

# ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS DA ILHA DE SÃO LUÍS – MA

Subsídios para o Uso Sustentável  
dos Recursos Hídricos



## VOLUME I Relatório Final

Caracterização Geológica  
Geofísica  
Geomorfologia  
Solos e Testes de Infiltração  
Uso e Ocupação do Solo



# **ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS DA ILHA DE SÃO LUÍS – MA**

Subsídios para o Uso Sustentável dos Recursos Hídricos

## **REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL**

### **PRESIDENTE**

Jair Bolsonaro

## **MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE**

### **MINISTRO DE ESTADO**

Ricardo Sales

## **AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA**

### **DIRETORIA COLEGIADA**

#### **Diretora Presidente**

Christiane Dias Ferreira

#### **Diretor de Hidrologia**

Ney Maranhão

#### **Diretor de Gestão**

Ricardo Medeiros de Andrade

#### **Diretor de Planejamento**

Marcelo Cruz

#### **Diretor de Regulação**

Oscar de Moraes Cordeiro Netto

## **MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA**

### **MINISTRO DE ESTADO**

Bento Costa Lima Leite de Albuquerque Junior

### **SECRETÁRIO DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL**

Alexandre Vidigal de Oliveira

## **SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM**

### **DIRETORIA EXECUTIVA**

#### **Diretor-presidente**

Esteves Pedro Colnago

#### **Diretor de Hidrologia e Gestão Territorial**

Antônio Carlos Bacelar Nunes

#### **Diretor de Geologia e Recursos Minerais**

José Leonardo Silva Andriotti

#### **Diretor de Administração e Finanças**

Juliano de Souza Oliveira

#### **Diretor de Infraestrutura Geocientífica**

Fernando Pereira de Carvalho

#### **Chefe do Departamento de Hidrologia**

Frederico Cláudio Peixinho

#### **Chefe da Divisão de Hidrogeologia e Exploração**

João Alberto Oliveira Diniz

Agência Nacional de Águas – ANA  
Ministério do Meio Ambiente

Serviço Geológico do Brasil – CPRM  
Ministério de Minas e Energia

# ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS DA ILHA DE SÃO LUÍS – MA

Subsídios para o Uso Sustentável dos Recursos Hídricos

Relatório Final

## VOLUME I

Caracterização Geológica  
Geofísica  
Geomorfologia  
Solos e Testes de Infiltração  
Uso e Ocupação do Solo

Brasília - DF  
ANA | CPRM  
2019

## AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA

Setor Policial, Área 5, Quadra 3, Blocos “B”, “L” e “M” e “T”.  
CEP:70610-200, Brasília - DF - Brasil  
PABX: (61) 2109-5400 / (61) 2109-5252  
www.ana.gov.br

## SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM

SEDE

Setor Bancário Norte - SBN Quadra 02, Bloco H - Asa Norte  
Edifício Central Brasília  
CEP: 70040-904, Brasília - DF - Brasil  
Tel.: (61) 2108-8400

ESCRITÓRIO RIO DE JANEIRO

Avenida Pasteur, 404 - Urca  
CEP: 22290-255, Rio de Janeiro - RJ - Brasil  
Tel.: (21) 2295-0032  
www.cprm.gov.br

## EDITORAÇÃO

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM

DIVISÃO DE EDITORAÇÃO GERAL – DIEDIG

Valter Barradas

Ricardo Motta

PROJETO GRÁFICO e DIAGRAMAÇÃO

Andréia Continentino

Agmar Alves Lopes

## NORMATIZAÇÃO BIBLIOGRÁFICA

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM

DIVISÃO DE DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA – DIDOTE

Maria Gasparina de Lima

Isabel Angela dos Santos Matos

## FOTOGRAFIAS

Imagens pertencem ao acervo da CPRM

Contato

Informações, críticas, sugestões, correções de dados.

sip@ana.gov.br

adriana.ferreira@ana.gov.br

© 2019 AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA

**Todos os direitos reservados.**

**É permitida a reprodução de dados e de informações contidos nesta publicação, desde que citada a fonte.**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

E82 Estudos hidrogeológicos da Ilha de São Luís, MA : subsídios para o uso sustentável dos recursos hídricos : relatório final, volume I / Agência Nacional de Águas, Serviço Geológico do Brasil – CPRM. -- Brasília : ANA; CPRM, 2019.  
1 recurso eletrônico : PDF

Nota de conteúdo: caracterização geológica, geofísica, geomorfologia, solos e testes de infiltração, uso e ocupação do solo.

ISBN 978-65-5664-222-2

1. Hidrogeologia. I. Agência Nacional de Águas (Brasil).  
II. Serviço Geológico do Brasil – CPRM. III. Título.

CDD 551.49

## EQUIPE DE EXECUÇÃO

---

### COORDENAÇÃO GERAL

João Alberto Oliveira Diniz

### GESTOR

Carlos Eduardo Sobreira Leite

### HIDROGEOLOGIA

Thiago Luís Feijó de Paula

João Alberto Oliveira Diniz

Carlos Eduardo Sobreira Leite

Viviane Cristina Vieira da Cunha

### CADASTRO DE POÇOS E FONTES DE CONTAMINAÇÃO

Breno Augustos Beltrão

Manoel Júlio da Trindade Gomes Galvão

Bruno Eldorff

Cipriano Gomes de Oliveira

Frank José Gurgel Santos

Adão José Gomes

Luís Antônio Rodrigues Almendra

Saulo Moreira

### HIDROLOGIA E CLIMA

João H. P. de B. Salgueiro

Éber Pinto de Andrade - Consultor

Alice Silva Castilho - Consultor

Fábio Araújo

José Carlos Souza da Silva

Eduardo da Silveira Wilson

### HIDROGEOQUÍMICA E ISÓTOPOS

Tereza Cristina B. Villanueva

Idembergue Barroso Macedo de Moura

Mickaelon Belchior de Vasconcelos

Manoel Imbiriba

Clyvikh Renna Camacho

Liano Silva Veríssimo

Maria Antonieta Alcântara Mourão

Daniele Tokunaga Genaro

### GEOFÍSICA

Oderson A. de Souza Filho

Bruce Fabini Franco Chiba

Rafael Ribeiro Severino

Jairo Jamerson Correia de Andrade

Nilo C. Pedrosa Jr

### GEOLOGIA

Elem Cristina dos S. Lopes

Gisele Correa dos Anjos

José Paulo dos Santos Melo

Avelino Alves de Moraes

Edilberto Lisboa Leão

Lourenço Cardoso

### SOLOS

Edgar Shinzato - Coordenador

Rogério Valença Ferreira

Marta Vasconcelos Ottoni

### GEOMORFOLOGIA E USO E OCUPAÇÃO DOS SOLOS

Rogério Valença Ferreira

Marcelo Dantas

### GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS

Roberto Eduardo Kirchhein

Andrea Segura Franzini

Camila Dalla Porta Mattiuzi

Andrea de Oliveira Germano

### NIVELAMENTO GEODÉSICO

Rubens Esteves Kenup

Fábio Silva da Costa

### SIG E BANCO DE DADOS

Robson de Carlo da Silva

Thiago Luiz Feijó de Paula

Franciele Eunice de Araújo

Rayssa Costa Pedrosa

### CONSULTORES

Éber de Andrade Pinto

Alice Silva Castilho

Maria Antonieta Alcântara Mourão

Roberto Gusmão de Oliveira

Wenceslau Teixeira - EMBRAPA

Alba Martins - EMBRAPA

### EQUIPE DE GESTÃO, SUPERVISÃO E FISCALIZAÇÃO

#### CPRM

Frederico Cláudio Peixinho -

Chefe do Departamento de Hidrologia (DEHID)

João Alberto Oliveira Diniz -

Chefe de Divisão de Hidrologia e Exploração (DIHEXP)

#### ANA

Tibério Magalhães Pinheiro -

Superintendente de Implementação de Planos, Programas e Projetos (SIP)

Flavia Carneiro da Cunha Oliveira (Adjunta)

Fernando Roberto de Oliveira -

Coordenador de Águas Subterrâneas (COSUB/SIP)

Fabício Bueno da Fonseca Cardoso (Substituto)

Adriana Niemeyer Pires Ferreira

Gestora do Projeto

Letícia Lemos de Moraes

Gestora Adjunta

### COMISSÃO TÉCNICA DE ACOMPANHAMENTO E FISCALIZAÇÃO - CTAF

Liene Soares Pereira -

SEMA/SRH

Raimundo N. Medeiros da Silva -

SEMA/SRH (*in memorian*)

Breno Ruiz de Lima Verda da Silva

SEMA/SRH

Rebeca Cristina Nascimento Matos

SEMA/SRH

José Augusto dos Santos -

CAEMA (*in memorian*)

Wagner Gonzaga -

CAEMA

Suely Gonçalves da Conceição -

CAEMA

Felipe Negreiros de Moreira -

BRK Ambiental

Helder Dantas

BRK Ambiental

Lucas Pinheiro da Silva -

BRK Ambiental (substituto)

Ricardo Pereira Alves Mamede -

BRK Ambiental (substituto)

Ediléia D. Pereira -

Universidade Federal do Maranhão (UFMA)

Jorge Hamilton Souza dos Santos -

Universidade Federal do Maranhão (UFMA)

Alessandro Costa da Silva -

Universidade Estadual do Maranhão (UEMA)

Jucivan Ribeiro Lopes -

Universidade Estadual do Maranhão (UEMA)

Sara de C. Ribeiro -

Serviço Autônomo de Águas de Codó (CERH)

José Ronald Damasceno -

Região dos Lagos (CERH)

Myrcea Araújo Muniz -

Pref. Paço Lumiar

Suzane Andrade -

Pref. Paço Lumiar

Edmar Silva Castro -

Pref. Paço Lumiar (substituto)

Antônio Paulo da Silva Filho -

Pref. Paço Lumiar (substituto)

Flavio Bonfim -

Pref. Paço Lumiar (substituto)

Maria Madalena Xavier -

Pref. São José do Ribamar

Claudio Bastos Figueira -

Pref. São José do Ribamar

José Ribamar P.A. Coimbra -

Pref. São José do Ribamar

Claudio Bastos Figueira Junior -

Pref. São José do Ribamar

Divane Pinheiro da Silva -

Pref. São José do Ribamar

OCEANO ATLÂNTICO

RAPOSA

PAÇO  
DO LUMIAR

SÃO LUÍS

SÃO JOSÉ  
DE RIBAMAR

BAÍA DE SÃO JOSÉ

BAÍA DO ARRAIAL

MARCOS



---

## FIGURAS

Figura 1: Mapa de localização .....	18
Figura 2: Coluna estratigráfica das bacias de São Luís – Ilha Nova – Bragança – Viseu (ZALÁN, 2007) .....	22
Figura 3: Síntese das propostas de empilhamento litoestratigráfico do Grupo Barreiras, com base nos trabalhos de Oliveira e Silva 2011, Arai 2006, Rossetti e Góes 2004 e Rossetti 2006 .....	30
Figura 4: Mapa Geológico da Ilha de São Luís .....	31
Figura 5: Perfis geológicos da praia de Boa Viagem - São José do Ribamar (EL – 02) .....	36
Figura 6: Perfis geológicos praia de Guarapiranguinha, S. José do Ribamar (EL 30 e 32) .....	37
Figura 7: Perfil litoestratigráfico do Ponto GA-39, apresentando intercalações de camadas arenosas e argiloarenosas, estruturas convolutas, estratificações tangenciais, e intercalações de lâminas de argila .....	37
Figura 8: Mapa geológico com a localização dos pontos de amostragem para datação por LOE .....	40
Figura 9: Domínios Estruturais da Ilha do Maranhão .....	46
Figura 10: Modelo esquemático de <i>Gráben</i> e <i>Horst</i> .....	47
Figura 11: Diagrama de rosetas. (A) falhas e (B) fraturas.....	47
Figura 12: Perfil geológico e bloco diagrama esquemático ao longo da Av. Litorânea (Domínio II) .....	48
Figura 13: Perfil geológico/bloco diagrama esquemático praia Guarapiranga (Domínio I).....	49
Figura 14: Perfil geológico e bloco digrama esquemático em área entre as localidades Jussara e Sol Nascente, SE da Ilha (Domínio II). Deslocamento do acamamento devido a falha normal .....	49
Figura 15: Perfil geológico e bloco diagrama esquemático na localidade Porto Grande, porção SE da Ilha (Domínio II). Observa-se deslocamento do acamamento devido a falha a normal .....	49
Figura 16: Distribuição das 40 SEVs realizadas nos 53 blocos de 5 km x 5 km na Ilha de São Luís .....	55
Figura 17: Seções geológico-geofísicas na Ilha de São Luís .....	56
Figura 18: Seção 1 construída com os poços MJ084, BE011, BE125, FS029, MJ110 e MJ127, e SEVs 12, 36, 24, 31, 32, 21 e 06 .....	58
Figura 19: Seção 2 construída a partir dos poços SA024, BE011, BE139 e BE152, e das SEVs 02, 24, 29, 28 e 27 .....	58
Figura 20: Perfil elaborado a partir da Seção 1 .....	59
Figura 21: Perfil elaborado a partir da Seção 2 .....	59
Figura 22: Seção 3 construída a partir dos poços NG006, MJ122 e MJ127, e das SEVs 16, 15, 38 e 06 .....	60

---

Figura 23: Seção 4 construída a partir dos poços BE148, BE139, BE104, BE125, FS029, e SEVs 20, 19, 22, 29, 23, 31, 32, 05, 15 .....	61
Figura 24: Seção 5 construída a partir dos poços LA027, BE011, BE104 e BE151, e das SEVs 01, 24, 23, 11 e 34 .....	62
Figura 25: Distribuição das linhas de CE realizadas dentro da Ilha de São Luís .....	63
Figura 26: Distribuição das SEVs utilizadas para traçar os perfis 1 e 2 .....	64
Figura 27: Resultado das inversões do perfil 1 .....	65
Figura 28: Seção interpretativa geofísica do perfil 1 .....	66
Figura 29: Resultado das inversões do perfil 2 .....	67
Figura 30: Seção interpretativa geofísica do perfil 2 .....	67
Figura 31: Distribuição das linhas de CEM realizadas dentro da Ilha de São Luís.....	68
Figura 32: Integração da SEV01 com os caminhamentos CEM2 e CEM3 realizados na praia do Calhau, São Luís: a) topo da Duna 1, com afloramentos de areia Pós-Barreiras (?) com estratos plano-paralelos e maciços; b) e c) vista do topo da Duna 2 .....	69
Figura 33: (a) Falésia na Praia do Meio. Rochas da formação Cujupe sotoposta a areias pleistocênicas; (b) cava a 200 m a sul da CE1, com areia maciça laranja no topo, sotoposta por 2 m areia com fragmentos lateríticos, em discordância erosiva .....	70
Figura 34: Integração em perspectiva dos caminhamentos CE1, CE2 e CEM1 - Assentamento do Cumbique (Paço do Lumiar).....	71
Figura 35: Integração SEV 16 e caminhamento CE5, região de Raposa (parte superior); Caminhamentos CE2 (Cumbique) e CE5 (Raposa) realizados próximos ao braço de um mangue (parte inferior da figura) .....	72
Figura 36: Integração da SEV12 com caminhamento CEM4. Falésia acima da Praia da Ponta da Espera. Siltitos alterados em falésia na Ponta da Espera. Há surgência de água a 5 m acima da linha de praia .....	73
Figura 37: Integração da SEV13 com o caminhamento CEM5. Trabalhos realizados ao lado da propriedade da Vale .....	74
Figura 38: Integração da SEV33 com os caminhamentos CE6 e CEM6. Santa Rosa a leste do Rio Tibiri .....	75
Figura 39: Integração da SEV34 e o caminhamento CEM7. Santa Rosa entre os rios Tibiri e Jeniparana .....	76
Figura 40: Integração da SEV06 com os caminhamentos CE7 e CEM8 realizados a 1 Km da Praia de Panaquatira .....	77
Figura 41: Integração da SEV02 com o caminhamento CE3 realizados na Reserva do Rangedor.....	78
Figura 42: Integração entre a SEV25, SEV26 e o caminhamento CE8 realizados no Quebra-Pote .....	79

---

Figura 43: Integração da SEV21 com o caminhamento CE9 realizados em São José do Ribamar.....	80
Figura 44: Mapa Geomorfológico da Ilha de São Luís.....	86
Figura 45: Ciclo hidrológico no perfil do solo (Schoenebeger; Wysocki, 2005).....	98
Figura 46: Mapa de Solos da Ilha de São Luís.....	100
Figura 47: Estatística descritiva (box plot) dos dados da condutividade hidráulica saturada ( $K_{fs}$ – $\text{cm dia}^{-1}$ ).....	107
Figura 48: Estatística descritiva (box plot) dos dados da condutividade hidráulica saturada ( $K_{fs}$ – $\text{cm h}^{-1}$ ) com carga hidráulica de 10 cm, nas profundidades de 20 e 60 cm.....	107
Figura 49: Localização dos testes de infiltração realizados .....	113
Figura 50: Capacidade de infiltração dos solos versus bacias hidrográficas, relevo, uso e ocupação da terra; interpolação pelo método do vizinho próximo (natural) .....	114
Figura 51: Uso e Ocupação do Solo na Ilha de São Luís .....	118
Figura 52: Mapa da Expansão Urbana da cidade de São Luís (BURNETT, 2011) .....	120

---

## FOTOS

Foto 1: Falésia da Praia da Baronesa (Formação Alcântara) composta por alternâncias de arenitos, pelitos e dolomitos (Alcântara - MA) .....	26
Foto 2: Arenito da base da Formação Alcântara com estratificação cruzada do tipo <i>swaley</i> . Praia da Prefeitura, Alcântara .....	26
Foto 3: Amostra de pelito contendo palygorskita (porção esbranquiçada). Praia da Baronesa – Alcântara .....	26
Foto 4: Níveis de palygorskita (porção esbranquiçada) na Formação Alcântara, Praia da Baronesa – Alcântara .....	26
Foto 5: Fotografia panorâmica mostrando a Formação Cujupe (Porto de Cujupe-MA) .....	27
Foto 6: (A) Conglomerado intraformacional na Formação Cujupe (Porto de Cujupe-MA); (B) Acamamento <i>wavy</i> e <i>flaser</i> em arenitos-argilosos da Formação Cujupe (Morro Jarupari – São Luís/MA) .....	27
Foto 7: Rochas com acamamento heterolítico do Grupo Barreiras (topo) em contato discordante com rochas da Formação Cujupe (Grupo Itapecurú). MA-106. Setas vermelhas indicam o contato .....	29
Foto 8: (A) Vista panorâmica do afloramento. (B) Siltitos com estratificação acanalada. (C) Os pacotes às vezes estão intercalados com argilas cinza e calcarenitos e calcirruditos (Formação Alcântara) – Praia Ponta da Areia, São Luís/MA). Ponto EL-81 .....	32
Foto 9: Arenitos finos de cores variegadas intercalados com filmes de argila (Praia Olho D’água, São Luís/MA). Formação Cujupe. Ponto EL-70 .....	32
Foto 10: (A) Arenitos finos, avermelhados, com estratificação cruzada acanalada; (B) estrutura tipo <i>wavy</i> . (Formação Cujupe, Praia da Guia, São Luís - MA). EL-39.....	33
Foto 11: (A e B) Afloramento tipo voçoroca, mostrando camadas centimétricas a métricas de arenito variegado intercalado com camadas argilosas, argilo-siltosas; (C), estratificações plano-paralelas, laminações cruzadas plano paralelas e truncadas; (D) Topo da camada marcado por horizonte ferruginoso colunar (GA-09). Formação Cujupe. Praia Araçagy (São Luís/MA).....	33
Foto 12: Pacote composto por arenito friável, creme amarelado, de granulação média a grossa, com alguns níveis finos ou conglomeráticos, intercalado a lâminas de argila. Contém camada de argila sotoposta a camada de arenito fino no topo. Observa-se estratificação cruzada tangencial de grande porte. Formação Cujupe (GA-22). Mineração Prime S/A, São Luís .....	34
Foto 13: (A) Visão panorâmica do afloramento; (B e C) Camada de arenito muito fino, cinza, apresentando acamamento tipo <b>wavy</b> e <b>flaser</b> ; (D) Sobreposta a essa camada ocorre pacote areno-argiloso, esbranquiçado, variegado, com acamamento lenticular. Formação Cujupe. Morro Jarupari – São Luís/MA. Ponto GA-37 .....	34
Foto 14: (A, B e C) Rocha areno-argilosa, avermelhada, manchas esbranquiçadas e intercalações de areia e argila (acamamento <i>wavy</i> e <i>flaser</i> ); (D) observa-se contato entre camadas areno-argilosas cinzas com camadas areno-argilosas vermelhas, esbranquiçadas. Formação Cujupe. Morro João da Ponta – São Luís. Ponto GA-40 .....	35

---

Foto 15: Conglomerados polimíticos. Praia Ponta do Panaquatira, São José do Ribamar/MA. EL-05 .....	38
Foto 16: Conglomerados e arenitos ferruginizados. Praia Ponta do Panaquatira, São José de Ribamar/EL-03 .....	38
Foto 17: (A) Arenito conglomerático, mosqueado, muito intemperizado, (B) intercalado com alguns níveis de argila laminada mais espessos em direção ao topo da camada, até a altura de 2m; (C) o topo é marcado por nível concrecionário ferruginoso (Ponto GA 01).....	38
Foto 18: Visão geral de afloramento de Formação Barreiras. Praia de Panaquatira, São José do Ribamar.....	39
Foto 19: Procedimentos de amostragem. Limpeza do afloramento (A); retirada da porção mais superficial de sedimento (B), inserção inicial (C), final (D) e retirada (E) do tubo de coleta .....	41
Foto 20: Fotografia panorâmica de falésia na Praia do Panaquatira. Observam-se sedimentos Pós Barreiras recobrimdo depósitos da Formação Cujupe. As setas indicam o topo da unidade sotoposta (EL-03).....	43
Foto 21: Fotografia exibindo o espesso pacote de Sedimentos Pós-Barreiras aflorantes na Praia do Panaquatira (EL-03).....	44
Foto 22: Planície de maré lamosa ao lado do Centro Histórico de São Luís .....	44
Foto 23: Vegetação de restinga sobre cordões arenosos de origem marinha.....	45
Foto 24: Manguezal na Praia de Guarapiranga .....	45
Foto 25: Campo de dunas da praia do Calhau, adjacente à Avenida Litorânea – São Luís.....	45
Foto 26: Planície aluvial embutida no fundo de vale do igarapé Maracujá.....	45
Foto 27: Estrutura extensional tipo <i>horst</i> e <i>gráben</i> na Ilha de São Luís (Estrada vicinal nas proximidades da Ponta do Arraial – coordenadas 585870 e 9702754) .....	48
Foto 28: Equipamentos utilizados para levantamento geofísico elétrico: à direita resistivímetro Syscal Pro e a esquerda o comutador Switch Pro 72 .....	53
Foto 29: Equipamento utilizado para levantamento eletromagnético Promis 10.....	54
Foto 30: Afloramento do arenito do Grupo Itapecuru, na parte superior da foto, com nível concrecionário e ferruginoso na parte inferior. Praia do Calhau – São Luís .....	87
Foto 31: Falésias esculpidas sobre rochas sedimentares do Grupo Barreiras na Ponta de Itapari, São José do Ribamar .....	87
Foto 32: Vista do topo dos tabuleiros conservados – Estrada Araçagi Paço do Lumiar .....	88
Foto 33: Perfil de Neossolo Quartzarênico na estrada Araçagi – Paço do Lumiar.....	88
Foto 34: Pequena trincheira com exposição de horizonte superficial adensado (fragipan) de Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico. Conjunto habitacional Zumbi dos Palmares – São José do Ribamar.....	88

---

Foto 35: Topo do tabuleiro costeiro convertido em área de plantio de coqueiro .....	89
Foto 36: Eixo viário da Avenida Guajajaras atravessando o topo dos tabuleiros conservados. Bairro Planalto Anil, São Luís .....	89
Foto 37: Aspecto ondulado do relevo de tabuleiros dissecados - Parque Estadual do Bacanga, São Luís .....	89
Foto 38: Fenômeno de erosão acelerada sobre rebordo erosivo dos tabuleiros cimeiros, em área de risco geológico devido à ocupação urbana desordenada .....	90
Foto 39: Afloramento do Grupo Itapecuru com Argissolos Vermelhos distróficos no topo. Estrada entre o Porto de Itaqui e a BR – 135 .....	90
Foto 40: Instalações do Porto de Itaqui em área de tabuleiros pouco dissecados .....	90
Foto 41: Planta do Polo da ALUMAR, relevo de tabuleiros pouco dissecados. São Luís.....	90
Foto 42: Vista da extensa coroa de lama aflorante durante a maré baixa, junto ao Centro Histórico de São Luís. Ao fundo à direita, o bairro de Ponta da Areia.....	91
Foto 43: Avenida Quarto Centenário, separando a planície fluvio-marinha do rio Anil das comunidades mais pobres do bairro Fé em Deus .....	91
Foto 44: Planície fluvio-marinha do estuário do rio Bacanga, com adensamento urbano de baixa renda .....	91
Foto 45: Extensa planície fluvio-marinha do rio Tibiri, com vegetação de mangue de grande porte.....	92
Foto 46: Planície fluvio-marinha do canal dos Mosquitos .....	92
Foto 47: Canal de maré da planície fluvio-marinha da Ilha de Curupu .....	92
Foto 48: Gleissolos Háplicos na planície de inundação do rio Santo Antônio .....	92
Foto 49: Aterro sobre mangue do rio Bacanga, próximo ao Mercado do Peixe, na região central de São Luís.....	93
Foto 50: Vista das margens da Lagoa da Jansen, com a presença de resquícios de vegetação de mangue, que foi aterrada para a construção da via que liga os bairros de Ponta da Areia e São Francisco, ao fundo.....	93
Foto 51: Planície marinha da praia de Ponta da Areia, bairro de ocupação urbana densa .....	94
Foto 52: Cordões arenosos de origem marinha que formam Neossolos Quartzarênicos com vegetação de restinga. Praia do Coqueiral – Raposa .....	94
Foto 53: Terraço marinho formado por antigos cordões arenosos – Ilha do Curupu.....	94
Foto 54: Campo de dunas ativas e fixas da Ilha de Curupu, município de Raposa .....	95
Foto 55: Vista do campo de dunas na Praia do Calhau, adjacente à Avenida Litorânea – São Luís.....	95
Foto 56: Planície de inundação do rio Paciência no seu médio curso, onde se desenvolvem solos Gleissolos Háplicos e mata secundária fragmentada.....	96
Foto 57: Aterro tecnogênico para instalação do Complexo Minerio-Portuário de Itaqui.....	97

---

Foto 58: Infiltrômetro de anel ( <i>single ring</i> ) utilizado nas avaliações de velocidade de infiltração básica das principais classes de solos da Ilha de São Luís – Maranhão.....	103
Foto 59: Permeâmetro de Guelph utilizado nas avaliações da condutividade hidráulica saturada das principais classes de solos da Ilha de São Luís .....	103
Foto 60: Amostras de solo coletadas em cilindros metálicos de 100 cm <sup>3</sup> .....	105
Foto 61: Avaliações de condutividade hidráulica saturada (kfs) e da velocidade de infiltração básica (VIB) na Falésia de Araçagi a aproximadamente 10 m e 30 m da superfície .....	108
Foto 62: Aspecto do espigão de Ponta da Areia. Imensa estrutura perpendicular à linha de costa que interfere na dinâmica sedimentar costeira .....	121
Foto 63: Ponte-barragem sobre o rio Bacanga, que interliga o Centro Histórico de São Luís ao bairro Sá Viana.....	122
Foto 64: Construção de casas rústicas com madeira entrelaçada e taipa em loteamento clandestino no interior do Parque Estadual do Bacanga.....	122
Foto 65: Aspecto do Conjunto Habitacional Mato Grosso II, com casas e arruamentos padronizados. Localidade de Santa Rosa, São Luís.....	123
Foto 66: Aterro de grandes dimensões soterrando a planície fluviomarinha na extremidade sul do Conjunto Habitacional Mato Grosso II .....	123
Foto 67: Vista dos topos planos dos tabuleiros cimeiros, palco da expansão urbana dos bairros e loteamentos periféricos de São Luís. Vila Olímpica .....	124
Foto 68: Disposição de lixo irregular em topo de tabuleiro, em via transversal a Estrada Araçagi – Paço do Lumiar .....	124

---

## TABELAS

Tabela 1: Área, população e densidade demográfica dos municípios da ilha de São Luís (FONTE: IPEA, 2014) .....	20
Tabela 2: Síntese das sequências deposicionais definidas na bacia de São Luís-Grajaú e sua correlação com as unidades definidas anteriormente, com ênfase no Grupo Itapecuru (compilado de ROSSETTI, 2001).....	25
Tabela 3: Idades obtidas para os sedimentos Pós-Barreiras na Ilha do Maranhão .....	42
Tabela 4: Variação de resistividade elétrica nos principais litotipos da Ilha de São Luís.....	81
Tabela 5: Biblioteca dos padrões de relevo mapeados na Ilha de São Luís .....	85
Tabela 6: Pontos visitados no estudo de solos da Ilha de São Luís .....	101
Tabela 7: Identificação dos locais de avaliação das propriedades físico hídricas do solo na Ilha de São Luís .....	103
Tabela 8: Análises físico-hídricas de amostras de solos de horizontes superficiais na Ilha de São Luís – Maranhão .....	105
Tabela 9: Classificação dos valores de Água Disponível (AD) em solos do Brasil .....	106
Tabela 10: Condutividade hidráulica saturada no campo (Kfs) avaliada com Permeâmetro de Guelph em diferentes profundidades e Velocidade de Infiltração Básica (VIB) na superfície avaliado com Infiltrômetro de Anel em diferentes solos .....	109
Tabela 11: Condutividade hidráulica saturada (Kfs) na sub-bacia do rio Maracanã (SANTOS & PEREIRA, 2013) .....	111
Tabela 12: Classificação da infiltração básica, de acordo com Reichardt (1990).....	112

---

# SUMÁRIO

<b>1. APRESENTAÇÃO .....</b>	<b>17</b>
1.1. A ÁREA DE ESTUDOS .....	20
<b>2. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA.....</b>	<b>21</b>
2.1. ARCABOUÇO TECTÔNICO – GEOLÓGICO REGIONAL.....	21
2.1.1. Bacias de São Luís e Ilha Nova .....	22
2.1.1.1. O Grupo Itapecuru (K12it) .....	23
2.1.1.2. A Formação Alcântara (K12al).....	24
2.1.1.3. A Formação Cujupe (K2E1c) .....	27
2.1.2. Formação Barreiras (Enb) .....	28
2.1.3. Sedimentos Pós-Barreiras (N34pb).....	29
2.2. GEOLOGIA LOCAL .....	31
2.2.1. O Grupo Itapecuru .....	32
2.2.2. A Formação Barreiras.....	38
2.2.3. Sedimentos Pós-Barreiras (N24pb).....	39
2.2.3.1. Resultados obtidos.....	41
2.2.4. Depósitos de Planície de Maré Lamosa (Q2ml) .....	44
2.2.5. Depósitos de Cordões Litorâneos Antigos (Q1cl) .....	44
2.2.6. Depósitos de Pântanos Salinos (Q2ps) .....	45
2.2.7. Depósitos de Mangues (Q2m) .....	45
2.2.8. Depósitos Eólicos Litorâneos (Q2el) .....	45
2.2.9. Depósitos Aluvionares (Q2a) .....	45
2.3. QUADRO ESTRUTURAL .....	46
2.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	50
<b>3. GEOFÍSICA.....</b>	<b>52</b>
3.1. MÉTODOS ELÉTRICOS .....	52
3.2. MÉTODOS ELETROMAGNÉTICOS.....	53
3.3. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	53
3.4. PRODUTOS GERADOS .....	54
3.4.1. Seções Geofísicas .....	57
3.4.2. Interpretação Conjunta de Caminhamentos e SEVs.....	62
3.5. CONCLUSÕES .....	80
<b>4. GEOMORFOLOGIA.....</b>	<b>83</b>
4.1. METODOLOGIA.....	83
4.2. TAXONOMIA DO RELEVO.....	84
4.3. UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS .....	85

---

4.3.1. Tabuleiros.....	87
4.3.2. Tabuleiros Dissecados .....	89
4.3.3. Planícies Fluviomarinhas (Mangues) .....	91
4.3.4. Planícies Marinhas (Cordões Litorâneos) .....	93
4.3.5. Campos de Dunas .....	95
4.3.6. Planícies de Inundação (Várzeas) .....	96
4.3.7. Aterros (Depósitos Tecnogênicos).....	97
<b>5. SOLOS.....</b>	<b>98</b>
5.1. CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS DA ILHA DE SÃO LUÍS.....	99
5.2. INFILTRAÇÃO, TRANSMISSÃO E RETENÇÃO DE ÁGUA NOS PRINCIPAIS SOLOS DA ILHA DE SÃO LUÍS .....	102
5.2.1. Avaliação da Retenção de Água no Solo .....	104
5.2.2. Análise da Infiltração e Transmissão de Água nas Principais Classes de Solo da Ilha de São Luís .....	106
<b>6. USO E OCUPAÇÃO DO SOLO .....</b>	<b>115</b>
6.1. MANGUES .....	115
6.2. RESTINGAS.....	115
6.3. MATAS SECUNDÁRIAS .....	116
6.4. MATA SECUNDÁRIA FRAGMENTADA.....	116
6.5. CULTURAS AGRÍCOLAS .....	116
6.6. SOLO EXPOSTO .....	116
6.7. URBANO DE ALTA DENSIDADE.....	117
6.8. URBANO DE MÉDIA DENSIDADE.....	117
6.9. URBANO DE BAIXA DENSIDADE.....	117
6.10. URBANO INDUSTRIAL .....	117
6.11. CORPOS D'ÁGUA.....	117
6.12. IMPLICAÇÕES DA EXPANSÃO URBANA NA DISPONIBILIDADE HÍDRICA DA ILHA DE SÃO LUÍS.....	119
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>125</b>
<b>ANEXO 1</b>	
Descrições detalhadas dos pontos de amostragem e dos procedimentos adotados para coleta de sedimentos para datação por luminescência opticamente estimulada (LOE)	

# 1

## APRESENTAÇÃO

**O PLANO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS (PNRH)**, aprovado pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos, por meio da Resolução nº 058, de 30 de janeiro de 2006, configura-se como instrumento norteador da implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e pauta a atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos – SINGREH, em consonância com os fundamentos da descentralização e da participação na gestão dos recursos hídricos, preconizados pela Lei 9.433/97. A Agência Nacional de Águas - ANA, na condição de entidade federal implementadora do PNRH, em obediência aos preceitos acima, instituiu a Agenda de Ações para a Gestão Integrada dos Recursos Hídricos Superficiais e Subterrâneos, que tem como objetivo principal fortalecer a implementação da gestão integrada de recursos hídricos superficiais e subterrâneos no Brasil.

Neste sentido, foi elaborado um projeto técnico visando a avaliação dos recursos hídricos subterrâneos da Ilha de São Luís e suas interações com os mananciais superficiais. Esse projeto visa subsidiar a gestão de recursos hídricos, a apresentação de sugestões de normas e procedimentos de gestão, a indicação de diretrizes para uma exploração sustentável e a verificação da possibilidade de ampliação do uso das águas subterrâneas como incremento ao sistema de abastecimento na região. A localização da área estudada e dos municípios beneficiados pode ser vista na Figura 1.

Os trabalhos desenvolvidos, embora enfatizem as águas subterrâneas, tratam da avaliação dos recursos hídricos totais da Ilha, visando subsidiar a gestão tanto das águas subterrâneas quanto das águas superficiais.

O crescimento populacional dos municípios da Ilha de São Luís nas últimas décadas tem sido bastante expressivo, com média de 22% entre 2000 e 2010, destacando-se neste contexto o município de São José do Ribamar com incremento de 54% no período (IBGE, 2010). O incremento no desenvolvimento populacional e socioeconômico se reflete diretamente na demanda pelo uso da água.

Tendo em vista a crescente demanda local pelos recursos hídricos, sobressai-se a preocupação com um possível aumento de crises hídricas relacionadas à sua utilização, as quais podem ser agravadas pela demanda descontrolada e por reduções nas recargas de águas subterrâneas, que pode ter causas antrópicas ou naturais, tornando-se imprescindível e urgente a necessidade de se conhecer a disponibilidade hídrica subterrânea atual e suas interações com os mananciais superficiais, sua vulnerabilidade à contaminação, bem como projetar cenários futuros de exploração. Somente considerando os usos conjuntos das águas de superfície e subterrânea e o prognóstico dos seus efeitos sobre a disponibilidade hídrica total nas bacias se tornará possível a tomada de decisões estratégicas para a preservação dos mananciais em bases técnicas e científicas consistentes.

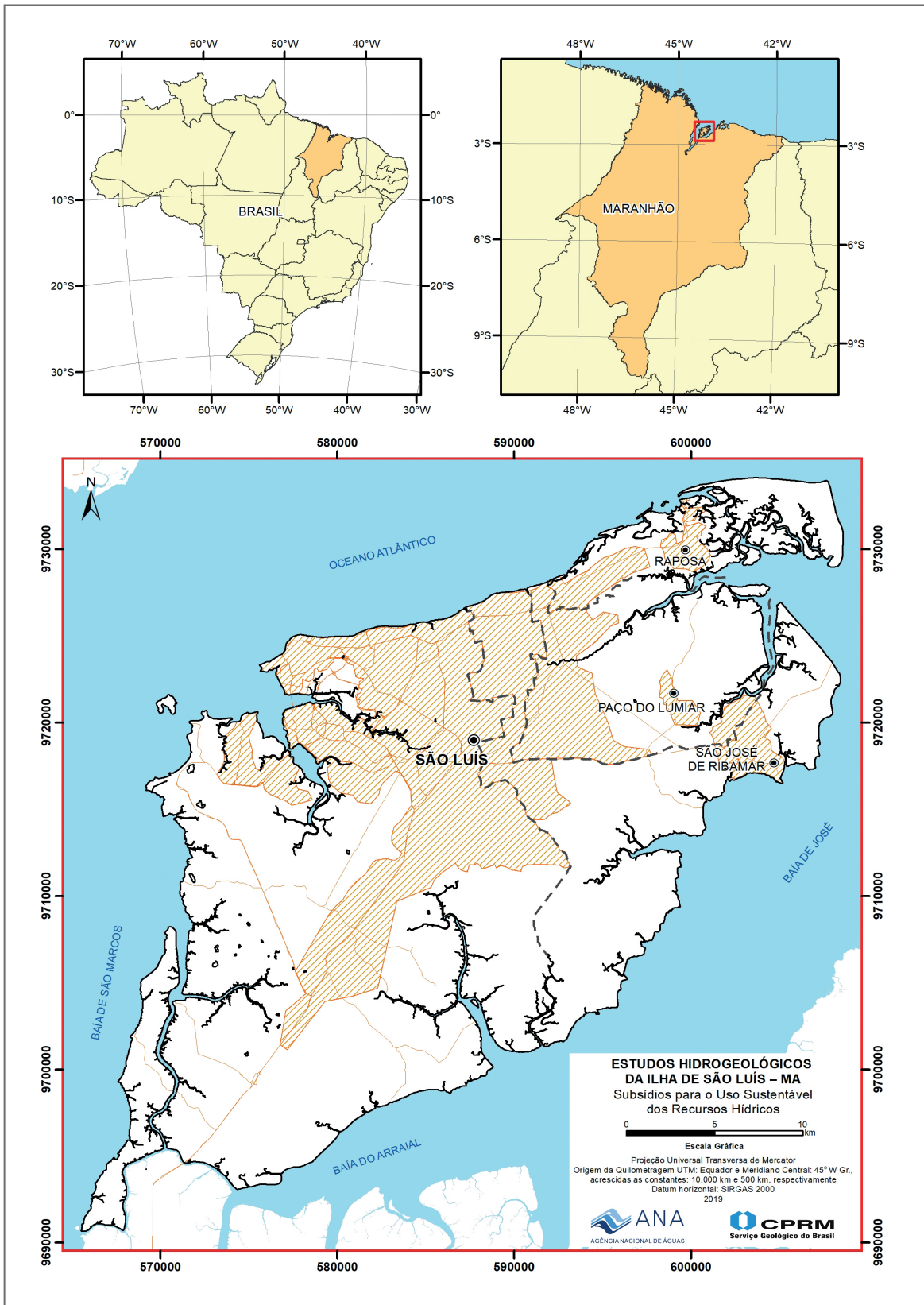


Figura 1: Mapa de localização



Neste RELATÓRIO FINAL se apresenta a consolidação do trabalho, iniciado em setembro de 2016, tendo, portanto, uma duração de 36 meses de pesquisas. Durante esse período foram elaborados 9 (nove) relatórios parciais, todos sistematicamente analisados e corrigidos por representantes da Comissão Técnica de Acompanhamento e Fiscalização – CTAF, constituída por instituições públicas (órgão gestor de recursos hídricos, Universidades, e Prefeituras Municipais), empresas de saneamento e a sociedade civil. No caso deste Estudo da Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMA), Companhia de Saneamento Ambiental do Maranhão (CAEMA), BRK Ambiental, Universidade Federal e Estadual do Maranhão (UFMA e UEMA), do Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CERH), e das Prefeituras de Paço do Lumiar e São José de Ribamar. O relatório encontra-se estruturado da seguinte forma:

**VOLUME I:** Caracterização do Meio Físico

Engloba informações relativas à caracterização geológica da área, estudos geofísicos, geomorfologia, solos e uso e ocupação do solo na Ilha de São Luís.

**VOLUME II:** Hidroclimatologia e Avaliação Urbana

Apresenta a avaliação hidroclimática, avaliação hidrológica, balanço hídrico e estimativa das recargas naturais, com uma caracterização dos sistemas de drenagem urbana, esgotamento sanitário e de abastecimento de água de forma a avaliar o impacto da urbanização na recarga de forma a estimar as recargas urbanas.

**VOLUME III:** Hidrogeologia

Reúne toda a informação hidrogeológica, hidroquímica e isotópica levantada neste estudo, tanto em trabalhos de campo como em outros trabalhos anteriores de forma a consolidar toda a informação hidrogeológica existente necessária para embasar a gestão das águas subterrâneas.

**Volume IV:** Ferramentas e estratégias de gestão

Discute os dispositivos legais hoje existentes na Ilha de São Luís relativos aos recursos hídricos e a situação atual de sua gestão na Ilha, apresenta o sistema hídrico local, discorrendo sobre suas vulnerabilidades a contaminações e à salinização, elenca as principais fontes de contaminação presentes na Ilha, alertando para o perigo de contaminação das águas subterrâneas, para cada uma das bacias hidrográficas existentes. Discorre sobre as áreas de proteção de poços e de aquíferos, apresenta novas estimativas de recarga, avalia reservas e esboça um mapa de zonas de restrição de uso de águas subterrâneas. No final, a partir da modelagem matemática da área, faz previsões sobre possíveis cenários futuros da exploração.

**Volume V:** Mapas em PDF na escala 1:50.000

**Volume VI:** Sumário Executivo



## 1.1. A ÁREA DE ESTUDOS

Os principais dados populacionais da ilha de São Luís (área metropolitana de acordo com a LCE nº 174/2015), encontram-se resumidos na Tabela 1 (IPEA, 2014).

Tabela 1: Área, população e densidade demográfica dos municípios da ilha de São Luís (FONTE: IPEA, 2014)

MUNICÍPIO	POPULAÇÃO	ÁREA (km <sup>2</sup> )	DENSIDADE DEMOGRÁFICA (hab./km <sup>2</sup> )
São Luís	1.014.837	834,781	1215,69
São José do Ribamar	163.045	388,369	419,82
Paço do Lumiar	105.121	124,753	842,63
Raposa	26.327	64,353	409,1

A área de estudos, bem como a delimitação dos respectivos municípios pode ser vista na Figura 1.

Limita-se a norte com o Oceano Atlântico, a oeste com a Baía de São Marcos, a leste com a Baía de São José e a sul com o Estreito dos Mosquitos. Está ligada ao interior do estado e ao estado do Piauí pela Ferrovia São Luís – Teresina (Ferrovia Transnordestina), e aos estados do Pará e Tocantins por meio da Estrada de Ferro Carajás e pela Ferrovia Norte/Sul, esta última prolongando-se até a Região Centro-Oeste, facilitando o escoamento de safras para o Porto de Itaqui. Por via rodoviária, o principal acesso se faz pela BR – 135, que liga a ilha ao continente. O transporte aéreo é feito por meio do Aeroporto Marechal Cunha Machado. Conta ainda com um serviço de *ferry-boats*, que faz sua ligação com o município de Alcântara.

Limita-se pelas coordenadas 02°22'23" e 02°51'00" Lat. Sul; 44°26'41" e 43°59'41" Long. Oeste. Faz parte do Sistema Hidrográfico das Ilhas Maranhenses, caracterizando-se como espaços que vem, ao longo dos anos, sendo ocupados de forma não ordenada, desrespeitando as condições do meio natural. É considerada uma ilha – península, dada sua compleição insular ante a existência de um estreito canal (mosquitos) que a separa da Baixada de Perizes e a interliga às baías de São José e São Marcos (PEREIRA, 2018).

# 2

## CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA

**O ENTENDIMENTO DA GEOLOGIA DE UM TERRITÓRIO**, por meio do mapeamento geológico, é imprescindível para a gestão territorial e dos recursos naturais. O mapeamento geológico fornece dados que contribuem para avanços no estudo das geociências, ajudando a entender a formação, dinâmica e evolução do planeta ao longo do tempo geológico. Pode ser aplicado em diversas áreas do conhecimento, como exploração mineral, meio ambiente, agricultura, riscos geológicos, etc.

Em trabalhos de hidrogeologia, o mapeamento geológico visa identificar os tipos rochosos e entender a geometria das camadas geológicas, bem como auxiliar a identificação e classificação dos aquíferos, além da definição das camadas confinantes, se presentes. O conhecimento dos diversos litotipos que compõem os aquíferos também é importante para entender como a interação rocha/água influencia as características e qualidade das águas subterrâneas.

Os objetivos do presente estudo se atêm à caracterização da geologia da Ilha de São Luís, Ilha do Maranhão ou Ilha de Upaon-Açu, considerando aspectos litológicos, tectônicos e estruturais, como subsídio para a elaboração do levantamento das disponibilidades hídricas locais. A seguir é apresentada uma caracterização geral da região, com base em dados bibliográficos, seguida da descrição dos resultados obtidos em campo no âmbito do presente estudo.

### 2.1. ARCABOUÇO TECTÔNICO – GEOLÓGICO REGIONAL

O rifteamento que culminou com a abertura do Oceano Atlântico, iniciada no Neocomiano, resultou na formação de várias bacias individualizadas no Leste e Nordeste do Brasil (SZATMARI *et al.*, 1987). Alguns riftes da margem continental atlântica foram abortados e não evoluíram para bacias de margem continental divergente (passiva), pois sua evolução cessou antes da formação da crosta oceânica atlântica.

A maioria dos riftes eram mares epicontinentais cretáceos, com deposição de espessas sequências marinhas e transicionais em fossas intracontinentais, geralmente oblíquas à linha de costa do proto-oceano Atlântico Central (ou Equatorial) e Sul. Eventualmente essa sedimentação alcançou porções mais interiores do continente e depositou pacotes sedimentares mais delgados em amplas bacias tipo sag. Outros riftes costeiros continuaram a evoluir com o estiramento litosférico e expansão do fundo oceânico e se tornaram bacias de margem continental distensiva. Por isso Vasquez *et al.* (2012) distinguem bacias de riftes costeiros abortados (associação Bacia de Riftes Abortados Mesozoicos) e bacias de margem divergente (associação Bacias de Margem Passiva Mesozóicas).

As bacias localizadas na margem Equatorial, devido ao processo de transcorrência divergente, mostram um grau de complexidade estrutural maior que suas correspondentes da borda Leste (SZATMARI *et al.*, 1987; ARANHA *et al.*, 1990; GÓES & ROSSETTI, 2001). Uma destas bacias é a de São Luís, a qual faz parte do Sistema de Gráben do Gurupi (GÓES & ROSSETTI, 2001).



A Ilha do Maranhão está situada geologicamente na Bacia de Rifte Abortado de São Luís e Ilha Nova, que se formou a partir de um sistema de grábens instalados durante a metade final do Eocretáceo (VASQUEZ *et al.*, 2012), conforme mostrado na Figura 2.

### 2.1.1. Bacias de São Luís e Ilha Nova

As bacias de São Luís e Ilha Nova localizam-se no litoral noroeste do Estado do Maranhão e constituem grábens desenvolvidos sobre o Fragmento Cratônico São Luís. A norte são separadas das bacias do Pará-Maranhão e Barreirinhas pela Plataforma de Ilha de Santana e o limite sul é o Arco Ferrer-Urbano Santos, que a separa da Bacia do Parnaíba.

Estas bacias mostram uma configuração estratigráfica dividida em seqüências Pré-Rifte, Rifte e Drifte (Figura 2). O seu embasamento é constituído principalmente por unidades do Fragmento Cratônico São Luís. Também compõe esse substrato uma seqüência cambro-ordoviciano que corresponde à Formação Bequimão, que é uma fase rifte pretérita à formação das bacias (ZALÁN, 2007).

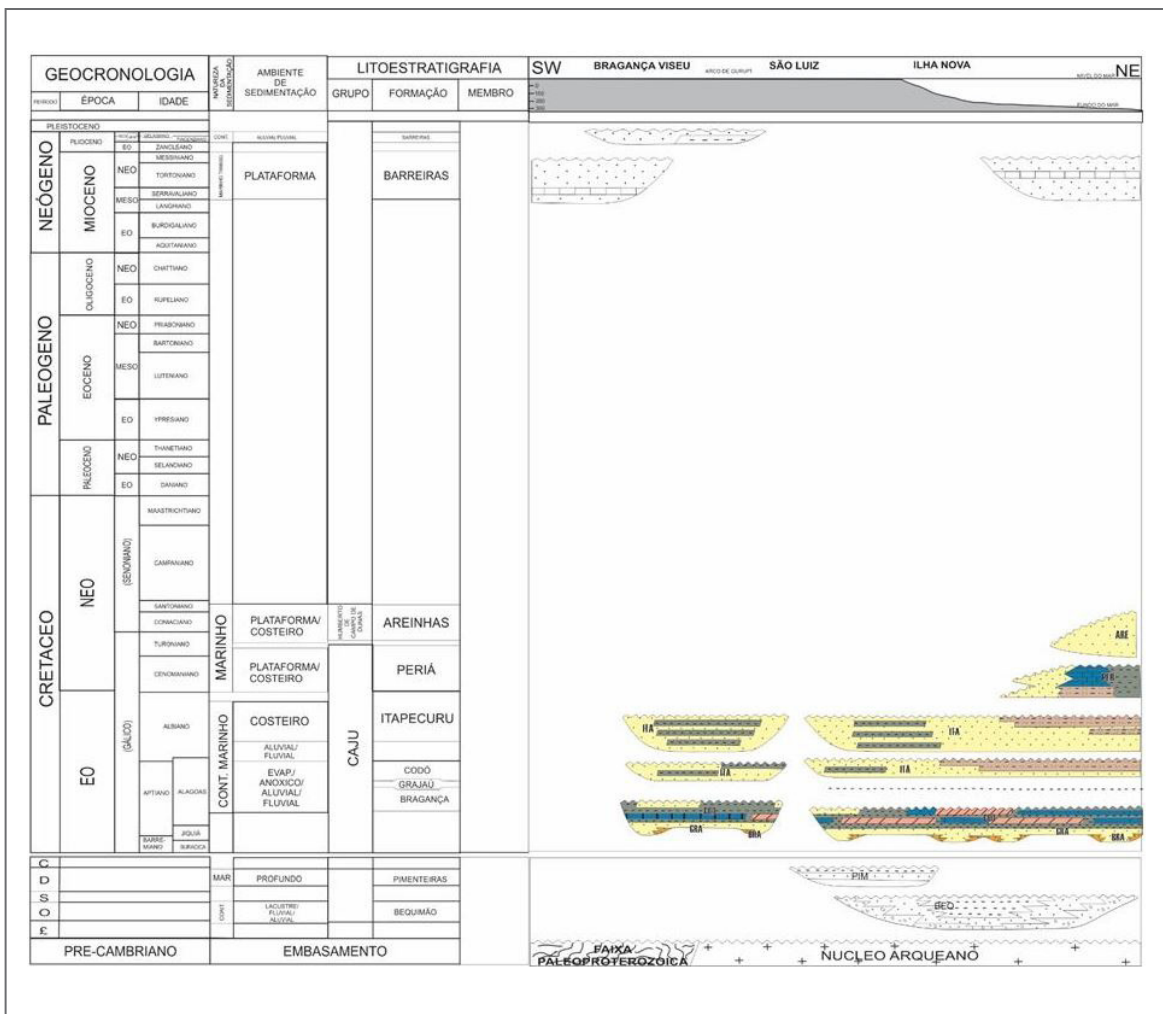


Figura 2: Coluna estratigráfica das bacias de São Luís – Ilha Nova – Bragança – Viseu (ZALÁN, 2007)



A sequência devoniana pertence à Bacia do Parnaíba e possui espessura máxima de 500m (ZALÁN, 2007). A Sequência pré-rifte, de idade Aptiana, é composta pelas formações Bragança, Grajaú e Codó (LIMA *et al.*, 1994). Na Bacia de São Luís, a sequência de rifte corresponde ao Grupo Itapecuru, apresentando duas idades deposicionais, uma no Albiano Inferior e outra no Albiano Médio-Superior. A sequência drift é praticamente ausente na Bacia de São Luís e na Bacia de Ilha Nova e localiza-se próxima do seu limite com a Bacia de Barreirinhas. Esta sequência é representada pelas formações Peria (Grupo Caju), Areinhas e Pirabas (ZALÁN, 2007).

Durante o mapeamento geológico foram identificadas apenas unidades pertencentes à Bacia de São Luís (Grupo Itapecuru) e coberturas Cenozóicas (formações Barreiras, Pós-Barreiras e depósitos recentes tipo mangue, dunas, pântanos salinos, etc.).

#### **2.1.1.1. O Grupo Itapecuru (K12it)**

O nome Itapecuru foi usado inicialmente por Lisboa (1914), que denominou de Camadas Itapecuru rochas aflorantes entre os rios Itapecuru e Alpercatas. Campbell (1949) chamou de Formação Itapecuru arenitos com siltitos e folhelhos intercalados que recobrem concordantemente a Formação Codó. Os depósitos situados entre as formações Codó/Grajaú (Aptiano) e Pirabas/Barreiras (Oligo-Mioceno) passaram a ser denominados de Formação Itapecuru (MESNER e WOOLDRIDGE, 1964; CUNHA e CARNEIRO, 1973; LIMA e LEITE, 1978; SCHOBENHAUS *et al.*, 1981 e ALMEIDA *et al.*, 1995), que possui idade cenomaniana e é caracterizado por pacotes de arenito, pelito e, subordinadamente, calcário e conglomerado.

Com base em descrição detalhada de depósitos de idade Cretácea-Paleógena localizados na região de Alcântara (MA), Bacia de São Luís (ROSSETTI, 1996; ROSSETTI, 1997), Rossetti e Truckenbrodt (1997) elevaram a Formação Itapecuru à categoria de Grupo, composto, da base para o topo, pela Unidade Indiferenciada (Albiano - em subsuperfície), Formação Alcântara (Albiano-Cenomaniano) e Formação Cujupe (Cretáceo Superior? - Paleógeno).

No presente trabalho se adota a denominação Grupo Itapecuru, tendo sido identificada na área as formações Alcântara e Cujupe, descritas a seguir.

O Grupo Itapecuru é uma das unidades com maior distribuição espacial no Maranhão, composto por arenitos, argilitos, siltitos e conglomerados, oriundos de deposição em diversos ambientes. Na região leste do Estado foram identificados depósitos de delta de baía (Rodrigues *et al.*, 1994).

Lima e Rossetti (2001), Lima e Leite (1978) afirmam que a deposição do Grupo Itapecuru seria predominantemente fluvial ao longo da região próxima ao Arco Xambioá. Em estudos realizados por Araújo *et al.* (2007) na praia de São Marcos, o ambiente deposicional interpretado foi de planície deltaica. A presença de palinóforos marinhos na associação palinológica sugere um ambiente marinho com forte aporte de terrígeno.

Rossetti (2001) dividiu, informalmente, o Grupo Itapecuru em 2 sequências deposicionais (S2 e S3) limitadas por superfícies de caráter regional, em que a sucessão basal possui organização interna compatível com tratos de sistemas. A sequência basal (S2) é de idade eo/mesoalbiana, e



mostra uma subdivisão interna tripartida (S2a, S2b, S3c), a sequência superior (S3) é de idade Mesoalbio-Maastrichtiano, possuindo 6 unidades cíclicas superpostas, que podem estar associadas às frequentes transgressões no Neo Albiano ao Cenomaniano (Tabela 2).

### 2.1.1.2. A Formação Alcântara (K12a1)

Ao descrever afloramentos na cidade de Alcântara, Cunha (1968) propôs o termo “Formação provisória Alcântara” para nominar depósitos cenomanianos (Cretáceo Superior) constituídos por folhelhos sílticos com leitos de calcário esbranquiçado. Esses depósitos já foram considerados como fácies (KLEIN e FERREIRA, 1979; PETRI e FÚLFARO, 1983) ou como membro (RODRIGUES *et al.*, 1994a) da “Formação Itapecuru”. Posteriormente, em estudo de revisão estratigráfica na Bacia de São Luís, Rossetti e Trukenbrodt (1997) enquadraram os depósitos cenomanianos na categoria de formação e propuseram a utilização do termo Formação Alcântara para se referir aos mesmos, cuja seção tipo está situada na Ilha de Livramento, em Alcântara.

A Formação Alcântara é composta por um pacote de aproximadamente 30 m de espessura, equivalente à unidade S3 proposta por Rossetti (2001) (Tabela 2). É constituída por arenitos, pelitos e subordinadamente por calcário e conglomerado. Aflora principalmente em falésias costeiras localizadas no município de Alcântara (Foto 1) e São Luís, ou em cortes de estrada situados nos trechos Pinheiro-Guimarães, Bacuritiba-Cajapió e Santa Inês-Bom Jardim (ROSSETTI, 1997).

Conforme Rossetti (1997), os arenitos têm granulometria fina a média (Foto 1), são bem litificados, comumente cimentados por calcita e apresentam vários tipos de estratificação, como estratificação cruzada do tipo *swaley* (Foto 2) e *hummocky* (menos comum), cruzada tabular, cruzada de grande escala e baixo ângulo, além de laminações paralelas ondulantes. Os pelitos podem ser maciços, com laminação plano-paralelas ou com acamamento deformado. Os calcários são brancos a cinza e intercalam-se aos pelitos. As rochas são compostas por quartzo, palygorskita, dolomita, clorita, esmectita, illita, caulinita, calcita e traços de feldspatos (AMORIM e ANGÉLICA, 2011). Amorim e Angélica (2011) identificaram a presença de duas gerações de palygorskita em perfil localizado na praia da Baronesa, Alcântara. A primeira é maciça, está associada aos pelitos e é identificada apenas por difração de raios X. A segunda, visível a olho nu, aparece como acumulações esbranquiçadas, eflorescentes (Foto 3), e em pequenas lentes (Foto 4).

As rochas da Formação Alcântara foram originadas por processos de tempestade e, subordinadamente, correntes de maré, em ambientes de *shoreface/foreshore*, canal de maré e laguna/*washover* (ROSSETTI, 1997), que caracterizam sistemas de ilhas barreira, associados a vales incisos (ROSSETTI, 2001).

O registro fóssilífero desta unidade é muito variado, sendo composto por pólenes, invertebrados marinhos (foraminíferos, gastrópodos, bivalves), vertebrados (peixes, tartarugas, crocodilos e dinossauros), fragmentos vegetais (folhas, troncos silicificados) e pistas e pegadas de dinossauros (SANTOS e CARVALHO, 2009). Quanto à idade, a unidade é considerada eo-cenomaniana, Cretáceo Superior (AGUIAR, 1971; PEDRÃO, 1996).

Tabela 2: Síntese das sequências deposicionais definidas na bacia de São Luís-Grajaú e sua correlação com as unidades definidas anteriormente, com ênfase no Grupo Itapecuru (compilado de ROSSETTI, 2001)

IDADE	ESTRATIGRAFIA		
	ROSSETTI 2001		ROSSETTI & TRUCKDENBRODT (1997)
Cenomaniano-Maestrictiano	S3		FORMAÇÃO OCUJUPE
			FORMAÇÃO ALCÂNTARA
Albiano	S2	GRUPO ITAPECURU	UNIDADE INDIFERENCIADA
Eo			
Meso			
Neo			
Aptiano	S1		FORMAÇÕES CODÓ E GRAJAÚ
Pré-cambriano e Paleozóico			Embasamento



Foto 1: Falésia da Praia da Baronesa (Formação Alcântara) composta por alternâncias de arenitos, pelitos e dolomitos (Alcântara - MA)



Foto 2: Arenito da base da Formação Alcântara com estratificação cruzada do tipo *swaley*. Praia da Prefeitura, Alcântara



Foto 3: Amostra de pelito contendo palygorskita (porção esbranquiçada). Praia da Baronesa – Alcântara



Foto 4: Níveis de palygorskita (porção esbranquiçada) na Formação Alcântara, Praia da Baronesa – Alcântara

### 2.1.1.3. A Formação Cujupe (K2E1c)

A Formação Cujupe, proposta por Rossetti e Truckenbrodt (1997), possui aproximadamente 25 m de espessura e tem como área tipo a estrada que liga a rodovia Pinheiro-Alcântara (MA-106) ao Porto de Cujupe (ROSSETTI; TRUCKENBRODT, 1997). Ocorre sobreposta discordantemente à Formação Alcântara e sotoposta ao Grupo Barreiras, em contato discordante, marcado por paleossolo laterítico.

As melhores exposições ocorrem nas adjacências da cidade de Pinheiro e ao longo das rodovias Pinheiro-Porto de Cujupe, Santa Inês-Alcântara e Santa Inês - Nova Olinda (Foto 5).

A unidade é composta litologicamente por arenitos intercalados a argilitos e, subordinadamente, conglomerados. Corresponde à unidade S3f de Rossetti (2001) (Tabela 2). Os arenitos são caulínicos, com granulometria fina a muito fina, bem selecionados, de coloração branca ou rósea a amarelada. Os argilitos possuem coloração branca, cinza a violácea e os conglomerados são do tipo intraformacional, com clastos de argila e matriz arenosa (Foto 6.A). São reconhecidas estruturas sedimentares oriundas da ação de correntes de maré, como estratificação cruzada sigmoidal, acamamento heterolítico (lenticular, *flaser* e *wavy*) (Foto 6.B), acamamento maciço ou deformado, laminação planoparalela e microlaminação cruzada.



Foto 5: Fotografia panorâmica mostrando a Formação Cujupe (Porto de Cujupe-MA)

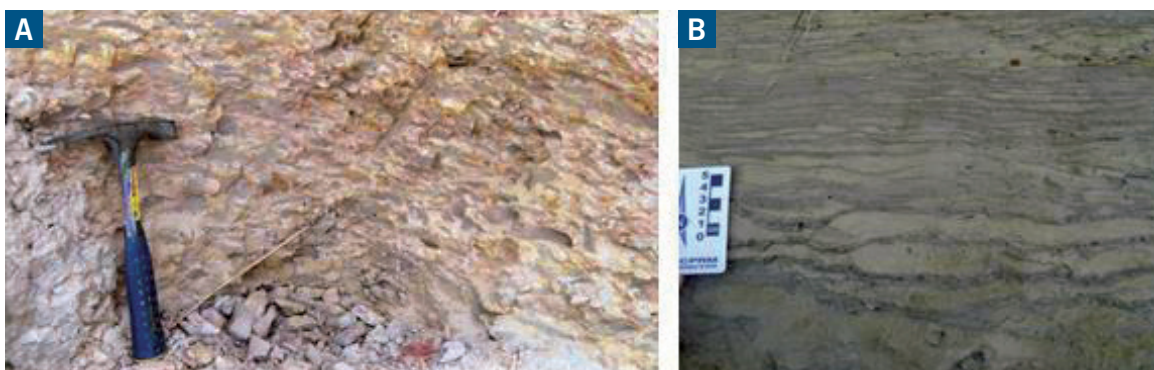


Foto 6: (A) Conglomerado intraformacional na Formação Cujupe (Porto de Cujupe-MA);  
(B) Acamamento *wavy* e *flaser* em arenitos-argilosos da Formação Cujupe  
(Morro Jarupari – São Luís/MA)



A unidade é composta por depósitos estuarinos (ROSSETTI, 1998; LIMA; ROSSETTI, 2001), formados em um paleovale localizado no leste da Bacia de São Luís (ROSSETTI, 2003), e que se prolonga para sudoeste, além dos limites da referida bacia (LIMA; ROSSETTI, 1999, 2001).

Os depósitos oriundos da porção distal deste sistema estuarino foram formados totalmente por processos atribuídos a ambientes deposicionais de canal de maré, preenchimento de baía estuarina, baixios de maré/planície de areia e delta de maré (ROSSETTI, 1998). Já os depósitos formados na porção proximal, caracterizam um complexo de delta de baía atribuído a um sistema estuarino dominado por onda, composto por depósitos de barra de desembocadura, canal fluvial/canal distributário, barra de desembocadura distal/crevasse e baía interdistributária/prodelta (LIMA; ROSSETTI, 1999, 2001). Foi reconhecida na unidade a assembleia icnológica representada por *Ophiomorpha*, *Skolithos*, *Thalassinoides*, *Diplocraterion*, *Planolites*, *Arenicolites* e *Palaeophycus* (Rossetti, 2001). A Formação Cujupe não possui registro fóssil (SANTOS; CARVALHO, 2009) e considera-se que a deposição da mesma ocorreu em um tempo incerto entre o Turoniano (Eocretáceo) e o Paleógeno, com base no seu posicionamento estratigráfico (ROSSETTI, 1996; ROSSETTI; TRUCKENBRODT, 1997).

### 2.1.2. Formação Barreiras (Enb)

O nome Barreiras foi usado inicialmente por Oliveira e Leonardos (1943), que designaram de Série das Barreiras, rochas cenozóicas que ocorrem no litoral brasileiro. Na década de 1950 alguns autores passaram a usar a expressão Formação Barreiras para nomear esses depósitos (KEGEL 1957, OLIVEIRA e RAMOS 1956) e outros propuseram designá-los de Terciário Superior Indiviso (ANDRADE 1955) ou Formações Cenozóicas Indiferenciadas (MATOSO e ROBERTSON, 1959).

Um estudo mais sistemático foi apresentado pela primeira vez por Bigarella e Andrade (1964), que propuseram a denominação de Grupo Barreiras para as rochas que ocorrem na faixa costeira do Estado de Pernambuco. A partir de então, vários trabalhos foram realizados na unidade, destacando-se os da região nordeste e norte do país (ARAI, 2006; ROSSETTI, 2006; MABESOOONE *et al.*, 1972; BIGARELLA, 1975; ALHEIROS *et al.*, 1988, ARAI *et al.*, 1988; ROSSETTI *et al.*, 1989; ALHEIROS e LIMA-FILHO, 1991; COSTA *et al.*, 1993; TRUCKENBRODT *et al.*, 1994; VILLAS BOAS *et al.*, 2001; ARAÚJO *et al.*, 2006, dentre outros).

Quanto à hierarquia, de acordo com Arai (2006) e Ferraz e Valadão (2005), a unidade deve ser considerada como Grupo, pois há pelo menos duas sequências bem distintas, designadas de Barreiras Inferior e Barreiras Superior.

No mapa geológico do estado do Pará, Vasquez *et al.* (2008) consideram como Grupo Barreiras a sucessão de estratos oligo-miocênicos geneticamente relacionados, que abrange as unidades litoestratigráficas conhecidas como Formação Pirabas e as Formações Barreiras Inferior e Barreiras Superior. A Formação Pirabas não aflora na área do projeto. As formações Barreiras Inferior e Barreiras Superior não foram individualizadas e, portanto, optou-se por utilizar especificamente neste trabalho apenas o termo “Formação Barreiras”.



A Formação Barreiras é composta litologicamente por arenitos mal selecionados, finos a grossos, variegados, em geral argilosos, com numerosas intercalações de folhelhos (AGUIAR, 1971), além de fácies conglomeráticas (GÓES, 1981). Trabalhos realizados nos estados do Pará e Maranhão comprovaram influência marinha na unidade (ARAI *et al.*, 1988, 1994). Na região nordeste do Brasil, a influência marinha foi confirmada no estado de Alagoas por Rossetti e Góes (2009). No Estado do Maranhão, a unidade aflora no nordeste e noroeste e recobre discordantemente o Grupo Itapecuru (Foto 7).

A partir de estudos realizados no nordeste do Pará e litoral do Maranhão, Rossetti e Góes (2004) e Rossetti (2006) propuseram que a sedimentação do grupo ocorreu no Oligo-Mioceno, em sistemas de vales estuarinos encaixados em zonas de falhas. Para Arai (2006) a evolução do Grupo Barreiras deu-se a partir do sistema transgressivo no Eomioceno (Aquitano – Burdigalio), tendo o sistema de mar alto ocorrido no Mesomioceno (Langhiano-Serravalio).

Os produtos desse evento representam as fácies continentais, transicional, carbonática e marinha das formações Pirabas e Barreiras Inferior. Após a reconhecida discordância tortoniana (relacionada à formação da calota glacial Antártida, há cerca de 10 Ma), verificou-se nova transgressão no Neomioceno, cujo sistema de mar alto deu-se no Zancleano (Eoplioceno), resultando na sucessão sedimentar de fácies continental, transicional e marinha do Barreiras Superior.

Neste trabalho considera-se que a sedimentação do Grupo ocorreu no intervalo que vai do Mioceno Inferior ao Plioceno, com base em dados bibliográficos (Figura 3), publicados por Oliveira e Silva (2011), Arai (2006), Rossetti e Góes (2004), Rossetti (2006).

### 2.1.3. Sedimentos Pós-Barreiras (N34pb)

O termo Sedimentos pós-Barreiras é usado desde o final da década de 1960 para nominar a sucessão estratigráfica sobreposta ao Grupo Barreiras (SILVA; LOEWENSTEIN, 1968; SÁ, 1969; GÓES, 1981; ROSSETTI *et al.*, 1989; ROSSETTI, 2004). No presente trabalho admitem-se como Sedimentos Pós-Barreiras os depósitos que recobrem discordantemente as unidades soto-postas (Grupo Itapecuru e Formação Barreiras).

Segundo Rossetti *et al.* (2001), depositou-se diretamente sobre a discordância erosiva do topo dos depósitos miocênicos, o Pós-Barreiras I. Medindo até 10 m de espessura em superfície, esse pacote é composto principalmente por areias vermelho-claras a alaranjadas, friáveis a endurecidas, maciças, bioturbadas, moderadas a bem selecionadas, de granulometria fina a média, localmente grossas a conglomeráticas, com a presença local de pelitos bioturbados.



Foto 7: Rochas com acamamento heterolítico do Grupo Barreiras (topo) em contato discordante com rochas da Formação Cujupe (Grupo Itapecurú). MA-106. Setas vermelhas indicam o contato

Era	Período	Época	Estágio	Idade (Ma)	Rossetti e Góes (2004) Rossetti (2006)	Arai (2006)	Oliveira e Silva (2011)	
Cenozoico	Quaternário	Holoceno		0				
				0.0117				
			Pleistoceno	Superior	0.126			
				Ioniano	0.781			
				Calabriano	1.806			
		Gelasiano	2.588			Formação Superficial Intempérica (ou Formação Laterítica)		
	Neógeno	Plioceno	Piacenziano	3.600				
			Zancleano	5.332		Fm. Barreiras Superior	Fm. Barreiras Superior	
		Mioceno	Messiniano			Paleossolo laterítico		
			Tortoniano	11,6				
			Serravaliano			Fm. Barreiras Med./Sup. 3	Fm. Barreiras Inferior + Fm. Pirabas	Fm. Barreiras Inferior
	Paleógeno	Oligoceno	EÓCENO	Langhiano	15,9			
				Burdigaliano			Fm. Barreiras Inferior 2	
				Aquitano	23,03		Fm. Pirabas 1	Formação Pirabas
			Paleógeno	Chattiano			Rochas pré - miocênicas	Rochas pré - miocênicas
Rupeliano				33,9				

Figura 3: Síntese das propostas de empilhamento litoestratigráfico do Grupo Barreiras, com base nos trabalhos de Oliveira e Silva 2011, Arai 2006, Rossetti e Góes 2004 e Rossetti 2006

Está recoberto, em discordância erosiva, pelos depósitos Pós-Barreiras II, compostos por areias amareladas e marrons, de espessuras médias em torno de 2 a 5 m, bem selecionadas, de granulometria fina a média, principalmente maciças, apresentando, entretanto, estruturas de dissipação de dunas eólicas. Existe uma significativa variedade faciológica para os Sedimentos Pós-Barreiras, como depósitos eólicos (dunas costeiras), depósitos de cordão litorâneo, planície de maré, canal e mangue (ROSSETTI *et al.*, 2001).

Segundo Rossetti e Góes (2004), os depósitos pós-miocênicos mais antigos (que incluem areias vermelho-claras), provavelmente plio-pleistocênicos, depositados diretamente sobre a discordância miocênica, possuem assembleias de minerais pesados muito similares à sucessão miocênica, como teores de andaluzita que variam de 1 a 5%. Já os depósitos caracterizados por areias amareladas, provavelmente do Holoceno Médio, apresentam assembleias distintas, com concentrações de andaluzita de até 10%.

Com base em datação por luminescência opticamente estimulada (LOE), foram detectadas no nordeste do Pará idades variando entre 430.000 ( $\pm$  60.000) e 3.400 ( $\pm$  400) anos AP para a unidade (TATUMI *et al.*, 2007, 2008). Oliveira e Silva (2011) obtiveram idades variando entre 21.300 ( $\pm$  2.500) e 7.230 ( $\pm$  850) anos AP para os Sedimentos Pós Barreiras ocorrentes na Região Metropolitana de Belém e Município de Castanhal-PA, utilizando também o método LOE.

## 2.2. GEOLOGIA LOCAL

Durante o mapeamento geológico, foram identificadas unidades atribuídas ao Grupo Itapecuru (formações Alcântara e Cujupe), à Formação Barreiras, aos sedimentos pleistocênicos (Sedimentos Pós-Barreiras) e ao quaternário. Na Figura 4 se mostra o mapa geológico com a localização dos afloramentos citados no texto.

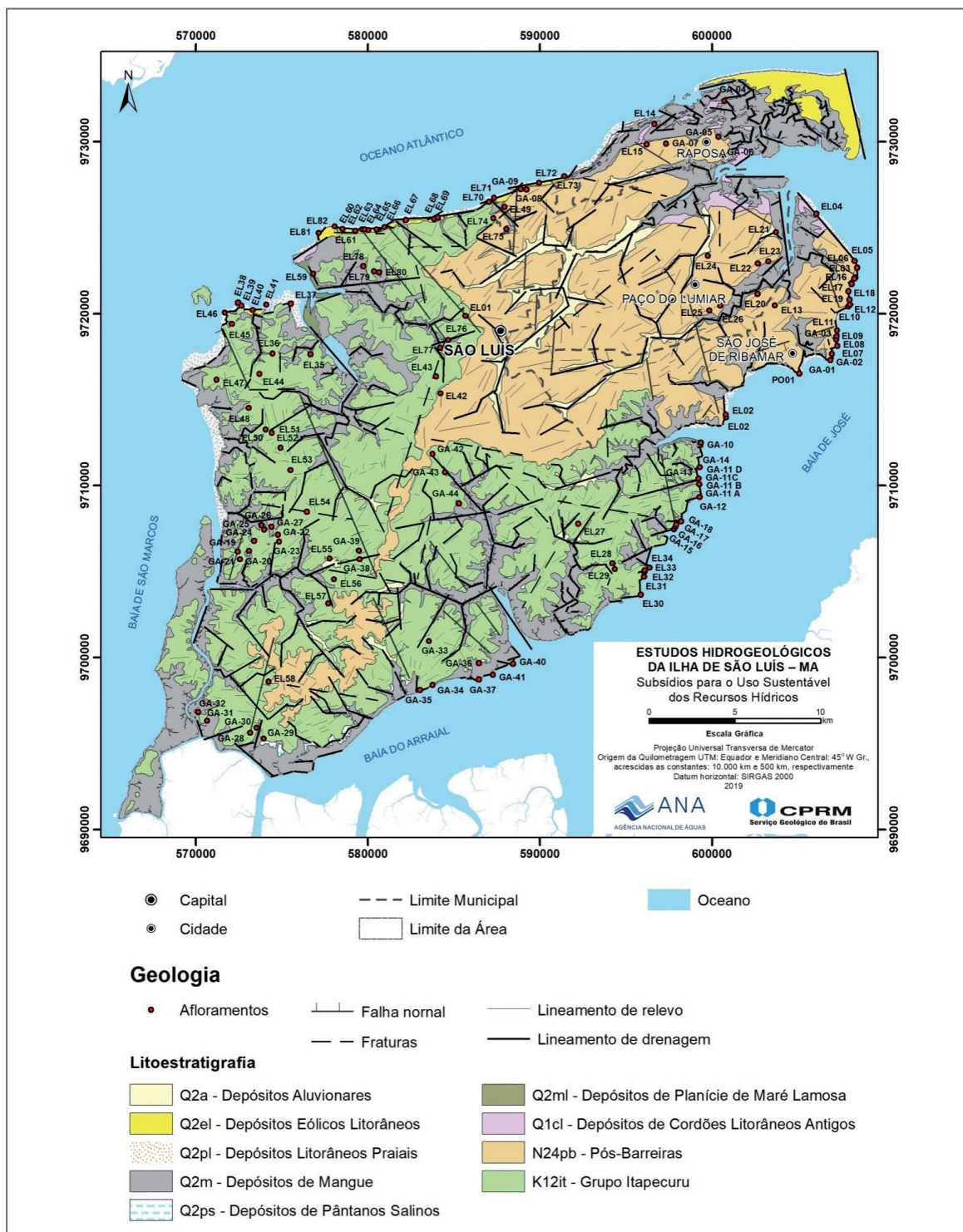


Figura 4: Mapa Geológico da Ilha de São Luís



### 2.2.1. O Grupo Itapecuru

O Grupo Itapecuru ocorre praticamente em toda a área de trabalho, perfazendo pelo menos 80% da Ilha de São Luís, observado em cortes de estradas, morrotes, cavas de extração de areia e falésias. Compõem-se principalmente de arenitos e pelitos intercalados com arenitos finos, bem selecionados, com coloração amarela, roxa, vermelha e esbranquiçada, bem laminados, às vezes ondulados. Subordinadamente ocorrem siltitos vermelhos com estratificações acanaladas e truncadas por onda, arcóseos, calcirruditos e calcarenitos.

Durante o mapeamento individualizou-se a Formação Alcântara (Foto 8), e pacotes relacionados à Formação Cujupe (Foto 9, Foto 10, Foto 11, Foto 12, Foto 13 e Foto 14). Na Figura 5, Figura 6 e Figura 7 são exibidos perfis da Formação Cujupe, compostos essencialmente por intercalações de camadas arenosas, areno-argilosas e argilosas.



Foto 8: (A) Vista panorâmica do afloramento. (B) Siltitos com estratificação acanalada. (C) Os pacotes às vezes estão intercalados com argilas cinza e calcarenitos e calcirruditos (Formação Alcântara) – Praia Ponta da Areia, São Luís/MA. Ponto EL-81



Foto 9: Arenitos finos de cores variegadas intercalados com filmes de argila (Praia Olho D'água, São Luís/MA). Formação Cujupe. Ponto EL-70

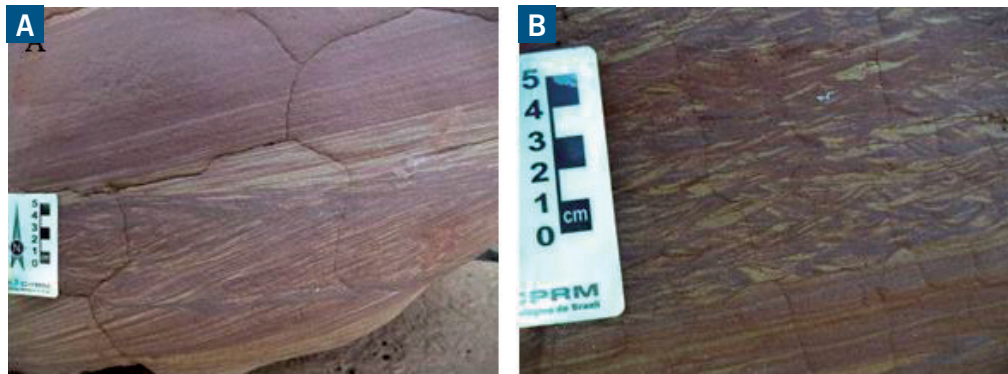


Foto 10: (A) Arenitos finos, avermelhados, com estratificação cruzada acanalada; (B) estrutura tipo wavy. (Formação Cujupe, Praia da Guia, São Luís - MA). EL-39

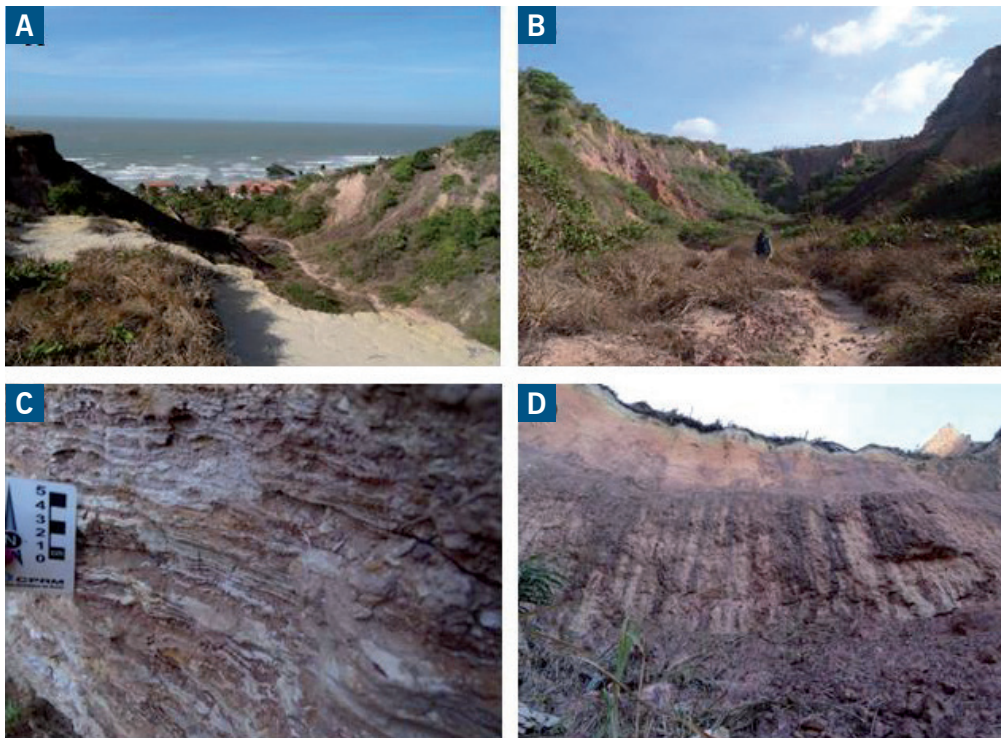


Foto 11: (A e B) Afloramento tipo voçoroca, mostrando camadas centimétricas a métricas de arenito variegado intercalado com camadas argilosas, argilo-siltosas; (C), estratificações plano-paralelas, laminações cruzadas plano paralelas e truncadas; (D) Topo da camada marcado por horizonte ferruginoso colunar (GA-09). Formação Cujupe. Praia Araçagy (São Luís/MA)



Foto 12: Pacote composto por arenito friável, creme amarelado, de granulação média a grossa, com alguns níveis finos ou conglomeráticos, intercalado a lâminas de argila. Contém camada de argila sotoposta a camada de arenito fino no topo. Observa-se estratificação cruzada tangencial de grande porte. Formação Cujupe (GA-22). Mineração Prime S/A, São Luís

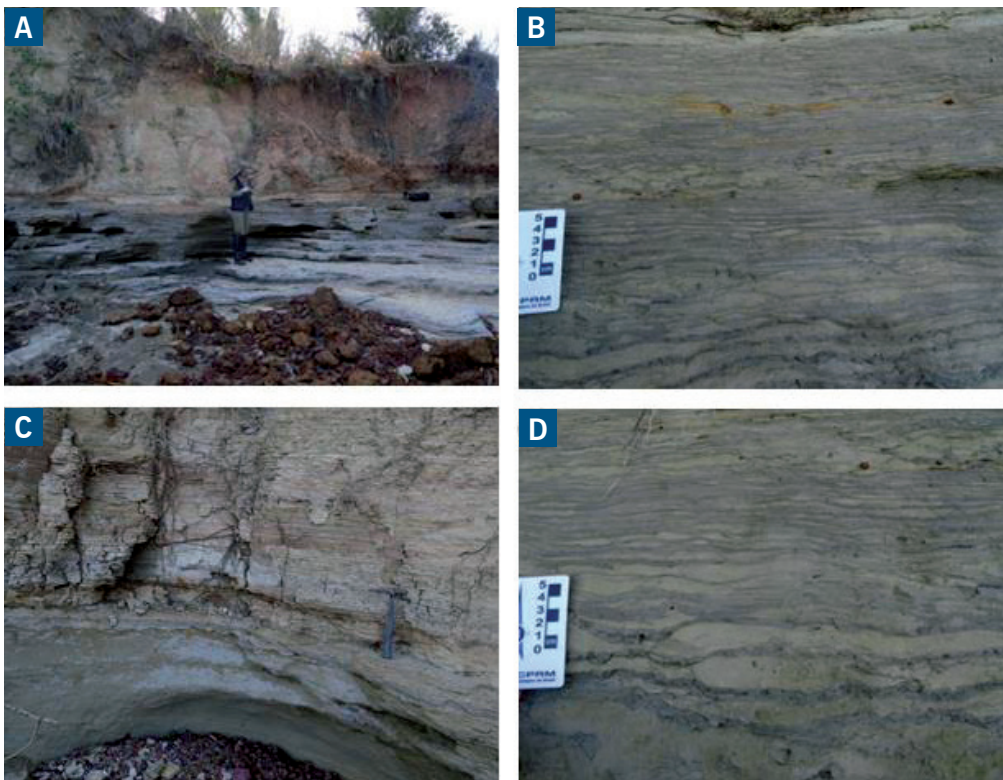


Foto 13: (A) Visão panorâmica do afloramento; (B e C) Camada de arenito muito fino, cinza, apresentando acamamento tipo *wavy* e *flaser*; (D) Sobreposta a essa camada ocorre pacote areno-argiloso, esbranquiçado, variegado, com acamamento lenticular. Formação Cujupe. Morro Jarupari – São Luís/MA. Ponto GA-37

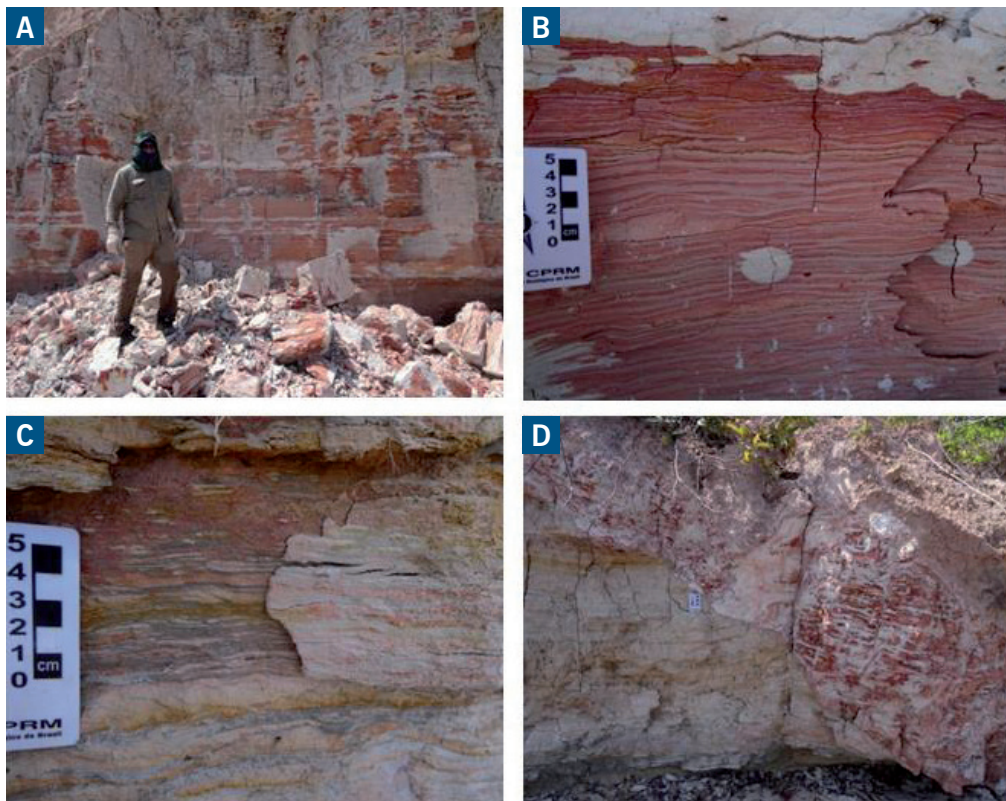


Foto 14: (A, B e C) Rocha areno-argilosa, avermelhada, manchas esbranquiçadas e intercalações de areia e argila (acamamento *wavy* e *flaser*); (D) observa-se contato entre camadas areno-argilosas cinzas com camadas areno-argilosas vermelhas, esbranquiçadas. Formação Cujupe. Morro João da Ponta – São Luís. Ponto GA-40

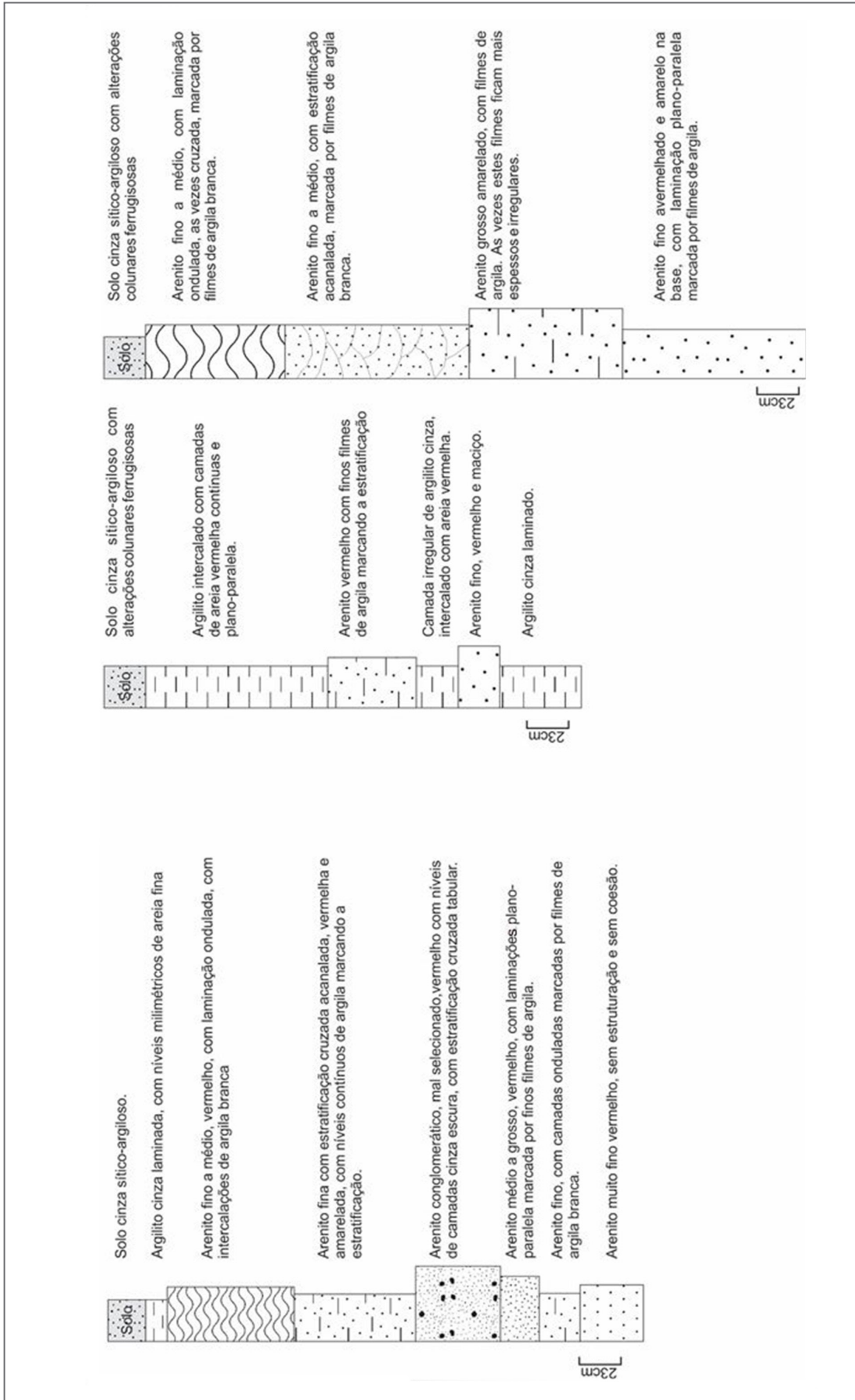


Figura 5: Perfis geológicos da praia de Boa Viagem - São José do Ribamar (EL - 02)

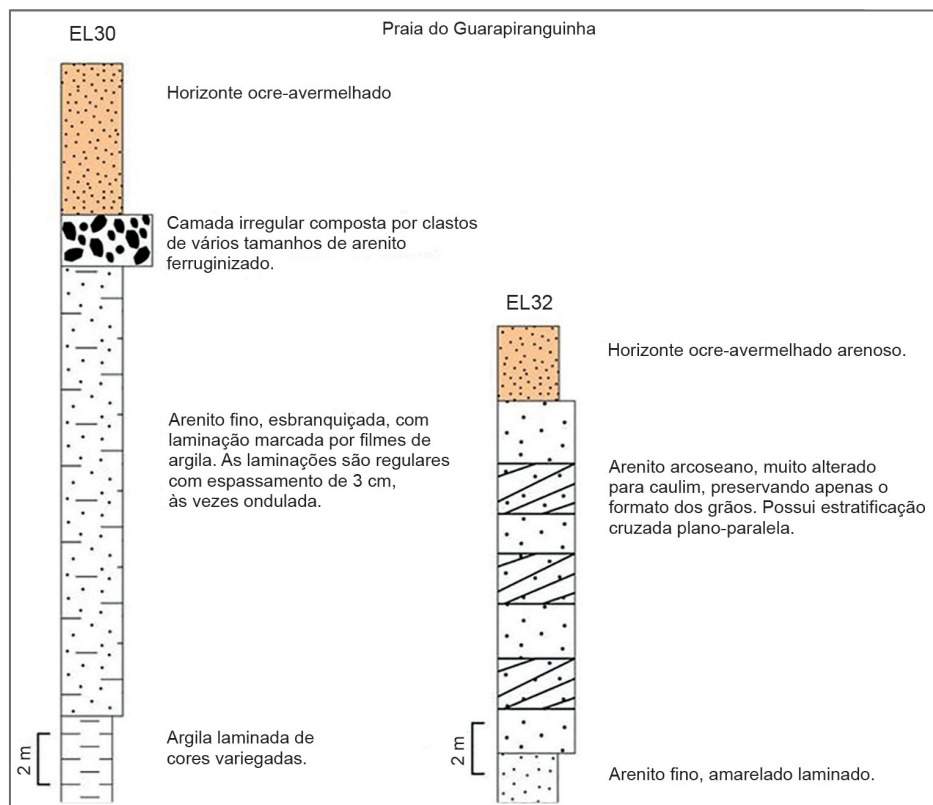


Figura 6: Perfis geológicos praia de Guarapiranguinha, S. José do Ribamar (EL 30 e 32)

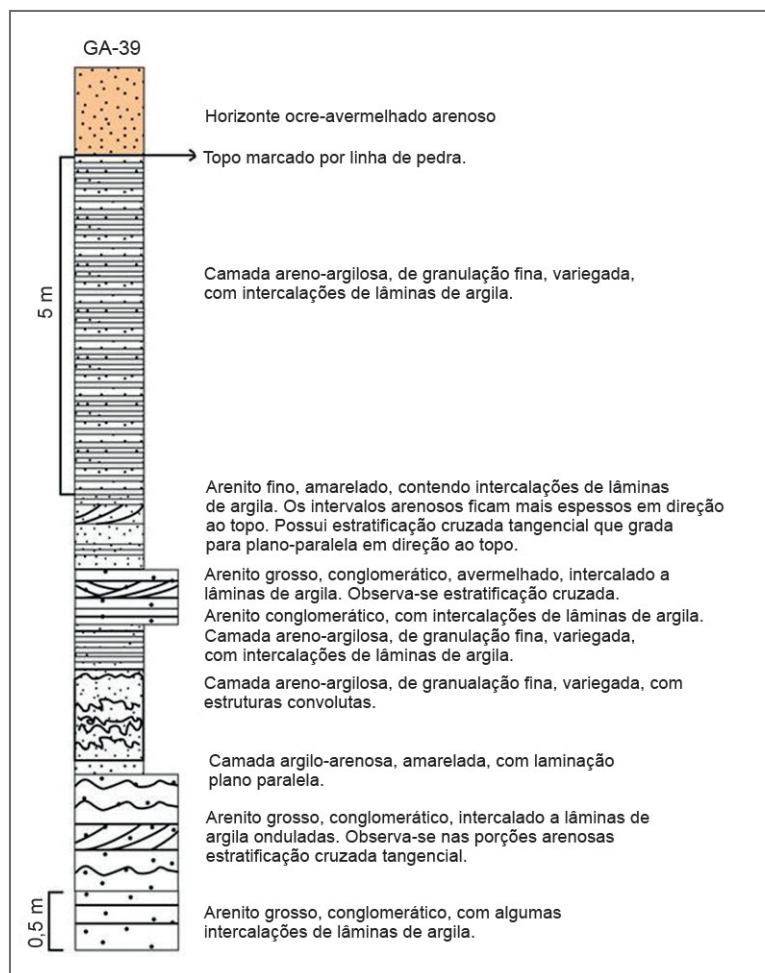


Figura 7: Perfil litoestratigráfico do Ponto GA-39, apresentando intercalações de camadas arenosas e argiloarenosas, estruturas convolutas, estratificações tangenciais, e intercalações de lâminas de argila



### 2.2.2. A Formação Barreiras

A Formação Barreiras aflora em porção muito reduzida da Ilha de São Luís, sendo uma deposição muito restrita e sem expressividade no mapa geológico. É composta por uma sequência de arenitos e pelitos de cores variegadas, geralmente mosqueadas, mal selecionadas, com nível de alteração colunar no topo. Subordinadamente ocorrem conglomerados oligomíticos e polimíticos, mal selecionados, com grãos subangulosos, ferruginizados. Ocorre na porção nordeste da Ilha, principalmente nas falésias (Foto 15, Foto 16, Foto 17 e Foto 18).



Foto 15: Conglomerados polimíticos.  
Praia Ponta do Panaquatira,  
São José do Ribamar/MA. EL-05



Foto 16: Conglomerados e arenitos ferruginizados. Praia Ponta do Panaquatira,  
São José de Ribamar/EL-03

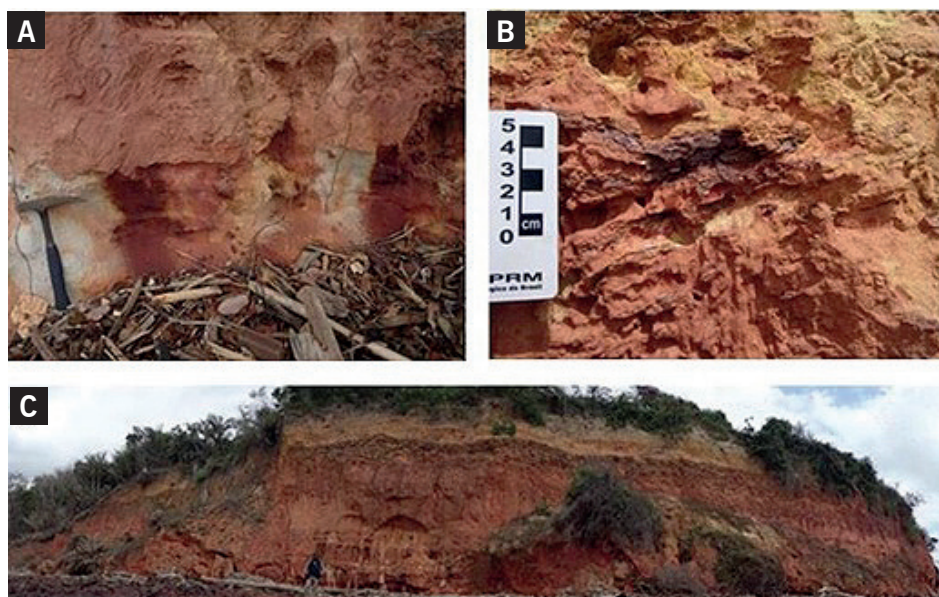


Foto 17: (A) Arenito conglomerático, mosqueado, muito intemperizado, (B) intercalado com alguns níveis de argila laminada mais espessos em direção ao topo da camada, até a altura de 2m; (C) o topo é marcado por nível concrecionário ferruginoso (Ponto GA 01)



Foto 18: Visão geral de afloramento de Formação Barreiras.  
Praia de Panaquatira, São José do Ribamar

### 2.2.3. Sedimentos Pós-Barreiras (N24pb)

No litoral do Maranhão observam-se, ao longo de falésias, corte de estradas e barrancos de rios, depósitos sedimentares que ocorrem em discordância erosiva sobre as formações Pirabas, Barreiras e sobre as rochas do Grupo Itapecuru. Tais estratos são comumente referenciados como Sedimentos Pós-Barreiras.

Para esses depósitos, são descritos na literatura pelo menos três episódios de sedimentação, ocorridos entre o Neopleistoceno (126.000 a 11.700 anos) e o Holoceno (11.700 anos até o presente) (ROSSETTI *et al.* 2013). Admite-se que a deposição de tais sedimentos foi influenciada principalmente por processos eólicos (ROSSETTI *et al.* 2013).

No estado do Maranhão, Rossetti *et al.* (2013) identificaram três sucessões sedimentares de idades entre 84.000 e 38.000 anos, 29.000 e 16.000 anos, e 11.000 e 500 anos, com base em datação por Luminescência Oticamente Estimulada (LOE), ao longo de falésias localizadas nas praias Mamuna Grande, Praia do Peru e Praia da Base, entre as cidades de Alcântara e Guimarães. Idades pleistocenas e holocenas também foram determinadas em outras áreas do nordeste (SUGUIO *et al.* 2011) e norte do Brasil (TATUMI *et al.*, 2008; SOUZA *et al.*, 2010; OLIVEIRA e SILVA, 2011).

Foram identificados na Ilha do Maranhão sedimentos correlacionáveis aos depósitos Pós-Barreiras (Pleistoceno-Holoceno), considerados por outros autores como pertencentes à Formação Barreiras (Mioceno-Plioceno), sotoposta (SOUSA, 2000; PEREIRA, 2006).

Para confirmar a idade quaternária desses depósitos, e comparar os resultados com os dados em outras áreas, foram coletadas 8 amostras para datação por luminescência oticamente estimulada (LOE). Essa técnica consiste na emissão de luz por materiais que foram inicialmente expostos a radiação ionizante (partícula- $\alpha$ , partícula- $\beta$ , radiação- $\gamma$  e raios cósmicos) e posteriormente subordinados a condições que proporcionaram a liberação dessa luz. A Figura 8 mostra a localização desses pontos de amostragem (Foto 19). Descrições detalhadas dos pontos de amostragem e dos procedimentos adotados podem ser vistos no ANEXO 1 deste relatório.

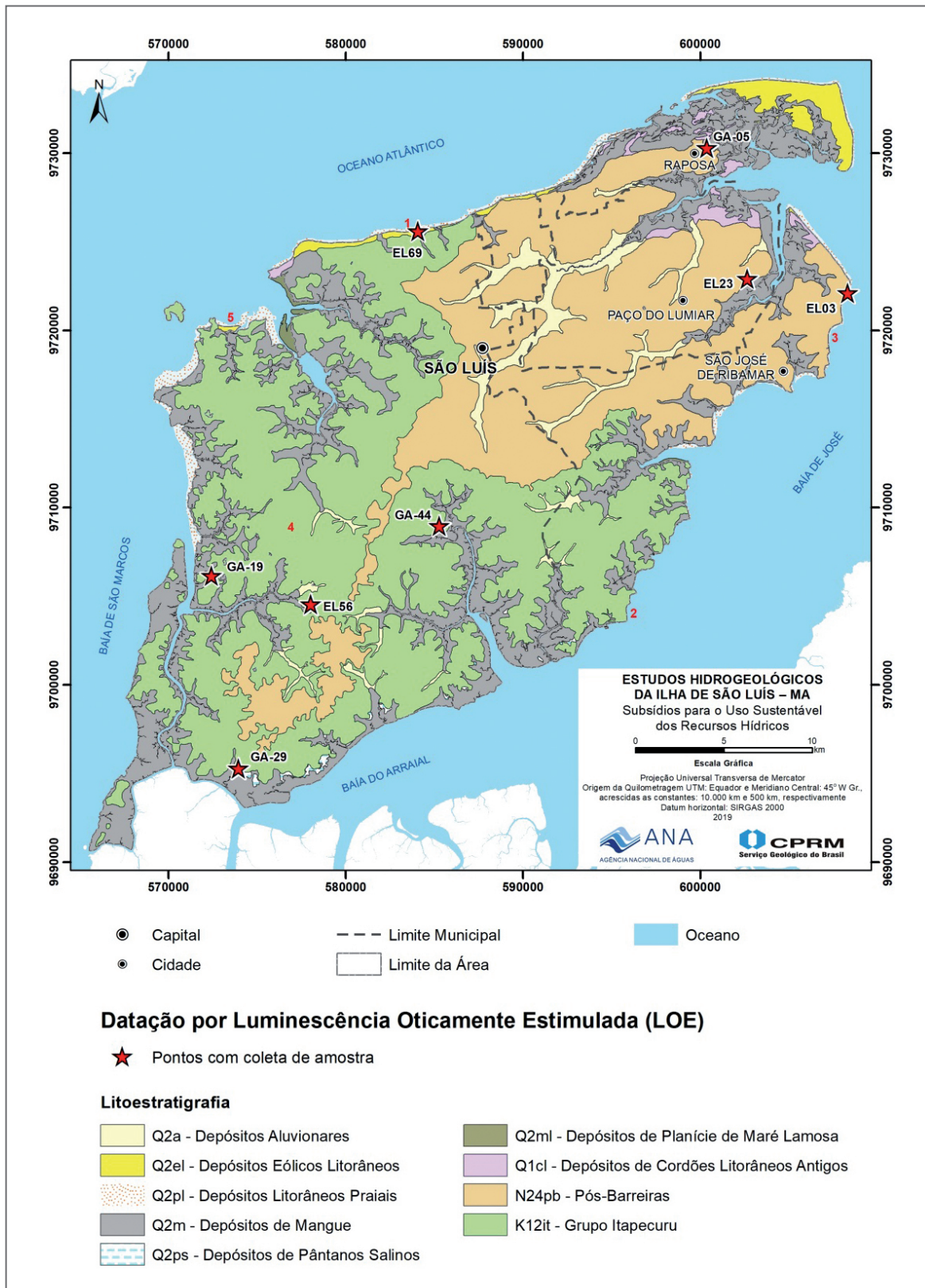


Figura 8: Mapa geológico com a localização dos pontos de amostragem para datação por LOE

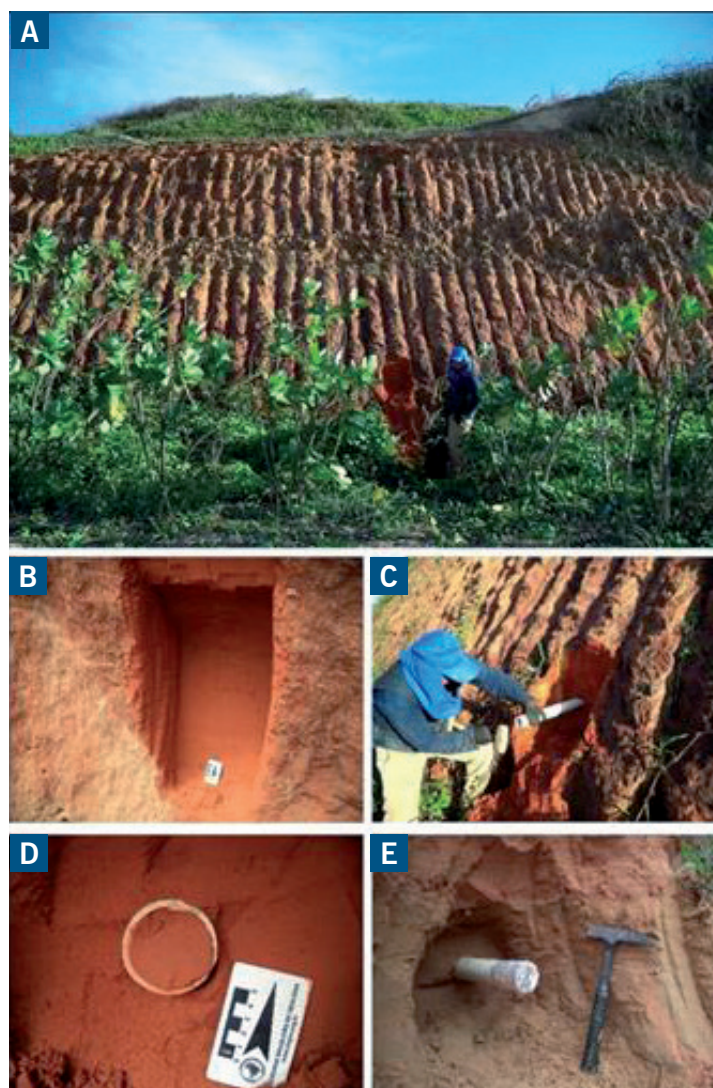


Foto 19: Procedimentos de amostragem. Limpeza do afloramento (A); retirada da porção mais superficial de sedimento (B), inserção inicial (C), final (D) e retirada (E) do tubo de coleta

### 2.2.3.1. Resultados obtidos

De acordo com o resultado das datações por LOE, realizadas no laboratório “Datação, Comércio e Prestação de Serviços Ltda”, as amostras coletadas possuem idades que variam entre 142.800 (+ 27.000) e 5.600 (+ 550) anos (Tabela 3).

A idade mais antiga, 142.800 ( $\pm$  27.500), detectada no ponto EL-69, na Avenida Litorânea, porção NNW da área, se localiza em afloramento composto por sedimentos avermelhados e amarelados, com estrutura maciça, granulação fina a média, com clastos subarredondados a arredondados.

Idades em torno de 120.000 anos foram determinadas nos pontos EL-56 (117.400  $\pm$  16.400), GA-19 (129.300  $\pm$  19.900), GA – 29 (123.400  $\pm$  18.100) e GA-44 (123.100  $\pm$  15.900), na porção sudoeste da Ilha. Os afloramentos são compostos essencialmente por sedimentos arenosos avermelhados, estruturas maciças, com granulação fina a média, clastos subangulosos, subarredondados e arredondados, e grânulos de quartzo dispersos.



Tabela 3: Idades obtidas para os sedimentos Pós-Barreiras na Ilha do Maranhão

AMOSTRA	TOPONÍMIA	MUNICÍPIO	IDADE
EL-03	Praia do Panaquatira	São José de Ribamar/MA	11.800 + 1.800
EL-23	Prox. Vila Mojó	Paço do Lumiar/MA	5.600 + 550
EL-56	BR 135	São Luís/MA	117.400 ± 16.400
EL-69	Av. Litorânea	São Luís/MA	142.800 ± 27.500
GA-05	Vila Maresia	Raposa/MA	30.000 ± 3.600
GA-19	Localidade Porto Grande	São Luís/MA	129.300 ± 19.900
GA-29	Assentamento Terra do Rumo	São Luís/MA	123.400 ± 18.100
GA-44	Localidade Tibiri	São Luís/MA	123.100 ± 15.900

O ponto GA – 19 se diferencia dos demais devido a coloração amarelado-avermelhadas, granulação muito fina, e clastos subangulosos, moderadamente selecionados, que gradam em direção ao topo para sedimentos silteosos, creme. Observa-se nesse ponto laminação planoparalela e clastos dispersos de argila, com até 1cm de comprimento.

As idades mais recentes foram determinadas em três pontos da porção nordeste. Os sedimentos são arenosos, areno-silteosos, bege a amarelados, com granulação fina a média, com clastos subangulosos, subarredondados a arredondados.

Desta forma, é possível se considerar como Sedimentos Pós-Barreiras todos os depósitos que ocorrem sistematicamente sobre a discordância erosiva que marca o topo da Formação Barreiras ou das rochas do Grupo Itapecuru, assinalada por notável paleossolo laterítico, composto por horizonte concrecional em colunas verticais ou resíduos de seu retrabalhamento sob a forma de blocos de concreções lateríticas.

Esta unidade ocorre principalmente nas cotas mais elevadas e forma relevo de topo plano e/ou sem rugosidade na área de estudo, ocorrendo indistintamente em toda a área.

As idades variando entre 142.800 (+ 27.000) e 5.600 (+ 550) anos indicam que a deposição desses sedimentos aconteceu entre o Pleistoceno Médio/Superior (126.000 anos) e o Holoceno (11.700 anos até o presente) (Carta Cronoestratigráfica Internacional - ISC 2017).

Os depósitos que ocorrem na Avenida Litorânea (EL-69), bem como os da porção sudoeste da área (EL-56, GA-19, GA-29 e GA-44) são os mais antigos. Com base nessas idades, que variam aproximadamente entre 142.000 e 117.000 anos, bem como em características sedimentológicas semelhantes, sugere-se que esses depósitos podem ser considerados inicialmente como pertencentes à unidade estratigráfica Pós Barreiras 1, definida por Rossetti (2004).

De acordo com a referida autora, os Sedimentos Pós-Barreiras que ocorrem no nordeste do Pará e litoral do Maranhão representam, pelo menos, dois episódios distintos de sedimentação, denominados informalmente de Sedimentos Pós-Barreiras I e Sedimentos Pós-Barreiras II.

Os Sedimentos Pós-Barreiras I, inferiores, formam um pacote de até 10 m de espessura, que consiste, predominantemente, em areias de coloração vermelho-clara a alaranjada, friáveis a endurecidas, maciças, bioturbadas, de seleção moderada a boa, granulometrias em geral finas a médias, podendo ser localmente grossas a conglomeráticas. Pelitos e argilitos bioturbados são localmente presentes. Esses depósitos são recobertos, em discordância erosiva, pelos Sedimentos Pós-Barreiras II, que representam um pacote de espessuras variáveis, com médias em torno de 2 a 5 m, composto por areias finas a muito finas, bem selecionadas, com fragmentos de carvão dispersos e, eventualmente, fragmentos de cerâmica. As cores variam desde tipicamente amarela clara a amarela dourada, laranja acinzentada, marrom amarelado e amarelo amarronzado. O acamamento maciço é a estrutura mais comum, porém ocorrem, também, estruturas de dissipação de dunas sugestivas de contribuição eólica (ROSSETTI *et al.*, 1989; ROSSETTI, 2004).

Na porção nordeste, as idades variam entre 5.600 (ponto EL 23) e 11.800 (ponto EL 03) anos, correspondendo, dessa forma, a uma sedimentação ocorrida no Holoceno. Nessa porção, conforme descrição anterior, os sedimentos são arenosos, areno-siltosos, marrons, beges a amarelados, com granulação fina a média, clastos subangulosos, subarredondados a arredondados. Possuem estrutura maciça, exceto o ponto EL-03, onde é possível observar laminações plano-paralelas. Possui também níveis conglomeráticos. Portanto, no que diz respeito às idades obtidas e às características sedimentológicas, esses depósitos poderiam ser enquadrados no Pós Barreiras II de Rossetti (2004), apesar de em nenhum dos afloramentos visitados terem sido observados contatos com o Pós Barreiras I. No ponto EL-03 os sedimentos estão sobrepostos a rochas da Formação Cujupe (Foto 20). Nessa praia, os Sedimentos Pós-Barreiras atingem até 15m de espessura (Foto 21). A amostra datada foi coletada na base do pacote atribuído aos Sedimentos Pós-Barreiras.

Desta forma, com base nos resultados obtidos nas análises, se pode concluir que, nessa área, os Sedimentos Pós-Barreiras foram depositados em pelo menos dois episódios de sedimentação, ocorridos no Meso/Neo Pleistoceno e Holoceno. Essas idades são compatíveis com as demais encontradas em diversos trabalhos realizados nos litorais do Pará e Noroeste do Maranhão (TATUMI *et al.*, 2008, SOUZA *et al.*, 2010; OLIVEIRA e SILVA, 2011 e ROSSETTI, 2013).



Foto 20: Fotografia panorâmica de falésia na Praia do Panaquatira. Observam-se sedimentos Pós Barreiras recobrendo depósitos da Formação Cujupe. As setas indicam o topo da unidade sotoposta (EL-03)



Foto 21: Fotografia exibindo o espesso pacote de Sedimentos Pós-Barreiras aflorantes na Praia do Panaquatira (EL-03)

A deposição desses sedimentos, tanto na porção sudoeste quanto na porção nordeste, ocorreu diretamente sobre rochas da Formação Cujupe, diferente do observado por Rossetti (2013) em falésias de praias localizadas entre as cidades de Alcântara - MA e Guimarães – MA, onde apenas a sucessão mais antiga (Pós Barreiras 1) aparece imediatamente sobreposta a Formação Barreiras.

As duas sucessões do Pós-Barreiras não foram observadas sobrepostas uma sobre a outra, ocorrendo diretamente relacionadas aos dois domínios tectônicos separados na Ilha de São Luís. A sucessão com idade Pleistocênica (idade acima de 100mil anos) ocorre exclusi-

vamente no Domínio Tectônico II, onde o terreno é bem dissecado e onde o paleossolo laterítico foi erodido, fazendo com que os sedimentos se assentassem diretamente sobre as rochas da Formação Cujupe, mostrando espessuras em torno de 5m e pouca continuidade lateral.

A sucessão de idade, predominantemente, Holocênica (idades inferiores a 30mil anos) ocorre no Domínio Tectônico I. Estes sedimentos assentam-se diretamente sobre o paleossolo laterítico e o terreno é composto por tabuleiros de topos planos. As espessuras destes sedimentos são em torno de 15m, com boa continuidade lateral.

A sedimentação das duas sucessões Pós-Barreiras está intimamente associada à neotectônica que ocorreu na Ilha de São Luís, controlando sua ocorrência, distribuição, espessura e a continuidade lateral destes depósitos.

#### **2.2.4. Depósitos de Planície de Maré Lamosa (Q2ml)**

Perfazem apenas 1% da Ilha de São Luís, compostos por pelitos lamosos, cinza escuro, que são expostos apenas na maré vazante (Foto 22)

#### **2.2.5. Depósitos de Cordões Litorâneos Antigos (Q1cl)**

Representam menos de 1% da geologia da Ilha de São Luís, compostos por areias finas, esbranquiçadas, inconsolidadas, são pequenos cordões mais ou menos perpendiculares a linha de costa (Foto 23)



Foto 22: Planície de maré lamosa ao lado do Centro Histórico de São Luís



### 2.2.6. Depósitos de Pântanos Salinos (Q2ps)

Representam menos de 1% da geologia da Ilha de São Luís, constituindo depósitos compostos por areia fina e lama de manguezais expostos na maré vazante.

### 2.2.7. Depósitos de Mangues (Q2m)

Perfazem 5% da geologia da Ilha, compostos por argilas cinza escura de manguezais, expostos na maré vazante (Foto 24)

### 2.2.8. Depósitos Eólicos Litorâneos (Q2el)

Compõem apenas 1% da geologia da Ilha (Foto 25), sendo constituídos por dunas eólicas atuais de areia fina, bem selecionada com estratificação acanalada de grande porte.

### 2.2.9. Depósitos Aluvionares (Q2a)

Correspondem a menos de 1% da geologia da Ilha de São Luís, representados pelos depósitos dos rios atuais constituídos por argilas e areias finas (Foto 26)



Foto 23: Vegetação de restinga sobre cordões arenosos de origem marinha



Foto 24: Manguezal na Praia de Guarapiranga

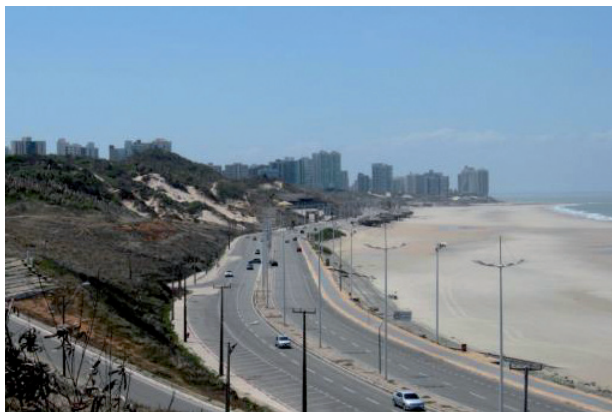


Foto 25: Campo de dunas da praia do Calhau, adjacente à Avenida Litorânea – São Luís



Foto 26: Planície aluvial embutida no fundo de vale do igarapé Maracujá

## 2.3. QUADRO ESTRUTURAL

O quadro estrutural se refere ao comportamento rúptil das rochas, principalmente em função de sua resposta aos esforços em situação próxima a superfície, associado ao quadro evolutivo mais recente e ao regime neotectônico.

Na Ilha de São Luís é possível distinguir dois domínios principais: Domínio I, na porção norte-nordeste; e Domínio II, na porção oeste-sudeste (Figura 9).

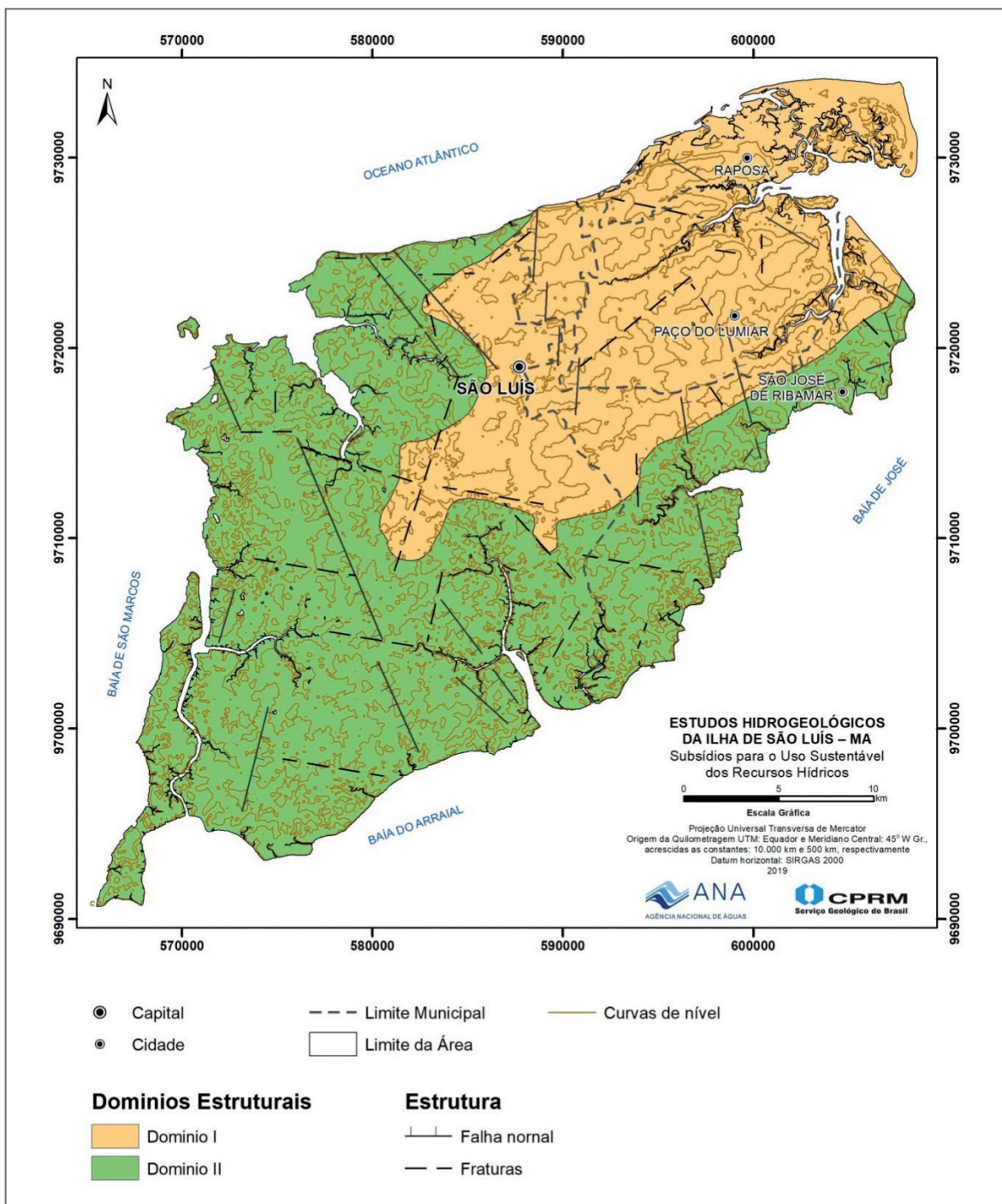


Figura 9: Domínios Estruturais da Ilha do Maranhão

O Domínio I tem o relevo relativamente plano, as cotas são mais elevadas (variando de 30 a 60m) e os lineamentos de drenagens possuem direções principais ENE-WSW. Predominam rochas da Unidade Pós-Barreiras, com espessuras em torno de 50m e com pacotes contínuos.

No Domínio II o relevo é mais dissecado, com as cotas mais baixas da Ilha (menos de 30m) e os lineamentos de drenagens têm direções principais NW-SE. Predominam as rochas do Grupo Itapecuru, sendo os sedimentos do Pós-Barreiras de menor espessura, em torno de 10m, sem grandes continuidades laterais.

Estes dois domínios se encaixam num modelo de *Horst* e *Gráben* (Figura 10). De um modo regional o Domínio I seria um gráben, no qual foram preservadas as unidades mais jovens (Pós- Barreiras) com as rochas do Grupo Itapecuru situadas em profundidades bem maiores de ocorrência. No domínio II, porção tectonicamente mais elevada da Ilha (Horst), a erosão atuou de forma mais severa, deixando o relevo mais dissecado e com resquícios das unidades mais jovens (Pós-Barreiras).

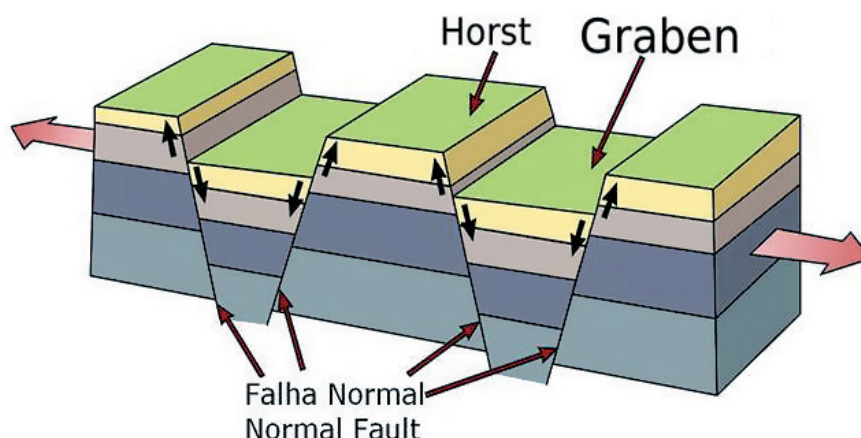


Figura 10: Modelo esquemático de *Gráben* e *Horst*

O modelo de *Horsts* e *Grábens* forma estruturas abertas, por ser um sistema extensional, fazendo com que a Ilha de São Luís possua zonas diretas de recarga através destas falhas/fraturas. As falhas identificadas e medidas em campo possuem direção preferencial NW e NE, as fraturas possuem 3 direções principais NE, NW e EW (Figura 11).

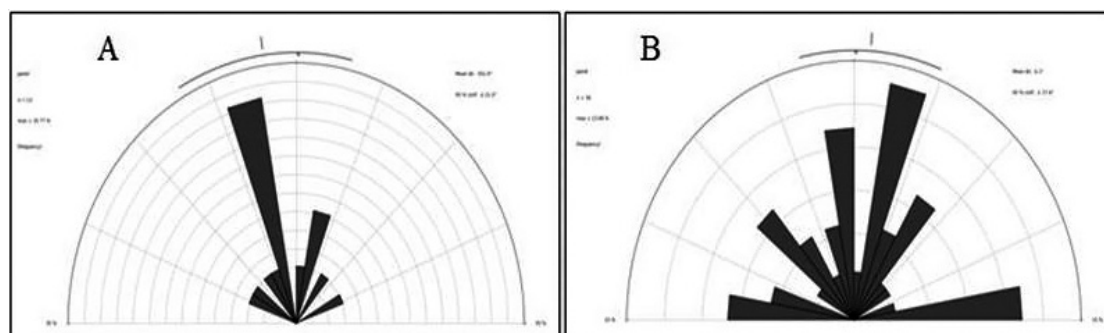


Figura 11: Diagrama de rosetas. (A) falhas e (B) fraturas

Este comportamento de *Horsts* e *Grábens* (Foto 27), além de ser regionalmente expressivo, é notório na escala dos afloramentos e falésias, fazendo com que unidades mais jovens fiquem em contato com unidades mais antigas, como pode ser visto ao longo da Av. Litorânea. Nesta área, unidades antigas do Grupo Itapecuru se encontram em contato lateral com as unidades mais jovens Pós-Barreiras e Dunas eólicas (Figura 12).

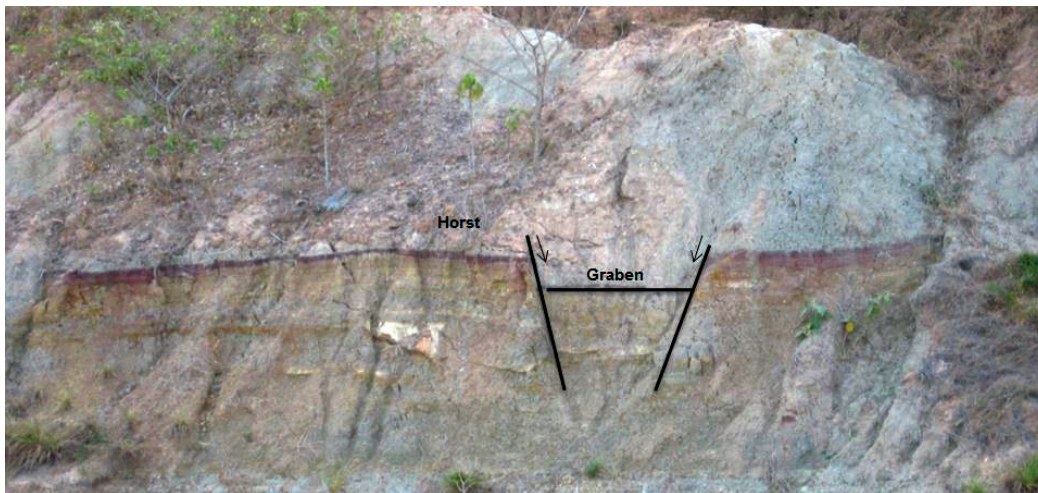


Foto 27: Estrutura extensional tipo *horst* e *gráben* na Ilha de São Luís (Estrada vicinal nas proximidades da Ponta do Arraial – coordenadas 585870 e 9702754)

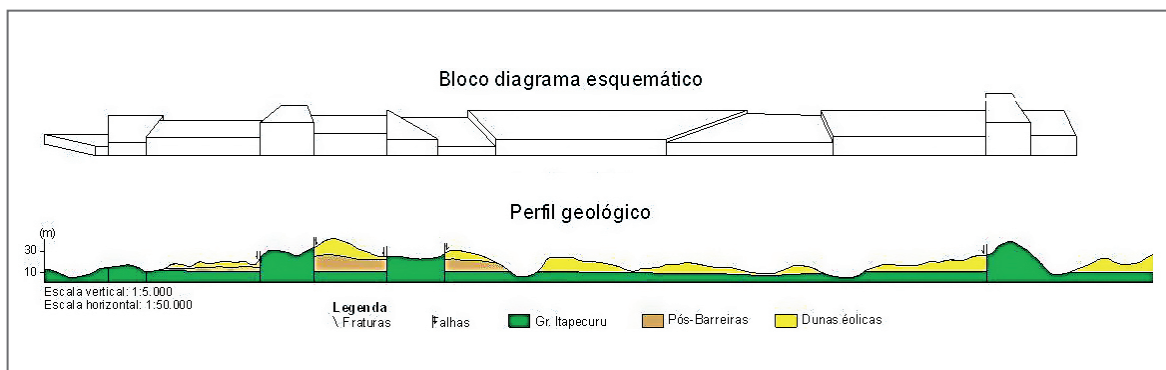


Figura 12: Perfil geológico e bloco diagrama esquemático ao longo da Av. Litorânea (Domínio II)

Esta variação interfere na continuidade lateral das formações, fazendo com que ocorram frequentes truncamentos e contatos abruptos por falhas entre as rochas das unidades presentes, situação encontrada ao longo do perfil da praia de Guarapiranga, porção SE da Ilha (Figura 13). A mesma situação ocorre entre as localidades Jussara e Sol Nascente (Figura 14), e Porto Grande (Figura 15), na região SW da área.

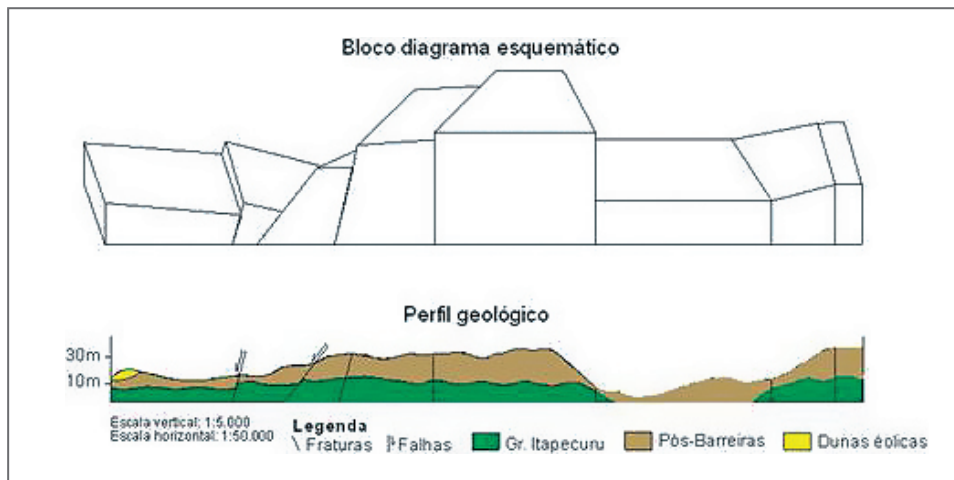


Figura 13: Perfil geológico/bloco diagrama esquemático praia Guarapiranga (Domínio I)

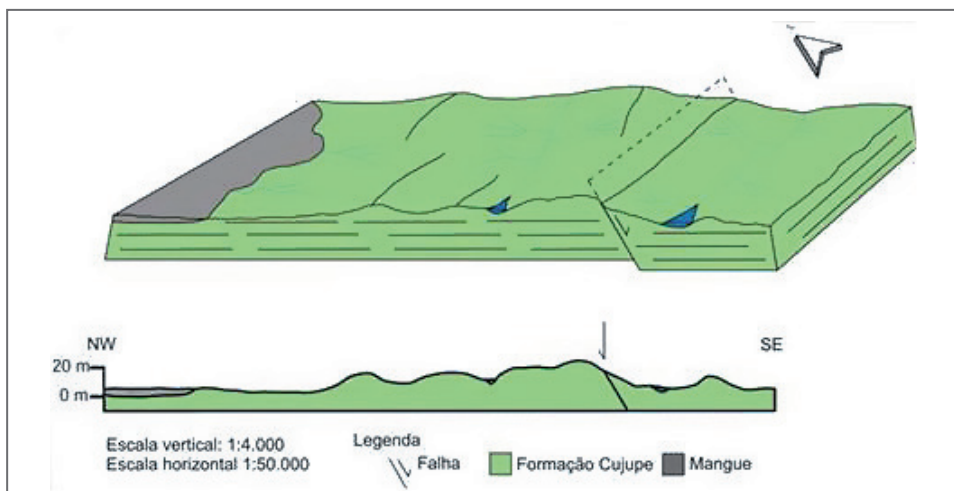


Figura 14: Perfil geológico e bloco diagrama esquemático em área entre as localidades Jussara e Sol Nascente, SE da Ilha (Domínio II). Deslocamento do acamamento devido a falha normal

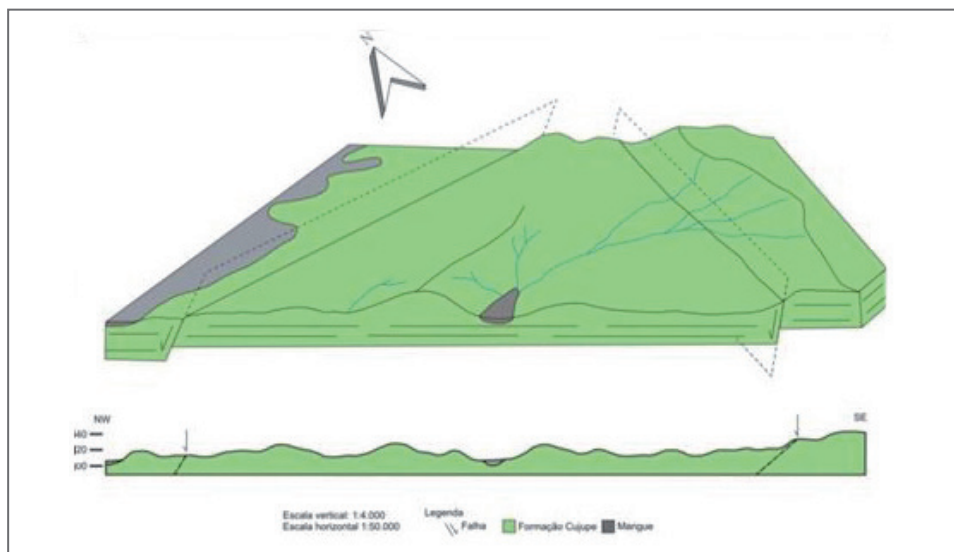


Figura 15: Perfil geológico e bloco diagrama esquemático na localidade Porto Grande, porção SE da Ilha (Domínio II). Observa-se deslocamento do acamamento devido a falha a normal



## 2.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A geologia da Ilha tem sido abordada direta ou indiretamente em diversos trabalhos publicados em literatura especializada, tais como dissertações, teses, etc, sobre temas bastante variados, como sedimentologia/estratigrafia, paleontologia, hidrogeologia, geomorfologia, geotecnia, etc. (ROSSETTI e TRUCKENBRODT, 1997; ROSSETTI, 1998; ROSSETTI, 2000; CARVALHO e PEDRÃO, 1998; SOUSA, 2000; ARAÚJO *et al.*, 2007; PEREIRA & ZAINÉ, 2007), porém um mapeamento geológico sistemático de toda a Ilha, em escala 1:50.000, foi realizado pela primeira vez no âmbito do presente projeto.

Na área de trabalho foram encontrados pelitos intercalados a arenitos e subordinadamente sil-titos vermelhos com estratificação acanalada e truncadas por onda, arcóseos, calcirruditos e calcarenitos, atribuídos às formações Alcântara e Cujupe (Grupo Itapecuru); arenitos e pelitos de cores variegadas, geralmente mosqueadas, mal selecionadas, com nível de alteração colunar no topo, e subordinadamente conglomerados oligomíticos e polimíticos, ferruginizados, atribuídos à Formação Barreiras; e areias ocre, amareladas e avermelhadas, com grãos subarredondados a arredondados, maciços, atribuídos a depósitos pleistocênicos, geralmente denominados de Sedimentos Pós-Barreiras. Também ocorrem depósitos recentes, relacionados a ambientes litorâneos.

As formações Alcântara e Cujupe pertencem a Sequência S3 de Rossetti (2001) e, segundo essa autora, a Sequência foi depositada durante trato de sistema de mar transgressivo a alto. Portanto, cada ciclo de incisão e preenchimento registraria uma sequência de menor grandeza, formada pela oscilação de maior frequência/menor amplitude do nível de base. As superfícies de descontinuidades marcadas por contrastes litológicos corresponderiam às discordâncias que definem os limites dessas sequências.

A Formação Alcântara foi formada por processos de tempestade de grande intensidade e subordinadamente correntes de maré, em ambientes de *shoreface* médio a superior, *foreshore*, canal de maré e laguna/*washover*, que configuram sistemas de ilhas barreiras (ROSSETTI, 2001). A Formação Cujupe depositou-se em ambiente predominantemente estuarino, caracterizado por domínio de fácies formadas por processos de maré em ambientes de canal de maré, baía, delta de maré e baixio de maré/planície de areia (ROSSETTI, 2001).

A sedimentação do Grupo Barreiras ocorreu no Oligo-Mioceno, em sistemas de vales estuarinos encaixados em zonas de falhas, em ambientes de canal de maré, canal com influência fluvial, laguna, delta de maré, baía estuarina e ambientes litorâneos (ROSSETTI e GÓES, 2004; ROSSETTI, 2006).

Para os Sedimentos Pós-Barreiras são descritos na literatura pelo menos três episódios de sedimentação ocorridos entre o Neopleistoceno e o Holoceno (ROSSETTI *et al.*, 2013). Admite-se que a deposição de tais sedimentos foi influenciada principalmente por processos eólicos (ROSSETTI *et al.*, 2013).



A partir do reconhecimento das unidades estratigráficas durante e após os trabalhos de campo, e com base nas pesquisas bibliográficas, observou-se que o mapa geológico proposto diverge em alguns pontos dos trabalhos já publicados sobre a geologia da Ilha.

A principal divergência diz respeito à área de ocorrência da Formação Barreiras, que no presente trabalho é considerada como aflorante restritamente na porção nordeste da Ilha, na região de São José de Ribamar, não tendo sido reconhecidos como miocênicos os depósitos que ocorrem ao longo das falésias de São Luís e outras regiões. Estes depósitos ocorrem em contato abrupto e concordante sobre rochas Cenomanianas (ARAÚJO *et al.*, 2007) da Formação Alcântara (Grupo Itapecuru), relação observada nas falésias da praia de São Marcos.

As rochas sobrejacentes aos depósitos cenomanianos são semelhantes às que afloram ao longo de boa parte da Ilha de São Luís, possuem as mesmas litologias, estruturas sedimentares e ambientes (transicional com influência de maré), além de possuírem semelhança com os depósitos descritos para a Formação Cujupe, pelos diversos autores anteriormente citados (ROSSETTI e TRUCKENBRODT, 1997; ROSSETTI, 1998; ROSSETTI, 2000; CARVALHO e PEDRÃO, 1998; SOUSA, 2000; ARAÚJO *et al.*, 2007; PEREIRA & ZAINÉ, 2007; entre outros). Todas estas observações contribuíram para correlacionar as rochas aflorantes em São Luís com as rochas da Formação Cujupe (Paleógena). A correlação com as rochas miocênicas da formação Barreiras implicaria num hiato de 70 milhões de anos, o que é pouco provável, pois existe registro de rochas paleógenas (Fm. Cujupe) na outra margem da baía de São Marcos, no porto de Cujupe e nos arredores de Pinheiro e Santa Inês.

Outro ponto importante é o reconhecimento de areias pleistocênicas (Sedimentos Pós-Barreiras) em áreas consideradas por outros autores como ainda pertencentes à Formação Barreiras, a exemplo do estabelecido por Rossetti *et al.* (2013) nas praias Mamuna Grande, Praia do Peru e Praia da Base, localizadas entre as cidades de Alcântara e Guimarães/MA. A constatação da ocorrência desta unidade representa importante contribuição para os estudos do quaternário no nordeste do Brasil.

Quanto ao quadro tectônico, observa-se que a Ilha de São Luís se encaixa no modelo de *Horst* (Domínio II) e *Gráben* (Domínio I), fazendo com que unidades de idades diferentes estejam lado a lado (vide o encarte tectônico, as seções geológicas e blocos diagramas). Isso ocorre de maneira regional e em escala de afloramentos, indicando forte atuação da neotectônica na Ilha. Esse tipo de configuração interfere na continuidade lateral das camadas, fazendo com que camadas de unidades mais antigas fiquem em contato lateral com unidades mais novas como, por exemplo, dunas eólicas lado a lado com unidades cretáceas/paleógenas (Av. Litorânea, Praia do Panaquatira e Boa Viagem).

A forte estruturação decorrente desta configuração permite que a recarga dos aquíferos ocorra diretamente através das inúmeras falhas e fraturas existentes

**OS LEVANTAMENTOS GEOFÍSICOS TIVERAM POR OBJETIVO** auxiliar na caracterização das unidades geológicas que compõem os sistemas aquíferos da bacia de São Luís, elaborar mapas de isópacas e de profundidade do nível estático do Aquífero São Luís e dimensionar o contato água doce/água salgada, com vistas a avaliar a possibilidade de intrusão salina na região.

### 3.1. MÉTODOS ELÉTRICOS

Os métodos elétricos utilizam correntes diretas ou correntes alternadas de baixa frequência para investigar as propriedades elétricas da subsuperfície. Nesse trabalho foram usados os métodos de resistividade a fim de estudar descontinuidades horizontais e verticais nas propriedades elétricas do solo e associá-las aos objetivos do projeto. Nos métodos de resistividade, correntes elétricas geradas artificialmente são introduzidas no solo e as diferenças de potencial resultantes são medidas na superfície.

A resistividade elétrica é uma das propriedades físicas mais variáveis. A maior parte dos minerais formadores das rochas é isolante, e a corrente elétrica é conduzida através de uma rocha principalmente pela presença de íons nas águas dos poros. Assim, o aumento da porosidade e do conteúdo de sais são os principais fatores que diminuem a resistividade de rochas. Secundariamente, a presença de argilominerais, minerais sulfetados e granulação grosseira.

A resistividade elétrica é determinada pela seguinte equação:

$$\rho = K \cdot \frac{\Delta V}{I}$$

Onde  $I$  é a corrente elétrica introduzida no solo,  $\Delta V$  é a diferença de potencial medida e  $K$  é um fator geométrico que depende das técnicas e arranjos utilizados nos levantamentos. As técnicas de campo utilizadas foram a Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e o Caminhamento Elétrico (CE).

Nas sondagens elétricas verticais a abertura máxima dos eletrodos foi de 1200 m, ou seja,  $AB/2$  de 600 m. A investigação máxima foi em torno de 80 m, pois é dependente da possibilidade de abertura dos eletrodos no local e da condutividade das camadas superiores. Em geral, há perda de informação abaixo de camada condutiva, como argila saturada e água salgada.

O caminhamento elétrico realizado pode ser considerado uma tomografia elétrica-ERT. Foram abertos 720 m, com 72 eletrodos em superfície, espaçados de 10 m e lidos 1.125 pontos em subsuperfície. O arranjo utilizado foi o *Wenner-Schlumberger*, pois é o mais indicado para ambientes geológicos sedimentares e tem maior profundidade de investigação quando comparada ao arranjo Dipo-Dipolo. Outra vantagem do arranjo *Wenner-Schlumberger* é de que cada ponto representa um perfil de resistividade semelhante a uma SEV com abertura inicial  $AB$  de 20 m e  $MN$  de 10 m.

O processamento contemplou 25 níveis de investigação, alcançando profundidade em torno de 95 metros no centro da seção.

### 3.2. MÉTODOS ELETROMAGNÉTICOS

O método eletromagnético-EM se baseia na teoria de que um campo primário alternado artificial ao se propagar no subsolo gera correntes elétricas de difusão, *eddy currents*, que ao interagir com feições geológicas condutivas (água, alguns minerais metálicos, argilas) produzem um campo eletromagnético secundário passível de ser medido isoladamente.

Foi empregado um sistema multifrequencial do tipo SLINGRAM, composto por Transmissor (Tx), Receptor (Rx), módulos de controle e gerador de energia e cabos de comunicação. No Tx, campos eletromagnéticos alternados (campos primários) são gerados a diferentes frequências por uma bobina. O Rx está ajustado para as mesmas frequências de transmissão e pode registrar até três arranjos perpendiculares entre si, considerando-se as direções: Z-vertical; X-horizontal, ao longo do caminhamento; Y-horizontal, transversal à direção X. Foi escolhido o arranjo coplanar horizontal, que mede a componente vertical. As medidas são dadas em porcentagens das componentes em Fase (Ip) e Quadratura (Q) do campo secundário.

A separação Tx-Rx entre os sensores define a profundidade teórica de investigação. Nesse estudo os sensores foram separados de 50 m e 100 m, possibilitando investigações pouco superiores a 50 m de profundidade do solo.

As seções EM contribuíram para melhor definição de camadas geológicas onde as imagens de ERT e SEV não tinham resolução ou não havia espaço para abertura dos eletrodos. Em contrapartida, o ambiente urbano e de redes elétricas foram obstáculos.

### 3.3. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Nos levantamentos elétricos, SEVs e CE, foram utilizados dois resistivímetros Syscal Pro. Para o CE, o Syscal foi conectado a um comutador Switch 72 (Foto 28) e interligado a um cabo multieletrodo para permitir as leituras automáticas em todos os eletrodos.



Foto 28: Equipamentos utilizados para levantamento geofísico elétrico: à direita resistivímetro Syscal Pro e a esquerda o comutador Switch Pro 72

Os equipamentos auxiliares foram: uma bateria de 12 V; eletrodos metálicos para injeção de corrente elétrica e medição do potencial elétrico; cabos para conexões entre equipamento e eletrodos; marretas para fixação dos eletrodos; solução de cloreto de sódio e bentonita, para diminuir a resistência de contato entre eletrodos e o solo e trenas para marcar as posições dos eletrodos. Para os levantamentos eletromagnéticos foi utilizado o Promis 10 (Foto 29), de fabricação da empresa IRIS Instruments.



Foto 29: Equipamento utilizado para levantamento eletromagnético Promis 10

### 3.4. PRODUTOS GERADOS

- A Ilha de São Luís foi dividida em 53 blocos com áreas de 5 km x 5 km, nas quais foram distribuídas 40 SEVs de forma a cobrir regularmente a área (Figura 16). Em vista do adensamento urbano, as aberturas AB/2 variaram entre 300 e 600 m. No ANEXO 2 se mostram os dados brutos das SEVs efetuadas.
- Seções geológico-geofísicas foram construídas com base nas informações de poços, SEVs e conhecimentos geológicos (Figura 17). Quando possível, foram estimados os contatos das principais unidades geológicas e aquíferas em subsuperfície, o nível de água e inferidas estruturas tectônicas (falhas e fraturas).

Nos textos a seguir, os intervalos de resistividades são referenciados da seguinte forma:

- Cascalhos, laterita, areia de duna, arenito seco – superior a 1500 Ohm.m;
- Zona insaturada – entre 300 Ohm.m e 1500 Ohm.m;
- Zona saturada em água doce – entre 40 Ohm.m e 300 Ohm.m, sendo argilas/argilitos menos resistivos e areias/arenitos mais resistivos;
- Zona saturada com maior concentração de sais – entre 20 Ohm.m a 40 Ohm.m;
- Águas salgadas ou influência de intrusão salina – inferiores a 20 Ohm.m.
- Por encontrar-se a profundidades inferiores a 40 m da superfície, a inferência do topo da Formação Alcântara/Aquífero Itapecuru baseou-se na existência de camadas condutivas (< 20 Ohm.m), em correspondência a descrições de argilitos ou carbonatos em poços.

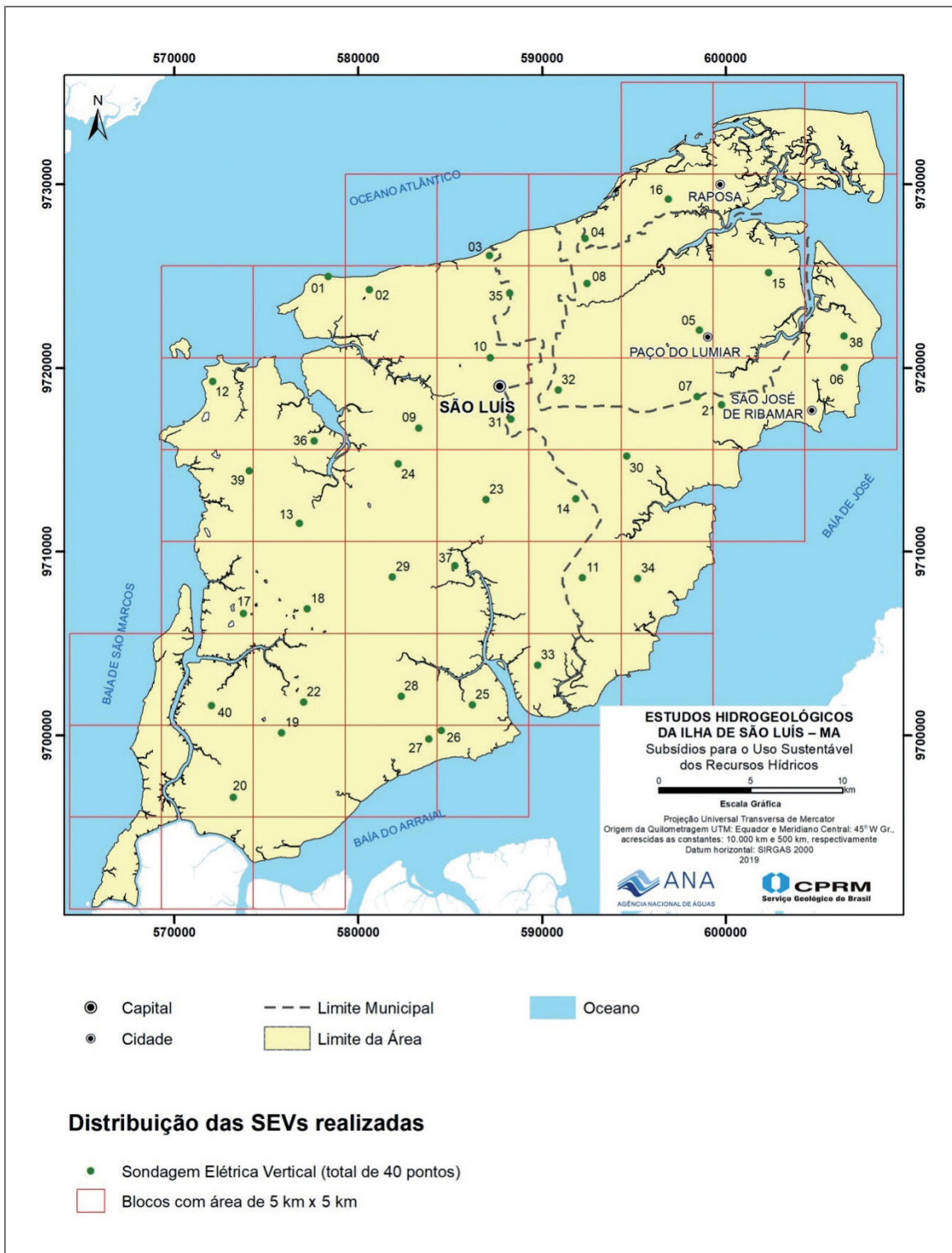


Figura 16: Distribuição das 40 SEVs realizadas nos 53 blocos de 5 km x 5 km na Ilha de São Luís



Figura 17: Seções geológico-geofísicas na Ilha de São Luís



### 3.4.1. Seções Geofísicas

#### • SEÇÃO 1

A seção 1 (Figura 18) foi construída na direção preferencial W-E a partir dos Poços MJ084, BE011, BE125, FS029, MJ110 e MJ127, e das SEVs 12, 36, 24, 31, 32, 21 e 06.

As SEVs 12 e 36 apresentam uma camada geolétrica com valores entre 1 e 20 Ohm.m na cota de 15 m que, com auxílio do poço MJ084, pode ser correlacionada com camadas de argila ou argilitos saturados. Nessas duas SEVs ocorre perda de resolução com a profundidade, de forma que não é mais possível distinguir entre camadas de arenitos e argilitos saturados ou intercalações entre elas. Por associação a afloramentos próximos (EL-39, Praia da Guia), a SEV12 investigou apenas a Formação Alcântara.

As SEVs 31, 32, 21 e 06 apresentam uma zona não saturada correlacionada com os sedimentos inconsolidados da Formação Pós-Barreiras e parte dos arenitos da Formação Cujupe. A zona saturada identificada nas SEVs pode ser relacionada com os arenitos da Formação Cujupe, ou seja, aquífero São Luís.

A SEV24 se encontra numa região com contato por falhas normais entre a Formação Cujupe e os sedimentos Pós-Barreiras. Possui valores discrepantes de resistividades em relação às demais sondagens e necessitaria de outras investigações para corroborar esses valores. Os poços próximos possuem níveis estáticos profundos, como o BE-011.

O nível de água para o aquífero São Luís ocorre entre o nível do mar e 15 m. Há um rebaixamento do nível de água ao redor da SEV24, associado às zonas de falhamentos e o nível de água para o aquífero Itapecuru a oeste da seção está em torno de -15 m.

#### • SEÇÃO 2

A seção 2 (Figura 19) foi construída com uma direção preferencial N-S a partir dos Poços SA024, BE011, BE139 e BE152, e das SEVs 02, 24, 29, 28 e 27.

As SEVs 27, 28 e 29 podem ser associadas aos arenitos da Formação Cujupe tanto na porção não saturada quanto na saturada. Considerando as porções basais condutivas dessas SEVs (valores menores que 20 Ohm.m), e as descrições de argilitos nos poços, admite-se que o topo da Formação Alcântara esteja às cotas dessas camadas.

A SEV02 apresenta camada saturada rasa, sendo relacionada aos arenitos da Formação Cujupe. Em seguida apresenta uma camada mais condutiva (< 20 Ohm.m) que pode ser correlacionada com os argilitos do Poço SA024 e indicar o topo da Formação Alcântara.

As camadas com resistividade menor que 1 Ohm.m indicam argilitos saturados ou influência de intrusão salina, em virtude da proximidade ao mar.

Nessa seção ambos os aquíferos foram captados. O nível de água para o aquífero São Luís encontra-se entre o nível do mar e +25 m. Como já mencionado na seção 1, há um rebaixamento do nível de água ao redor da SEV24, associado às zonas de falhamentos.

A Figura 20 ilustra de forma mais didática uma possível interpretação da Seção 1. Já na Figura 21 observa-se o perfil construído a partir da seção 2.

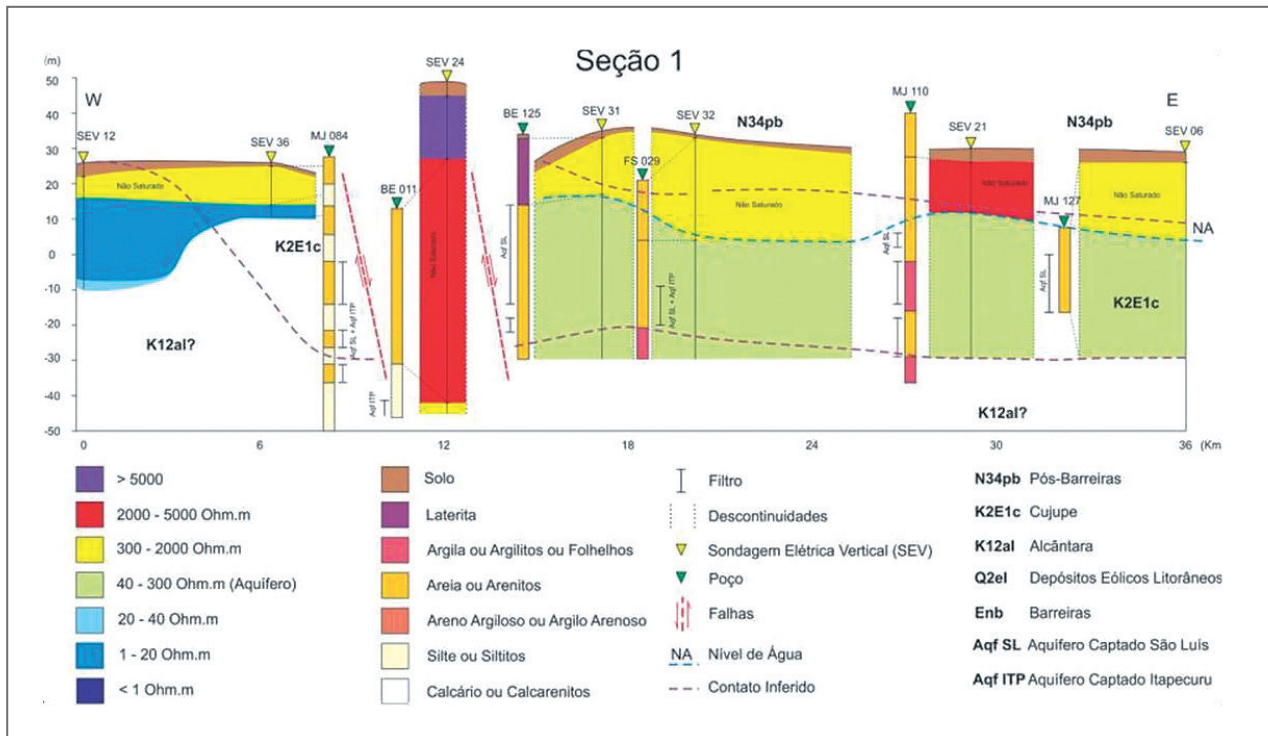


Figura 18: Seção 1 construída com os poços MJ084, BE011, BE125, FS029, MJ110 e MJ127, e SEVs 12, 36, 24, 31, 32, 21 e 06

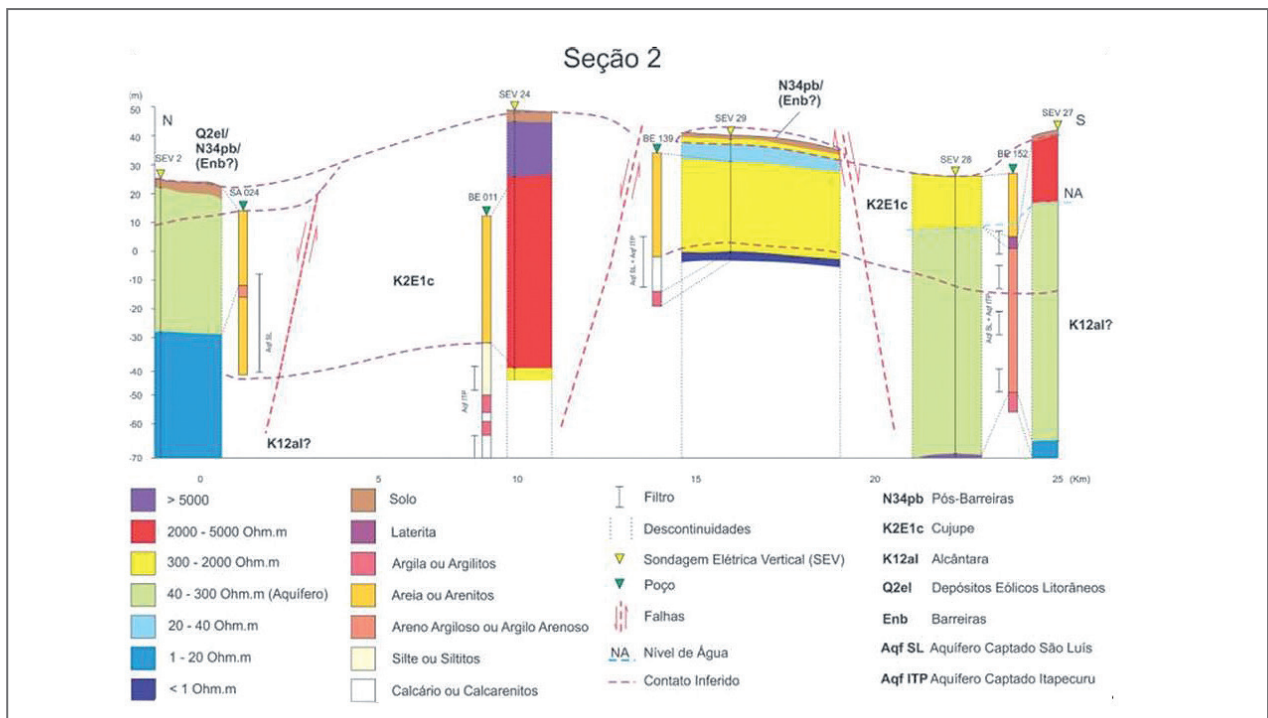


Figura 19: Seção 2 construída a partir dos poços SA024, BE011, BE139 e BE152, e das SEVs 02, 24, 29, 28 e 27

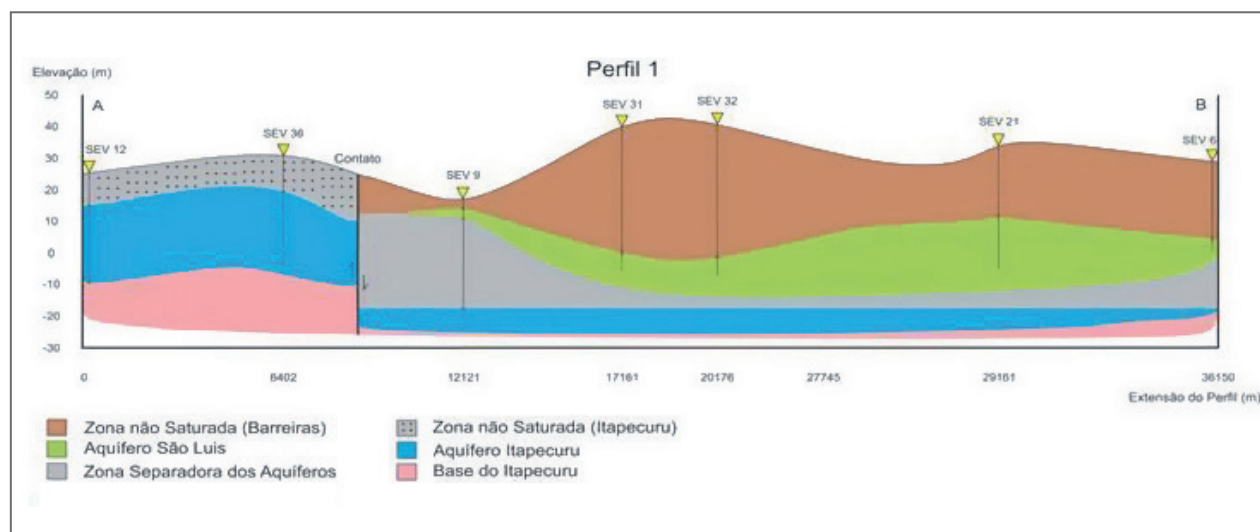


Figura 20: Perfil elaborado a partir da Seção 1

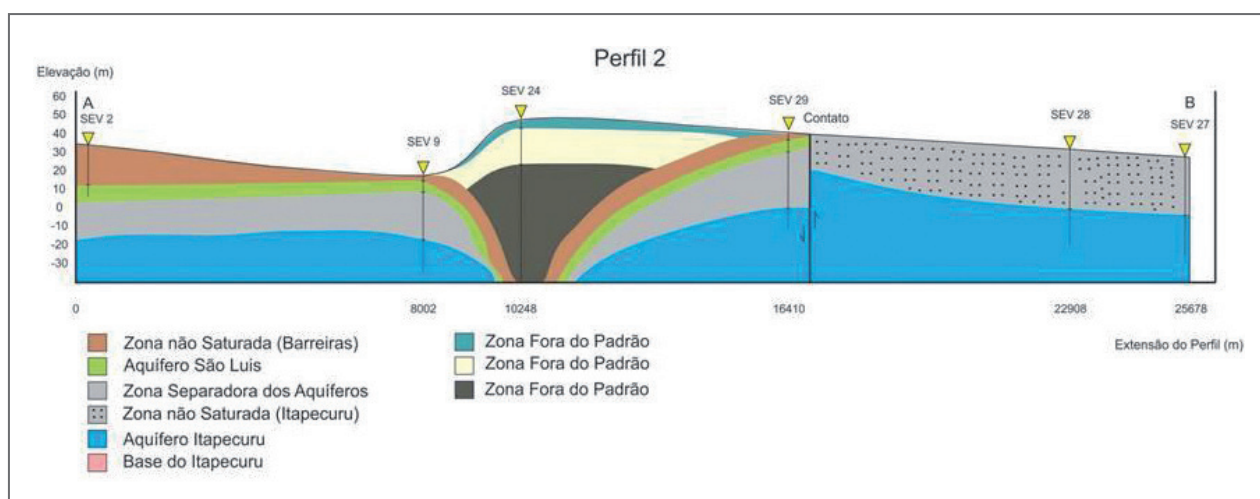


Figura 21: Perfil elaborado a partir da Seção 2

### • SEÇÃO 3

A seção 3 (Figura 22) foi construída com uma direção preferencial NW-SE a partir dos Poços NG006, MJ122 e MJ127, e das SEVs 16, 15, 38 e 06.

Essa seção atravessa importantes zonas de fraturas orientadas N60E e N-S, e, orienta-se paralelamente ao lineamento N40-60W, que delimita parte da Baía do Curupu e o litoral do extremo Norte da Ilha. Situa-se no compartimento rebaixado da Ilha.

Em ambas as falésias das praias de Araçagi e Olho D' água (NW) e na de Panaquatira (SE), observaram-se arenitos não consolidados da Formação Pós Barreiras com espessuras superiores a 10 m que podem ser correlacionados com a camada não saturada das SEVs 16 e 06.

As camadas de argilito no poço NG006 permitem inferir que o topo da Formação Alcântara está próximo à cota -45 m, a NW da seção (Raposa).

A SEV 15 indica que a Formação Pós-Barreiras supere os 30 m de espessura, tendo na sua base, uma camada extremamente resistiva ( $> 5000 \text{ Ohm.m}$ ) e não saturada, interpretada como laterita e cascalho.

A SEV 38 apresenta uma camada condutiva com valores entre  $1 \text{ Ohm.m}$  e  $20 \text{ Ohm.m}$ , provavelmente correlacionada com camadas de argilito do Poço MJ122, podendo o topo da Formação Alcântara estar próximo da cota  $-60 \text{ m}$  em Paço do Lumiar e Panaquatira.

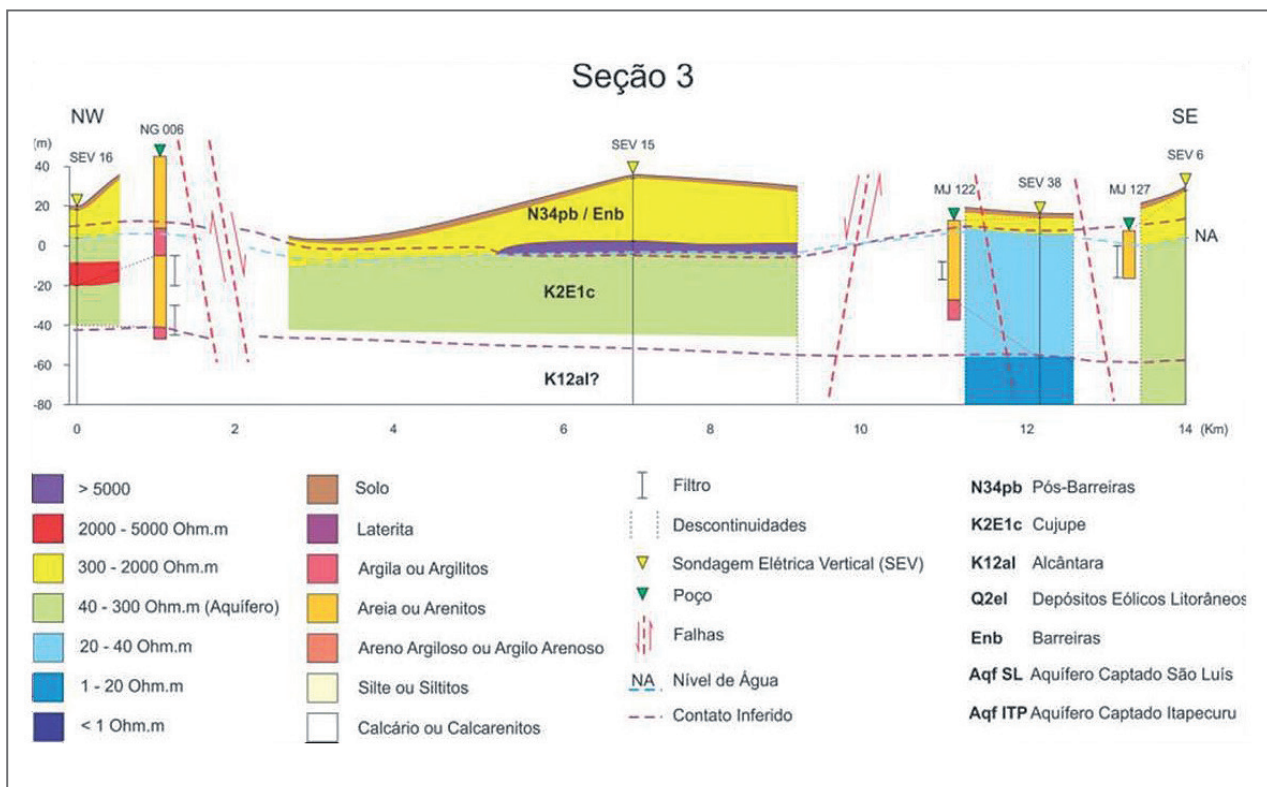


Figura 22: Seção 3 construída a partir dos poços NG006, MJ122 e MJ127, e das SEVs 16, 15, 38 e 06

#### • SEÇÃO 4

A seção 4 (Figura 23) foi construída atravessando a Ilha com uma direção preferencial SW-NE coincidindo com o eixo maior da ilha, a partir dos Poços BE148, BE139, BE104, BE125, FS029, e das SEVs 20, 19, 22, 29, 23, 31, 32, 05, 15.

Conforme o mapa geológico, a seção intercepta importantes descontinuidades, como falhas normais NW-SE e NNE-SSW, todas geralmente com bloco abatido para oeste e sudoeste, e os lineamentos NW-SE no extremo norte da Ilha. Essa tectônica se manifesta na disposição das camadas geoeletricas interpretadas nas SEVs. As camadas condutivas ( $< 20 \text{ Ohm.m}$ ) são bons marcadores desta movimentação.

As SEVs apresentam zonas não saturadas correlatas aos sedimentos da Formação Pós-Barreiras e parte dos arenitos da Formação Cujupe. As camadas condutivas ( $< 20 \text{ Ohm.m}$ ) relacionam-se aos intervalos de argilito presentes nos poços, podendo delimitar o topo da Formação Alcântara.

A camada geoeletrica condutiva ( $< 1 \text{ Ohm.m}$ ) na SEV29 indica a possibilidade de águas salgadas. A seção mostra um espessamento das camadas mais recentes em direção ao norte da Ilha e corroborada pela interpretação geológica.

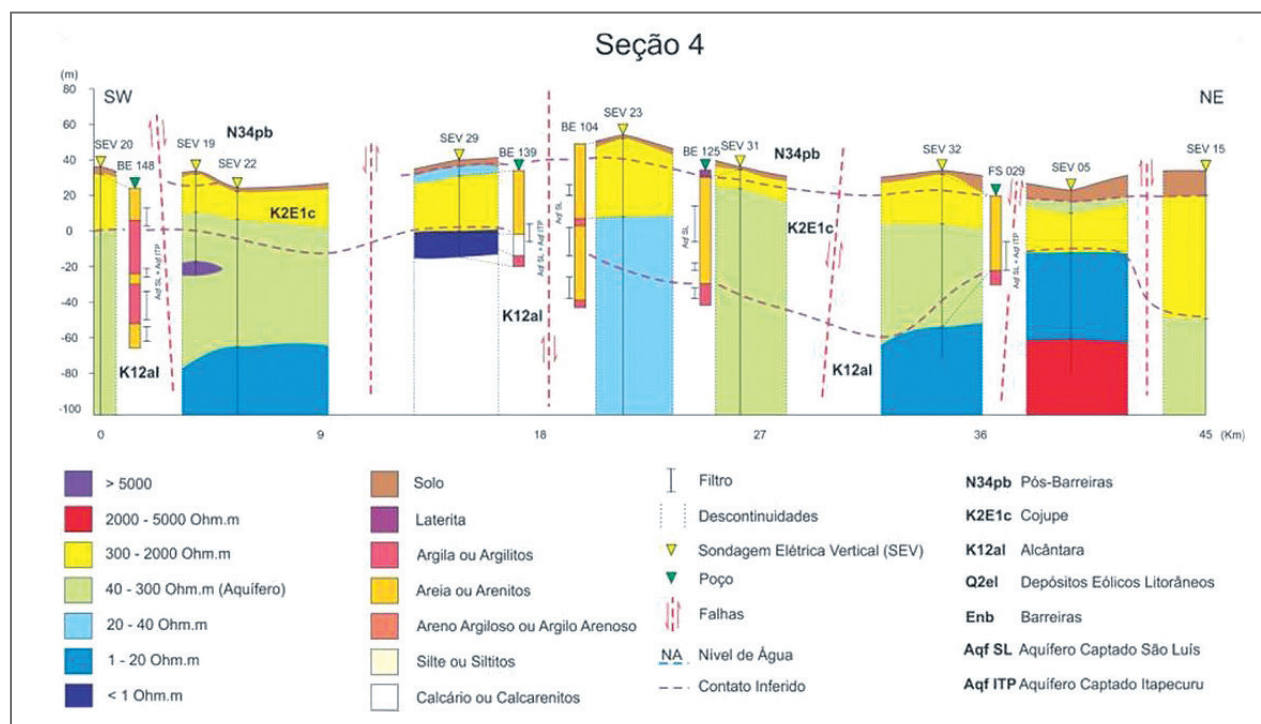


Figura 23: Seção 4 construída a partir dos poços BE148, BE139, BE104, BE125, FS029, e SEVs 20, 19, 22, 29, 23, 31, 32, 05, 15

## • SEÇÃO 5

A seção 5 (Figura 24) foi construída com uma direção preferencial NW-SE a partir dos Poços LA027, BE011, BE104 e BE151, e das SEVs 01, 24, 23, 11 e 34.

A SEV01 apresenta camada saturada rasa, sendo correlata aos arenitos da Formação Cujupe, descritos em afloramentos. Pela proximidade com o mar, a camada condutiva ( $< 20 \text{ Ohm.m}$ ) pode ser correlacionada com o argilito do poço LA027, mas provavelmente saturada em água do mar.

A SEV23 possui uma zona não saturada que pode ser correlacionada com os sedimentos da Formação Pós-Barreiras e parte dos arenitos da Formação Cujupe. E toda a zona saturada está associada a Formação Cujupe também. Esta afirmação é consubstanciada pelo poço BE104 que contém carbonatos (pertencentes a Formação Alcântara) a -47 m do nível do mar.

As SEV11 e SEV34 localizam-se sobre a Formação Cujupe por correlação com afloramentos na Praia de Guarapiranga (pontos EL30 e EL32).

Pela informação em poços, o topo da Formação Alcântara está em cotas variadas como -15 m no bairro Itaqui e -49 m na bacia do rio Bacanga (próximo a SEV24). Supõe-se que este eleve-se ao nível do mar na direção SE, próximo a SEV34. Essa seção apresenta uma grande variação de profundidade das formações geológicas que pode ser atribuída às falhas geológicas.

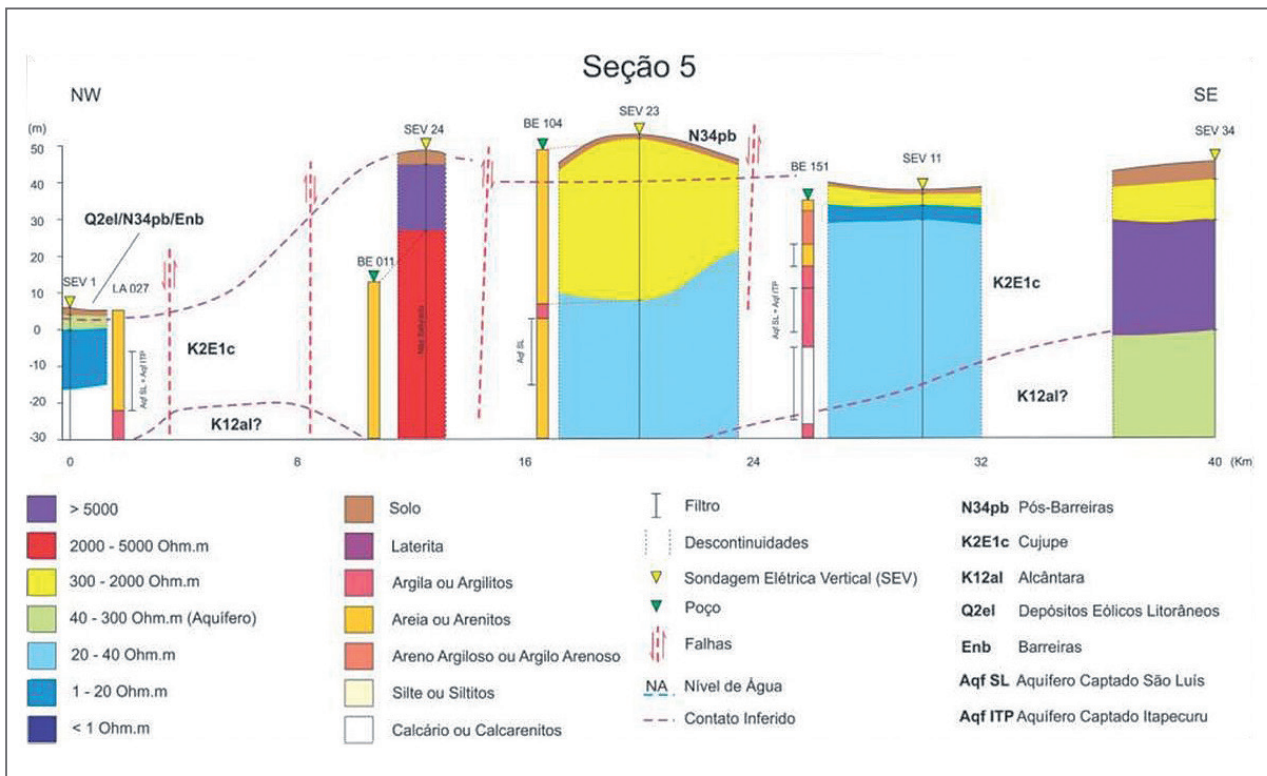


Figura 24: Seção 5 construída a partir dos poços LA027, BE011, BE104 e BE151, e das SEVs 01, 24, 23, 11 e 34

### 3.4.2. Interpretação Conjunta de Caminhamentos e SEVs

Nove caminhamentos ou tomografias elétricas foram levantados, totalizando 10 km lineares (Figura 25). Elas se localizaram preferencialmente próximas ao litoral para investigar a influência de intrusão salina. O início do projeto coincidiu com o período chuvoso e as ocorrências diárias de chuva, juntamente com a grande urbanização da área, comprometeram o cumprimento das metas de 50 km de CE e os esforços se voltaram para cumprir a meta das SEVs.

Desta forma, com o intuito de minorar possíveis prejuízos advindos da não realização desses caminhamentos elétricos na quantidade prevista, algumas SEVs foram selecionadas e processadas conjuntamente com informações de poços tubulares com descrições litológicas apropriadas, formando dois perfis lito-geofísicos seccionando toda a Ilha (Figura 26).

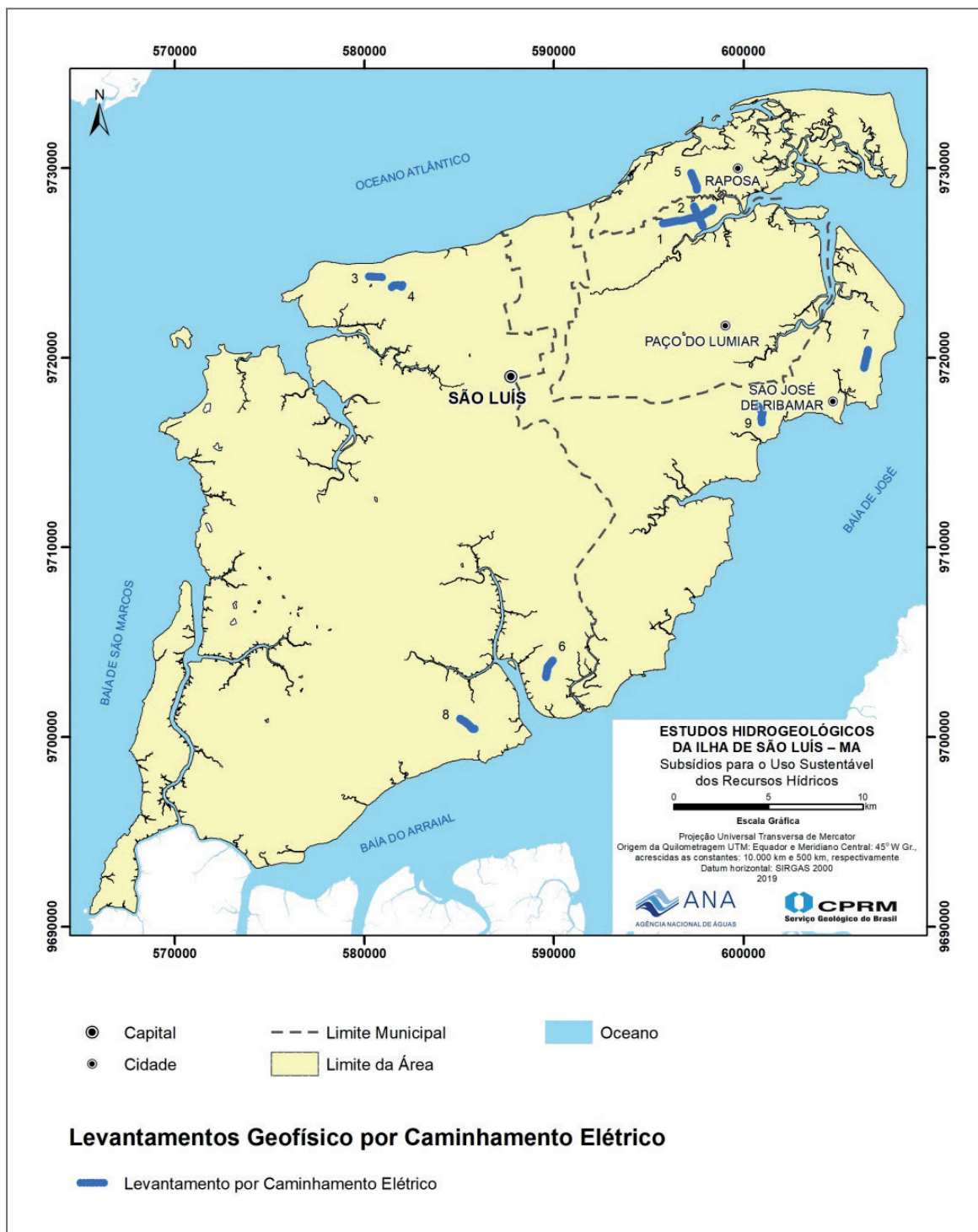


Figura 25: Distribuição das linhas de CE realizadas dentro da Ilha de São Luís



Figura 26: Distribuição das SEVs utilizadas para traçar os perfis 1 e 2

#### • PERFIL 1

O perfil 1, com 36 km de comprimento, é dado pelas SEV12, SEV36, SEV09, SEV31, SEV32, SEV21 e SEV06. O resultado das inversões é mostrado dentro do perfil (Figura 27), juntamente com sua interpretação geofísica (Figura 28).

##### SEV12

O resultado mostra uma camada saturada na cota 15 m. Não há um poço disponível para correlacionar, mas os poços mais próximos da região (MJ066 e MJ068) apresentam pH 7,7. Pode-se sugerir que essa camada saturada esteja correlacionada com aquífero inferior.

##### SEV36

O resultado mostra uma camada saturada na cota 20 m. O poço utilizado foi MJ085 (a 250 m) que mostra que o nível de água está na cota de 8 m com pH 7. Apesar dos níveis de água divergirem, pode-se sugerir que essa camada saturada esteja correlacionada com o aquífero inferior.

##### SEV09

O resultado mostra duas camadas saturadas sendo uma superior na cota 14,5 m e uma inferior na cota -17,4 m. O poço utilizado foi BE007 (a 245 m) que mostra o nível de água está na cota de 11 m com pH 5,4. O resultado sugere que camada saturada superior pode ser correlacionada com aquífero superior enquanto a camada saturada inferior pode ser correlacionada com aquífero inferior.

## SEV31

O resultado mostra uma camada saturada na cota 22,5 m. O poço utilizado foi BE125 (a 1 Km) que mostra que o nível de água está na cota de 17,5 m com pH 4,5. Apesar dos níveis de água não conferirem, pode-se sugerir que essa camada saturada esteja correlacionada com aquífero superior.

## SEV32

O resultado mostra uma camada saturada na cota 12 m. O poço utilizado foi FS029 (a 500 m) que mostra que o nível de água está na cota de 15 m com pH 4,4. O resultado sugere que essa camada saturada esteja correlacionada com aquífero superior.

## SEV21

O resultado mostra uma camada saturada na cota 11,6 m. O poço utilizado foi MJ112 (a 325 m) que mostra que o nível de água está na cota de 12 m com pH 4,6. O resultado sugere que essa camada saturada esteja correlacionada com aquífero superior.

## SEV06

O resultado mostra uma camada saturada na cota 4,5 m. Não há um poço disponível para correlacionar, mas o poço mais próximo da região (MJ127) apresenta pH 4,9. Pode-se sugerir que essa camada saturada esteja correlacionada com aquífero superior.

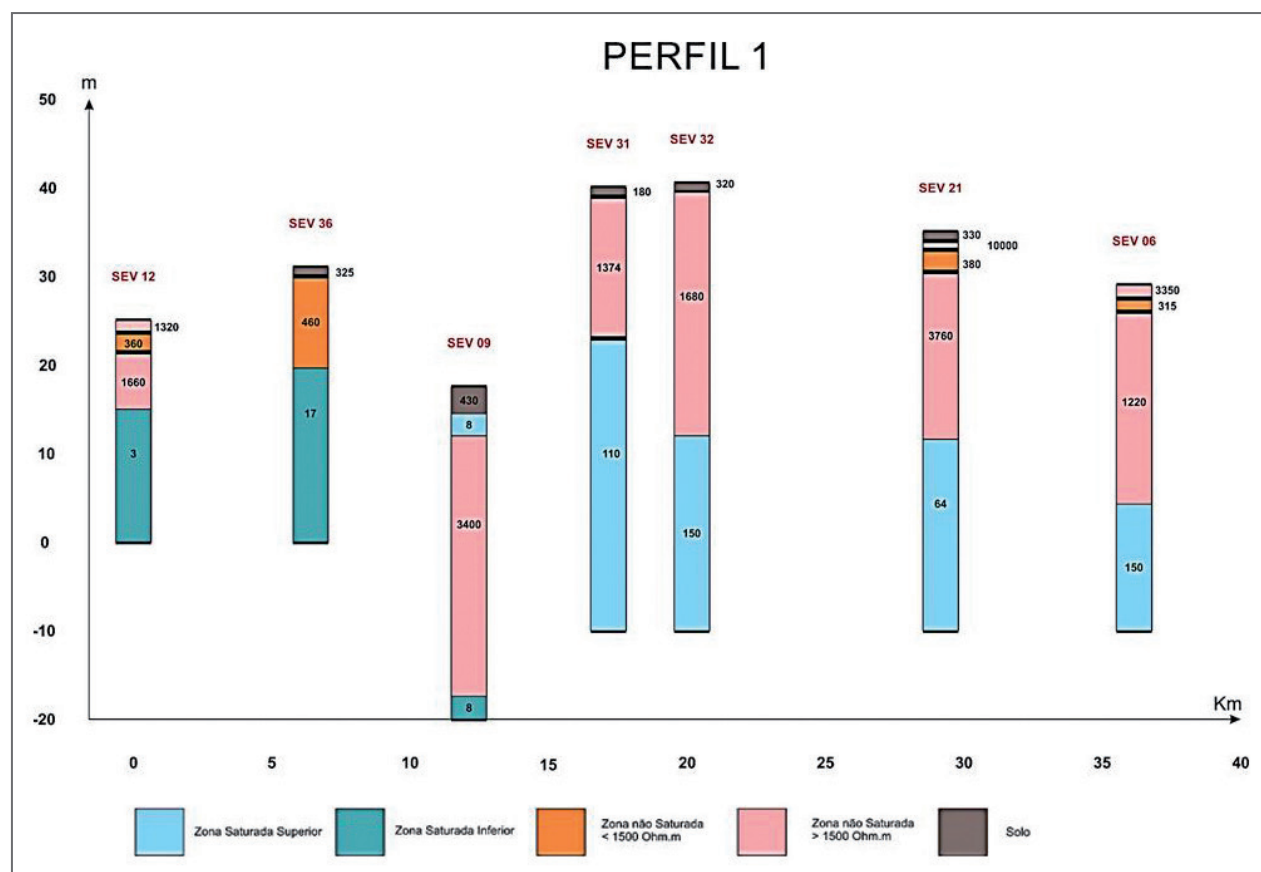


Figura 27: Resultado das inversões do perfil 1

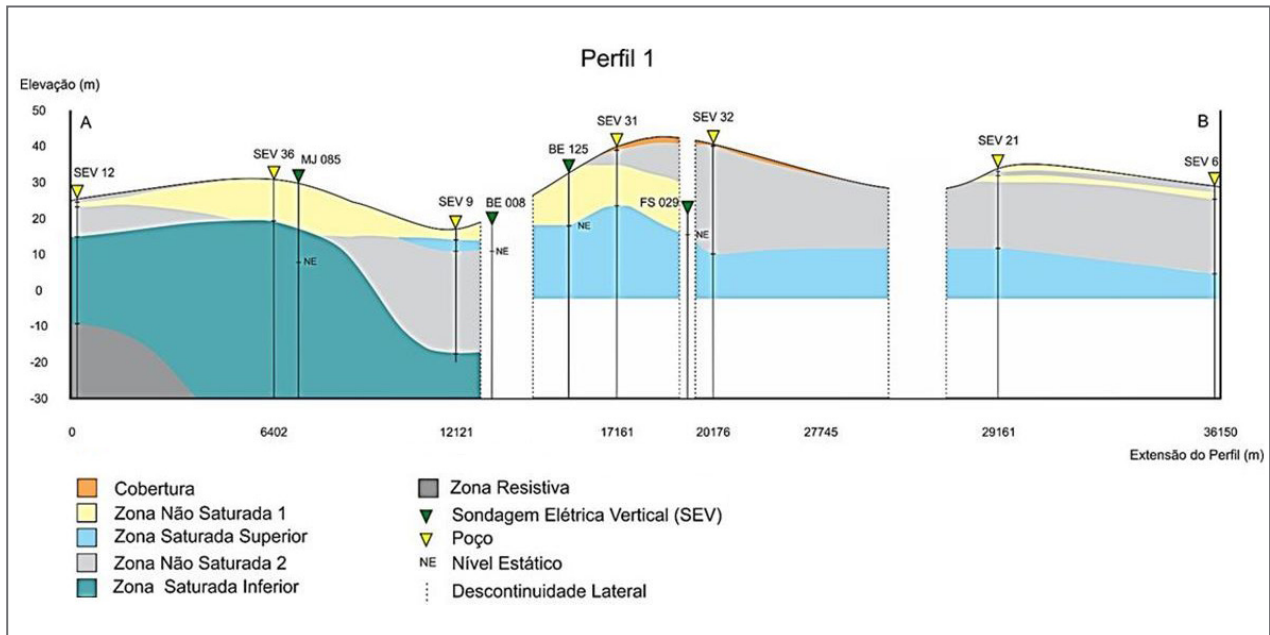


Figura 28: Seção interpretativa geofísica do perfil 1

## • PERFIL 2

O perfil 2 (26 km de extensão) é constituído pelas SEV02, SEV09, SEV24, SEV29, SEV28 e SEV27. O resultado das inversões é mostrada dentro do perfil em escala (Figura 29) juntamente com sua interpretação geofísica (Figura 30).

### SEV02

O resultado mostra uma camada saturada na cota 12 m. O poço utilizado foi FS029 (a 1,3 Km) que mostra que o nível de água está na cota de 3,5 m com pH 7. O resultado sugere que essa camada saturada esteja correlacionada com o aquífero inferior.

### A SEV09

Já foi discutida no perfil 1.

### SEV24

O resultado não mostra nenhuma camada saturada. O poço utilizado foi FS016 (a 660 m) que mostra que o nível de água está na cota de -40 m com pH 7,8. O resultado sugere que a profundidade de investigação da SEV não foi suficiente para alcançar o nível de água do aquífero inferior.

### SEV29

O resultado mostra duas camadas saturadas, sendo uma superior na cota 37 m e uma inferior na cota 0 m. O poço utilizado foi SA039 (a 970 m) que mostra que o nível de água está na cota de 35 m. Pode-se sugerir que a camada saturada superior pode ser correlacionada com aquífero superior enquanto a camada saturada inferior pode ser correlacionada com aquífero inferior.

SEV28

O resultado mostra uma camada saturada na cota 13,5 m. Não há um poço disponível para correlacionar. Pode-se sugerir que essa camada saturada esteja correlacionada com aquífero inferior.

SEV27

O resultado mostra uma camada saturada na cota 2 m. Não há um poço disponível para correlacionar. Pode-se sugerir que essa camada saturada esteja correlacionada com aquífero inferior.

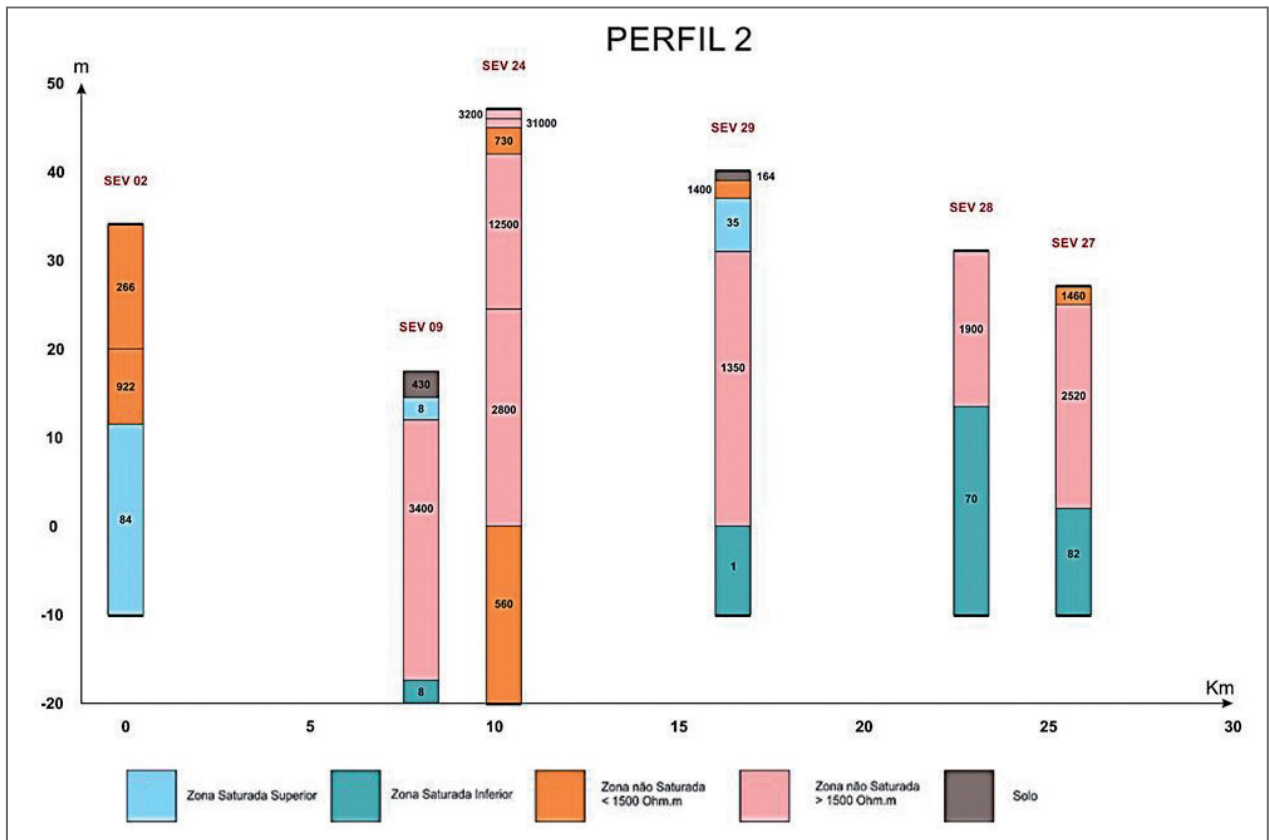


Figura 29: Resultado das inversões do perfil 2

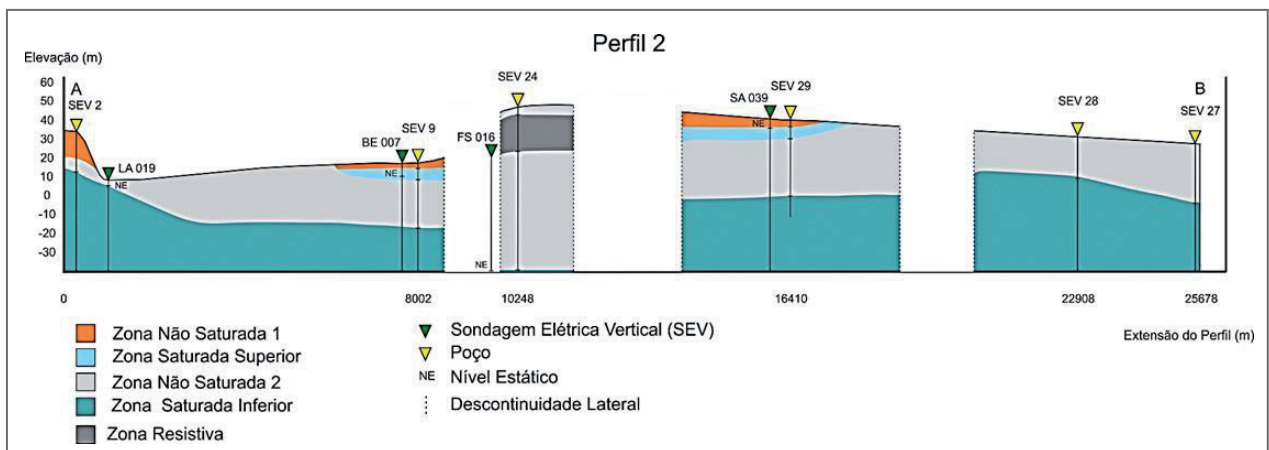


Figura 30: Seção interpretativa geofísica do perfil 2

Adicionalmente, foram ainda realizados 10 caminhamentos eletromagnéticos, totalizando mais 7 km de caminhamento geofísico. A escolha deste método de investigação se deu devido à sua maior aplicabilidade, em regiões rurais, sem presença de “ruídos” que interfiram nos resultados, para a detecção de zonas de águas salinizadas, como bolsões de águas salgadas ou zonas de intrusão marinha e as investigações foram realizadas no litoral, próximas a mangues ou a poços (Figura 31).

Considera-se, portanto, que no total foram realizados 79 km de caminhamentos geofísicos em toda a Ilha (CE, CEM e perfis lito-geofísicos).

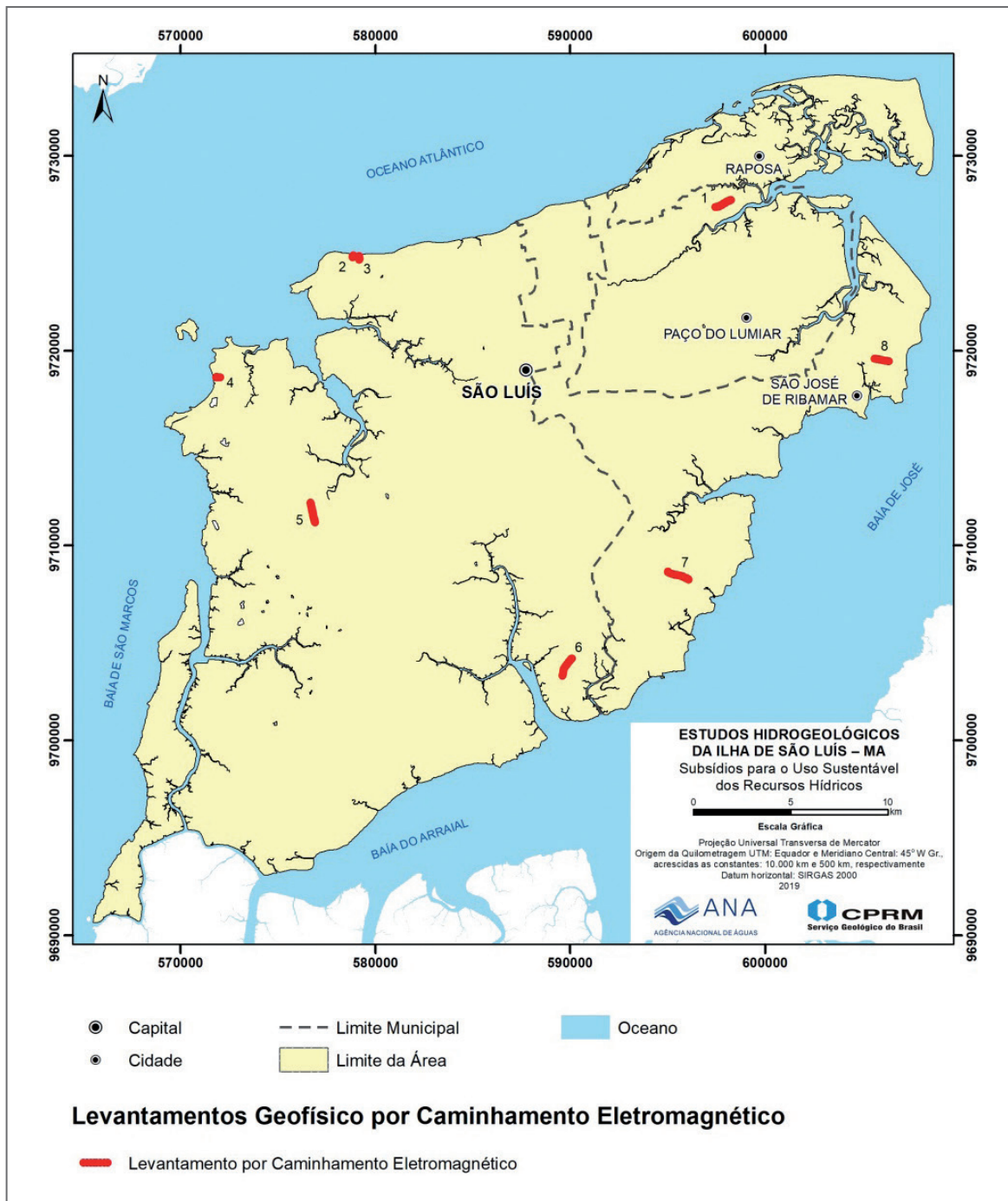


Figura 31: Distribuição das linhas de CEM realizadas dentro da Ilha de São Luís

São apresentadas a seguir as interpretações integradas dos métodos geofísicos em 11 locais. Estas permitiram a confirmação de camadas condutivas associadas aos argilitos, inferências quanto a águas salgadas, o mapeamento da seção não saturada e, em algumas seções, a notável acomodação tectônica dos estratos geológicos.

### CEM2 – CEM3 – SEV1

Na praia do Calhau, realizaram-se a SEV01 e os caminhamentos CEM2 e CEM3 (Figura 32).

A SEV01 mostra três camadas geolétricas associadas, respectivamente, a um solo com 2 m de espessura relacionado à areia de duna + solo úmido (choveu na noite anterior aos trabalhos e havia poças), um arenito saturado com 4 m de espessura e uma camada condutiva (~7 Ohm.m) relacionada a rochas saturadas em água do mar. Essa SEV não conseguiu investigar muito além do nível do mar.

Os caminhamentos CEM2 e CEM3 foram adquiridos ortogonais à praia, em direção ao topo das dunas. Localmente ocorrem areias brancas de dunas (até 2 m de espessura), areias amareladas Pós-Barreiras, granulação média, estratificadas (2 m de espessura), blocos de arenitos ferruginosos com laterita (possível indicação da Formação Barreiras). Na base das dunas e na praia ocorrem arenitos alterados e argilitos alterados do Grupo Itapecuru, sem identificação da formação. Na base das dunas, ao nível do calçadão (~10 m de altitude) há uma fonte, podendo ser inferida como o nível de água doce local.

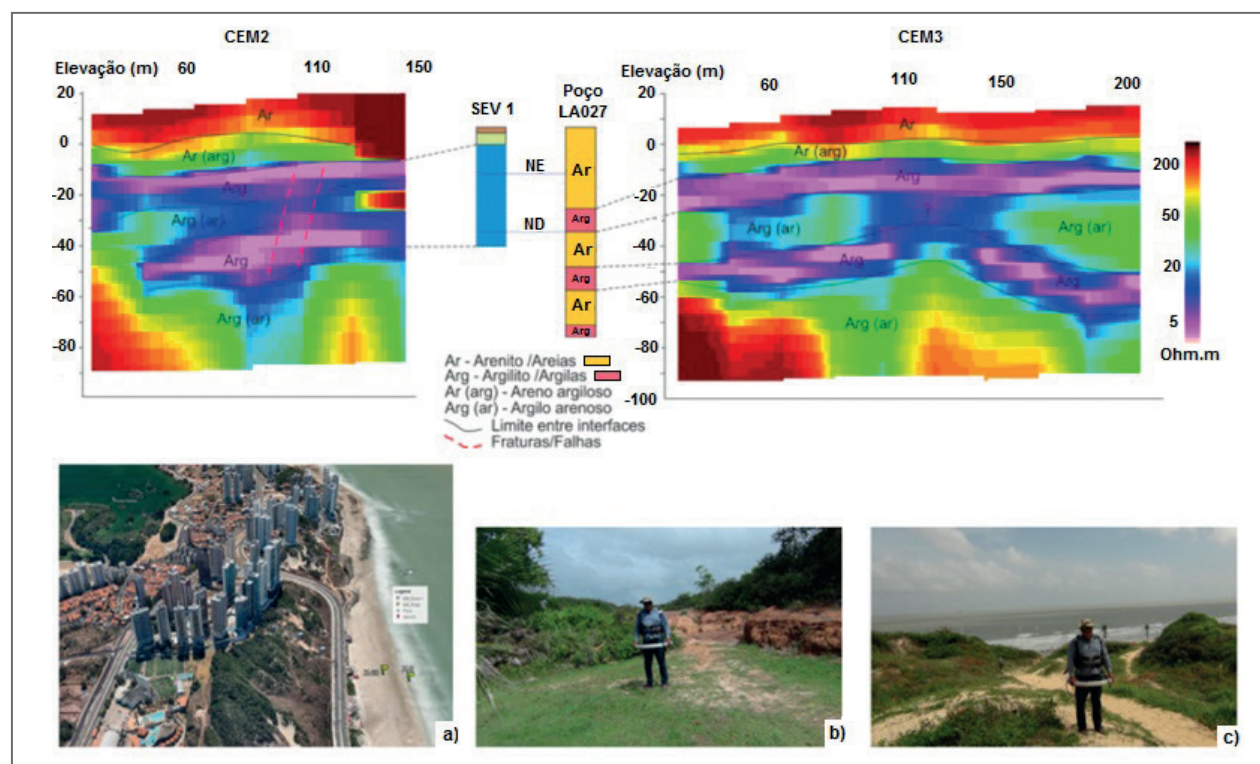


Figura 32: Integração da SEV01 com os caminhamentos CEM2 e CEM3 realizados na praia do Calhau, São Luís: a) topo da Duna 1, com afloramentos de areia Pós-Barreiras (?) com estratos plano-paralelos e maciços; b) e c) vista do topo da Duna 2

No topo das seções CEM, há uma camada resistiva (>300 Ohm.m), provavelmente não saturada (7 a 20 m de espessura), associada às areias de dunas e areias Pós-Barreiras. Entre as cotas + 5 m e -10 m existe uma camada (28 Ohm.m a 275 Ohm.m), relacionada a arenitos com variadas concentrações de argila, saturados em água doce. Ocorrem duas camadas condutivas (< 10 Ohm.m) interpretadas como argilitos saturados, com influência da água do mar nas altitudes -10 m e -40 m. Entre as camadas condutivas se apresenta outra camada pouco resistiva (10 Ohm.m a 300 Ohm.m), correlacionada a arenitos saturados. Estima-se que o limite entre as formações Cujupe e Itapecuru se situe na cota -15 m.

### CEM1 / CE1- CE2

No Assentamento do Cumbique (Paço do Lumiar), realizaram-se os caminhamentos elétricos CE1 e CE2, e o caminhamento eletromagnético CEM1 (Figura 33 e Figura 34). O CE1 apresenta três camadas geoeletricas, sendo que a zona saturada ao nível do mar, com cota de até -40 m. Rumo a leste, aproximando-se do mangue, o nível de água alinha-se ao nível do mar.

O CE2 intercepta perpendicularmente a CE1 na posição 1700 m da CE1 e posição 600 m da CE2. Predominam duas camadas geoeletricas, sendo a zona saturada próxima ao nível do mar.

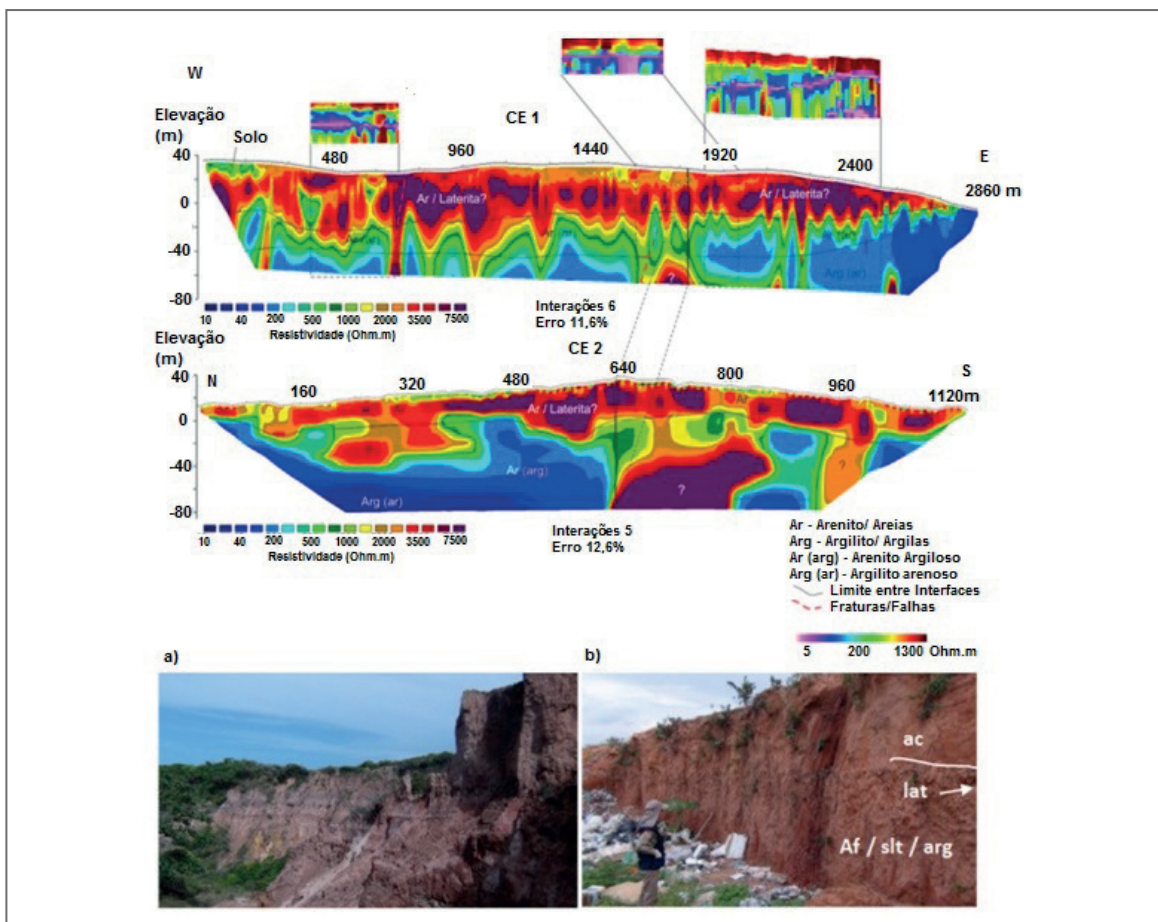


Figura 33: (a) Falésia na Praia do Meio. Rochas da formação Cujupe sotoposta a areias pleistocênicas; (b) cava a 200 m a sul da CE1, com areia maciça laranja no topo, sotoposta por 2 m areia com fragmentos lateríticos, em discordância erosiva

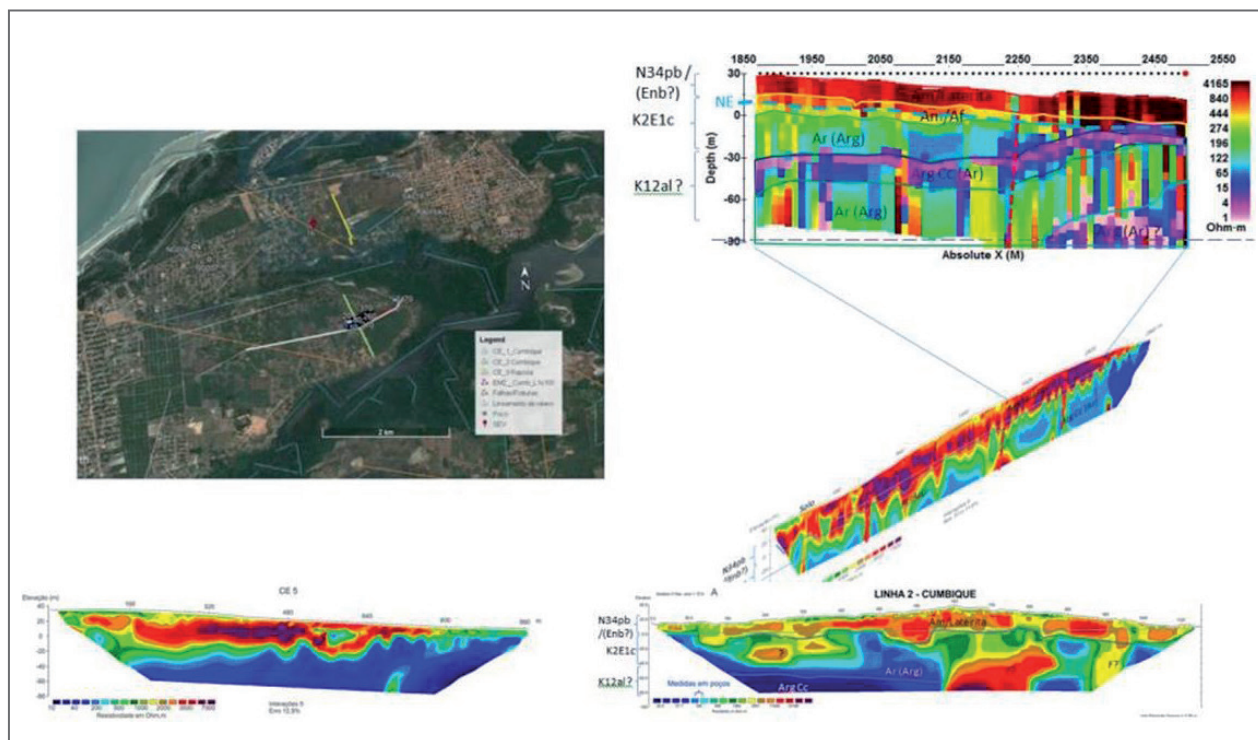


Figura 34: Integração em perspectiva dos caminhamentos CE1, CE2 e CEM1 - Assentamento do Cumbique (Paço do Lumiar)

Entre as coordenadas 640 m e 860 m, há uma interrupção brusca dessas camadas com um corpo ou estrutura resistiva. Entre 160 m e 480 m, a inversão mostra uma camada mais condutiva com cota média de -60 m que pode ser ou intrusão salina ou a presença de argilito saturado.

O CEM1 representa três levantamentos com separação de sensores de 50 m e 100 m e traz mais detalhes sobre a litologia. O trecho entre as posições 1600 m e 1800 m do CE1 representa uma camada resistiva superficial que pode ser associada às areias pleistocênicas da Formação Pós-Barreiras. Há duas camadas condutivas (< 10 Ohm.m) que podem ser associados a argilitos saturados, e entre elas uma camada com resistividade entre 100 Ohm.m e 300 Ohm.m, que pode ser associado a um arenito saturado em água doce. Essa intercalação arenito e argilito remetem à Formação Cujupe. O topo da Formação Cujupe estaria +5 acima do nível do mar. Entre as posições 400 m e 725 m do CE1, há outro CEM com o objetivo de compreender melhor a anomalia resistiva na posição 650 m do CE1. A inversão mostra exatamente o mesmo comportamento do primeiro trecho, porém não avança no entendimento da anomalia resistiva.

O trecho do CEM, às posições 1850 e 2500 m do CE1, apresenta modelo com o comportamento de camadas semelhante aos demais trechos. A camada condutiva associada ao argilito saturado apresenta-se na cota -30 m. A partir da posição 2250 m, essa camada eleva-se ao nível do mar, sugerindo que o topo da Formação Cujupe foi erodido anteriormente à deposição das areias da Formação Pós-Barreiras.

Os poços locais com profundidades entre 38 m e 100 m possuem níveis estáticos de 20 a 36 m da superfície (equivalente a +5 m do nível do mar) e resistividades entre 174 Ohm.m e 98 Ohm.m.

## CE5 – SEV16

Foram realizadas a SEV16 e o CE5 (Figura 35) na região da Raposa, ladeada por lineamentos N70- 80E e N15W, expressos principalmente nas drenagens. O local está entre manguezais de afluentes do Rio Paciência. O mapa geológico mostra as areias Pós-Barreiras nos tabuleiros baixos e depósitos de mangues nas planícies do rio Paciência.

A SEV16 está nas proximidades da posição 600 e tem o mesmo padrão de CE5. Apresenta duas camadas resistivas totalizando 14 m de espessura, representativas do solo e porções não saturadas de areias e lateritas das Formações Pós-Barreiras e, dos arenitos e argilitos da Formação Cujupe. Em seguida uma camada pouco resistiva (250 Ohm.m) com 13 m de espessura indicativa de aquífero com água doce. Abaixo está outra camada resistiva (~ 3000 Ohm.m) com 10 m de espessura. A última camada, com resistividade de 90 Ohm.m, pode ser um arenito argiloso da base da Formação Cujupe.

O CE5 tem correspondência com a SEV16. O CE5 apresenta uma camada não saturada superior (resistividade > 1000 Ohm.m) com espessura variável chegando a 80 m na borda NW e afinando até à borda SE. A camada inferior possui média a baixa resistividade (< 300 Ohm.m) com a cota de topo variando de -40 m na borda NW ao nível do mar da borda SE. Essa camada pode ser associada a arenitos saturados da Formação Cujupe. Por correlação aos poços NG006 e NG007, o topo da Formação Alcântara está próximo à cota -40 m.

A região do Cumbique e da Raposa são ladeadas por lineamentos N70-80E e N15W, expressos principalmente nas drenagens. É um local entre manguezais de afluentes do Rio Paciência.

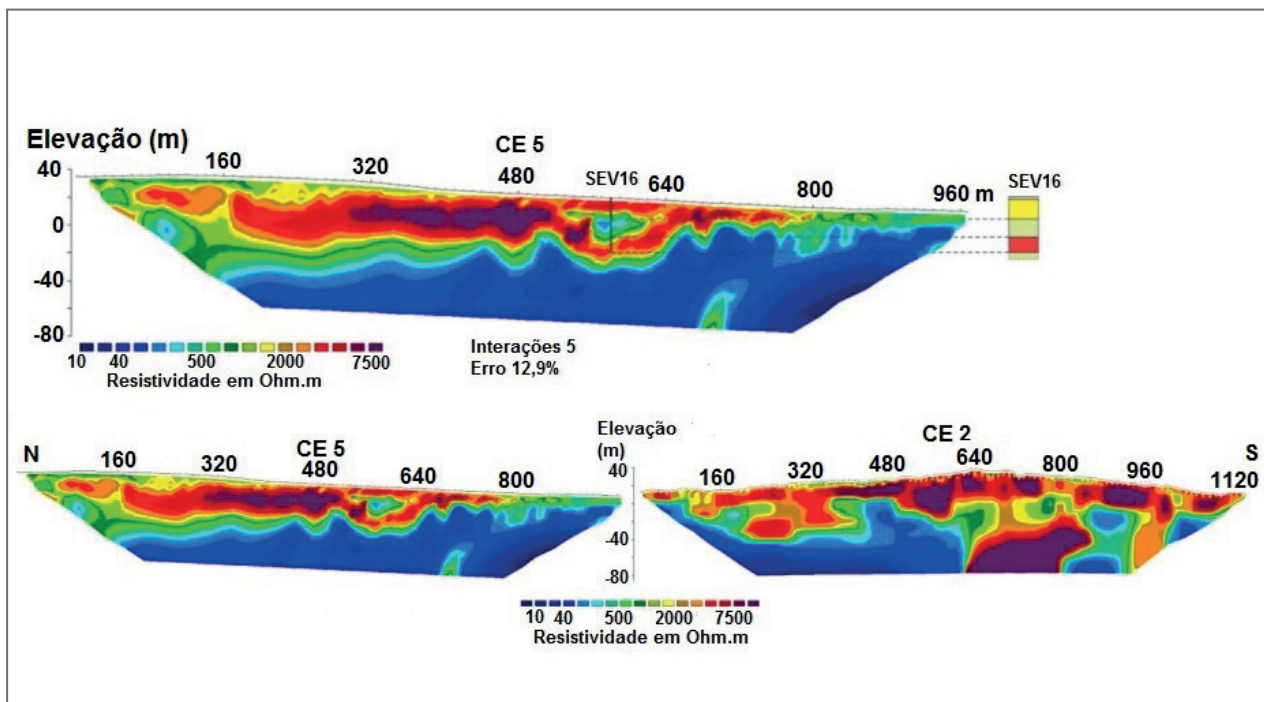


Figura 35: Integração SEV 16 e caminhamento CE5, região de Raposa (parte superior); Caminhamentos CE2 (Cumbique) e CE5 (Raposa) realizados próximos ao braço de um mangue (parte inferior da figura)

Nas extremidades do CE2 e do CE5, ao nível do mar em direção ao interior das seções observa-se zona condutiva (<20 Ohm.m) com gradientes entre 7,6° e 11°. A disposição destas zonas condutivas sugere uma provável influência de águas salobras provenientes dos manguezais.

#### CEM 4 – SEV 12

Os levantamentos CEM4 e SEV12 (Figura 36) abrangem os tabuleiros baixos e falésias pouco íngremes acima da Praia da Ponta da Espera, constituídos de arenitos finos avermelhados e argilitos da Formação Alcântara (afloramento EL-39).

A SEV12 mostra duas camadas até 4 m da superfície associadas a um solo com frações grossas e cascalho (1319 Ohm.m) e frações mais finas (357 Ohm.m). Abaixo, uma camada de 6 m de arenito não saturado. Na cota 16 m, outra camada (< 3 Ohm.m) que pode ser associada a um argilito saturado em água provavelmente salina. Abaixo da cota -7 m, o aumento da resistividade sugere diminuição na concentração de sais.

O CEM4 mostra uma camada resistiva (~ 500 Ohm.m), com espessura inferior a 5 m, provavelmente regolito. A camada inferior, entre +25 e +5 m de altitude, com baixa resistividade (19 Ohm.m a 70 Ohm.m) indica rochas saturadas em água, talvez arenitos finos. Duas camadas condutivas (< 10 Ohm.m) ocorrem nas cotas +5 m e outra a -15 m, diferentemente do modelo da SEV12. Uma camada pouco resistiva (10 Ohm.m e 300 Ohm.m) entre -15 m e -30 m sugere arenitos saturados em água mais doce. Valores de resistividades inferiores a 8 Ohm.m podem indicar influência de água do mar na formação. Um deslocamento das camadas na posição 200 m denota falhamento recente na falésia, parte da evolução da linha de costa, como frequentemente visto na Praia de Panaquatira. Na mesma posição foi avistada uma fonte de água sobre argilitos ao sopé da falésia.

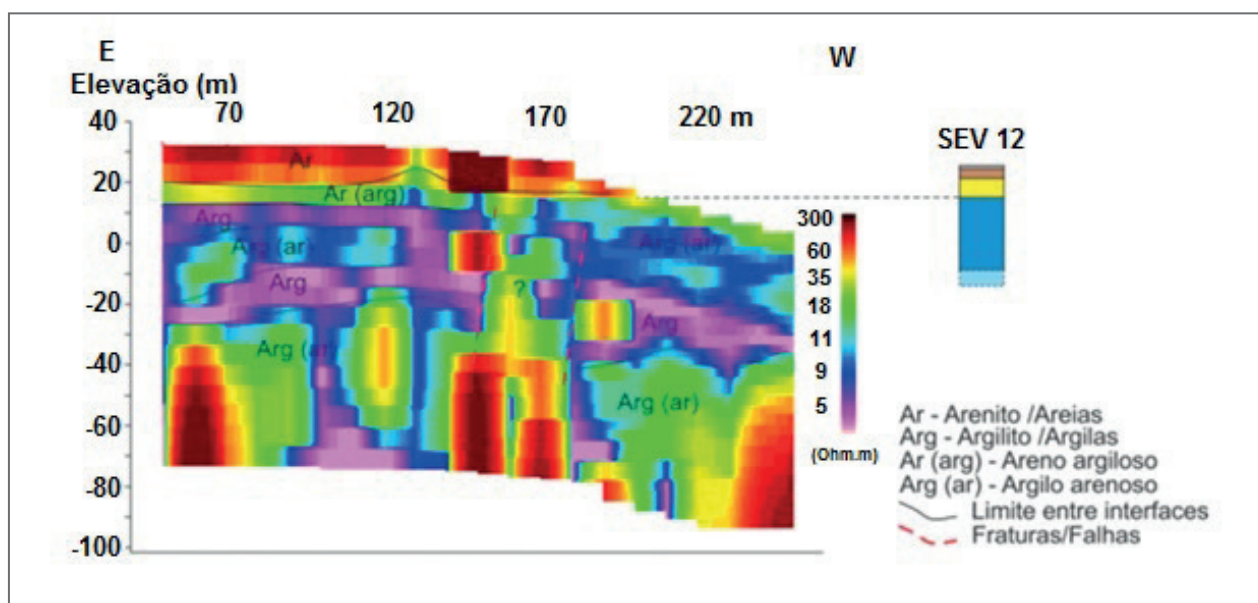


Figura 36: Integração da SEV12 com caminamento CEM4. Falésia acima da Praia da Ponta da Espera. Siltitos alterados em falésia na Ponta da Espera. Há surgência de água a 5 m acima da linha de praia

## CEM5 – SEV13

Os levantamentos CEM5 e SEV13 (Figura 37) foram realizados numa região pouco ondulada atravessada por drenagem, ao lado da propriedade da Vale. O mapa geológico indica afloramento do Grupo Itapecuru.

A SEV13 mostra duas camadas de até 2 m que podem ser associadas a um solo superior com cascalho (5.361 Ohm.m) e outro mais siltico-argiloso (413 Ohm.m). Abaixo, há uma camada resistiva da ordem de 9.000 Ohm.m com espessura de 6 m. Aproximadamente na cota 14, há uma camada pouco resistiva (< 20 Ohm.m) com 14 m de espessura que indica saturação podendo ser associada a um argilito ou arenito. No nível do mar, há novamente outra camada resistiva da ordem de 9.000 Ohm.m.

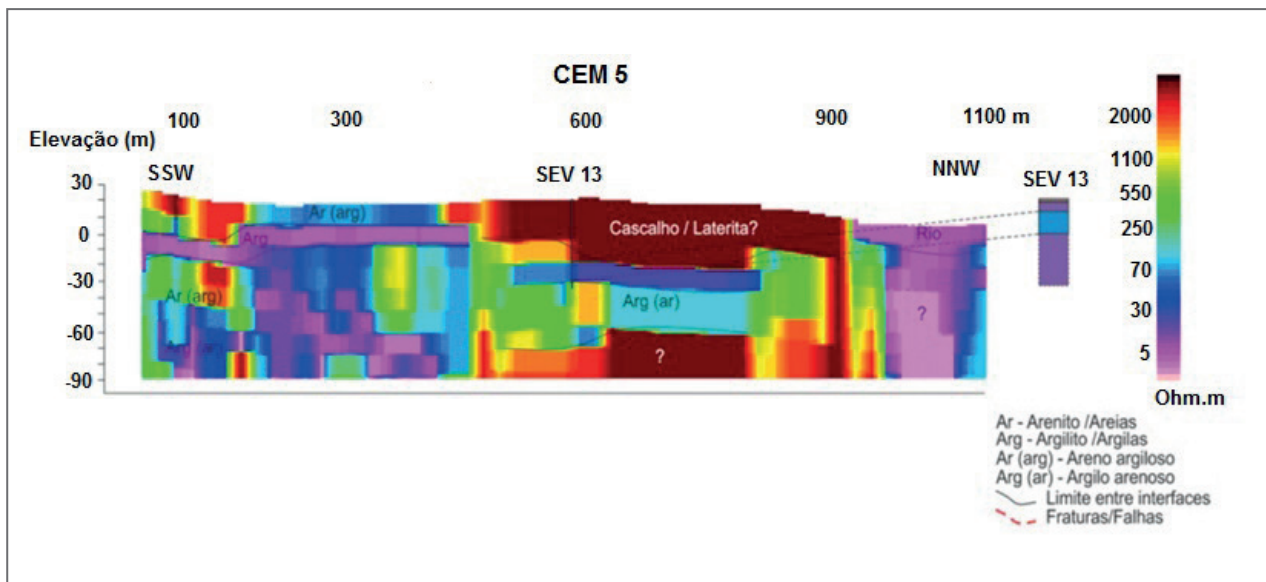


Figura 37: Integração da SEV13 com o caminhamento CEM5.  
Trabalhos realizados ao lado da propriedade da Vale

O CEM5 apresenta três comportamentos diferentes. Entre as posições 50 m e 450 m, há duas camadas pouco resistivas. A camada superior a +15 m (resistividade de 7 Ohm.m a 80 Ohm.m) tem correspondência no modelo da SEV e pode ser uma camada argilosa localmente saturada (lençol freático local restrito-suspensão). Outra camada pouco resistiva (3 Ohm.m a 80 Ohm.m) ocorre ao nível do mar. De 0 a -40 m, as resistividades entre 193 Ohm.m e 653 Ohm.m representam as intercalações de arenitos e argilitos com águas mais doces, citadas na descrição do poço JA003.

Não se pode tecer considerações entre as posições 450 m e 950 m, pois os dados originais de fase e quadratura elevaram-se bruscamente, o que sugere uma fonte adicional de energia na propriedade da Vale, como um gerador elétrico ou rede de alta tensão. Entre as posições 950 m e 1100 m ocorre uma feição condutiva relacionada a um rio. Os dados não trazem resolução abaixo do rio.

## CEM6 – CE6 – SEV33

Os levantamentos CEM6, CE6 e SEV33 (Figura 38) foram realizados em Santa Rosa, num local distante 1500 m a leste do Rio Tibiri. Região suavemente ondulada, atravessada por lineamentos N25E e N40-55W. O litoral é delineado por falhamentos N-S e N40E, provavelmente extensionais. Afloram rochas da Formação Cujupe.

Nos primeiros 20 m da superfície ocorrem arenitos insaturados da Formação Cujupe (K2E1c) com maior resistividade ( $> 600$  Ohm.m na seção eletromagnética-EM). No CE6 e na SEV33, as resistividades superam 2.000 Ohm.m, e os valores maiores podem indicar cascalho laterítico. O nível de água é delineado pelo valor de 300 Ohm.m. O argilito, com resistividades inferiores a 40 Ohm.m, é nítido na seção EM. Este se situa ao nível do mar na porção SW e aprofundando-se até -30 m a nordeste. Valores inferiores a 10 Ohm.m em ambas as seções sugerem cunha salina. A água do mar deve fluir na interface entre os arenitos e argilitos citados. Um segundo nível argiloso ocorre a -60 m, no limite do modelo. A Formação Alcântara deve estar abaixo da cota -20 m. Uma zona de fraturamentos é indicada entre as posições 200 m e 400 m. Os poços MJ (204, 205 e 208) extraem água com resistividades entre 100 Ohm.m e 150 Ohm.m.

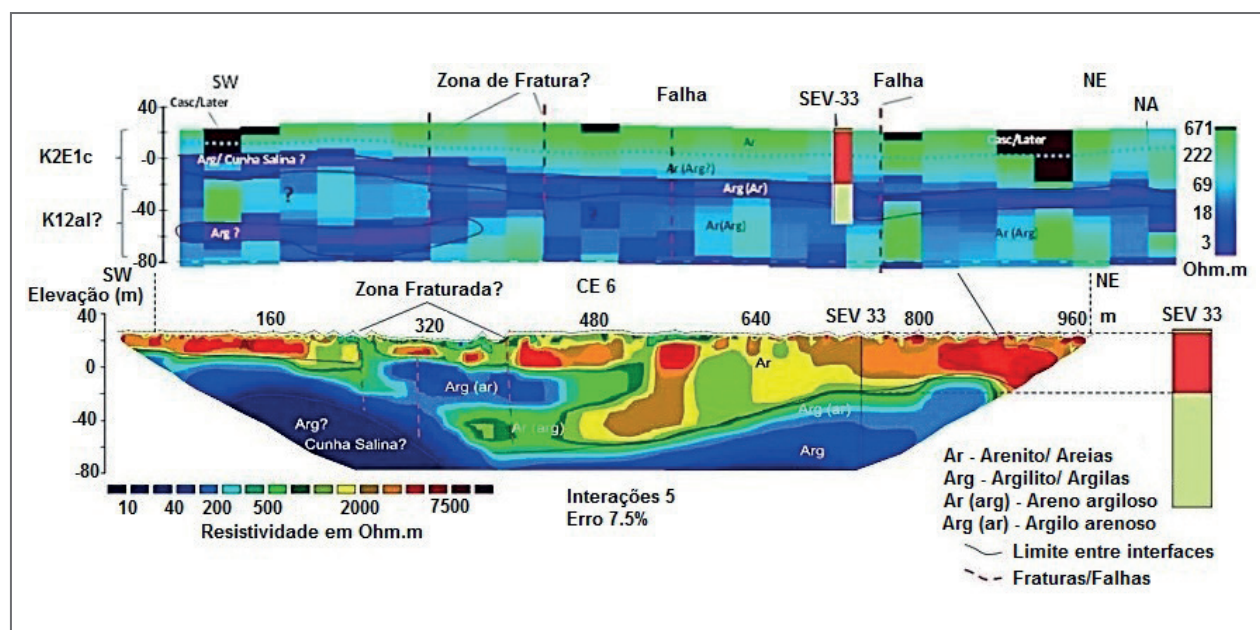


Figura 38: Integração da SEV33 com os caminhamentos CE6 e CEM6. Santa Rosa a leste do Rio Tibiri

## CEM7 – SEV34

A região é uma borda de tabuleiro entre os rios Tibiri e Jeniparana. A forte estruturação controla a dissecação do tabuleiro e o recorte do litoral. Afloram rochas da Formação Cujupe nos tabuleiros e nas falésias costeiras, pontos geológicos EL32 e EL30.

Os modelos de inversão de dados da SEV34 e da seção CEM7 (Figura 39) destacam nos primeiros 40 m da superfície, as altas resistividades ( $> 500$  Ohm.m) da porção não saturada da

Formação Cujupe, Aquífero São Luís. Locais mais resistivos ( $> 6000 \text{ Ohm.m}$ ) denotam depósitos de cascalhos com fragmentos de lateritas. As fácies areníticas saturadas possuem resistividades entre  $82 \text{ Ohm.m}$  e  $300 \text{ Ohm.m}$ . O nível de água está entre  $+10 \text{ m}$  e  $0 \text{ m}$  de altitude.

A base da Formação Cujupe é interpretada no contato com a camada condutiva ( $11 \text{ Ohm.m}$  a  $34 \text{ Ohm.m}$ ) na cota  $-15 \text{ m}$ . Abaixo desta, considera-se Formação Alcântara, com seções areníticas pouco resistivas ( $34 \text{ Ohm.m}$  a  $82 \text{ Ohm.m}$ ). Uma segunda camada condutiva ocorre a  $-70 \text{ m}$ , porém está no limite de resolução do modelo EM. As interrupções das camadas geoeletricas têm correspondência com a densidade de lineamentos no local. Os valores de condutividade menores que  $10 \text{ Ohm.m}$  são indicativos de águas salobras.

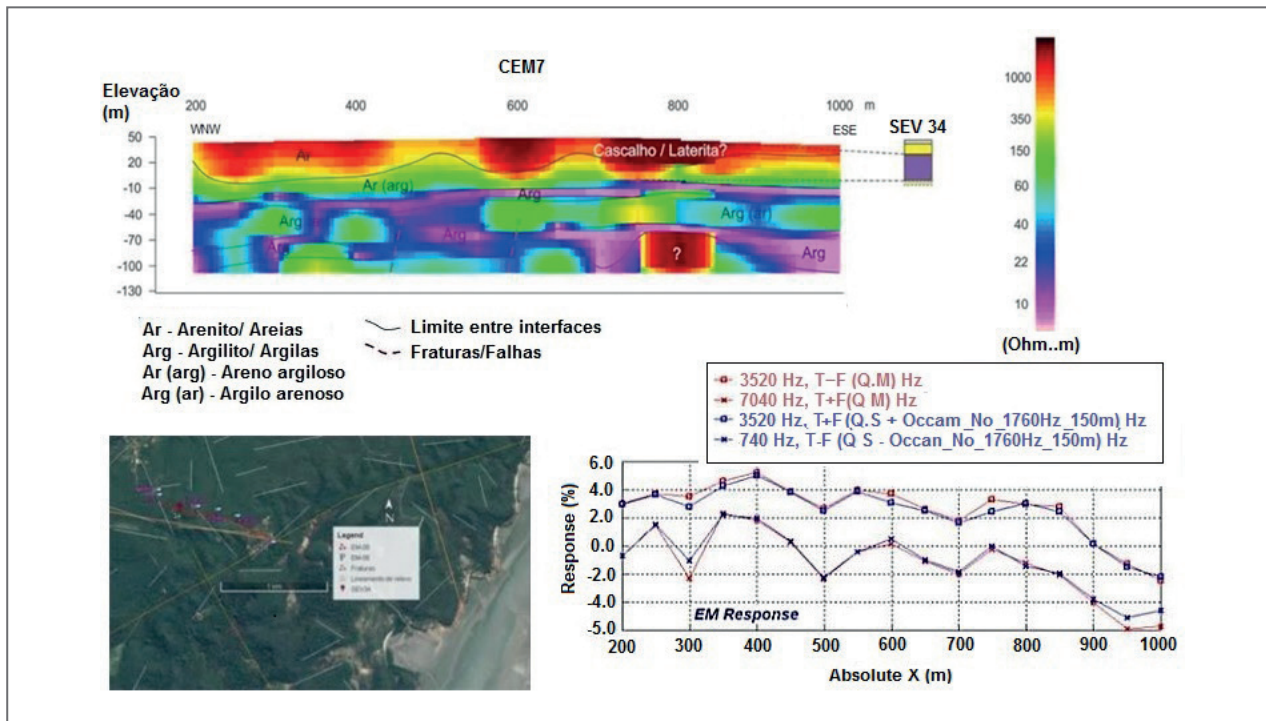


Figura 39: Integração da SEV34 e o caminhamento CEM7. Santa Rosa entre os rios Tibiri e Jeniparana

#### CEM8 – CE7 – SEV06

Os levantamentos foram realizados numa região suavemente ondulada, distante  $1000 \text{ m}$  da praia de Panaquatira. É atravessada por lineamentos predominantemente N70E relacionados a falhamentos normais (bloco baixo para SE) e N25W (bloco baixo para NE), descritos no relatório de geologia (Figura 40).

Nos primeiros  $20 \text{ m}$  da superfície predominam areias inconsolidadas (Pós-Barreiras-N34pb) e provável Formação Barreiras (ENb) com resistividade maior que  $600 \text{ Ohm.m}$ . A zona saturada encontra-se na cota  $+4 \text{ m}$ , associada a um arenito saturado (resistividade  $\sim 150 \text{ Ohm.m}$ ). Ao nível do mar ocorrem arenitos argilosos e argilitos cinza da Formação Cujupe (K2E1c), associados a baixa e moderada resistividade ( $16 \text{ Ohm.m}$  a  $150 \text{ Ohm.m}$ ). Os modelos resultantes dos três métodos geofísicos são equivalentes, indicando uma boa confiabilidade na interpretação para cotas até  $-20 \text{ m}$ .

As alternâncias faciológicas da Formação Cujupe (K2E1c), entre frações arenosas (Ar) e argilosas (Arg.), são evidenciadas pelas variações verticais das camadas geoeletricas. Domínios pouco resistivos ( $< 40 \text{ Ohm.m}$ ) abaixo de  $-30 \text{ m}$  provavelmente relacionam-se à Formação Alcântara. Obtém-se o nível de água por informação de poços e as SEV's 6 e 38.

Nas seções, há indícios de águas salobras (resistividade  $< 5 \text{ Ohm.m}$ ), interpretadas na interface entre argilitos sotopostos a arenitos nas cotas  $-10 \text{ m}$  e  $-35 \text{ m}$ . Falhas e fraturas orientadas para o mar podem facilitar a intrusão de água do mar.

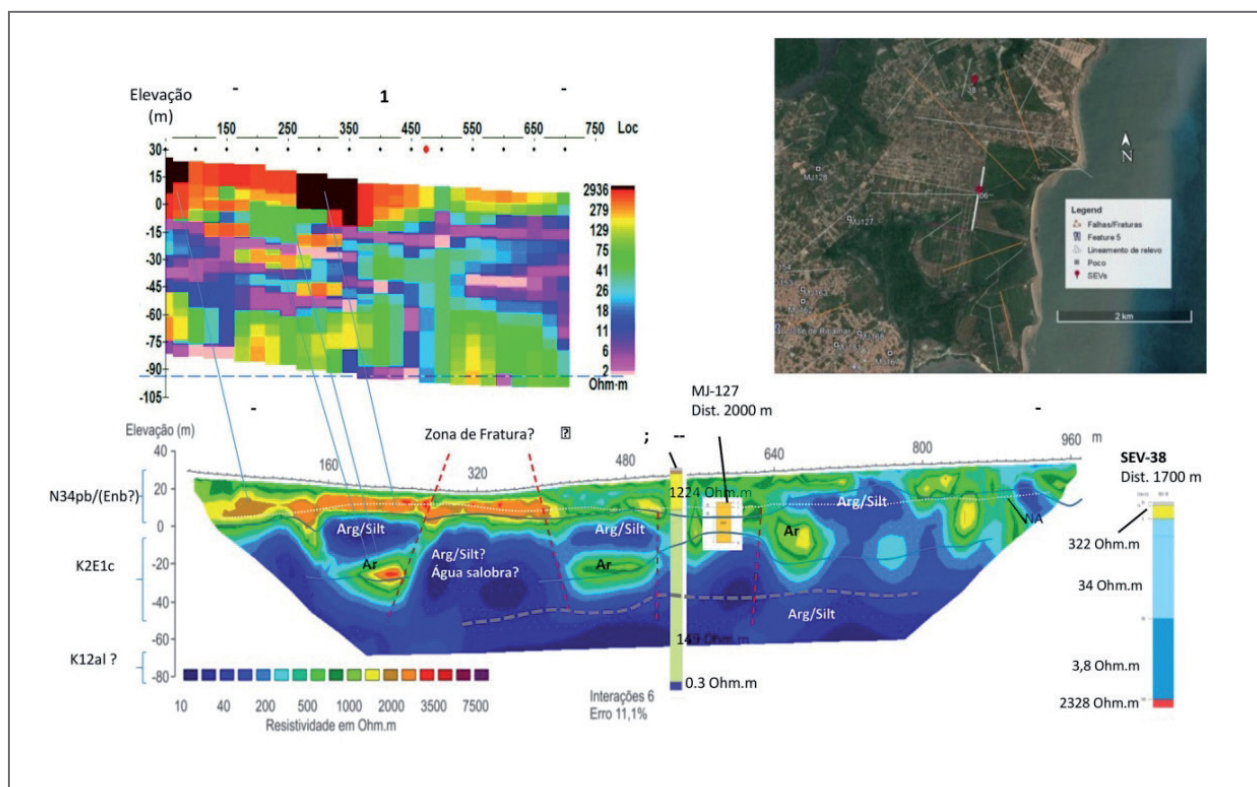


Figura 40: Integração da SEV06 com os caminhamentos CE7 e CEM8 realizados a 1 Km da Praia de Panaquatira

### CE3 – SEV02

Levantamentos realizados na Reserva Rangedor que apresenta relevo suave e altitudes entre 20 m e 30 m. Há lineamentos estruturais importantes de direções NW-SE, N-S e NE-SW e E-W (sendo que os dois últimos delineiam a linha de costa). Em direção à praia há formações arenosas praias e de dunas (Figura 41).

O CE3 mostra uma camada superior resistiva ( $> 500 \text{ Ohm.m}$ ) e com espessura de até 30 m. Essa camada não saturada corresponde a areias médias, maciças e alaranjadas da Formação Pós-Barreiras. O pacote provavelmente inclui o topo da Formação Cujupe.

Abaixo do nível do mar, a seção mostra resistividades entre 40 e 200 Ohm.m. Suas características refletem alternâncias faciológicas de pacotes saturados arenosos e argilosos da Formação Cujupe. Aproximadamente na cota  $-30 \text{ m}$ , os valores de resistividade tornam-se menores que

40 Ohm.m, podendo ser associados a argilitos saturados do topo da Fm. Alcântara. Os contatos laterais bruscos e deslocamento de camadas são indicativos de falhas Neotectônicas, visto que afetam as formações mais recentes.

A SEV02 possui um modelo de camadas semelhante a CE3 em termos de espessura, porém menos resistivo porque foi realizada no período chuvoso. A camada condutiva (6 Ohm.m) na cota -85 m pode representar um argilito.

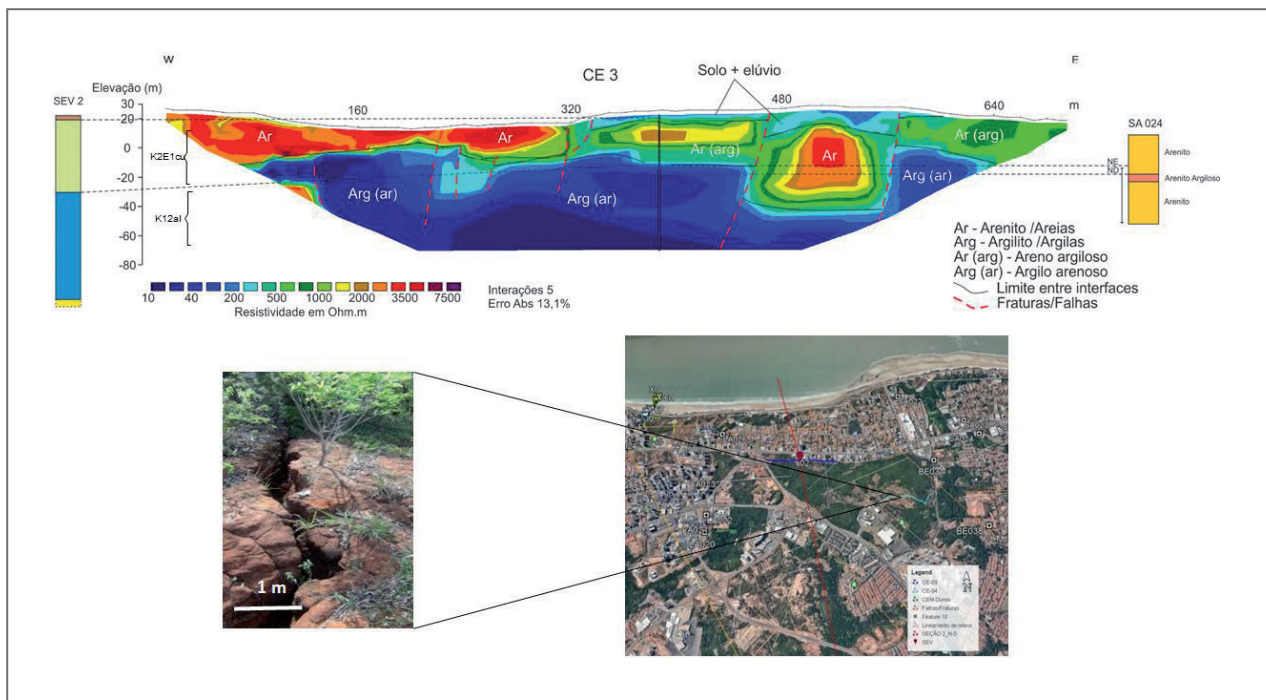


Figura 41: Integração da SEV02 com o caminhamento CE3 realizados na Reserva do Rangedor

## CE8 – SEV25 – SEV26

Levantamentos realizados no bairro Quebra-Pote, local de tabuleiros baixos e dissecados, com cotas de +37 m a +13 m e próximos a declive para planícies de manguezais. O levantamento cruza a quebra estrutural de um vale orientado para N40E e N-S. São marcantes os lineamentos N43W e ravinamentos N22W nas encostas. Na praia Jurupari foram descritos arenitos avermelhados e cinzas com matriz argilosa (Figura 42) da Formação Cujupe (K2E1c, GA-40 e GA-37).

Os perfis das SEVs mostram uma camada superior, resistiva (> 1000 Ohm.m) e espessura máxima de 30 m, afinando para o centro da seção. Esta marca a porção não saturada da Formação Cujupe e possíveis níveis lateríticos (> 3500 Ohm.m). Regolitos e alúvios no centro do vale possuem baixa resistividade (200 Ohm.m). O nível de água está inferido pela resistividade de 300 Ohm.m, um pouco acima do nível do mar.

Seções predominantemente argilosas (Arg) associam-se a valores entre 40 Ohm.m e 100 Ohm.m. Os intervalos mais resistivos (200 Ohm.m a 500 Ohm.m) entre -20 m e -40 m são interpretados como fácies mais arenosas. Considerando 30 m como a espessura média da

Formação Cujupe, o limite inferior com a Formação Alcântara (K12al) pode ser a cota -25 m. As formações apresentam falhamentos e basculamentos, denotados pelos contrastes laterais abruptos da resistividade.

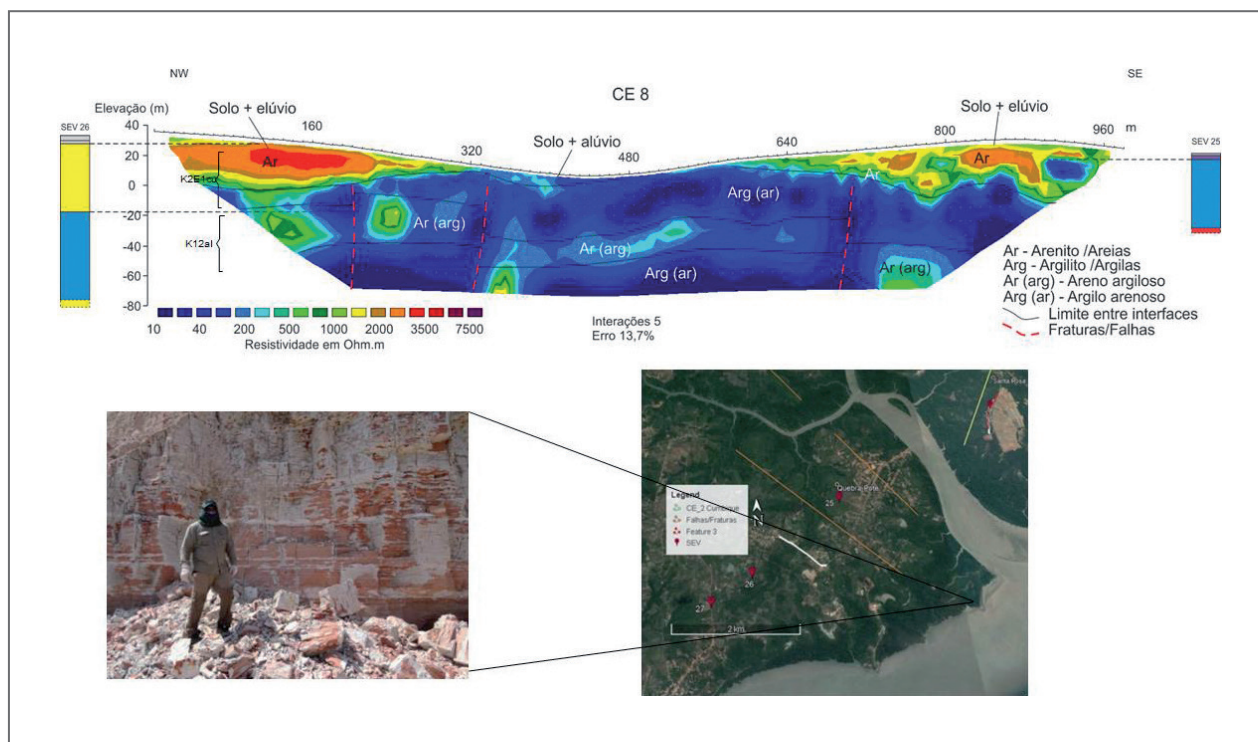


Figura 42: Integração entre a SEV25, SEV26 e o caminhamento CE8 realizados no Quebra-Pote

### CE9 – SEV21

Os levantamentos CE9 e SEV21 (Figura 43) foram realizados em São José do Ribamar, próxima ao residencial Tiriúba. O relevo é suave, com cotas variando entre 20 m e 40 m de altitude. Há lineamentos estruturais importantes de direções NE-SW, N-S e E-W, que marcam o recorte do litoral e drenagens adjacentes. A seção atravessa uma drenagem orientada E-W.

De acordo com o mapa geológico do projeto, afloram rochas do Grupo Itapecuru. A porção superior da seção apresenta resistividade maiores que 500 Ohm.m, cujas espessuras das camadas variam de 2 m até a 50 m. Essas camadas são solos arenosos e a partir da posição 640 m e representam as areias do conjunto Barreiras (ENb)/Pós-Barreiras (N34pb) e porção superior da Formação Cujupe (K2E1c).

A porção abaixo do nível do mar até a cota -80 m apresenta resistividades essencialmente mais baixas (< 200 Ohm.m). Essa característica reflete a composição mais argilosa e a presença de água nos arenitos Cujupe e possivelmente Alcântara. São evidenciadas as variações entre pacotes predominantemente arenosos (Ar) e argilosos (Arg), associados a deslocamentos por falhas.

Na porção basal da seção, na distância entre 400 m e 500 m, ocorre anomalia resistiva, com valores maiores que 7.500 Ohm.m, e que pode estar associada a alto do embasamento

cristalino (Suíte granítica Rosário). Com as informações da SEV21 e dos baixos valores de resistividade na seção, é provável que o contato da Formação Cujupe com a Formação Alcântara seja em torno de -25 m.

O poço MJ-110 foi utilizado para referenciar as camadas arenosas e argilosas no trecho superior da seção. As diferenças abruptas de cotas denotam falhas geológicas, sendo que uma falha normal N20W encontra-se a 1200 m a oeste.

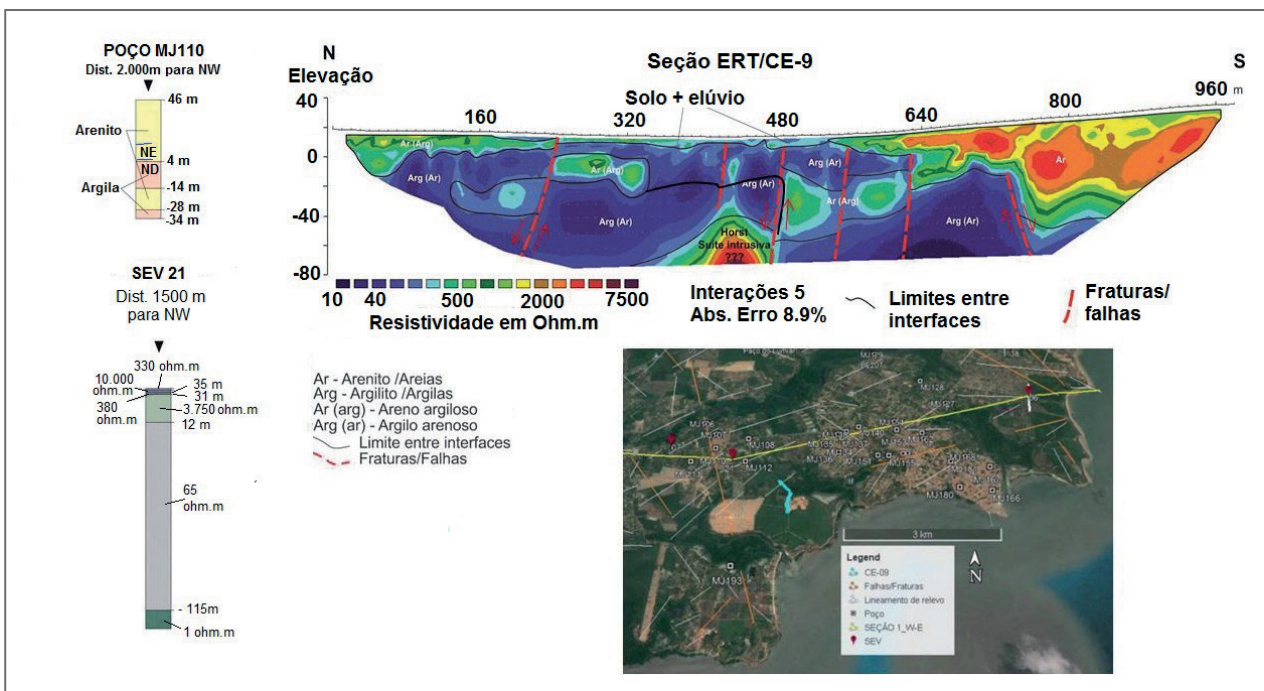


Figura 43: Integração da SEV21 com o caminhamento CE9 realizados em São José do Ribamar

### 3.5. CONCLUSÕES

Os conhecimentos adquiridos com os levantamentos geofísicos fornecem suporte aos demais temas deste projeto. As informações existentes são suficientes para caracterizar as principais formações geológicas de importância para a água subterrânea e indicar a extensão e profundidade da influência de águas salobras ou intrusões marinhas no subsolo de setores da Ilha.

As atividades de geofísica foram realizadas entre novembro de 2016 e julho de 2017, e transcorreram no período chuvoso em sua maior parte, o que dificultou o progresso dos trabalhos.

Ressalte-se que os valores de resistividade elétrica e espessuras dos modelos poderão variar entre as estações climáticas, mudanças de maré ou intervenção humana no subsolo (aterros, poluição, lixões). Os modelos e interpretações subsequentes representam uma melhor estimativa da propriedade física, dentre as possíveis, em relação às litologias e, por isso, são apresentados intervalos de resistividade e de profundidades. Em virtude do uso de GPS portátil, os posicionamentos dos modelos possuem um erro intrínseco mínimo de 5 metros na horizontal e 10 m na vertical.

Avaliando as seções geológico-geofísicas, algumas formações têm localmente espessuras superiores às descritas na literatura. A Formação Pós-Barreiras pode alcançar 25 m no centro da Ilha e a Formação Cujupe pode alcançar 50 m em diversos setores.

No Bairro Cumbique em Paço do Lumiar foi identificado um modelo de interação da cunha salina com as rochas sedimentares. (levantamentos CE1, CE2, CE6, CEM1, SEV06). As resistividades absolutas entre ER e EM variam dentro da mesma ordem de grandeza.

Nota-se a ocorrência de uma camada muito condutiva (4 a 20 Ohm.m), contínua a -5 m de profundidade, próximo aos mangues do Rio Paciência, e que se aprofunda para -40 m em direção WSW na CE1. Aproximando-se das duas margens do rio Paciência e afluente, ela é detectada em ambas as extremidades da CE2 e na parte SE da CE6. O nível afetado é melhor definido na seção CEM1, possuindo até 6 m de espessura.

Um provável aquífero inferior não é afetado (resistividade equivalente ao do aquífero superior). Construiu-se uma hipótese de que a camada condutiva seja um argilito, próximo ao nível do mar e que impeça a migração descendente da água salobra e induza o fluxo numa interface ao longo da base do aquífero São Luís por distâncias de poucos quilômetros.

A Tabela 4 resume as características geológico-geofísicas determinadas para as principais formações e condições aquíferas.

Tabela 4: Variação de resistividade elétrica nos principais litotipos da Ilha de São Luís

FORMAÇÃO GEOLÓGICA	LITOTIPO	CONDIÇÕES GEOLÓGICAS	RESISTIVIDADE (Ohm.m)
Solo agricultável: espessura < 1 m	Areia, matéria orgânica, silte e argila	Irrigação e arado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Irrigado ~ 200</li> <li>• Seco ~ 1300</li> </ul>
Lateritas colunares do Neógeno e Cascalho,	Arenito litificado, concreção ferruginosa; cascalho variegado	Espessuras ~ 2,5 m; em geral não saturadas	> 1500, por vezes 3000 a 15000
Depósitos de Dunas	Areia quartzosa média	Inconsolidadas	400 a 15000
Depósitos Litorâneos Praiais	Areias quartzosas, silte.	Inconsolidadas, subsaturadas a saturadas	Maré seca ~ 1 a 5
Areias Pleistocênicas, Pós-Barreiras	Areia quartzosa, selecionada, pouca argila	Inconsolidados; espessura até 25 m; não saturadas	400 a 10000
Grupo Barreiras (sem aquisição)	Areia c/ matriz argilosa	Analogia a areias argilosas não saturadas	≤ Areias Pós-Barreiras
Formação Cujupe	Arenito fino e argilito	Espessura de estratos 0.5 m a 6 m	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não saturado: 350 a 1500</li> <li>• Saturado: 20 a 450</li> </ul>
Formação Alcântara	Arenito fino a médio, com siltito e argilito	Em geral subaflorante ou confinado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aflorante: 400 a 1700</li> <li>• Confinado 30 a 150</li> </ul>
Grupo Itapecuru	Argilitos em geral	Espessura ~ 2 m;	Saturado em água salobra ou salgada: 1 a 15



A influência de falhas neotectônicas foi observada nos afloramentos de areias Pós-Barreiras da Praia de Panaquatira e tem correspondência com imagens de vários caminhamentos e na constituição das seções geológico-geofísicas.

Algumas SEVs detectaram a possibilidade de poluição urbana nos primeiros metros abaixo do solo. A SEV29, no Parque São Luís próximo à BR-135, possui um intervalo pouco resistivo (20 e 40 Ohm.m) entre 3 e 10 m da superfície, que pode indicar água misturada com efluentes urbanos. Na SEV08 ocorre um horizonte pouco resistivo a 9 m de profundidade do solo, sobreposto a um horizonte aparentemente não saturado. Há um lixão comunitário no local e existe a possibilidade do chorume se infiltrar até o aquífero São Luís. Por estar em alto topográfico (cota 38 m), parte da carga contaminante pode atingir o aquífero, a 57 m abaixo da superfície, na cota -20m.

Há risco de entrada de águas mais salgadas em poços distantes até 2 km do litoral ou principalmente àqueles localizados próximos a mangues. Testemunhos de proprietários em Panaquatira, Cumbique, Av. Litorânea e os modelos gerados apontam essa possibilidade quando há seção filtrante entre o nível do mar e cota -15 m. Outros levantamentos apontam para camadas muito condutivas no centro da Ilha, mas que necessitam maiores investigações e correlações com poços.

# 4 GEOMORFOLOGIA

**A GEOMORFOLOGIA É A CIÊNCIA QUE IDENTIFICA, DESCREVE, CLASSIFICA E ANALISA** as formas da superfície terrestre, buscando, para isto, compreender as relações processuais, pretéritas e atuais, da elaboração do relevo em sua morfodinâmica. A compreensão da gênese e evolução do modelado terrestre é de fundamental importância para o entendimento do ambiente natural servindo, assim, de base para estudos e planejamento do espaço geográfico.

O mapa geomorfológico exprime uma compartimentação espacial de distintos padrões de relevo que apresentam graus variáveis de declividade e de amplitude de relevo. Tais variáveis morfométricas são de grande relevância para os estudos hidrogeológicos, pois auxiliam a interpretação e correlação das áreas onde ocorre maior ou menor infiltração, devido às variações de inclinação, relacionadas às formas e geometria do modelado. De modo geral, em áreas mais declivosas com geometria convexa, o escoamento é mais acelerado, diminuindo a possibilidade de infiltração; em áreas com vertentes mais suaves e com geometria côncava, o escoamento é mais lento e gradual, incrementando a possibilidade de infiltração; em áreas com topografia plana ou aplainada, o processo de infiltração é praticamente integral, excetuando-se as áreas com impermeabilização artificial, como áreas densamente urbanizadas com emprego intenso de asfalto e concreto.

No desenvolvimento deste projeto, foi enfatizado o fato de o estudo ter sido realizado em uma metrópole que passa por um acelerado e desordenado crescimento urbano nos últimos 50 anos, que modificou bastante o uso e a ocupação do solo metropolitano. Devido a este fator crucial, ressalta-se um notável processo cumulativo de degradação ambiental decorrente da expansão urbana da metrópole de São Luís sobre a Ilha do Maranhão nas últimas décadas, com fortes implicações sobre os recursos hídricos superficiais e subterrâneos.

## 4.1. METODOLOGIA

Para a elaboração do Mapa Geomorfológico da Região Metropolitana de São Luís, foram utilizadas e interpretadas imagens RAPIDEYE, combinação das bandas 3 (R), 2 (G), 1 (B) e imagens do *World Imagery*, do *ArcMap*, que utiliza diversas fontes de imagens, dependendo da escala de observação (*Esri*, *DigitalGlobe*, *GeoEye*, *i-cubed*, *USDA*, *USGS*, *AEX*, *Getmapping*, *Aerogrid*, *IGN*, *IGP* e *swisstopo*). Foi utilizado o Modelo Digital de Elevação – MDE, do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*, para a geração do relevo sombreado e mapas de declividade, curvas de nível e hipsométrico, dentro de ambiente SIG. O programa utilizado foi o *ArcGis 10.2*.

Durante os trabalhos, foram visitados 75 pontos, e efetuada a análise da dinâmica geológico-geomorfológica e dos padrões de solos e de uso e ocupação, aplicada a uma avaliação ambiental integrada, com enfoque sobre os impactos que a expansão e consolidação da metrópole exerceram sobre os recursos hídricos da área.



A abordagem metodológica adotada para a confecção do mapa geomorfológico foi baseada no mapeamento e classificação dos Padrões de Relevo, conforme preconizado por Dantas *et al.* (2013) e baseada na metodologia de Ross (1985 e 1992), que contempla uma classificação taxonômica composta por 6 táxons. Neste trabalho foram mapeados elementos dos 3º e 4º táxons, que representam os Padrões e Formas de Relevo respectivamente (Figura 44).

O mapeamento geomorfológico, realizado em escala de apresentação de 1:50.000, consiste em um banco de dados georreferenciado que apresenta gráfica e espacialmente a compartimentação topográfica do relevo em táxons hierárquicos e diferentes parâmetros de análise geomorfológica. Deste modo, o relevo é classificado em unidades morfoestruturais, unidades morfoesculturais, unidades geomorfológicas e padrões de relevo, estes últimos, caracterizados quanto às amplitudes e declividades predominantes no padrão. Os diferentes níveis de classificações permitem analisar diferentes aspectos geomorfológicos, como a morfogênese, a morfodinâmica, a cronologia e a morfologia (morfografia e morfometria). A utilização da carta pressupõe a consulta ao documento técnico que a acompanha, denominado “Biblioteca de Padrões de Relevo”, onde são apresentados os diferentes aspectos geomorfológicos que diferenciam as unidades (DANTAS *et al.*, 2013). A referida biblioteca pode ser visualizada no seguinte link:

[http://www.cprm.gov.br/suscetibilidade/Biblioteca\\_Padros\\_Relevo\\_Suscetibilidade\\_31mar2016.pdf](http://www.cprm.gov.br/suscetibilidade/Biblioteca_Padros_Relevo_Suscetibilidade_31mar2016.pdf)

Tais cartas, disponibilizadas em escala de semidetalhe, apresentam um relevante valor intrínseco e podem ser utilizados para diversas finalidades e pelos mais diferenciados atores sociais, destacando-se universidades, centros de pesquisa e órgãos de gestão e planejamento em todas as esferas governamentais, especialmente, em âmbito municipal.

## 4.2. TAXONOMIA DO RELEVO

Para o entendimento da Geomorfologia da Ilha do Maranhão procedeu-se a uma classificação taxonômica das formas de relevo conforme pressupostos consagrados por Ross (1992) e já aplicados na área de estudo por Silva (2012).

A Ilha do Maranhão está inserida na Unidade Morfoestrutural Bacia Grajaú – São Luís. Esta unidade consiste numa Província Geológica originada pela tectônica extensional do Atlântico Equatorial durante o Aptiano (CORDANI *et al.*, 2000) e depositada ao longo do Cretáceo Inferior a Médio com a sedimentação das Formações Grajaú, Codó, Itapecuru e Ipixuna (BANDEIRA, 2013). Sobreposta a esta Bacia Sedimentar assentam-se as rochas sedimentares de idade Neógena do Grupo Barreiras e os sedimentos recentes constituídos por diversos tipos de ambientes deposicionais de idade Quaternária.

No contexto regional, a Ilha do Maranhão se insere no Golfão Maranhense, grande reentrância central do litoral do Estado do Maranhão, conforme descrito por Feitosa (2006). Essa unidade parece estar associada a uma extensa zona de subsidência tectônica controlada por falhas normais e transcorrentes de direções NNE-SSW e ENE-WSW (IBGE, 2011) que orientam a direção principal do Golfão, o alto estrutural da Ilha do Maranhão e os baixos cursos dos rios principais

convergentes (COSTA *et al.*, 1996). A Ilha do Maranhão, posicionada no meio do Golfão Maranhense representa, portanto, um alto topográfico em meio ao litoral afogado do Golfão Maranhense.

Neste contexto geológico, foram desenvolvidas duas unidades morfoesculturais: os Tabuleiros Costeiros e as Planícies Fluviomarinhas.

Os Tabuleiros Costeiros ocupam a maior parte da Ilha do Maranhão. Estes terrenos consistem de rochas sedimentares pouco litificadas, de coloração variegada e aspecto mosqueado. Constituem o pacote sedimentar do Grupo Barreiras, de idade Neógena, sobrepostas a rochas sedimentares do Grupo Itapecuru ou pelo afloramento de espessos mantos de intemperismo de arenitos muito intemperizados do Grupo Itapecuru. É representado por tabuleiros esculpidos num relevo de baixos platôs dissecados e colinas tabulares, francamente entalhados por uma rede de canais de moderada densidade de drenagem. Esta vasta superfície tabular, mais ou menos dissecada, apresenta cotas baixas que variam entre 20 e 60 metros. Numa situação diversa à observada na maior parte dos tabuleiros, os tabuleiros da Ilha do Maranhão apresentam, por vezes, uma suscetibilidade à erosão moderada a alta, devido à franca exposição dos espessos pacotes de arenitos imaturos friáveis do Grupo Itapecuru (DANTAS *et al.*, 2013).

As Planícies Fluviomarinhas, por sua vez, ocupam o litoral da Ilha do Maranhão e os fundos de vales principais do interior da Ilha. Consistem de terrenos inundáveis compostos por sedimentos inconsolidados de idade Holocênica com predomínio absoluto dos manguezais, mas com ocorrências de feixes de cordões arenosos e campos de dunas, além de algumas restritas planícies de inundação.

### 4.3. UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS

Com base na análise e reconhecimento das Unidades Morfoestruturais e Morfoesculturais, a Ilha do Maranhão foi compartimentada em 07 padrões de relevo distintos para caracterizar a Geomorfologia da Ilha do Maranhão (Tabela 5 e Figura 44).

Tabela 5: Biblioteca dos padrões de relevo mapeados na Ilha de São Luís

SÍMBOLO	TIPO DE RELEVO	DECLIVIDADE (GRAUS)	AMPLITUDE TOPOGRÁFICA
R1a	Planícies de Inundação (Várzeas)	0 a 3°	Zero
R1d1	Planícies Fluviomarinhas (mangues)	0°	Zero
R1e	Planícies Costeiras (terraçoes marinhos e cordões arenosos)	0 a 5°	2 a 20 metros
R1f	Campo de Dunas	3 a 30°	2 a 40 metros
R1h1	Depósitos Tecnogênicos (aterros sobre corpos d'�gua)	0°	Zero
R2a1	Tabuleiros	0 a 3°	20 a 50 metros
R2a2	Tabuleiros Dissecados	0 a 3°	20 a 50 metros

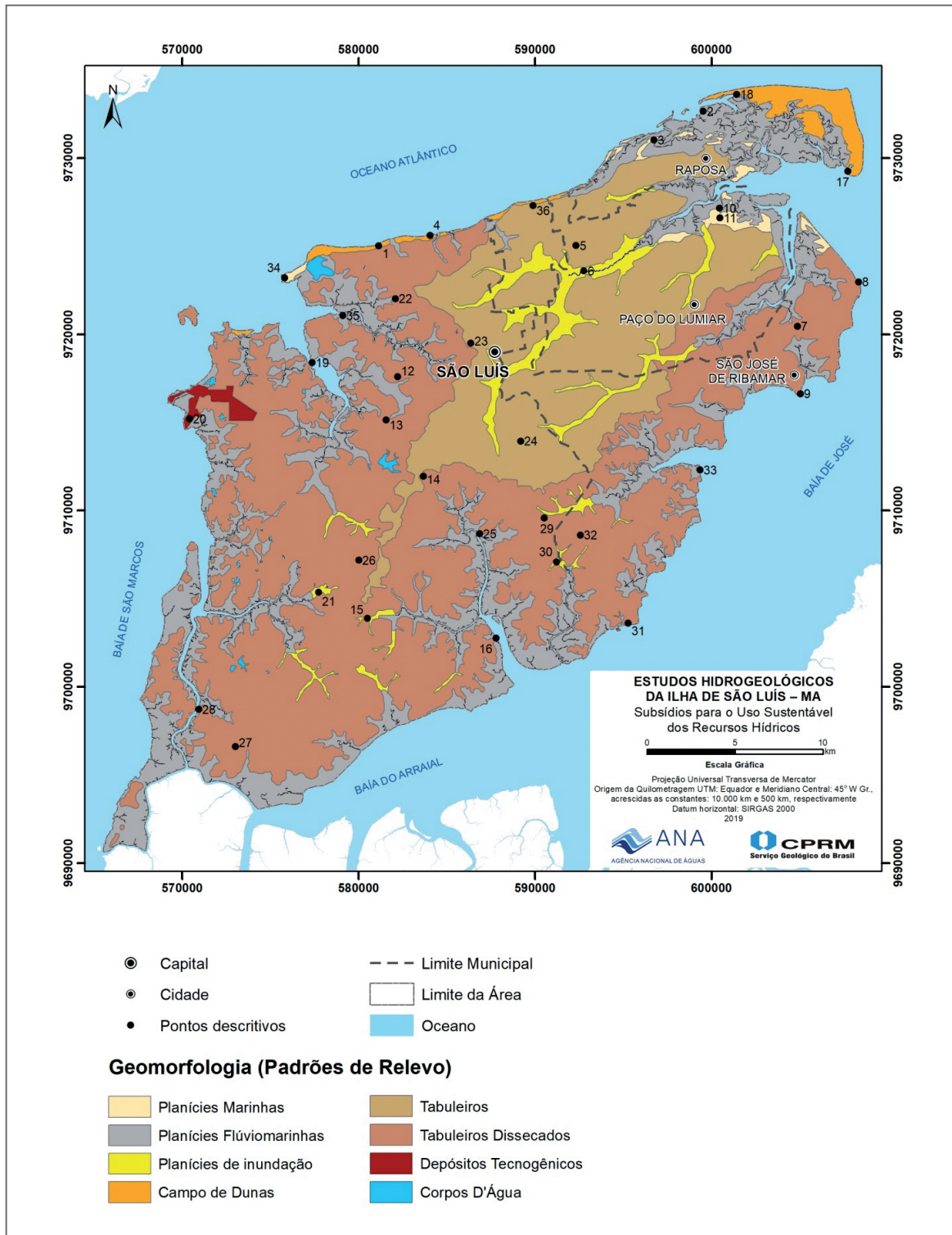


Figura 44: Mapa Geomorfológico da Ilha de São Luís

A **Unidade Morfoescultural Tabuleiros Costeiros da Ilha do Maranhão** pode ser subdividida em duas Unidades Geomorfológicas que correspondem aos padrões de relevo Tabuleiros e Tabuleiros Dissecados, ambos descritos a seguir, de forma sistemática.

#### 4.3.1. Tabuleiros

Os tabuleiros, ou tabuleiros conservados, se estendem, preferencialmente, por toda a porção leste-nordeste da Ilha do Maranhão, apresentando modestas amplitudes de relevo, entre 20 e 40 metros. São embasados, predominantemente, por rochas sedimentares pouco litificados de idade Neógena do Grupo Barreiras. Sotopostos a estegrupto afloram, frequentemente, arenitos avermelhados finos e maciços ou estratificados, oxidados e fraturados do Grupo Itapecuru. É comum a ocorrência de níveis concrecionários e ferruginosos (canga laterítica) em meio ao pacote sedimentar (Foto 30).

Estes tabuleiros apresentam topos planos e rebordos com declividade pronunciada. Tal superfície encontra-se levemente reafeiçoada por uma rede de baixa densidade de drenagem, em vertentes muito amplas e suaves. Em áreas de pontas litorâneas, junto à linha de costa, frequentemente, os tabuleiros são submetidos a processos de abrasão marinha, gerando altas falésias de grande beleza cênica, como ocorre na praia de Araçagi e na Ponta de Itapari (praia de Panaquatira - Foto 31).

O topo das superfícies tabulares conservadas na porção central da Ilha constitui a superfície cimeira de toda Ilha do Maranhão, alçadas em cotas entre 50 e 65 metros de altitude. Em certos casos, é possível delimitar uma cornija de crosta laterítica mantendo a integridade do tabuleiro frente aos processos de dissecação fluvial. Sobre tal superfície cimeira encontram-se terrenos planos com solos profundos e bem drenados, apresentando uma situação ideal para a recarga dos aquíferos intergranulares subjacentes. Consiste, portanto, em uma das regiões mais elevadas de toda a Ilha do Maranhão (Foto 32).



Foto 30: Afloramento do arenito do Grupo Itapecuru, na parte superior da foto, com nível concrecionário e ferruginoso na parte inferior.  
Praia do Calhau – São Luís



Foto 31: Falésias esculpidas sobre rochas sedimentares do Grupo Barreiras na Ponta de Itapari, São José do Ribamar

Sobre os topos dos tabuleiros é comum a ocorrência de solos bem drenados a fortemente drenados e de alta permeabilidade (Neossolos Quartzarênicos - RQ), provavelmente associados a uma fácies arenosa do Grupo Barreiras. Tais solos apresentam alta transmissividade e consistem em excelentes ambientes de recarga para os aquíferos Barreiras e Itapecuru, subjacentes (Foto 33).



Foto 32: Vista do topo dos tabuleiros conservados – Estrada Araçagi Paço do Lumiar



Foto 33: Perfil de Neossolo Quartzarênico na estrada Araçagi – Paço do Lumiar

Nos rebordos dos tabuleiros é frequente a ocorrência de Argissolos de alta suscetibilidade à erosão laminar e baixa permeabilidade no horizonte B textural. Ressalta-se ainda a ocorrência de solos com marcante descontinuidade hidráulica no seu perfil, o que acarreta num incremento do escoamento superficial e de erosão laminar em sulcos/ravinas: Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVad). A presença do horizonte adensado “fragipan” reduz significativamente a capacidade de percolação da água nesses solos, constituindo um fator limitante à recarga do Aquífero Barreiras (Foto 34).

Devido a sua topografia plana, os topos dos tabuleiros apresentam condições favoráveis, tanto para o desenvolvimento de atividades agrícolas (tal como as culturas de coco, mamão e olerícolas) quanto para a expansão da malha urbana da metrópole de São Luís, que tem ocorrido preferencialmente nessas áreas (Foto 35 e Foto 36).



Foto 34: Pequena trincheira com exposição de horizonte superficial adensado (fragipan) de Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico. Conjunto habitacional Zumbi dos Palmares – São José do Ribamar



Foto 35: Topo do tabuleiro costeiro convertido em área de plantio de coqueiro



Foto 36: Eixo viário da Avenida Guajajaras atravessando o topo dos tabuleiros conservados. Bairro Planalto Anil, São Luís

#### 4.3.2. Tabuleiros Dissecados

Os tabuleiros dissecados se estendem, preferencialmente, por toda a porção oeste e sul-sudoeste da Ilha do Maranhão, situadas em cotas baixas entre 20 e 50 metros, posicionadas abaixo dos topos dos tabuleiros cimeiros. Fundamentalmente, os tabuleiros dissecados se diferenciam do conjunto dos tabuleiros devido a uma atuação mais efetiva da erosão e da dissecação fluvial promovida por uma rede de canais de média a alta densidade de drenagem. Nesse sentido, a antiga superfície tabular é desfeita num relevo movimentado de curtos tabuleiros e colinas de topo plano escavados, por vezes, em vales incisos, ladeados por vertentes declivosas (Foto 37). Todavia, é mais comum registrar na Ilhado Maranhão, uma paisagem de tabuleiros pouco dissecados com vertentes suaves de relevo ondulado e topos aplainados.

São embasados, predominantemente, por argilitos e arenitos estratificados de idade cretácica do Grupo Itapecuru com ocorrência de níveis carbonáticos e crostas lateríticas em meio ao pacote sedimentar.



Foto 37: Aspecto ondulado do relevo de tabuleiros dissecados - Parque Estadual do Bacanga, São Luís

Os rebordos erosivos dos tabuleiros dissecados, principalmente junto ao contato com os tabuleiros cimeiros, representam áreas de maior suscetibilidade à erosão e movimentos de massa. A despeito das baixas amplitudes de relevo (inferiores a 30 metros), tais rebordos erosivos representam vertentes íngremes (com declividades que superam 20°) submetidas a um efetivo entalhamento que atinge espessos pacotes sedimentares intemperizados, bastantes friáveis e arenosos do Grupo Itapecuru. Registram-se áreas de risco de pequena monta em locais recentemente urbanizados sobre os rebordos erosivos (Foto 38).



Foto 38: Fenômeno de erosão acelerada sobre rebordo erosivo dos tabuleiros cimeiros, em área de risco geológico devido à ocupação urbana desordenada



Foto 39: Afloramento do Grupo Itapecuru com Argissolos Vermelhos distróficos no topo. Estrada entre o Porto de Itaqui e a BR – 135



Foto 40: Instalações do Porto de Itaqui em área de tabuleiros pouco dissecados

Sobre os topos dos tabuleiros dissecados é comum a ocorrência de solos profundos e bem drenados (Argissolos Vermelhos distróficos – Pvd), por vezes com alta pedregosidade, sendo estes provavelmente associados ao desmantelamento e remobilização de antigas crostas lateríticas elaboradas em meio a pacote arenítico do Grupo Itapecuru (Foto 39).

Devido à topografia movimentada e a uma eficiência do escoamento superficial conduzida por uma rede de canais de moderada a alta densidade de drenagem, os tabuleiros dissecados não consistem numa zona tão favorável à recarga dos aquíferos como ocorre sobre os tabuleiros conservados.

Devido a sua topografia movimentada e à ocorrência de solos muito pobres e, por vezes, pedregosos, os tabuleiros dissecados apresentam baixa aptidão agrícola. Entretanto, devido à construção da BR-135 e da Estrada de Ferro Carajás – São Luís, uma parte desta unidade geomorfológica experimentou uma expressiva expansão urbano-industrial da metrópole, com destaque para a implantação do complexo minero-portuário de Itaqui e o polo industrial da Alumar (Foto 40 e Foto 41).



Foto 41: Planta do Polo da ALUMAR, relevo de tabuleiros pouco dissecados. São Luís.

Fonte: [http://www.alumar.com.br/internas\\_template4.aspx?spbId=28&tbsid=2](http://www.alumar.com.br/internas_template4.aspx?spbId=28&tbsid=2)



A **Unidade Morfoescultural Planícies Fluviomarinhas** da Ilha do Maranhão reúne um conjunto de ambientes deposicionais modernos, de idade holocênica e pode ser subdividida em quatro Unidades Geomorfológicas que correspondem aos padrões de relevo: planícies fluviomarinhas (mangues); planícies marinhas (cordões litorâneos); campos de dunas e planícies de inundação (várzeas), todos descritos abaixo, de forma sistemática.

#### 4.3.3. Planícies Fluviomarinhas (Mangues)

As planícies fluviomarinhas, caracterizadas por mangues, representam planícies de maré e constituem terrenos lamosos, saturados em água, muito ricos em matéria orgânica, situados na orla estuarina da Ilha do Maranhão, às margens das Baías de São José e São Marcos. Consistem de superfícies planas, de interface com os sistemas deposicionais fluviais e marinhos, constituídas de depósitos argilo-arenosos a argilosos. São terrenos diariamente inundados e apresentam uma rede de canais, com padrão meandrante de alta sinuosidade e divagante, sob influência de refluxo de marés, com desenvolvimento de vegetação de manguezais e apicuns. Ressalta-se no ambiente de macromarés reinante na Ilha do Maranhão, a exposição diária de extensas coroas de lama durante os períodos de maré baixa (Foto 42).

O desenvolvimento mais expressivo dos manguezais ocorre em costas abrigadas ou no fundo de estuários em ambiente de baixa energia. Destacam-se, nesse contexto, os estuários do Anil e do Bacanga em zona de forte pressão urbana (Foto 43 e Foto 44).



Foto 43: Avenida Quarto Centenário, separando a planície fluviomarinha do rio Anil das comunidades mais pobres do bairro Fé em Deus



Foto 42: Vista da extensa coroa de lama aflorante durante a maré baixa, junto ao Centro Histórico de São Luís. Ao fundo à direita, o bairro de Ponta da Areia



Foto 44: Planície fluviomarinha do estuário do rio Bacanga, com adensamento urbano de baixa renda



Ressaltam-se também extensos manguezais nas orlas dos estuários dos rios Paciência, Tibiri, dos Cachorros e Geniparana, dentre os principais (Foto 45). Destacam-se ainda três importantes ocorrências de manguezais na área de estudo: a) ao longo do canal dos Mosquitos, que consiste num furo que interliga as baías de São Marcos e de São José e isola a Ilha do Maranhão do continente (Foto 46); b) ao longo do estreito de Coqueiros, que consiste num paraná, que separa a Ilha de Tauá-Mirim da Ilha do Maranhão; e c) na orla e no canal que interliga a Lagoa do Jansen ao Oceano.

A mais vasta área de ocorrência de manguezais na área de estudo situa-se no município de Raposa e abrange o extremo nordeste da ilha do Maranhão e grande parte da Ilha do Curupu, isolada por uma densa rede de canais de maré meandrantos (Foto 47).

Sobre os terrenos das planícies fluvio-marinhas, desenvolvem-se Solos Indiscriminados de Mangue. Ligeiramente acima do nível das planícies de marés, registram-se solos hidromórficos com influência fluvio-marinha (Foto 48), os Gleissolos Hápticos distróficos (GXbd).



Foto 45: Extensa planície fluvio-marinha do rio Tibiri, com vegetação de mangue de grande porte



Foto 46: Planície fluvio-marinha do canal dos Mosquitos



Foto 47: Canal de maré da planície fluvio-marinha da Ilha de Curupu



Foto 48: Gleissolos Hápticos na planície de inundação do rio Santo Antônio

Os manguezais constituem área de preservação permanente (APP) e têm enorme relevância junto a toda a zona costeira da Região Metropolitana de São Luís, assim como do Estado do Maranhão. A indiscutível importância ecológica, como berçário da vida marinha e os serviços ecossistêmicos prestados pelos manguezais denotam a importância da preservação desses ambientes. Contudo, historicamente, os manguezais vêm sofrendo impacto ambiental irreversível, principalmente, nos estuários dos rios Anil e Bacanga, via aterramento das planícies de maré, avanço de comunidades de baixa renda e, conseqüentemente, poluição hídrica indiscriminada (Foto 49 e Foto 50).

Assim sendo, o processo de degradação ambiental decorrente da expansão desordenada da malha urbana sobre as planícies fluviomarinhas ocorre devido à supressão da vegetação original e à falta de saneamento básico (lançamento indiscriminado de resíduos sólidos urbanos e efluentes domésticos) descaracterizando e poluindo o manguezal.

Junto ao centro histórico de São Luís, antigos aterros sobre mangues foram ocupados pelo mercado do Peixe, pelo mercado Central e pelo terminal de integração Praia Grande (Foto 51). Casos de degradação acelerada do manguezal também foram registrados na Lagoa da Jansen (bairro São Francisco) e na estrada que interliga a cidade de Raposa à sua praia (Foto 52 e Foto 53).



Foto 49: Aterro sobre mangue do rio Bacanga, próximo ao Mercado do Peixe, na região central de São Luís



Foto 50: Vista das margens da Lagoa da Jansen, com a presença de resquícios de vegetação de mangue, que foi aterrada para a construção da via que liga os bairros de Ponta de Areia e São Francisco, ao fundo

A urbanização dos mangues aterrados é contraindicada também devido à baixa capacidade de suporte dos terrenos, suscetíveis a recalque de construções e obras de infraestrutura. Mesmo assim, avenidas modernas (tais como trechos das Avenidas dos Franceses, dos Africanos e dos Holandeses, e a nova Avenida do Quarto Centenário) foram construídas sobre aterros de mangues.

#### 4.3.4. Planícies Marinhas (Cordões Litorâneos)

As planícies marinhas caracterizadas por feixes de cordões arenosos, consistem de superfícies sub-horizontais, formadas por depósitos arenosos, apresentando microrrelevo ondulado, geradas por processos de sedimentação marinha. Representam terrenos bem drenados e não inundáveis elaborados sobre terraços marinhos e cordões arenosos que ocorrem, de forma mais expressiva, ao longo da porção norte da Ilha do Maranhão, junto à linha de costa banhada pelo Oceano Atlântico.



O desenvolvimento mais expressivo das planícies marinhas ocorre a partir da deposição de cordões arenosos à retaguarda das praias oceânicas em ambiente de alta energia, tais como as praias da Ponta d'Areia, São Marcos, Calhau, Olho d'Água, do Meio e Araçagi (Foto 51). O ambiente de macromarés, típico do litoral subequatorial da Ilha do Maranhão expõe, durante a maré baixa, extensas zonas de estirâncio com centenas de metros, de uma areia fina a lamosa, por vezes, pontilhadas por plataformas de abrasão resultantes do arrasamento de perfis lateríticos oriundos dos Grupos Barreiras e Itapecuru.

Ressalta-se também a ocorrência de flechas de cordões arenosos e vegetação de restinga em meio aos vastos manguezais posicionados entre Araçagi, a Ilha do Curupu e o estuário do rio Paciência. Estes esparsos cordões arenosos representam paleo-linhas de costa (ou antigas praias) em um nível marinho mais alto do que o atual durante o Holoceno (Foto 52 e Foto 53).

Sobre os terrenos das planícies marinhas, desenvolvem-se solos tipicamente arenosos (Neossolos Quartzarênicos órticos - RQo) com alta permeabilidade e boa capacidade de suporte para obras de engenharia e de infraestrutura, sendo, sob a ótica da geotécnica, indicados para expansão urbana.



Foto 51: Planície marinha da praia de Ponta da Areia, bairro de ocupação urbana densa



Foto 52: Cordões arenosos de origem marinha que formam Neossolos Quartzarênicos com vegetação de restinga. Praia do Coqueiral – Raposa



Foto 53: Terraço marinho formado por antigos cordões arenosos – Ilha do Curupu



A expansão urbana da elite econômica de São Luís foi direcionada para os terrenos firmes e bem drenados das planícies marinhas. Os bairros nobres pontilhados com altos e modernos edifícios marcam a paisagem urbana dos bairros de Ponta d'Areia, São Marcos, Calhau e Olho d'Água, no município de São Luís. Entretanto, no caso da planície marinha de Araçagi, ainda esparsamente ocupada, se reforça a importante preservação da vegetação original de restinga e das dunas, típicas deste ambiente, tendo em vista que as outras restingas foram, em pouco tempo, suprimidas das praias urbanas de São Luís, mas são lugares com relevância para a preservação da biodiversidade.

#### 4.3.5. Campos de Dunas

Os campos de dunas consistem de superfícies de relevo ondulado, podendo atingir até 20 metros de altura. São constituídas de sedimentos arenoquartzosos bem selecionados, depositados por ação eólica longitudinalmente à linha de costa. Por vezes, encontram-se desprovidos de vegetação e apresentam expressiva mobilidade (dunas móveis); ora se encontram recobertos por vegetação pioneira (dunas fixas). Representam terrenos declivosos constituídos por areia solta e capeados, ou não, por vegetação pioneira de dunas. Sua ocorrência é disseminada ao longo da costa atlântica, no norte da Ilha do Maranhão, com destaque para as formações de dunas da Ilha do Curupu (Foto 54).

A remobilização eólica dos sedimentos arenosos marinhos é expressiva a ponto de que algumas formações de dunas “cavalgarem” as falésias do Grupo Barreiras, gerando campos eólicos sobre a superfície dos tabuleiros, como registrado nos bairros de São Marcos, Calhau e Olho d'Água.

Assim como os mangues, as dunas são classificadas como área de preservação permanente (APP), apresentando grande fragilidade ambiental e constituindo paisagens de grande beleza cênica ao longo das praias de São Luís. Entretanto, a expansão imobiliária recente ao longo da costa atlântica da Ilha do Maranhão tem promovido o progressivo arrasamento do



Foto 54: Campo de dunas ativas e fixas da Ilha de Curupu, município de Raposa

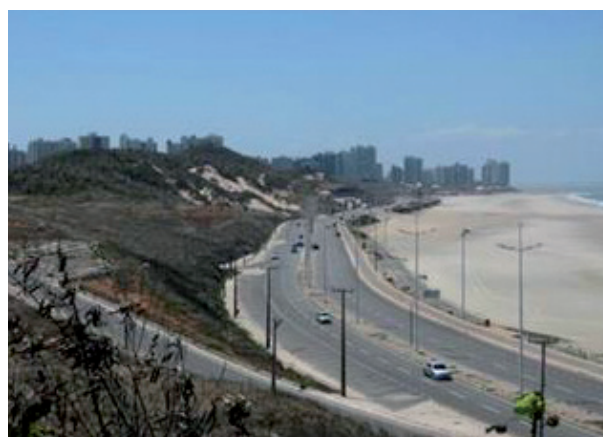


Foto 55: Vista do campo de dunas na Praia do Calhau, adjacente à Avenida Litorânea – São Luís



campo de dunas original (e a conseqüente impermeabilização dos terrenos decorrente da implantação da malha urbana), gerando degradação ambiental e podendo representar o colapso das áreas de recarga do aquífero dunar com reflexos na recarga dos aquíferos Barreiras e Itapecuru (Foto 55).

#### 4.3.6. Planícies de Inundação (Várzeas)

As planícies de inundação são caracterizadas pelas várzeas situadas em fundos de vales dos tabuleiros conservados ou dissecados no interior da Ilha do Maranhão. Consistem de superfícies sub-horizontais constituídas de depósitos arenosos ou areno-argilosos a argilosos, bem selecionados e estratificados. Estes terrenos apresentam gradientes extremamente suaves e



Foto 56: Planície de inundação do rio Paciência no seu médio curso, onde se desenvolvem solos Gleissolos Háplicos e mata secundária fragmentada

convergentes em direção aos cursos d'água principais, sendo imperfeitamente drenados e periodicamente inundáveis.

As mais expressivas planícies de inundação mapeadas na Ilha do Maranhão ocupam os médio-altos cursos dos rios da Paciência, Santo Antônio, Bacanga, Tijupá, Tibiri e dos Cachorros, dentre outros (Foto 56).

O grau de entalhamento da rede de canais sobre os tabuleiros conservados ou pouco dissecados é incipiente, gerando vertentes muito suaves e planícies de inundação mais largas em fundos de vales abertos, tal como observado nos fundos de vales dos rios Pa-

ciência e Santo Antônio. Já o grau de entalhamento sobre os tabuleiros dissecados, por sua vez, é mais eficiente, gerando fundos de vales incisivos e aprofundados. As vertentes dos vales são mais declivosas e as planícies de inundação mais restritas, tal como observado nos fundos de vales dos rios Bacanga, Tijupá, Tibiri e dos Cachorros.

Sobre as várzeas das planícies de inundação, desenvolvem-se solos hidromórficos de boa fertilidade natural, tais como os Gleissolos Háplicos (GX). Estes terrenos apresentam um bom potencial para a produção agrícola em pequenas propriedades, destinada ao abastecimento urbano. De fato, observa-se a conversão de áreas de várzea para culturas agrícolas, com destaque para horticultura em diversos rios ao longo da franja periurbana da Região Metropolitana. Entretanto, a falta de saneamento básico nos bairros periféricos da cidade de São Luís polui de tal maneira os canais fluviais, que os transformam em verdadeiras valas de esgoto comprometendo, decisivamente, a qualidade da produção hortícola e olerícola desenvolvida nas planícies de inundação. Isso acarretará perda de renda para a população local que subsiste da agricultura, além de um grave risco para a saúde pública.



#### 4.3.7. Aterros (Depósitos Tecnogênicos)

Os depósitos tecnogênicos, representados por aterros sobre o mar, são caracterizados por superfícies planas, resultantes de aterramento de antigas planícies fluviomarinhas (mangues) e de parte do espelho d'água da baía de São Marcos para o assentamento do complexo minero-portuário de Itaqui. Consiste em unidade geotécnica singular apresentando terrenos firmes e bem drenados destinados a conferir todas as condições necessárias para o empreendimento (Foto 57).

Ressalta-se, deste modo, numa radical transformação da paisagem natural materializada em forma de grandes aterros, além de desmonte e terraplenagem de encostas e tabuleiros.



Foto 57: Aterro tecnogênico para instalação do Complexo Minero-Portuário de Itaqui

# 5 SOLOS

**A INFILTRAÇÃO DA ÁGUA NO SOLO É IMPORTANTE PARA A RECARGA DOS AQUÍFEROS** e para a manutenção do fluxo de base dos rios e constitui uma ferramenta de grande importância para a gestão dos recursos hídricos, propiciando maior permanência da água na bacia hidrográfica e fornecendo uma maior disponibilidade hídrica para desenvolvimento e manutenção da sua cobertura vegetal. Muitos problemas relacionados à erosão, movimentos de massa, assoreamento e qualidade da água são afetados pela taxa de infiltração, pois quanto maior a capacidade do solo absorver a água da chuva, menor a intensidade do escoamento superficial e, por conseguinte, menor será a erosividade deste fenômeno.

O termo infiltração expressa a quantidade de água que entra no solo ou rocha. Considerando-se um solo seco submetido a taxas de precipitação maiores que de infiltração, a entrada de água no solo é máxima no início do evento chuvoso e sofre um decréscimo exponencial, até atingir uma taxa constante de entrada, chamada de velocidade de infiltração básica.

O processo pelo qual a água circula pelo solo, sem que obedeça, necessariamente, um fluxo descendente, chama-se percolação. Uma vez infiltradas, as águas começam a percolar pela zona vadosa ou de aeração, podendo atingir a zona de saturação. A percolação de água nestas zonas representa o fluxo saturado e o fluxo não saturado. A água que ultrapassa a zona radicular constitui a drenagem profunda que tem a função de recarregar os aquíferos, ou seja, nem toda a água que se infiltra vai para a recarga subterrânea profunda, conforme pode ser visto na Figura 45.

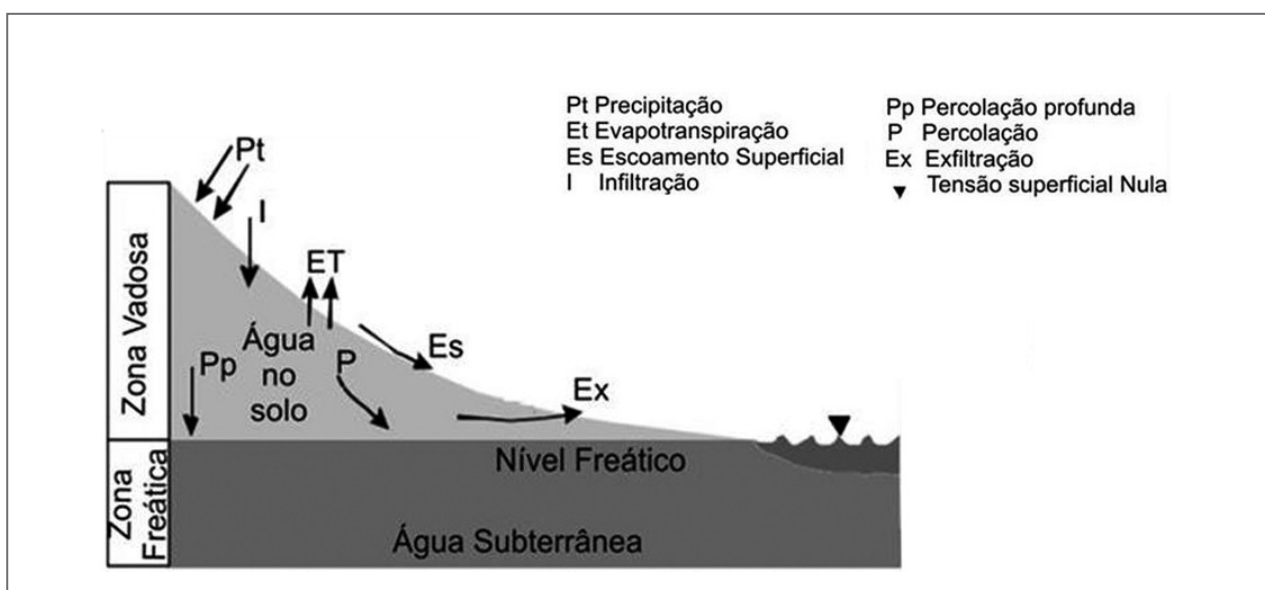


Figura 45: Ciclo hidrológico no perfil do solo (Schoenebeger; Wysocki, 2005)



## 5.1. CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS DA ILHA DE SÃO LUÍS

Nos trabalhos desenvolvidos neste tema, foram visitados 32 pontos de observação e efetuada análise da dinâmica geológico-geomorfológica e dos padrões de solos aplicada a uma avaliação ambiental integrada com enfoque nos impactos que a expansão e consolidação da metrópole exercem sobre os recursos hídricos superficiais e subterrâneos da Ilha do Maranhão. Além disso, outras informações foram geradas a partir de técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto.

O trabalho mais recente existente sobre solos na área, de autoria do NUGEO da UEMA (GAMA *et al.*, 2012), mostra um amplo domínio dos Argissolos Vermelho-Amarelos, antigos Podzólicos Vermelho-Amarelos da classificação antiga, com ou sem a ocorrência de lateritas, na parte alta. Nas áreas de baixada, foi possível identificar, além dos Solos de Mangue, os Gleissolos associados aos Neossolos Flúvicos e Neossolos Quartzarênicos hidromórficos.

Ocorrem os seguintes tipos de solo:

- Gleissolos Háplicos tb distróficos: Compreendem solos mal drenados, relacionados às áreas mais deprimidas do terreno, com deficiência de oxigênio, dando ao solo uma coloração acinzentada, chegando até azulada, quase sempre implicando em presença de ferro, principalmente devido à condição de redução. Pelo fato da proximidade do mar, é comum estarem associados a solos com excesso de sais, formando solos salinos. Tais solos possuem estruturas prismáticas, comumente colunares, com baixíssima permeabilidade.
- Neossolos Quartzarênicos órticos: Correlacionados principalmente aos tabuleiros da formação terciária do Grupo Barreiras;
- Argissolos Vermelho-Amarelos ou Vermelhos distróficos: Desenvolvidos em colinas relacionadas às formações cretáceas do Itapecuru. É bastante comum a ocorrência de lateritas associadas a esses solos.
- Solos Indiscriminados de Mangue: De ocorrência restrita às áreas de baixadas, classificados genericamente como solos Indiscriminados de mangue.

Alguns tipos de terreno, que não são considerados como solos, também foram mapeados como é o caso dos apicuns e dunas.

A Figura 46 mostra o Mapa de Solos da Ilha de São Luís e os pontos de observação visitados, enquanto que na Tabela 6 se relacionam os locais dos estudos.

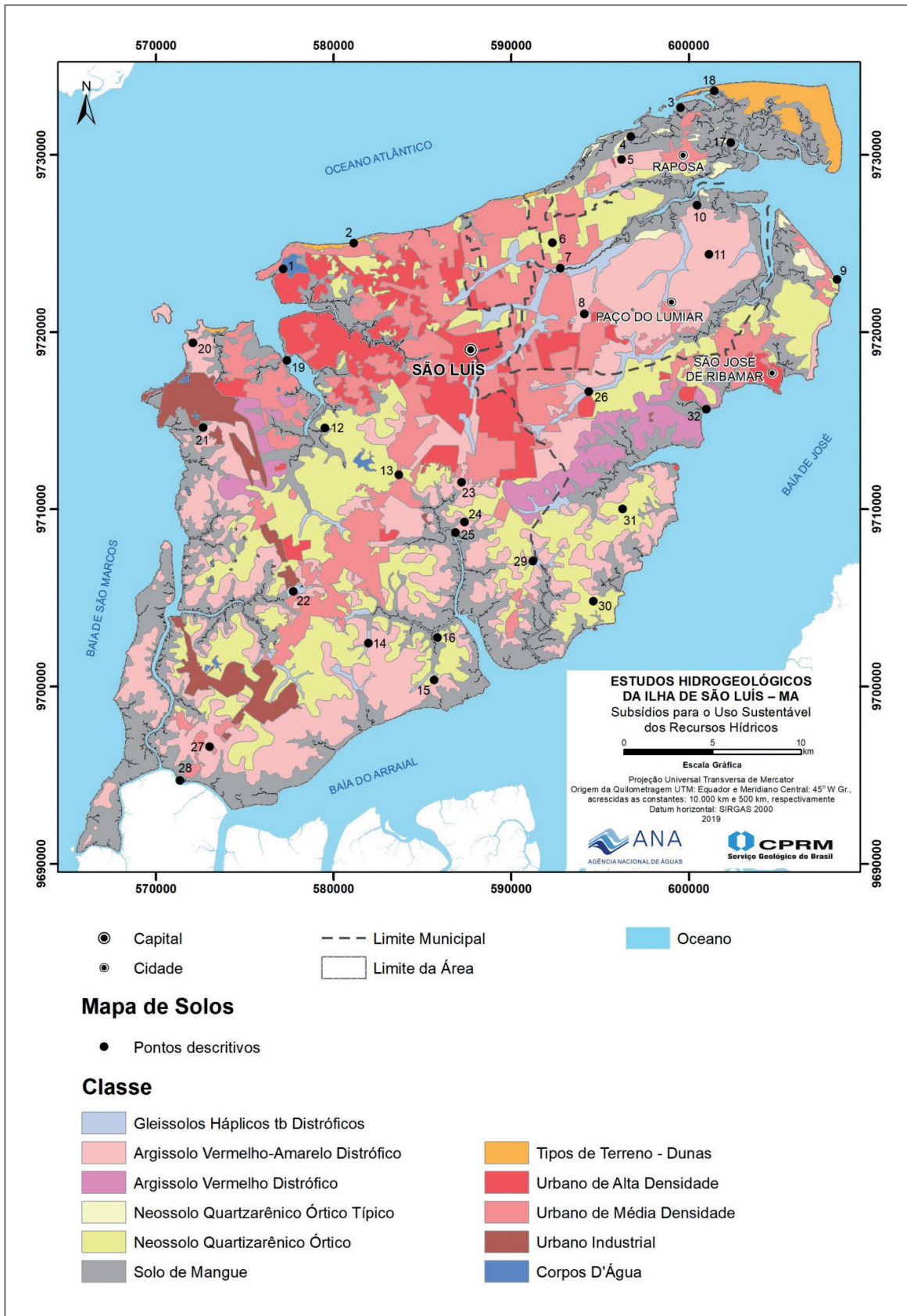


Figura 46: Mapa de Solos da Ilha de São Luís



Tabela 6: Pontos visitados no estudo de solos da Ilha de São Luís

PONTO	LATITUDE	LONGITUDE	LOCALIDADE
1	577160	9723541	Lagoa da Jansen
2	581146	9725012	Praia do Calhau
3	599552	9732637	Raposa
4	596755	9731011	Praia do Cocal
5	596216	9729716	Estrada de terra vicinal da praia do Cocal
6	592339	9725027	Estrada Araçagi – Paço do Lumiar (MA-204) - Perfil de Neossolo
7	592774	9723586	Estrada Araçagi – Paço do Lumiar (MA-204) - Planície aluvionar
8	594124	9721012	Estrada de terra vicinal do conjunto habitacional Zumbi dos Palmares
9	608361	9722958	Praia de Panaquatira
10	600472	9727133	Estuário do Rio Paciência
11	601146	9724359	Estrada de terra vicinal na localidade de Mojó
12	579525	9714585	Parque Estadual do Bacanga
13	583674	9711926	Corte de aterro margens BR-135
14	581977	9702434	Vicinal de asfalto Quebra-Pote
15	585673	9700359	Vicinal de asfalto Quebra-Pote (localidade de Tapira)
16	585870	9702754	Pequena vicinal de terra (proximidades da ponta do Arraial)
17	602385	9730680	Ilha do Curupu – Paleoduna
18	601451	9733600	Ilha do Curupu – Dunas
19	577389	9718375	Estuário do Rio Bacanga
20	572101	9719374	Terminal Ferry Boat
21	572653	9714594	Itaqui – BR135
22	577743	9705350	Planície Fluvial do Rio dos Cachorros
23	587223	9711504	Bairro Santa Bárbara
24	587395	9709268	Localidade Tajaçuaba
25	586868	9708669	Planície Fluviomarinha do rio Tibiri - Localidade de Tajaçuaba
26	594392	9716618	Planície fluvial do rio Santo Antônio - Localidade de Maioba
27	573017	9696597	Estrada dos Coqueiros - Acesso à localidade de Juçara
28	571357	9694694	BR135 - Canal do Mosquito
29	591241	9707057	Planície fluvial do rio Tijupá - Localidade de Taijipuru
30	594631	9704812	Estrada Tajaçuaba – Praia de Guarapiranga
31	596285	9710014	Estrada Tajaçuaba – Praia da Unicamping
32	601003	9715623	Canal de Maré próximo à praia de Janquara - São José do Ribamar



## 5.2. INFILTRAÇÃO, TRANSMISSÃO E RETENÇÃO DE ÁGUA NOS PRINCIPAIS SOLOS DA ILHA DE SÃO LUÍS

Foram utilizados os seguintes equipamentos: Permeâmetro de Guelph (a 20 cm e 60 cm de profundidade); Infiltrômetro de Anel e Infiltrômetro de Tensão (Mini Disk - Decagon). No total foram realizadas 12 avaliações (três ensaios de infiltração com três repetições em cada ponto – 9; mais três ensaios de permeabilidade e condutividade hidráulica insaturada – 12) em cada uma das 13 áreas selecionadas, atingindo, no total, 156 avaliações.

Os solos dos locais selecionados foram avaliados com três repetições, quanto à velocidade de infiltração básica (VIB), com a utilização de um infiltrômetro de anel (Foto 58). Para reduzir a divergência lateral do fluxo de água no solo ao redor do disco, o local de avaliação era previamente molhado, e as avaliações foram realizadas até que os valores da VIB assumissem valores constantes. Os resultados apresentados são médias aritméticas das repetições com o desvio padrão. O cilindro utilizado tinha um diâmetro de 19 cm com 20 cm de altura. Este era inserido cinco centímetros no solo e avaliação feita com carga variável entre 15 e 5 cm de altura. Nos ensaios com carga hidráulica variável, após a instalação, enchia-se o infiltrômetro com cerca de 15 cm de água. No decorrer do ensaio registaram-se as variações do nível de água com leituras manuais numa escala, em intervalos de tempo progressivos de 1 a 10 minutos. Sempre que a carga hidráulica no anel interior atingia 3 cm, o nível de água era repostado para 15 cm. Os ensaios eram concluídos após 1 hora em locais com baixa infiltração, ou em menores tempos, nos casos de valores de taxas de infiltração constantes e mais rápidas. Para reduzir a ocorrência de divergência lateral, o solo ao redor do cilindro era umedecido (BOWER, 1986), e o solo próximo da parede do cilindro, pelo lado de fora, comprimido. Desta forma permitiu-se que um razoável volume de água infiltrasse no solo antes de iniciar as avaliações em locais de alta permeabilidade.

Para avaliação da condutividade hidráulica saturada no campo (Kfs) foi utilizado um Permeâmetro de Guelph (Foto 59) em poços escavados, utilizando um trado de caneco com seis centímetros de diâmetro. A profundidade dos poços foi, na maioria dos casos, de 20 e 60 cm abaixo da superfície do solo e foram utilizadas cargas hidráulicas de 5 e 10 cm.

Nas avaliações nas áreas das falésias das Praias de Araçagy e Panaquatira, foi estimada a profundidade do local de avaliação em relação à superfície do solo, utilizando um hipsômetro *laser tech*. Esses locais, são identificados como Perfis 7 a 11 (Tabela 7).

O fluxo de água no permeâmetro de Guelph foi avaliado pelo monitoramento do nível da água no reservatório de Mariotte, que era registrado em planilhas a cada minuto até assumir uma variação constante no tempo. O tempo de avaliação variou entre 15 a 120 minutos dependendo da permeabilidade da água no solo.

Na aplicação do método se considera o solo como um meio poroso rígido, homogêneo e isotrópico eo fluxo em regime permanente. Para estimativas da (Kfs) foram utilizadas simultaneamente duas cargas hidráulicas (5 e 10 cm) ou apenas uma carga hidráulica isoladamente (5 ou 10 cm).



Foto 58: Infiltrômetro de anel (*single ring*) utilizado nas avaliações de velocidade de infiltração básica das principais classes de solos da Ilha de São Luís – Maranhão



Foto 59: Permeâmetro de Guelph utilizado nas avaliações da condutividade hidráulica saturada das principais classes de solos da Ilha de São Luís

Tabela 7: Identificação dos locais de avaliação das propriedades físico hídricas do solo na Ilha de São Luís

PERFIL	COORDENADAS GEOGRAFICAS (UTM)		LOCAL	MUNICÍPIO	CLASSE DE SOLOS E CLASSE TEXTURAL
	LAT	LONG			
1	583113	9716432	Poço da Caema - Sacavém - Piezômetro 1	São Luís	ARGISSOLO VERMELHO AMARELO textura arenosa/média
2	583481	9716888	Poço da Caema - Sacavém - Piezômetro 2	São Luís	ARGISSOLO VERMELHO AMARELO textura arenosa/média
3	589643	9718231	Poço Caema Maiobão- Piezômetro 3	São José de Ribamar	Área aterrada – presença de horizonte gleizado
4	576947	9715359	Poço da Caema - Vila Embratel - Piezômetro 4	São Luís	ARGISSOLO VERMELHO AMARELO textura arenosa/média
5	595517	9729521	Sítio Farol do Araçagi	Raposa	ARGISSOLO VERMELHO AMARELO textura arenosa/média
6	598078	9722374	Iguaíba	Paço do Lumiar	ARGISSOLO VERMELHO AMARELO textura arenosa/média
7	608405	9722770	Falésia Panaquatira – Nível de topo	São José de Ribamar	NEOSSOLO QUARTZARÊNICO – arenosa

Tabela 7: Identificação dos locais de avaliação das propriedades físico hídricas do solo na Ilha de São Luís (continuação)

PERFIL	COORDENADAS GEOGRÁFICAS (UTM)		LOCAL	MUNICÍPIO	CLASSE DE SOLOS E CLASSE TEXTURAL
	LAT	LONG			
8	608029	9720526	Falésia Panaquatira – nível intermediário	São José de Ribamar	NEOSSOLO QUARTZARÊNICO – arenosa
9	588887	9727262	Falésia Araçagi – nível de topo	São Luís	ARGISSOLO VERMELHO AMARELO textura arenosa/média
10	588878	9727192	Falésia Araçagi ~10 m da superfície	São Luís	ARGISSOLO VERMELHO AMARELO textura arenosa
11	588901	9727204	Falésia Araçagi ~30 m da superfície	São Luís	ARGISSOLO VERMELHO AMARELO textura arenosa
12	587796	9701375	Quebra Pote	São Luís	ARGISSOLO VERMELHO AMARELO textura arenosa/média
13	575572	9695543	Igaraú	São Luís	ARGISSOLO VERMELHO AMARELO textura arenosa/média

### 5.2.1. Avaliação da Retenção de Água no Solo

Embora não solicitadas diretamente nos termos de referência do projeto em estudo, foram realizadas investigações a respeito da capacidade de retenção da água nos solos da Ilha de São Luís, as quais foram consideradas importantes para a caracterização destes solos no presente estudo e representam importante contribuição ao conhecimento dos solos locais.

Foram coletadas amostras de solo em cinco pontos e em duas profundidades. As amostras de solo foram coletadas em cilindros metálicos de 100 cm<sup>3</sup> (Foto 60) inseridas por percussão, em triplicata. As avaliações da retenção de água para as amostras dos perfis de solo foram realizadas no Laboratório de Física do Solo da Embrapa Amazônia Ocidental, em Manaus.

O conteúdo volumétrico de água retido nas amostras foi determinado por pesagem, após obtido o equilíbrio nos potenciais de 0, 6 e 10 kPa em mesa de tensão; para os potenciais de 33 e 1100 e 5100 kPa, utilizou-se a câmara de Richard; para o potencial de 1500 kPa, a câmara de Richard de alta pressão com o uso de amostras deformadas em anéis com 1 cm de altura. O cálculo da porosidade total (Pt) nas amostras indeformadas foi realizado considerando a densidade de partícula (Dp) e a densidade do solo (Ds), através da equação:  $Pt = 100 \times [(Dp - Ds) / Ds]$ . Nessas mesmas amostras, a macroporosidade foi estimada subtraindo-se os valores da porosidade total do conteúdo volumétrico de água retida a 6 kPa. Detalhes metodológicos dos procedimentos de retenção de água estão descritos em Teixeira e Behring (2017).



Foto 60: Amostras de solo coletadas em cilindros metálicos de 100 cm<sup>3</sup>

Os dados experimentais da retenção de água em função foram ajustados para a equação de van Genuchten (1980), e para a equação proposta por Durner (1994), que descreve melhor solos com porosidade bimodal.

Os valores de retenção de água nas principais classes de solos da Ilha de São Luís são mostrados na Tabela 8. Os dados de retenção do horizonte *Aup* deste solo mostram valor elevado na capacidade de campo e baixo no Ponto de Murcha (PM) e, conseqüentemente, elevada água disponível – AD (Tabela 8).

Tabela 8: Análises físico-hídricas de amostras de solos de horizontes superficiais na Ilha de São Luís – Maranhão

PERFIL	PROF. cm	DENSID. mg.m <sup>-3</sup>	PM	MP	RETENÇÃO DE ÁGUA (kPa)							
					0	3,3	6	10	33	1000	1500	AD
					Umidade volumétrica (cm <sup>3</sup> )							
P03	0 – 16	1,50	43	25	0,43	0,39	0,31	0,25	0,07	0,07	0,07	0,24
	16-28	1,84	29	21	0,25	0,23	0,19	0,15	0,05	0,05	0,05	0,14
P02	0-10	1,49	43	24	0,39	0,37	0,33	0,28	0,10	0,10	0,09	0,24
	10-25	1,75	33	19	0,30	0,29	0,28	0,23	0,08	0,08	0,07	0,20
P04	0-22	1,48	43	23	0,45	0,41	0,38	0,30	0,08	0,08	0,08	0,30
	22-42	1,50	42	23	0,42	0,39	0,37	0,29	0,06	0,06	0,06	0,31
P11	~ 2900 - 30 m da superfície	1,72	34	20	0,33	0,31	0,28	0,24	0,10	0,10	0,10	0,18
	3000 superfície	1,64	37	22	0,35	0,33	0,28	0,24	0,11	0,11	0,11	0,18
P10	~ 900 - superfície	1,49	43	29	0,36	0,33	0,28	0,21	0,07	0,06	0,06	0,22
	1000 superfície	1,48	43	30	0,36	0,33	0,29	0,19	0,04	0,04	0,04	0,25

AD = Água disponível; PM= Ponto de murcha; Mp- Macroporosidade



A baixa retenção de água no PM é devida, sobretudo, à textura franco-arenosa deste horizonte, sendo que há um aumento da água retida no PM nos horizontes subsuperficiais, em consonância com o aumento no conteúdo de argila.

A classificação dos níveis de água disponível nos solos do Brasil é mostrada na Tabela 9.

Tabela 9: Classificação dos valores de Água Disponível (AD) em solos do Brasil

CLASSIFICAÇÃO	MUITO BAIXO	BAIXO	MÉDIO	ALTO	MUITO ALTO
Água disponível (cm <sup>3</sup> )	< 0,050	≥0,050 a ≤0,075	> 0,075 a ≤ 0,100	>0,100 a b ≤0,125	>0,125

Os horizontes superficiais apresentaram textura mais grosseira (franco-arenosa e franco-argiloarenosa) que os subjacentes (argiloarenosa), característica típica de muitos solos na Ilha de São Luís. Os valores de densidade do solo são relativamente elevados nestes horizontes (Tabela 8), mas concordantes com a classe textural de areia, franco arenosa, argiloarenosa. O predomínio da fração areia conduziu à baixa retenção de água em elevados potenciais (ponto de murcha permanente – 1500 kPa) e a elevados valores de água disponível (AD) – Tabela 7. Uma maior compactação nos horizontes subjacente ao superficial reduziu a porosidade, a retenção de água e a capacidade de transmissão de água. Na Tabela 8, todos os valores de AD são muito altos, entretanto, como alguns destes solos apresentam uma elevada velocidade de transmissão de água, há riscos de deficiência hídrica em áreas com a ocorrência de veranicos. Os valores de AD ou da denominada Capacidade de Água Disponível (CAD), que consiste na multiplicação da AD por uma espessura de solo considerada (60, 100, 120 cm), é um parâmetro essencial para os planejamentos que envolvem irrigação, tendo também grande potencial para utilização em estudos ecológicos relacionados à distribuição da flora. Adicionalmente, é o principal fator do solo, em conjunto com a precipitação, utilizado nos estudos de Zoneamento de Risco Agrícola (ZAR). Apesar desta relevância, são dados muito raros e, quando existentes, estimados a partir de outros atributos, principalmente a textura do solo. Conforme já citado, a sua disponibilização se constitui em importante contribuição para a Ilha de São Luís.

### 5.2.2. Análise da Infiltração e Transmissão de Água nas Principais Classes de Solo da Ilha de São Luís

Na Tabela 10 são apresentados os resultados da Kfs determinados através do fluxo (Q) obtido com permeâmetro de Guelph com as cargas hidráulicas de 5, 10 cm separadamente e com a utilização das duas cargas combinadas para a estimativa do Kfs. Em alguns poços a determinação da Kfs com a utilização das duas cargas não foi possível pela obtenção de valores negativos. Este fato é relatado, para solos heterogêneos e com a presença de macroporos (ELRICK *et al.*, 1989). Esses autores propuseram, nestes casos, a utilização de somente uma carga de pressão nas estimativas do Kfs. Os dados apresentados na Tabela 10 e a elevada correlação entre os

valores estimados para  $K_{fs}$  utilizando a carga hidráulica de 10 cm e carga combinada, nos leva a preconizar o uso de uma única carga hidráulica (10 cm) nas estimativas da  $K_{fs}$  no campo, quando da utilização de permeâmetro de poço.

Outra alternativa para obtenção da  $K_{fs}$  a partir de duas cargas é o cálculo da média aritmética dos valores das duas cargas. A Figura 47 mostra um gráfico box plot com os dados dos diferentes locais agrupados, representando a  $K_{fs}$  média dos poços de 20 e 60 cm de profundidade agrupados. As áreas com maior comprimento das caixas (boxes) e as linhas (whiskers) indicam locais de maior variabilidade entre as profundidades. A Figura 48 mostra o box plot obtido com a utilização da carga hidráulica de 10 cm nas profundidades de 20 e 60 cm.

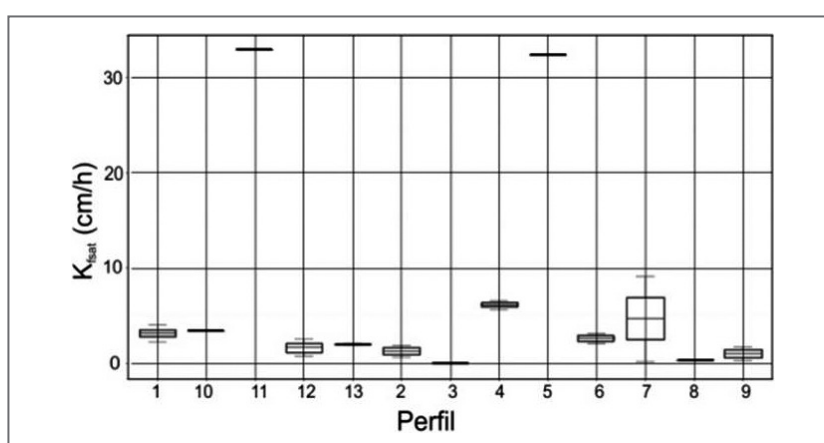


Figura 47: Estatística descritiva (box plot) dos dados da condutividade hidráulica saturada ( $K_{fs}$  – cm dia<sup>-1</sup>)

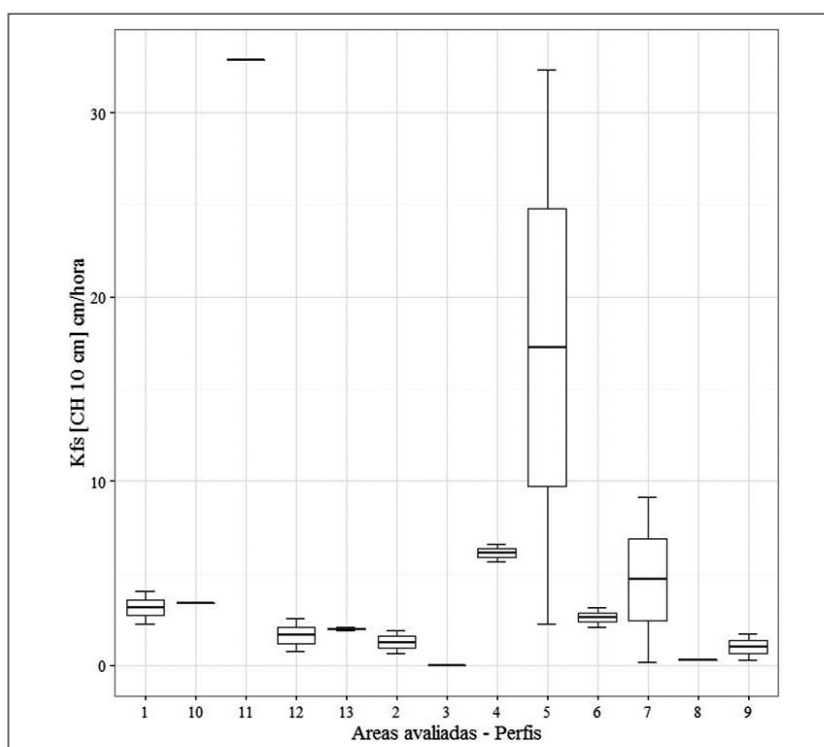


Figura 48: Estatística descritiva (box plot) dos dados da condutividade hidráulica saturada ( $K_{fs}$  – cm h<sup>-1</sup>) com carga hidráulica de 10 cm, nas profundidades de 20 e 60 cm



As avaliações nos horizontes subsuperficiais da Falésia de Araçagi (Perfil 11, Foto 61) e no Sítio Farol do Araçagi (Perfil 5) foram as que apresentaram os maiores valores de Kfs, estando no limite superior das avaliações que o permeâmetro utilizado permite avaliar. São locais com infiltração muito rápida (Tabela 10). Contrastando com estes locais temos as avaliações numa área antropizada (Perfil 3) e nos sedimentos arenosos parcialmente sedimentados da Falésia de Panaquatira (Perfil 8) que apresentaram valores muito lentos de infiltração. O perfil 5 também mostra a maior variação entre as camadas de 20 e 60 cm. As áreas dos Perfis 3,8,10 e 13 são as áreas mais homogêneas entre as duas camadas avaliadas



Foto 61: Avaliações de condutividade hidráulica saturada (kfs) e da velocidade de infiltração básica (VIB) na Falésia de Araçagi aproximadamente 10 m e 30 m da superfície

Os resultados obtidos usando o infiltrômetro de anel são geralmente superiores às estimativas obtidas com o permeâmetro de Guelph. Vários fatores condicionam a infiltração, condução e retenção água no solo. A granulometria, mineralogia e arranjos estruturais parecem ser os mais relacionados à velocidade do movimento da água, nos solos da Ilha da São Luís. A estrutura solta dos horizontes arenosos subsuperficiais da Falésia de Araçagi se contrasta com a estrutura cimentada dos horizontes subsuperficiais da Falésia de Panaquatira, apesar de ambos terem textura arenosa. Os valores de VIB apresentado na Tabela 10

podem ser utilizados no dimensionamento de projetos agrícolas de irrigação, drenagem e conservação do solo e da água, em especial, dos sistemas que usam aspersão. Como exemplo, considerem-se os resultados dos testes de infiltração realizados no local do poço da CAEMA/Maiobão e na falésia de Panaquatira. No primeiro caso, devido à urbanização da área, não ocorre qualquer infiltração, mesmo se variando a carga hidráulica e a profundidade do poço de injeção. No segundo caso, como decorrência da estrutura cimentada dos horizontes subsuperficiais, a infiltração também é muito reduzida.

Em alguns dos locais mostrados na Tabela 10, problemas operacionais não permitiram a realização dos testes em todas as profundidades e/ou com as cargas hidráulicas totais e são mostrados na tabela apenas por meio de um traço, sem valor numérico.

A elevada variabilidade da Kfs e VIB, apresentados como desvio padrão das médias na Tabela 10, se justifica pela consideração das fontes de erros na técnica e a elevada variabilidade de K em campo. Essa variação pode ser considerada normal. Outro aspecto questionado no uso do permeâmetro de Guelph é o parâmetro alpha que é estimado baseado numa classificação estrutural do solo. A maioria dos solos apresenta uma estimativa de alpha de 0,12, entretanto um erro em uma categoria introduz um erro de pequena magnitude, o que é geralmente aceitável para aplicações de estudos de campo (ELRICK *et al.*, 1989).

Tabela 10: Condutividade hidráulica saturada no campo (Kfs) avaliada com Permeâmetro de Guelph em diferentes profundidades e Velocidade de Infiltração Básica (VIB) na superfície avaliado com Infiltrômetro de Anel em diferentes solos

PERFIL	COORDENADAS GEOGRÁFICAS		LOCAL	MUNICÍPIO	CLASSE DE SOLO	CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA NO CAMPO (Kfs – cm.hora <sup>-1</sup> )										VIB (na superfície)
						PROFUNDIDADE DO POÇO (cm)										
	----- 20 -----					----- 60 -----										
	CARGA HIDRÁULICA (cm)															
LAT	LONG	UTM	5	10	[5 e 10]	5	10	[5 e 10]	5	10	[5 e 10]					
1	583113	9716432	Poço da Caema – Sacavém – Piezômetro 1	São Luís	ARGISSOLO VERMELHO AMARELO textura arenosa/média	2,1760 ± 0,7076	4,0220 ± 1,0185	9,3600 ± 3,3584	1,8940 ± 0,5386	2,2660 ± 0,3811	3,3400 ± 1,1066	68,67 ± 49,65				
2	583481	9716888	Poço da Caema – Sacavém - Piezômetro 2	São Luís	ARGISSOLO VERMELHO AMARELO textura arenosa/média	0,7200 ± 0,0000	0,6300 ± 0,0000	0,3600 ± 0,0000	1,9200 ± 0,0000	1,8900 ± 0,0000	1,7940 ± 0,0000	2,77 ± 5,46				
3	589643	9718231	Poço Caema Maiobão – Piezômetro 3	São José de Ribamar	Área aterrada – presença de horizonte gleizado	0,000 ± 0,000	0,000 ± 0,000	0,000 ± 0,000	0,000 ± 0,000	0,000 ± 0,000	0,000 ± 0,000	8,01 ± 7,64				
4	576947	9715359	Poço da Caema Vila Embratel - Piezômetro 4	São Luís	ARGISSOLO VERMELHO AMARELO textura arenosa/média	6,7800 ± 2,6304	5,6130 ± 1,0564	6,1950 ± 1,8455*	5,0610 ± 0,06322	6,6090 ± 1,0055	11,0700 ± 2,1637	15,06 ± 2,10				
5	595517	9729521	Sítio Farol do Araçagi	Raposa	ARGISSOLO VERMELHO AMARELO textura arenosa/média	7,6000 ± 1,0224	32,3400 ± 35,4051	104,0200 ± 140,7419	1,1760 ± 0,0749	2,2240 ± 1,6089	1,7000 ± 0,8336*	99,01 ± 43,65				
6	598078	9722374	Iguaíba	Paço do Lumiar	ARGISSOLO VERMELHO AMARELO textura arenosa/média	2,9160 ± 1,7269	3,1300 ± 2,4851	3,7442 ± 5,6434	0,8020 ± 1,3017	2,0814 ± 3,3521	5,7810 ± 9,2831	42,00 ± 13,88				

continua

Tabela 10: Condutividade hidráulica saturada no campo (Kfs) avaliada com Permeômetro de Guelph em diferentes profundidades e Velocidade de Infiltração Básica (VIB) na superfície avaliado com Infiltrômetro de Anel em diferentes solos. (continuação)

PERFIL	COORDENADAS GEOGRÁFICAS		LOCAL	MUNICÍPIO	CLASSE DE SOLO	CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA NO CAMPO (Kfs – cm.hora <sup>-1</sup> )						VIB (na superfície)
						PROFUNDIDADE DO POÇO (cm)						
	LAT	LONG				CARGA HIDRÁULICA (cm)						
						5	10	[5 e 10]	5	10	[5 e 10]	
----- cm hora <sup>-1</sup> -----												
7	608405	9722770	Falésia Panaquatira – superfície	São José de Ribamar	NEOSSOLO QUARTZARÊNICO – arenosa	5,6700 ± 1,45558	9,1400 ± 3,4281	19,1800 ± 9,3843	0,1220 ± 0,0339	0,1806 ± 0,1001	0,3508 ± 0,3359	64,81 ± 20,11
8	608029	9720526	Falésia Panaquatira ~ 20 m da superfície	São José de Ribamar	NEOSSOLO QUARTZARÊNICO – arenosa	-	-	-	0,1632 ± 0,1527	0,2762 ± 0,0955	0,6030 ± 0,2856	0,00 ± 0,00
9	588887	9727262	Falésia Araçagi - superfície	São Luís	ARGISSOLO VERMELHO AMARELO textura arenosa/média	1,3680 ± 0,1697	1,6950 ± 0,4540	2,6730 ± 2,3122	0,2608 ± 0,3159	0,3056 ± 0,5097	0,2832 ± 0,4097 *	21,86 ± 7,76
10	588878	9727192	Falésia Araçagi ~ 10 m da superfície	São Luís	ARGISSOLO VERMELHO AMARELO textura arenosa	-	-	-	4,7640 ± 0,9164	3,3960 ± 0,5431	4,0800 ± 0,1967*	8,90 ± 7,79
11	588901	9727204	Falésia Araçagi ~ 30 m da superfície	São Luís	ARGISSOLO VERMELHO AMARELO textura arenosa	-	-	-	65,1200 ± 49,3784	32,9000 ± 21,0970	49,0100 ± 34,6916*	49,72 ± 11,07
12	587796	9701375	Quebra Pote	São Luís	ARGISSOLO VERMELHO AMARELO textura arenosa/média	2,4020 ± 1,6255	2,5300 ± 1,4648	2,8980 ± 1,0395	0,5284 ± 0,2811	0,7604 ± 0,3985	1,4252 ± 0,7482	12,45 ± 0,64
13	575572	9695543	Igaraú	São Luís	ARGISSOLO VERMELHO AMARELO textura arenosa/média	2,1421 ± 1,9325	2,0450 ± 1,8708	2,0936 ± 1,7680*	1,2164 ± 0,9659	1,9000 ± 0,2449	1,5582 ± 0,5190*	33,50 ± 3,01

Santos e Pereira (2013) efetuaram testes de infiltração na Subbacia do rio Maracanã (parte da Bacia do rio Bacanga), na Ilha de São Luís, utilizando o método de duplo anel, cujos resultados são mostrados na Tabela 11.

Tabela 11: Condutividade hidráulica saturada (Kfs) na sub-bacia do rio Maracanã (SANTOS & PEREIRA, 2013)

MUNICÍPIO	LOCALIDADE	LATITUDE	LONGITUDE	TIPOS DE SOLOS	Kfs – cm/h <sup>-1</sup>	CLASSIFICAÇÃO
São Luís	São Luís	587245	9719545	Urbano de Alta Densidade	3,5	Muito alta
São Luís	São Luís	587846	9716756	Gleissolos Hápicos tb Distróficos	4,20	Muito alta
São Luís	Trizidela	588915	9716461	Urbano de Alta Densidade	11,90	Muito alta
Paço Lumiar	Trizidela	591201	9718195	Urbano de Média Densidade	8,40	Muito alta
S.J. Ribamar	Mato Escuro	589879	9719343	Urbano de Média Densidade	6,30	Muito alta
São Luís	São Luís	584988	9715348	Urbano de Média Densidade	0,70	Média
São Luís	São Luís	586544	9715473	Urbano de Alta Densidade	0,70	Média
São Luís	Santa Bárbara	586034	9713096	Urbano de Alta Densidade	2,80	Alta
São Luís	Santa Bárbara	588870	9712242	Urbano de Média Densidade	9,15	Muito alta
São Luís	Santa Bárbara	588172	9713137	Urbano de Média Densidade	1,40	Média
São Luís	São Luís	588299	9714294	Urbano de Média Densidade	1,40	Média
São Luís	Distrito Industrial	581797	9708700	Urbano de Média Densidade	0,11	Baixa
São Luís	Tibirizinho	582583	9710832	Urbano de Média Densidade	0,11	Baixa
São Luís	Maracanã	582122	9709605	Urbano de Média Densidade	0,11	Baixa
São Luís	Maracujá	582133	9706966	Urbano de Média Densidade	0,35	Baixa
São Luís	Tibirizinho	583091	9711121	Neossolo Quartzarênico Órtico	0,23	Baixa
São Luís	Tibirizinho	582246	9711232	Neossolo Quartzarênico Órtico	0,64	Média
São Luís	Maracanã	581559	9709597	Urbano de Média Densidade	0,70	Média
São Luís	Maracanã	581118	9709268	Urbano de Média Densidade	1,17	Média
São Luís	Maracanã	579305	9708133	Neossolo Quartzarênico Órtico	0,11	Média
São Luís	Maracanã	579503	9709784	Neossolo Quartzarênico Órtico	0,11	Baixa
São Luís	Pedreiras	579368	9710029	Neossolo Quartzarênico Órtico	1,35	Média
São Luís	Vila Maranhão	576745	9709792	Neossolo Quartzarênico Órtico	0,71	Média
São Luís	Riacho da Alegria	576693	9711641	Neossolo Quartzarênico Órtico	3,00	Alta

Com base nos critérios estabelecidos por Reichardt (1990), para a classificação da infiltração básica (Tabela 12) ressaltam, nas suas conclusões, que “a porção sudeste e leste da sub-bacia apresentou susceptibilidade baixa à infiltração em decorrência dos severos impactos ocasionados pelo uso e ocupação sem prévio planejamento e observância das vulnerabilidades e potencialidades das características do terreno. As áreas de tabuleiros, consideradas áreas de recarga dos aquíferos Itapecuru e Barreiras, não exercem suas funções ecológicas. O intensivo uso e a ocupação ao longo da BR-316, associada às impermeabilizações e selamento do terreno são as possíveis causas”.

Continuam sua análise alertando que “na porção norte e oeste obteve-se uma permeabilidade de média a alta. Nestas áreas têm-se uma vegetação arbóreo-arbustiva e herbácea onde se encontram os ecossistemas de várzeas, destacando-se a presença das matas ciliares e dos frondosos juçarais e buritizais ainda existentes”.

Tabela 12: Classificação da infiltração básica, de acordo com Reichardt (1990)

Kfs – cm.hora <sup>-1</sup>	CLASSIFICAÇÃO
> 3,0	Muito Alta
3,0 - 1,5	Alta
1,5 - 0,50	Médio
0,50 - 0,10	Baixa
< 0,10	Muito Baixa

Na Figura 49 se mostra a localização de todos os testes de infiltração realizados, tanto pela CPRM/EMBRAPA (2017), quanto por Santos e Pereira (2013). Ressalta-se que, no caso dos dados da CPRM/EMBRAPA, os valores de Kfs utilizados são aqueles obtidos com o uso da carga hidráulica de 10 cm, pelas razões anteriormente mencionadas.

Nota-se que, nos locais onde foram realizados os testes, a infiltração ocorre de forma mais efetiva nas seguintes situações:

- 1- Na Bacia do rio Paciência, com valores de Kfs oscilando entre 1,4 e 11,9 cm/h; um valor mais elevado, oscilando entre 11,9 e 32,9, foi verificado em uma falésia na praia de Araçagi, enquanto que valores próximos de zero foram observados em uma área intensamente urbanizada localizada no Maiobão, próxima ao piezômetro 03, perfurado neste projeto;
- 2- Nas áreas planas dos topos dos tabuleiros (Sistema Aquífero São Luís/Pós-Barreiras);
- 3- Nas classes de uso e ocupação do solo das matas secundárias fragmentadas e urbano baixo;

Foram feitas interpolações (Kfs com o uso da carga hidráulica de 10 cm), utilizando o método do vizinho natural (natural neighbor) cujos resultados ressaltam a tendência da ocorrência de maior infiltração nos solos dos topos dos tabuleiros da Ilha de São Luís (Figura 50).

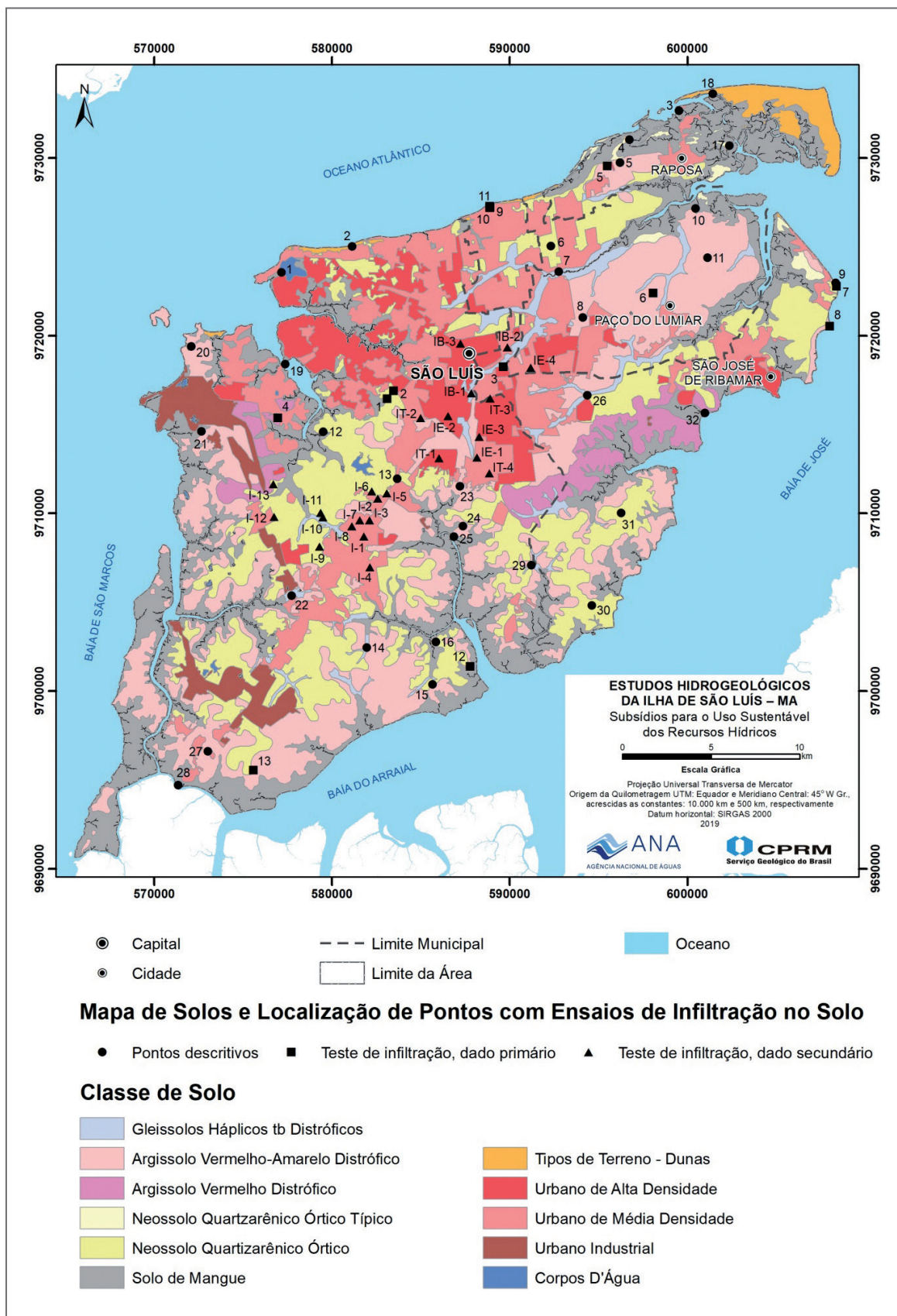


Figura 49: Localização dos testes de infiltração realizados

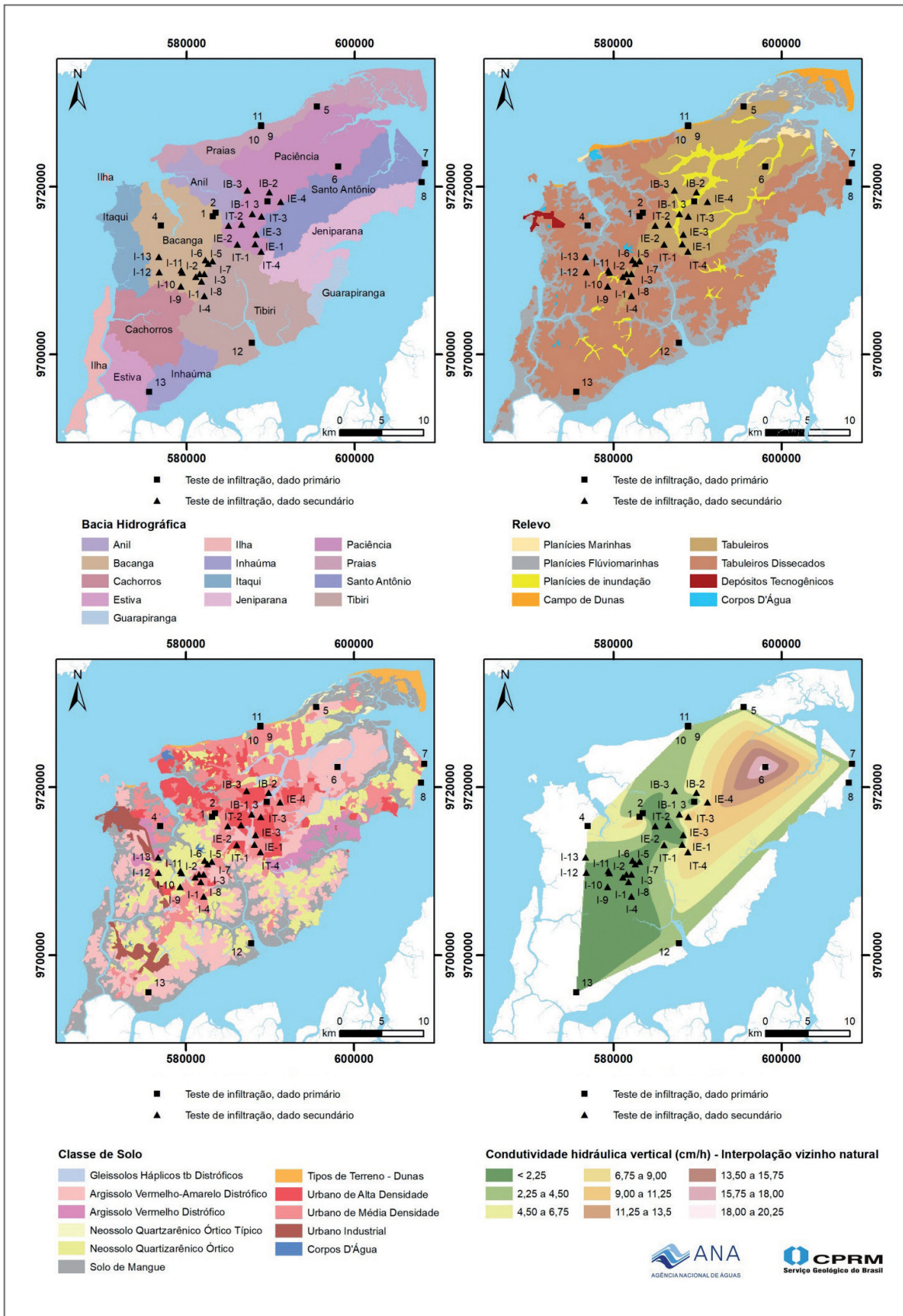


Figura 50: Capacidade de infiltração dos solos versus bacias hidrográficas, relevo, uso e ocupação da terra; interpolação pelo método do vizinho próximo (natural)

# 6

## USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

O MAPA DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO DA ILHA DE SÃO LUÍS foi elaborado com base no Mapa de Uso do Solo da Ilha do Maranhão (UEMA, 2016), com algumas modificações no que tange às classes de uso e ocupação do referido mapa.

As mudanças ocorreram nas áreas urbanizadas, que no mapa da UEMA eram representadas por três classes (urbano denso, esparso e industrial) e neste documento se propõe a inclusão de mais uma, totalizando quatro classes de uso e ocupação (urbano de alta, média e baixa densidade, além do industrial). Nas áreas com cobertura vegetal, que continham cinco classes (mangue, apicum, restinga, mata secundária e mata secundária fragmentada), foi acrescentada a classe relativa às culturas agrícolas. A classe apicum foi suprimida, em função da sua ínfima representatividade areal.

Sendo assim, foram definidas onze classes de uso e ocupação do solo, representadas por áreas de mangue, restinga, mata secundária, mata secundária fragmentada, culturas agrícolas, solo exposto, urbano de alta, média e baixa densidade, urbano industrial e corpos d'água, descritas a seguir.

O mapa final de Uso e Ocupação do Solo pode ser visto na Figura 51.

### 6.1. MANGUES

O mangue é um ecossistema cuja vegetação está assentada em terrenos lamosos, saturados em água salobra e muito ricos em matéria orgânica, resultantes da interface entre os ambientes terrestre e marinho, típicos de regiões tropicais e subtropicais. Em decorrência da alta salinidade dos solos desse ecossistema, predominam espécies halófitas, na maioria arbóreo-arbustivas. No estado do Maranhão ele ocupa parte significativa da zona costeira, notadamente nas Reentrâncias Maranhenses, onde está localizado o Golfão Maranhense, composto pelas baías de São Marcos e São José e entre elas a Ilha do Maranhão ou Ilha de São Luís. A vegetação de mangue contorna praticamente toda a Ilha do Maranhão e adentra os cursos dos seus rios. Apesar de ser um ecossistema protegido por lei, face à ocupação, na referida ilha a degradação desse ambiente é visível em várias localidades. Ocupam uma área de 194,30 Km<sup>2</sup>, que representa 21,53% da Ilha.

### 6.2. RESTINGAS

A vegetação de restinga está associada a diversos tipos de depósitos sedimentares litorâneos paralelos à linha de costa, a exemplo de praias, cordões arenosos e campos de dunas, assim como nos estuários dos rios. Desempenha importante função ambiental de fixação de dunas e estabilização de manguezais. Na Ilha do Maranhão essa vegetação conta predominantemente



com espécies herbáceas e arbustivas, concentradas principalmente na Ilha do Curupu, município de Raposa; mas também com presença ao longo das praias do litoral norte: Calhau e Araçagy, no município de São Luís e Mangue Seco, no município de Raposa. Engloba uma área de 15,61 Km<sup>2</sup>, que corresponde a 1,73% da superfície da Ilha.

### 6.3. MATAS SECUNDÁRIAS

As matas secundárias resultam da degradação das matas ou florestas primárias pela ação antrópica, através do corte para extração de madeira, queimadas para posterior uso do solo na agricultura e/ou pecuária, etc. Tem como característica um maior espaçamento das espécies vegetais, notadamente as de maior porte, do que nas matas primárias. Nas áreas tropicais, isso ocorre devido ao empobrecimento dos solos após a retirada, mesmo que parcial, da vegetação primária, que não consegue mais se regenerar integralmente. A Ilha do Maranhão, cuja ocupação se iniciou no período colonial (século XVII), teve ao longo do tempo a sua vegetação primária, originalmente classificada como Floresta Ombrófila Aberta das Terras Baixas (IBGE, 2004), paulatinamente degradada. O que resta de mata nos tempos atuais, em sua forma secundária, está concentrado no sul e sudeste da Ilha, com a ocorrência de uma área significativa na porção central, em contato com a área mais urbanizada de São Luís, que corresponde ao Parque Estadual do Bacanga. Esse tipo de associação vegetal ocupa uma extensão total de 120,26 Km<sup>2</sup>, que equivale a 13,32 % do território metropolitano.

### 6.4. MATA SECUNDÁRIA FRAGMENTADA

Os fragmentos de mata secundária são resultantes da divisão em manchas, ou fragmentos menores, da vegetação secundária acima referida. Na Ilha do Maranhão esse processo se intensificou com a urbanização acelerada das últimas décadas, que resultou em inúmeras manchas interdigitadas na área urbana. Esses fragmentos contêm uma vegetação ainda mais esparsa que os da mata secundária, com uma tendência de supressão total devido à pressão da expansão da área urbana. A soma desses fragmentos de vegetação secundária totaliza 195,71 Km<sup>2</sup>, que perfazem 21,7% da área.

### 6.5. CULTURAS AGRÍCOLAS

As culturas agrícolas na Ilha do Maranhão são pequenas parcelas com cultivos de subsistência, como mandioca, vinagreira, pequenos pomares e hortaliças. Na porção norte, município de Paço do Lumiar, existe algumas áreas com uma incipiente plantação de coqueiros para exploração comercial. Estas culturas indiferenciadas, no mapa, representam apenas 3,48% do território da Ilha, com uma área de 31,34 km<sup>2</sup>.

### 6.6. SOLO EXPOSTO

As áreas de solo exposto na Ilha do Maranhão estão, em geral, associadas à retirada da cobertura vegetal para implantação de culturas agrícolas, terraplenagem em área industrial e urbana,



loteamentos e mineração. Muitas dessas áreas não tiveram a continuidade da ocupação prevista e foram aparentemente abandonadas. Nas áreas de mineração, várias se encontram sem a devida recuperação que deveria ser feita após o término da exploração. Os solos expostos favorecem a incidência de processos erosivos, que carregam o material particulado para os cursos d'água. As manchas de solos expostos mapeadas ocupam uma área de 7,85 Km<sup>2</sup>, que equivale a 0,88% da Ilha.

### **6.7. URBANO DE ALTA DENSIDADE**

As áreas urbanas de alta densidade correspondem às nucleações mais adensadas, onde o revestimento do solo, e consequente impermeabilização, representam a quase totalidade da superfície ocupada, prevalecendo o escoamento superficial das águas pluviais. São bairros com uso residencial ou misto (comércio, serviços e residências), com pouca ou nenhuma vegetação e ruas, na sua grande maioria, pavimentadas. Estão localizadas predominantemente na capital São Luís, a exemplo do Centro Histórico e bairro de São Francisco, e no centro de São José de Ribamar. Engloba uma superfície total de 72,25 Km<sup>2</sup>, que corresponde a 8,0% da Ilha.

### **6.8. URBANO DE MÉDIA DENSIDADE**

As áreas urbanas de média densidade são de ocupação mais espaçada, mais residencial, média densidade populacional, com a presença de vegetação em terrenos baldios e quintais, com menor índice de pavimentação das ruas, o que significa a presença de infiltração de parte da precipitação pluviométrica. Ocupam uma área de 156,78 Km<sup>2</sup>, que equivale a 17,37% da superfície da Ilha.

### **6.9. URBANO DE BAIXA DENSIDADE**

As áreas urbanas de baixa densidade são de ocupação incipiente, no entorno das áreas de média densidade, que representam zonas de expansão urbana, de baixa densidade populacional, com vilas e vilarejos, loteamentos em processo de ocupação, áreas mistas de residências e pequenas chácaras ou sítios. A pavimentação nessas áreas é praticamente inexistente, o que reflete num maior potencial de infiltração. Ocupam uma área de 78,77 Km<sup>2</sup>, ou 8,72% da Ilha do Maranhão.

### **6.10. URBANO INDUSTRIAL**

As áreas urbanas industriais da Ilha do Maranhão estão localizadas em dois núcleos: o primeiro na porção oeste da Ilha, em torno do Porto de Itaqui; o segundo na parte sul, polarizado pela indústria Alumar. Nessas áreas, existe o risco de contaminação dos solos e aquíferos por efluentes e rejeitos industriais. Ocupam uma extensão superficial de 26,80 Km<sup>2</sup>, que corresponde a 2,97% do território metropolitano.

### **6.11. CORPOS D'ÁGUA**

Os corpos d'água superficiais são representados por lagoas, barragens e pequenos lagos. O mais expressivo é a Lagoa da Jansen, no bairro de Ponta de Areia. Totalizam uma superfície de 2,77 Km<sup>2</sup>, que equivale a 0,30% da área da Ilha de São Luís.

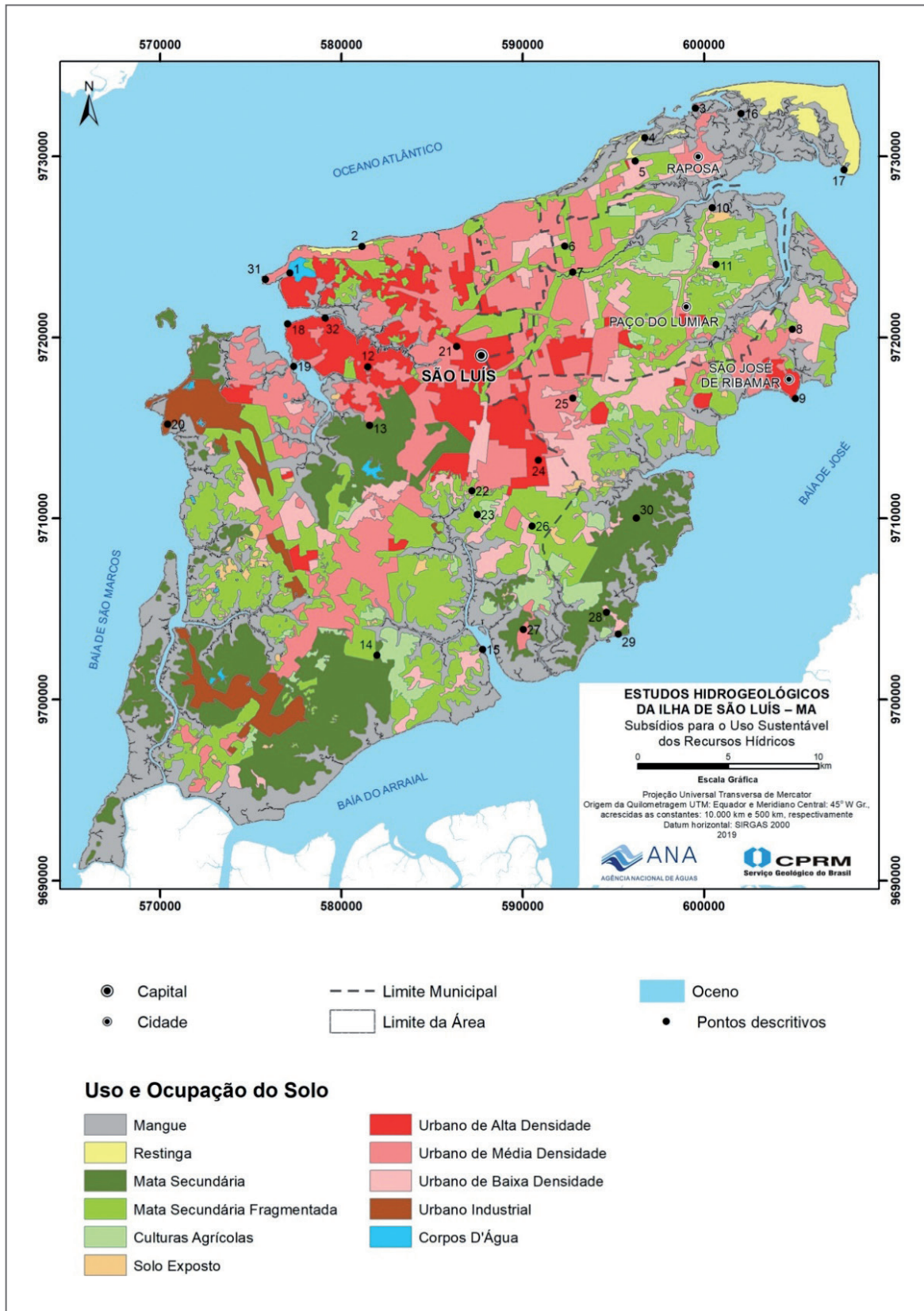


Figura 51: Uso e Ocupação do Solo na Ilha de São Luís



## 6.12. IMPLICAÇÕES DA EXPANSÃO URBANA NA DISPONIBILIDADE HÍDRICA DA ILHA DE SÃO LUÍS

A Região Metropolitana de São Luís experimentou uma vertiginosa expansão de sua malha urbana ao longo dos últimos 50 anos (BURNETT, 2011). Evidentemente, tal crescimento acelerado da metrópole vem acarretando, forçosamente, em sérios problemas de ordem socioambiental, típicos das grandes aglomerações urbanas de países periféricos ou semiperiféricos.

Historicamente, o núcleo urbano esteve confinado entre os estuários dos rios do Anil e Bacanga. A malha urbana de São Luís praticamente se resumia ao atual centro histórico desde sua fundação, em princípios do século XVII, até 1920 para atender as funções originais de forte militar e porto exportador de algodão, dentre outras matérias-primas (BURNETT, 2011). A partir de 1930, com a consolidação de uma burguesia industrial calcada na indústria têxtil, São Luís expande-se a partir de seu núcleo colonial em direção a leste ao longo de tabuleiros dissecados do interflúvio Anil-Bacanga e planícies fluviomarinhas adjacentes. Enquanto as elites se instalaram nas porções mais elevadas do interflúvio nos topos dos tabuleiros atravessadas pelas Avenidas Getúlio Vargas, Guaxenduba e João Pessoa, a população mais pobre ocupava os terrenos insalubres dos mangues constituindo bairros proletários em palafitas como os de Fé em Deus, Parque Amazonas e Salina do Sacavém. Tal expansão para leste prossegue nas décadas seguintes e, na década de 1960, galga os rebordos erosivos das nascentes do rio do Anil e alcança os tabuleiros conservados das superfícies cimeiras da porção central da Ilha do Maranhão.

Entretanto, até 1965, a malha urbana de São Luís ainda se encontrava encerrada entre os dois estuários, limitando o crescimento urbano da futura metrópole. Apenas em fins dos anos 60 foram construídas as pontes sobre os rios do Anil e Bacanga, a partir do seu centro histórico, libertando São Luís de suas “amarras estuarinas” e permitindo um extraordinário crescimento urbano nas décadas subsequentes.

Deste modo, a partir da década de 1970, observam-se três vetores distintos da expansão da metrópole, do ponto de vista socioespacial, como mostrado no mapa da expansão urbana elaborado pelo urbanista argentino Frederico Lago Burnett (Figura 52), descritos a seguir:

### **Primeiro vetor: Para além do estuário do rio Anil**

Este primeiro vetor de expansão urbana se consolida a partir da construção da ponte governador José Sarney em 1969, interligando o centro histórico ao bairro de São Francisco, rumo norte e nordeste, em direção às praias oceânicas. A partir deste vetor, a elite econômica de São Luís se desloca, a partir dos anos 1970, constituindo seu novo *locus* de moradia. Esta expansão urbana sobrepõe-se aos antigos balneários já originados nos anos 50, como a cidade-balneário Olho d'Água (BURNETT, 2011). Neste sentido, as praias oceânicas deixam de ser local de veraneio e passam a ser residência fixa.

Deste modo, consolidou-se um processo de ocupação urbana caracterizado por imponentes edifícios de alto padrão construtivo em toda a faixa litorânea voltada para o Oceano Atlântico,





Ocorre também em bairros que ocupam os tabuleiros pouco dissecados entre a bacia do rio do Anil e as praias oceânicas, tais como os bairros de Vinhais, Parque Athenas e Turu, dentre outros.

Todavia, mesmo em terrenos ocupados pela elite, observam-se sérios problemas ambientais derivados do lançamento irregular de efluentes domésticos nas praias, descaracterização dos campos de dunas e avanço da ocupação para o limite da zona de estirâncio. O problema mais grave está associado à poluição das praias, o que interfere sensivelmente na redução do potencial turístico de São Luís. Sendo assim, toda esta zona costeira consiste numa área prioritária para execução de obras de saneamento ambiental, o que atende também as camadas sociais mais privilegiadas da metrópole.

Uma situação singular associada a uma transformação radical no balanço sedimentar dessa zona costeira ocorre no bairro de Ponta d'Areia. Este bairro está assentado sobre um pontal arenoso de restinga que demarca o limite entre a Baía de São Marcos e o Oceano Atlântico. Este cordão arenoso experimenta um processo recente de verticalização por meio da construção de condomínios de prédios de alto padrão numa área de moderna valorização imobiliária, que se estende por toda a costa atlântica da Ilha do Maranhão. Nesse contexto, ressalta-se a construção de um grande espigão de 572 metros de extensão. Esta estrutura, constituída por um grande enrocamento de pedras, situa-se no extremo oeste do pontal arenoso, perpendicularmente à linha de costa e afeta, decisivamente, o trânsito de sedimentos movimentado pela corrente de deriva litorânea que apresenta uma direção geral de leste para oeste. Deste modo, registra-se um acúmulo de sedimentos que alarga a praia de Ponta D'Areia e impede que essas areias promovam o assoreamento da barra da Baía de São Marcos. Como efeito colateral, ocorre uma tendência de soterramento do próprio espigão devido à remobilização eólica das areias acumuladas na praia de Ponta D'Areia (Foto 62).

### **Segundo vetor: Para além do estuário do rio Bacanga**

Este segundo vetor de expansão urbana se consolida a partir da construção da ponte-barragem rio Bacanga em 1970, interligando o centro histórico ao bairro de Sá Viana, rumo sul e sudoeste, em direção ao terminal mineiro-portuário de Itaqui (Foto 63). Este vetor promoveu a conexão da cidade com os novos polos industriais e a cadeia extrativa e de beneficiamento mineral consolidados na década de 1980, com a implantação do porto de Itaqui e da usina de Alumar.



Foto 62: Aspecto do espigão de Ponta da Areia. Imensa estrutura perpendicular à linha de costa que interfere na dinâmica sedimentar costeira

Evidentemente, tais complexos extrativo-industriais voltados para exportação são grandes consumidores de água, o que pressiona, decisivamente, por uma competição pelo uso da



água disponível com uma metrópole em franco e acelerado crescimento populacional. Neste sentido, a importante obra de abastecimento de água, a partir da transposição das águas do rio Itapecuru para a Ilha do Maranhão (sistema Italuís) foi inaugurada em 1982, assim como o incremento de perfuração de poços tubulares que visava atender a demanda de água crescente da metrópole. Desenha-se, portanto, um cenário de possível superexploração dos aquíferos, o que exige uma eficiente gestão da demanda e alternativas de redução da quantidade de água por estas indústrias, e/ou em projetos de reuso da água ou na busca de outras alternativas de abastecimento.

A partir do novo eixo viário representado pela Avenida dos Portugueses, que interliga Itaqui ao centro de São Luís, promove-se a consolidação de bairros de classe média-baixa e comunidades proletárias, tais como Sá Viana, Vila Embratel, Anjo da Guarda e Bonfim, além do Campus da Universidade Federal do Maranhão (UFMA).

Um fato marcante do processo de expansão urbana da metrópole é o seu caráter desordenado onde, frequentemente, a ação do Estado é deficiente, ficando preferencialmente a cargo de uma população marginalizada e sem acesso ao espaço urbano. Deste modo, verifica-se a ocorrência de sucessivos registros de invasões empreendidos pela população de baixa renda em busca de moradia próximo ao centro urbano, como observado no interior de uma unidade de conservação: o Parque Estadual do Bacanga (Foto 64). Na realidade, o processo de invasão se manifesta em toda a franja periurbana da Região Metropolitana de São Luís.

O conflito social decorrente da luta pelo direito à moradia e as graves implicações ambientais decorrentes da falta de infraestrutura urbana e sanitária, tornam tal questão fundiária de extrema importância para a metrópole, em especial, para a contaminação de recursos hídricos superficiais e subterrâneos.



Foto 63: Ponte-barragem sobre o rio Bacanga, que interliga o Centro Histórico de São Luís ao bairro Sá Viana



Foto 64: Construção de casas rústicas com madeira entrelaçada e taipa em loteamento clandestino no interior do Parque Estadual do Bacanga



Megaempreendimentos habitacionais como a construção de centenas de casas, como os executados pelo Programa Minha Casa Minha Vida, destinados à população de baixa renda com pequenas casas padronizadas, arruamento planejado e obras de infraestrutura básica e drenagem almejam ser uma resposta do Estado frente a essa dramática chaga social (Foto 65). Contudo, ressaltam-se os impactos ambientais de empreendimentos imobiliários desta magnitude com extensa área terraplenada, suscetível à ação de erosão por escoamento superficial e o aterramento de áreas de brejos e mangues adjacentes (Foto 66).

Com base no observado em áreas de ocupação urbana já consolidada na periferia de São Luís, outros impactos futuros advirão do término das obras e ocupação de conjuntos residenciais com a deficiência dos serviços de coleta e tratamento de lixo e esgoto. Além disso, é de fundamental importância prover a população que irá viver nessa área de serviços básicos de educação e saúde (creche, escola do ensino fundamental, posto de saúde), além de acessibilidade, lazer, arborização e segurança.

Apesar da grande relevância da implantação de programas habitacionais em larga escala, é fundamental um planejamento criterioso dessas intervenções, visto que, devido à dimensão desses empreendimentos, novos bairros são criados, habitados por milhares de pessoas e os impactos ambientais e sociais decorrentes de uma execução malsucedida podem ser muito significativos.



Foto 65: Aspecto do Conjunto Habitacional Mato Grosso II, com casas e arruamentos padronizados. Localidade de Santa Rosa, São Luís



Foto 66: Aterro de grandes dimensões soterrando a planície fluviomarinha na extremidade sul do Conjunto Habitacional Mato Grosso II

### **Terceiro vetor: Prosseguimento do eixo original da expansão urbana**

Este terceiro vetor de expansão urbana estende-se, a partir das décadas de 1970 e 1980 para leste e sudeste do bairro do Planalto Anil e do aeroporto de São Luís, inaugurado em 1942 e ampliado em 1974. Importantes eixos viários, tais como as avenidas Guajajaras e Jerônimo de Albuquerque perfazem a interligação do Planalto Anil com os bairros nobres da costa atlântica e a BR-135. Este é o mais expressivo vetor de crescimento populacional da metrópole, cujos eixos de penetração são as estradas da Maioba e Ribamar, além das avenidas Joaquim Mochel, Lourenço Vieira da Silva, José Sarney e Tancredo Neves, dentre as principais.



Nesses terrenos planos, elevados e bem drenados dos tabuleiros cimeiros, podendo atingir mais de 60 metros de altitude, foram implantados grandes loteamentos proletários com arruamento planejado (Foto 67) e se constituem nas áreas preferenciais da expansão da periferia de São Luís, justamente na porção mais central e elevada da Ilha do Maranhão.

Desta forma, a superfície cimeira da Ilha do Maranhão, onde se localizam bairros como Cidade Operária, Cidade Olímpica, Santa Clara, Jardim São Cristóvão, Jardim América, Jardim Tropical, Maiobão, dentre outros, representa o principal vetor de expansão urbana da periferia de São Luís nas últimas décadas.

Todos esses bairros periféricos apresentam infraestrutura urbana e sanitária muito precária, com ênfase na carência de coleta e tratamento de resíduos sólidos urbanos e efluentes domésticos. Ou seja, atualmente, em São Luís, uma das principais áreas de descarte irregular de lixo e despejo de esgoto *in natura* consiste, justamente, numa das principais zonas de recarga dos aquíferos sedimentares Barreiras e Itapecuru (Foto 68).

Neste sentido, o saneamento ambiental desses loteamentos proletários implantados no topo dos tabuleiros cimeiros é de crucial importância para a preservação da qualidade de água dos aquíferos Barreiras e Itapecuru. Trata-se de uma área prioritária para investimentos de infraestrutura urbana. Apesar disso, esta é uma das áreas mais pobres da metrópole e o Estado, historicamente, prioriza tais investimentos nas áreas nobres da cidade (ABREU, 1987).

O cenário de risco, acarretado pela pobreza crônica observada na região e pelo baixo nível de desenvolvimento social e educacional assume proporções dramáticas com relação à degradação ambiental e, mais especificamente, à contaminação dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos: o lançamento indiscriminado de resíduos sólidos urbanos em centenas de lixões clandestinos sobre os topos dos tabuleiros polui a pequena malha de rede de canais existentes na Ilha do Maranhão, colocando em risco a qualidade da água dos aquíferos Barreiras e Itapecuru, com possíveis reflexos no abastecimento de água de uma expressiva parte da população da Ilha de São Luís.



Foto 67: Vista dos topos planos dos tabuleiros cimeiros, palco da expansão urbana dos bairros e loteamentos periféricos de São Luís. Vila Olímpica



Foto 68: Disposição de lixo irregular em topo de tabuleiro, em via transversal a Estrada Araçagi – Paço do Lumiar

# REFERÊNCIAS

- ABREU, M.A. **A Evolução Urbana do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: IPP - Instituto Pereira Passos, 1987. 156 p.
- AGUIAR, G.A. de. Revisão geológica da bacia paleozóica do Maranhão. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 25., set. 1971, São Paulo. **Anais** [...]. São Paulo: SBG, 1971. v. 3, p. 113-122.
- ALHEIROS, M. M.; LIMA FILHO, M. **A Formação Barreiras**. Revisão geológica da faixa sedimentar costeira de Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte. Recife: UFPE/ DEGEO, 1991. p. 77-88 (Estudos Geológicos - série B, Estudos e Pesquisas, 10).
- ALHEIROS, M.M.; LIMA FILHO, M.F.; MONTEIRO, F.A.J.; OLIVEIRA FILHO, J.S. Sistemas deposicionais na Formação Barreiras no Nordeste Oriental. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35., 1988, Belém. **Anais** [...]. Belém: SBG, 1988. v. 2, p. 753-760.
- ALMEIDA, H.G. de; MARINHO, P.A. da C.; MARTINS, R.C. **Marabá, Folha SB.22-X-D**: estados do Pará, Maranhão e Tocantins. Brasília: CPRM, 1995. 144 p. il. Escala 1:250.000. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil-PLGB. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/5664>. Acesso em: 28 maio 2021.
- AMORIM, K.B.K.; ANGÉLICA, R.S. Mineralogia e geoquímica da ocorrência de palygorskita de Alcântara, bacia de S. Luís-Grajaú, Maranhão. **Cerâmica**, v. 57, p. 483-490, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132011000400017>.
- ANDRADE, G.O. **Itamaracá**: contribuição para o estudo geomorfológico da costa Pernambucana. 1955. 84 f. Monografia (Especialização em Geografia Geral) – Colégio Estadual de Pernambuco, Recife, 1955.
- ARAI, M. A grande elevação eustática do Mioceno e sua influência na origem do Grupo Barreiras. **Geologia USP: Série Científica**, v. 6, n. 2, p. 1-6, 2006. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/guspsc/article/view/27419>. Acesso em: 28 maio 2021. DOI: <https://doi.org/10.5327/S1519-874X2006000300002>.
- ARAI, M.; TRUCKENBRODT, W.; NOGUEIRA, A.C.R.; GÓES, A.M.; ROSSETTI, D.F. Novos dados sobre estratigrafia e ambiente deposicional dos sedimentos Barreiras, NE do Pará. *In*: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 4., 1994, Belém. **Boletim de Resumos Expandidos** [...]. Belém: SBG, 1994. p. 185-187.
- ARAI, M.; UESUGUI, N.; ROSSETTI, D.F.; GÓES, A.M. Considerações sobre a idade do Grupo Barreiras no Nordeste do Estado do Pará. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35., 1988. Belém, **Anais** [...] Belém: SBG, 1988. v. 2, p. 738-752.
- ARANHA, L.G.F.; LIMA, H.P.; SOUZA, J.M.P.; MAKINO, R.K. Origem e evolução das Bacias de Bragança-Viseu, São Luís e Ilha Nova. *In*: GABAGLIA, G.P.R.; MILANI, E.J. (coords.). **Origem e evolução de bacias sedimentares**. Rio de Janeiro: Petrobrás, 1990. p. 221-223.



- ARAÚJO, M.N.; FERREIRA, E.P.; CARVALHO, I.S.; CARVALHO, M.A. Análise Sedimentar e Palinológica em Afloramento da Formação Peraiá, Bacia de São Luís, Brasil. *In*: CARVALHO, I. de S.; SRIVASTAVA, N.K.; STROHSCHOEN JR., O.; LANA, C.C. **Paleontologia: Cenários de Vida**. Rio de Janeiro: Interciencia, 2007. v. 3, p. 81-92. ISBN 978-85-7193-273-9. Disponível em: [https://igeo.ufrj.br/inc/isc/1/1\\_47a.pdf](https://igeo.ufrj.br/inc/isc/1/1_47a.pdf). Acesso em: 28 maio 2021.
- ARAÚJO, V.D.; REYES-PERES, Y.A.; LIMA, R.O.; PELOSI, A.P.M.; MENEZES, L.; CÓRDOBA, V.C.; LIMA-FILHO, F.P. Fácies e Sistema Depositional da Formação Barreiras na Região da Barreira do Inferno, Litoral Oriental do Rio Grande do Norte. **Geologia USP: Série Científica**, v. 6, n. 2, p. 43-49, 2006. DOI: <https://doi.org/10.5327/S1519-874X2006000300006>.
- BANDEIRA, I.C.N. (org.) **Geodiversidade do estado do Maranhão**. Teresina: CPRM, 2013. 256 p. il. color. Programa Geologia do Brasil. Levantamento da Geodiversidade. ISBN 978-85-7499-159-7. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/14761>. Acesso em: 28 maio 2021.
- BIGARELLA, J.J.; ANDRADE, G.O. Considerações sobre a estratigrafia dos sedimentos cenozóicos em Pernambuco (Grupo Barreiras). **Arquivos do Instituto Ciências da Terra**, v. 2, p. 1-14, 1964.
- BIGARELLA, J.J. The Barreiras Group in northeastern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 47 (Suplemento), p. 365-393, 1975.
- BOUWER, H. Intake rate: Cylinder infiltrometer. *In*: KLUTE, A. (ed.). **Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods**. Madison, WI: American Society of Agronomy, 1986. p. 825-844. ISBN 978-0-8911-8811-7.
- BURNETT, F.L. Da cidade unitária à metrópole fragmentada: crítica à constituição da São Luís moderna. *In*: BURNETT, F.L. **São Luís por um Triz: Escritos Urbanos e regionais**. São Luís: Editora UEMA, 2011. p 58-77. Disponível em: <https://www.athuar.uema.br/wp-content/uploads/2017/11/L.-BURNETT-S%C3%A3o-Luis-por-um-triz-escritos-urbanos-e-regionais.pdf>. Acesso em: 02 jun. 2021.
- CAMPBELL, D.F. **Revised report on the reconnaissance geology of the Maranhão basin**. Rio de Janeiro: Conselho Nacional do Petróleo, 1949. 117 p. (Relatório Interno, 7).
- CARVALHO, I.; PEDRÃO, E. Brazilian theropods from the Equatorial Atlantic margin: behavior and environmental setting. **GAIA – Ecological Perspectives on Science and Society**, v. 15, p. 369-378, 1998. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/40661821\\_Brazilian\\_theropods\\_from\\_the\\_Equatorial\\_Atlantic\\_margin\\_behavior\\_and\\_environmental\\_setting](https://www.researchgate.net/publication/40661821_Brazilian_theropods_from_the_Equatorial_Atlantic_margin_behavior_and_environmental_setting). Acesso em: 02 jun. 2021.
- CORDANI, U.G.; SATO, K.; TEIXEIRA, W.; TASSINARI, C.C.G.; BASEI, M.A.S. Crustal evolution of the South America Platform. *In*: CORDANI, U.G.; MILANI, E.J.; THOMAZ FILHO, A.; CAMPOS, D. de A. (eds.) **Tectonic Evolution of South America**. Rio de Janeiro: 31st International Geological Congress, 2000. p. 19-40. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/236348355\\_Crustal\\_evolution\\_of\\_the\\_South\\_American\\_platform](https://www.researchgate.net/publication/236348355_Crustal_evolution_of_the_South_American_platform). Acesso em: 31 maio 2021.
- COSTA, J.B.S.; BEMERGUY, R.L.; HASUI, Y.; BORGES, M.S.; FERREIRA JR., C.R.P.; BEZERRA, P.E.; COSTA, M.L.; FERNANDES, J.M.G. Neotectônica da Região Amazônica: aspectos tectônicos, geomorfológicos e deposicionais. **Geonomos**, v. 4, n. 2, UFMG, Belo Horizonte/MG, p. 23-44, 1996.
- COSTA, J.B.S.; BORGES, M.S.; BEMERGUY, R.L.; FERNANDES, J.G.; COSTA JR., P.S.; COSTA, M.L. A evolução Cenozóica da região de Salinópolis, nordeste do Estado do Pará. **Geociências**, UNESP, v. 12, n. 2, p. 373-396, 1993. Disponível em: <http://twixar.me/pPBm>. Acesso em: 14 jun. 2021.



CUNHA, F.M.; CARNEIRO, R.G. **Carta Geológica da Bacia do Parnaíba**. Rio de Janeiro: PETROBRAS / DNPM, 1973. Escala 1.250.000.

CUNHA, F.M. **Fotointerpretação da Bacia de São Luiz, Maranhão**. Belém: PETROBRÁS, 1968. 22 p. Relatório RENOR, 318/68.

DANTAS, M.E.; SHINZATO, E.; BANDEIRA, I.C.N.; SOUZA, L.V.; RENK, J.F.C. Compartimentação geomorfológica do Estado do Maranhão. *In*: BANDEIRA, I.C.N. **Geodiversidade do Estado do Maranhão**. Teresina: CPRM, 2013. p. 31-62. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/14761>. Acesso em: 31 maio 2021.

DURNER, W. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. **Water Resources Research**, v. 30, n. 2, p. 211-223, 1994. DOI: <https://doi.org/10.1029/93WR02676>.

ELRICK, D.E.; REYNOLDS, W.D.; TAN, K.A. Hydraulic conductivity measurements in the unsaturated zone using improved well analyses. **Groundwater Monitoring & Remediation**, v. 9, n. 3, p. 184-193, 1989. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1745-6592.1989.tb01162.x>.

FEITOSA, A.C. Relevo do Estado do Maranhão: uma nova proposta de classificação topomorfológica. *In*: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 6., Goiânia, 2006. **Anais [...]**. Goiânia: UGB, 2006. 1 CD-ROM. Disponível em: <http://lsie.unb.br/ugb/sinageo/6/11/476.pdf>. Acesso em: 31 maio 2021.

FERRAZ, C.M.L.; VALADÃO, R.C. Barreiras: formação ou grupo? (contribuições da análise geomorfológica do litoral sul da Bahia e das “chapadas” do Jequitinhonha). *In*: CONGRESSO ABEQUA, 10., 2005, Guarapari, ES. **Resumos [...]**. Guarapari, ES: ABEQUA, 2005. 1 CD-ROM.

GAMA, J.R.N.F.; ARAÚJO, E.P.; LOPES, J.R.; TELES, M.G.L.; SANTOS, A.H.M.; CARVALHO FILHO, R. **Solos e bacias Hidrográficas da Ilha do Maranhão**. São Luís: UEMA, 2012. 9 p. Disponível em: <https://www.sbcs.org.br/cbcs2015/arearestrita/arquivos/734.pdf>. Acesso em: 26 maio 2021.

GÓES, A.M. **Estudos sedimentológicos dos sedimentos Barreiras, Ipixuna e Itapecuru no nordeste do Estado do Pará e nordeste do Maranhão**. Belém, 1981. 55 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Curso de Pós-Graduação em Geologia, Núcleo de Ciências Geofísicas e Geológicas, Universidade Federal do Pará, Belém, 1981. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/8697>. Acesso em 31 maio 2021.

GÓES, A.M.; ROSSETTI, D.F. Gênese da Bacia de São Luís-Grajaú, Meio-Norte do Brasil. *In*: ROSSETTI, D.F.; GÓES, A.M.; TRUCKENBRODT, W. (ed.). **O Cretáceo na Bacia de São Luís – Grajaú**. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 2001. p. 15-30. (Coleção Friedrich Katzer). ISBN 978-8570-9807-31

IBGE. **Censo Demográfico 2010**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. Disponível em: <https://censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php?dados=1&uf=33>. Acesso em: 02 jun. 2021.

IBGE. **Estado do Maranhão: Geologia**. Rio de Janeiro, 2011. 1 mapa, color., 2011. Escala 1: 1.400.000. Disponível em: [https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes\\_ambientais/geologia/levantamento\\_geologico/mapas/unidades\\_da\\_federacao/ma\\_geologia.pdf](https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/geologia/levantamento_geologico/mapas/unidades_da_federacao/ma_geologia.pdf). Acesso em: 31 maio 2021.

IBGE. **Mapa de Vegetação do Brasil**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2004. 1 mapa, color., 2004. Escala 1: 5.000.000. Disponível em: [https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes\\_ambientais/vegetacao/mapas/brasil/vegetacao.pdf](https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/vegetacao/mapas/brasil/vegetacao.pdf). Acesso em: 31 maio 2021.



IPEA - INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA - **Caracterização e quadros de análise comparativa da governança metropolitana no Brasil**: arranjos institucionais de gestão metropolitana (componente 1). Rio de Janeiro: IPEA, 2014. p. 8. Disponível em: [https://www.ipea.gov.br/redei/pea/images/pdfs/governanca\\_metropolitana/rel1\\_1\\_rmgs1.pdf](https://www.ipea.gov.br/redei/pea/images/pdfs/governanca_metropolitana/rel1_1_rmgs1.pdf). Acesso em: 27 maio 2021.

KEGEL, W. **Contribuição ao estudo da Bacia costeira do Rio Grande do Norte**. Rio de Janeiro: DNPM, 1957. p. 30-32.

KLEIN, V.C.; FERREIRA, C.S. Paleontologia e estratigrafia de uma fácies estuarina da formação Itapecuru, Estado do Maranhão. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 51, n. 3, p. 523-533, 1979.

LIMA, E. de A.M.; LEITE, J.F. **Projeto estudo global dos recursos minerais da bacia sedimentar do Parnaíba**. Integração geológico-metalogenética. Relatório Final, Etapa III. Belém: DNPM/CPRM, 1978. v. 1. 190 p. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/9382>. Acesso em: 31 maio 2021.

LIMA, H.P.; ARANHA, L.G.F.; FEIJÓ, F.J. Bacias de Bragança, São Luís e Graben de Ilha Nova. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 8, n. 1, p. 111-116, mar. 1994.

LIMA, R.D.; ROSSETTI, D.F. Análise faciológica e sequencial de depósitos de delta de baía (Neocretáceo), Bacia do Grajaú, MA. In: ROSSETTI, D.F.; GÓES, A.M.; TRUCKENBRODT, W. (eds.) **O Cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú**. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 2001. p. 151-174. (Coleção Friedrich Katzer). ISBN 978-8570-9807-31

LIMA, R.D.; ROSSETTI, D.F. Depositional facies in Late Cretaceous- early Tertiary deposits in northwestern Maranhão State, Brazil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 29, n. 2, p. 237-244, 1999. Disponível em: <http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/11117>. Acesso em: 31 maio 2021.

LISBOA, M.A.R. The Permian geology of Northern Brazil. **American Journal of Science**, New Haven, v. 37, n. 221, p. 425-443, Maio 1914. DOI: <https://doi.org/10.2475/ajs.s4-37.221.425>.

MABESSOONE, J.M.; SILVA, A.C.; BEURLLEN, K. Estratigrafia e Origem do Grupo Barreiras em Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 2, n. 3, p. 173-178, 1972. Disponível em: <http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/12512>. Acesso em: 31 maio 2021.

MATOSO, S.Q.; ROBERTSON, F.S. Uso geológico de termo “Barreiras”. **Boletim Técnico da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 2, n. 3, p. 37-43, 1959.

MESNER, J.C.; WOOLDRIDGE, L.C.P. Estratigrafia das Bacias paleozóicas e cretáceas do Maranhão. **Boletim Técnico da Petrobras**, v. 7, n. 2, p. 137-164, abr./jun. 1964.

OLIVEIRA, A.I.; LEONARDOS, O.H. **Geologia do Brasil**. Rio de Janeiro: Serviço Informação Agrícola/Ministério da Agricultura, 1943. 813 p

OLIVEIRA, J.G.F. de; SILVA, R.C.S. **Geologia e recursos minerais da folha Belém SA.22-X-D-III, Estado do Pará**. Belém: CPRM, 2011. Escala 1:100.000. 91 p. il. color. Projeto Cartografia da Amazônia. Levantamentos Geológicos Básicos. Programa Geologia do Brasil – PGB. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/11353>. Acesso em: 31 maio 2021.

OLIVEIRA, P.E.; RAMOS, J.R.A. **Geologia das quadrículas de Recife e Pontas de Pedra**. Rio de Janeiro: DNPM, 1956. 60 p. (Boletim DFPM, 151).



PEDRÃO, E. Palinoestratigrafia e análise quantitativa de amostras de superfície (Formação Itapecuru, Bacia de São Luís). **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 68, n. 2, p. 268, 1996.

PEREIRA, E.D. **Avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação do solo e do aquífero do Reservatório Batata – São Luís – MA**. 2006. 133 p. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista - UNESP, Rio Claro-SP, 2006. Disponível em: [https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/102894/pereira\\_ed\\_dr\\_rc.pdf](https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/102894/pereira_ed_dr_rc.pdf). Acesso em: 21 jun. 2021.

PEREIRA, E.D.; ZAINÉ, J. E.. Mapa geológico-geotécnico da bacia do Rio Bacanga – São Luís (MA). **Geociências**, v. 26, n. 1, 2007, p. 45-54. Disponível em: <http://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/geociencias/article/view/1702>. Acesso em: 27 maio 2021.

PEREIRA, L.S. **Gestão de águas subterrâneas no contexto metropolitano: viabilidade para implementação de novas áreas de recarga de aquíferos na Ilha de São Luís/MA**. 2018. 96 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente) – Universidade CEUMA, São Luís, 2007. Disponível em: [http://www.ceuma.br/mestradomeioambiente/images/Dissertacoes/2018\\_LIENE\\_SOARES\\_PEREIRA.pdf](http://www.ceuma.br/mestradomeioambiente/images/Dissertacoes/2018_LIENE_SOARES_PEREIRA.pdf). Acesso em: 27 maio 2021.

PETRI, S.; FÚLFARO, V.J. **Geologia do Brasil**. São Paulo: TA Queiroz/USP, 1983. 631 p.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1990. 188 p. ISBN 978-8520-4048-36

RODRIGUES, T.L. das N. (org.); ARAÚJO, C.C.; CAMOZZATO, E.; RAMGRAB, G.E. **São Luís - folha SA.23-Z-A. Cururupu - folha SA.23-X-C**: Estado do Maranhão. Brasília: CPRM, 1994. 185 p. il. 04 mapas. il. Color. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil – PLGB. Projeto Especial Mapas de Recursos Minerais de Solos e de Vegetação para a Área do Programa.

RODRIGUES, T.L. das N.; FAVILLA, C.A.C.; CAMOZZATO, E.; VERÍSSIMO, L.S. **Bacabal. Folha SB.23-X-A**. Estado do Maranhão. Escala 1:250.000. Brasília: CPRM, 1994a. 124 p. il. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil.

ROSS, J.L.S. O registro cartográfico dos fatos geomórficos e a questão da taxonomia do relevo. **Revistas da USP**, Departamento de Geografia, v. 6, p. 17-29, 1992. DOI: <https://doi.org/10.7154/RDG.1992.0006.0002>.

ROSS, J.L.S. Relevo brasileiro: uma nova proposta de classificação. **Revistas da USP**, Departamento de Geografia, v. 4, p. 25-39, 1985. DOI: <https://doi.org/10.7154/RDG.1992.0006.0002>.

ROSSETTI, D.F. Arquitetura deposicional da Bacia de São Luís-Grajaú. *In*: ROSSETTI, D.F.; GÓES, A.M.; TRUCKENBRODT, W. (coords.). **O Cretáceo na Bacia de São-Luís Grajaú**. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 2001. p. 15-30. (Coleção Friedrich Katzer). ISBN 978-8570-9807-31.

ROSSETTI, D.F. Bacia de São Luís-Grajaú. **Boletim de Fundação Paleontológica Phoenix**, Aracajú, n. 38, p. 1-9, 2003.

ROSSETTI, D.F. Evolução sedimentar miocênica nos Estados do Pará e Maranhão. **Geologia USP: Série Científica**, v. 6, n. 2, p. 7-18, 2006. DOI: <https://doi.org/10.5327/S1519-874X2006000300003>.

ROSSETTI, D.F.; GÓES, A.M. Geologia. *In*: ROSSETTI, D.F.; GÓES, A.M. (ed.). **O Neógeno da Amazônia Oriental**. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 2004. p. 13-52. (Coleção Friedrich Katzer).



- ROSSETTI, D.F.; GÓES, A.M. Marine influence in the Barreiras Formation, State of Alagoas, northeastern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 81, n. 4, p. 741-755, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0001-37652009000400012>.
- ROSSETTI, D.F.; GÓES, A.M.; SOUZA, L.S.B. Estratigrafia da sucessão sedimentar Pós-Barreiras (zona Bragantina, Pará) com base em radar de penetração no solo. **Revista Brasileira de Geofísica**, São Paulo, v. 19, n. 2, p. 113-130, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2001000200001>.
- ROSSETTI, D.F.; GÓES, A.M.; TRUCKENBRODT, W. (eds.). **O Cretáceo na Bacia de São-Luís Grajaú**. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 2001. p. 31-46. (Coleção Friedrich Katzer). ISBN-13 978- 8570-9807-31.
- ROSSETTI, D.F. Fácies analysis of the Lower Sucession of the Upper Itapecuru Formation, São Luís Basin, northern Brazil. In: COSTA, M.L.; ANGÉLICA, R.S. (ed). **Contribuições à Geologia da Amazônia**. Belém: Editora Falângola, 1997. p. 241-284.
- ROSSETTI, D.F. Fácies architecture and sequential evolution of an incised-valley estuarine fill; the Cujupe Formation (Upper Cretaceous to lower Tertiary), Sao Luis Basin, northern Brazil. **Journal of Sedimentary Research**, v. 68, n. 2, p. 299-310. 1998. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2004.08.003>.
- ROSSETTI, D.F. Influence of low amplitude/high frequency relative sea-level changes in a wave-dominated estuary (Miocene), São Luis Basin, norther Brazil. **Sedimentary Geology**, v. 133, n. 3/4, p. 295-324, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(00\)00046-4](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(00)00046-4).
- ROSSETTI, D.F. Paleosurfaces from northeastern Amazonia as a key for reconstructing paleolandscapes and understanding weathering products. **Sedimentary Geology**, v. 169, n. 3, p. 151-174, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2004.05.003>.
- ROSSETTI, D.F.; ROCCA, R.R.; TATUMI, S.H. Evolução dos Sedimentos Pós-Barreiras na zona costeira da Bacia São Luís, Maranhão, Brasil. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi**, Belém, v. 8, n. 1, p. 11-25, 2013. (Série Ciências da Terra). Disponível em: [http://editora.museu-goeldi.br/bn/artigos/cnv8n1\\_2013/evolucao\(rossetti\).pdf](http://editora.museu-goeldi.br/bn/artigos/cnv8n1_2013/evolucao(rossetti).pdf). Acesso em: 31 maio 2021.
- ROSSETTI, D.F. Sequence stratigraphy and depositional evolution of Itapecuru Formation (Late Cretaceous) in the São Luís Basin, northern Brazil. **Acta Geologica Leopoldinense**, n. 19, p. 111-126, 1996.
- ROSSETTI, D.F.; TRUCKENBRODT, W. Classificação estratigráfica para o Albiano-Terciário Inferior (?) na Bacia de São Luís, MA. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi**, v. 9, p. 31-43, 1997. (Série Ciências da Terra).
- ROSSETTI, D.F.; TRUCKENBRODT, W.; GÓES, A.M. Estudo paleoambiental e estratigráfico dos Sedimentos Barreiras e Pós-Barreiras na região Bragantina, nordeste do Pará. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi**, 1:25-74, 1989. (Série Ciências da Terra). Disponível em: <http://repositorio.museu-goeldi.br/handle/mgoeldi/623>. Acesso em: 02 jun. 2021.
- SÁ, J.H.S. Contribuição à geologia dos sedimentos terciários e quaternários da região bragantina, Estado do Pará. **Boletim do Instituto de Geologia do Rio de Janeiro**, n. 3, p. 21-36, 1969.
- SANTOS, J. do N.; PEREIRA, E.D. Carta de suscetibilidade a infiltração de água no solo na sub-bacia do rio Maracanã – MA. **Cadernos de Pesquisa**, São Luís, v. 20, n. especial, julho 2013. DOI: <https://doi.org/10.18764/2178-2229.v20n.especialp63-71>.



SANTOS, M.E.C.M.; CARVALHO, M.S.S. **Paleontologia das Bacias do Parnaíba, Grajaú e São Luís**. Rio de Janeiro: CPRM, 2009. 215 p. il. ISBN 9788574990712. Disponível em: [Inicio.pmd \(cprm.gov.br\)](http://inicio.pmd.cprm.gov.br). Acesso em: 01 abr. 2021.

SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D.A.; DERZE, G.R.; ASMUS, H.E. (coords). **Mapa geológico do Brasil e da área oceânica adjacente incluindo depósitos minerais**. Escala 1:2.500.000. Brasília: DNPM, 1981.

SCHOENEBERGER, P.J.; WYSOCKI, D.A. Hydrology of soils and deep regolith: a nexus between soil geography, ecosystems and land management. **Geoderma**, v. 126, n. 1-2, p. 117-128, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.11.010>.

SILVA, C.F.; LOEWENSTEIN, P. Contribuição à geologia da folha de São Luís (AS-23), no Estado do Pará: II – Novas localidades e razão magnésio/calcário do calcário Pirabas. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi: Nova Série de Geologia**, n. 13, p. 1-17, 1968. Disponível em: [https://repositorio.museu-goeldi.br/bitstream/mgoeldi/366/1/artigo\\_calcario%20pirabas\\_versao%20bib.pdf](https://repositorio.museu-goeldi.br/bitstream/mgoeldi/366/1/artigo_calcario%20pirabas_versao%20bib.pdf). Acesso em: 01 abr. 2021.

SILVA, Q.D. da. **Mapeamento geomorfológico da Ilha do Maranhão**. 2012. 248 f. Tese (Doutorado em Dinâmica e Gestão Ambiental) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, 2012. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/101458>. Acesso em: 20 abr. 2021.

SOUSA, S.B. Sistema Aquífero da Ilha do Maranhão (MA). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 11.; CONGRESSO MUNDIAL INTEGRADO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 8., 2000, Fortaleza. **Anais [...]** Fortaleza: ABAS, 2000.

SOUZA, S.C.R.; SANTOS JR, A.E.A. Fácies e estratigrafia da sedimentação proximal da Formação Barreiras, sul do sistema de gráben do Marajó, Região de Marabá. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 45., 26 set. - 01 out. 2010, Belém. **Anais [...]**. Belém: SBG. Núcleo Norte, 2010. 1079 p.

SZATMARI, P.; FRANÇOLIN, J.B.L.; ZANOTO, O.; WOLFF, S. Evolução tectônica da Margem Equatorial Brasileira. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 17, n. 2, p. 180-188, jul. 1987. Disponível em: <http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/11920>. Acesso em: 01 abr. 2021.

SUGUIO, K.; BEZERRA, F.H.R.; BARRETO, A.M.F. Luminescence dated Late Pleistocene wave-built terraces in northeastern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 83, n. 3, p. 907-920, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0001-37652011005000010>.

TATUMI, S.H. Datação de sedimentos Pós-Barreiras no norte do Brasil por luminescência opticamente estimulada (LOE). In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 11., 2007, Belém. **Resumos [...]**. Belém: ABEQUA, 2007. 1 CD-ROM.

TATUMI, S.H.; SILVA, L.P da; PIRES, E.L.; ROSSETTI, A.M.G.; MUNITA, C.S. Datação de sedimentos Pós-Barreiras no Norte do Brasil: implicações paleogeográficas. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 38, n. 3, p. 514-524, set. 2008. Disponível em: <http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/7602>. Acesso em: 01 abr. 2021.

TEIXEIRA, W.G.; BEHRING, S. Retenção de água no solo pelos métodos da mesa de tensão e da câmara de Richards. In: TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMMA, G.K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W.G. **Manual de métodos de análise de solos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2017. p. 34-46. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/172266/1/Pt-1-Cap-4-Retencao-de-agua-no-solo.pdf>. Acesso em: 01 abr. 2021.



TRUCKENBRODT, W.; KOTSCHOUBEY, B. Aspectos petrográficos e geoquímicos de bauxitas na Amazônia oriental. *In*: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 4., Belém, 1994. **Anais [...]**. Belém: SBGeo, 1994. p. 289-290. Disponível em: [http://sbg.sitepessoal.com/anais\\_digitalizados/nucleonorte/Anais%204%20Simp%20Geol%20Amaz%20Junho-1994%20Vol%201-Belem.pdf](http://sbg.sitepessoal.com/anais_digitalizados/nucleonorte/Anais%204%20Simp%20Geol%20Amaz%20Junho-1994%20Vol%201-Belem.pdf). Acesso em: 01 abr. 2021.

TRUCKENBRODT, W.; NOGUEIRA, A.C.R.; GOES, A.M.; ARAI, M. Conteúdo fossilífero e estruturas sedimentares nos sedimentos Barreiras, NE do Pará. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 38., 1994, Camboriú. **Boletim de Resumos Expandidos [...]**. Belém: SBG, 1994. v. 3, p. 210-211. Disponível em: [http://sbg.sitepessoal.com/anais\\_digitalizados/1994-CAMBORIU/1994CAMBORIU.zip](http://sbg.sitepessoal.com/anais_digitalizados/1994-CAMBORIU/1994CAMBORIU.zip). Acesso em: 01 abr. 2021.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO - UEMA. **Mapeamento do Uso do Solo da Ilha do Maranhão**: relatório técnico. Núcleo Geoambiental. São Luís: Universidade Estadual do Maranhão, 2016. 12 p. Inclui mapa.

VAN GENUCHTEN, M. TH. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>.

VASQUEZ, M.L.; KLEIN, E.L.; LOPES, E. do S. Compartimentação Tectônica. *In*: KLEIN, E.L.; SOUSA, C.S. (org). **Geologia e Recursos Minerais do Estado do Maranhão**: texto explicativo do mapa geológico e de recursos minerais do Estado do Maranhão. Belém: CPRM. 2012. p. 21-39. il. color. Escala 1:750.000.. Programa Geologia do Brasil – PGB. ISBN 978-85-7499-15-42. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/17861>. Acesso em: 01 abr. 2021

VASQUEZ, M.L.; ROSA-COSTA, L.T.; SILVA, M.G.C; BARBOSA, J. dos P. de O.; KLEIN, E.; LOPES, E.C. dos S.; MACAMBIRA, E.M.B.; CHAVES, C.L.; CARVALHO, J. M. de A.; OLIVEIRA, J.G.F.; ANJOS, G.C. dos; SILVA, H.R. da. Unidades Litoestratigráficas. *In*: VASQUEZ, M.L.; ROSA-COSTA, L.T (org.). **Geologia e Recursos Minerais do Estado do Pará**: texto explicativo do mapa geológico e de recursos minerais do Estado do Pará. Belém: CPRM, 2008. p. 112-216. il. Color. Escala 1: 1.000.000. Programa Geologia do Brasil – PGB. ISBN 978-85-7499-065-1. Disponível em <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/10443>. Acesso em: 01 abr. 2021.

VILAS BOAS, G.; SAMPAIO, F.J.; PEREIRA, A.M.S. The Barreiras Group in the Northeastern coast of the State of Bahia, Brazil: depositional mechanisms and processes. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 73, n. 3, p. 417-427, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0001-37652001000300010>.

ZALÁN, P.V. Bacias de Bragança-Viseu, São Luís e Ilha Nova. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 15, n. 2, p. 341-347, 2007.

---

# ANEXO 1

Descrições detalhadas dos pontos de amostragem e dos procedimentos adotados para coleta de sedimentos para datação por luminescência opticamente estimulada (LOE)

As amostras foram coletadas nos pontos EL-03, EL-23, EL-56, EL-69, GA-05, GA-19, GA-29 e GA-44, conforme descrito nas Foto 1, Foto 2, Foto 3, Foto 4, Foto 5, Foto 6, Foto 7 e Foto 8.

<b>Nº Afloramento</b>	<b>EL-03</b>
<b>Toponímia</b>	Praia do Panaquatira
<b>Município/UF</b>	São José de Ribamar/MA
<b>Tipo de Afloramento</b>	Falésia
<b>Dimensões</b>	C: 20 m/ A: 3 m
<b>Unidade Estratigráfica</b>	Sedimentos Pós-Barreiras
<b>Amostras coletadas</b>	1
<b>Descrição:</b> Arenito bege, com porções avermelhadas, granulação fina a média, com clastos subarredondados a angulosos. Observam-se laminações plano-paralelas, evidenciadas por filmes de argila intercalados aos arenitos. Possui também níveis conglomeráticos.	

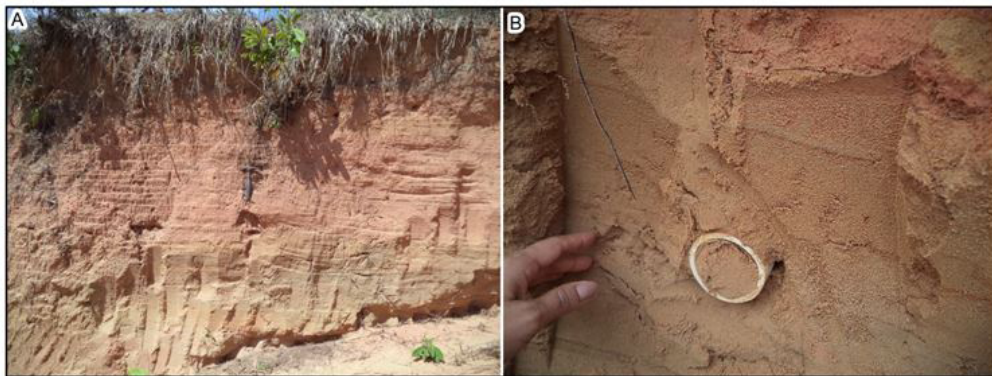


Foto 1: Fotografias ilustrando a visão frontal do afloramento (A) e inserção final tubo de coleta (B).



<b>Nº Afloramento</b>	<b>EL-23</b>
<b>Toponímia</b>	Prox. Vila Mojó
<b>Município/UF</b>	Paço do Lumiar/MA
<b>Tipo de Afloramento</b>	Corte de estrada
<b>Dimensões</b>	C: 10 m/ A: 1,5 m
<b>Unidade Estratigráfica</b>	Sedimentos Pós-Barreiras
<b>Amostras coletadas</b>	1

**Descrição:** Sedimento bege, amarelado, areno-siltoso, granulação fina, maciço, com clastos subangulosos, moderadamente selecionados.



Foto 2: Visão frontal do afloramento (A) e inserção final tubo de coleta (B).

<b>Nº Afloramento</b>	<b>GA-05</b>
<b>Toponímia</b>	Vila Maresia
<b>Município/UF</b>	Raposa/MA
<b>Tipo de Afloramento</b>	Cava
<b>Dimensões</b>	C: 15 m/ A: 5 m
<b>Unidade Estratigráfica</b>	Sedimentos Pós-Barreiras
<b>Amostras coletadas</b>	1

**Descrição:** Sedimento arenoso, amarelado, maciço, de granulação fina a média, moderadamente selecionado, com clastos arredondados a subarredondados.



Foto 3: Visão frontal do afloramento (A) e inserção do tubo de coleta (B).

<b>Nº Afloramento</b>	GA-19
<b>Toponímia</b>	Localidade Porto Grande
<b>Município/UF</b>	São Luís/MA
<b>Tipo de Afloramento</b>	Corte de estrada
<b>Dimensões</b>	C: 20 m/ A: 2,5 m
<b>Unidade Estratigráfica</b>	Sedimentos Pós-Barreiras
<b>Amostras coletadas</b>	1
<b>Descrição:</b> Sedimento arenoso, amarelo pálido, de granulação muito fina, com clastos subangulosos, moderadamente selecionados, que gradam em direção ao topo para sedimentos siltsos, creme. Observa-se laminação plano-plano paralela e clastos dispersos de argila, com até 1cm de comprimento.	

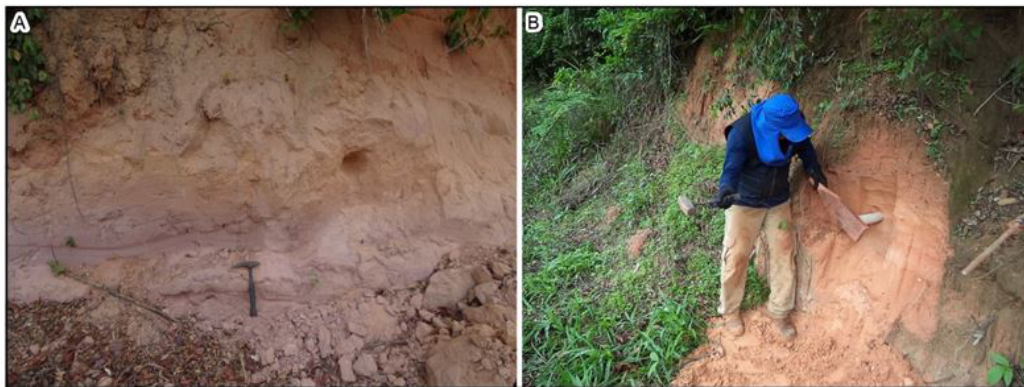


Foto 4: Visão frontal do afloramento (A) e inserção do tubo de coleta (B)

<b>Nº Afloramento</b>	GA-29
<b>Toponímia</b>	Assentamento Terra do Rumo, na estrada Leste-Oeste
<b>Município/UF</b>	São Luís/MA
<b>Tipo de Afloramento</b>	Cava
<b>Dimensões</b>	C: 15 m/ A: 3 m
<b>Unidade Estratigráfica</b>	Sedimentos Pós-Barreiras
<b>Amostras coletadas</b>	1
<b>Descrição:</b> Sedimento avermelhado, maciço, areno-argiloso, com granulação fina e clastos angulosos a subangulosos.	



Foto 5: Visão frontal do afloramento (A) e inserção do tubo de coleta (B).

<b>Nº Afloramento</b>	<b>GA-44</b>
<b>Toponímia</b>	Localidade Tibiri, pós Matadoro
<b>Município/UF</b>	São Luís/MA
<b>Tipo de Afloramento</b>	Cava (muito extensa)
<b>Dimensões</b>	C: 100 m/ A: 5 m
<b>Unidade Estratigráfica</b>	Sedimentos Pós-Barreiras
<b>Amostras coletadas</b>	1

**Descrição:** Sedimento avermelhado, maciço, de granulação fina a média, com clastos arredondados.



Foto 6: Visão frontal do afloramento (A) e inserção do tubo de coleta (B).

<b>Nº Afloramento</b>	<b>EL-56</b>
<b>Toponímia</b>	BR 135
<b>Município/UF</b>	São Luís/MA
<b>Tipo de Afloramento</b>	Corte de estrada
<b>Dimensões</b>	C: 5 m/ A: 1,5 m
<b>Unidade Estratigráfica</b>	Sedimentos Pós-Barreiras
<b>Amostras coletadas</b>	1

**Descrição:** Sedimento vermelho alaranjado, maciço, com granulação fina a média e grânulos de quartzo dispersos.

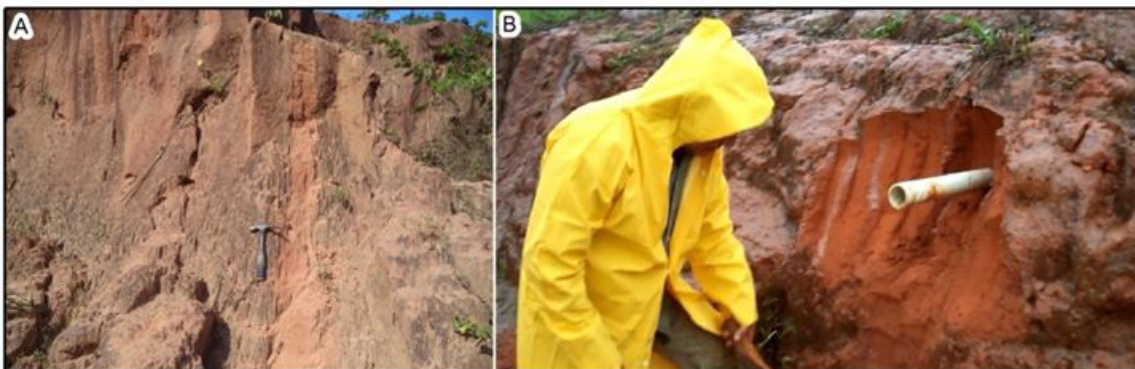


Foto 7: Visão frontal do afloramento (A) e inserção do tubo de coleta (B).

<b>Nº Afloramento</b>	<b>EL-69</b>
<b>Toponímia</b>	Av. Litorânea
<b>Município/UF</b>	São Luís/MA
<b>Tipo de Afloramento</b>	Corte de estrada
<b>Dimensões</b>	C: 15 m/ A: 3 m
<b>Unidade Estratigráfica</b>	Sedimentos Pós-Barreiras
<b>Amostras coletadas</b>	1
<b>Descrição:</b> Sedimento com porções avermelhadas e amareladas, maciço, de granulação fina a média, com clastos subarredondados a arredondados.	

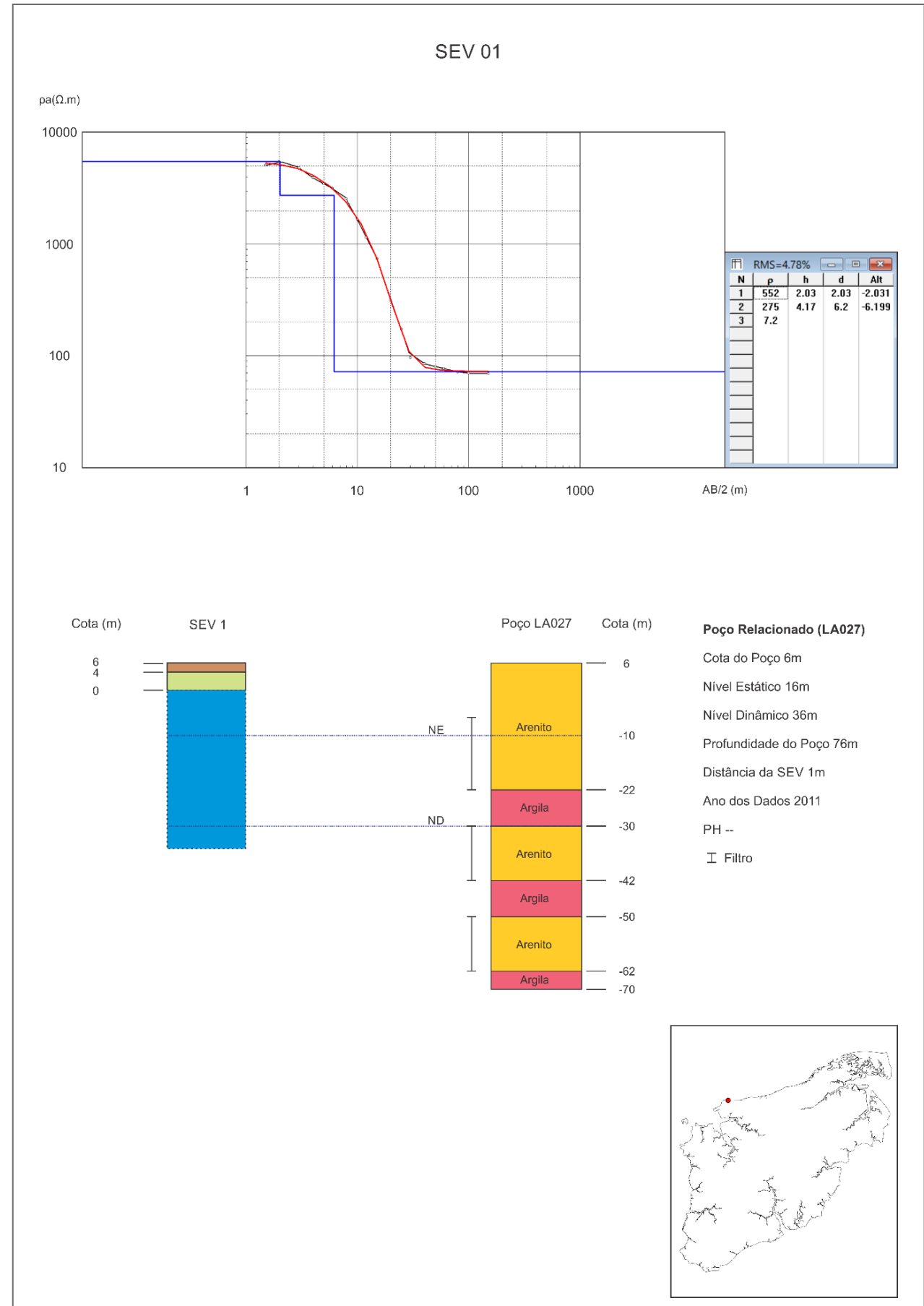


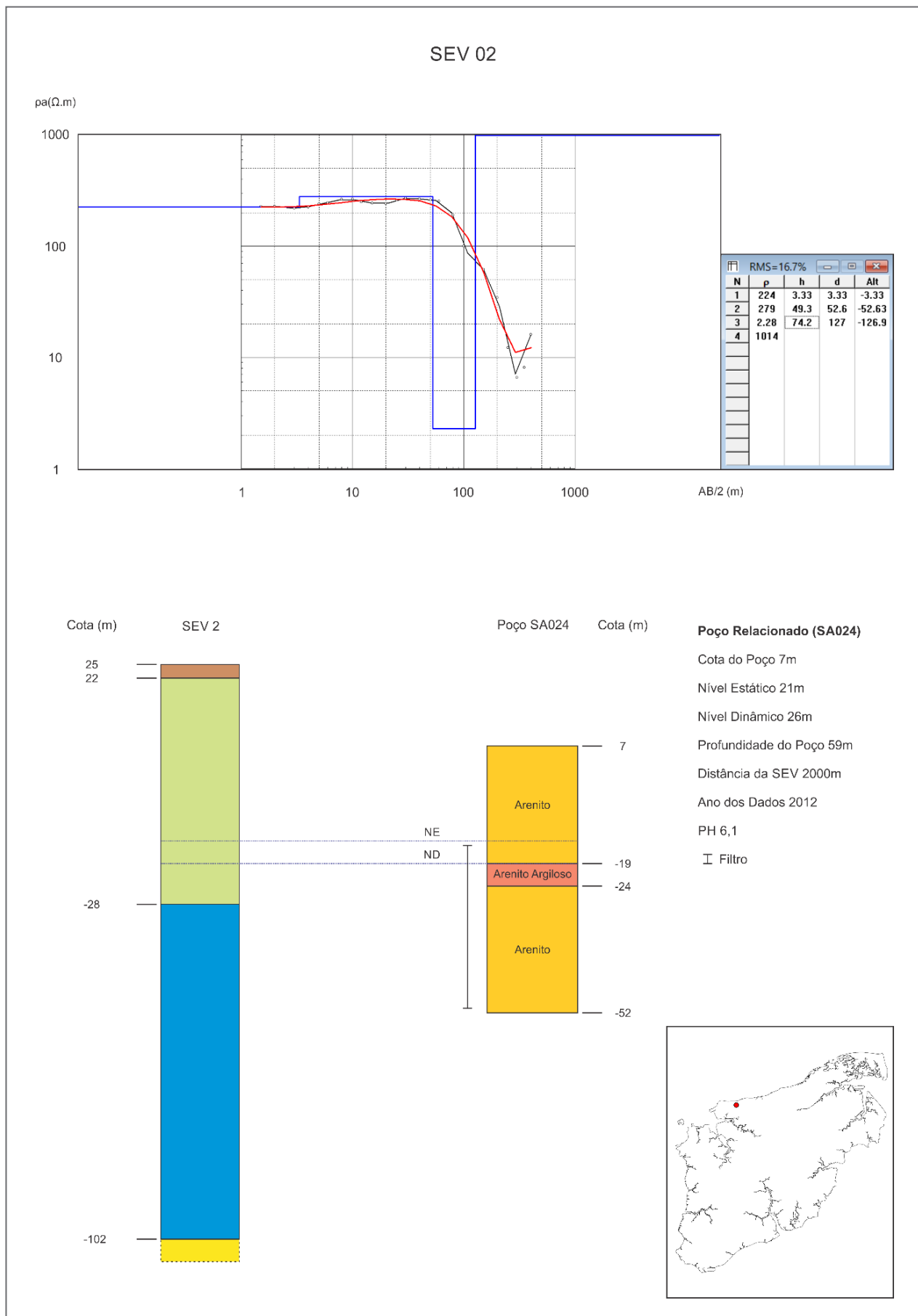
Foto 8: Visão frontal do afloramento (A) e inserção do tubo de coleta (B).

---

## **ANEXO 2**

Dados brutos das sondagens elétricas verticais efetuadas na área de estudo.

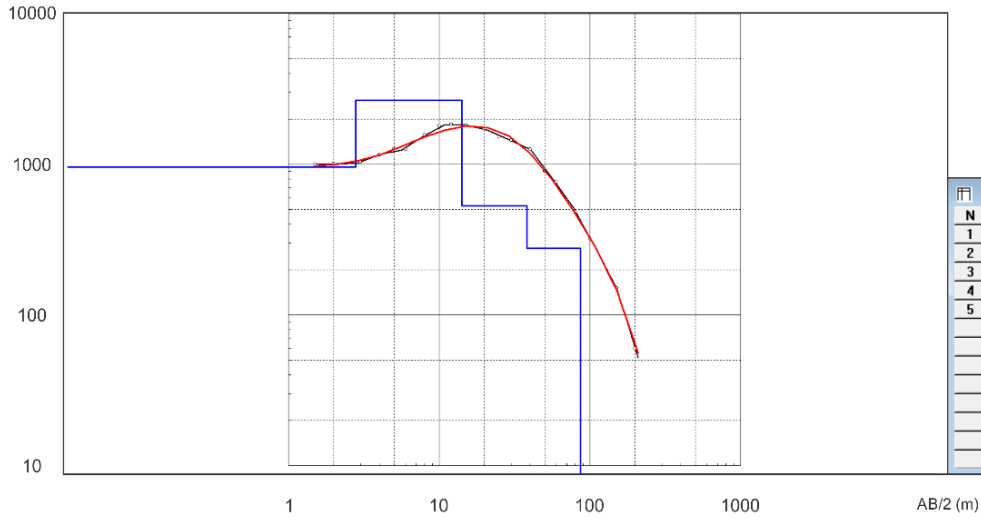






### SEV 03

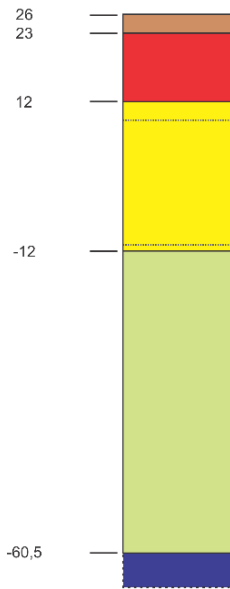
$\rho_a(\Omega.m)$



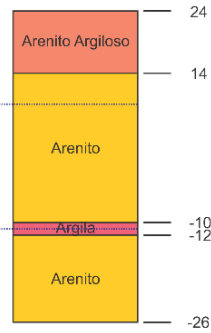
RMS=4.18%

N	p	h	d	Alt
1	961	2.79	2.79	-2.791
2	2657	11.3	14.1	-14.08
3	530	24.1	38.2	-38.18
4	277	48.4	86.5	-86.55
5	0.806			

Cota (m) SEV 3

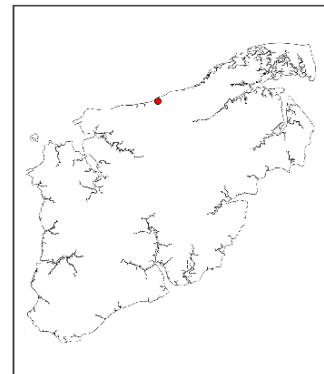


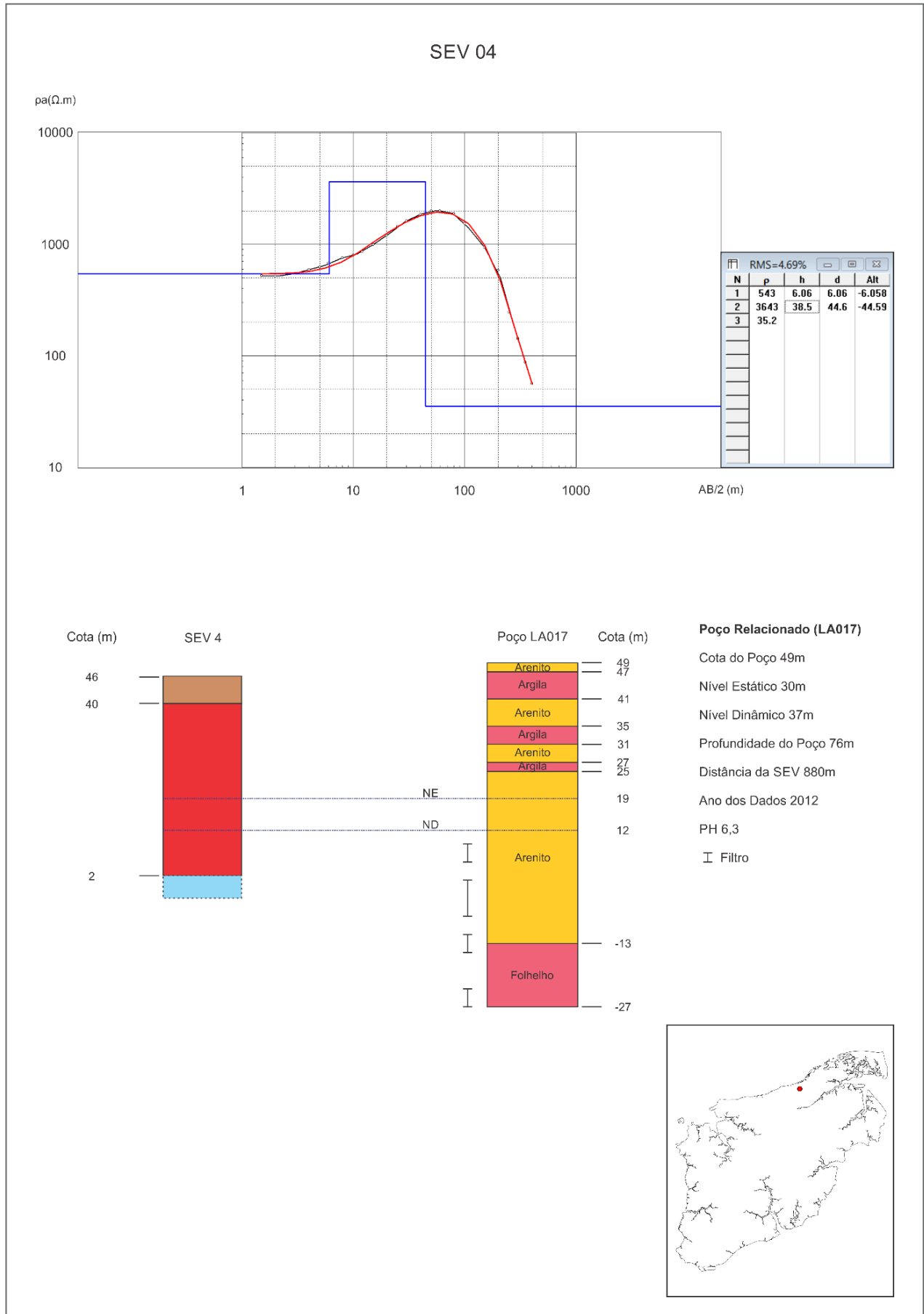
Poço NG022 Cota (m)



#### Poço Relacionado (NG022)

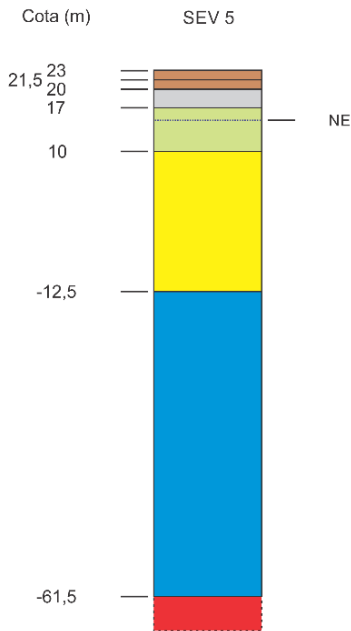
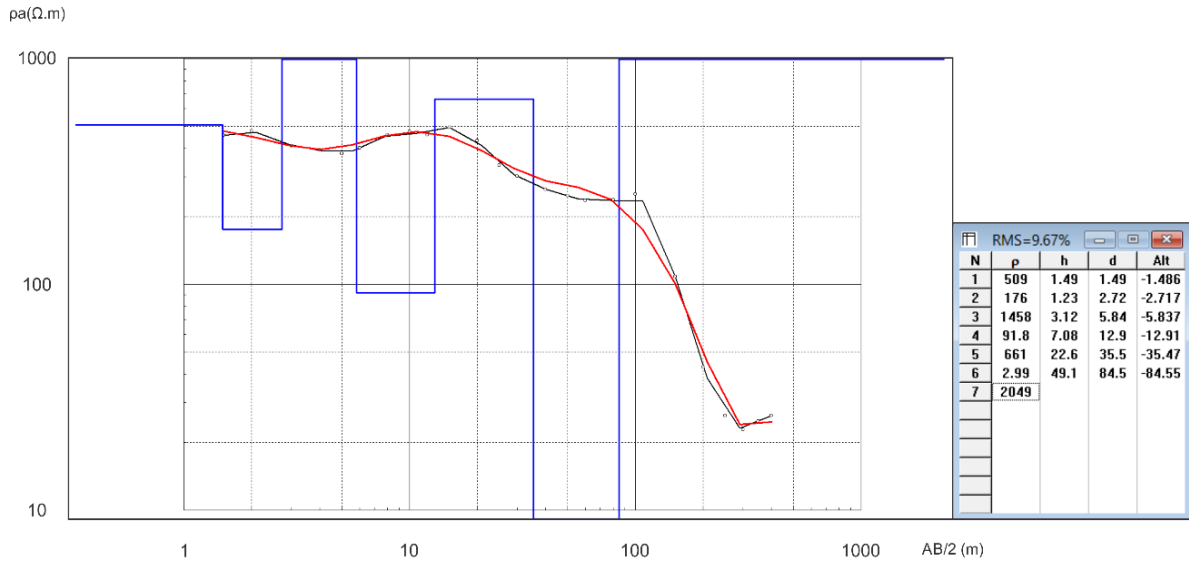
- Cota do Poço 24m
- Nível Estático 15m
- Nível Dinâmico 35m
- Profundidade do Poço 50m
- Distância da SEV 1900m
- Ano dos Dados 2010
- PH 5,2
- ┆ Filtro







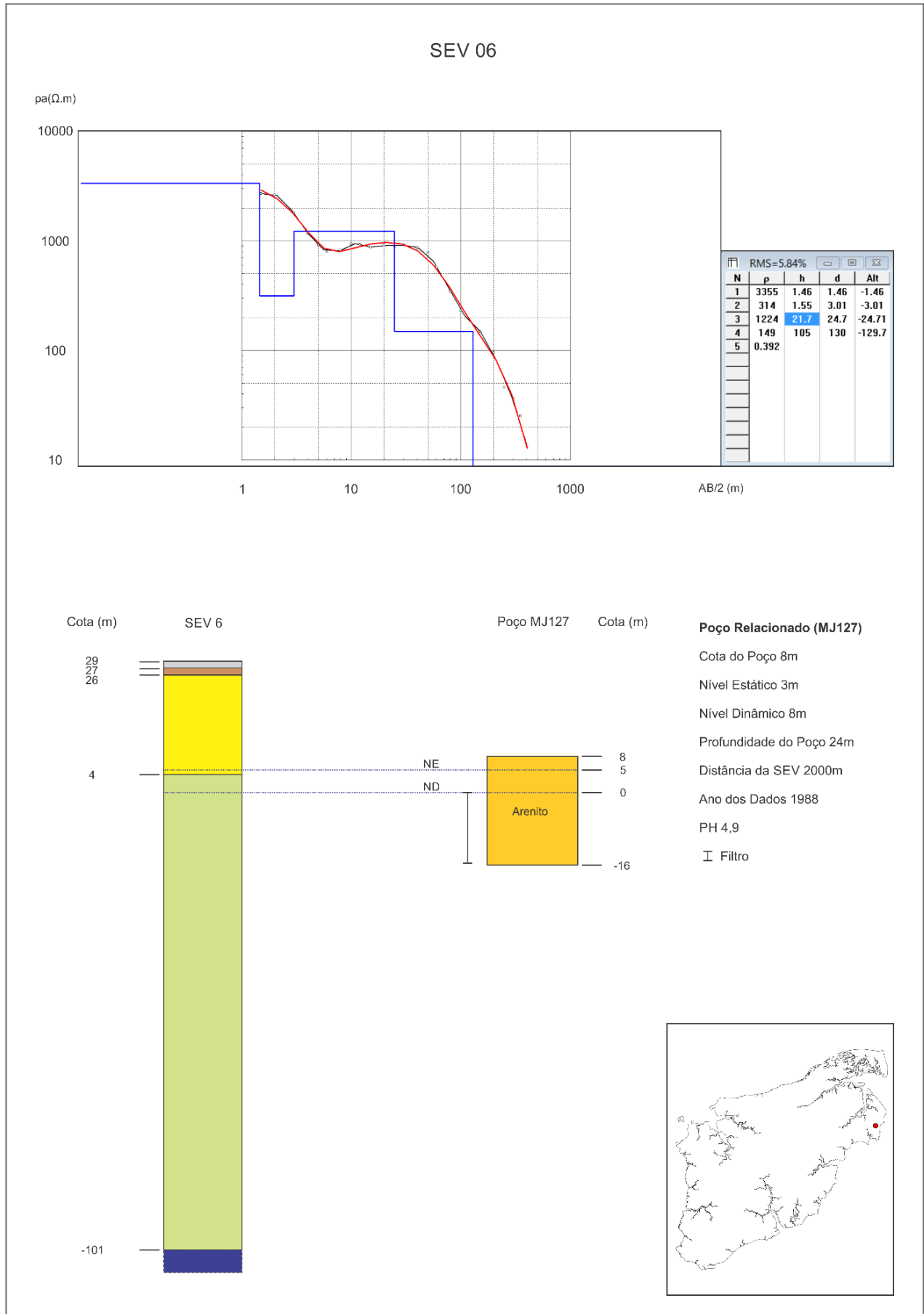
### SEV 05

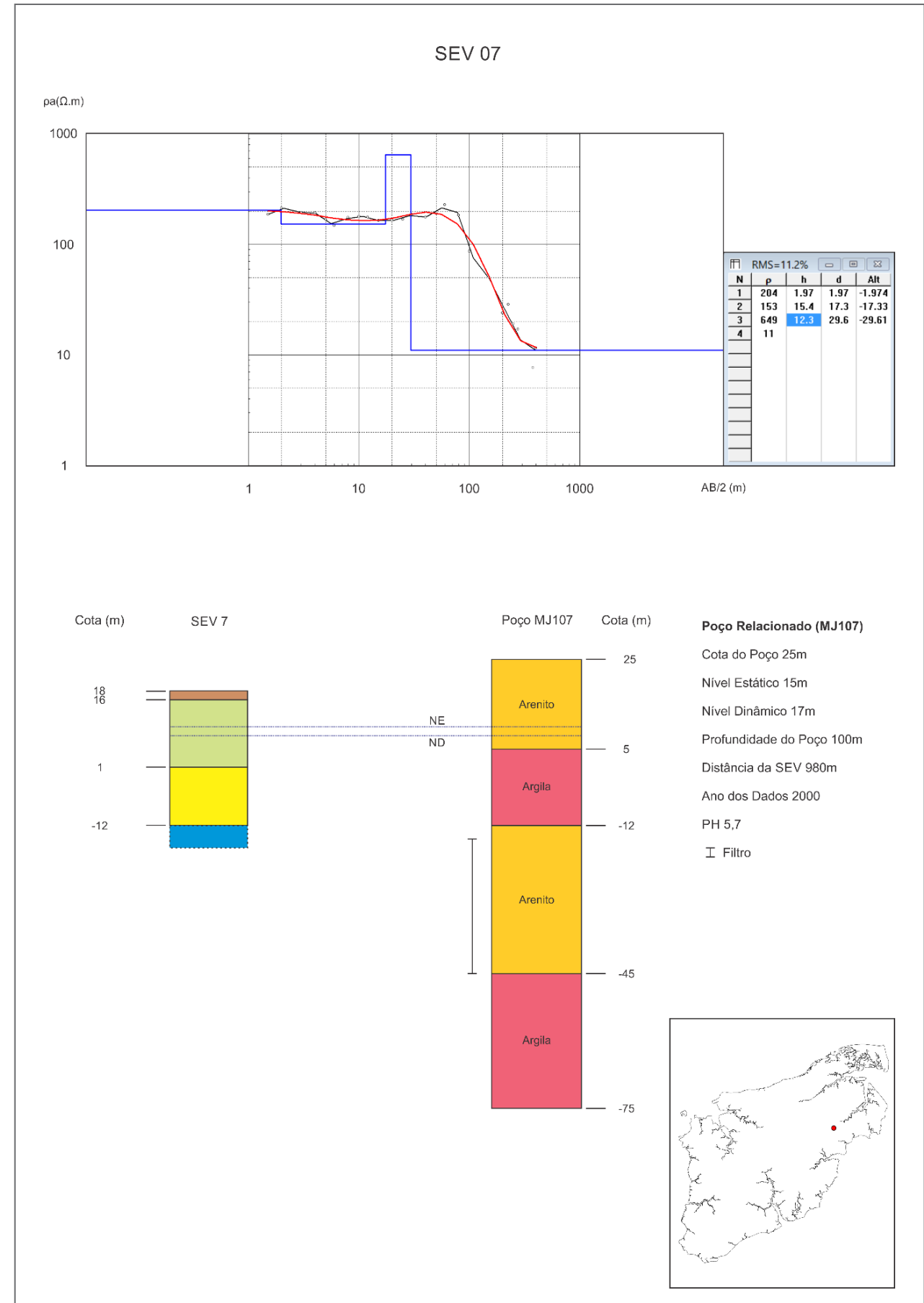


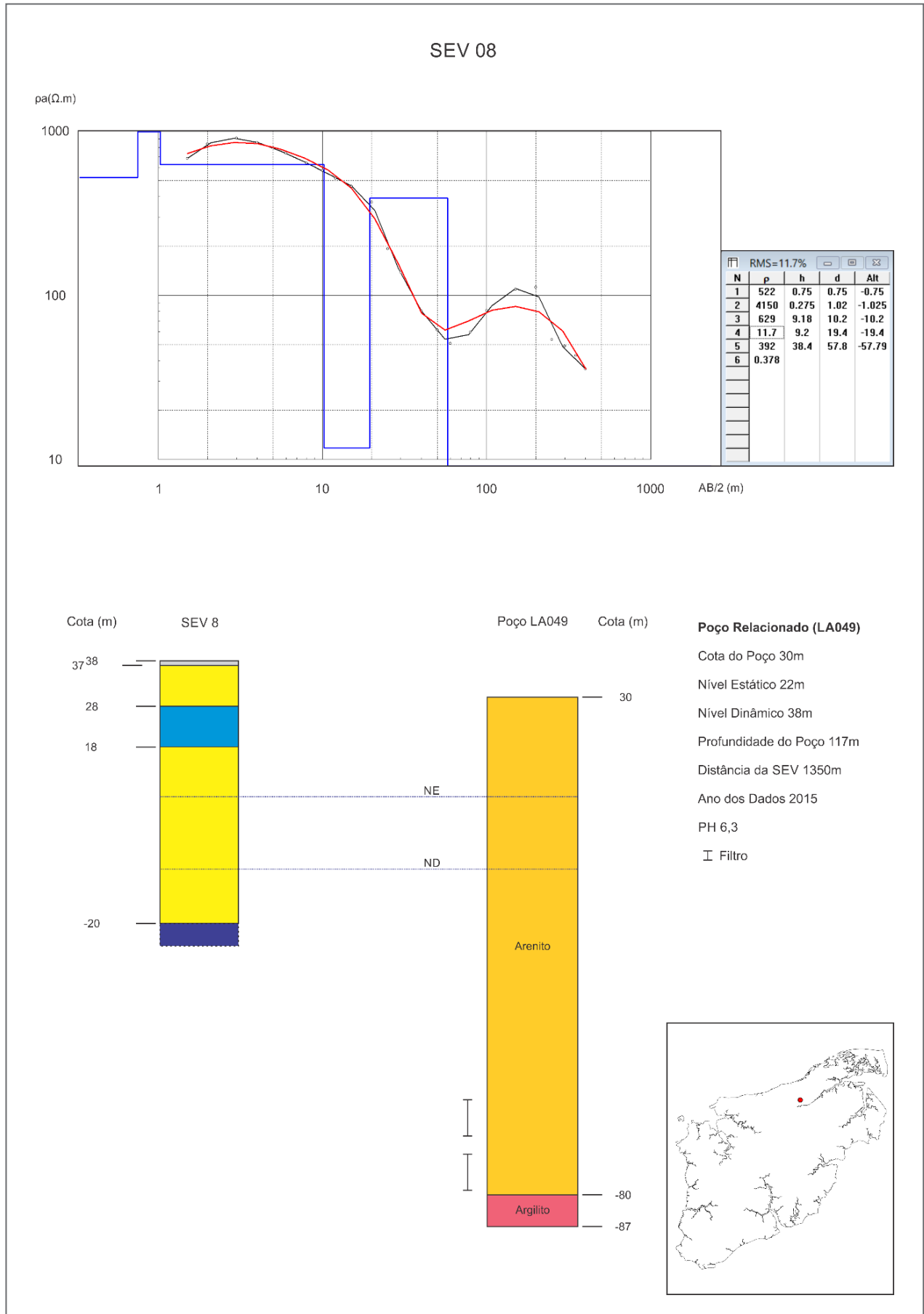
#### Poço Relacionado (JA012)

Cota do Poço 30m  
 Nível Estático 15m  
 Nível Dinâmico --  
 Profundidade do Poço 72m  
 Distância da SEV 460m  
 Não Possui Descrição Litológica  
 PH 6,7



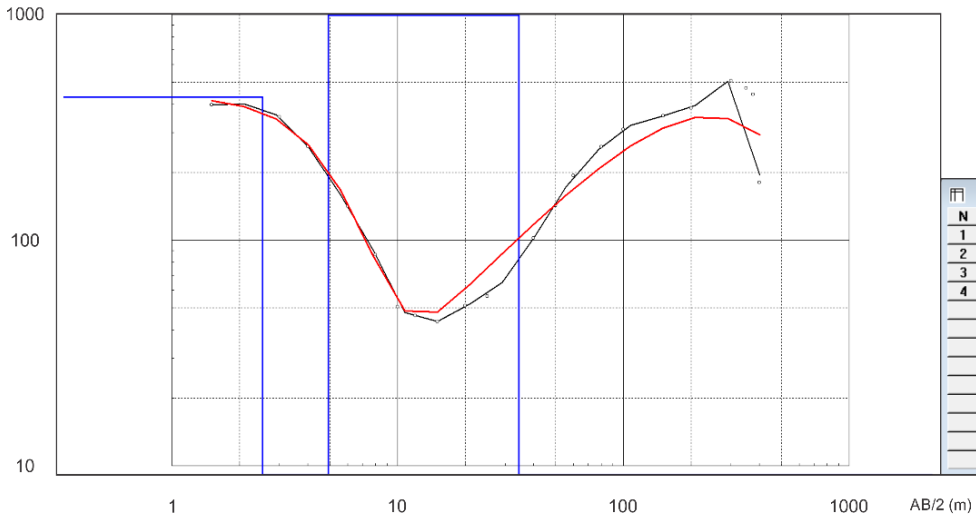






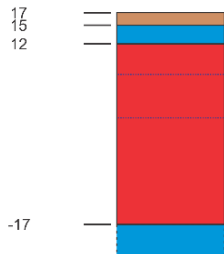
### SEV 09

pa(Ω.m)



Cota (m)

SEV 9

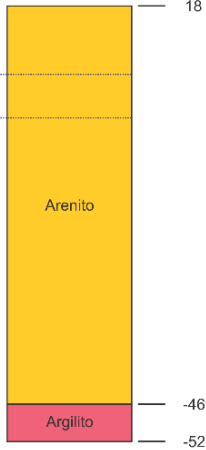


Poço BE007

Cota (m)

NE

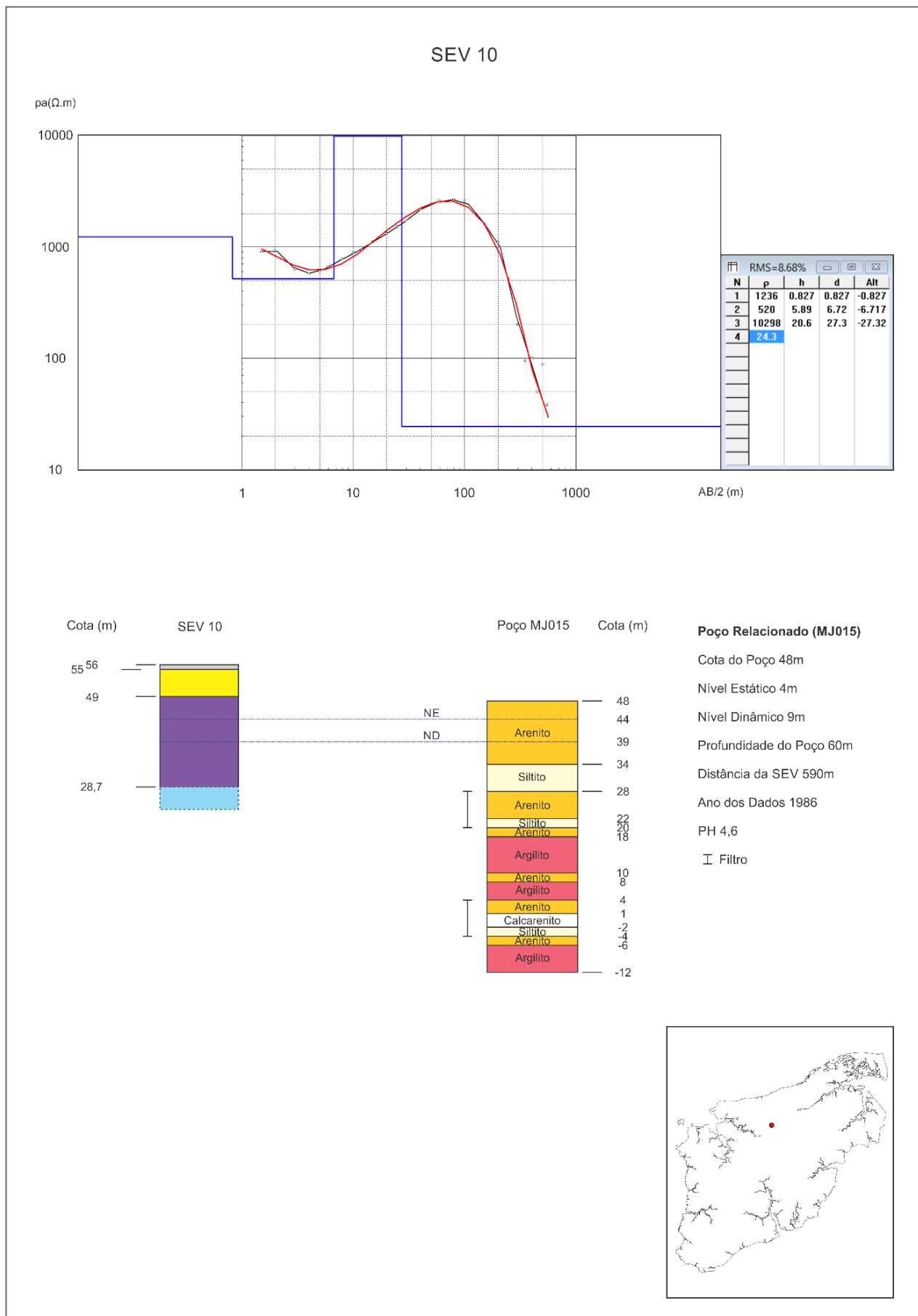
ND



#### Poço Relacionado (BE007)

- Cota do Poço 18m
- Nível Estático 7m
- Nível Dinâmico 18m
- Profundidade do Poço 70m
- Distância da SEV 240m
- Ano dos Dados 2013
- PH 5,4
- ┌ Filtro

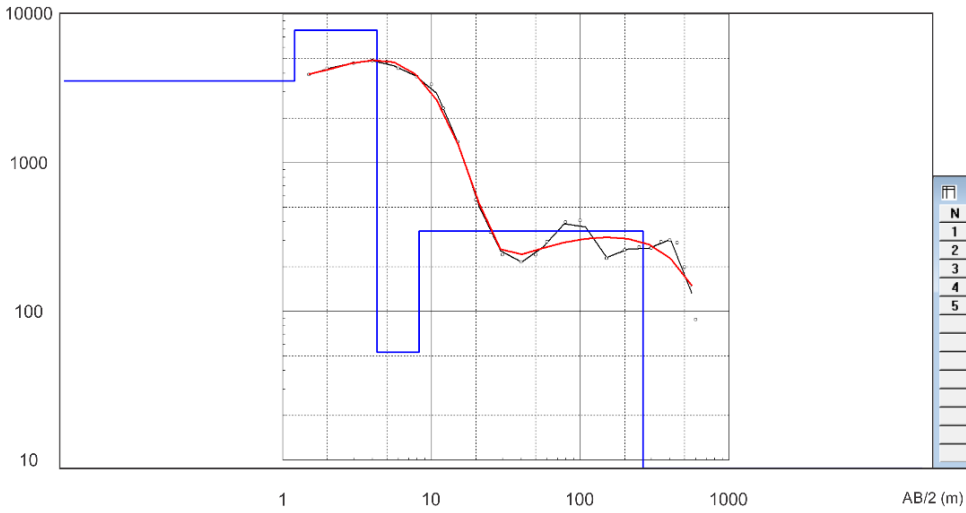






### SEV 11

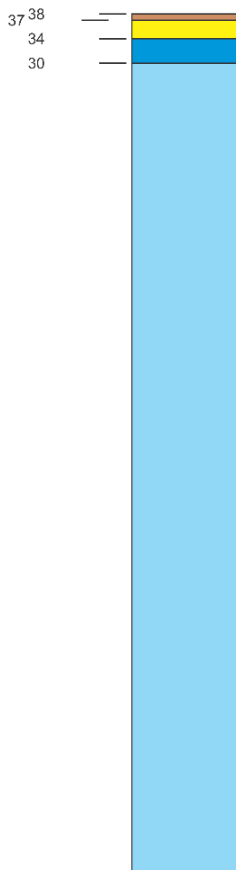
$\rho_a(\Omega.m)$



RMS=14.1%

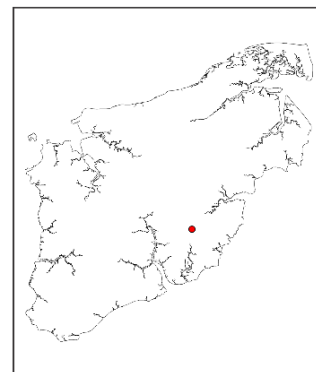
N	p	h	d	Alt
1	35.7	1.2	1.2	-1.204
2	781	3.11	4.31	-4.309
3	5.32	3.96	8.26	-8.265
4	34.7	255	263	-263.4
5	0.216			

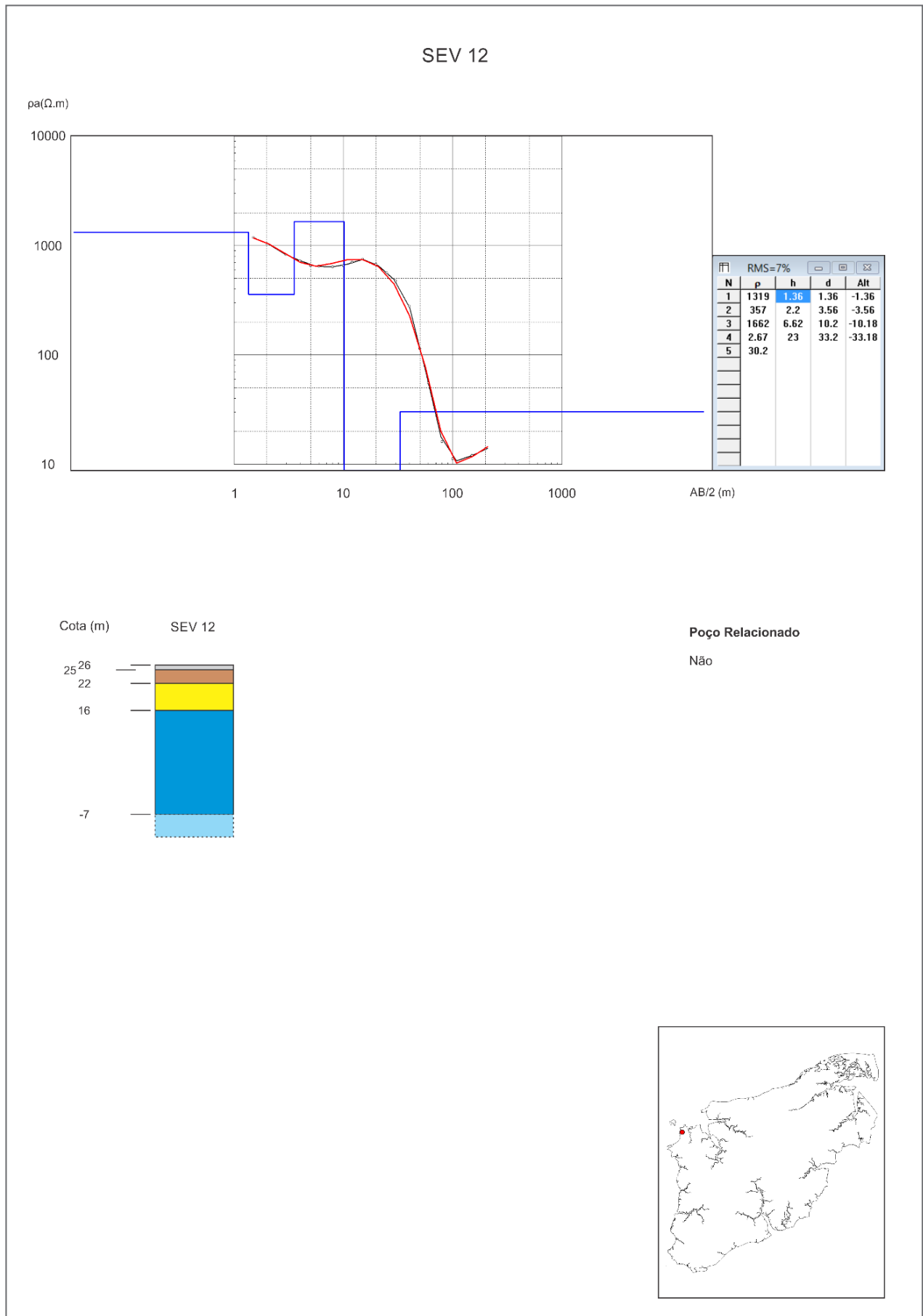
Cota (m) SEV 11

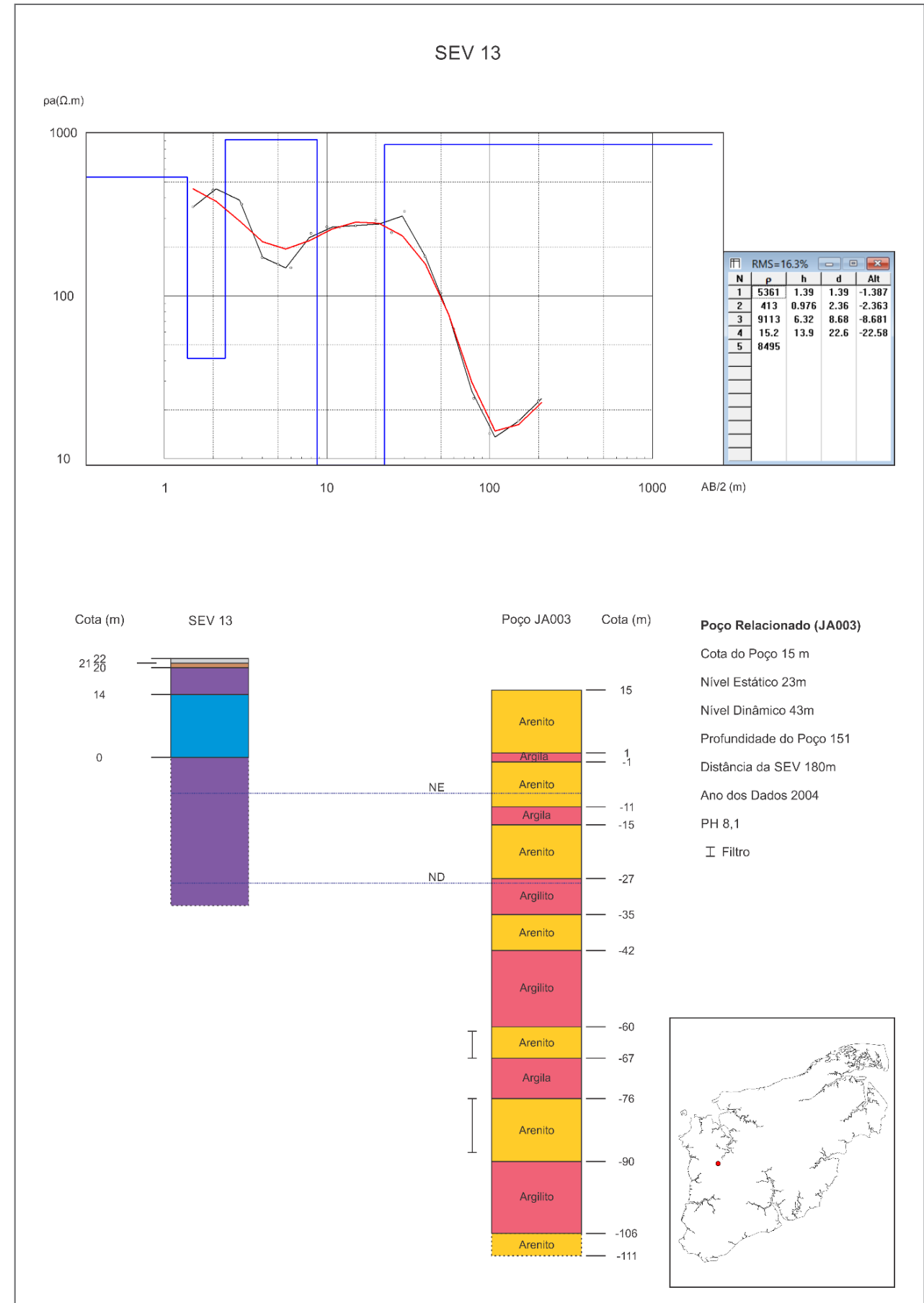


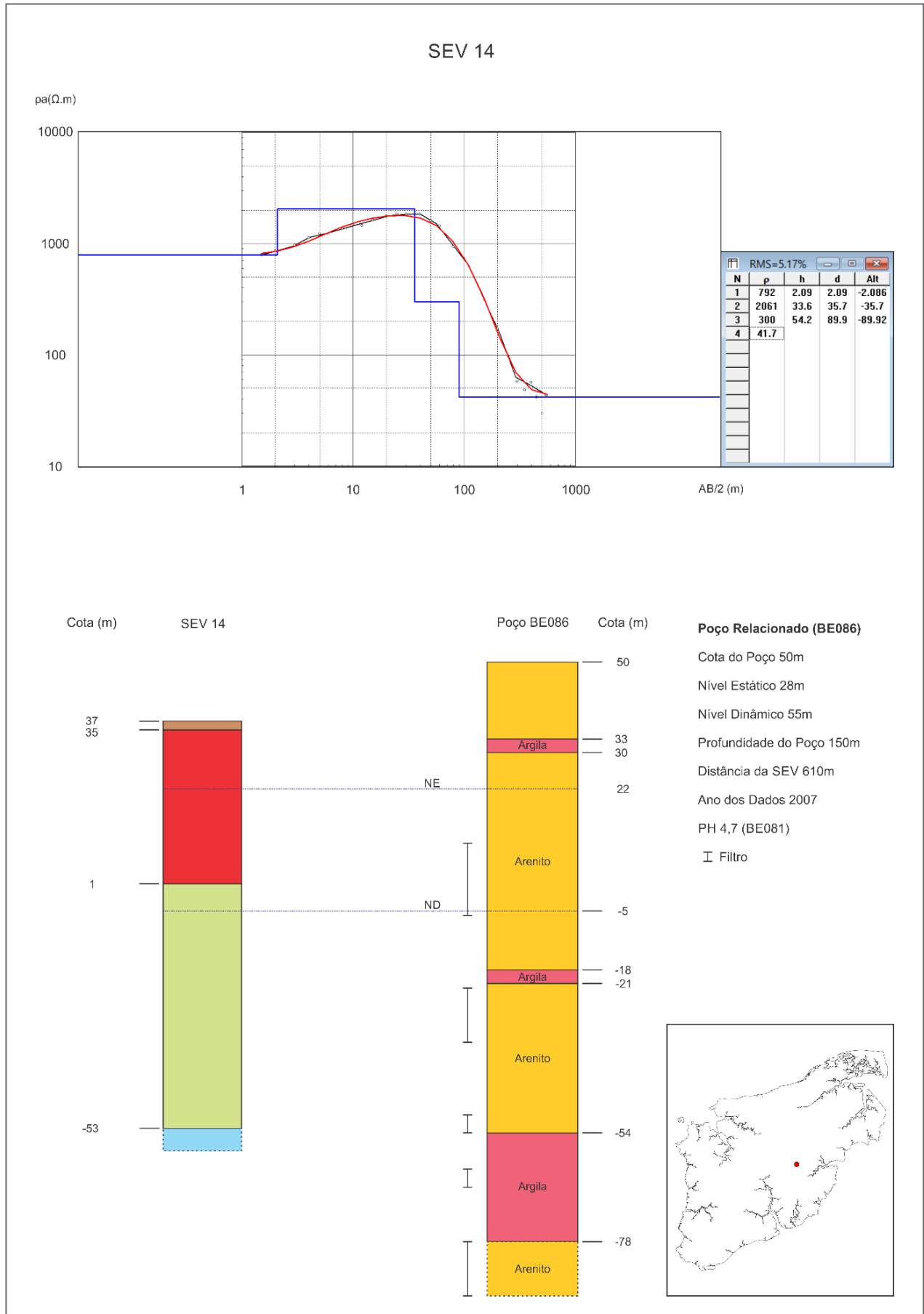
Poço Relacionado

Não





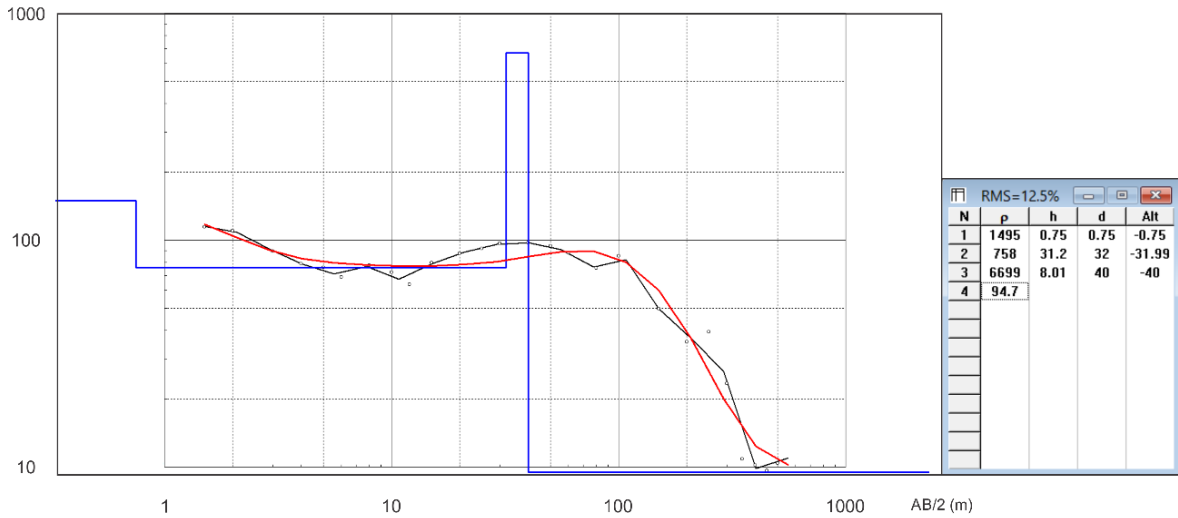






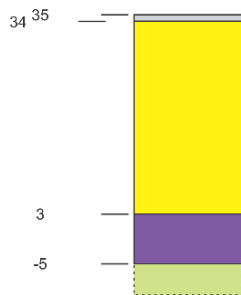
### SEV 15

pa(Ω.m)



Cota (m)

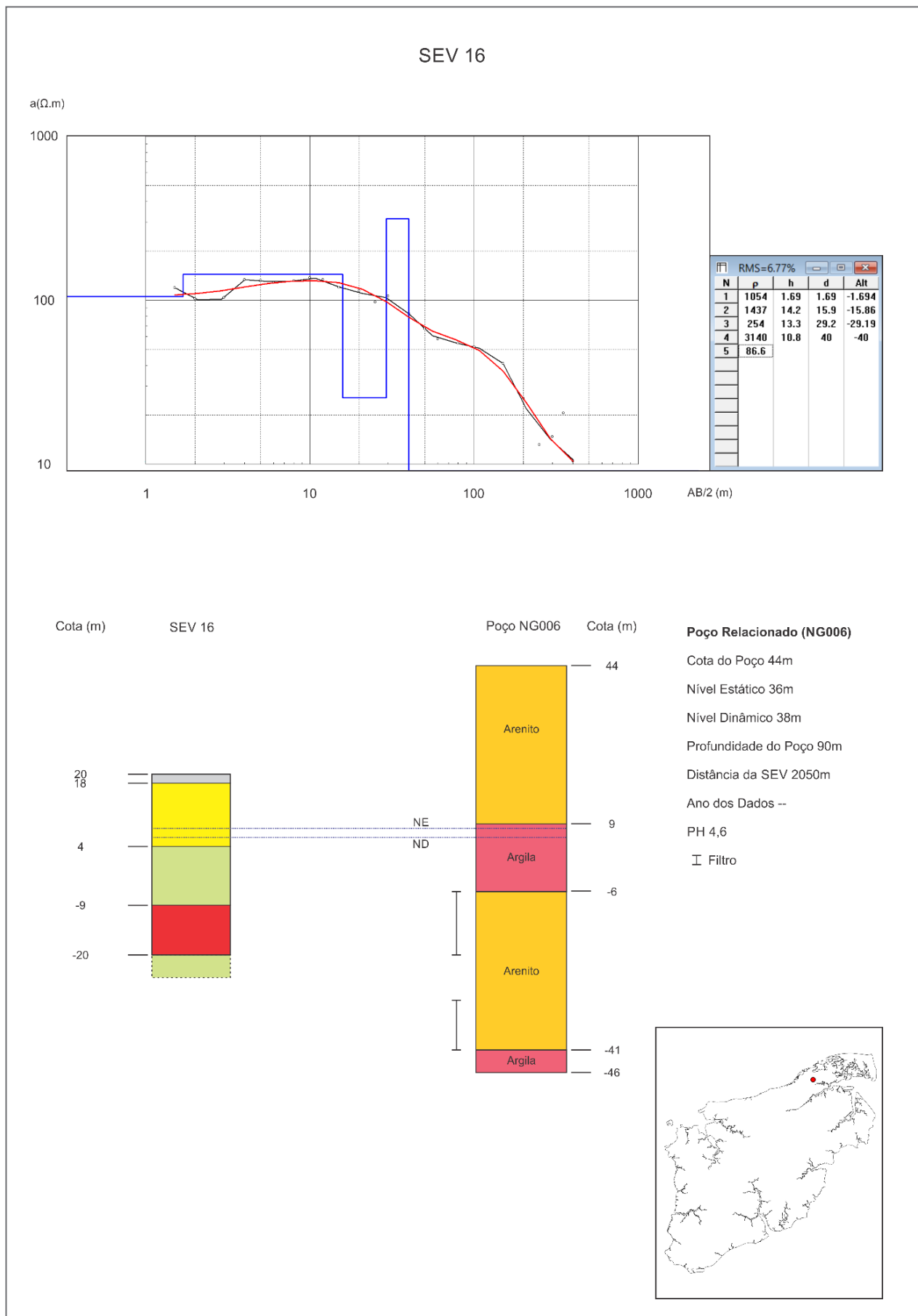
SEV 15



Poço Relacionado

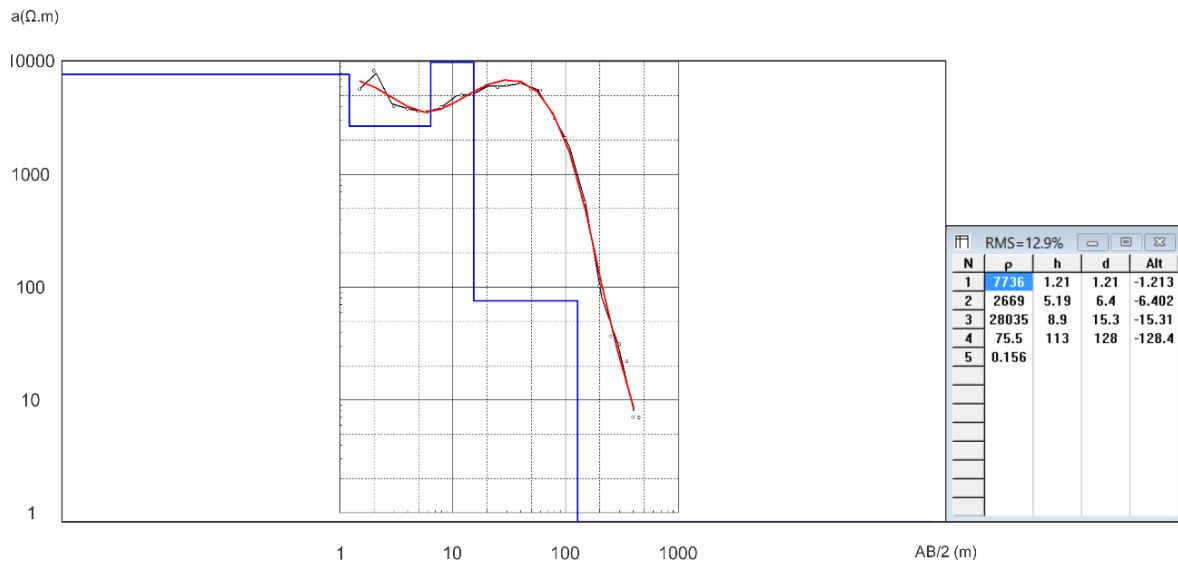
Não







### SEV 17



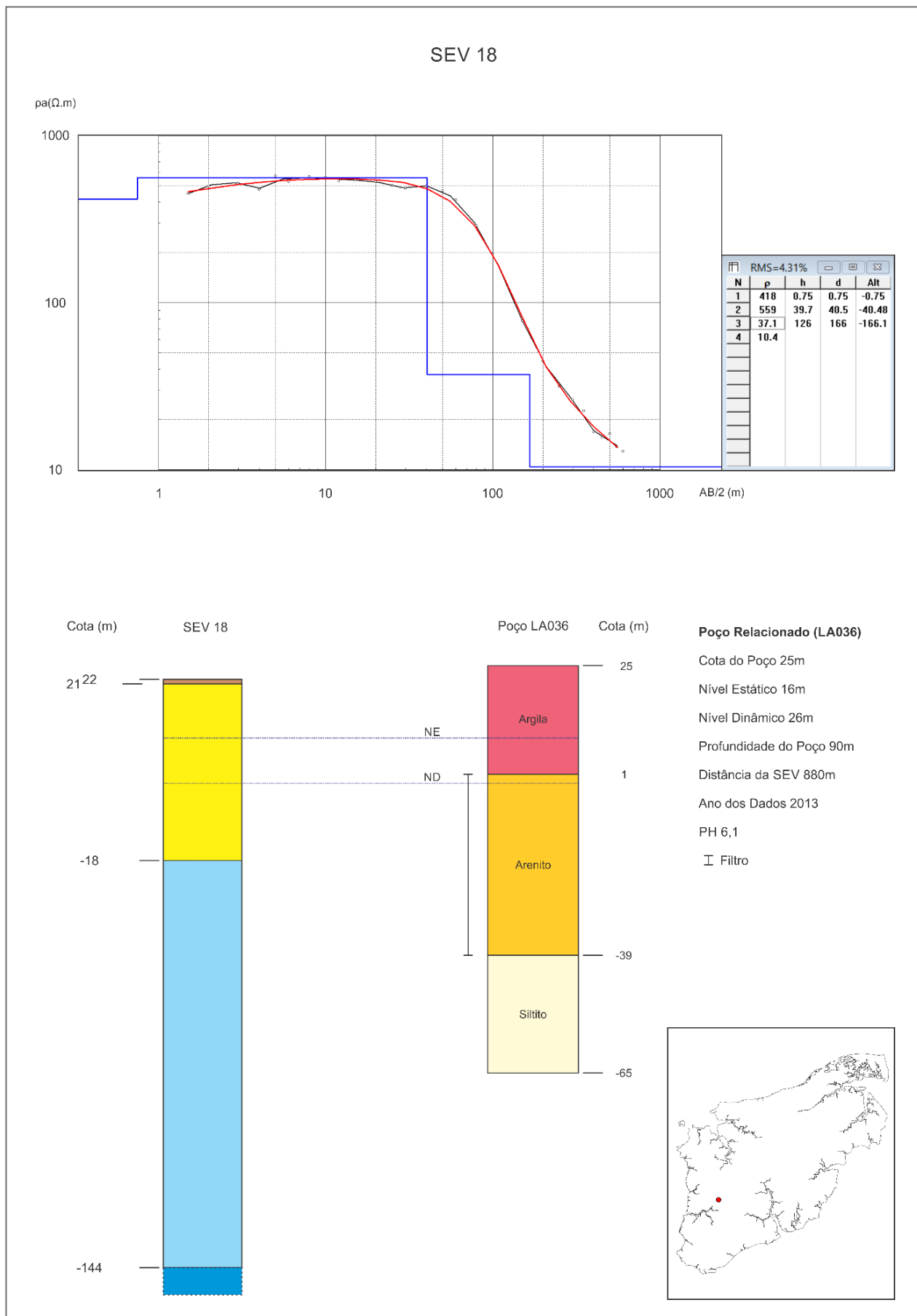
Cota (m) SEV 17



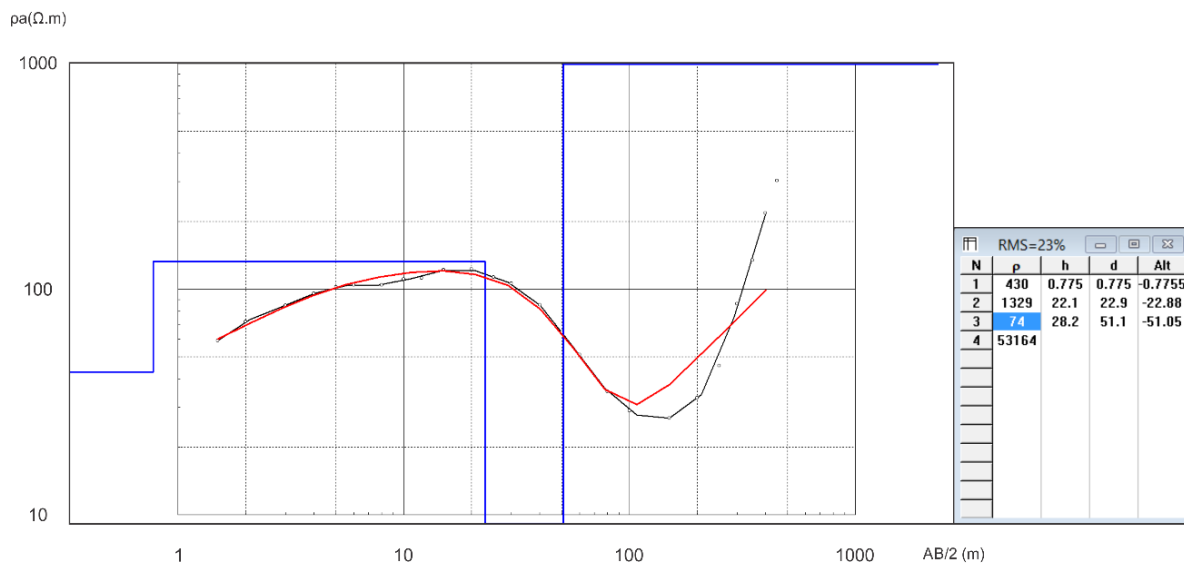
**Poço Relacionado**

Não

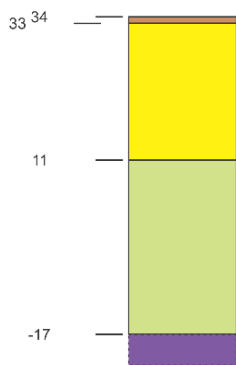




### SEV 19



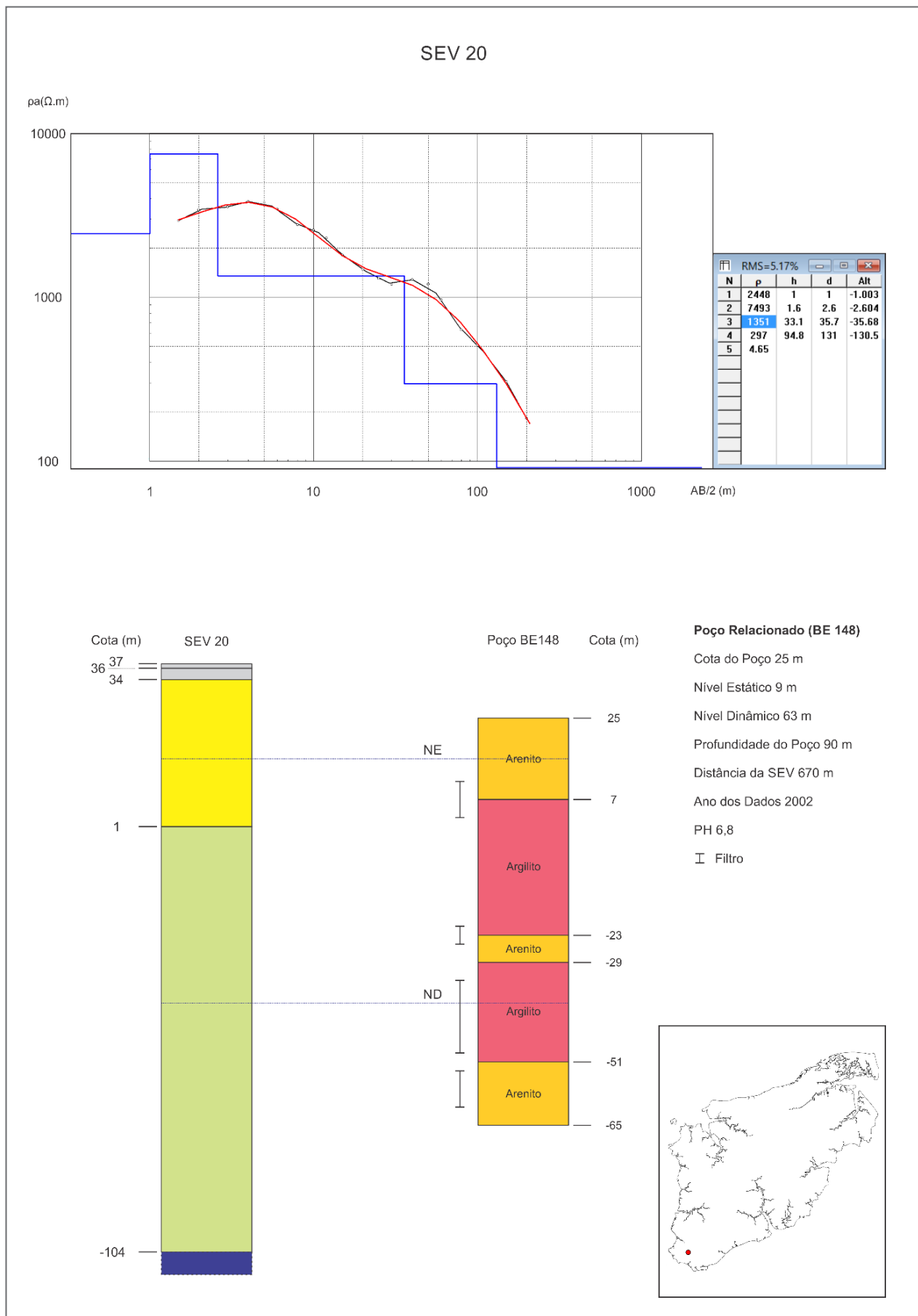
Cota (m) SEV 19

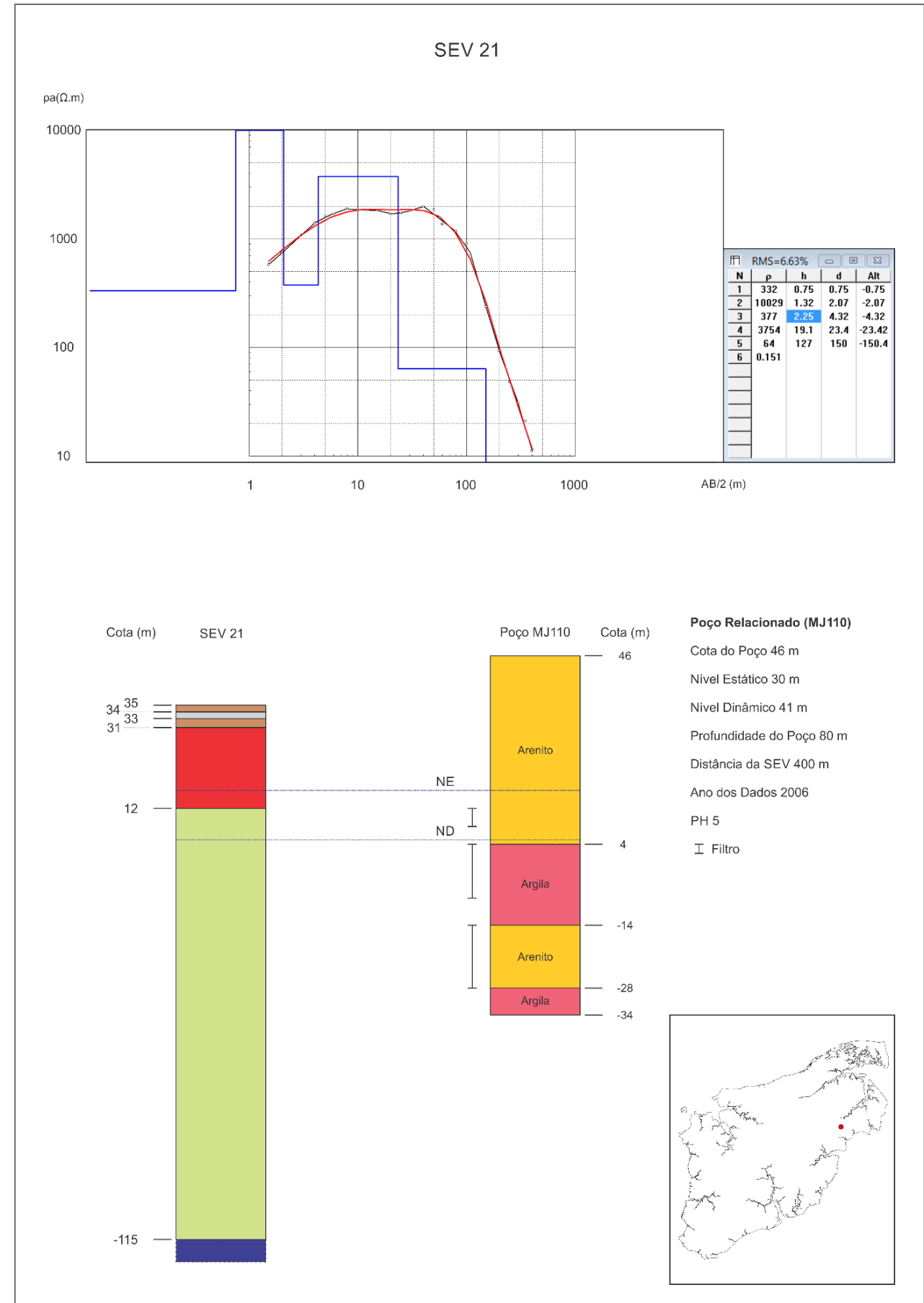


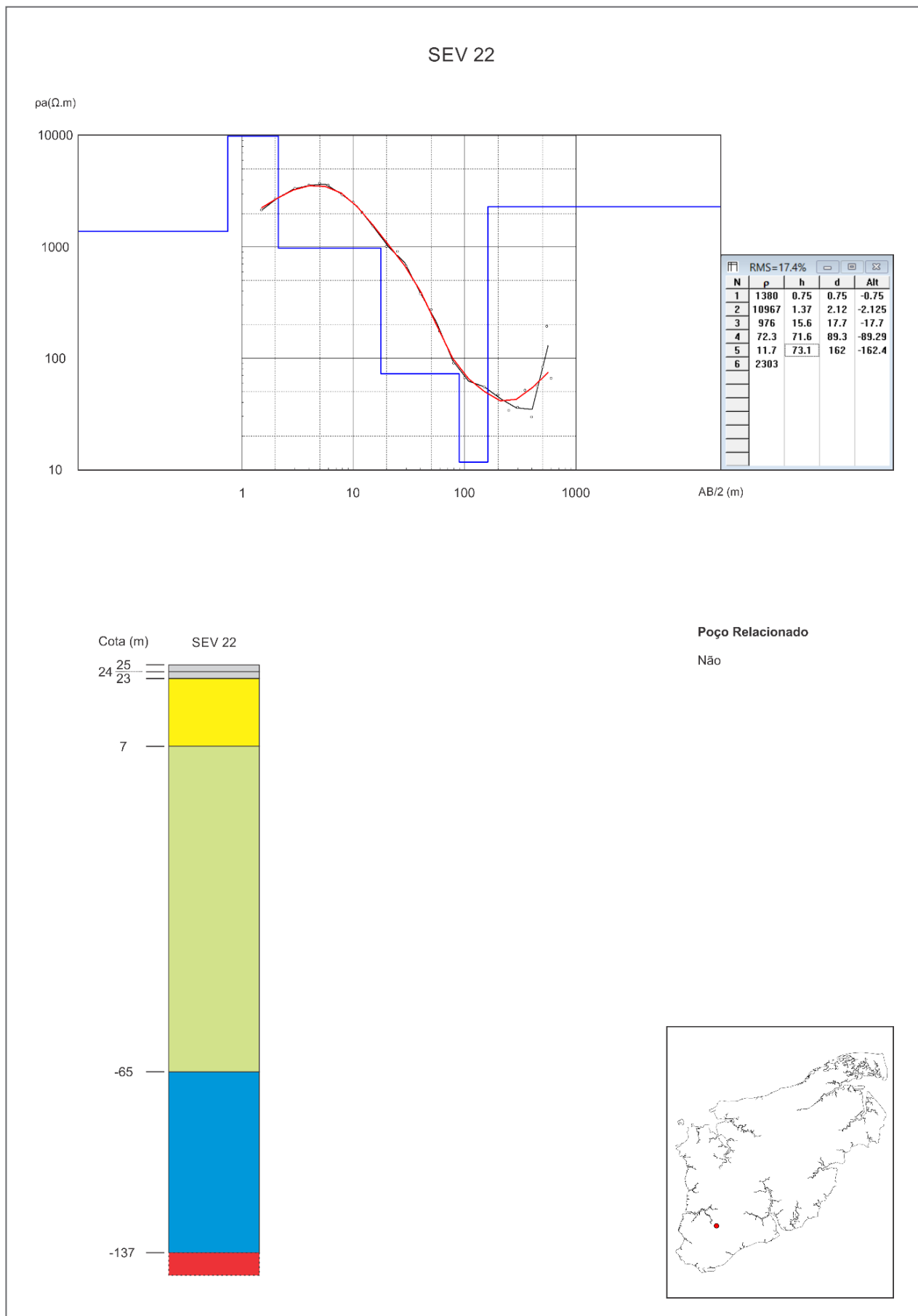
Poço Relacionado

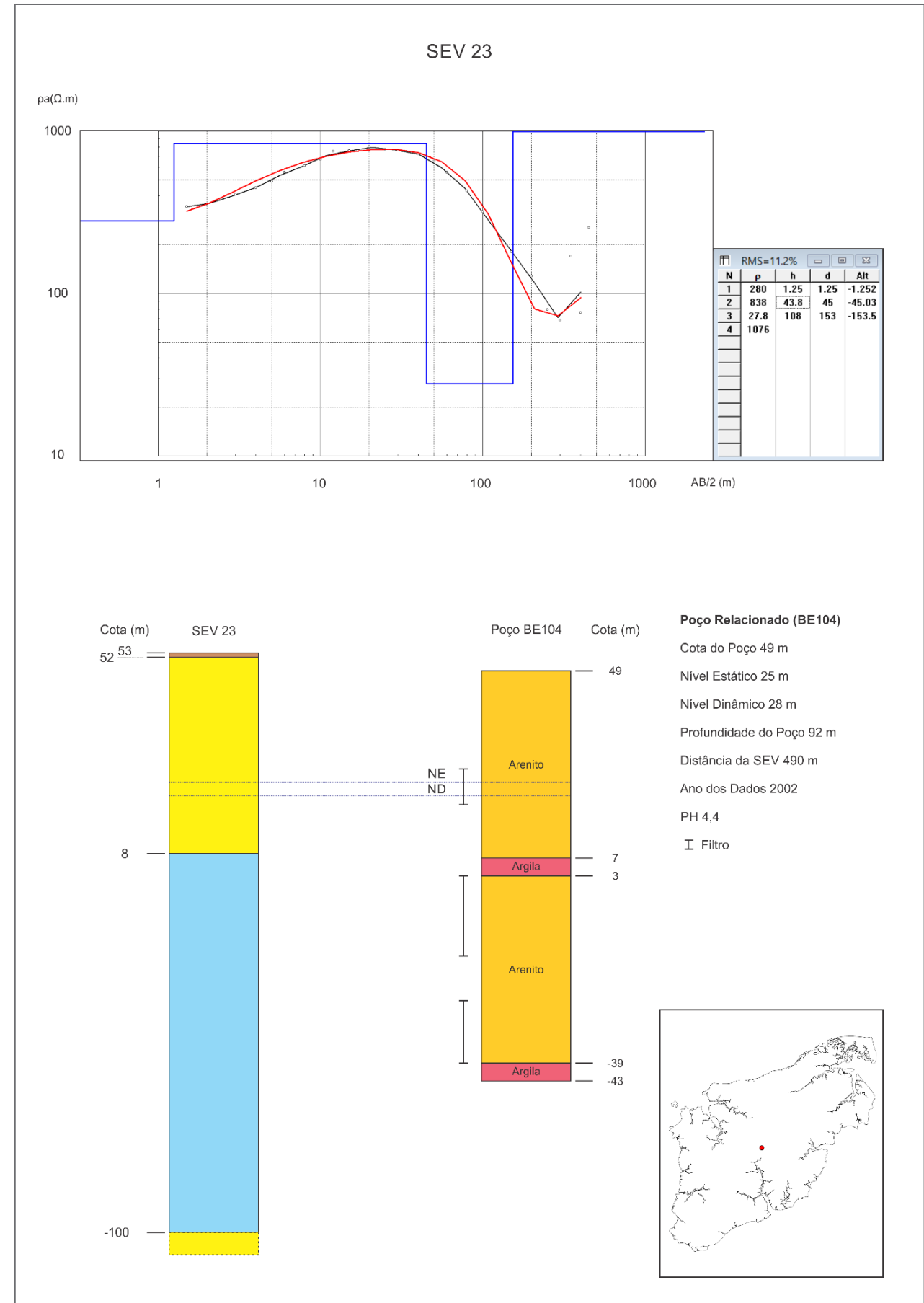
Não

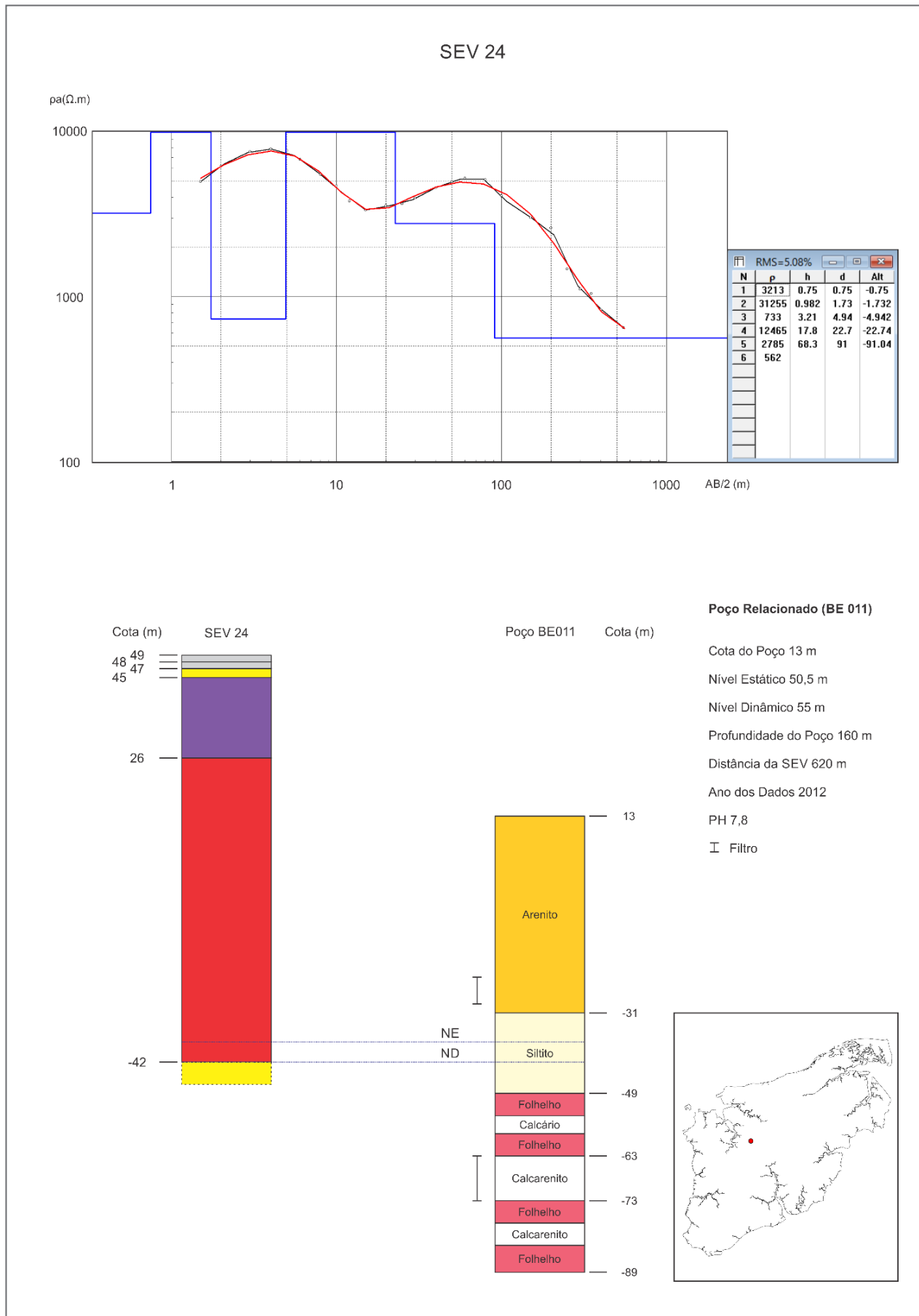


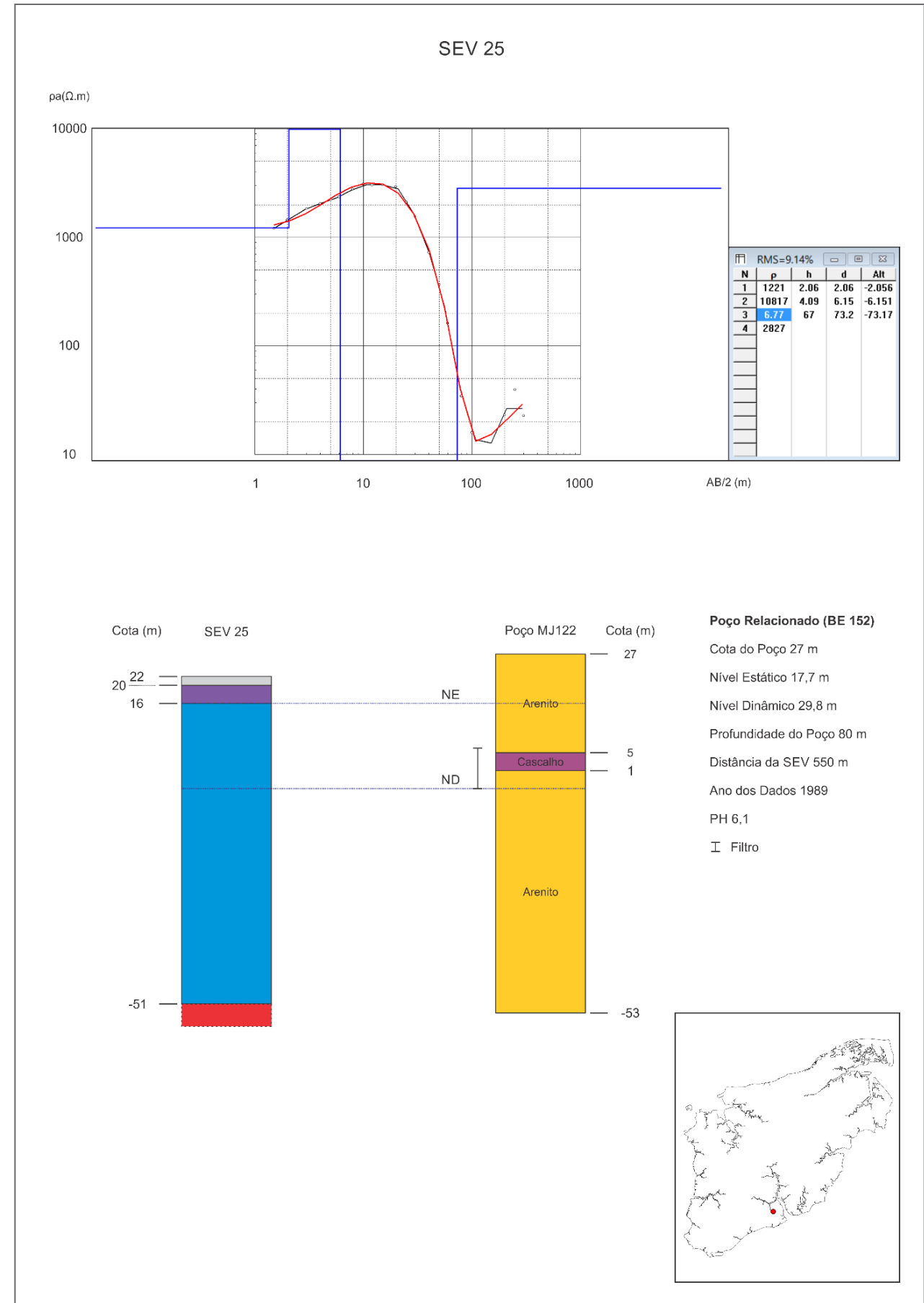


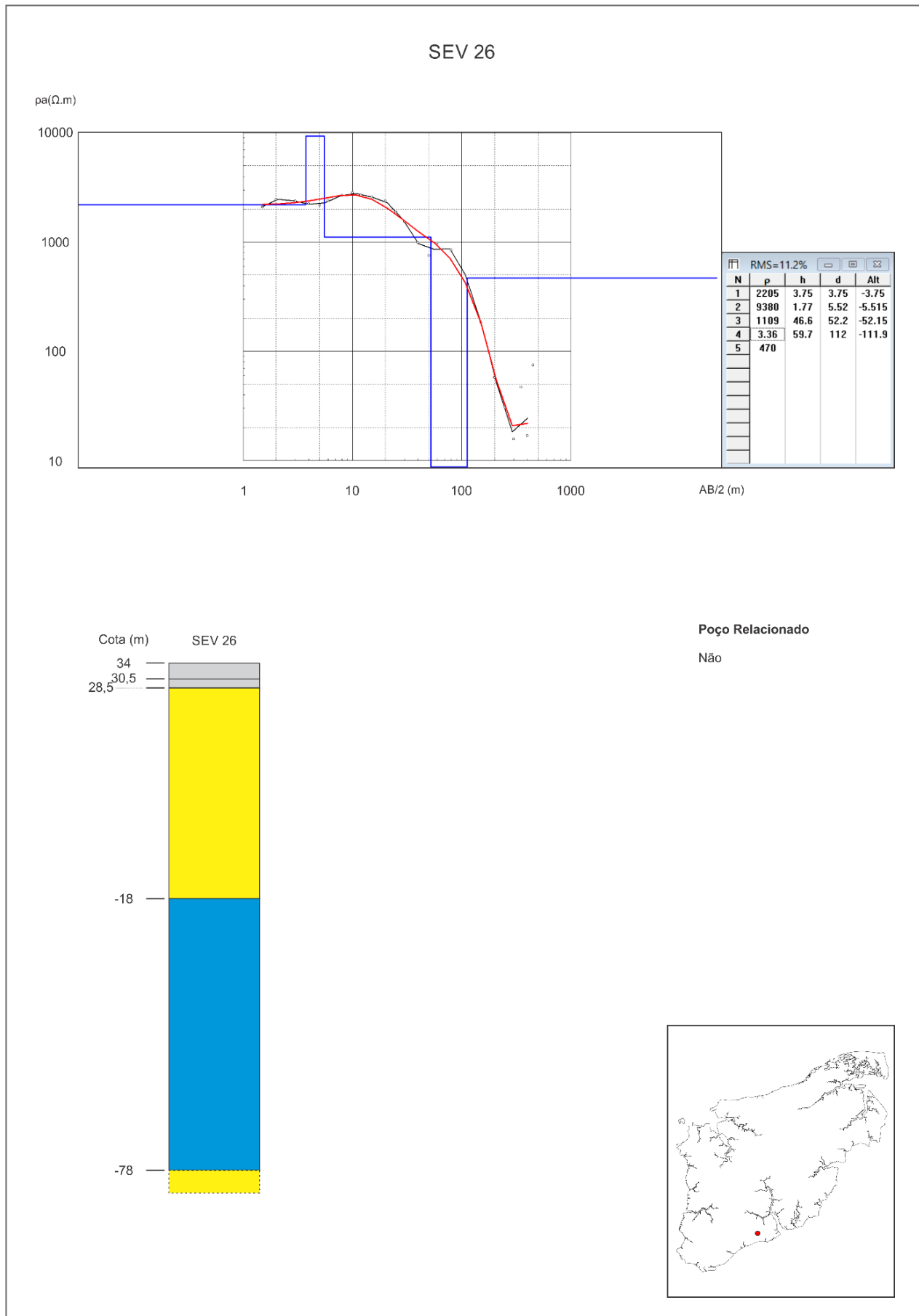






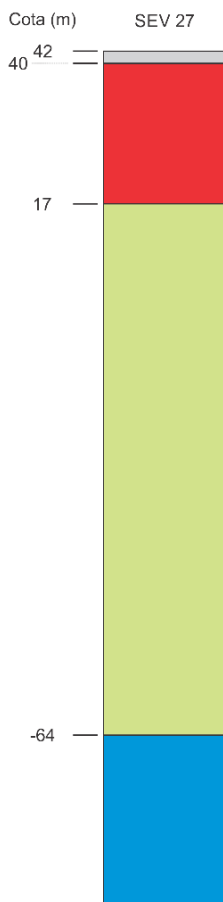
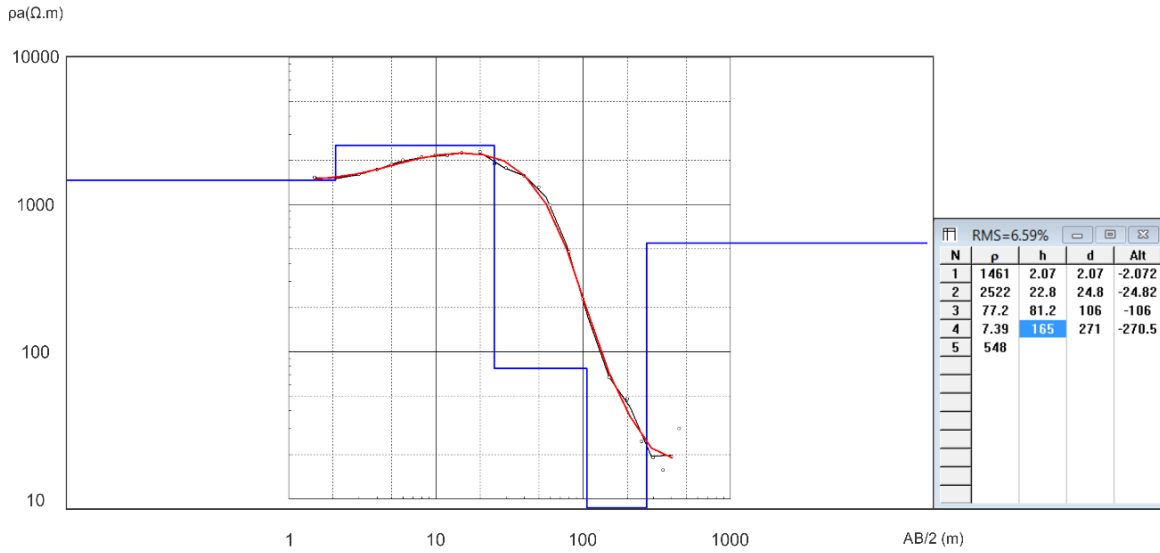






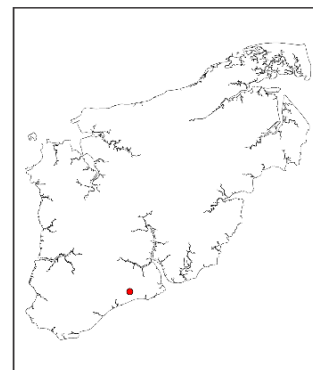


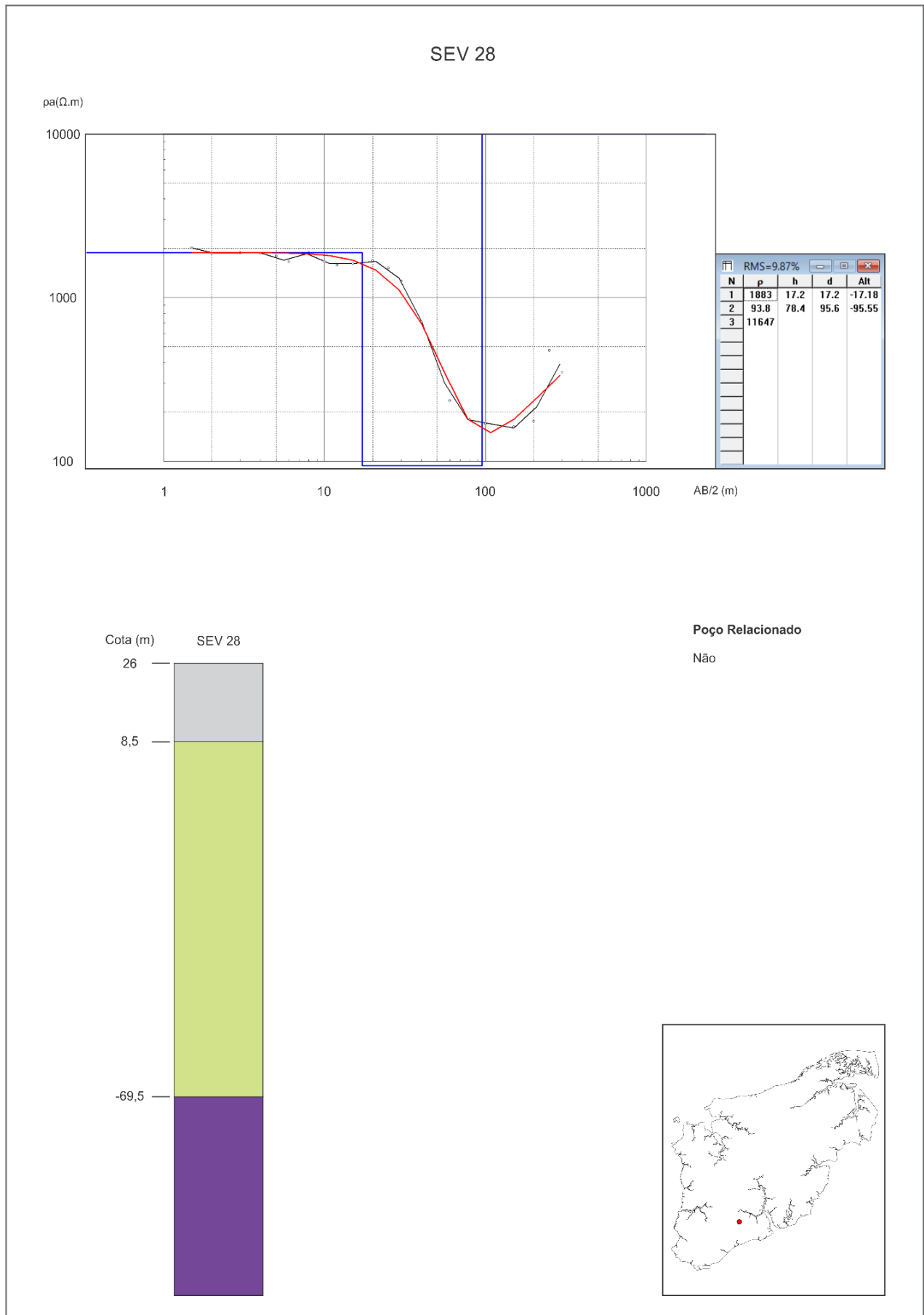
### SEV 27



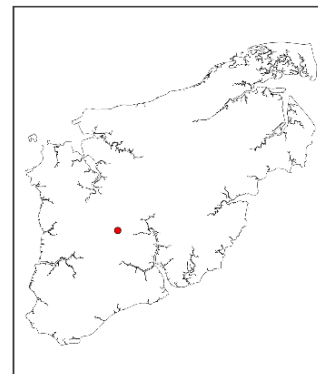
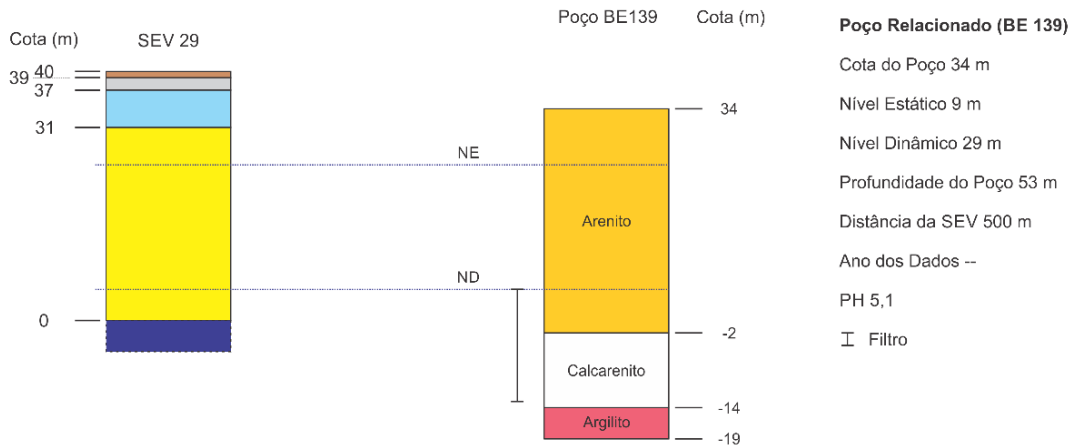
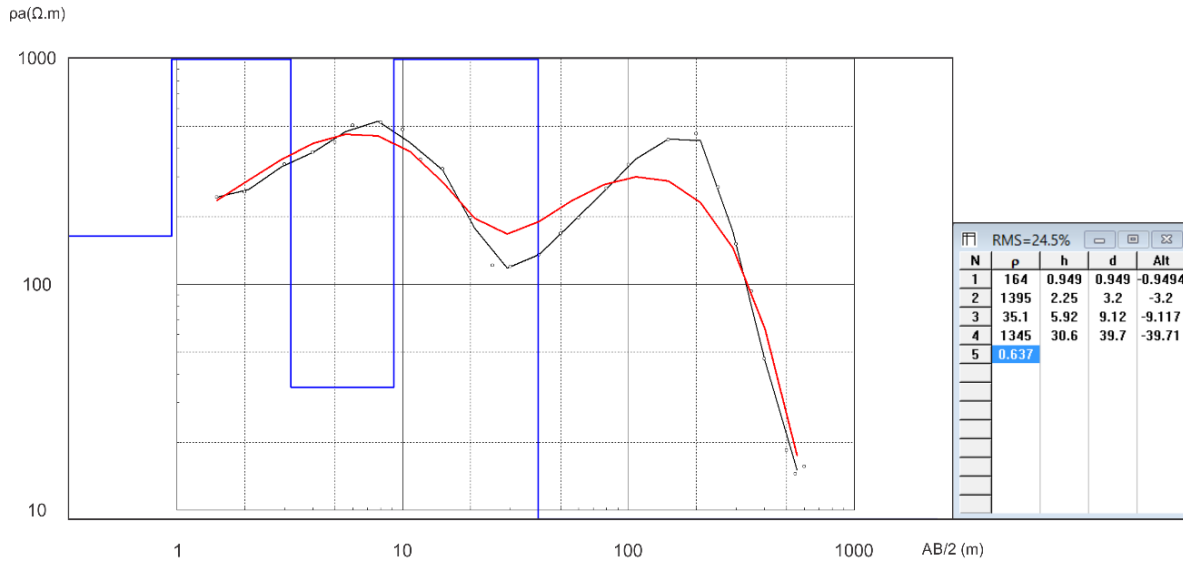
**Poço Relacionado**

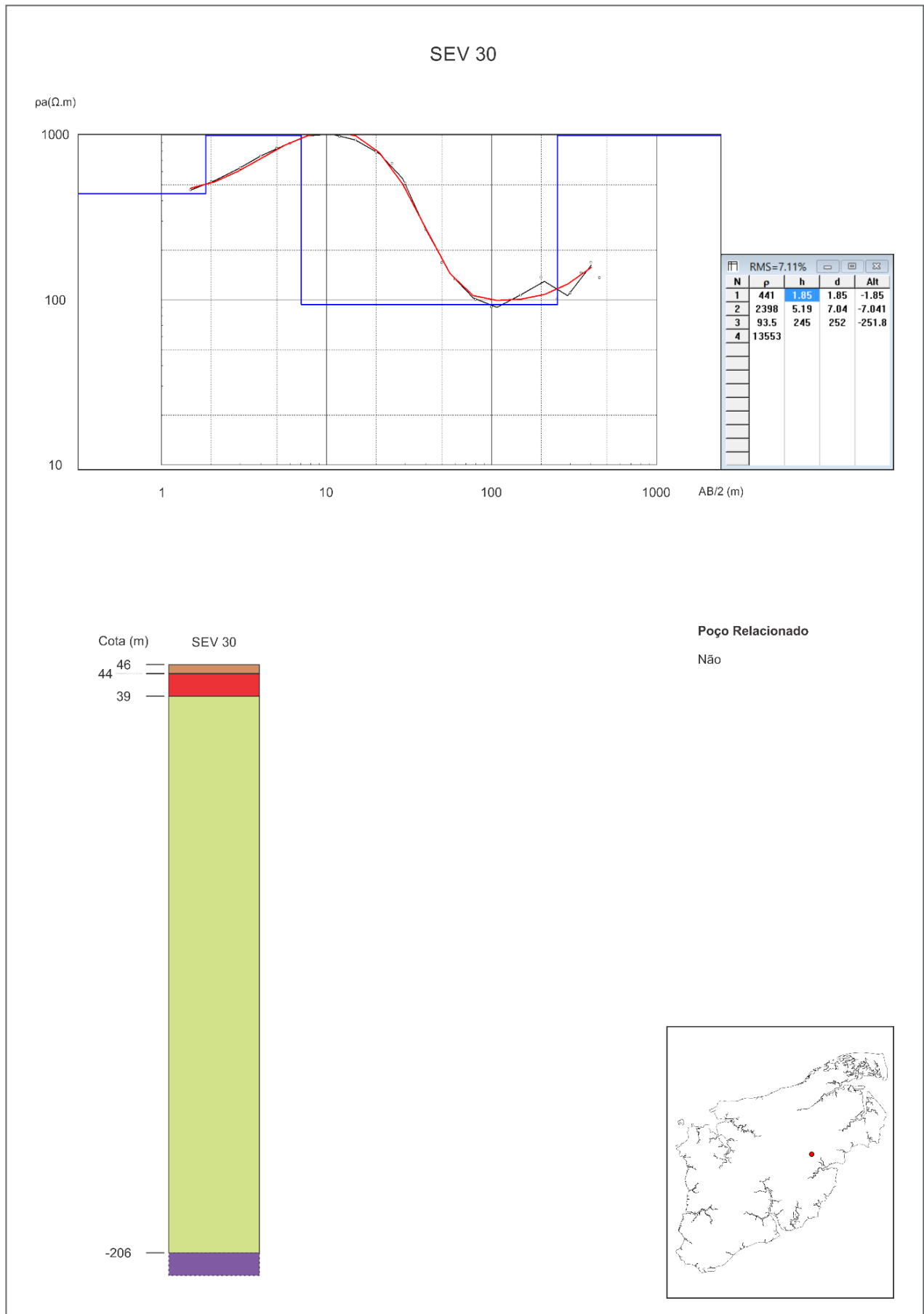
Não



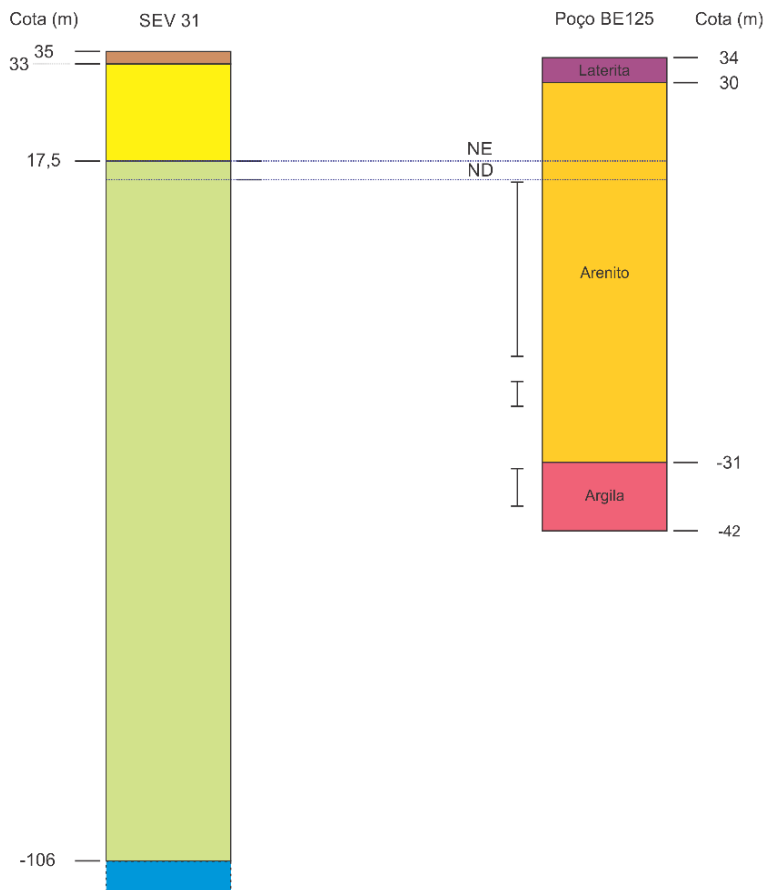
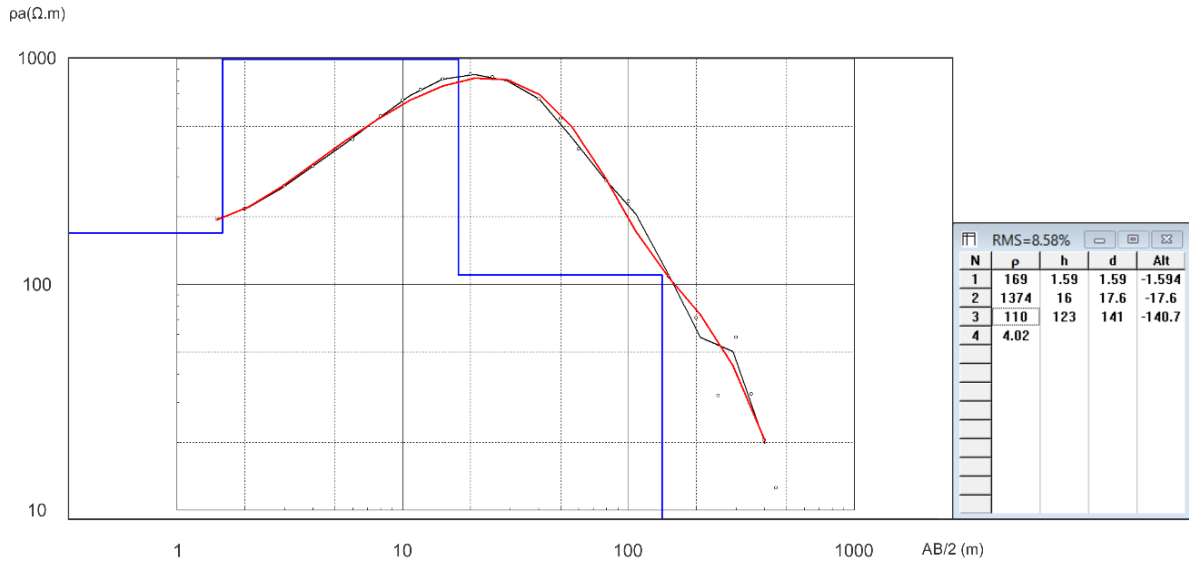


### SEV 29



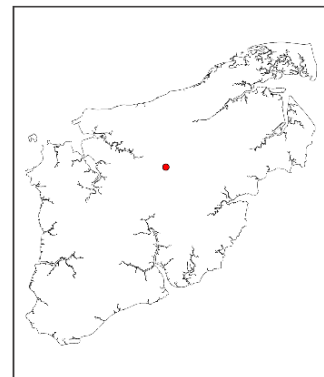


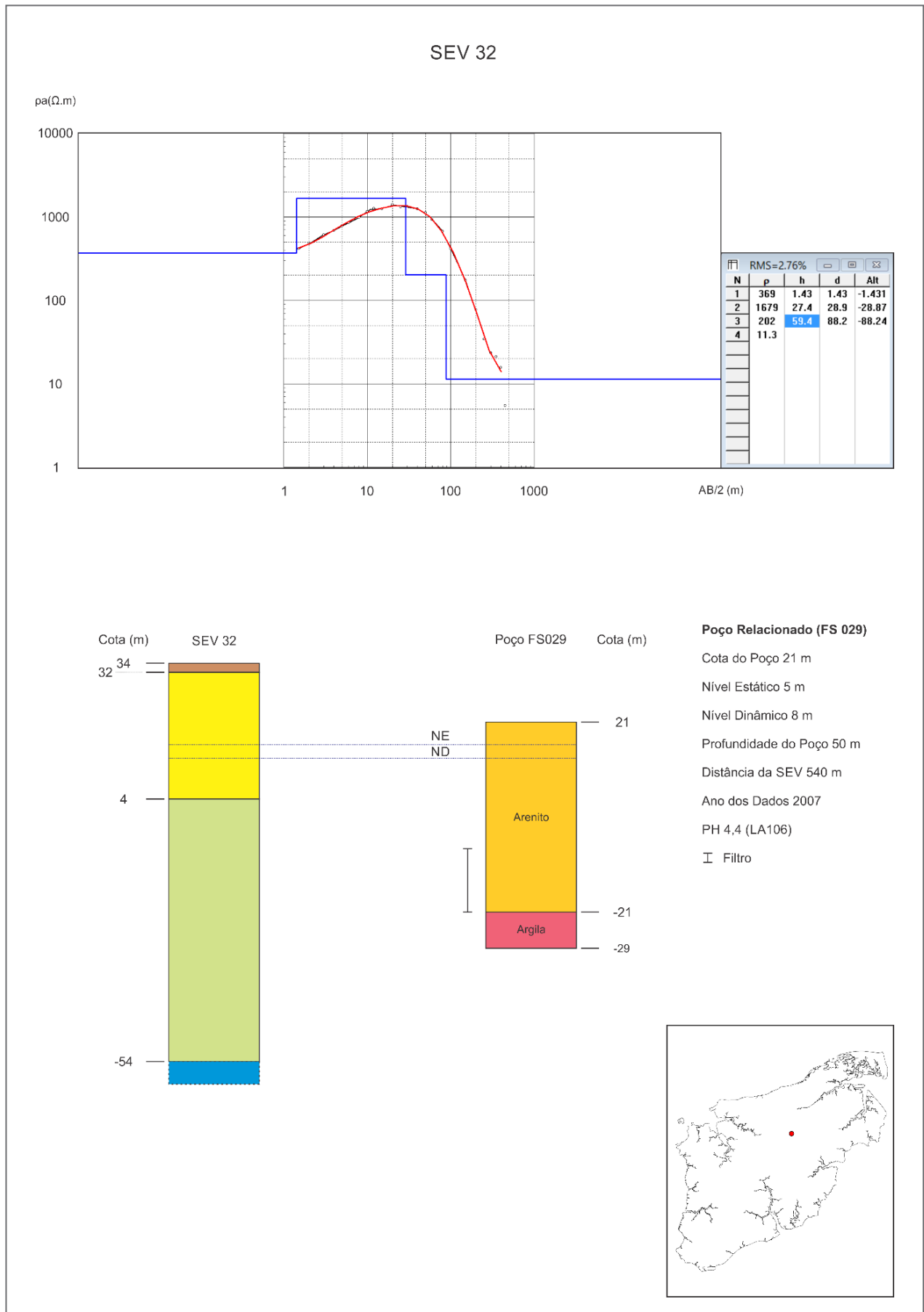
### SEV 31

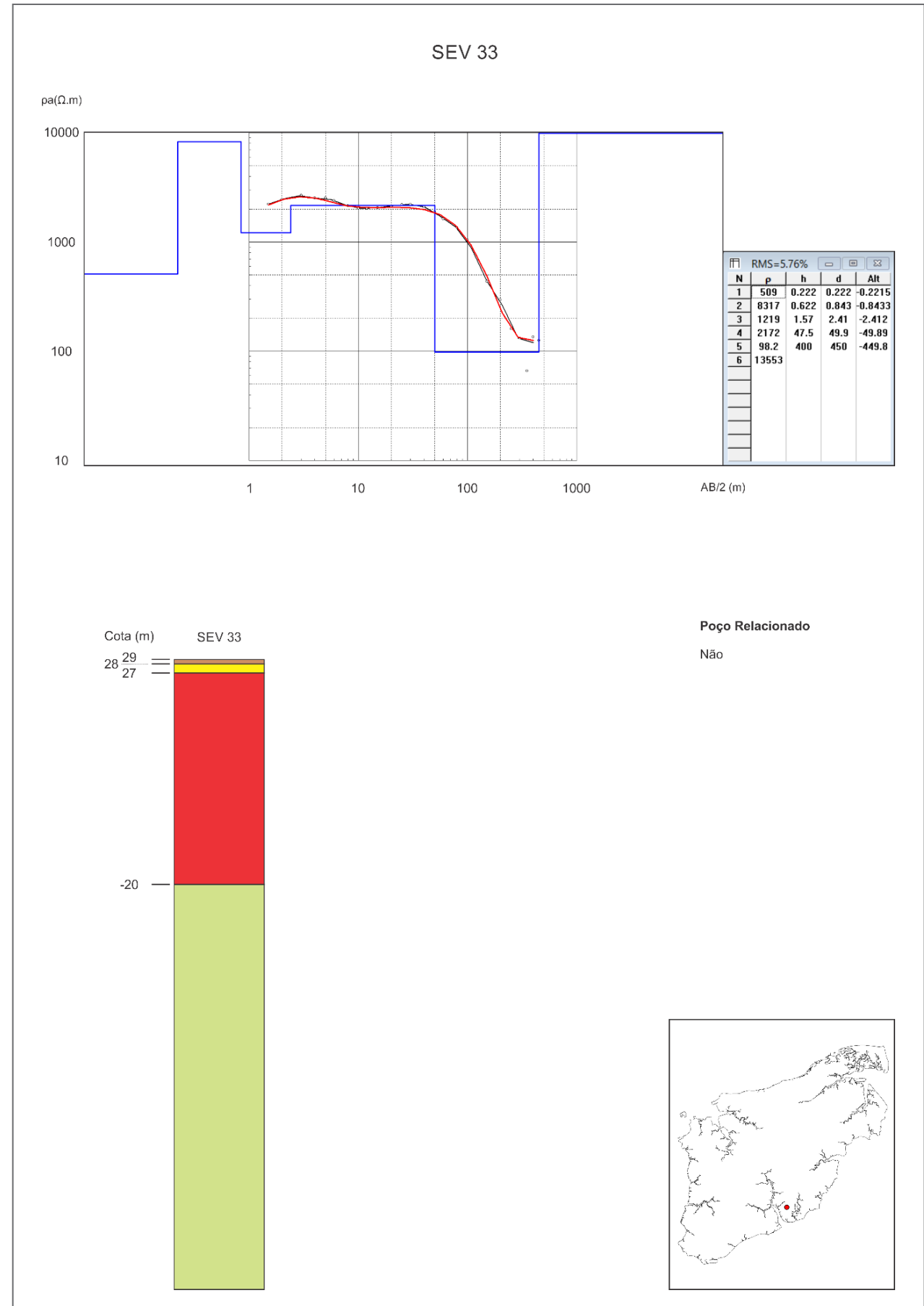


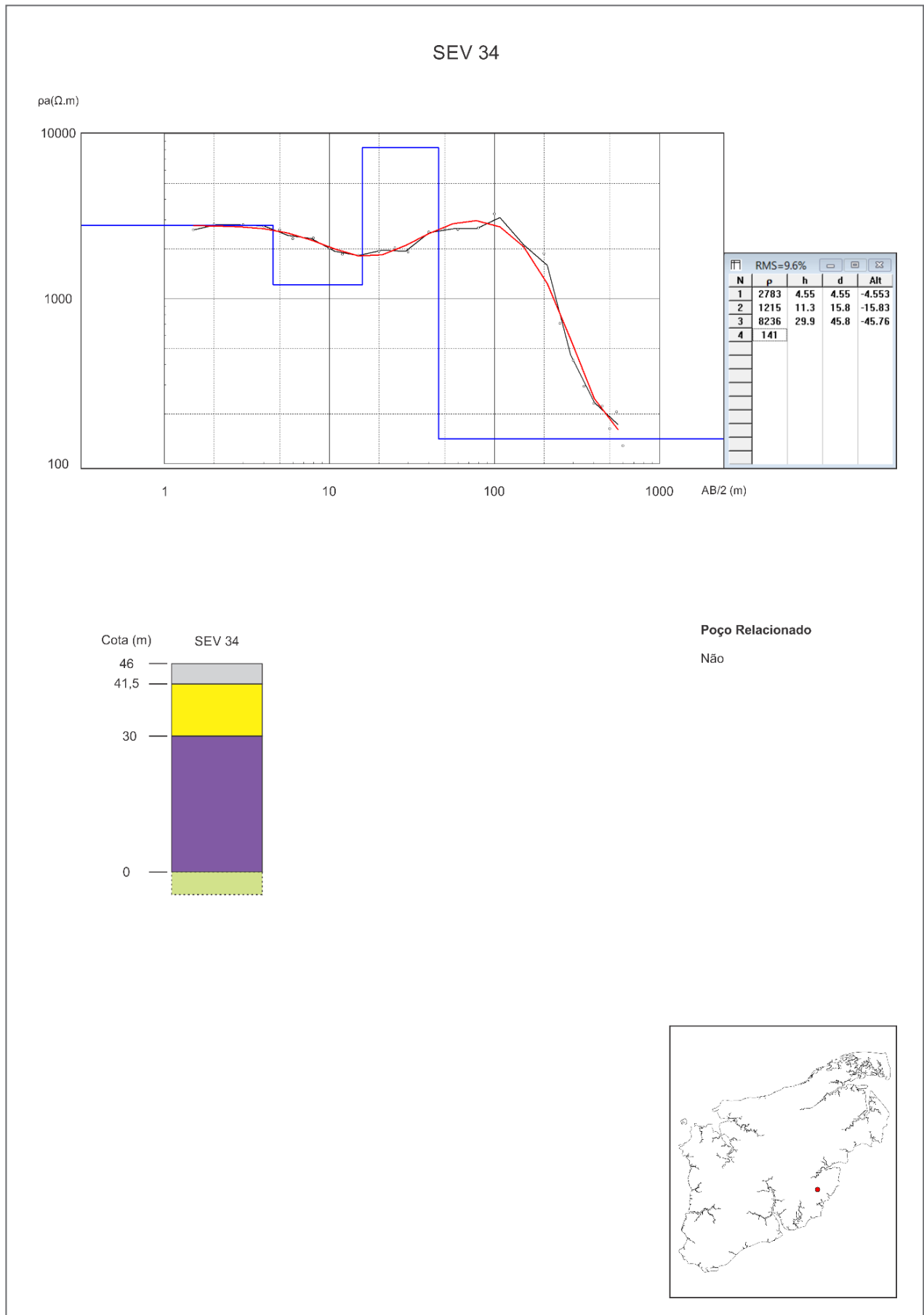
#### Poço Relacionado (BE 125)

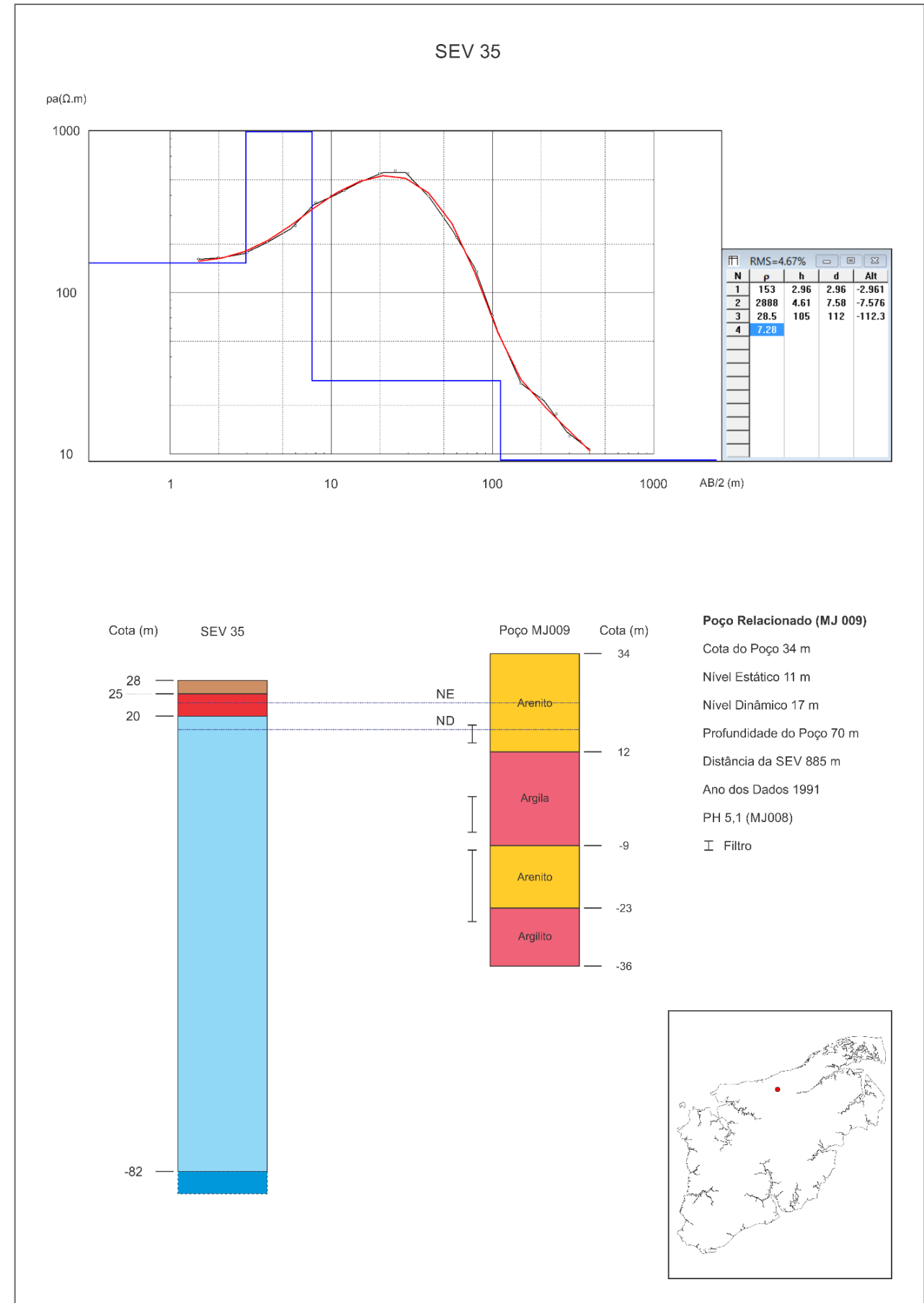
- Cota do Poço 34 m
- Nível Estático 16,5 m
- Nível Dinâmico 19,5 m
- Profundidade do Poço 76 m
- Distância da SEV 1100 m
- Ano dos Dados 2002
- PH 4,5
- ┃ Filtro

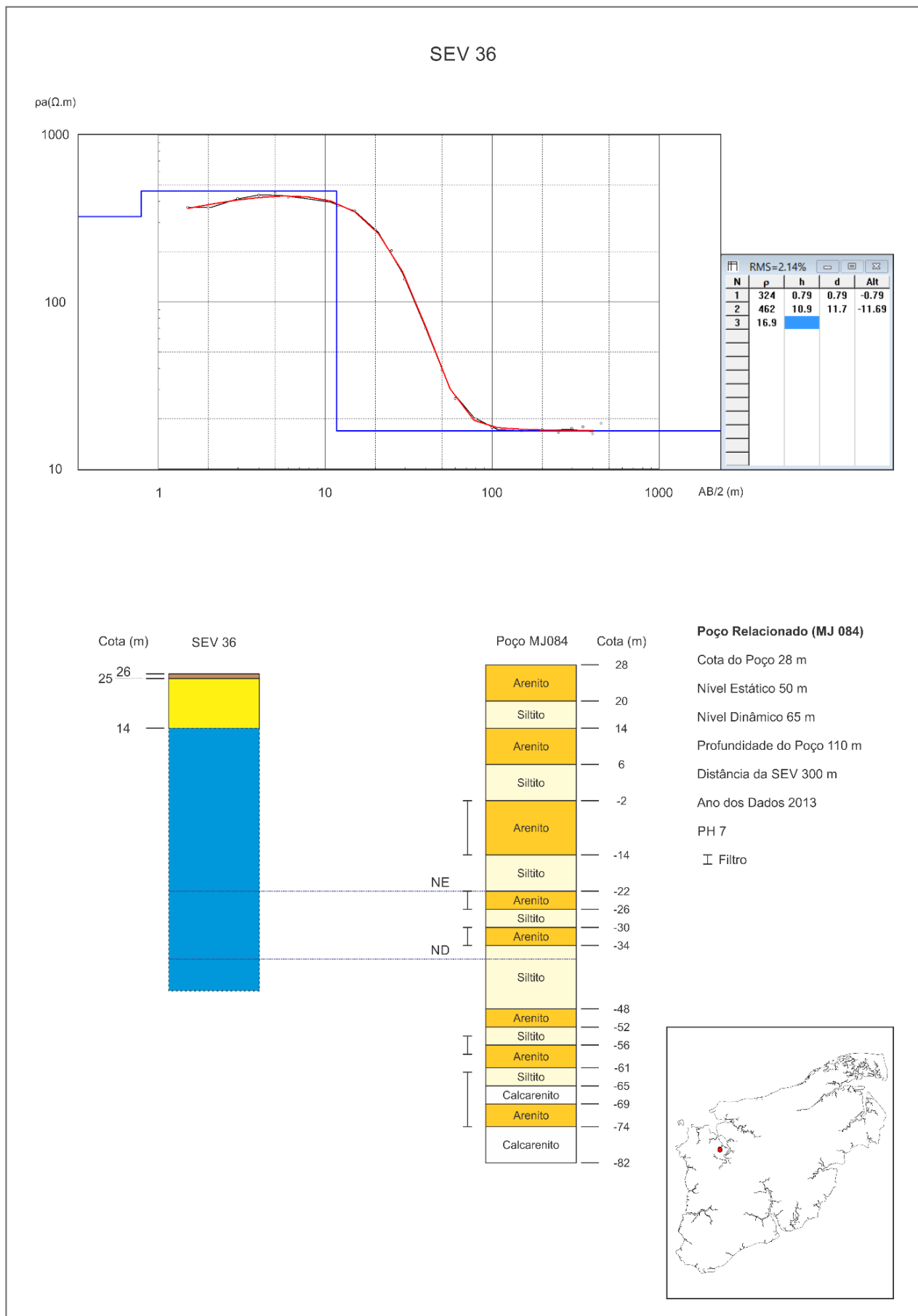


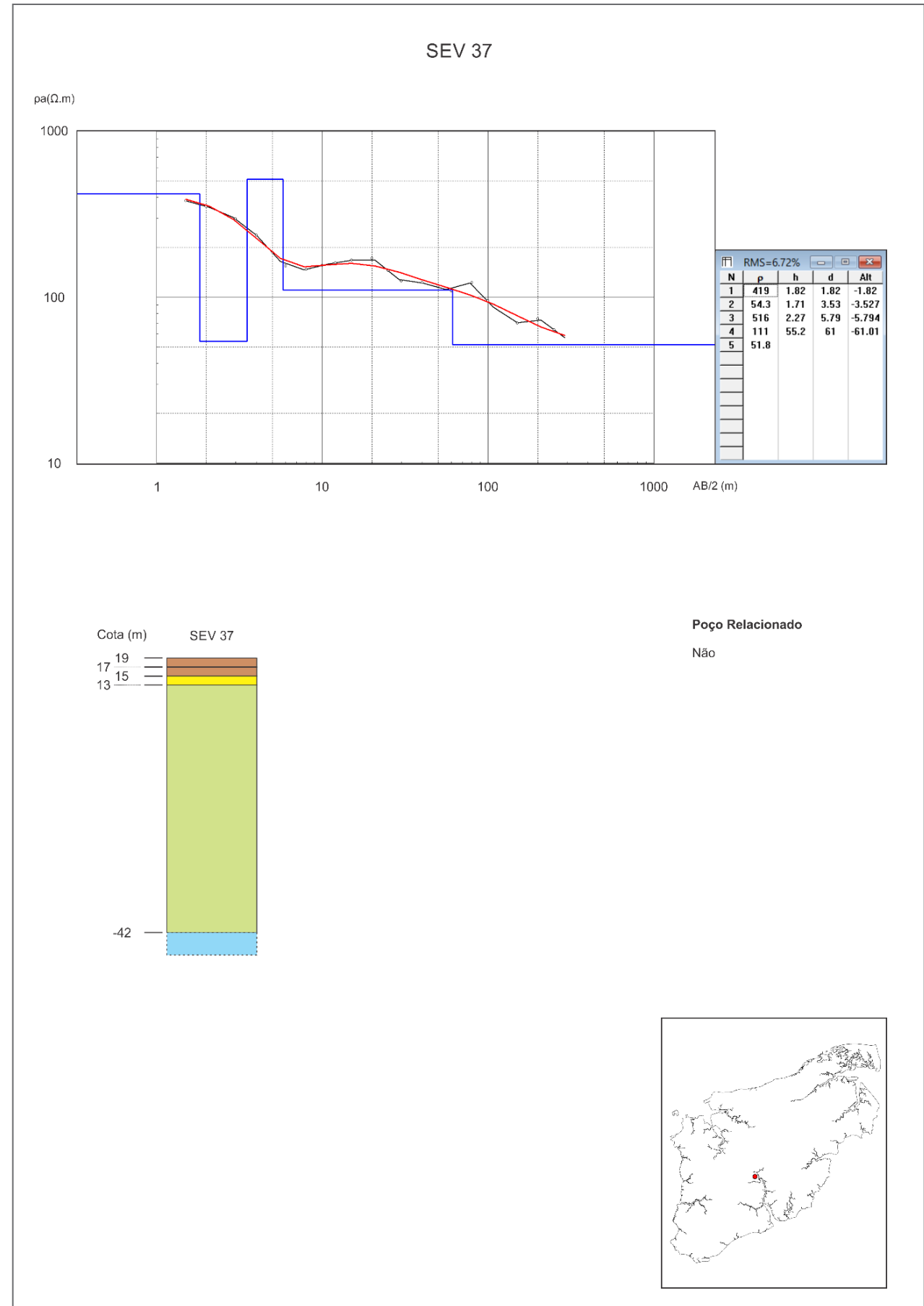


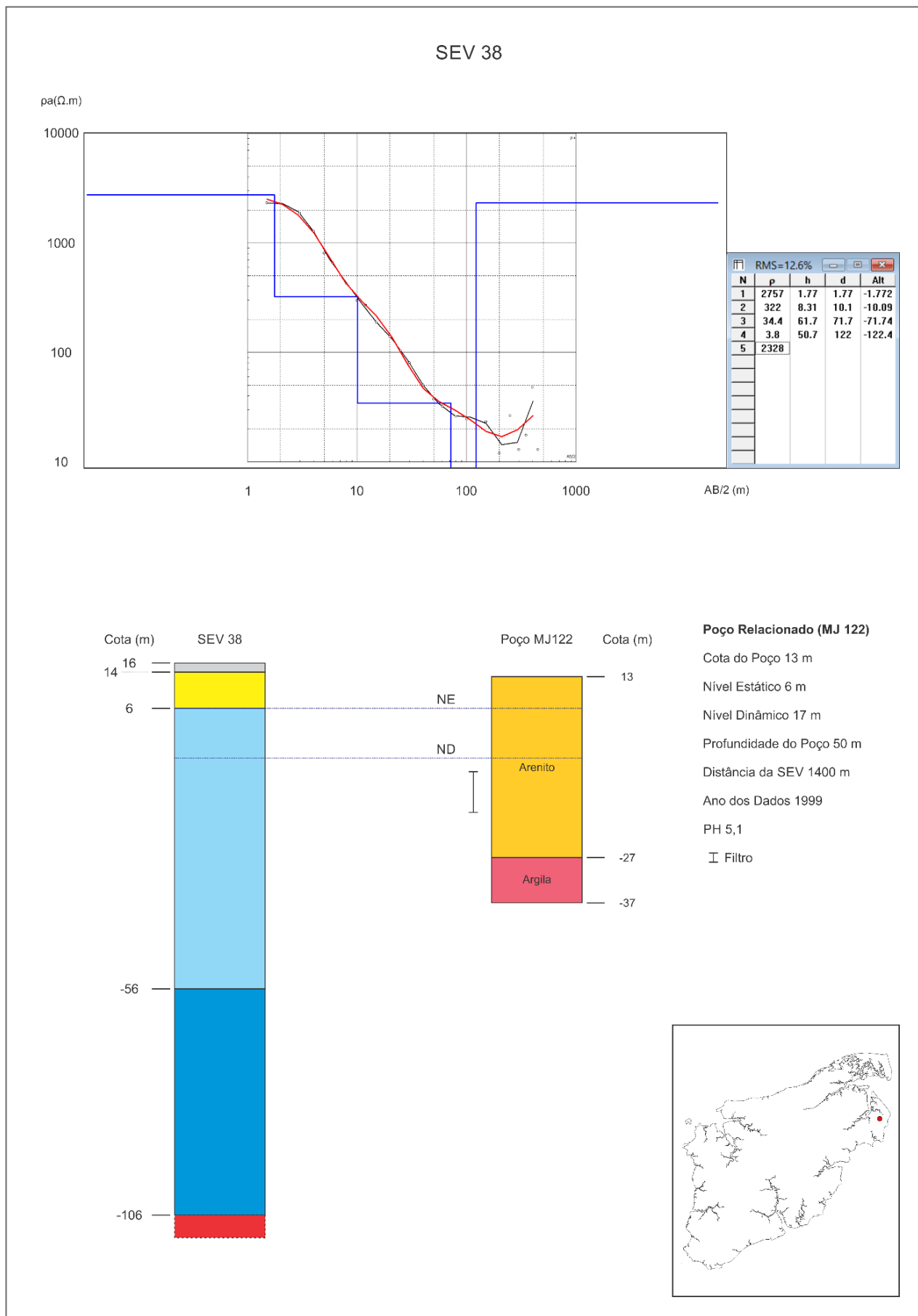




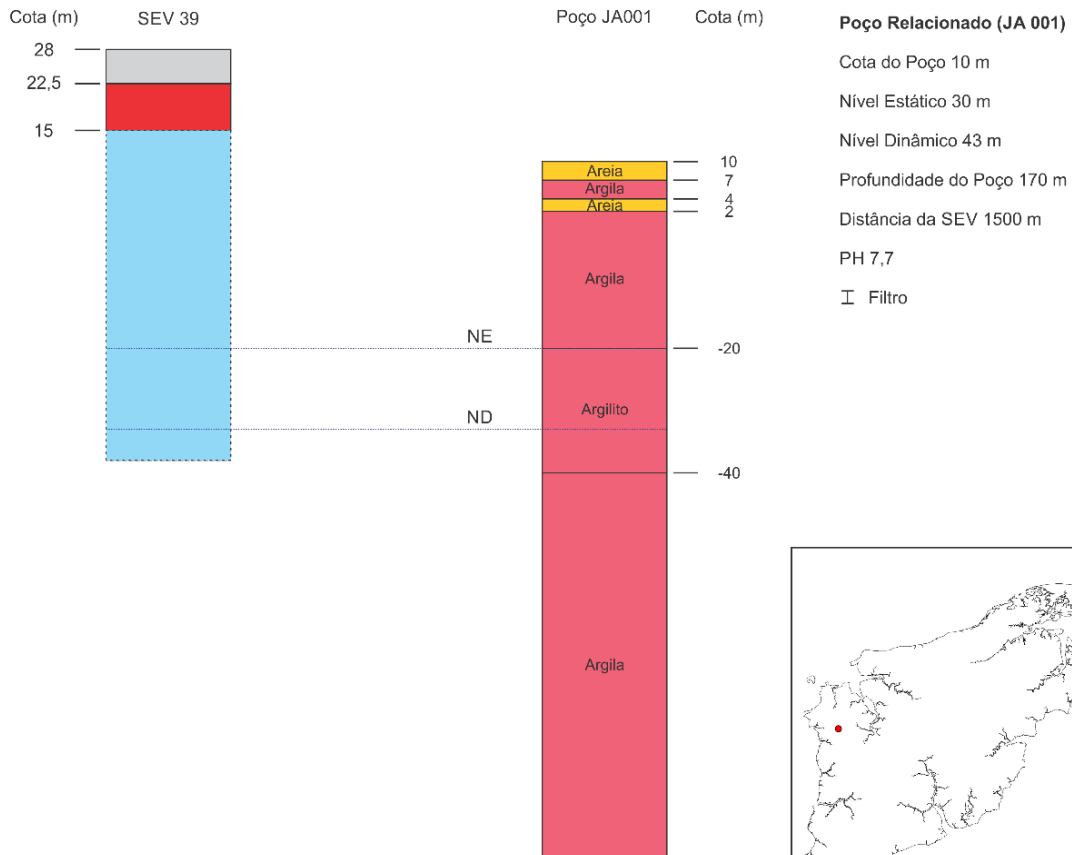
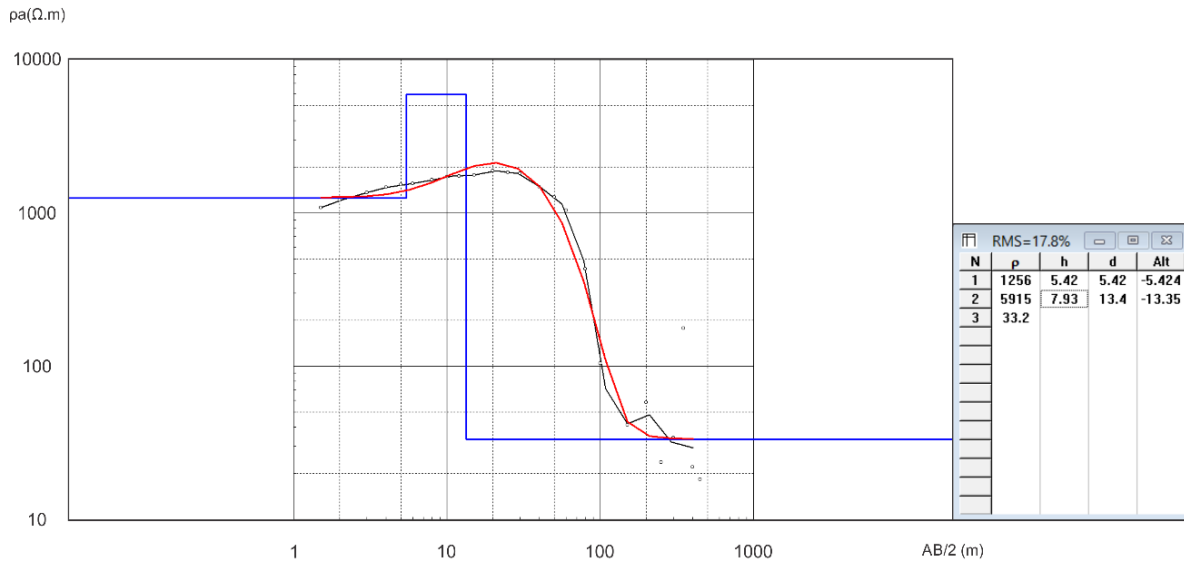


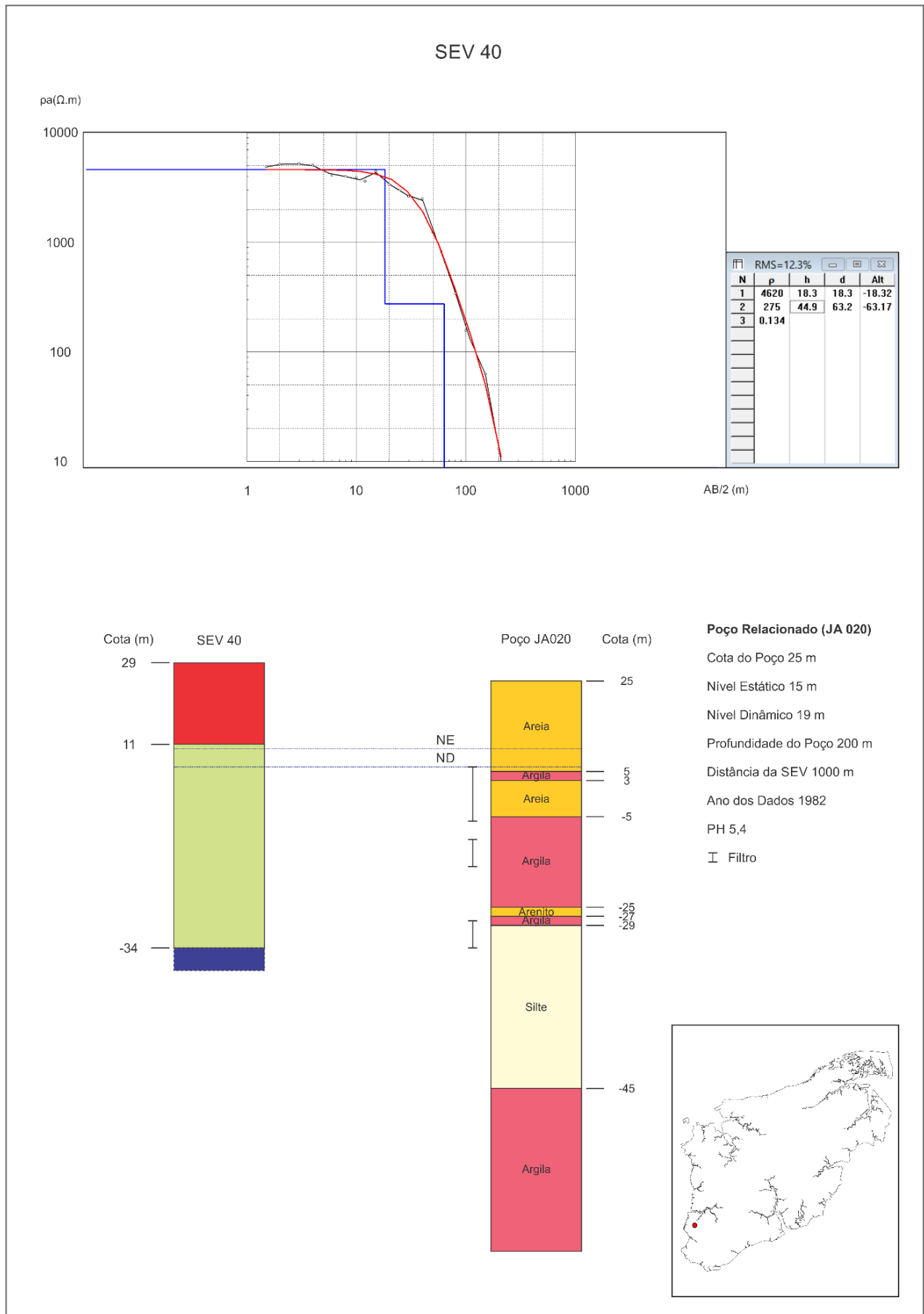






### SEV 39





ISBN  
978-65-5664-222-2



SECRETARIA DE  
GEOLOGIA, MINERAÇÃO  
E TRANSFORMAÇÃO MINERAL

MINISTÉRIO DE  
MINAS E ENERGIA

MINISTÉRIO DO  
MEIO AMBIENTE

