da luz no vácuo (0,3 m/ns) e  $\epsilon$  e  $\epsilon_0$  como a permissividade elétrica respectivamente, no meio e no vácuo ( $8,84 \times 10^{12}$  F/m).

O fenômeno base da aplicação do GPR é regido pelas mesmas equações do item 4.1.1, mas as constantes de propagação, atenuação e fase não permitem simplificações nas suas equações originais. Por outro lado, com as altas frequências do GPR, o produto  $\omega^2 \epsilon^2$  é muito maior do que  $\sigma^2$ , de modo que a equação da velocidade da onda pode, então, nos meios não magnéticos ( $\mu_r = 1$ ), ser simplificada para:

$$v = \frac{c}{\sqrt{k}}. \quad (4.20)$$

O coeficiente de reflexão  $R$  da interface que separa os meios 1 e 2 é dado por:

$$R = \frac{v_1 - v_2}{v_1 + v_2}. \quad (4.21)$$

Substituindo-se o valor de  $v$  dado por (4.20) na equação do coeficiente de reflexão, obtém-se:

$$R = \frac{\sqrt{k_2} - \sqrt{k_1}}{\sqrt{k_2} + \sqrt{k_1}}, \quad (4.22)$$

em que  $k_1$  e  $k_2$  representam as constantes dielétricas das camadas no meio superior e inferior respectivamente.

A relação obtida mostra que quanto menor for o contraste entre as constantes dielétricas menor será a quantidade de energia refletida, o que explica a extrema sensibilidade do

GPR ao conteúdo de água no meio. Argilas saturadas de água absorvem de tal maneira as ondas que são virtualmente opacos ao radar. O lençol freático é um grande refletor e pode prejudicar a penetração do sinal, pois grande parte da energia refletida volta à superfície.

A permeabilidade magnética relativa, parâmetro de especial interesse para este trabalho, influi tanto na velocidade como na atenuação da onda eletromagnética, de modo que quanto menor o seu valor, menor será a atenuação e maior será a velocidade da onda.

A frequência e a resistividade elétrica do meio são fatores que influenciam diretamente na profundidade de penetração. Resistividades baixas e frequências mais altas contribuem para uma maior absorção de energia da onda contribuindo para diminuir a profundidade de penetração. Frequências altas aumentam a resolução e permitem identificar alvos pequenos, obedecendo à relação:

$$v = \lambda f \quad (4.23)$$

#### 4.2.2 Arranjos

Os dados de radar podem ser obtidos por meio do arranjo de afastamento constante (*common mid point*) ou CMP e *wide angle reflection and refraction* ou WARR.

O levantamento com afastamento constante emprega uma antena mono-estática ou então um par de antenas bi-estáticas separados por uma distância fixa que é conduzido passo a passo nos perfis. 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. Com o arranjo WARR, uma das antenas é mantida fixa enquanto a outra é consecutivamente espaçada da primeira. Neste trabalho, a aquisição foi realizada através do afastamento constante (Figura 4.8).

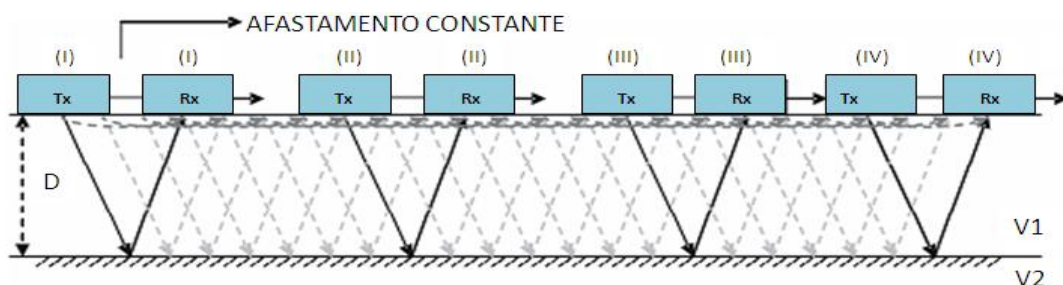


Figura 4.8 - Aquisição de dados com afastamento constante (REYNOLDS, 1997).  
Antenas: transmissora – Tx e receptora – Rx.

#### 4.2.3 Aquisição dos Dados

Neste trabalho, a aquisição de dados foi realizada por meio de perfis de reflexão com afastamento constante com o equipamento TerraSIRch System-3000, fabricado pela empresa Geophysical Survey Systems, Inc., usando antena de 200 MHz (Figura 4.9).

A velocidade da onda foi calculada tendo como base a assinatura de um macaco de veículo enterrado a 30 cm de profundidade na estação 300NE (Figura 4.10).

Para a investigação 2D foi levantado o perfil 0-600NE com marcações no terreno a cada 10 m em ambas as marés nos dias 14 e 15 de março de 2010. Para facilitar a abordagem a seguir, esse perfil foi segmentado em oito perfis, PI de 0 a 100NE, PII de 100 a 180NE, PIII de 180 a 230NE, PIV de 230 a 280NE, PV de 280 a 380NE, PVI de 380 a 460NE, PVII, de 460 a 550NE e PVIII de 560 a 600NE (Figura 4.11). Entre 550 e 560NE, a existência de bambuzal impediu a passagem do radar.



Figura 4.9 Antena de 200MHz e Unidade de Controle SIR 3000, usados na aquisição de dados.



Figura 4.10 Procedimento de campo para cálculo da velocidade. Macaco, envolto em saco plástico, enterrado em 300NE afastado 3 m da pista.

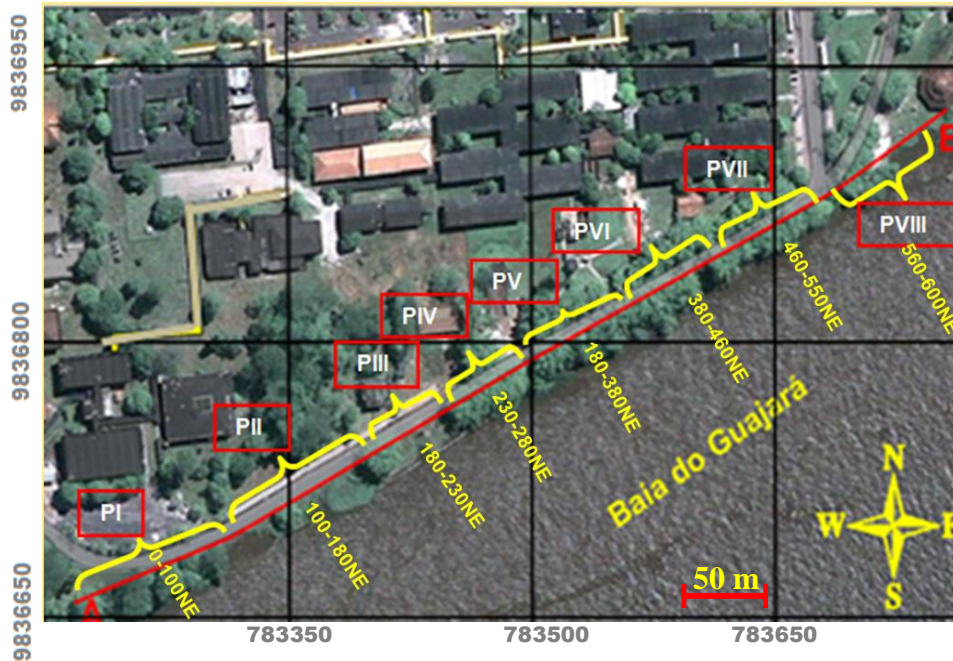


Figura 4.11 Segmentação do perfil AB na investigação GPR 2D.

Foram também levantadas em ambas as marés três áreas para o estudo 3D (Figura 4.12). A primeira área, PX, é vizinha e paralela ao trecho do perfil 100-150NE, enquanto a segunda área, PY, ao trecho 440-460NE. A terceira área, PZ, é quase perpendicular à orla e sua projeção coincide aproximadamente com o trecho do perfil 585-600NE, do qual distam 10 m. As duas primeiras áreas são paralelas à margem de erosão intensa da orla, enquanto PZ está localizada em trecho distante de erosão. Todos três levantamentos foram realizados sobre pista asfaltada. As figuras 4.13, 4.14 e 4.15 mostram a localização da área PX, a figura 4.16, da área PY e a figura 4.17, da área PZ.

As fotos reunidas nas figuras 4.18 e 4.19 mostram rachaduras em 110 NE e 115 NE, área PX, estando à última relacionada à presença de tubulação. A figura 4.18 também permite observar rachaduras em PX ao longo da lateral da pista a NW da área bem como no centro paralelamente às laterais. A foto 4.20 mostra rachaduras na área PY.

O levantamento da área PX foi realizado no dia 3 de junho de 2010 ao longo de doze perfis paralelos de 50 m de extensão, separados entre si de 50 cm (área de 6 m x 50 m). O levantamento de PY, por sua vez, foi realizado no dia 8 de junho de 2010 ao longo de quinze perfis paralelos de 20 m de extensão, separados entre si de 50 cm (área de 7,5 m x 20 m). Finalmente, o levantamento de PZ foi realizado no dia 16 de junho de 2010 ao longo de quinze perfis paralelos de 15 m de extensão, separados entre si de 50 cm (área de 7,5 m x 15 m). Os dois primeiros levantamentos foram feitos de SW para NE e o levantamento de PZ de S para N.



Figura 4.12 Localização da investigação GPR 3D.



Figura 4.13 Área PX. Seta indica direção do levantamento para NE.



Figura 4.14 Lateral da área PX com demarcações a cada 0,50 m de cada um dos doze perfis.



Figura 4.15 Área PX vista lateralmente. Seta indica direção do levantamento para NE.





Figura 4.16 Área PY vista lateralmente. Seta indica direção do levantamento para NE.



Figura 4.17 Bloco PZ com as demarcações a cada 0,50 m de cada um dos perfis. Seta indica direção do levantamento para N.



Figura 4.18 Rachaduras aos 110NE da área PX.



Figura 4.19 Rachaduras aos 112 NE da área PX relacionado à presença de tubulação abaixo do asfalto.



Figura 4.20 Rachaduras no formato de meia lua no pavimento asfáltico na área PY, 440 – 460 NE.

#### 4.2.4 Processamento

O processamento de dados GPR consiste das etapas que seguem.

- i) Pré-processamento, que envolve a obtenção do dado bruto (porque ainda no campo é possível fazer algumas modificações nos dados), posteriormente a esta, inclusão de informação sobre a topografia, correção estática (que permite eliminar do traço a parte na qual ele reflete as variações provocadas pela emissão da onda e seu encontro com a interface ar-superfície do terreno devida às instabilidades da antena durante a aquisição), correção de erros na amostragem do sinal, etc.
- ii) Aplicação de ganho, que compensa atenuações sofridas pelo sinal ao penetrar no subsolo.
- iii) Filtragem, que permite a eliminação ou redução de ruídos (postes, canos, cabos de alta-tensão, raízes).
- iv) Conversão do tempo em profundidade, que envolve a modificação dos tempos medidos de retorno das ondas em profundidades, de forma a obter a profundidade das feições investigadas, o que exige o conhecimento da velocidade de propagação do meio, que pode ser obtida por meio de hipérbolas de reflexão presentes no radargrama.

Neste trabalho, o processamento dos dados de GPR foi realizado com o programa REFLEX-WIN 5.2 desenvolvido pela *Sandmeier Software*. Foram feitos os seguintes processamentos:

- Correção estática,
- Interpolação das marcas de posicionamento,
- Remoção do ganho inicial,
- Aplicação do ganho linear e exponencial,
- Aplicação de filtros 1D (*Butterworth* e *Dewow*) ,
- Aplicação de filtro 2D (*Running Average*) e
- Conversão do tempo em profundidade a partir do cálculo da velocidade por meio do ajuste de hipérbole aos dados obtidos para o macaco de veículo enterrado de 30 cm de profundidade, o que forneceu 0,085 m/ns (Figura 4.21).

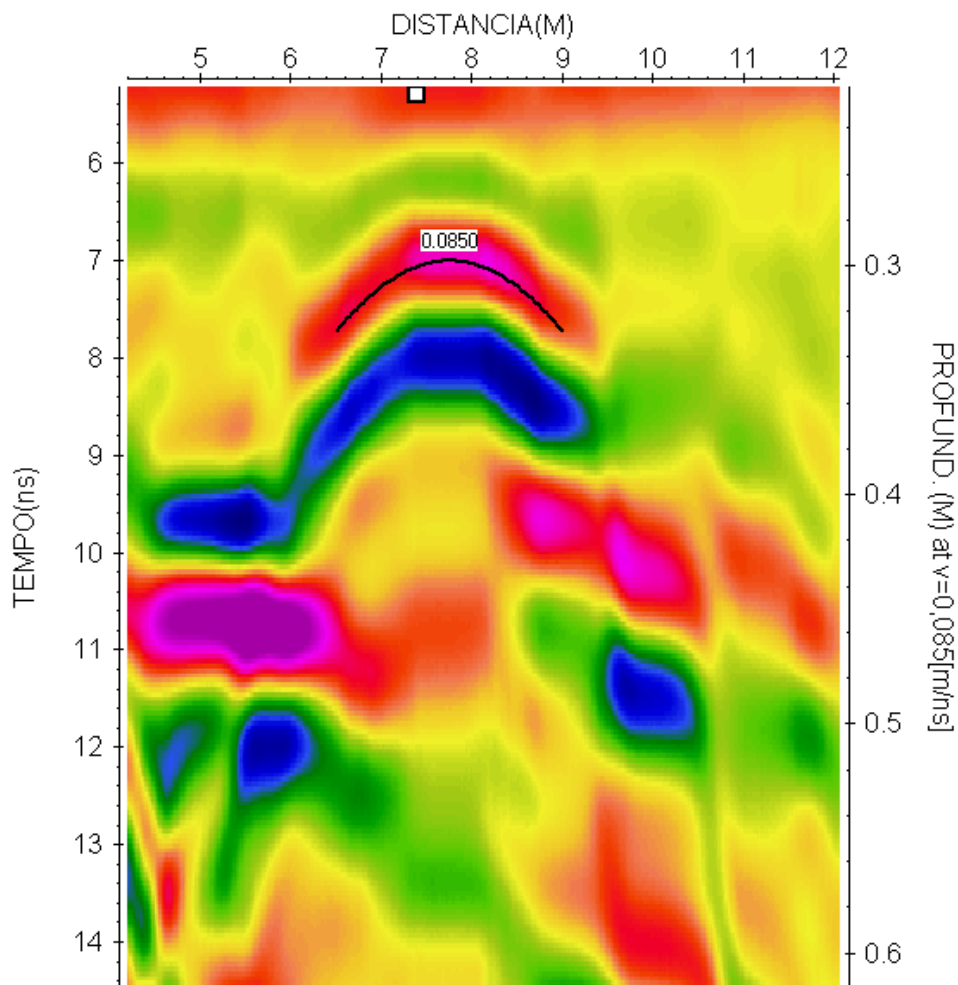


Figura 4.21 Radargrama mostrando a hipérbole relacionada ao macaco veicular enterrado na profundidade de 0,3 m. Velocidade de ajuste de 0,085m/ns.

## 4.2.5 Interpretação

### 4.2.5.1 Radargramas (2D)

Os resultados obtidos ao longo do perfil AB foram reunidos nas figuras 4.22 a 4.29. No topo dessas figuras são apresentados os radargramas brutos, em sua porção intermediária, os radargramas após o processamento e na base dessas figuras, os radargramas interpretados. A localização das feições mostradas nas fotos em anexo é apresentada no radargrama interpretado da maré baixa com as letras usadas para designar as referidas fotos reunidas no anexo dispostas no eixo dos x. Os dados do perfil 100-180NE (Figura 4.23) foram obtidos algo afastados (cerca de 3 m) na direção NW em relação ao perfil original, devido à erosão.

A comparação entre os radargramas para as duas marés mostra que o sinal refletido é mais nítido nos radargramas obtidos com a maré alta e tanto mais nítido quanto mais estiver a zona submetida à erosão. A erosão perturba a continuidade dos refletores. Zonas com contenção de cimento podem mostrar o sinal atenuado e ser menos afetadas pela mudança de maré. Raízes parecem reduzir a reflexão. O nível hidrostático, localizado a cerca de 0,8 m de profundidade mais a camada argilosa que segue a camada que funciona como aquífero livre causam a atenuação do sinal a partir de cerca de 1 m e quase 2 m entre 460-550NE, que é a zona com a erosão mais intensa. Nos radargramas, essas observações aparecem destacadas.

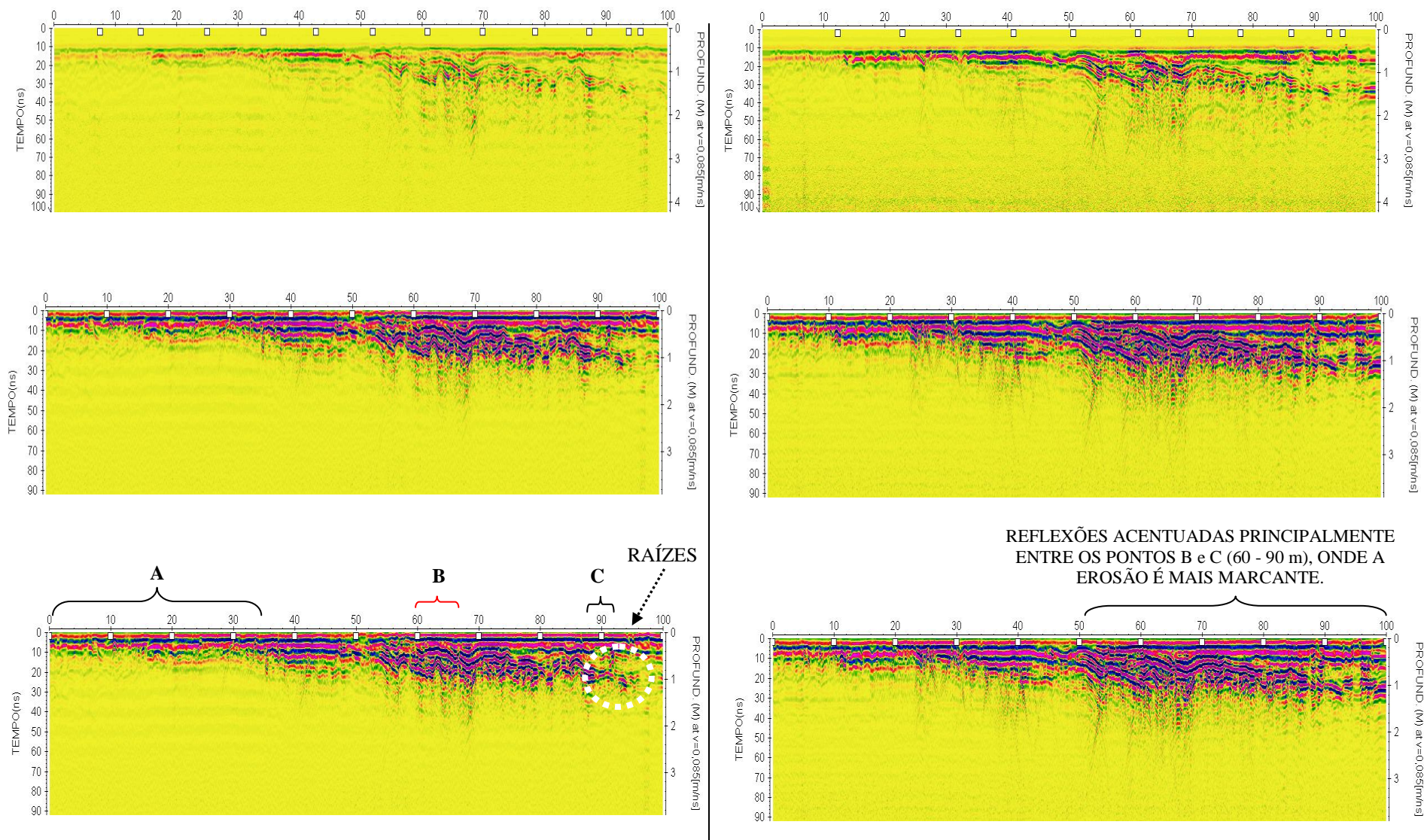


Figura 4.22 Trecho 0-100NE. Radargramas bruto (topo), processado (meio) e interpretado (base) obtidos nas marés baixa (lado esquerdo) e alta (lado direito).

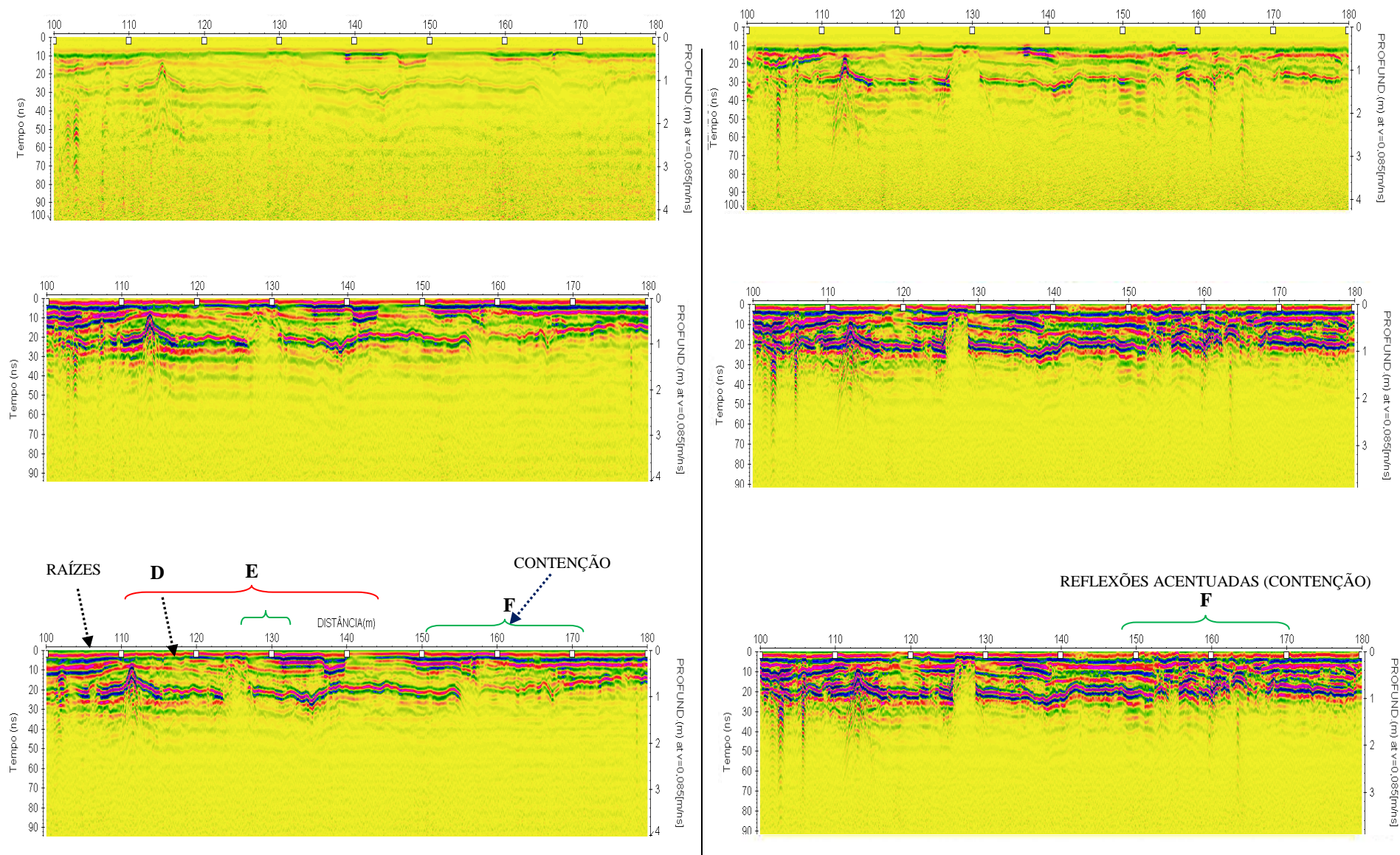


Figura 4.23 Trecho 100-180NE. Radargramas bruto (topo), processado (meio) e interpretado (base) obtidos nas marés baixa (lado esquerdo) e alta (lado direito).

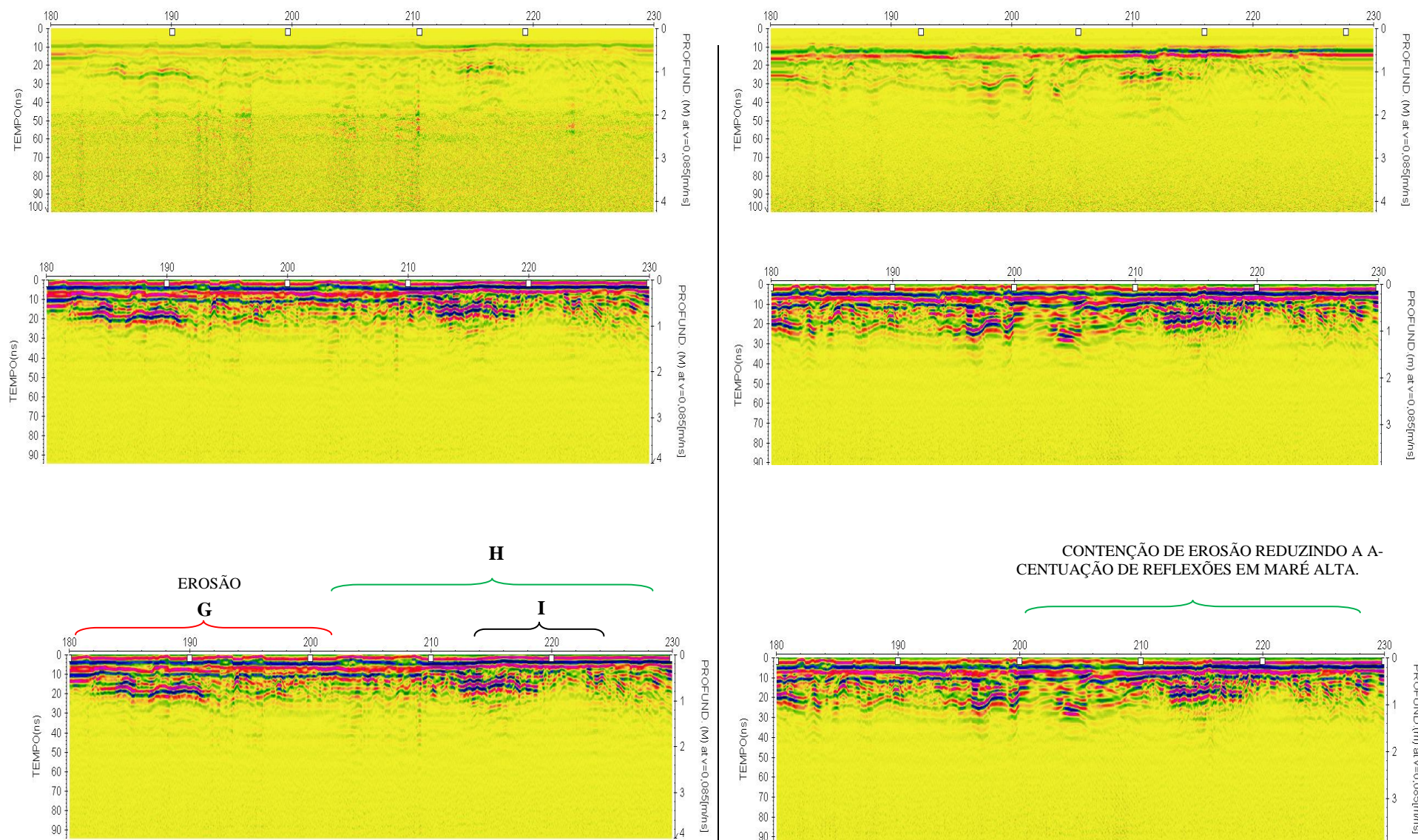


Figura 4.24 Trecho 180-230NE. Radargramas bruto (topo), processado (meio) e interpretado (base) obtidos nas marés baixa (lado esquerdo) e alta (lado direito).



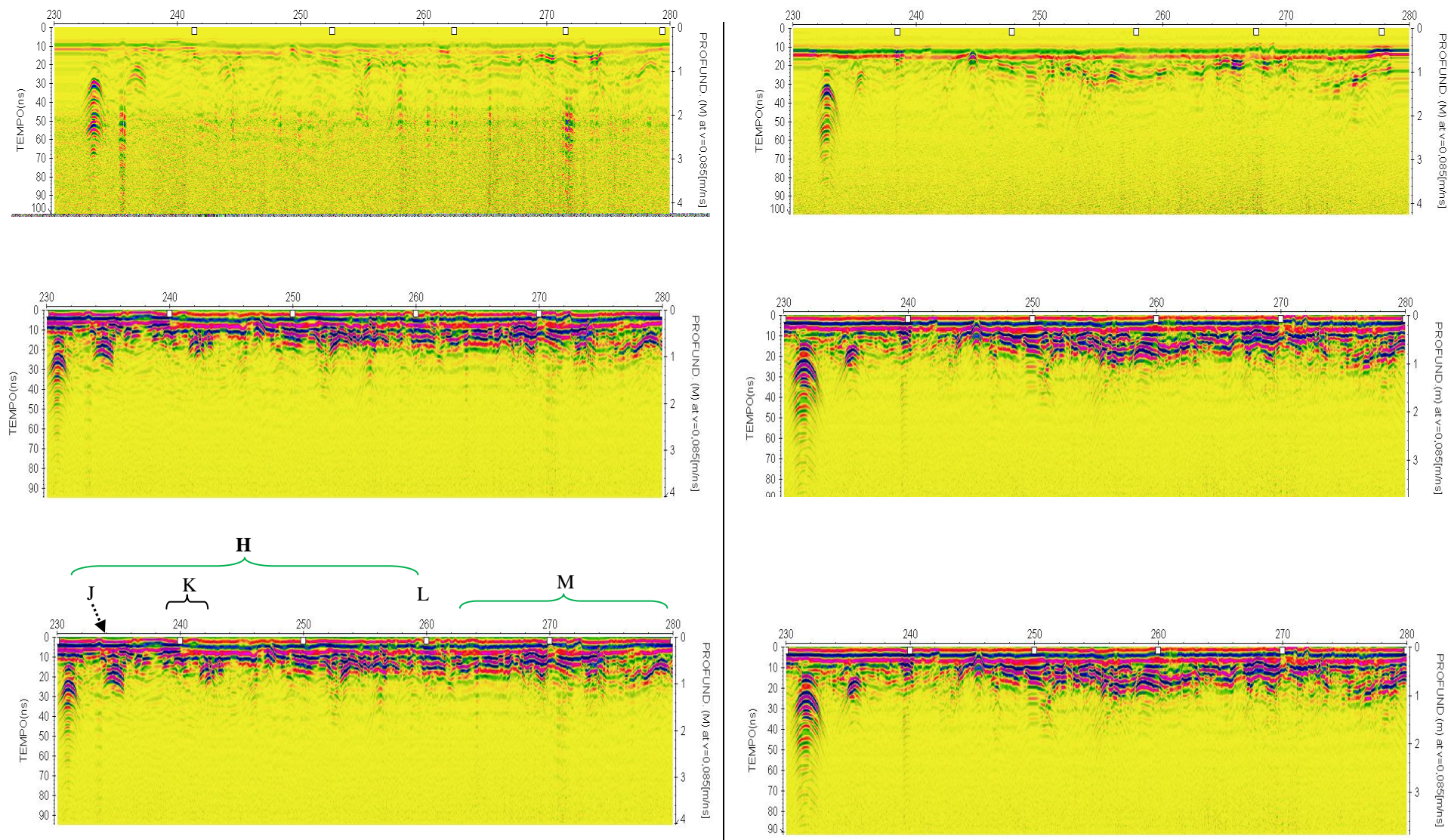


Figura 4.25 Trecho 230-280NE. Radargramas bruto (topo), processado (meio) e interpretado (base) obtidos nas marés baixa (lado esquerdo) e alta (lado direito).

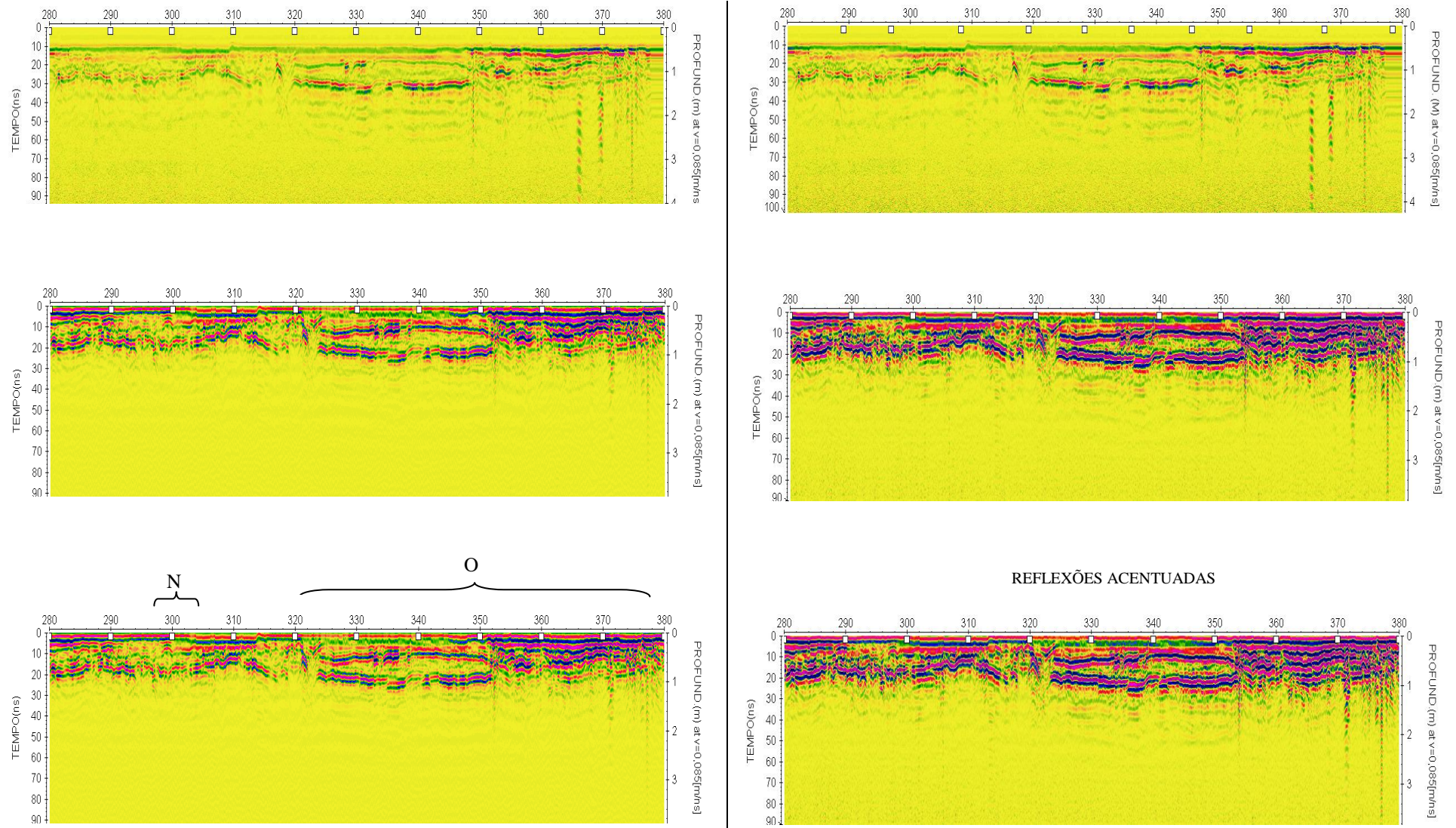


Figura 4.26 Trecho 280-380NE. Radargramas bruto (topo), processado (meio) e interpretado (base) obtidos nas marés baixa (lado esquerdo) e alta (lado direito).

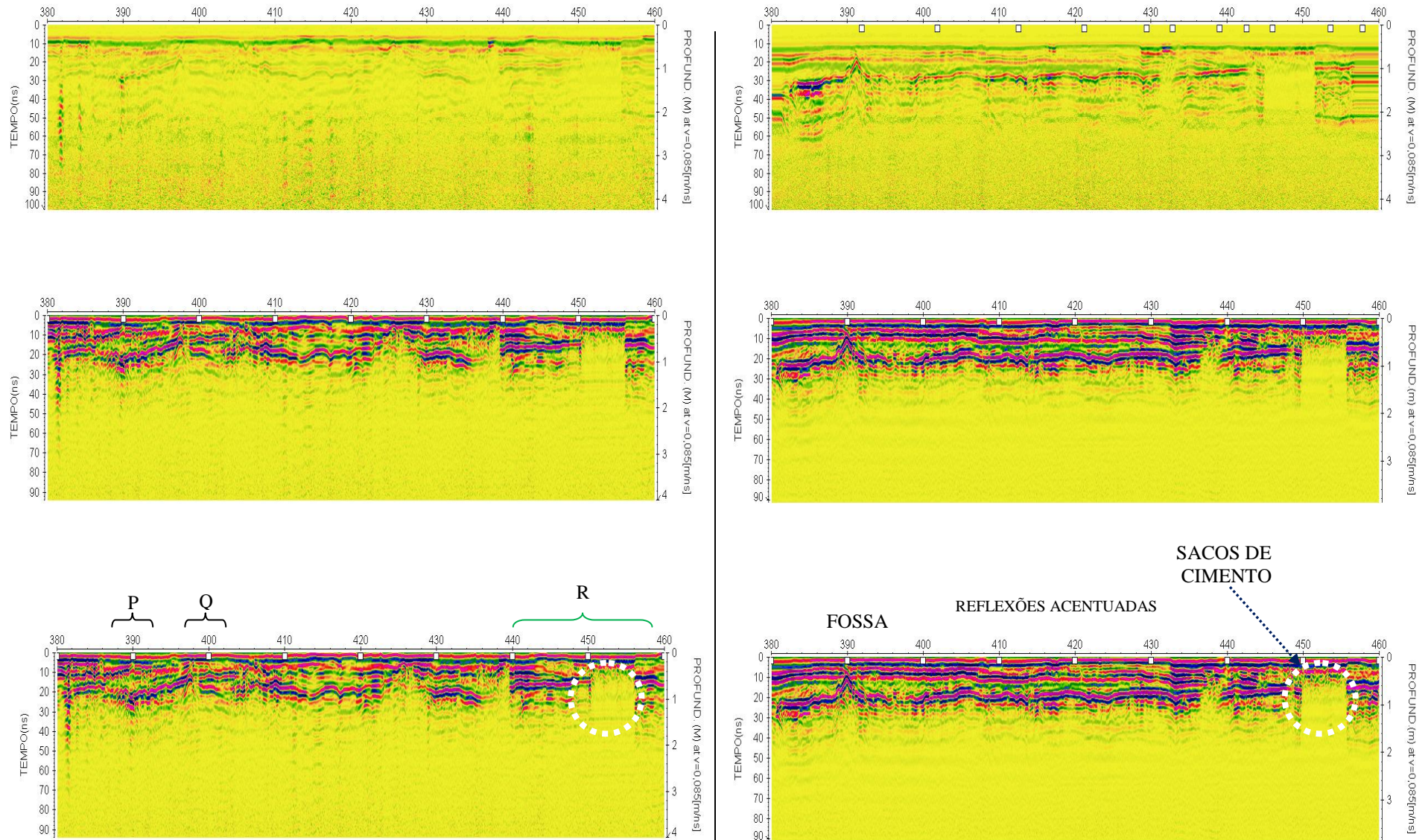


Figura 4.27 Trecho 380- 460NE. Radargramas bruto (topo), processado (meio) e interpretado (base) obtidos nas marés baixa (lado esquerdo) e alta (lado direito).

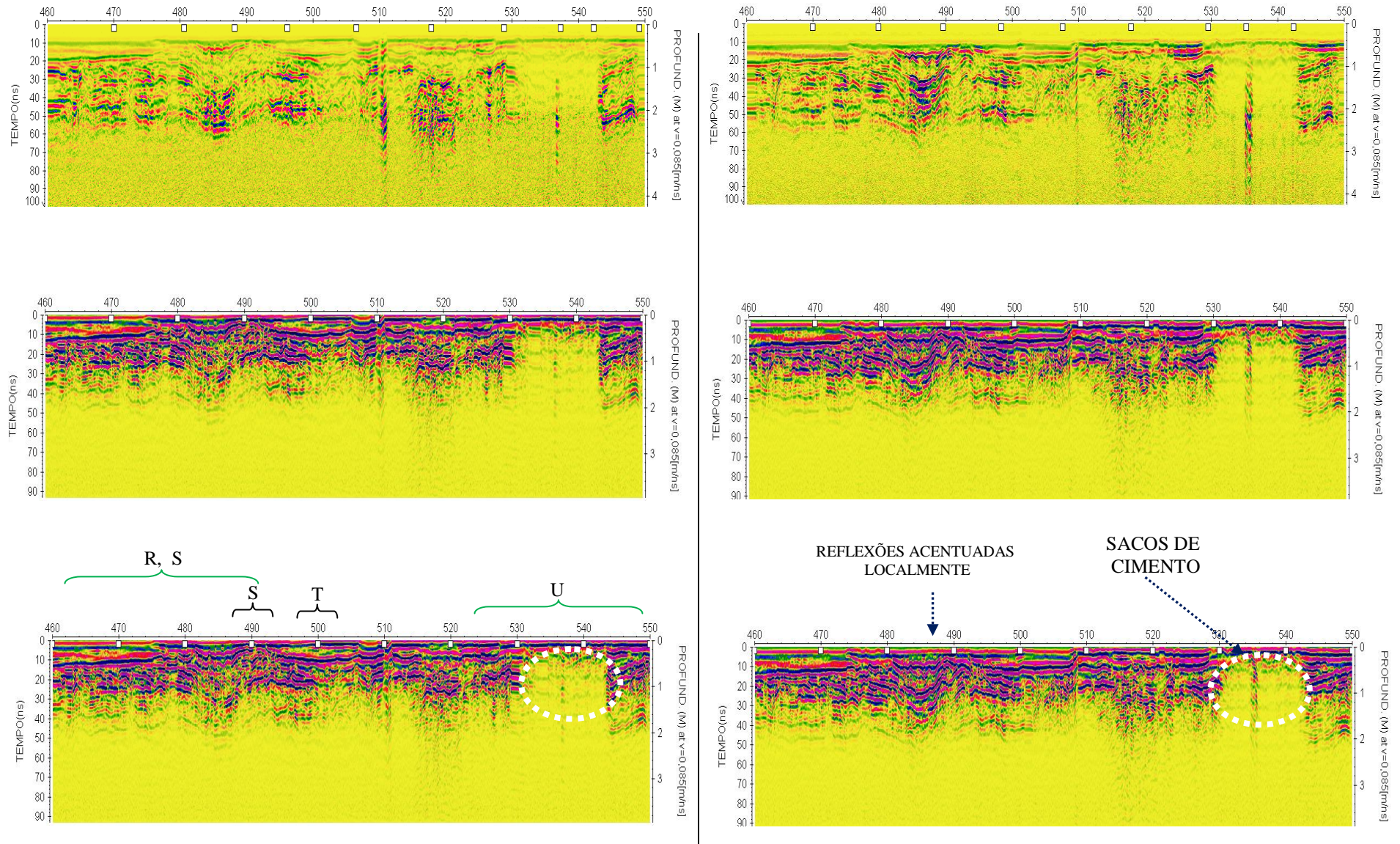


Figura 4.28 Trecho 460-550NE. Radargramas bruto (topo), processado (meio) e interpretado (base) obtidos nas marés baixa (lado esquerdo) e alta (lado direito).

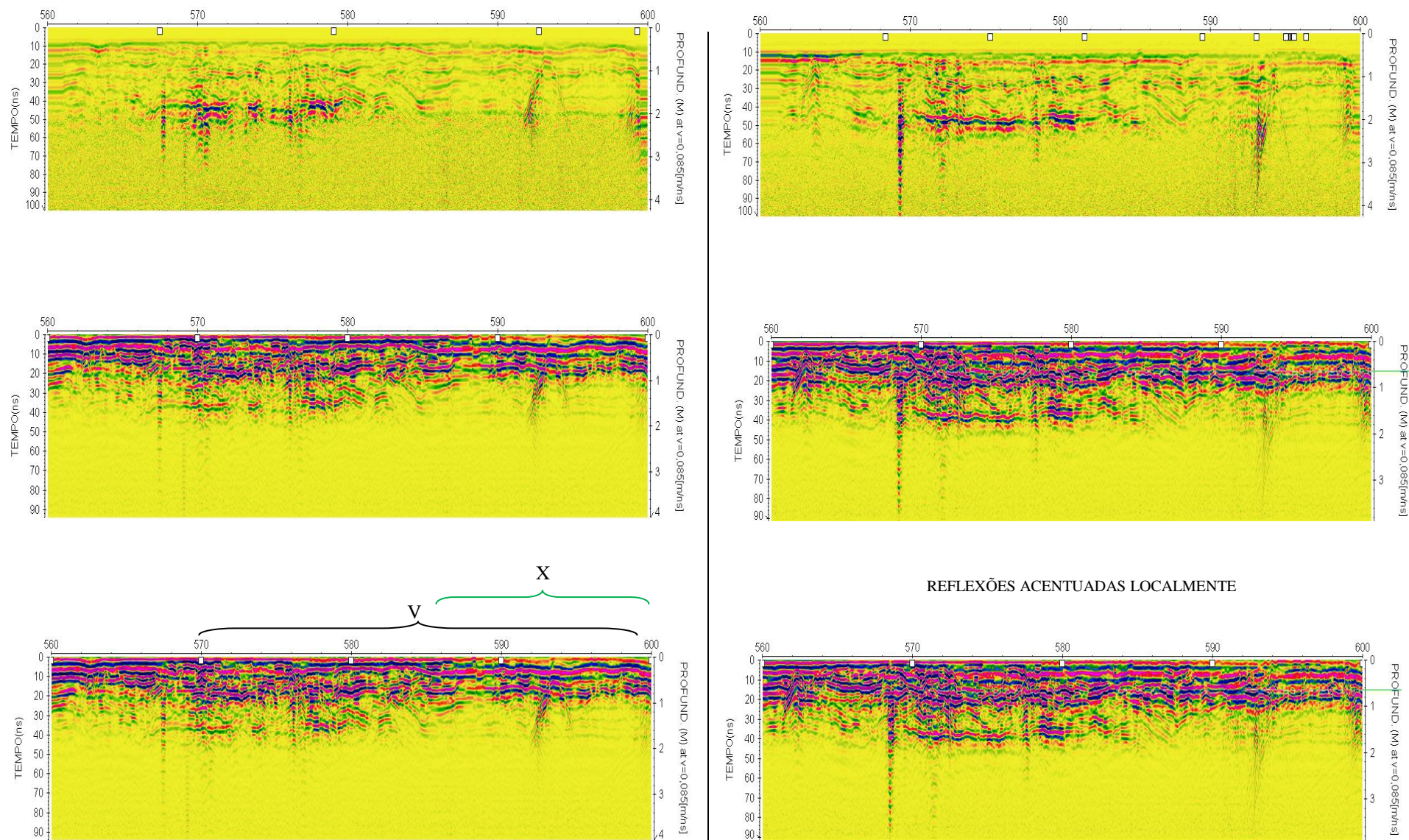


Figura 4.29 Trecho 560-600NE. Radargramas bruto (topo), processado (meio) e interpretado (base) obtidos nas marés baixa (lado esquerdo) e alta (lado direito).

#### 4.2.5.2 Blocos Diagramas (3D)

A partir de no mínimo três radargramas processados, é possível com o programa utilizado criar uma imagem 3D da área sob investigação.

As figuras 4.30 a 4.39 mostram as imagens 3D obtidas para as três áreas levantadas, PX, PY e PZ para sete profundidades: 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1; 1,25 e 1,5 m. No lado esquerdo dessas figuras aparecem os blocos diagramas obtidos na maré baixa e no lado direito, àqueles referentes à maré alta. No topo e na porção intermediária dessas figuras são mostrados os blocos diagramas das áreas PX e PY, que sofreram os efeitos erosivos de uma forma muito crítica, enquanto na base dessas figuras, os blocos diagramas para a área PZ, distante dos efeitos erosivos.

Os blocos diagramas permitem a interpretação tridimensional por meio do volume completo bem como de cortes em qualquer uma das direções. É especialmente indicado na investigação de eventos com continuidade em alguma direção, que é o objetivo deste trabalho, porque sendo a permissividade elétrica relativa da água muito maior que a dos materiais geológicos, a resposta do GPR é extremamente sensível ao conteúdo da água do meio.

A Figura 4.30 mostra que a 0 m de profundidade, na maré baixa, predominam valores de amplitude negativa intermediária (cor verde). Na maré alta, a área PX apresenta valores de amplitude negativos elevados (cor azul) que refletem a presença de água, pois o levantamento no dia 3 de junho de 2010 foi realizado cerca de 40 minutos após chuva, mascarando possíveis eventos com continuidade em alguma direção. Já na área PY, em maré alta, amplitudes negativas elevadas (azuis) acompanham a borda SE que ladeia a porção erodida pelo rio. A área PZ em maré alta não mostra evento que mereça destaque, sendo que algumas mudanças nos valores de amplitude podem estar relacionadas com infiltração favorecida por rachaduras na pista.

A Figura 4.31 mostra que a 0,25 m de profundidade, na maré baixa, aparecem eventos perpendiculares à margem SW-NE do rio, em especial na direção erodido entre 120 e 130NE, que se destaca ainda mais no bloco diagrama obtido na maré alta. Na área PY, a feição se destaca no bloco diagrama obtido com os dados de maré baixa e, especialmente, naquele para a maré alta é paralela à margem SW-NE do rio. Na área PZ, as feições são paralelas às bordas da pista, destacando-se aquelas nas bordas, que é onde há fraturas na pista.

A Figura 4.32 mostra que a 0,50 m de profundidade, as direções dos eventos permanecem as mesmas. Destaca-se, com amplitude 0 (amarelo), a porção da contenção com sacos de cimento na área PY.

As Figuras 4.33, 4.34 e 4.35 mostram em detalhe, respectivamente, as áreas PX, PY e PZ para profundidade de 0,50 m. Em cada uma dessas figuras, o topo do bloco diagrama é mostrado acima e as seções ao longo do perfil e perpendicular ao mesmo, respectivamente, à esquerda e à direita na base da figura. Um círculo branco nas duas seções marca uma mesma posição a título de referência.

A Figura 4.33 mostra o efeito da canalização entre 110 e 120 NE na área PX, marcada, inclusive, pela hipérbole mostrada na seção ao longo do perfil, como possível componente facilitadora da erosão, devido à heterogeneidade nas amplitudes que provoca. A linearidade da canalização não é obtida devido a erros minúsculos no posicionamento provocados pelo trabalho ter sido realizado no tempo (sem uso da roda odométrica). Abaixo dessa profundidade de 0,50 m, a seção evidencia acamamento rico em irregularidades.

A Figura 4.34 permite observar em detalhe o efeito da contenção em cimento entre 445 e 452 NE na área PY.

A Figura 4.35 mostra detalhe da área PZ, em que a continuidade do acamamento se destaca e a atenuação do sinal logo após sugerem a presença de uma camada de argila.

Na Figura 4.36, obtida para 0,75 m de profundidade, destaca-se: na área PX, a redução da possível infiltração relacionada à tubulação existente em 115 NE; na área PY, a ampliação da área com amplitudes negativas elevadas (azul) na área mais próxima ao rio, sugestiva de infiltrações na zona com a contenção em cimento, e, na área PZ, a perda do sinal do radar provavelmente pela presença de argila.

Na Figura 4.37, obtida para 1 m de profundidade, observa-se na área PX a heterogeneidade dos sinais tem a direção perpendicular ao perfil; na área PY, a amplificação da amplitude negativa elevada (azul) entre 450 e 460 NE na borda mais próxima à margem do rio durante a maré alta pode ser indicativa de infiltrações na parte erodida e, na área PZ, a continuidade da perda do sinal.

Na Figura 4.38 obtida para 1,25m de profundidade, destaca-se a redução de sinais possíveis de infiltração nas áreas PX e, especialmente, PY, e o retorno de algum sinal na área PZ.

Finalmente, na Figura 4.39, obtida para 1,5 m de profundidade, ocorre o declínio generalizado do sinal do GPR, provavelmente devido à presença de argila.

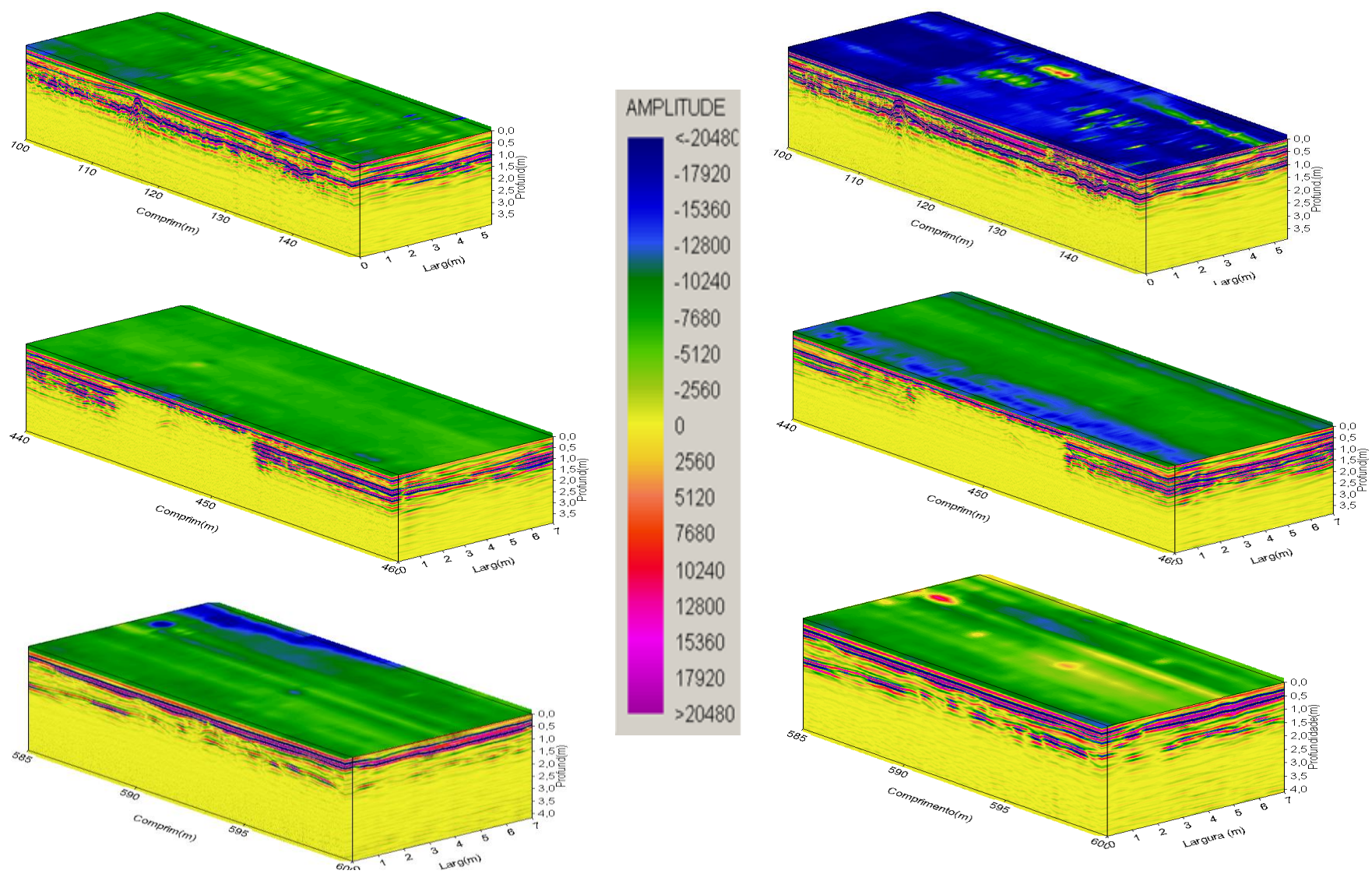


Figura 4.30 – Blocos diagramas. Com topo na profundidade de 0 m para as áreas: PX (topo), PY (meio) e PZ (base) obtidos nas marés baixa (lado esquerdo) e alta (lado direito).



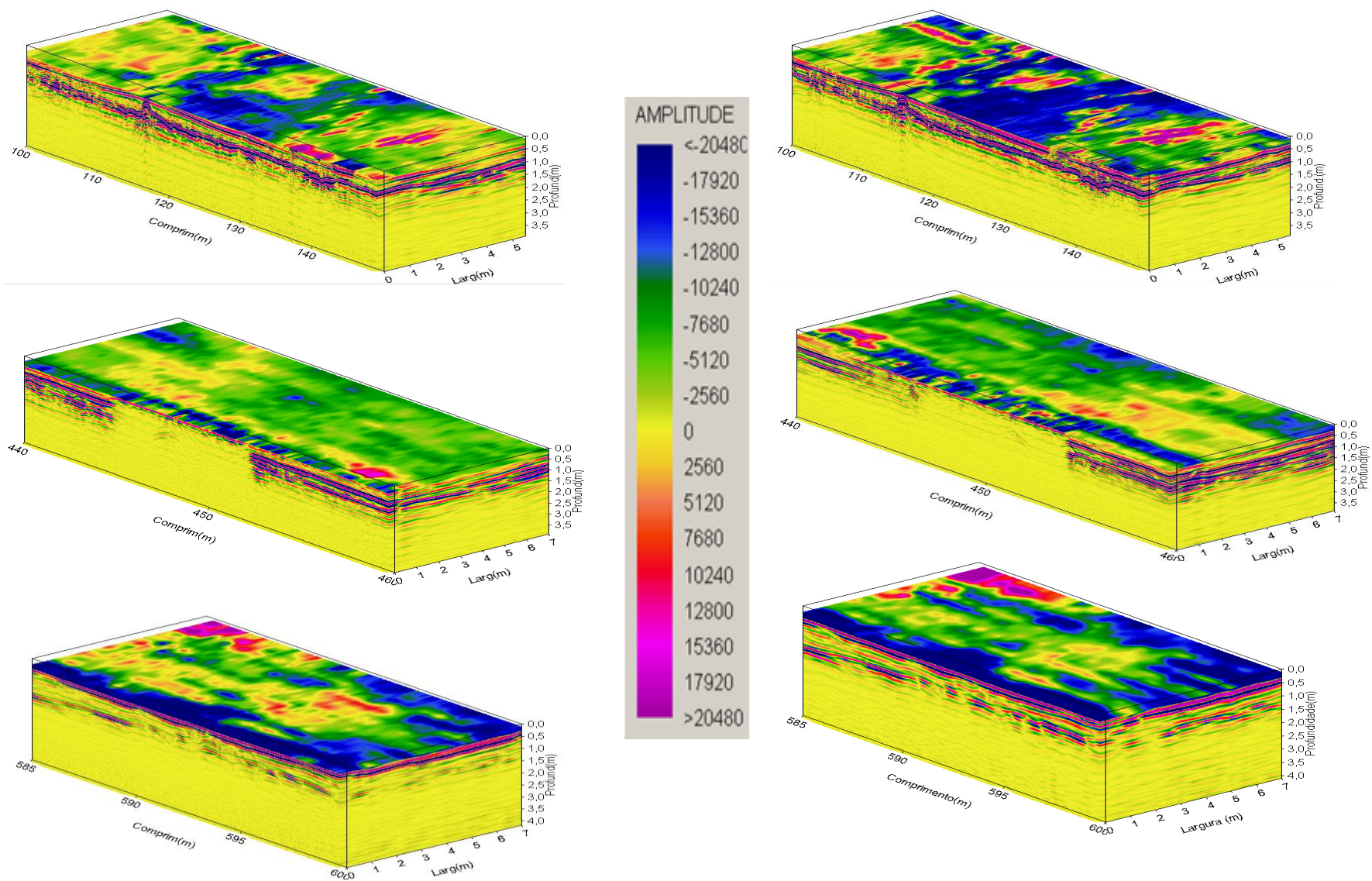


Figura 4.31 – Blocos diagramas. Com topo na profundidade de 0,25 m para as áreas: PX (topo), PY (meio) e PZ (base) obtidos nas marés baixa (lado esquerdo) e alta (lado direito).

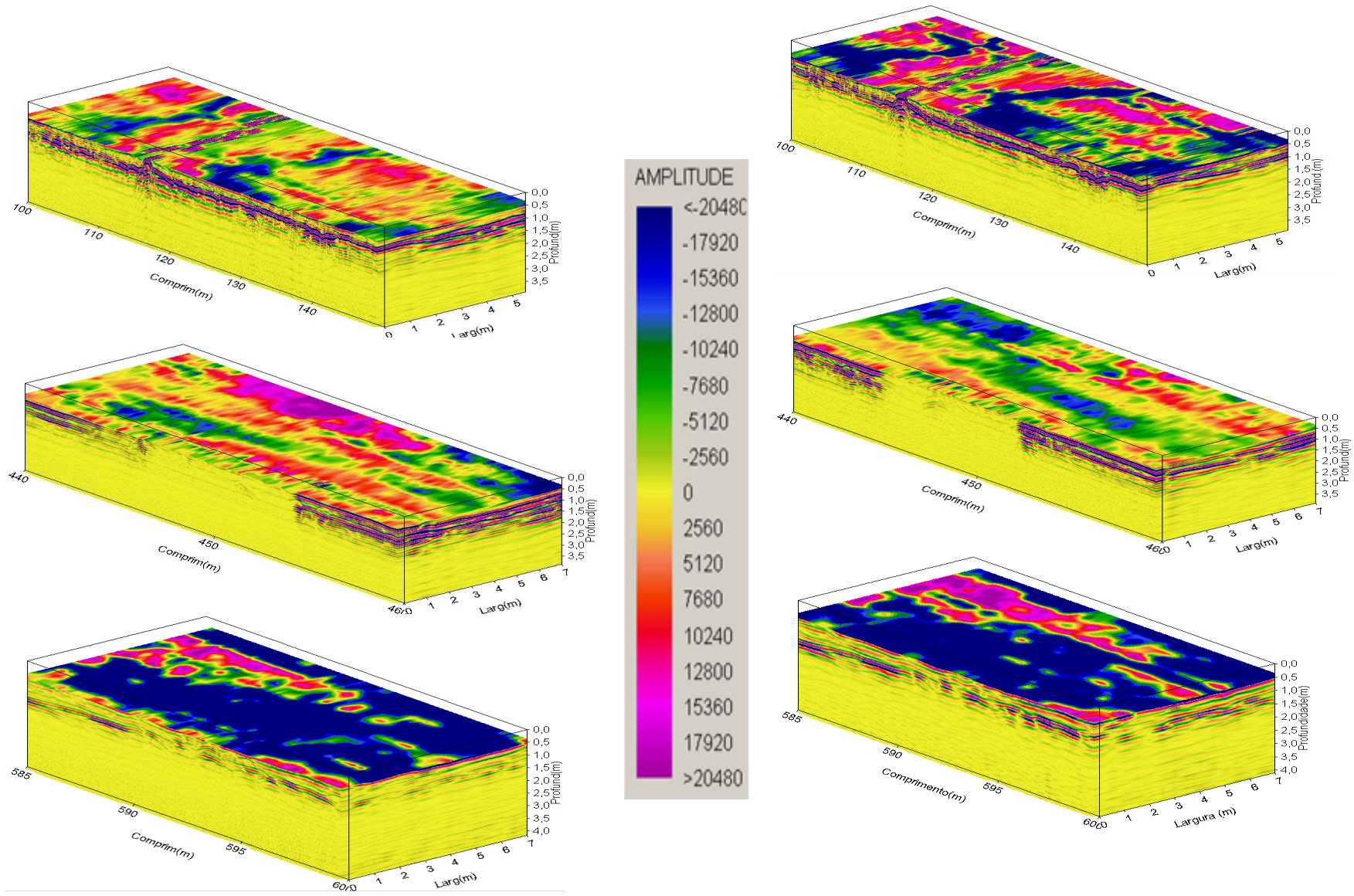


Figura 4.32– Blocos diagramas. Com topo na profundidade de 0,50 m para as áreas: PX (topo), PY (meio) e PZ (base) obtidos nas marés baixa (lado esquerdo) e alta (lado direito).

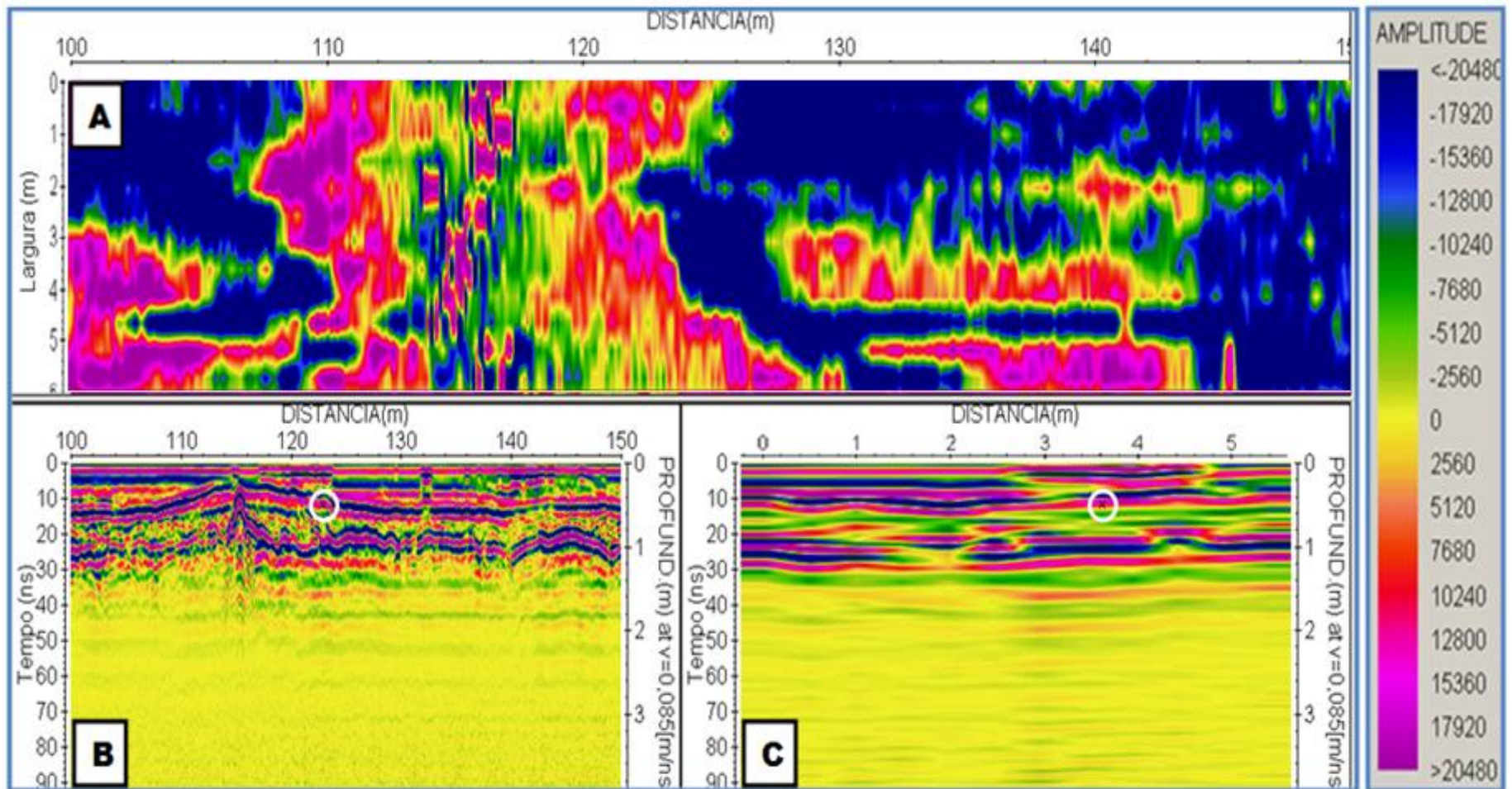


Figura 4.33 A – Vista de topo da área PX a 0,50 m de profundidade, em maré alta, em B – uma seção ao longo do perfil. C – Seção perpendicular ao perfil 13. O círculo marca uma mesma posição para referência.

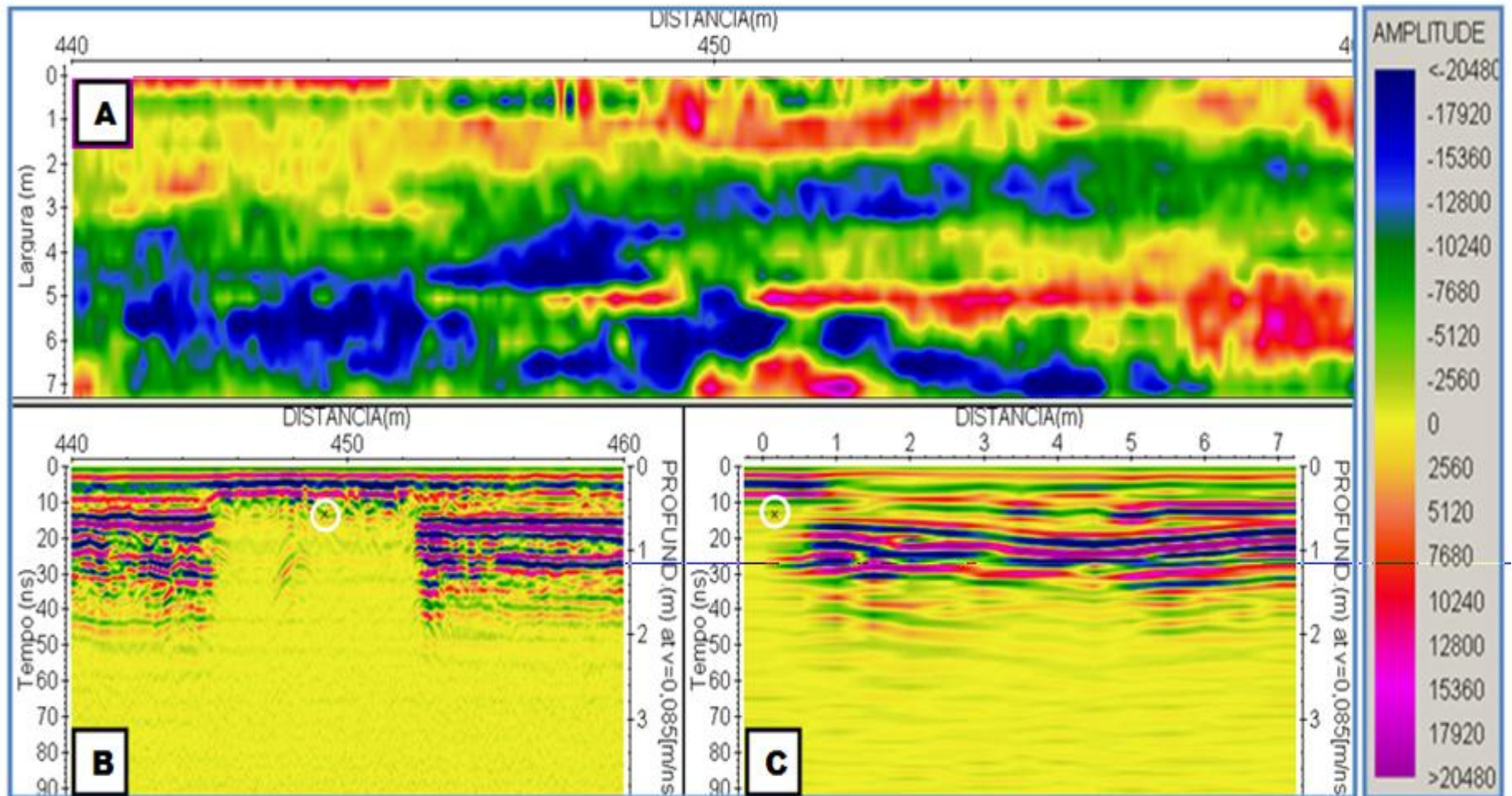


Figura 4.34 A – Vista de topo da área PY a 0,50 m de profundidade, em maré alta, em B – uma seção ao longo do perfil. C – Seção perpendicular ao perfil 13. O círculo marca uma mesma posição para referência.

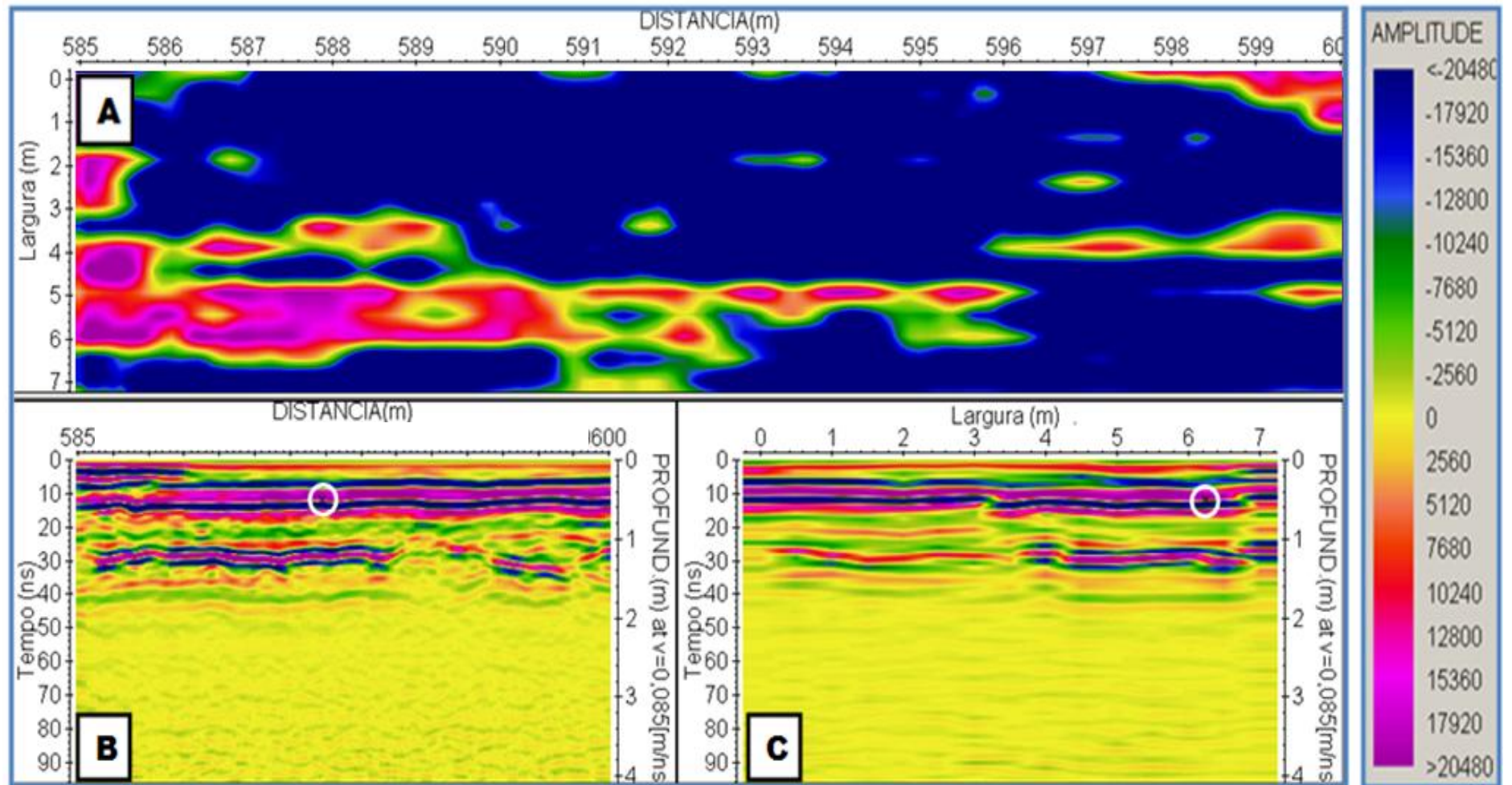


Figura 4.35 A – Vista de topo da área PZ a 0,50 m de profundidade, em maré alta, em B – uma seção ao longo do perfil. C – Seção perpendicular ao perfil 13. O círculo marca uma mesma posição para referência.

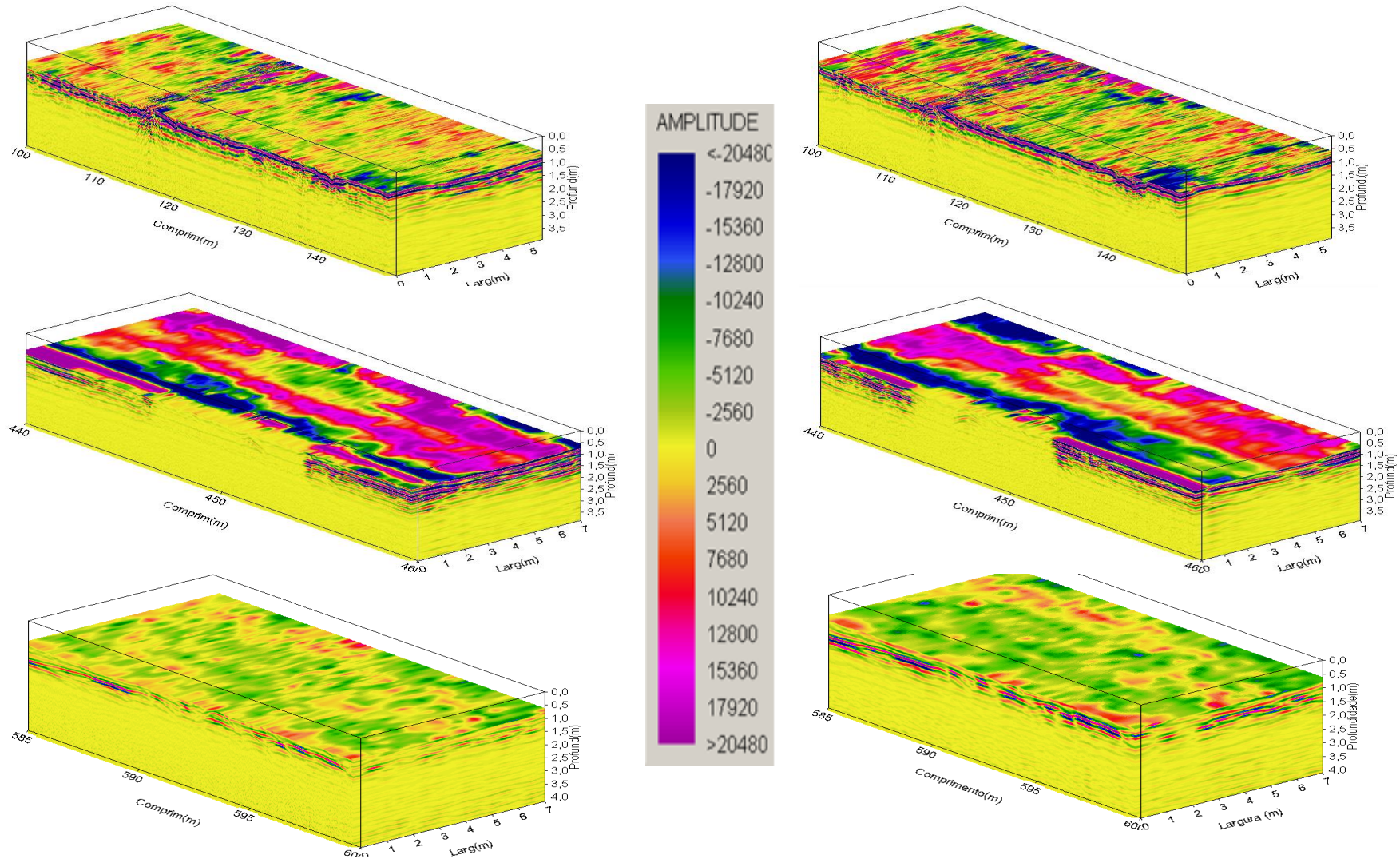


Figura 4.36 Blocos diagramas. Com topo na profundidade de 0,75 m para as áreas: PX (topo), PY (meio) e PZ (base) obtidos nas marés baixa (lado esquerdo) e alta (lado direito).

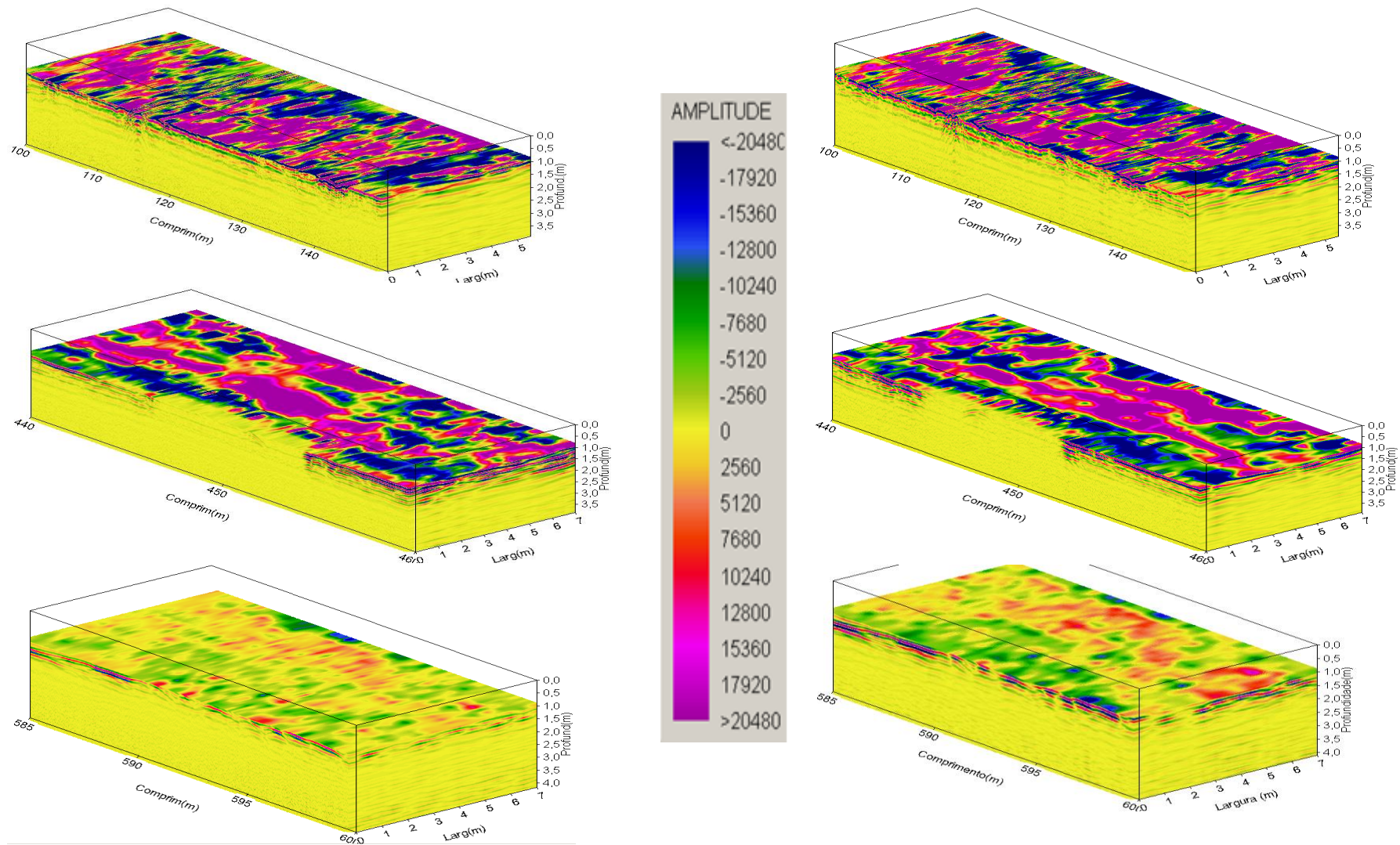


Figura 4.37 Blocos diagramas. Com topo na profundidade de 1,0 m para as áreas: PX (topo), PY (meio) e PZ (base) obtidos nas marés baixa (lado esquerdo) e alta (lado direito).

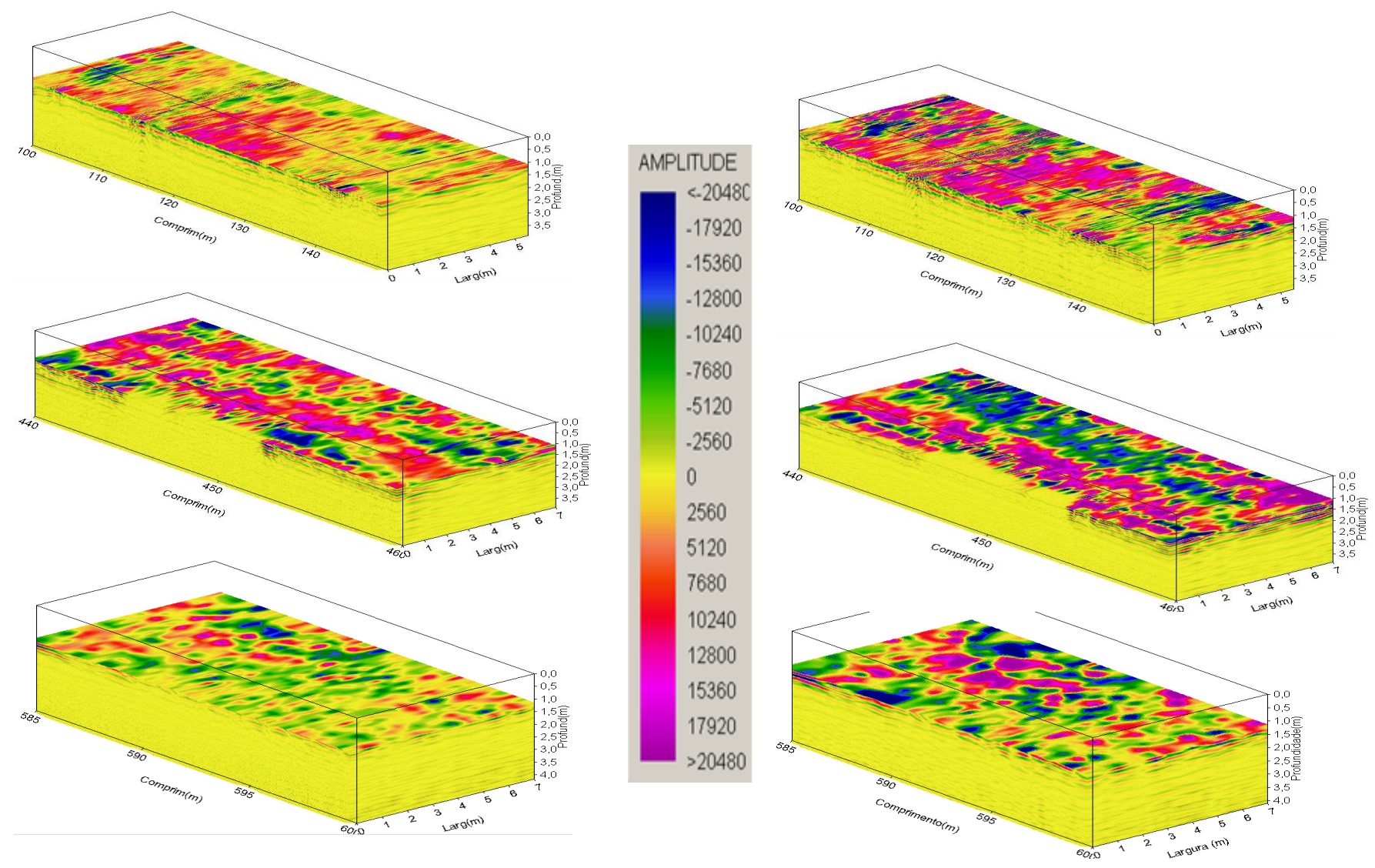


Figura 4.38 Blocos diagramas. Com topo na profundidade de 1,25 m para as áreas: PX (topo), PY (meio) e PZ (base) obtidos nas marés baixa (lado esquerdo) e alta (lado direito).



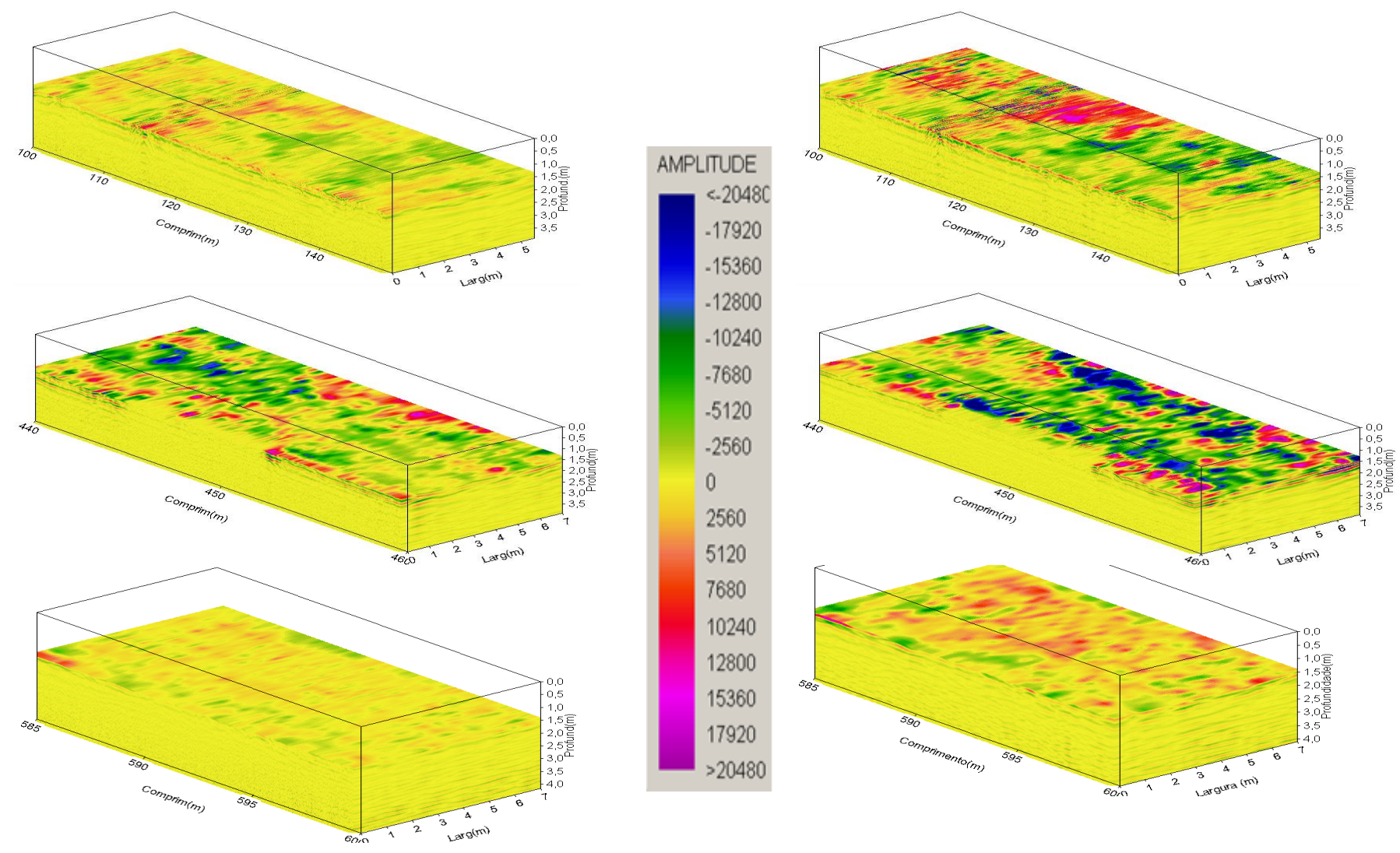


Figura 4.39 Blocos diagramas. Com topo na profundidade de 1,5 m para as áreas: PX (topo), PY (meio) e PZ (base) obtidos nas marés baixa (lado esquerdo) e alta (lado direito).

## 5. INTEGRAÇÃO DE RESULTADOS E CONCLUSÕES

Neste trabalho introduz-se, de forma inédita, a investigação do efeito da erosão na orla de rio por meio da Geofísica.

A investigação teve como base o levantamento de medidas tanto na maré baixa com na maré alta e a comparação entre os resultados, como forma de rastrear a penetração de água no terreno trazido pela maré alta, tanto maior quanto mais efetivo o caminho introduzido pelo fenômeno da erosão.

Na área investigada aparece a erosão e, localmente, diferentes tipos de contenção, o que torna a mesma um campo de testes para a modelagem em escala real geológica.

Os resultados obtidos com todos os métodos geofísicos utilizados – Potencial Espontâneo (SP), Eletrorresistividade, Slingram (LIN) e Radar de Penetração do Solo (GPR) – mostram que os dados obtidos em maré alta variam consideravelmente em relação aos dados obtidos em maré baixa e que seus comportamentos indicam zonas onde a erosão é mais proeminente e zonas onde a mesma mostra-se contida. Essas indicações podem auxiliar consequentemente, na previsão de locais onde o desmoronamento do terreno provocado pela erosão está prestes a ocorrer bem como na análise da eficácia da obra de contenção realizada.

A Tabela 5.1 reúne observações realizadas sobre o efeito global da maré e especificamente, sobre zonas com erosão e zonas com contenção da erosão.

As medidas SP, na zona Z1 (75-150NE) (Figura 3.5), por exemplo, formam um pico negativo da voltagem (positivo da voltagem espelhada) por volta de 85NE, que, segundo a Tabela 5.1, poderia ser reflexo da atuação de erosão, podendo indicar uma zona com desmoronamento eminente. O mesmo ocorre na zona Z3 (292-427NE) (Figura 3.5), em especial por volta de 370-385NE. Neste trecho ocorreu desmoronamento após o trabalho de campo, por volta de 380NE.

Com relação à eletrorresistividade, o trecho 104-170NE (Figura 3.11), por exemplo, apresenta zona resistiva coincidindo com zona com contenção e zona condutiva, com zona de erosão. De um modo geral, a Eletrorresistividade apresenta-se mais sensível à indicação da penetração e água e, por esse meio, das zonas mais susceptíveis à erosão bem como das zonas com contenção adequada.

O LIN, por sua vez, não permitiu uma profundidade de investigação adequada ao trabalho.

Finalmente, o trecho 460-550NE levantado com o GPR (Figura 4.28) mostra atenuação do sinal entre 520 e 550NE devido à contenção com cimento e manutenção do sinal entre

460-490NE devido à contenção com muro; acentuações locais do sinal podem indicar onde a contenção perde em eficácia.

Tabela 5.1 Integração dos resultados obtidos. MB e MA: marés alta e baixa.

<b>Método</b>	<b>Efeito Global da Maré</b>	<b>Zona com Erosão</b>	<b>Zona com Contenção</b>
<b>SP</b>	- Aumento das oscilações nas medidas	- Redução da voltagem (aumento da voltagem espelhada) em relação às medidas MB bem como ao BG das próprias medidas MA - Ocasionalmente, aumento da voltagem (redução da voltagem espelhada) especialmente nas bordas das zonas anteriores.	- Aumento da voltagem (redução da volt.esp.) em relação às medidas MB
<b>Eletrorresistividade</b>		- Diminuição da resistividade	- Aumento da resistividade
<b>LIN</b>		Profundidade inadequada à investigação.	
<b>GPR</b>	- Aumento na intensidade das reflexões	- Aumento na intensidade das reflexões - Perturbação da continuidade dos refletores	- Pode atenuar o sinal - Pode ser menos afetada pelo efeito global da maré

O problema, contudo, não é simples, porque a água infiltrada no solo a partir da superfície pode ser dividida em três partes. A primeira permanece na zona não saturada (zona onde os vazios do solo estão parcialmente preenchidos por água e ar), acima do nível freático. A segunda parte, denominada interfluxo (escoamento sub-superficial) pode continuar a fluir lateralmente, na zona não saturada, a pequenas profundidades, quando existem níveis pouco permeáveis imediatamente abaixo da superfície do solo e alcançar os leitos dos cursos d'água. A terceira parte pode percolar até o nível freático constituindo os recursos renováveis dos aquíferos (FEITOSA, 2000). Todos esses são, portanto, caminhos que podem oferecer contraste nas propriedades elétricas. Os caminhos preferenciais da água subsuperficial podem também representar rotas para a entrada de água trazida pela maré alta e, por esse meio, para o trabalho erosivo. É necessário considerar também que variações litológicas dão também sua contribuição aos dados. Finalmente, para a área estudada, que ela se encontra com eventos de erosão com contenção, às vezes, diversa.

A despeito das dificuldades, os resultados confirmam que a Geofísica pode ser uma ferramenta auxiliar na previsão de locais onde o desmoronamento do terreno provocado pela erosão está prestes a ocorrer bem como na análise da eficácia da obra de contenção realizada.

A despeito das contenções mais efetivas, temos o trecho 150 – 180 NE e 205 a 260 NE, sendo esta última a menos suscetível a desmoronamentos.

Contrariamente, os trechos mais suscetíveis à desmoronamentos são 80 – 140 NE, 180 – 200 NE, 440 - 460 NE e 520 – 550 NE, sendo as duas últimas já afetando a pista com várias rachaduras. Em todos esses trechos observamos contenções com sacos de cimento que não são suficientes para conter o efeito da erosão.

As contenções de cimento tem apresentado várias alterações e desagregação dos sacos de cimento, muitas vezes ocasionados devido aos efeitos da maré e chuvas constantes onde o cimento exposto vai se deteriorando e se soltando dos demais, não sendo uma obra efetiva ao longo do tempo, somente uma medida paliativa.

## 6. RECOMENDAÇÕES

Os resultados apresentados nesta pesquisa inicial sobre a detecção de áreas degradadas pela erosão mais suscetíveis ao seu desmoronamento sugerem que é relevante a continuidade dos trabalhos. É, portanto, conveniente apresentar recomendações para o aprimoramento desse tipo de pesquisa, o que é a seguir apresentado.

- i) Realizar maior número de furos para obtenção de amostras para a análise granulométrica e cálculo da erodibilidade, para usar na comprovação dos resultados geofísicos a serem obtidos.
- ii) Usar o GPR com odômetro e realizar a modelagem numérica do problema com diferentes variáveis.
- iii) Usar equipamento de Slingram/LIN de menor penetração do que o utilizado.
- iv) Utilizar equipamento de SP com multi-eletrodos, amostrando ao longo do tempo.
- v) Usar equipamento de eletrorresistividade com maior número de eletrodos e maior poder de penetração em ambiente com camadas ricas em argila.
- vi) Avaliar a utilidade de outras metodologias geofísicas para o problema.
- vii) Ao invés de levantar um perfil paralelo à orla, levantar um pequeno número de perfis para avaliar a continuidade das informações bem como obter imagens tridimensionais da subsuperfície.
- viii) Levantar outros locais que apresentam o mesmo problema, como ocorre em vários trechos da orla de Icoaraci e Mosqueiro, cujos desmoronamento, carregando calçada e pavimento asfáltico são frequentemente consertados pela Prefeitura.
- ix) Por último, avaliar a possibilidade de testar o trabalho em encosta, substituindo a amostragem em maré-alta e maré-baixa por amostragem no verão e no inverno.

Para o estudo da eficácia da obra de contenção podem ainda ser recomendados:

- x) Realizar o levantamento ao longo do tempo,
- xi) Estudar com diferentes métodos geofísicos zonas com vários tipos de contenção, construídas em nível de teste;
- xii) Realizar furos para obtenção de amostras para a análise granulométrica e cálculo da erodibilidade, para usar na comprovação dos resultados geofísicos a serem obtidos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AUGUSTIN, C.H.R.R. & ARANNHA, P.R.A. Timbó-Elmiro ET AL. A ocorrência de pipes descontínuos em Gouveia MG, Brasil, detectado com o auxílio do Ground Penetrating Radar (GPR). Anais do XI Congresso Latino americano de Geologia, Montevidéu, Uruguai, CD-ROM: n° 275(pdf), 2001.

BERTONI, J. & LOMBARDI NETO, F. – Conservação do Solo. Piracicaba/SP: Livroceres, 1985.

BRAGA, A.C.O. Métodos Geométricos Aplicados na Caracterização Geológica e Geotécnica – Formações Rio Claro e Corumbataí, no Município de Rio Claro – SP. Tese de Doutorado em Geociências, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, 1997.

CARVALHO JR., M. A. F. 1997. Aplicação de Métodos Geofísicos ao Estudo de Águas Subterrâneas na Grande Belém (Cemitério do Bengui). Belém, DGF/CG/UFGPA. TCC. 64 p.

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.

DALRYMPLE, R.W.; CHOI, K. Morphologic and fácies trends through the fluvial. Earth-Science Reviews, n. 81, p. 135-174, 2004.

DAMASCENO, F. F. Levantamento Geofísico do Cemitério do Tapanã. 2001. 67 p. Trabalho de Conclusão de Curso. DGF/CG/UFGPA, Belém, 2001.

BARREIRA, C.; DINIS, P. & FIGUEIREDO, F.P.O. - Estudo das plumas de contaminação provocadas por cemitérios da Fonte de Angeão, Vagos. In: 9º Congresso da Água, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos. Estoril, 24/04/2008.

FEITOSA, FERNANDO A.C. (2000) Hidrogeologia – Conceitos e Aplicações 2ª edição, Fortaleza: CPRM, 2000

GEONICS. Geonics Limited. Technical Note TN -6 Eletromagnetic Terrain. Conductivity Measurement At Low Induction Numbers, 1980.

GEONICS. Geonics Limited, Leaders Eletromagnetics. EM34-3/EM34-3XL. Operating Instructions, 2005.

GEONICS. Geonics Limited, Leaders Eletromagnetics. EM34-3/EM34-3XL. Disponível em: < <http://www.geonics.com/html/em34-3.html>>, acessado em 28/03/2010.

GEOTOMO SOFTWARE. Geoelectrical Imaging 2D & 3D. Disponível em [www.geoelectrical.com](http://www.geoelectrical.com)., 2007.

GREGÓRIO, A.M.S.; MENDES, A. C. Batimetria e Sedimentologia da Baía de Guajará, Belém, Estado do Pará, Brasil, revista Amazônia, Cia e Desenvolvimento, v. 5, n. 9, julh./dez. 2009.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. – Rede de Monitoramento de Eventos Extremos na Amazônia. Dados diários de precipitação pluviométrica em Belém, estação convencional do INMET. Belém, 2010.

KELLER, V. G; FRISCHKNECHT, F. C. Electrical Methods in Geophysical Prospecting. Oxford, Pergamon Press. 517 p. 1966.

LUIZ, J. G. Métodos eletromagnéticos. Belém, 1998. 8p. (Notas de aula).

MACEDO, R. S. et all. Índice de erosividade das chuvas em Coari-AM. In: XXXI Congresso Brasileiro de Ciência do solo, de 05 a 10 de agosto. Gramado-RS: Centro de Convenções, 2007.

MERCÊS, S. Relatório Ambiental da Região Metropolitana de Belém- RMB. Belém: COHAB, 1997.

MIRANDA, A. G. Dinâmica batimétrica da Baía de Guajará (Belém/PA). 2006. 49 f. Monografia (Bacharelado em Oceanografia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, 2006.

MATTA, M.A.S. Fundamentos hidrogeológicos para a gestão integrada dos recursos hídricos da região de Belém/Ananindeua – Pará, Brasil. 2002. 292 f. Tese (Doutorado em Geologia) - Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém, 2002

NASCIMENTO, W.G.: Investigação Geofísica Ambiental e Forense nos Cemitérios do Bengui e do Tapanã (Belém – PA); Dissertação de Mestrado; Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará; 2009

NUNES, Lana Patrícia Martins Caracterização geolétrica da área de curtume localizado no Distrito Industrial de Icoaraci, Belém-Pará; Dissertação de Mestrado; Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará; 2005

ORELLANA, E. Prospeccion Geoelectrica por Campos Variables. Madri, Paraninfo, p.561 1974.

PARASNIS.D.S.1989. In Memoriam Sture Werner (1908 – 1989). *Geoexploration*, 26(3): 73.

PINHEIRO, R. V. L. Estudo Hidrodinâmico e Sedimentológico do Estuário Guajará Belém (PA). Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 164p. (Dissertação de Mestrado), 1987.

PINTO, W. Disponível em: <[www.ufpa.br/beiradorio/novo/index.php/2007/108-edicao-especial-50-anos-da-ufpa/309-a-fundacao-do-campus-pioneiro-da-ufpa](http://www.ufpa.br/beiradorio/novo/index.php/2007/108-edicao-especial-50-anos-da-ufpa/309-a-fundacao-do-campus-pioneiro-da-ufpa)>, acessado 30/10/2010.

REYNOLDS, J. M. An Introduction to applied and environmental geophysics, John Wiley & Sons Ltd., New York, 1997.

RIJO, L. Electrical Geophysics; 1-D Earth Direct Modeling. [S.I.:s.n.], 2004



ROSSETTI, D.F.; GÓES, A.M. Imagine upper Tertiary to Quaternary deposits from northern Brazil applying ground penetrating radar. *Revista Brasileira de Geociências*, Curitiba, v.31 n. 2, p. 101-128, 2001.

RIBEIRO, H.M.C. Avaliação atual da qualidade das águas superficiais dos lagos Bolonha e Água Preta situados na área fisiográfica do Utinga (Belém-Pa). 1992. 205 f. Dissertação (Mestrado em Geoquímica e Petrologia) – Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém. 1992.

SAUMA FILHO, M. As águas subterrâneas de Belém e adjacentes: Influência da formação Pirabas e parâmetros físico-químicos para medidas de qualidade. 1996. 128 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – UFPA, Centro de Geociências, Belém, 1996.

SECRETARIA DE ESTADO DE PLANEJAMENTO ORÇAMENTO E FINANÇAS- SE-POF. Diretoria de pesquisas e informações sócio-econômicas. Estatística municipal. 2008.

SILVEIRA, O. F. M. Estudo batimétrico/sonográfico do Estuário Guajará, Belém/PA. 1992. 189 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Centro de Geociências, UFPA, Belém, 1992.

SCHLUMBERGER LOG INTERPRETATION CHART. Vol. I, 156 p. Schlumberger Limited, New York, 1975.

XAVIER, N. P. Processamento e Interpretação de Dados 2D e 3D de GPR: Aplicações no Imageamento de Feições Kárticas e Estruturas de Dissolução no Campo de Petróleo de Fazenda Belém – CE. Tese de Doutorado. UFRN, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós- Graduação em Geodinâmica e Geofísica, 2006.

## **ANEXO**

**Fotos de feições observadas na área sob estudo**



**A** – Erosão distante da pista (8 m) entre 0 e 35NE.



**B** – Erosão próximo a 60NE a 3 m da pista.



**C** – Grande árvore aos 90NE, distante 2 m da pista a 1,5 m da erosão.



**D** – Tubulação em 112NE.



**E** – Erosão rente à pista, entre 110 e 145NE, com sacos de cimento entre 117 e 124NE.



**F** – Muro de contenção de 150 a 170NE, distante 4,5 m da pista.



**G** – Erosão de 170 a 205NE (com queda do muro de contenção), distante 2 m da pista.



**H** – Declínio da erosão, com reinício do muro de contenção de 205 a 260NE, a 3,5 m da pista.



**I** – Bambuzal de 215 a 225NE.



**J** – Fossa por volta de 233NE



**K** – Muro de contenção aberto à passagem de água em 240NE:



**L** – Término do muro de contenção em 260NE



**M** – Queda do muro de contenção de 260 a 280NE.



**N** – Bambuzal aos 300NE com tubulação de esgoto passando ao lado, desagregando e provocando erosão, distante a 1m da pista.



**O** – Árvores de grande porte e raízes de 320 a 380NE.



**P** – Tapa de fossa com tubulação saindo do bambuzal em 390NE.



**Q** – Região com três bambuzais, fazendo a compactação do solo com suas raízes em 400NE.





**R** – Região erodida de 440 – 460NE, em: **(I)** maré baixa e **(II)** maré alta. A pista foi reconstruída após o seu desmoronamento e acrescentados sacos de cimento para contenção da erosão. Reinício do muro de contenção aos 460NE



**S** – Término do muro de contenção até cerca de 490NE.



**T** – Fossa atrás do bambuzal próxima aos 490NE.



U – Região erodida 520 a 550NE, com sacos de cimento a 1 m da pista.



V – Bambuzais de 570 a 600NE, fazendo a sustentação do trecho.



X – Região erodida de 585 a 610NE a 4,3 m da pista, com contenção.