

MÉTODO GEOFÍSICO DA ELETRORRESISTIVIDADE PARA LOCALIZAÇÃO DE EROSÃO E PERFIS ALTAMENTE POROSOS CONTENDO ÁGUA

Data de aceite: 01/03/2023

Data de submissão: xx/xx/2022

Gustavo Nogueira Dias

Gilberto Emanuel Reis Vogado

Fernando Roberto Braga Colares

Vanessa Mayara Souza Pamplona

Victor Hugo Chacon Britto

RESUMO: Este trabalho apresenta estudo geofísico de parte de orla fluvial sujeita à erosão com também região com alta porosidade com acúmulo de água e 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. Foi utilizado o método geofísico: Potencial Espontâneo (SP), 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. Através do método utilizado, foi possível averiguar as regiões mais porosas ou seja que contenham mais probabilidade de acúmulo de água. 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.

PALAVRAS-CHAVE: Erosão Fluvial. SP. Geotécnica.

1 | INTRODUÇÃO

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 ρ . A corrente elétrica se distribui uniformemente em todas as direções, desenvolvendo linhas de potencial semiesféricas.

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:

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

em que ∇ é o vetor divergente, 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,

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

permite escrever:

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

Como

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

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:

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

sendo r o raio, θ a longitude e φ a colatitude.

Como existe uma única fonte de corrente e o meio é homogêneo e isotrópico, o potencial não varia com os ângulos θ e φ , 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 semiesfera $2\pi r^2$:

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

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 ∇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 σ pelo seu inverso, a resistividade ρ , 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:

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

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 ∇V entre M e N é dada então por:

$$\Delta V = \rho I K, \quad (3.15)$$

sendo o fator K obtido por meio de:

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

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

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

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

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 ρ_a :

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

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.

TIPO LITOLÓGICO	RESISTIVIDADE (ohm.m)
Argiloso	≤ 20
Argilo-Arenoso	20 a 40
Areno-Argiloso	40 a 60
Siltito Argiloso	10 a 60
Siltito Arenoso	10 a 60
Arenoso	≥ 60
Argilito	10 a 20
Arenito	80 a 200
Basalto/Diabásio	200 a 500
Calcário	500 a 1000
Granito/Gnaisse	3000 a 5000

Tabela 1 Valores de resistividade de alguns tipos litológicos (BRAGA, 1997)

2 | ARRANJOS

Os dados de campo de Eletrorresistividade podem ser obtidos por meio de: caminhamento elétrico (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.

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

Tabela 2 Tipos de Arranjos

3.1 AQUISIÇÃO DOS DADOS

O levantamento dos dados de Eletrresistividade 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.

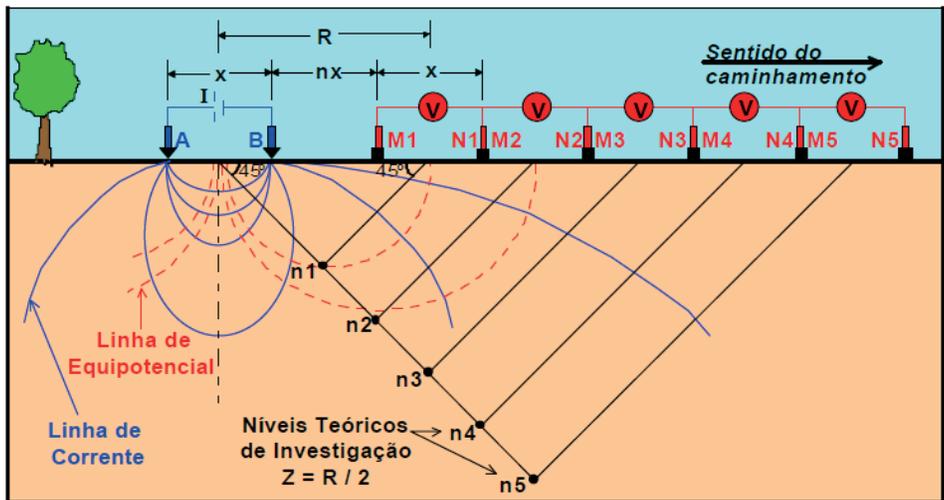


Figura 1 Esquema de configuração para arranjo dipolo-dipolo (BRAGA, 2007).

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.

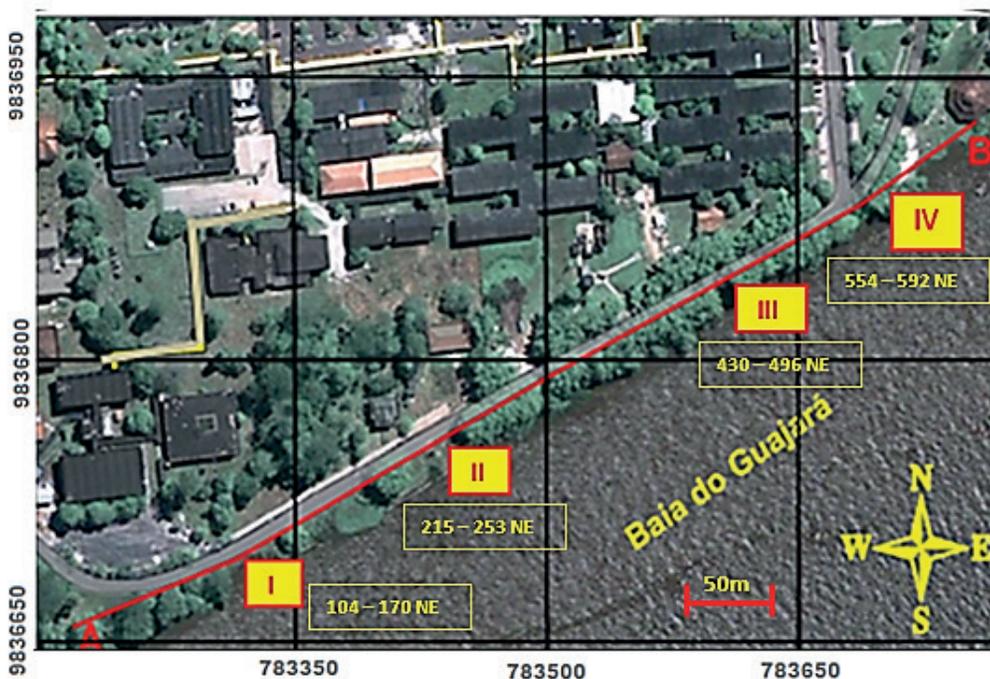


Figura 3. Centros dos quatro levantamentos de Eletrorresistividade



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 6 a 3.16 mostram para cada trecho levantado do perfil as pseudo-seções de r_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. Conseqüentemente, 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 se apresenta bastante sensível à penetração da água, indicativa de erosão.

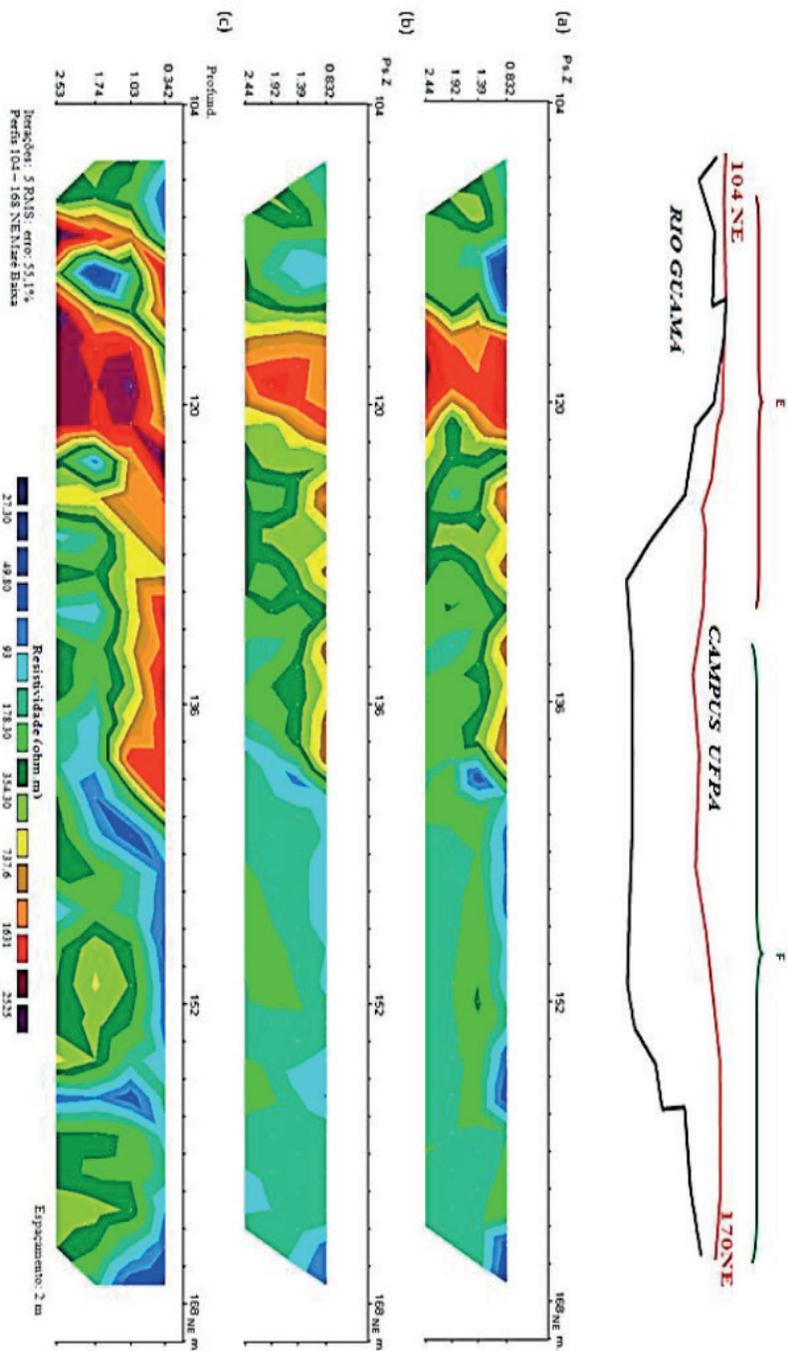


Figura 6. Trecho 104-170 NE. Maré baixa. Pseudo-seção: Resistividade aparente (a) medida, e (b) calculada. (c) Modelo de resistividade obtida com a inversão. Figura acima, fazendo a correlação do contorno do rio, em cor preta e a linha de investigação 104NE a 170NE, em cor vermelha, contida no perfil AB da figura 2.1, com o perfil de eletrorresistividade. Chave vermelha – erosão, chave verde – contenção.

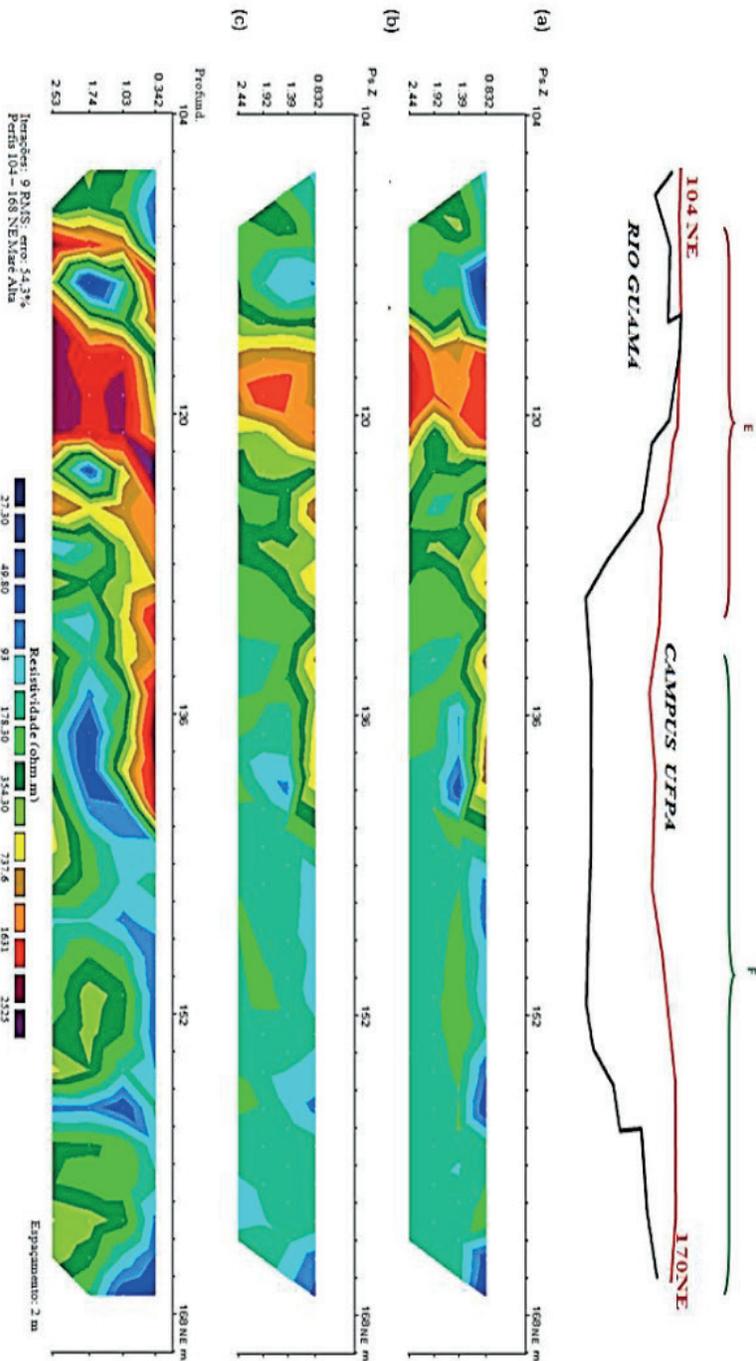


Figura 7 Trecho 104-170 NE. Maré alta. Pseudo-seção: Resistividade aparente (a) medida, e (b) calculada. (c) Modelo de resistividade obtida com a inversão. Figura acima, fazendo a correlação do contorno do rio, em cor preta e a linha de investigação 104NE a 168NE, em cor vermelha, contida no perfil AB da figura 2.1, com o perfil de eletrorresistividade. Chave vermelha – erosão, chave verde – contenção.

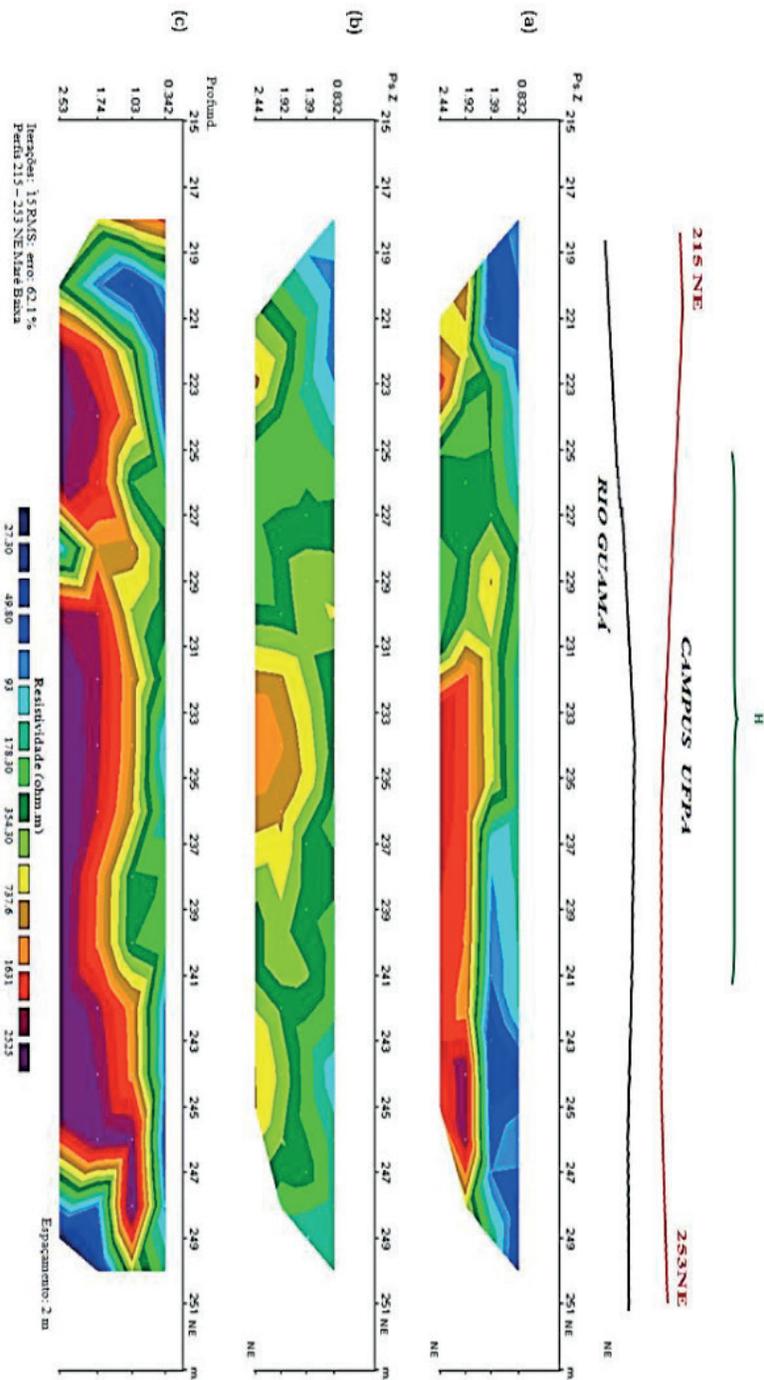


Figura 8 Trecho 215-253 NE. Maré baixa. Pseudo-seção: Resistividade aparente (a) medida, e (b) calculada. (c) Modelo de resistividade obtida com a inversão. Figura acima, fazendo a correlação do contorno do rio, cor preta e a linha de investigação 215NE a 253NE, em cor vermelha, contida no perfil AB da figura 2.1, com o perfil de eletrorresistividade. Chave vermelha – erosão, chave verde – contenção.

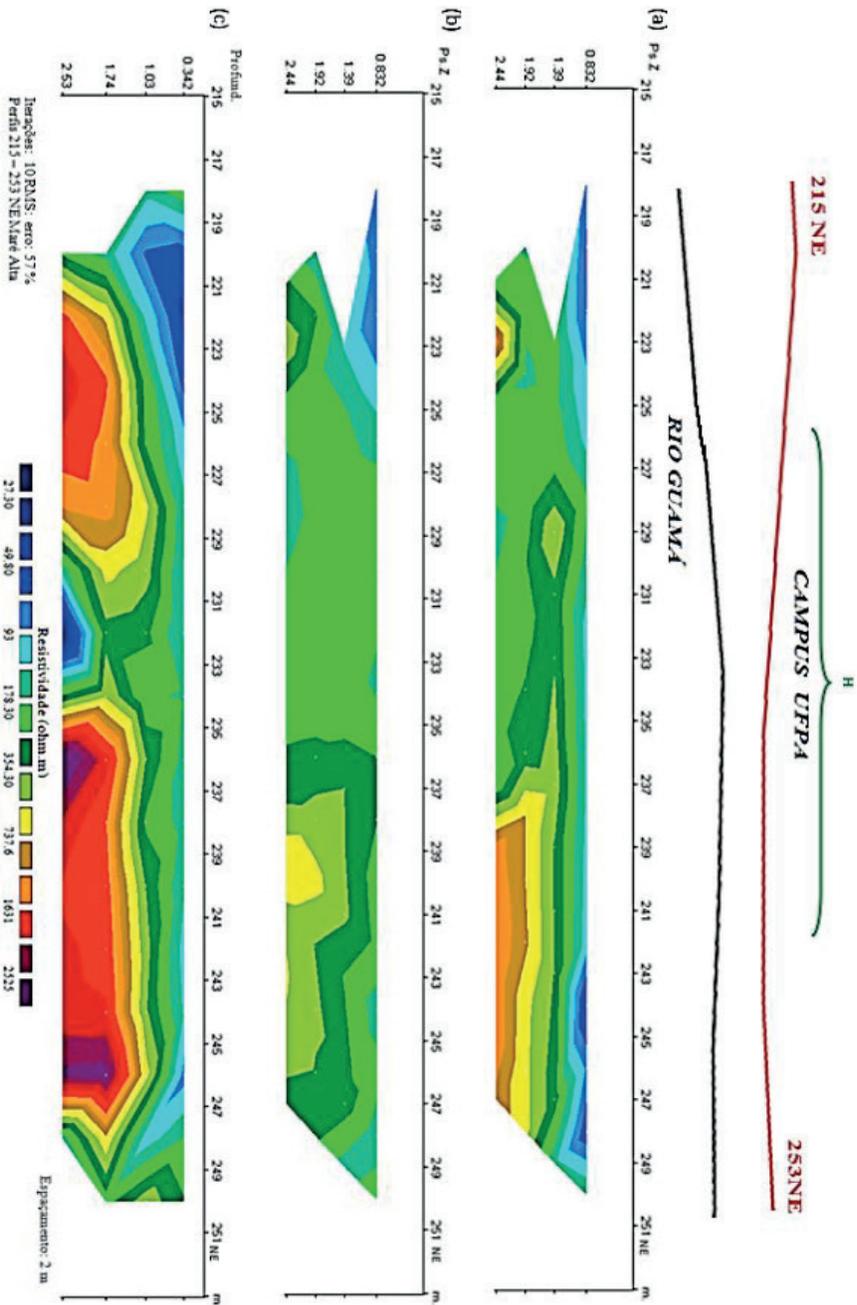


Figura 9 Trecho 215-253 NE. Maré alta. Pseudo-seção: Resistividade aparente (a) medida, e (b) calculada. (c) Modelo de resistividade obtida com a inversão. Figura acima, fazendo a correlação do contorno do rio, em cor preta e a linha de investigação 215NE a 253NE, em cor vermelha, contida no perfil AB da figura 2.1, com o perfil de eletrorresistividade. Chave vermelha – erosão, chave verde – contenção.

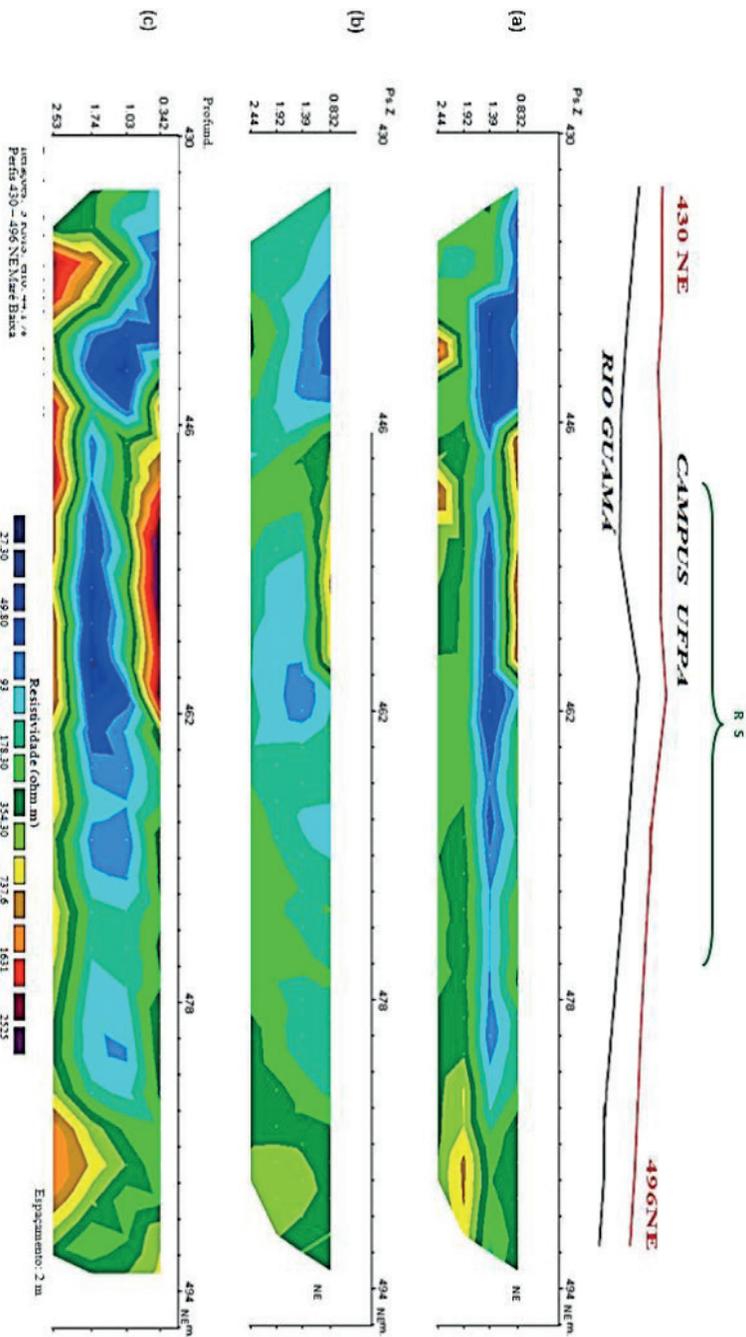


Figura 10. Trecho 430-492 NE. Maré baixa. Pseudo-seção: Resistividade aparente (a) medida, e (b) calculada. (c) Modelo de resistividade obtida com a inversão. Figura acima, fazendo a correlação do contorno do rio, em cor preta e a linha de investigação 430NE a 492NE em cor vermelha, contida no perfil AB da figura 2.1, com o perfil de eletrorresistividade. Chave vermelha – erosão, chave verde – contenção.

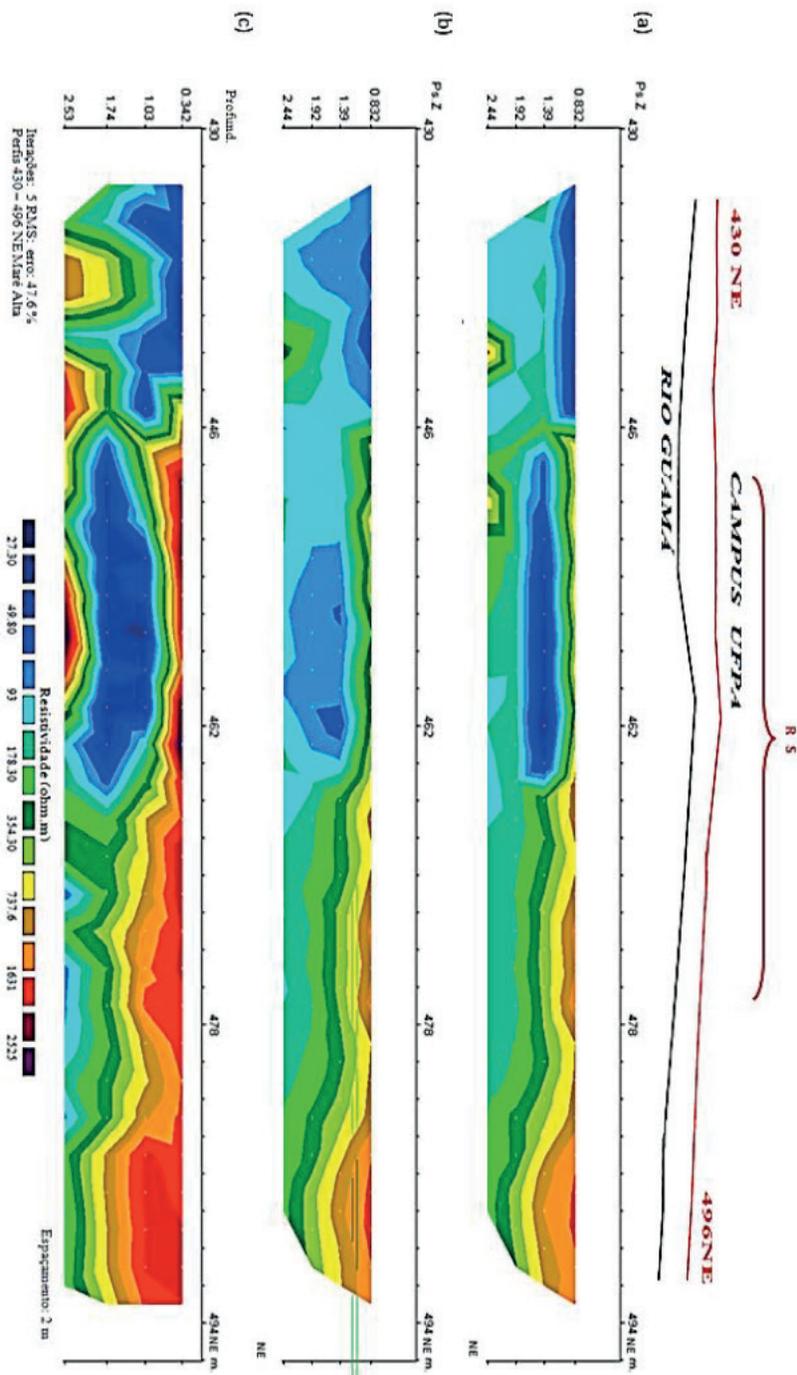


Figura 11. Trecho 430-492 NE. Maré alta. Pseudo-seção: Resistividade aparente (a) medida, e (b) calculada. (c) Modelo de resistividade obtida com a inversão. Figura acima, fazendo a correlação do contorno do rio, em cor preta e a linha de investigação 430NE a 492NE, em cor vermelha, contida no perfil AB da figura 2.1, com o perfil de eletrorresistividade. Chave vermelha – erosão, chave verde – contenção.

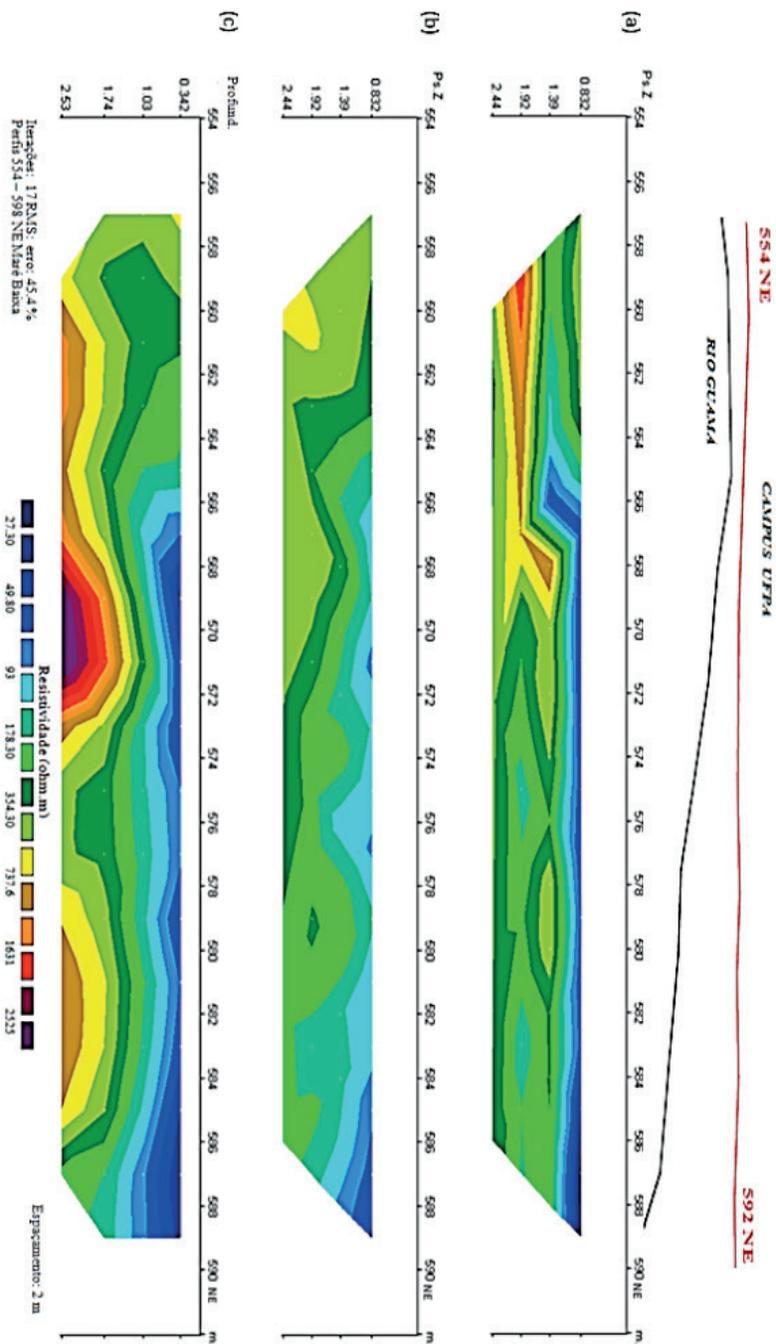


Figura 12. Trecho 554-592 NE. Maré baixa. Pseudo-seção: Resistividade aparente (a) medida, e (b) calculada. (c) Modelo de resistividade obtida com a inversão. Figura acima, fazendo a correlação do contorno do rio, em cor preta e a linha de investigação 554NE a 592NE, em vermelha, contida no perfil AB da figura 2.1, com o perfil de eletrorresistividade. Chave vermelha – erosão, chave verde – contenção.

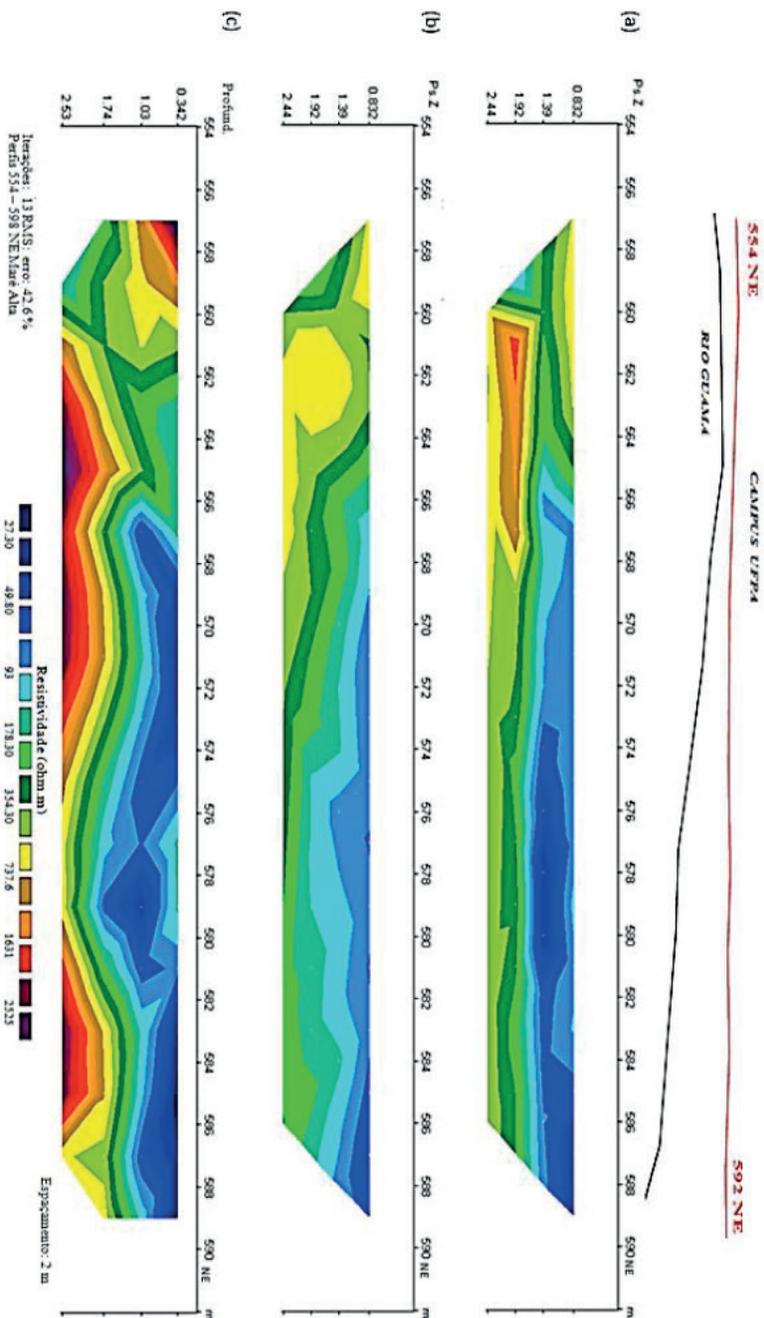


Figura 13. Trecho 554-592 NE. Maré alta. Pseudo-seção: Resistividade aparente (a) medida, e (b) calculada. (c) Modelo de resistividade obtida com a inversão. Figura acima, fazendo a correlação do contorno do rio, em cor preta e a linha de investigação 554NE a 592NE, em vermelha, contida no perfil AB da figura 2.1, com o perfil de eletrorresistividade. Chave vermelha – erosão, chave verde – contenção.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

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 Inter fluxo (escoamento subsuperficial) 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.

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.

REFERÊNCIAS

BRAGA, A.C.O. Métodos Geoelétricos 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, 2007.

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

GEOTOMO SOFTWARE. Geoelectrical Imaging 2D & 3D. Disponível em www.geoelectrical.com, 2007.

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