

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS
GEOCIÊNCIAS E MEIO AMBIENTE

**HETEROGENEIDADES GEOLÓGICAS E O GERENCIAMENTO DE ÁREAS
CONTAMINADAS EM LOCAL SITUADO NA INTERFACE DA SERRA DO MAR
COM A PLANÍCIE ALUVIONAR DO RIO CUBATÃO (CUBATÃO/SP)**

Marcio Costa Alberto

Orientador: Prof. Dr. Chang Hung Kiang

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Geociências e Meio Ambiente – Área de Concentração em Geociências
e Meio Ambiente, para obtenção do Título de Doutor

Rio Claro
Agosto/2010

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS
GEOCIÊNCIAS E MEIO AMBIENTE

**HETEROGENEIDADES GEOLÓGICAS E O GERENCIAMENTO DE ÁREAS
CONTAMINADAS EM LOCAL SITUADO NA INTERFACE DA SERRA DO MAR
COM A PLANÍCIE ALUVIONAR DO RIO CUBATÃO (CUBATÃO/SP)**

Marcio Costa Alberto

Orientador: Prof. Dr. Chang Hung Kiang

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Geociências e Meio Ambiente – Área de Concentração em Geociências
e Meio Ambiente, para obtenção do Título de Doutor

Rio Claro
Agosto/2010

551.49 Alberto, Marcio Costa
A334h Heterogeneidades geológicas e o gerenciamento de áreas contaminadas em local situado na Interface da Serra do Mar com a Planície Aluvionar do Rio Cubatão (Cubatão/SP) / Marcio Costa Alberto. – Rio Claro : [s.n.], 2010-11-18
218 f. : il., figs., tabs.

Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Orientador: Chang Hung Kiang

1. Águas subterrâneas. 2. Hidrogeologia. 3. Simulação estocástica. 4. Zonas de captura. 5. Cadeias de Markov. 6. Simulação numérica. I. Título

Ficha Catalográfica elaborada pela STATI – Biblioteca da UNESP
Campus de Rio Claro/SP

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Chang Hung Kiang

Orientador

UNESP – Rio Claro/SP

Prof. Dr. Paulo Milton Barbosa Landim

UNESP – Rio Claro/SP

Dr. Didier Gastmans

UNESP – Rio Claro/SP

Dr. Elton Gloeden

CETESB – São Paulo/SP

Dr. Fernando Krahenbul

Petrobras – São Paulo/SP

Rio Claro, 22 de outubro de 2010.

RESULTADO: APROVADO

DEDICATÓRIA

In Memoriam

Dedico esta tese aos meus avós:

Vô Zé, pela torcida à distância, e por ser amante fiel do Santos Futebol Clube; por me ensinar esta paixão.

Vô Artur, que apesar de não conhecê-lo, o elo será eterno.

Vó Lourdes, onde estiver, te amamos muito.

Vó Alzira, saudades mais recentes.

Que Deus os proteja!!!!

AGRADECIMENTOS

Em especial, devo agradecer à FUNDUNESP (Fundação para o Desenvolvimento da UNESP), a qual disponibilizou seus recursos, pelos convênios realizados entre Petróleo Brasileiro S/A (PETROBRAS), o Laboratório de Estudos de Bacias (LEBAC) e o Laboratório de Remediação de Áreas Impactadas por Hidrocarbonetos (RAIH), proporcionando a aquisição das ferramentas necessárias à realização desta pesquisa.

Ao Prof. Dr. Chang Hung Kiang, pela liberdade de escolha, por acreditar em minhas capacidades profissionais, pela disponibilidade dos recursos utilizados e pelas oportunidades oferecidas, ao longo destes 8 anos.

À PETROBRAS (RPBC e AB-CR) e seus profissionais por viabilizar a realização deste.

À minha esposa, Victória, amor, carinho e companheirismo, não preciso falar mais nada.

Aos meus pais e irmãos, Sônia, Antônio, Luís, e Rafael, às cunhadas Adriana e Ana, e às queridas sobrinhas, Dani e Gabi.

Ao amigo Geól. Elias Hideo Teramoto, Ms., que me ajudou sobremaneira na execução desta tese, com suas idéias e pela dedicação em conversas e nas simulações. Ao amigo Geól. Marco Pede, Dr., pelas conversas sobre zonas de captura e remediação.

À Prof^a D^{ra} Maria Rita Caetano-Chang pela revisão, pelas leituras e releituras desta tese, bem como pela orientação em parte deste caminho.

Aos amigos dos laboratórios LEBAC e RAIH.

Aos meus outros dois avós, D^a Irta e Sr. João Tappis e sua família (José Arnaldo, D^a Vitória e João Octávio)

A alguns amigos da vida profissional, Milton, Carlos, Flávio, Eliézer, Paulo e mais tantos outros.

SUMÁRIO

	RESUMO	ii
	ABSTRACT	iii
	ÍNDICE	ix
	ÍNDICE DE FIGURAS	vi
	ÍNDICE DE TABELAS	ix
1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	
3	A CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-HIDROGEOLÓGICA NO GERENCIAMENTO DE ÁREAS CONTAMINADAS	15
4	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	37
5	AVALIAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO DA ZONA DE CAPTURA DE UM POÇO EM BOMBEAMENTO	153
6	CONCLUSÕES	193
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	204

RESUMO

Heterogeneidades Geológicas e o Gerenciamento de Áreas Contaminadas em local situado na Interface da Serra do Mar com a Planície Aluvionar do Rio Cubatão (Cubatão/SP)

O gerenciamento de áreas contaminadas objetiva eliminar riscos pela contaminação de água subterrânea em áreas industriais. O comportamento de contaminantes também é controlado pela configuração das litologias, sendo necessária a caracterização geológica para estabelecer um modelo geológico conceitual, subsidiando as ações futuras de investigação e remediação. Em áreas geologicamente complexas, a distribuição das litologias deve ser enfocada, pois, apresenta variação significativa, e o seu conhecimento é de difícil estabelecimento com dados sem qualidade e quantidade. As incertezas associadas à heterogeneidade, tornam mais complexo o conhecimento destas. Neste estudo, foi aplicada investigação em área de Cubatão (SP), geologicamente heterogênea, iniciando pela caracterização regional, estabelecendo o modelo conceitual, a gênese das litologias e simulação numérica de fluxo da água subterrânea para verificação do modelo. Para simulação hipotética de um poço para remediação, foi utilizada simulação estocástica para definição da distribuição litológica, pois, a heterogeneidade pode apresentar diversos cenários para um mesmo conjunto de informações. Estas simulações geraram cenários, utilizados para simulação do poço, obtendo-se distintas zonas de captura. Os efeitos da heterogeneidade mostram que, para projeção de sistema de remediação, devem ser considerados diversos arranjos litológicos, pois, considerando-se modelos simplistas, a remediação será ineficiente, aumentando os custos para novas investigações e ações de remediação adicionais.

Palavras-chave: simulação estocástica, simulação numérica, cadeias de Markov, zonas de captura.

ABSTRACT

Geological heterogeneities and Management of Contaminated Areas in an area situated in the Serra do Mar interface with the alluvial fan of the Cubatão River (Cubatão/SP)

The management of contaminated areas aims to eliminate the risk of groundwater contamination in industrial areas. The behavior of contaminants is controlled by the configuration of lithologies, where geological characterization was needed to establish a conceptual geological model, supporting the actions of future investigation and remediation. In geologically complex areas, the distribution of lithologies should be focused, therefore, the distribution is also complex, and their knowledge is difficult to establish with no data quality and quantity. Uncertainties related to heterogeneity become more complex its definition. In this study, it was applied research in an area located at Cubatão (SP), geologically heterogeneous, starting with the regional characterization, setting the conceptual model, genesis of the lithologies and numerical simulation for model verification. For the simulation of a hypothetical well for remediation, stochastic simulation was used to define the lithological distribution, therefore, the heterogeneity may present different scenarios for a given set of information. These simulations generated scenarios used for simulation of extraction well, resulting in different capture zones. The effects of heterogeneity suggests that for projecting remediation system should be considered different lithological distribution, therefore, considering simplistic models, remediation will be inefficient, increasing costs for new investigations and further remediation actions.

Keywords: stochastic simulation, numerical simulation, Markov chain, capture zones

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	9
2.	OBJETIVOS	13
3.	A CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-HIDROGEOLÓGICA NO GERENCIAMENTO DE ÁREAS CONTAMINADAS.....	14
3.1.	ETAPAS DE INVESTIGAÇÃO NO GERENCIAMENTO DE ÁREAS CONTAMINADAS 20	
3.2.	AVALIAÇÃO DE RISCO À SAÚDE HUMANA	24
3.3.	PROJETO E EXECUÇÃO DA REMEDIAÇÃO.....	26
4.	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	36
4.1.	MATERIAIS E PROCEDIMENTOS	36
4.2.	CARACTERIZAÇÃO REGIONAL	37
4.2.1.	Hidrologia	37
4.2.1.1.	Rede Hidrográfica	37
4.2.1.2.	Pluviometria	40
4.3.	Geologia Regional.....	43
4.3.1.	Geotectônica	43
4.3.2.	Morfotectônica.....	50
4.3.3.	Unidades Geológicas	54
4.3.3.1.	Embasamento Cristalino.....	56
4.3.3.2.	Manto de Alteração	58
4.3.3.3.	Sedimentos Quaternários.....	60
4.3.4.	Hidrogeologia Regional.....	62
4.3.4.1.	Unidades/Sistemas Hidrogeológicos	62
4.3.4.2.	Sistema Aquífero Cristalino	67
4.3.4.3.	Sistema Aquífero Sedimentar Litorâneo	68
4.4.	GEOLOGIA E HIDROGEOLOGIA DA ÁREA DE ESTUDO	69
4.4.1.	Investigações realizadas.....	69
4.4.2.	Hidrogeologia local.....	85
4.4.2.1.	Unidades hidrofaciológicas	85
4.4.2.1.1.	Aterro	86
4.4.2.1.2.	Depósitos Sedimentares da Planície Costeira	90
4.4.2.1.2.1.	Sedimentos Flúvio-Costeiros.....	94
4.4.2.1.2.1.1.	Hidrofácies arenosa	94
4.4.2.1.2.1.2.	Hidrofácies siltosa e argilo-siltosa.....	97
4.4.2.1.2.2.	Hidrofácies <i>debris flow</i>	100
4.4.2.1.2.3.	Embasamento Cristalino Alterado.....	102
4.4.2.1.2.4.	Embasamento Cristalino São.....	103
4.4.2.2.	Fluxo da água subterrânea	114
4.4.3.	Simulação Numérica.....	117

4.4.3.1.	Modelo Conceitual	121
4.4.3.2.	Configuração geométrica do domínio simulado	123
4.4.3.3.	Condições de Contorno	127
4.4.3.3.1.	Recarga	127
4.4.3.3.2.	Condições de 3º tipo.....	129
4.4.3.3.2.1.	Canais	129
4.4.3.3.2.2.	Rios	129
4.4.3.3.2.3.	Condições de fluxo nulo	130
4.4.3.4.	Valores iniciais de condutividade hidráulica	130
4.4.3.5.	Calibração.....	131
4.4.3.7.	Potenciometria simulada	133
4.4.3.8.	Distribuição final dos valores de condutividade hidráulica	141
4.4.3.9.	Recarga.....	141
5.	AVALIAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO DA ZONA DE CAPTURA DE UM POÇO DE BOMBEAMENTO.....	152
5.1.	Cadeias de Markov e a hidrogeologia	155
5.2.	T-PROGS	159
5.3.	DESCRIÇÃO DO LOCAL	165
5.3.1.	Distribuição da condutividade hidráulica	169
5.3.2.	Determinação das zonas de captura	178
6.	CONCLUSÕES	192
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	203

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localização da área de estudo	12
Figura 2. Zona de captura estimada de um poço em bombeamento (modificado de USEPA, 1990)	28
Figura 3. Zona de captura estimada de uma barreira hidráulica (modificado de USEPA, 1990)	28
Figura 4. Representação da zona de captura de um poço parcialmente penetrante (modificado de USEPA, 2008).....	29
Figura 5. Representação do escape de plumas para zonas de captura estimadas com base em dados errôneos (modificado de USEPA, 2008).....	30
Figura 6. Zonas de captura de poços de extração de água subterrânea definidas por simulações estocásticas (KINZELBACH <i>et al</i> , 1996).....	30
Figura 7. Zonas de captura de poços de extração de água subterrânea definidas por simulações estocásticas (VAN LEEUWEN <i>et al</i> , 1999).....	31
Figura 8. Sistema hidrográfico da região de estudo.....	38
Figura 9. Porcentagem de estações pluviométricas com registro entre os anos de 1936 e 2004, para a região de Cubatão/SP.....	40
Figura 10. Estatísticas pluviométricas da região de Cubatão/SP.....	41
Figura 11. Contexto geotectônico regional.....	44
Figura 12. Contexto geotectônico da área de estudo.....	45
Figura 13. Cronologia dos episódios tectônicos de formação e evolução da Serra do Mar.....	49
Figura 14. Compartimentação geomorfológica da Planície Costeira da Baixada Santista.....	51
Figura 15. Mapa geológico regional (CPRM, 2001).....	55
Figura 16. Seção geológica regional.....	57
Figura 17. Detalhe das características dos depósitos de <i>debris flows</i>	61
Figura 18. Mapa hidrogeológico do Estado de São Paulo.....	64
Figura 19. Seção hidrogeológica do Estado de São Paulo.....	65
Figura 20. Distribuição das unidades aquíferas SAC e SASL na região de estudo.....	66
Figura 21. Localização das SEVs.....	70
Figura 22. Modelo geolétrico final.....	71
Figura 23. Localização das sondagens geotécnicas.....	73
Figura 24. Perfil típico de uma sondagem geotécnica.....	74
Figura 25. Localização dos poços de monitoramento e piezômetros.....	77
Figura 26. Localização dos ensaios hidrogeológicos – zona não-saturada.....	79
Figura 27. Localização dos ensaios hidrogeológicos – zona saturada.....	80
Figura 28. Registro histórico do desmonte das encostas rochosas da Serra do Mar.....	87
Figura 29. Registro histórico de terraplanagem com blocos rochosos da Serra do Mar.....	87
Figura 30. Curvas granulométricas da cobertura de aterros.....	88
Figura 31. Mapa de isoespessura de aterro.....	89
Figura 32. Evolução da variação do nível relativo do mar na região de Santos (SP).....	91
Figura 33. Mapa de isoespessura de sedimentos.....	93
Figura 34. Curvas granulométricas da hidrofácies arenosa.....	95
Figura 35. Hidrofácies arenosa com granodrecrescência ascendente.....	95
Figura 36. Microfotografia (MEV) da hidrofácies arenosa, mostrando a presença do feldspato albita.....	96
Figura 37. Composição mineralógica predominante da hidrofácies arenosa (quartzo, albita e muscovita) por difração de raios-X.....	96
Figura 38. Interdigitação entre as hidrofácies arenosa e <i>debris flow</i>	97
Figura 39. Composição mineralógica predominante da hidrofácies siltosa (quartzo, caulinita e albita) por difração de raios-X.....	98
Figura 40. Curvas granulométricas da hidrofácies siltosa.....	98
Figura 41. Aspectos da hidrofácies argilo-siltosa, com abundância de matéria orgânica.....	99
Figura 42. Curvas granulométricas da hidrofácies argilo-siltosa.....	99
Figura 43. Depósito de <i>debris flow</i> em uma encosta da Serra do Mar, com seixos decimétricos.....	101
Figura 44. Aspectos do embasamento cristalino alterado, mostrando estruturas reliquias da rocha gnáissica original.....	104
Figura 45. Composição mineralógica predominante do Embasamento Cristalino Alterado (quartzo, albita e caulinita) por difração de raio-X.....	104
Figura 46. Mapa de isoespessura do Embasamento Cristalino Alterado.....	105
Figura 47. Mapa do topo do Embasamento Cristalino São.....	106
Figura 48. Seção geológico-hidrogeológica A-B.....	108
Figura 49. Seção geológico-hidrogeológica C-D.....	109
Figura 50. Seção geológico-hidrogeológica E-F.....	110
Figura 51. Seção geológico-hidrogeológica G-H.....	111
Figura 52. Seção geológico-hidrogeológica I-J.....	112
Figura 53. Seção geológico-hidrogeológica K-L.....	113
Figura 54. Mapa potenciométrico da área de estudo.....	115
Figura 55. Seção mostrando as diferentes velocidades de fluxo nas regiões superficiais e profundas do aquífero.....	116

Figura 56. Comparação de Protocolos de Aplicação de Modelos Matemáticos - PAMMs (ALBERTO, 2005).....	119
Figura 57. Mapa de distribuição das condutividades hidráulicas iniciais nas 7 camadas.	122
Figura 58. Transposição da hidroestratigrafia para o modelo matemático.	124
Figura 59. Distribuição das células ativas e inativas nas 7 camadas.	125
Figura 60. Seção W-E na porção central do modelo.....	126
Figura 61. Seção N-S na porção central do modelo.....	126
Figura 62. Mapa de distribuição das condições de contorno.	128
Figura 63. Gráfico de dispersão dos valores de carga hidráulica calculados vs. campo e indicadores de calibração.	132
Figura 64. Gráfico de balanço hídrico do sistema simulado.	133
Figura 65. Mapa potenciométrico simulado - primeira camada.	134
Figura 66. Mapa potenciométrico simulado - segunda camada.	135
Figura 67. Mapa potenciométrico simulado - terceira camada.	136
Figura 68. Mapa potenciométrico simulado - quarta camada.	137
Figura 69. Mapa potenciométrico simulado - quinta camada.	138
Figura 70. Mapa potenciométrico simulado - sexta camada.	139
Figura 71. Mapa potenciométrico simulado - sétima camada.	140
Figura 72. Distribuição da condutividade hidráulica na primeira camada.	142
Figura 73. Distribuição da condutividade hidráulica na segunda camada.	143
Figura 74. Distribuição da condutividade hidráulica na terceira camada.	144
Figura 75. Distribuição da condutividade hidráulica na quarta camada.	145
Figura 76. Distribuição da condutividade hidráulica na quinta camada.	146
Figura 77. Distribuição da condutividade hidráulica na sexta camada.	147
Figura 78. Distribuição da condutividade hidráulica na sétima camada.	148
Figura 79. Distribuição dos valores de recarga após calibração.	149
Figura 80. Estilos de heterogeneidades em ambientes sedimentares aluvionares.	154
Figura 81. Distribuição tridimensional de materiais litológicos, simulados pelo T-PROGS.....	161
Figura 82. Representação gráfica da transição de probabilidade entre j e k	161
Figura 83. Conjunto de curvas de probabilidade de transição.	163
Figura 84. Localização da área selecionada para realização das simulações estocásticas.	166
Figura 85. Detalhe da seção geológico-hidrogeológica A-B	167
Figura 86. Localização das sondagens geotécnicas utilizadas para as simulações estocásticas no local selecionado e entorno.	168
Figura 87. Curvas de probabilidade de transição calculadas e ajustadas para o local selecionado.....	171
Figura 88. Distribuição espacial da condutividade hidráulica por simulação estocástica – Cenário 1.....	173
Figura 89. Distribuição espacial da condutividade hidráulica por simulação estocástica – Cenário 2.....	173
Figura 90. Distribuição espacial da condutividade hidráulica por simulação estocástica – Cenário 3.....	174
Figura 91. Distribuição espacial da condutividade hidráulica por simulação estocástica – Cenário 4.....	174
Figura 92. Distribuição espacial da condutividade hidráulica por simulação estocástica – Cenário 5.....	175
Figura 93. Distribuição espacial da condutividade hidráulica por simulação estocástica – Cenário 6.....	175
Figura 94. Distribuição espacial da condutividade hidráulica por simulação estocástica – Cenário 7.....	176
Figura 95. Distribuição espacial da condutividade hidráulica por simulação estocástica – Cenário 8.....	176
Figura 96. Distribuição espacial da condutividade hidráulica por simulação estocástica – Cenário 9.....	177
Figura 97. Distribuição espacial da condutividade hidráulica por simulação estocástica – Cenário 10.....	177
Figura 98. Domínio do modelo e condições de contorno.	179
Figura 99. Configuração da zona de captura – Cenário 1.....	181
Figura 100. Configuração da zona de captura – Cenário 2.....	182
Figura 101. Configuração da zona de captura – Cenário 3.....	183
Figura 102. Configuração da zona de captura – Cenário 4.....	184
Figura 103. Configuração da zona de captura – Cenário 5.....	185
Figura 104. Configuração da zona de captura – Cenário 6.....	186
Figura 105. Configuração da zona de captura – Cenário 7.....	187
Figura 106. Configuração da zona de captura – Cenário 8.....	188
Figura 107. Configuração da zona de captura – Cenário 9.....	189
Figura 108. Configuração da zona de captura – Cenário 10.....	190

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Vazões de longo prazo e $Q_{7,10}$ das sub-bacias dos rios Perequê e Cubatão	39
Tabela 2. Estatística dos dados pluviométricos das estações da região de Cubatão/SP	42
Tabela 3. Feições estruturais mais comuns nos litotipos da Serra do Mar (IPT, 2002).	48
Tabela 4. Tipos litológicos presentes na Serra de Cubatão (IPT, 2002).....	57
Tabela 5. Características dos sistemas aquíferos presentes na UGRHI 7.....	63
Tabela 6. Níveis d'água dos poços de monitoramento selecionados.....	78
Tabela 7. Condutividade hidráulica da zona não-saturada (ensaios <i>Guelph</i>).....	81
Tabela 8. Condutividade hidráulica da zona saturada.....	82
Tabela 9. Eventos de corridas de massa na Serra de Cubatão	101
Tabela 10. Parâmetros de convergência utilizados nas simulações realizadas.....	120
Tabela 11. Relação entre as hidrofácies e os valores médios de condutividade hidráulica.	130
Tabela 12. Balanço hídrico (m^3) da simulação realizada na área de estudo.	132
Tabela 13. Identificação das unidades hidrofaciológicas consideradas para as simulações estocásticas	169
Tabela 14. Taxas de probabilidade de transição para o eixo vertical (Z)	172
Tabela 15. Taxas de probabilidade de transição para os eixos horizontais (X e Y) para uma distância de passo de 100 m.....	172

1. INTRODUÇÃO

O gerenciamento de áreas contaminadas é tema que vem sendo discutido amplamente no cenário brasileiro atual, principalmente quanto ao modelo de gerenciamento implementado, o qual apresenta uma série de procedimentos dos mais diversos, incluindo aspectos referentes à caracterização de áreas com contaminação.

A metodologia de gerenciamento de áreas contaminadas tem como objetivo, para o órgão ambiental, eliminar as condições de risco à saúde humana e ao meio ambiente, por meio de ações de conhecimento do problema, remediação, monitoramento e medidas de restrição. Para as empresas, a aplicação da metodologia de gerenciamento pode, além do objetivo do órgão ambiental, permitir a otimização de custos na investigação e remediação de sua(s) área(s) contaminada(s), viabilizando o licenciamento ambiental de expansões e novos empreendimentos e evitando sanções penais.

Para atingir tais objetivos, a caracterização da área deve preconizar pelo conhecimento detalhado das condições geológico-hidrogeológicas, e não menos importante, da distribuição e comportamento de contaminantes, os quais são diretamente influenciados pelas heterogeneidades do meio físico local, que, por sua vez, estão associadas aos fenômenos originadores das litologias encontradas em local específico.

O que se observa atualmente, no mercado brasileiro, é um sem fim de estudos ambientais que apresentam deficiências quanto à quantidade e qualidade das informações obtidas, o que pode associar incertezas referentes ao conhecimento dos problemas, prejudicando a definição clara das situações encontradas, precisando, muitas vezes, repetir os trabalhos já executados, e, principalmente, da projeção de ações de remediação, quando se encontra uma área contaminada.

Mesmo para investigações realizadas de forma sistemática, é importante ressaltar que a configuração geológica de uma área exerce controle significativo no comportamento de contaminantes e, conseqüentemente, na resposta de sistemas de remediação e, as heterogeneidades geológicas, quando não conhecidas, podem levar ao descontrole das ações implementadas e a ineficiência de remediações projetadas, podendo ocorrer situações de risco inesperadas, pela falta de conhecimento, sem contar os custos associados.

Sendo assim, é importante que se conheça as relações geológicas entre as unidades litológicas existentes, o que é possível quando se eleva a análise para um nível regional. Porém, para problemas associados à contaminação, as análises são realizadas em nível local, de detalhe, e as heterogeneidades podem não ter sentido sem esta prévia avaliação regional, constituindo-se o modelo geológico conceitual da área em estudo.

Portanto, neste estudo, foi contemplada a caracterização geológico-hidrogeológica de uma área industrial situada na porção centro-norte do município de Cubatão/SP (**Figura 1**), em contexto geológico de interface das encostas da Serra do Mar e a Planície Costeira, onde se observam ambientes de sedimentação com contribuição de sedimentos provenientes das encostas, sedimentação aluvionar na planície e várzeas situadas entre os diversos canais fluviais presentes, configurando uma área com heterogeneidade significativa na distribuição litológica.

Para esta caracterização foram consideradas as análises em nível regional, para definição do modelo geológico conceitual e depois, foi aplicada abordagem de modelagem estocástica para verificação dos efeitos da heterogeneidade na distribuição litológica de um local específico da área de estudo e as suas consequências na configuração da zona de captura de um poço em bombeamento ante diferentes cenários simulados geoestatisticamente, verificados por meio de simulação numérica e suas implicações no gerenciamento de eventuais contaminações presentes na área estudada.



Figura 1. Localização da área de estudo

2. OBJETIVOS

Os objetivos principais deste trabalho são:

- ✓ Caracterizar, em nível regional, a geologia e hidrogeologia da área de estudo;
- ✓ Estabelecer o modelo hidrogeológico conceitual da área de estudo;
- ✓ Verificar o modelo estabelecido por meio de simulação numérica de fluxo da água subterrânea;
- ✓ Verificar os efeitos das heterogeneidades litológicas na determinação de zonas de captura de um hipotético poço de remediação, por meio de ;
- ✓ Discutir as vantagens dos procedimentos utilizados para caracterização para o gerenciamento de áreas contaminadas.

3. A CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-HIDROGEOLÓGICA NO GERENCIAMENTO DE ÁREAS CONTAMINADAS

De acordo com o órgão ambiental do Estado de São Paulo, CETESB (2001), pioneiro na implementação de ações de gerenciamento de áreas contaminadas (ACs) no Brasil, o *“gerenciamento de áreas contaminadas (ACs) visa minimizar os riscos a que estão sujeitos a população e o meio ambiente, em virtude da existência das mesmas, por meio de um conjunto de medidas que **assegurem o conhecimento das características dessas áreas** e dos impactos por elas causados, proporcionando os instrumentos necessários à tomada de decisão quanto às formas de intervenção mais adequadas. Com o objetivo de otimizar recursos técnicos e econômicos, a metodologia utilizada no gerenciamento de ACs baseia-se em uma estratégia constituída por etapas sequenciais, em que a informação obtida em cada etapa é a base para a execução da etapa posterior.”*

Neste documento, este órgão ambiental define dois processos como procedimentos-base ao gerenciamento de áreas contaminadas, sendo estes **identificação** e **recuperação** de áreas contaminadas.

O processo de **identificação de áreas contaminadas** tem como objetivo principal a localização das áreas contaminadas, o qual é constituído por quatro etapas:

- ✓ definição da região de interesse;
- ✓ identificação de áreas potencialmente contaminadas;
- ✓ avaliação preliminar;
- ✓ investigação confirmatória.

Com a realização de cada uma das etapas do processo de identificação de áreas contaminadas, estas são classificadas de acordo com as informações obtidas, sendo que o gerenciamento vai sendo aprimorado conforme aumenta a quantidade e a qualidade da informação, ou seja, de acordo com o nível da caracterização realizada na área.

Sendo assim, na etapa de definição da região de interesse *“são definidos os limites da região a ser abrangidos pelo gerenciamento, e estabelecidos os objetivos principais a ser alcançados por este, considerando os principais bens a proteger”* da região selecionada.

Este é o instrumento inicial de gerenciamento de uma área contaminada, e as informações obtidas têm abrangência de pequena escala, não sendo possível conhecer ainda a presença de possíveis contaminações existentes e estabelecer as condições específicas de uma determinada área.

Os aspectos mais importantes desta etapa são: a identificação de possíveis áreas contaminadas, denominadas de Áreas com Potencial de Contaminação (APs) e a definição dos bens a proteger, em relação a estas áreas.

Sendo identificadas APs na região de interesse, passa-se para a etapa de Avaliação Preliminar, onde já são obtidas informações mais precisas destas áreas.

Esta consiste, basicamente, no diagnóstico inicial das APs identificadas, por meio do levantamento de informações existentes e de informações específicas de cada área, coletadas em inspeções de reconhecimento de campo, possibilitando:

- ✓ levantar informações para subsidiar o desenvolvimento das demais etapas do gerenciamento;
- ✓ documentar evidências, indícios ou fatos que caracterizem a suspeita ou a confirmação da existência de contaminação nas áreas em avaliação;
- ✓ estabelecer o modelo conceitual inicial de cada área;
- ✓ verificar a necessidade da adoção de medidas emergenciais.

As informações levantadas nesta etapa referem-se à elaboração de um levantamento histórico das atividades desenvolvidas ou em desenvolvimento na área e o levantamento de dados sobre o meio físico, subsidiando a formulação de hipóteses sobre:

- ✓ as características da fonte de contaminação;
- ✓ as prováveis vias de propagação dos contaminantes;
- ✓ a distribuição espacial da contaminação em relação aos prováveis receptores ou bens a proteger atingidos.

Dessa forma, é possível estabelecer o Modelo Conceitual Inicial – MCI da área, selecionando-se aquelas áreas que tenham indícios, evidências ou fatos que levem a suspeitar da presença de contaminação.

Os resultados obtidos nesta etapa de Avaliação Preliminar deve ser utilizado como base para o planejamento da etapa de investigação confirmatória, última etapa do processo de identificação de áreas contaminadas, que tem como objetivo **confirmar ou não** a existência de contaminação nas áreas consideradas suspeitas (ASs), identificadas na etapa de Avaliação Preliminar.

Caso seja identificada a presença de contaminação pela investigação confirmatória, a área passa a ser denominada Área Contaminada (AC) e, dando continuidade ao gerenciamento de áreas contaminadas proposto por CETESB (2001), sucede-se ao processo de **recuperação de áreas contaminadas**, que tem como objetivo principal a adoção de medidas corretivas nestas áreas que possibilitem a recuperação das mesmas para um determinado uso compatível.

Este processo de recuperação de áreas contaminadas é composto pelas etapas apresentadas abaixo:

- ✓ investigação detalhada;
- ✓ avaliação de risco;
- ✓ investigação para remediação;
- ✓ projeto de remediação;
- ✓ remediação;
- ✓ monitoramento.

Neste momento do gerenciamento de áreas contaminadas se inicia a obtenção de dados específicos da área em avaliação, sendo que a etapa de investigação detalhada tem como objetivo quantificar a contaminação, avaliando-se, **detalhadamente**:

- ✓ as características da fonte de contaminação e dos meios afetados;
- ✓ as dimensões das áreas ou volumes afetados;
- ✓ os tipos de contaminantes presentes e suas concentrações;
- ✓ as características da pluma de contaminação, como seus limites e sua taxa de propagação.

De posse do conhecimento obtido pela investigação detalhada, que subsidia as etapas seguintes, sendo reconhecidas as contaminações existentes e suas devidas extensões e características, para continuar o gerenciamento das ações de intervenção necessárias para reabilitação da área, é realizada a etapa de avaliação de riscos, que tem como objetivo quantificar os riscos gerados pelas contaminações identificadas aos bens a proteger definidos, e definir as metas de remediação, quando aplicável.

A avaliação de riscos é baseada em princípios de toxicologia, química e no conhecimento sobre o comportamento e transporte dos contaminantes, sendo que os seus resultados devem ser utilizados para:

- ✓ determinar a necessidade de remediação em função dos usos definidos (local e entorno);
- ✓ estabelecer níveis de remediação aceitáveis para os usos definidos;
- ✓ auxiliar na seleção das técnicas de remediação a ser empregadas, a depender das situações de risco identificadas por esta etapa.

Gradativamente, vão sendo obtidas informações que subsidiam completamente o processo de gerenciamento das áreas contaminadas. Com a avaliação de risco executada, e a definição das intervenções necessárias, continuando-se o processo de gerenciamento de áreas contaminadas, são executadas as ações de investigação para remediação, que tem como objetivo selecionar, dentre as opções de técnicas de remediação, aquelas, ou a combinação destas, que são possíveis, apropriadas e legalmente permissíveis para as situações de risco observadas.

Neste momento, as ações a ser realizadas na área estão baseadas nas condições de risco encontradas, ou seja, o gerenciamento de áreas contaminadas está baseado no risco, e devem ser desenvolvidas as seguintes etapas:

- ✓ levantamento das técnicas de remediação apropriadas para as situações de risco encontradas;
- ✓ elaboração do plano de investigação para obtenção de informações detalhadas do meio físico e das contaminações existentes, para subsidiar a elaboração do projeto de remediação;
- ✓ execução de ensaios piloto em campo e em laboratório para obtenção de dados operacionais das técnicas de remediação a serem empregadas;
- ✓ realização de monitoramento e de modelagem matemática para definir as previsões e estimativas de funcionamento e desempenho das técnicas de remediação selecionadas;
- ✓ interpretação dos resultados;
- ✓ definição das técnicas de remediação que garantirão, com maior eficiência, a redução e eliminação dos riscos existentes.

A investigação para remediação deverá subsidiar a elaboração do projeto de remediação, que deverá conter:

- ✓ planos detalhados de segurança dos trabalhadores e vizinhança;
- ✓ plano detalhado de implantação e operação do sistema de remediação, contendo procedimentos e cronogramas detalhados
- ✓ plano de monitoramento da eficiência do sistema, com os pontos de coleta de dados definidos, parâmetros a ser analisados, frequência de amostragem e os limites ou padrões definidos como objetivos a ser atingidos pela remediação.

Conforme Decisão de Diretoria 103/2007/C/E, expedida em 22/06/2007 pela CETESB, o processo de recuperação de áreas contaminadas trocou o termo “investigação para remediação” pelo termo “concepção da remediação”, porém, sem alterar o conteúdo referente aos aspectos de caracterização, onde ressalta que “... *Se necessário, poderão ser realizados ensaios de campo ou em laboratório, com o objetivo de selecionar as técnicas de remediação mais adequadas para serem implementadas*”, indicando o Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas (CETESB, 2001), até então utilizado como referência neste trabalho, para a condução das investigações necessárias, quando necessária a implementação de remediação na área investigada.

Para se atingir o sucesso da remediação das áreas contaminadas, até a etapa de elaboração do projeto de remediação, os procedimentos para obtenção das informações devem ser executados criteriosamente, para que não se apresente expectativas subestimadas, podendo pôr em risco a população eventualmente exposta às contaminações identificadas, seja no local contaminado ou pela migração destas para áreas externas.

A resposta do comportamento do meio físico ante as intervenções estabelecidas como remediação de uma área contaminada, está associada diretamente ao conhecimento das características geológico-hidrogeológicas da área em que se está atuando, sendo de extrema importância, nas etapas de investigação, a obtenção de dados que possibilitem a realização da caracterização geológico-hidrogeológica local, em conjunto com a avaliação das contaminações existentes, pois, é esse arcabouço geológico-hidrogeológico, que condicionará o comportamento dos contaminantes no meio.

Então, durante a realização da etapa de remediação, propriamente dita, ou seja, na implementação de medidas que resultem no saneamento da área contaminada e/ou pela contenção e isolamento dos contaminantes, de modo a atingir os objetivos da remediação proposta, devem ser monitorados, continuada e detalhadamente, os parâmetros operacionais dos equipamentos de remediação, parâmetros do meio físico e do comportamento dos contaminantes, a fim de verificar e atualizar as condições de operação apresentadas no projeto de remediação.

Sendo importantes as etapas de caracterização geológico-hidrogeológica, denominadas por CETESB (2001) de etapas de investigação confirmatória, investigação detalhada e investigação para remediação, posteriormente alterada para concepção da remediação, será apresentada, a seguir, uma discussão sobre as principais metodologias e procedimentos necessários para a realização destas etapas, com ênfase para a importância que as mesmas apresentam em relação ao gerenciamento de áreas contaminadas.

3.1. ETAPAS DE INVESTIGAÇÃO NO GERENCIAMENTO DE ÁREAS CONTAMINADAS

A etapa de investigação confirmatória, conforme descrito por CETESB (2001), se dá, basicamente, pela tomada de poucas amostras dos possíveis meios contaminados, preferencialmente, de solo e água subterrânea em pontos estrategicamente localizados, para realização de análises, priorizando áreas potenciais fontes de contaminação, identificadas na avaliação ambiental preliminar.

Em seguida, os resultados das análises são comparados aos valores estabelecidos em listas de referência, definidas pelo órgão responsável pelo gerenciamento de áreas contaminadas, para verificar se existem ocorrências que possam, preliminarmente, estar pondo em risco a população exposta.

Nesta etapa de caracterização, o principal objetivo é de confirmar a presença ou não de contaminação, sendo assim, não há uma preocupação explícita com as características geológico-hidrogeológicas da área, porém, caso seja confirmada a existência de contaminação, a etapa de investigação detalhada será executada como subsídio a avaliação de risco para avaliar os riscos efetivos decorrentes da contaminação e para definição da remediação.

Na investigação detalhada, conforme descrito no Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas (CETESB, 2001), está incluída a preocupação com o conhecimento geológico-hidrogeológico, além da contaminação, pois, deve buscar a compreensão dos seguintes aspectos:

- ✓ a geologia e a hidrogeologia regional e local;
- ✓ a natureza e a extensão da contaminação;
- ✓ a evolução da contaminação no tempo e no espaço e
- ✓ as rotas de migração de contaminantes, vias de exposição e receptores de risco.

Neste manual, ainda é ressaltado que a investigação detalhada tem por finalidade subsidiar a avaliação de risco e a concepção do projeto de remediação, tecnicamente adequado, legalmente cabível e viável economicamente, para a contaminação existente, visando prevenir danos presentes e futuros à saúde e segurança pública, ao meio ambiente e bens a proteger.

Ainda segundo CETESB (2001), a *“investigação detalhada serve ainda à autoridade competente e à pessoa responsável, ou agente executor da remediação, como base para a tomada de decisão sobre qual dos possíveis cenários de remediação será aplicado a uma determinada área contaminada”*, ou seja, subsidiará o processo de tomada de decisões no gerenciamento destas áreas, tendo como base os riscos associados à contaminação existente.

Portanto, a execução desta etapa, obrigatoriamente, deve prever a delimitação total das fontes de contaminação, a delimitação tridimensional total das ocorrências de contaminação nos solos e nas águas subterrâneas e a identificação dos receptores de risco e usuários dos recursos impactados no entorno, por meio de pontos localizados estrategicamente, abrangendo:

- ✓ áreas de manipulação, estocagem e armazenamento de matérias primas, substâncias químicas auxiliares de processo, produtos, resíduos e efluentes;
- ✓ episódios históricos de vazamentos, derramamentos, descarte inadequado de resíduos e infiltração de substâncias químicas;
- ✓ demais investigações realizadas no local, sobre atividades potencialmente poluidoras, de maneira a contemplar todos os pontos suspeitos de contaminação;
- ✓ dados obtidos na investigação confirmatória;
- ✓ dados de investigações realizadas por métodos diretos ou indiretos de detecção de contaminação, como geofísica e pesquisa de gases no solo.

Somente é apresentada preocupação com as características geológico-hidrogeológicas, quando é apresentada sugestão para a instalação da rede de poços de monitoramento de qualidade das águas subterrâneas, onde a mesma deverá se basear na dinâmica local de escoamento das águas subterrâneas e propiciar a delimitação total tridimensional de todas as plumas de contaminação nas águas subterrâneas, relacionadas aos contaminantes presentes no local e seu entorno.

Portanto, é importante que, além da delimitação da contaminação, os serviços de investigação detalhada sejam programados para que se obtenha conhecimento aprofundado da geologia e hidrogeologia locais, principais responsáveis pelo comportamento dos contaminantes encontrados no meio físico, reduzindo, assim, as incertezas associadas ao conhecimento geológico-hidrogeológico.

Após a fase de investigação detalhada, quando já se conhece a distribuição e quantificação dos contaminantes presentes, é o momento de se implementar uma solução de remediação para cada situação de contaminação que possa representar riscos.

A solução de remediação deve ser baseada na realização de investigação complementar, com objetivo de se obter parâmetros essenciais à definição das técnicas de remediação a implementar na área, denominada, por CETESB (2001), de investigação para remediação ou concepção da remediação (CETESB, 2007), que tem por finalidade *“oferecer subsídios para a concepção e detalhamento de um projeto de remediação, que seja tecnicamente adequado, legalmente cabível e economicamente viável, para cada situação de contaminação, visando prevenir danos presentes ou futuros ao meio ambiente, à saúde humana e segurança pública”*.

Nesta etapa, no documento elaborado por CETESB (2001), *“as informações necessárias incluem a complementação e o refinamento das características geológicas e hidrogeológicas, geoquímicas e hidroquímicas da área de interesse”* e em CETESB (2007), *“Se necessário, poderão ser realizados ensaios de campo ou em laboratório, com o objetivo de selecionar as técnicas de remediação mais adequadas para serem implementadas”*.

Inclue-se, também, a necessidade de obtenção de informações em nível regional, onde “... a caracterização da geologia regional e local deve possibilitar a descrição geológica da área de interesse, contemplando os aspectos geomorfológicos, **litológicos**, **estratigráficos**, pedológicos, estruturais e geotécnicos, através da elaboração de mapa geológico em escala apropriada e seções geológicas elucidativas”. Esta caracterização regional deve ser efetuada mediante a consulta a mapas geológicos, imagens de satélite e fotografias aéreas, as quais devem subsidiar a realização de levantamento de campo e algumas sondagens mecânicas, além da realização de levantamentos geofísicos, quando aplicáveis.

Desta forma, serão obtidas informações referentes “... a delimitação das unidades aquíferas presentes, determinação da superfície potenciométrica e do regime de fluxo das águas subterrâneas, bem como o levantamento cadastral de fontes, surgências e captações existentes no entorno de interesse”.

Via de regra, uma área contaminada não apresenta condições geológico-hidrogeológicas homogêneas sob todos os aspectos, predominando “...variações nos aspectos do meio físico, tais como **heterogeneidade de solos, diferentes litologias e condições hidrogeológicas específicas locais**” (CETESB, 2001), sem contar “... a possibilidade de ocorrência de uma grande quantidade de contaminantes secundários, além daqueles considerados como contaminantes principais” (CETESB, 2001), os quais quase sempre são desconsiderados nas investigações ambientais conduzidas atualmente.

Desta maneira, todas as etapas de investigação devem ser conduzidas de forma a se obter informações em quantidade e qualidade suficientes, desde as primeiras etapas de investigação, sendo que, a caracterização geológico-hidrogeológica regional, já deveria ser apresentada na avaliação ambiental preliminar, subsidiando os demais estudos a ser conduzidos na área, desde a etapa de investigação confirmatória até a etapa referente à investigação para remediação, tendo como objetivo reduzir, na medida do possível, as incertezas associadas à geologia e hidrogeologia.

Assim como o conhecimento geológico-hidrogeológico, não menos importante, é a definição da distribuição e da quantificação dos contaminantes presentes, objetos dos estudos de investigação ambiental, que apresentam seu comportamento regido pelas condições hidrogeológicas da área, e também devem ser detalhadamente conhecidos pelas etapas de investigação conduzidas em uma área contaminada.

Para tanto, devem ser conduzidas investigações que também priorizem “... a identificação dos poluentes presentes, em termos de sua origem, tipos, propriedades físicas, químicas e biológicas (peso molecular, toxicidade, solubilidade em água, pressão de vapor, etc.) e processos de transporte e imobilização ambiental (degradabilidade, persistência, bioacumulação, mobilidade)”, as quais, associadas à caracterização hidrogeológica, “... possibilitarão uma previsão inicial da pluma de contaminação de solos e águas subterrâneas, como subsídio a uma caracterização hidrogeoquímica mais detalhada” (CETESB, 2001).

3.2. AVALIAÇÃO DE RISCO À SAÚDE HUMANA

A etapa de avaliação de risco, interposta com as etapas de investigação detalhada e investigação para remediação, tem como objetivo principal “... a identificação e quantificação dos riscos a saúde humana, decorrentes de uma área contaminada, uma vez que a saúde humana e a segurança da população devem ser priorizadas, dentre os bens a proteger expostos” (CETESB, 2001).

A elaboração de uma avaliação de risco está baseada em princípios de toxicologia humana e no conhecimento das propriedades físico-químicas e do comportamento dos contaminantes, bem como nas características do meio físico que podem afetar o transporte, a atenuação e a persistência dos mesmos no meio.

Portanto, inclusive nesta etapa, se ressalta mais uma vez a importância da caracterização geológico-hidrogeológica, por meio da obtenção de parâmetros específicos do meio, que serão utilizados nas equações de transporte e transferência entre os meios contaminados, para conhecimento e previsão do comportamento das substâncias de interesse, incluindo

“... alguns parâmetros necessários para o desenvolvimento, calibração e validação de modelos matemáticos de fluxo e transporte de contaminantes no meio físico” (CETESB, 2001).

CETESB (2001) preconiza pela aquisição de valores específicos da área de interesse, podendo ser utilizados dados bibliográficos, *“...caso o modelo a ser utilizado não seja sensível a um parâmetro em particular e existe um valor conhecido disponível na literatura para este parâmetro”*.

Nesta etapa, a coleta de dados tem a heterogeneidade natural do solo como um fator complicador no estabelecimento de um plano de amostragem representativo das condições do meio físico e da distribuição dos contaminantes no meio. Sendo assim, é de extrema importância a condução das etapas de investigação com ênfase ao conhecimento geológico-hidrogeológico, pois, mais uma vez se demonstra a necessidade de redução das incertezas associadas a estas características que, inclusive, podem afetar os aspectos de exposição dos prováveis receptores.

Desta maneira, assim como enfatizado por CETESB (2001), *“... o plano de amostragem deve contemplar parâmetros físicos do solo que irão influenciar diretamente o modelamento matemático de transporte de contaminantes”*, e as principais propriedades hidrogeológicas a ser obtidas são: condutividade hidráulica, porosidade, densidade de grãos e fração de carbono orgânico, além de outras que se julgar necessárias ao longo da elaboração do trabalho e da descoberta de novas fontes e meios de propagação.

Quanto menor a quantidade e a qualidade dos trabalhos de investigação conduzidos, aumenta a incerteza associada à caracterização dos riscos presentes em uma determinada área e, conseqüentemente, as metas de remediação estabelecidas nesta etapa também serão incertas, tendo em vista a utilização de parâmetros que apresentem distribuição ou quantificação com incertezas associadas.

As **Metas de Remediação com Base no Risco (MRBR)**, ou seja, “... as máximas concentrações dos compostos químicos de interesse no meio físico que não causem risco a saúde humana, caso ocorra uma situação de exposição de um indivíduo ou uma população”, poderão ser subestimadas ou superestimadas, a depender do cenário de exposição e da substância química, considerados para o estabelecimento das referidas metas, caso as incertezas da caracterização estejam acentuadas, principalmente, quanto à variação espaço-temporal, dos parâmetros do meio físico utilizados para o cálculo das metas.

Sendo assim, para cada variável associada aos meios de interesse, deverá ser estabelecida a faixa de sua variação para a área de estudo e de que forma esta variação pode influenciar no valor final das metas de remediação.

3.3. PROJETO E EXECUÇÃO DA REMEDIAÇÃO

Na elaboração de um projeto de remediação, principalmente para técnicas que considerem a utilização de poços para bombeamento de água subterrânea visando seu tratamento em superfície (*pump-&-treat*), as propriedades hidráulicas do meio físico, especialmente a condutividade hidráulica, são de extrema importância.

Em CETESB (2001) e CETESB (2007), especifica-se pela necessidade de investigações que possibilitem a determinação das propriedades do meio que influenciem, de forma significativa, no comportamento de eventuais contaminantes que necessitem de remediação.

Segundo USEPA (1990), são necessários dados geológicos e hidrogeológicos para a elaboração do projeto, sendo estes:

✓ Dados geológicos:

- o Tipo de unidade ou aquífero onde está contida a água subterrânea;
- o Espessura e extensão desta unidade ou aquífero;
- o Tipo de porosidade;
- o Presença ou ausência de unidades impermeáveis ou camadas confinantes;

- o Profundidade em relação ao nível d'água e espessura da zona não saturada.

✓ **Dados Hidráulicos:**

- o Propriedades hidráulicas da unidade ou aquífero considerado:
 - Condutividade hidráulica;
 - Transmissividade;
 - Coeficiente de armazenamento;
 - Porosidade;
 - Dispersividade.
- o Condições de pressão:
 - Confinado;
 - Livre;
 - Semi-confinado.
- o Direção, volume e taxas de fluxo da água subterrânea;
- o Áreas de recarga e descarga da água subterrânea;
- o Interações da água superficial com água subterrânea;
- o Variações sazonais das condições hidrogeológicas.

✓ **Aspectos de uso da água:**

- o Existência de fontes de uso da água subterrânea;
- o Existência de captação da água subterrânea.

Todos os dados apresentados por USEPA (1990) são de extrema importância, sendo que, neste trabalho, serão abordados somente os aspectos que se referem a distribuição das litologias e, conseqüentemente, das propriedades hidráulicas do aquífero, e as possíveis influências que a variação destes materiais pode representar na zona de captura de um poço em bombeamento, para remediação de áreas contaminadas.

Desta maneira, as propriedades hidráulicas, assim como a distribuição das litologias presentes no meio, as quais definem, de certa maneira, a distribuição da condutividade hidráulica do aquífero, devem ser alvo de detalhada caracterização, quando se pretende utilizar esta técnica de remediação, pois assim serão definidos o número de poços e sua posição, em função da zona de captura definida na fase de projeto da remediação.

Quando da execução da remediação, antes de seu início, devem ser conduzidos testes para verificar as condições de projeto, baseadas em modelos preditivos, buscando reduzir as incertezas associadas a definição da zona de captura, com base nos dados obtidos para a área. A **Figura 2** mostra a zona de captura modelada para um poço e a **Figura 3** de uma barreira hidráulica formada por diversos poços de bombeamento.

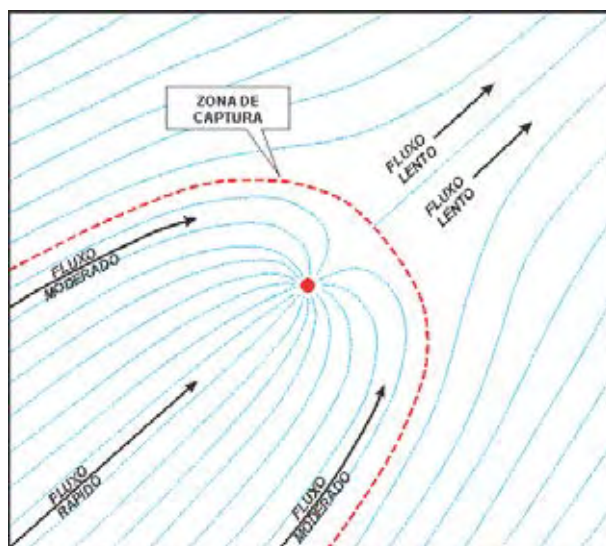


Figura 2. Zona de captura estimada de um poço em bombeamento (modificado de USEPA, 1990)

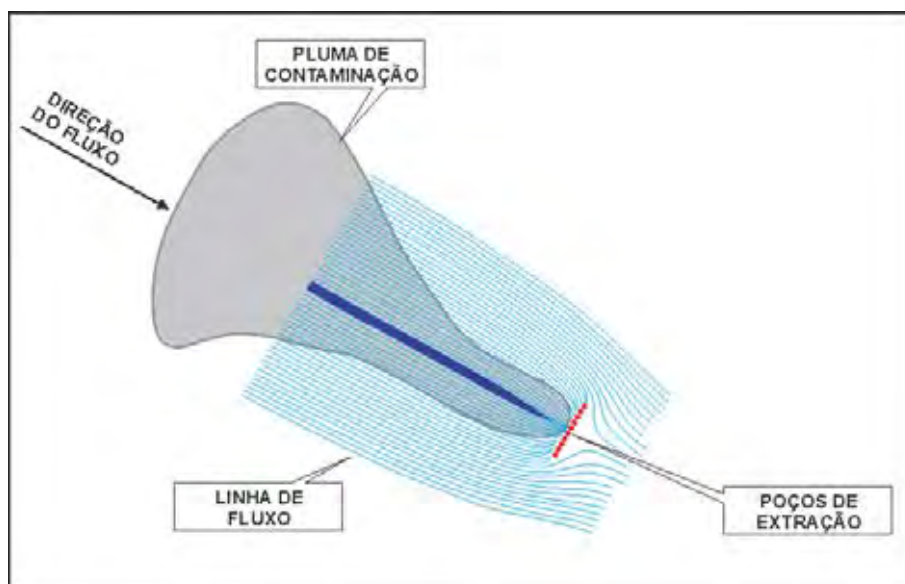


Figura 3. Zona de captura estimada de uma barreira hidráulica (modificado de USEPA, 1990)

De acordo com USEPA (2008), a zona de captura de um ou mais poços em bombeamento, incluídos drenos e poços dispostos para constituição de uma barreira hidráulica, refere-se a região “tridimensional” que contribui para a extração de água do aquífero, sendo esta a “zona de confinamento hidráulico”.

A **Figura 4** a seguir mostra a representação de uma zona de captura para um poço de bombeamento parcialmente penetrante, onde observa-se que a região de captura vertical não abrange todo o aquífero, mostrando a necessidade de investigações detalhadas para que se possa ter uma estimativa mais precisa desta zona.

O dimensionamento impreciso da zona de captura de poços utilizados para remediação podem ocasionar na fuga de contaminantes, com a possibilidade de atingir os receptores que estariam sendo protegidos pela remediação prevista (**Figura 5**).

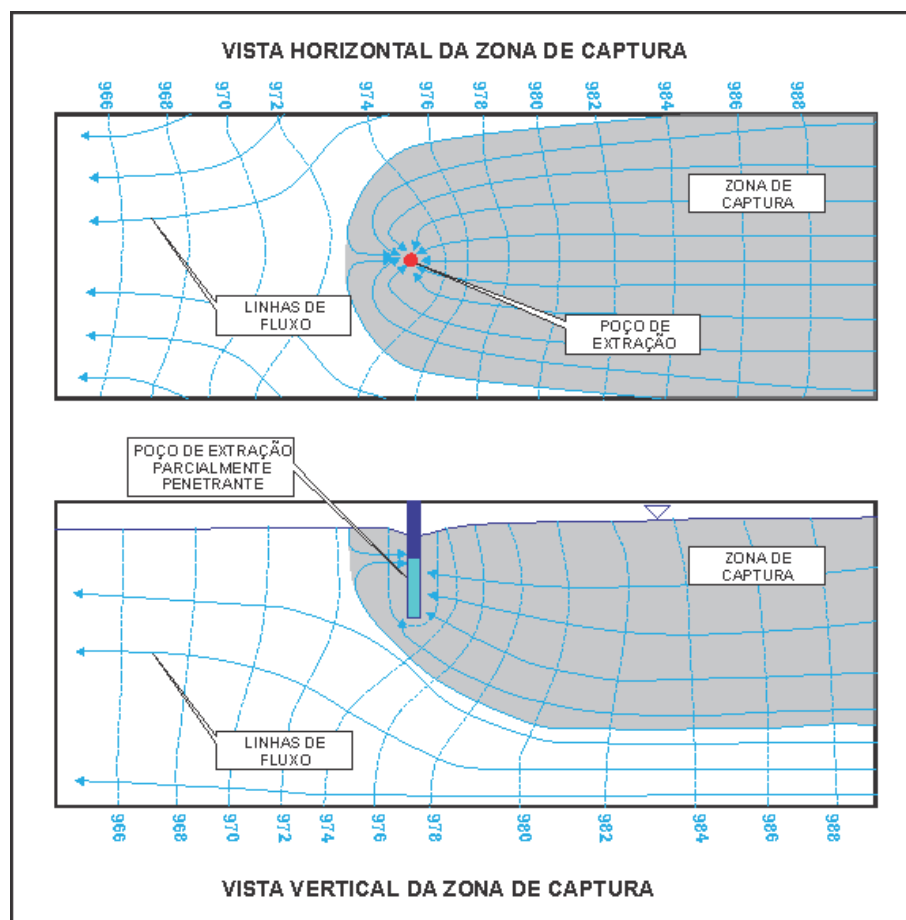


Figura 4. Representação da zona de captura de um poço parcialmente penetrante (modificado de USEPA, 2008)

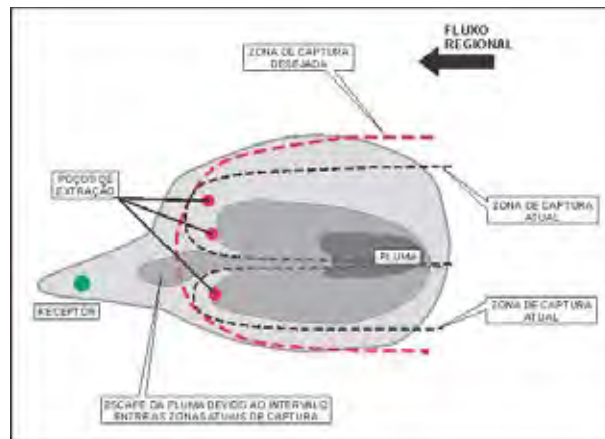


Figura 5. Representação do escape de plumas para zonas de captura estimadas com base em dados errôneos (modificado de USEPA, 2008)

Para Kinzelbach *et al* (1996), o formato e a dimensão de uma zona de captura não pode ser determinada com exatidão em função das incertezas inerentes aos parâmetros do aquífero e da recarga. Para tanto, estes autores aplicaram o método estocástico de Monte Carlo para determinação da distribuição da transmissividade e da recarga em um aquífero heterogêneo, obtendo-se diferentes zonas de captura, para distribuições distintas dos parâmetros do meio físico, conforme mostrado na **Figura 6**. Estes autores também identificaram que, com o aumento da disponibilização de dados, as incertezas reduziam consideravelmente.

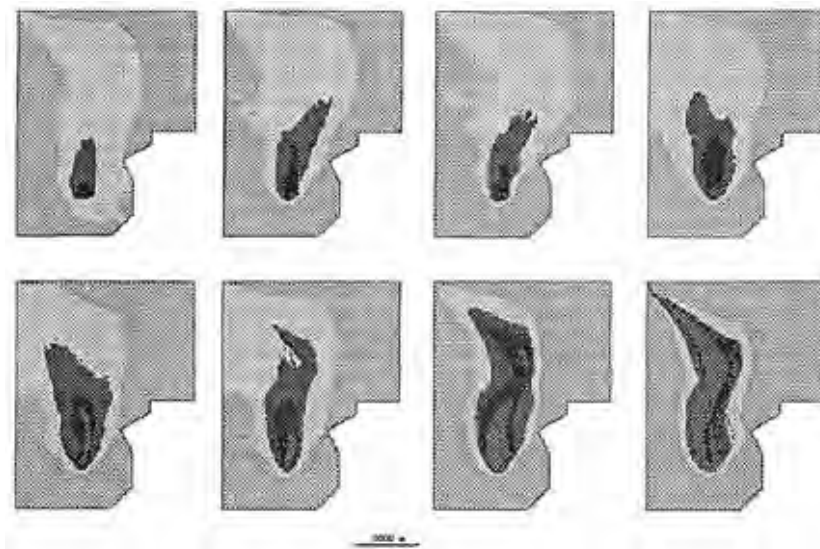


Figura 6. Zonas de captura de poços de extração de água subterrânea definidas por simulações estocásticas (KINZELBACH *et al*, 1996)

Guadagnini & Franzetti (1999) demonstraram, por meio de simulações estocásticas, o efeito da variação da condutividade hidráulica nas zonas de captura, para avaliar a possibilidade de bombeamento de uma substância traçadora em relação ao tempo, concluindo que as distâncias previstas, baseadas em um modelo conceitual homogêneo e isotrópico leva a diferenças substanciais em relação às distâncias observadas em campo. Sendo assim, os autores recomendam a introdução de conceitos probabilísticos na definição de perímetros de proteção de poços e de técnicas de remediação de aquíferos contaminados.

van Leeuwen *et al* (1999) apresentara uma abordagem estocástica para caracterização de incertezas na configuração de zonas de captura em função das heterogeneidades presentes em diferentes tipo de aquífero, conforme mostrado na **Figura 7**.

Cole & Silliman (2000) realizaram simulações estocásticas para delineação de perímetros de proteção de poços (PPPs) em uma área com um aquífero livre heterogêneo, encontrando resultados com incertezas associadas à esta delineação, relacionadas principalmente ao fluxo da água subterrânea por zonas de maior condutividade hidráulica. Com base nestas simulações, os autores propuseram uma metodologia para a introdução de fatores de segurança na definição dos PPPs, tendo em vista as heterogeneidades e conseqüentes incertezas existentes.

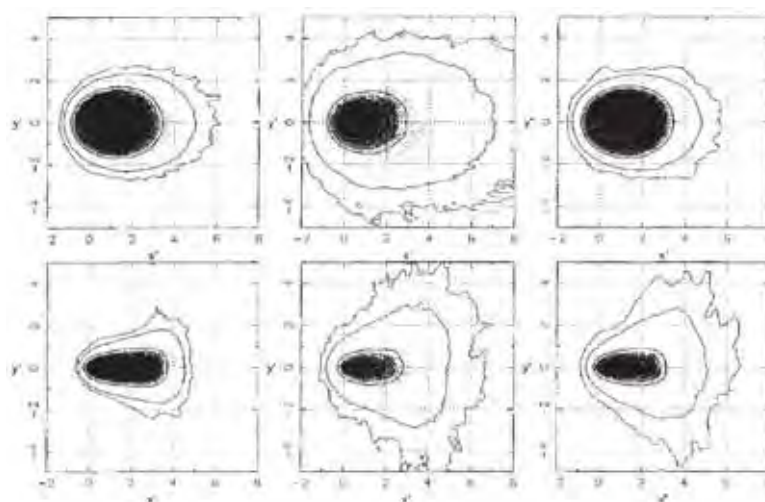


Figura 7. Zonas de captura de poços de extração de água subterrânea definidas por simulações estocásticas (VAN LEEUWEN *et al*, 1999)

De acordo com Coptý & Findikakis (2002), o dimensionamento da zona de captura de um poço em bombeamento deve considerar as heterogeneidades em diversas escalas de observação, sendo que as mais importantes são aquelas associadas a distribuição espacial de litofácies e a variabilidade das propriedades hidráulicas intra-fácies. Para definição destas heterogeneidades, os autores utilizaram-se de procedimentos stocásticos, com base em dados de condutividade hidráulica e informações das litologias em sondagens executadas. Os autores concluíram que a abordagem da distribuição das litofácies é o aspecto mais importante na delimitação da zona de captura do poço, sendo que recomendam para futuras caracterizações deve ser dada ênfase para o estudo da distribuição espacial das litofácies.

Ahern *et al* (2003) demonstraram os efeitos progressivos da introdução de heterogeneidades, pela aplicação de diversos modelos, iniciando-se dos mais simplistas até o mais complexos, na delimitação de zonas de captura de poços de extração de água em uma área de depósitos de canais fluviais entrelaçados. Estes identificaram que o uso de métodos simples, os quais negligenciam as heterogeneidades pode superestimar as zonas de captura. Também, em modelos mais complexos, os autores identificaram que, com mudanças na configuração da complexidade geológica da área, a configuração da zona de captura pode ser afetada consideravelmente.

Também utilizando-se de métodos probabilísticos, implementando a abordagem de equação-momento, Lu & Zhang (2003) e Zhang & Lu (2004) realizaram simulações para definição de zonas de captura em meios heterogêneos, os quais obtiveram resultados semelhantes àqueles obtidos por simulações estocásticas utilizando o método de Monte Carlo.

Indelman *et al* (2006), com o objetivo de determinar a quantidade de soluto, em função do tempo, na água subterrânea capturada por um poço de bombeamento e o controle de volume de aquífero que capta uma solução injetada por um poço, em um aquífero heterogêneo, utilizou de métodos estocásticos, mostrando diferenças significativas nos resultados em relação a um meio homogêneo.

Outros diversos autores apresentam a mesma abordagem em mais uma centena de artigos, definindo-se zonas de captura de poços de extração de água subterrânea, com os mais diversos objetivos, repetindo-se o uso de modelos estocásticos na simulação da distribuição do arranjo espacial da litologia e, conseqüentemente, das propriedades hidráulicas do meio físico, que influenciam no comportamento e na migração de contaminantes em subsuperfície, apresentando, também, significativa influência na projeção de sistemas de remediação baseados em bombeamento das águas subterrâneas.

Portanto, USEPA (2008) estabeleceu seis passos necessários para a delineação da zona de captura, a saber:

- **Passo 1** – Revisão dos dados disponíveis, do modelo conceitual e definição dos objetivos da remediação, incluídos os dados referentes a condutividade hidráulica e outras propriedades do meio físico.
- **Passo 2** – Definição da Zona de Captura Desejada – ZCD (Target Capture Zone).
- **Passo 3** – Interpretação dos níveis d'água:
 - o Mapas de superfície potenciométrica (horizontal) e mapas de diferença de nível (vertical);
 - o Pares de nível d'água (pontos de controle de gradiente).
- **Passo 4** – Realização de cálculos:
 - o Cálculo da vazão de fluxo estimado;
 - o Cálculo da largura da zona de captura (podendo incluir o cálculo de rebaixamento);
 - o Modelagem de níveis d'água, em conjunto com a simulação do trajeto de partículas e/ou modelagem de transporte de contaminantes.
- **Passo 5** – Avaliação das tendências de concentração dos contaminantes.
- **Passo 6** – Interpretação das zonas de captura atuais e comparação com a ZCD, gerenciando a ausência de dados e incertezas associadas.

Para definição da distribuição das litologias e, conseqüentemente, das propriedades hidráulicas da área, de maneira geral, são utilizadas técnicas de investigação diretas, por vezes, indiretas, como realização de sondagens com descrição do material, coleta de amostras de solo para determinação da granulometria das unidades litológicas existentes, instalação de poços de monitoramento, com a execução de testes para determinação da condutividade hidráulica.

De posse dos dados, estes são dispostos espacialmente em mapas, tendo sua representação efetuada por meio do método determinístico, ou seja, utilizando-se única e exclusivamente os dados obtidos.

Obviamente, desta maneira, se obtém a distribuição espacial das litologias e propriedades, porém, a definição desta distribuição fica limitada a quantidade de dados efetivamente obtidos, o que, muitas vezes, não é efetuado tendo em vista a necessidade de redução de custos durante a realização das investigações.

Isto se torna limitante em áreas com alta complexidade litológica onde ocorre uma variabilidade espacial acentuada das litologias e, conseqüentemente, das propriedades hidráulicas do meio, em função da atuação de processos naturalmente aleatórios, dificilmente redutível em uma avaliação.

Aliado a variabilidade espacial dos atributos, deve se considerar ainda as incertezas de uma investigação, referentes ao desconhecimento parcial desta variabilidade, que pode ser reduzida pela implementação de estudos adicionais da área ou pela aplicação de modelos estocásticos, se o meio apresentar características espaciais que permitam o uso destes modelos.

Desta maneira, em áreas de alta complexidade geológica iniciou-se o uso destes tipos de modelos probabilísticos para a definição da distribuição espacial das características hidráulicas das unidades litológicas, constituindo-se diversos cenários de distribuição das litologias, podendo-se avaliar as diversas possibilidades da configuração da zona de captura dos poços em bombeamento.

Neste trabalho, será apresentada a caracterização geológico-hidrogeológica de uma área situada em Cubatão/SP, que apresenta condições complexas de geologia, por estar situada na interface entre a Serra do Mar e a planície aluvionar do Rio Cubatão, onde se observa alta complexidade hidrogeológica.

Também serão apresentadas possíveis configurações da zona de captura de um poço de bombeamento em um local específico da área estudada, utilizando-se, para tanto, modelos estocásticos que considerem as características de ambientes deposicionais, como as Cadeias de Markov, representadas aqui pelo código computacional T-PROGS – *Transition Probability Geostatistics Software* (CARLE, 1999).

4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

4.1. MATERIAIS E PROCEDIMENTOS

Para realização da caracterização geológica e hidrogeológica regional da área de estudo, e para demonstrar os efeitos das incertezas na projeção de um poço de bombeamento para remediação de um local específico da área de estudo, foram utilizados os seguintes procedimentos e materiais:

- ✓ Levantamento bibliográfico para caracterização da área quanto à geologia, geomorfologia, hidrologia e hidrogeologia regional e local.
- ✓ Consulta e compilação de banco de dados de sondagens à percussão (SPTs) para caracterização geológica local.
- ✓ Compilação de dados de poços de monitoramento existentes na área de estudo, visando à caracterização hidrogeológica local.
- ✓ Realização de ensaios granulométricos;
- ✓ Compilação de dados e realização de ensaios hidrogeológicos tipo *slug test* para determinação da condutividade hidráulica;

- ✓ Simulação numérica por diferenças finitas, baseada no código computacional MODFLOW (MCDONALD & HARBAUGH, 1988), para comprovação do modelo hidrogeológico conceitual e representação da hidrogeologia regional;
- ✓ Simulação estocástica, utilizando-se cadeias de Markov (CARLE, 1999), para determinação da distribuição espacial da condutividade hidráulica, em parte da área de estudo, como estudo de caso, para demonstrar o grau de incerteza associado às características do meio físico da área;
- ✓ Simulação numérica por diferenças finitas, baseada no código computacional MODFLOW (USGS, 1988), para demonstração dos efeitos das incertezas associados, na previsão da zona de captura de um poço de bombeamento para remediação hipotética de um local específico da área estudada.

4.2. CARACTERIZAÇÃO REGIONAL

4.2.1. Hidrologia

4.2.1.1. Rede Hidrográfica

Situada na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos 7 da Baixada Santista (Decreto nº 10.755/1977; CETEC, 2002), a área de estudo está inserida na Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão (Classes 1 e 2, segundo Resolução CONAMA nº 357/2005), com área de 175,55 Km².

Localmente, a área está instalada na Bacia Hidrográfica do Rio Pilões, apresentando formato irregular, alongado segundo NE-SW em seus médio e baixo cursos, tendo dois apêndices, o primeiro N-S referente ao Rio Marcolino e o segundo nas cabeceiras da sub-bacia do Rio Passareúva. O formato irregular é decorrente do processo de captura dos rios à montante, alcançando o sistema de drenagem do planalto.

Os afluentes mais importantes, regionalmente, são os rios: Cubatão de Cima, Passareúva, Pilões, Perequê e Mogi, todos situados na margem esquerda do rio Cubatão. Este complexo hidrográfico tem como desembocadura o Complexo Estuarino de Santos-São Vicente, no Largo do Canéu (**Figura 8**).



Figura 8. Sistema hidrográfico da região de estudo

As drenagens são controladas estruturalmente, adaptando-se a antigos lineamentos estruturais, assumindo um padrão ortogonal aos taludes da serra, com padrão dendrítico-retangular (RODRIGUES, 1992).

No Relatório Zero desta UGRHI (CETEC, 2002) é apresentado o cálculo das vazões médias de longo período - Q_{LP} e a média das mínimas de 7 (sete) dias consecutivos em 10 (dez) anos de recorrência - $Q_{7,10}$ para os rios que drenam a área, conforme valores apresentados na **Tabela 1**.

Tabela 1. Vazões de longo prazo e $Q_{7,10}$ das sub-bacias dos rios Perequê e Cubatão

RIO	ÁREA DRENADA	PRECIPITAÇÃO	Q_{LP}	$Q_{7,10}^1$
	(Km ²)	(mm)	(m ³ /s)	(m ³ /s)
Cubatão	175,55	2400,0	8,09	1,970
Perequê	64,43	2400,0	2,96	0,725

A vazão do Rio Cubatão registrada é de 7,4 m³/s, ampliada para 87,0 m³/s quando recebe contribuição da Usina Hidrelétrica Henry Borden (RODRIGUES, 1992).

Os picos pronunciados de vazão estão associados às precipitações que ocorrem na região, podendo chegar a vazões de 550,0 m³/s, como registrado na estação fluviométrica Ponte Preta (BE-77-R).

Por seu alto gradiente hidráulico, da ordem de 46,0 m/km, o rio Cubatão apresenta curso de característica torrencial, durante e logo após eventos de precipitação elevada, diminuindo progressivamente até novo evento chuvoso, podendo decrescer em até 10,0 vezes sua vazão em três dias após o evento chuvoso anterior, caso não venha a ocorrer outro evento.

Ainda neste relatório, o uso é praticamente de 50,0 % industrial e 50,0 % urbano. Considerando a captação de ambas as sub-bacias dos rios Perequê e Cubatão, em toda a UGRHI, a vazão de uso é de 12,91 m³/s, divididos em 6,09 m³/s para captação urbana e 6,82 m³/s para captação industrial, com lançamento total de 6,8 m³/s, divididos em 1,75 m³/s para lançamento urbano e 5,05 m³/s para os lançamentos industriais (CETEC, 2002).

¹ A vazão $Q_{7,10}$ corresponde à estimativa estatística da vazão mínima média que pode ocorrer em 7 dias consecutivos com média recorrente em um intervalo de 10 anos.

4.2.1.2. Pluviometria

A avaliação da pluviometria foi efetuada com base nos registros obtidos nos bancos de dados oficiais do órgão fiscalizador dos recursos hídricos do Estado de São Paulo (DAEE/SP – Departamento de Águas e Energia Elétrica) e da Agência Nacional de Águas - ANA, onde foram resgatadas as observações efetuadas entre os anos de 1936 a 2004, em 32 estações de observação, salientando que as estações não apresentaram registros para todos os anos do período acima, conforme porcentagens anuais de observação apresentadas na **Figura 9**.

A soma anual das precipitações médias mensais na região de Cubatão é de 2.366,815 mm, sendo que no mês de janeiro observa-se o pico máximo de 349,1 mm e no mês de junho o pico mínimo, com precipitação de 114,8 mm.

A estatística das estações observadas em seus respectivos anos de monitoramento são representadas na **Figura 10**, conforme dados da **Tabela 2**.

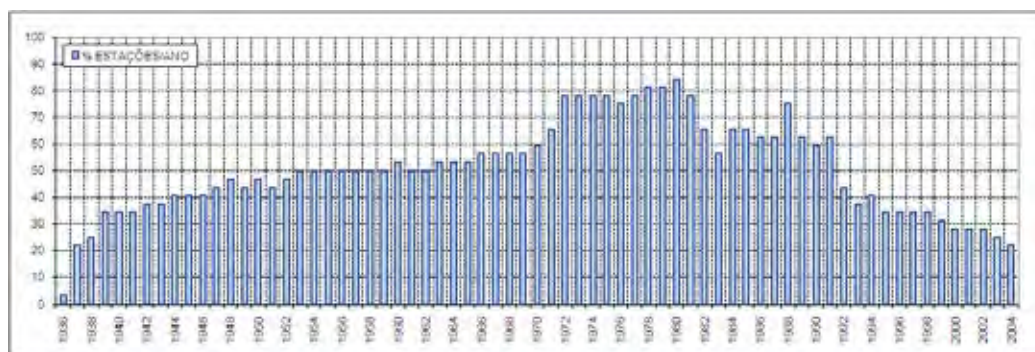


Figura 9. Porcentagem de estações pluviométricas com registro entre os anos de 1936 e 2004, para a região de Cubatão/SP.

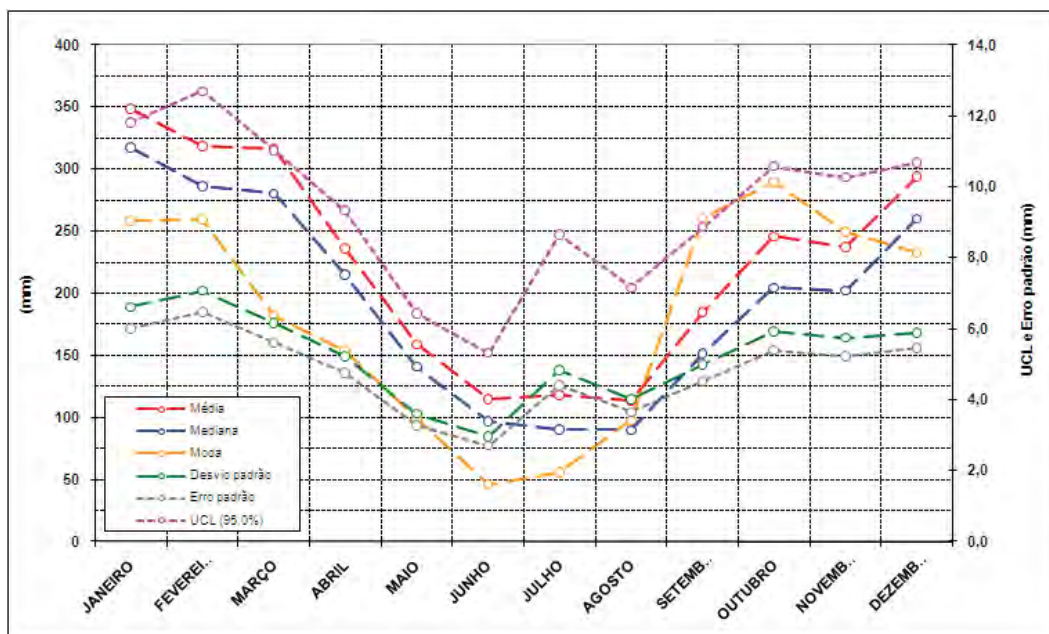


Figura 10. Estatísticas pluviométricas da região de Cubatão/SP

Tabela 2. Estatística dos dados pluviométricos das estações da região de Cubatão/SP (DAEE-SP e ANA)

PARÂMETROS	JANEIRO	FEVEREIRO	MARÇO	ABRIL	MAIO	JUNHO	JULHO	AGOSTO	SETEMBRO	OUTUBRO	NOVEMBRO	DEZEMBRO
Média	349,072	318,825	316,742	236,419	158,891	114,809	118,114	113,589	185,136	245,721	237,246	294,253
Erro padrão	6,016	6,470	5,628	4,757	3,279	2,710	4,409	3,647	4,520	5,395	5,235	5,450
Mediana	317,800	286,600	280,400	215,150	140,800	96,600	89,900	89,800	151,500	204,500	202,200	260,350
Moda	258,200	259,300	182,000	153,400	98,700	46,100	55,600	97,500	260,700	289,700	249,400	232,800
Desvio padrão	188,893	202,122	176,272	149,522	103,020	84,628	138,388	114,876	142,279	169,146	164,231	168,338
Variância	35.680,607	40.853,449	31.071,769	22.356,935	10.613,195	7.161,824	19.151,368	13.196,401	20.243,370	28.610,301	26.971,879	28.337,676
Curtose	4,458	3,202	2,513	2,470	2,615	5,713	126,073	74,535	34,027	14,766	12,369	1,821
Assimetria	1,550	1,229	1,253	1,207	1,252	1,705	9,029	6,394	3,792	2,506	2,414	1,194
Intervalo	1.591,100	1.629,800	1.216,500	1.102,200	732,800	700,100	2.438,000	1.823,000	1.972,400	1.798,700	1.747,200	1.100,900
Mínimo	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	3,600	3,300	20,800	0,000
Máximo	1.591,100	1.629,800	1.216,500	1.102,200	732,800	700,100	2.438,000	1.823,000	1.976,000	1.802,000	1.768,000	1.100,900
Soma	344.184,800	311.173,000	310.724,000	233.582,100	156.825,600	111.938,700	116.342,200	112.680,000	183.469,900	241.544,200	233.450,500	280.717,400
Contagem	986	976	981	988	987	975	985	992	991	983	984	954
UCL (95,0%)	11,805	12,696	11,044	9,335	6,435	5,319	8,653	7,157	8,869	10,587	10,274	10,696

4.3. Geologia Regional

4.3.1. Geotectônica

Diversos autores, principalmente na década de 1970, apresentaram estudos diversos referentes a Serra do Mar, pois, diversas obras foram realizadas na área, e necessitaram de investigação geológico-geotécnica, destacando-se os estudos iniciais de Hartt (1870 *apud* VARGAS, 1999), seguido pelos estudos sistematizados de Oliveira & Leonardos (1943 *apud* VARGAS, 1999), tendo continuidade com os trabalhos de definição da estratigrafia da Serra do Mar por Sadowski (1974) e Hasui & Sadowski (1976) e, por trabalhos de caracterização geotectônica conforme Fúlfaro & Suguio (1974), Fúlfaro & Ponçano (1974) e Chang *et al.* (1992).

Os trabalhos de caracterização petrológica e mapeamento geológico da Serra do Mar foram desenvolvidos por Coutinho (1971), IPT (1978) e, aqueles, abrangendo os aspectos da evolução geológico-geomorfológica da mesma, foram abordados por Cruz (1980), Riccomini (1987), Sadowski & Motidome (1987), Sadowski (1991), Rodrigues (1992), Endo & Machado (1993), Almeida & Carneiro (1998), Machado Filho (2000), IPT (2002), entre muitos outros, sendo aqui apresentados aqueles de maior destaque e relevância.

Dos trabalhos mais recentes, devem ser destacados aqueles de Hasui *et al.* (1995), Suguio & Martin (1994), Machado Filho (2000) e IPT (2002), os quais buscaram realizar uma compilação dos trabalhos já realizados para a área de estudo e consolidar um cenário geológico para a mesma, sendo que os primeiros autores apresentaram o arcabouço geológico do Embasamento Cristalino e os demais se atêm aos aspectos da sedimentação.

Outros autores como Rodrigues (1992) e Almeida & Carneiro (1998) também apresentam compilação semelhante, inclusive com aplicações diferenciadas, apresentando desde considerações quanto ao arcabouço geológico-tectônico da área, além de questões aplicadas à movimentação de massas.

IPT (1989; 1993) e Hasui *et al* (1995) apresentaram anomalias *Bouguer* que marcam grandes descontinuidades estruturais (suturas) distintas em 3 blocos crustais (**Figura 11**): (i) Bloco Brasília; (ii) Bloco Vitória e; (iii) Bloco São Paulo, que, em virtude da colisão entre os mesmos, apresentam rochas extremamente deformadas no contato entre estes.

A área de estudo está situada na Serra do Mar (Bloco São Paulo), que faz parte do “Sistema Rift do Leste Brasileiro” - SRLB (**Figura 12**) assim denominado por Chang *et al.* (1992). Este constitui o segmento setentrional do “Sistema Rift do Atlântico Sul” – SRAS, conforme Almeida (1976) e Riccomini (1987). Este rifte se formou durante a era Mesozóica, separando os continentes da América do Sul e da África, os quais pertenceram ao Supercontinente Gondwana.

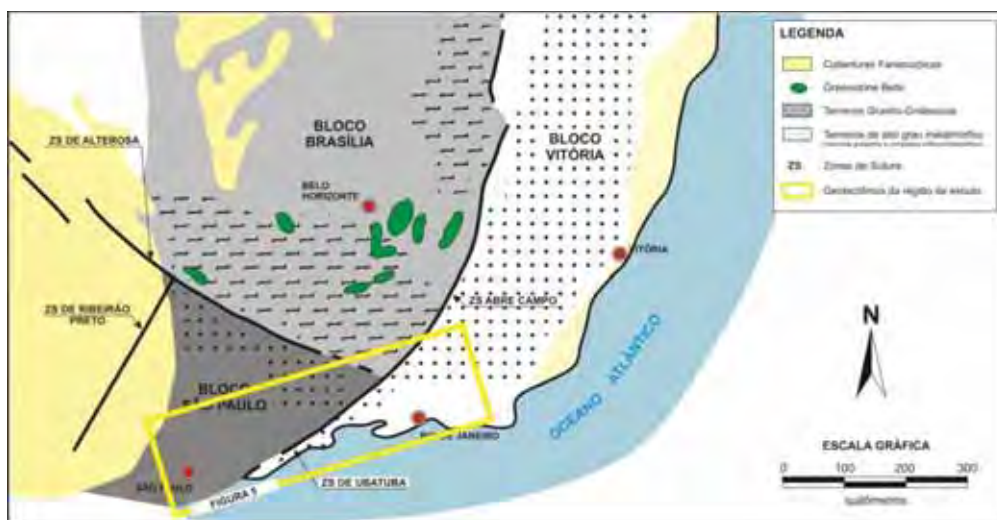


Figura 11. Contexto geotectônico regional.

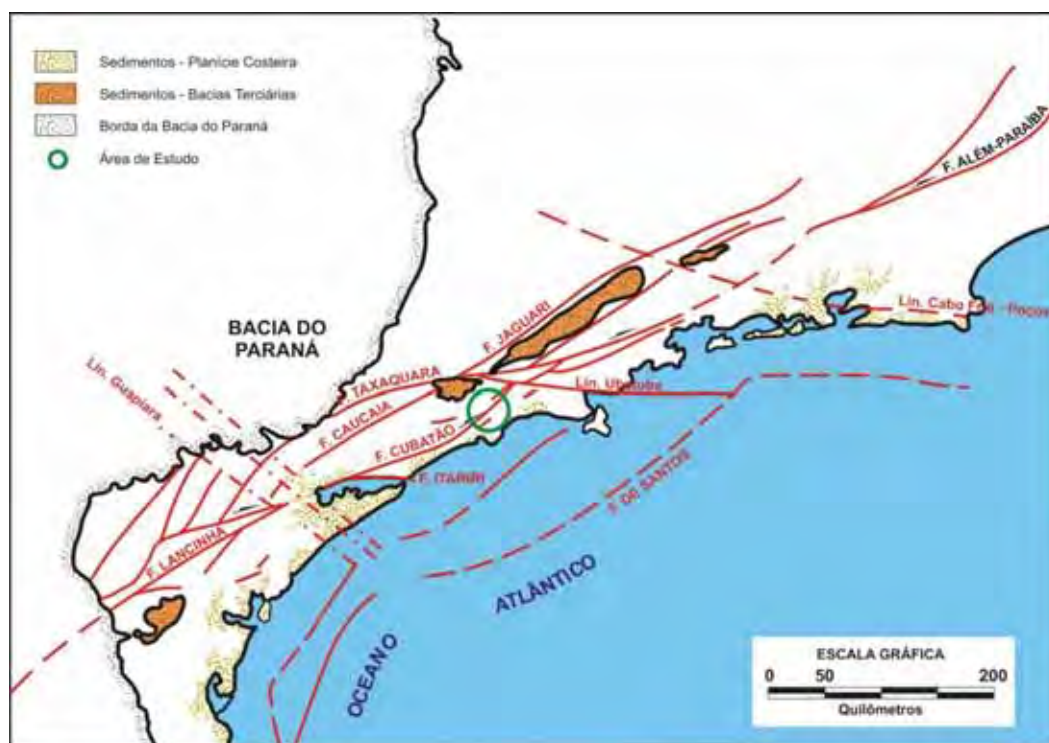


Figura 12. Contexto geotectônico da área de estudo.

O SRLB faz parte da margem leste do Bloco América do Sul, resultante de deslocamentos crustais de caráter extensivo, formando vales de subsidência de paredes paralelas, alongadas e íngremes, formados por *horsts* e *grabens* alinhados segundo direção NE-NNE, aproximadamente subparalelos aos lineamentos principais do Embasamento Cristalino (CHANG *et al.*, 1992).

Na porção da área de estudo, na Serra de Cubatão, o SRLB possui direções predominantes de lineamento de N55-60E, com conjunto subsidiário com direção de N45-55W (CHANG *et al.*, 1992).

O Embasamento Costeiro brasileiro foi afetado por 3 grandes eventos tectono-magmáticos Pré-Cambrianos, já desde o Arqueano:

- ✓ Jequié – Arqueano (2700 a 2600 M.a.);
- ✓ Transamazônico – Proterozóico (2200 a 1800 M.a.) e;
- ✓ Brasileiro – do início ao final do Proterozóico (700 a 500 M.a.).

Atribui-se que a Serra de Cubatão situa-se na Província Pré-Cambriana Ribeira (CORDANI *et al.*, 1984; SCHOBENHAUSS *et al.*, 1984) ou, então, denominada de Mantiqueira por Almeida & Hasui (1985).

Nesta província, as rochas foram extremamente afetadas pelo metamorfismo do Ciclo Brasileiro, recortada por intenso cisalhamento transcorrente, associado aos estágios de convergência de blocos continentais, quando, então, foi gerado o “Sistema de Megafalhas de Cubatão/Além-Paraíba” (SADOWSKI & MOTIDOME, 1987; SADOWSKI, 1991) ou “Sistema de Cisalhamento do Sudeste” (ENDO & MACHADO, 1993), conforme mostrado na **Figura 12**.

Este, engloba extensas zonas de cisalhamento subparalelas, com direções variando de N50E a N70E, as quais se estendem desde o Oceano Atlântico até a borda SSE de Minas Gerais (MG), com aproximadamente 150,0 Km de largura.

Indícios tectônicos são observados desde o Proterozóico superior até o Mesozóico, com várias reativações posteriores, afetando, inclusive, os sedimentos Cenozóicos (SADOWSKI, 1991; RICCOMINI, 1987).

O Sistema de Megafalhas de Cubatão apresenta uma zona central de falhamentos, constituída por 3 sistemas de falhas, com extensão exposta de 800,0 Km, e mais 1.300,0 Km sob a Bacia do Paraná, totalizando mais de 2.000,0 Km (ZALÁN *et al.*, 1987), a saber:

- ✓ Lancinha-Itapeúna,
- ✓ Cubatão e
- ✓ Além-Paraíba.

Na porção de estudo, o sistema de falhas Cubatão, encontra-se associado a uma faixa de metassedimentos de baixo grau, separando as rochas de alto e médio graus de metamorfismo do Complexo Costeiro, daquelas de médio grau do Bloco Juquitiba (HASUI & SADOWSKI, 1976).

Sadowski (1974 e 1991) considerou este sistema de falhamentos como transcorrente dextral, sendo que nas proximidades de Santos, apresenta evidências de transcorrência e também de feições de acavalamento.

A feição mais importante da região de estudo, refere-se à zona de cisalhamento de Cubatão, que passa longitudinalmente pela área, na direção geral NE-SW, com extensão aproximada de 60,0 Km e largura de 800,0 m (**Figura 11**), estando recoberta pelos sedimentos aluvionares do rio Cubatão (IPT, 2002).

Esta zona de cisalhamento, denominada de Zona de Cisalhamento Cubatão - ZCC, trata-se de uma zona de cisalhamento dúctil a dúctil-rúptil, transcorrente dextral de alto ângulo, que provocou intensa milonitização em toda área, imbricando e lenticularizando os corpos rochosos (IPT, 2002).

As litologias constituintes da Serra do Mar são divididas de acordo com o contexto geotectônico acima mencionado, separados em dois conjuntos de idade Pré-Cambriana:

- *níveis crustais mais profundos*, representados por gnaisses e metassedimentos de alto grau metamórfico associados às suturas entre os blocos e;
- *níveis crustais rasos*, representados por gnaisses de médio grau e metassedimentos de baixo a médio graus metamórficos e, ainda, por conjuntos litológicos fanerozóicos, compreendendo granitóides diversos, rochas básico-ultrabásicas e sedimentos cenozóicos (IPT, 1989; 1993).

Quanto à estruturação interna, a foliação é predominante, seguido de lineações e descontinuidades, conforme **Tabela 3** a seguir.

Hasui *et al.* (1995), então, definem os principais episódios tectônicos, com base nos diversos estudos compilados por estes autores, conforme mostrado na **Figura 13**.

Tabela 3. Feições estruturais mais comuns nos litotipos da Serra do Mar (IPT, 2002).

FEIÇÃO	CARACTERÍSTICAS	
Foliação	Predominante, é representada por xistosidades e gnaissosidades de direção NE-SW, com mergulhos subverticais a subhorizontais	
	Bandeamento Composicional	Faixas alternadas de composição mineralógica distintas
	Foliação milonítica	Orientação planar de minerais ou agregados minerais deformados ao longo de zonas de cisalhamento dúctil
Lineação	Feições lineares dispostas nos planos de foliação, indicando a direção do movimento das zonas de cisalhamento, sendo que para esta área, indicam movimento direcional.	
Descontinuidades	Feições rúpteis onipresentes, classificadas como falhas ou zonas de cisalhamento rúptil e juntas, podendo ser transcorrentes, inversas ou normais.	

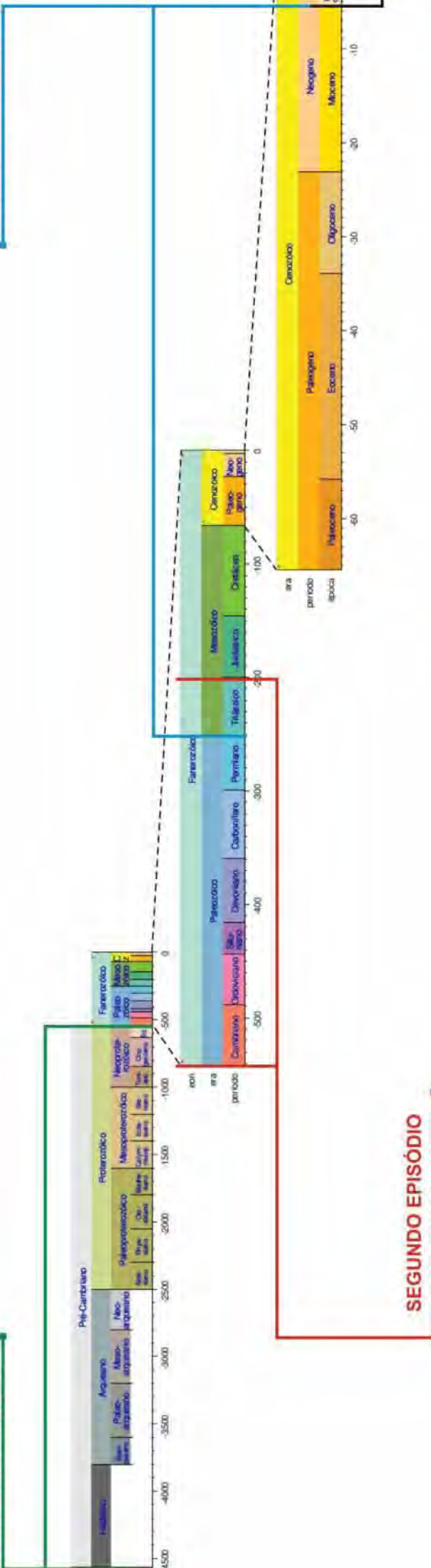
Para Almeida & Carneiro (1998), a Serra do Mar formou-se a partir da Falha de Santos, como resultado do abatimento Paleocênico do planalto, tendo suas encostas recuadas até a posição atual pela erosão diferencial regressiva.

Neste trabalho são apresentados somente os aspectos gerais da geotectônica da área, para contextualização regional do local estudado, devendo ser consultadas as bibliografias específicas para maior detalhamento.

Apresenta 4 etapas de evolução, onde ocorreu, sequencialmente:

- (i) a formação das foliações e lineações
- (ii) que são afetadas pelas zonas transcorrentes dextrais de cisalhamento dúctil, com direção NE-SW
- (iii) desenvolvimento de ondulações
- (iv) formação de juntas de alto mergulho, representando o estágio final de alívio de tensões

PRIMEIRO EPISÓDIO



SEGUNDO EPISÓDIO

Geração de intrusivas granitíoides

QUARTO EPISÓDIO

Refere-se à neotectônica, que corresponde ao basculamento de blocos e sedimentação em bacias restritas, em função de regime tectônico transcorrente, transpressivo e transensivo.

Figura 13. Cronologia dos episódios tectônicos de formação e evolução da Serra do Mar

4.3.2. Morfotectônica

A área de interesse está inserida na interface da Serra de Cubatão (denominação local para a Serra do Mar) com a Planície Costeira, estando presente nas províncias geomorfológicas da Serra do Mar e Costeira, definidas por Ponçano *et al.* (1981), abrangendo ambas as margens do rio Cubatão (**Figura 14**).

No primeiro domínio, correspondente ao Domínio Serra do Mar, predominam encostas íngremes, com declividades médias da ordem de 30,0 %, picos máximos de altitude entre 750,0 e 770,0 metros.

O relevo predominante é de escarpas festonadas, desfeitas em anfiteatros separados por espigões, com vertentes de perfil retilíneo, onde predominam declividades altas e amplitudes de formas maiores que 100,0 metros, alongando-se para e interdigitando-se com a Planície Costeira.

IPT (1986) dividiu os relevos da Serra do Mar presentes na região de estudo em 3 unidades principais:

- morrotes de pequenas dimensões isolados em meio à planície sedimentar;
- escarpas festonadas em anfiteatros;
- escarpas festonadas complexas.

O desenvolvimento da frente das escarpas serranas e das drenagens principais foi condicionado pelo sistema regional de juntas N50-70E, paralelos à foliação regional e o entalhe das drenagens perpendiculares às escarpas e o desenvolvimento dos vales foram condicionados pelos sistemas de juntas N30-50W e N5-15E (IPT, 2002), condicionando também a atual linha de costa do Estado de São Paulo.

Este desenvolvimento se deu a partir de erosão remontante da escarpa da serra em direção ao planalto, sendo que as diferentes direções de lineamentos impuseram ao relevo atual o lineamento dos segmentos de escarpas e das principais feições de drenagem paralelas a estas escarpas, bem como aquelas que condicionam o relevo na direção NW-SE, formando as drenagens afluentes destes rios. A linha da Serra do Mar apresenta esta mesma direção, afastando-se do litoral nas proximidades do município de Peruíbe, ainda preservada esta direção.

O direcionamento é controlado por diversos fatores, representados por traços de:

- contatos litológicos;
- foliação metamórfica;
- zonas de cisalhamento dúctil;
- zonas de falhas e;
- fraturas e juntas.

Na área da Serra de Cubatão há forte controle estrutural, sendo que os principais traços são os lineamentos NE a ENE, controlando as feições de drenagem e também as de relevo.

Ao longo destes lineamentos é que se reconhecem os grandes desnivelamentos da Serra do Mar, sistematicamente arranjados de forma a apresentar o bloco abatido a SE e o bloco elevado a NW, delineando os grandes traços da Serra do Mar, paralelos à linha de costa.

Então, interpreta-se que estes lineamentos são importantes na formação do relevo regional e local, em parte como herança do rifteamento e abertura do Oceano Atlântico, em regime de distensão com eixo principal NW-SE, formando as principais bacias alongadas marginais ou os traços de quebra dos continentes em arranjos de falhas normais.

São reconhecidos grandes alinhamentos associados a esta direção, ao longo dos traços da Falha de Cubatão, a partir da região de Itanhaém, onde a linha de serra se afasta da linha de costa.

Ao longo destes traços, se observam outras feições morfológicas de menor importância regional, mas que condicionam o ajuste local do sistema relevo-drenagem, tais como:

- Vales achatados e estreitos, condicionando regiões de acumulação de sedimentos com desenvolvimento de planícies aluvionares e sistemas meandantes de drenagens, sendo uma das principais feições com estas características o rio Cubatão a montante da confluência com o rio Pilões e;
- Trechos elevados de serra, formando altos topográficos alinhados e estreitos.

Outras direções de lineamentos também são importantes no condicionamento do relevo atual. Os traços NW-SE são marcantes com pequenos traços retilíneos condicionando as drenagens presentes nas escarpas da serra, e até mesmo do Planalto Paulista e da Planície Costeira. Uma das feições NW-SE de destaque é aquela referente ao rio dos Macacos, situado no município de Itanhaém (SP).

Na região de Santos e Cubatão, os lineamentos NW-SE são bastante importantes, pois, o arranjo sistemático de falhas normais, com alternância de blocos altos e baixos, formando grabens e horsts, avança continente adentro.

O conjunto de lineamentos E-W marca a compartimentação morfotectônica da região sudeste brasileira, delineando um importante feixe transcorrente dextral ao longo do Lineamento Paranapanema, porém, estes não são importantes na região litorânea da serra, marcando pouco extensos feixes de drenagens (HASUI *et al.*, 1995).

Os conjuntos N-S não apresentam importância para o litoral do Estado de São Paulo, aparecendo somente como traços isolados, formando localmente feixes paralelos e em menor importância como condicionadores do relevo.

Outras feições geomorfológicas foram descritas por IPT (1986) como corpos de tálus, alvéolos, soleiras litológicas, feições de leitos de drenagem com blocos rochosos, sedimentos erosivos, cicatrizes de escorregamentos e as planícies aluvionares ao longo dos rios Cubatão e Perequê e seus afluentes.

As direções das feições hidrográficas estão diretamente associadas com os lineamentos estruturais regionais NE-SW como os traços da Zona de Falha de Cubatão, imprimindo formato alongado às bacias com segmentos retilíneos, demarcados pelos segmentos retilíneos da borda das escarpas ou pequenas serras alinhadas paralelamente a esta zona falha.

O segundo domínio geomorfológico, representado pela Planície Costeira Sedimentar, tem extensão bastante pronunciada e apresenta relevo plano com rios meandantes cortando os sedimentos depositados nesta planície, com morros-testemunho esparsos por toda a sua extensão, até a orla marítima.

4.3.3. Unidades Geológicas

As unidades geológicas existentes na área, segundo Hasui *et al.* (1995) e Suguio & Martin (1994), são representadas por rochas do *Embasamento Cristalino* e por *Sedimentos Terciário-Quaternários*, conforme distribuição apresentada no mapa geológico regional da **Figura 15**.

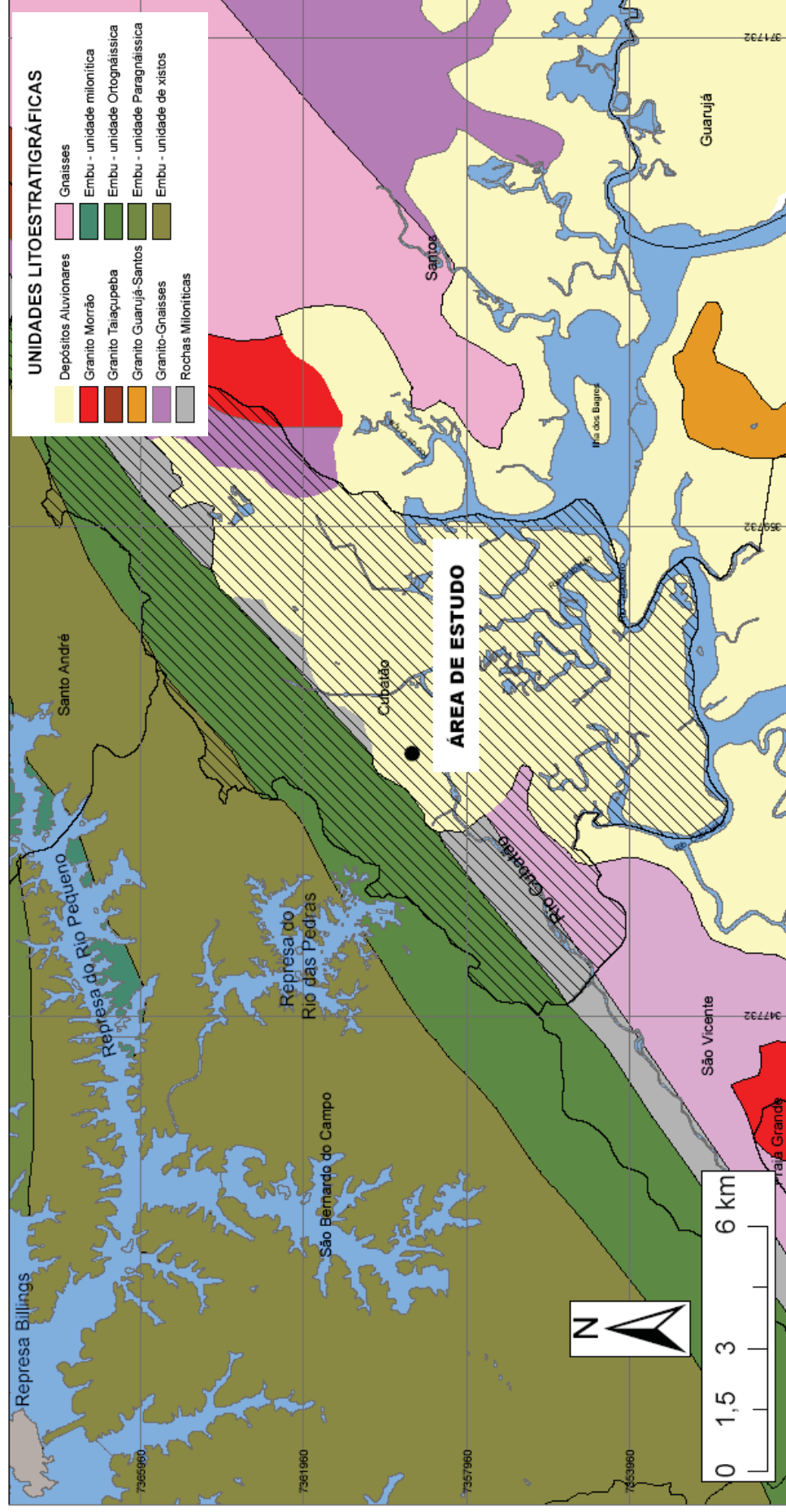


Figura 15. Mapa geológico regional (CPRM, 2001)

4.3.3.1. *Embasamento Cristalino*

As rochas do Embasamento Cristalino são representadas por conjuntos litológicos diversos, separados em dois conjuntos, ambos de idade Pré-Cambriana, denominados de *Complexo Piaçagüera* (HASUI & SADOWSKI, 1976; IPT, 1993) e *Grupo Paraíbuna* (IPT, 1993), que, predominantemente, ocorrem nas áreas das encostas da Serra do Mar, e nos morrotes dispersos pela Planície Sedimentar. Também são consideradas as rochas granitóides do Paleozóico e as rochas básicas do Mesozóico, como integrantes do Embasamento Cristalino.

O *Complexo Piaçagüera* é constituído por rochas metamórficas de alto grau, representadas por gnaisses de diversos tipos (bandado, laminado, homogêneo, porfiróide de granulação fina a muito grossa), tonalíticos a graníticos, as quais se encontram mais ou menos migmatizadas, predominando a estrutura estomatítica, com leucossomas rosados a cinzentos.

Já o *Grupo Paraíbuna*, constituído por metassedimentos, aparecem intercalados às rochas do Complexo Piaçaguera, em forma de faixas e lentes, compostas por rochas calco-silicáticas, mármore, micaxistos e quartzitos, e alguns corpos anfibolíticos de pequena expressão.

Ambas as unidades ocorrem em faixas alongadas de direção ENE, definidas pela foliação, paralelas à direção da escarpa da Serra do Mar.

Ainda compondo o Embasamento Cristalino, também são observados pequenos corpos granitóides intrusivos.

A seção geológica da **Figura 16**, apresentada por Sadowski (1991), mostra a distribuição, a relação e o ângulo de mergulho destas unidades em um trecho da Serra do Mar, nas proximidades da Usina Henry Borden, localizada adjacente a área de estudo desta tese.

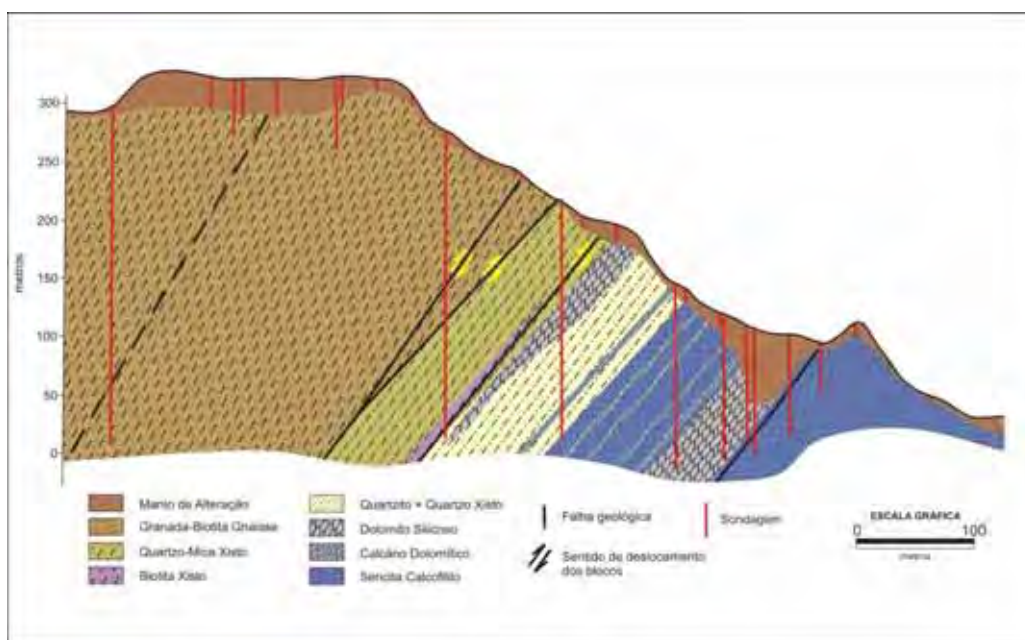


Figura 16. Seção geológica regional.

Fonte: modificado de Sadowski, 1991

Os litotipos que compõem as escarpas da Serra do Mar são apresentados na **Tabela 4** a seguir.

Tabela 4. Tipos litológicos presentes na Serra de Cubatão (IPT, 2002)

UNIDADE	DESCRIÇÃO
Rochas metamórficas migmatizadas de fácies anfibolito	Biotita gnaisses e micaxistos com lentes de quartzito e anfibolitos (Cgx)
	Migmatitos homogêneos (Cgm)
Ectinitos e migmatitos de fácies xisto verde a anfibolito	Xistos e gnaisses migmatizados (Axm)
	Micaxistos e filitos (Ax)
	Quartzitos e quartzitos impuros (Aq)
	Rochas calciossilicáticas e anfibólio xistos (Ac)

4.3.3.2. *Manto de Alteração*

Os produtos de alteração das rochas do Embasamento Cristalino estão associados à composição litológica da Serra do Mar e às características climáticas da região, onde se observa intensa pluviometria e temperaturas altas, típico de climas subtropicais, gerando intensa atividade de intemperização, e consequente manto espesso de solos de alteração (IPT, 2002).

Segundo IPT (2002), os principais materiais que constituem este manto de alteração estão divididos em:

- **Tálus:** são constituídos por depósitos de blocos matriz-suportados, caracterizados por:
 - o *Matriz:* material predominantemente argiloso a arenoso, com constituição e granulometria bastante heterogêneas, muitas vezes saturados por água e;
 - o *Blocos:* seixos, matacões e fragmentos de rochas diversas, desde bastante alterados a praticamente são, imersos na matriz em proporções variadas, com posicionamento totalmente caótico. Em função da deposição diferencial ou pela posterior lixiviação, estes podem por vezes encontrar-se acumulados nas bases destes depósitos, conferindo um primeiro horizonte contínuo de materiais granulares grossos.

Conforme descrito por IPT (1986), os depósitos de tálus apresentam duas fases de formação, onde os mais antigos apresentam maior compactação, alteração e lateritização em relação aos depósitos similares mais recentes. Podem ter espessuras de 6,0 a 10,0 metros.

São constituídos por matacões, blocos e seixos, polimíticos, angulosos a subarredondados, com distribuição caótica no depósito. A matriz destes depósitos é reduzida em relação aos rudáceos, tendo sua composição variada em função das litologias proximais.

- **Solo coluvionar** (ou solo superficial): sem vestígios de sua origem residual, apresenta textura diferenciada de local para local em função da litologia dominante. Podem apresentar textura arenosa, quando se encontram nas regiões onde ocorrem rochas gnáissicas a graníticas, principalmente naquelas que há predominância de migmatitos homogêneos ou oftalmíticos de neossoma dominante, classificados como areias argilosas pouco siltosas. Para as regiões que ocorre predomínio de rochas xistosas, como migmatitos embrechíticos com paleossoma de xistos dominante, estes apresentam textura argilosa a siltosa. Por vezes, apresenta-se com processo de lateritização ou já lateritizados. IPT (2002) divide os solos coluvionares em dois horizontes, a saber:
 - o *Horizonte superficial* (espessura da ordem de 0,5 m) - são caracterizados pela densa fixação de raízes da vegetação e;
 - o *Horizonte inferior* (0,5 a 1,5 m de espessura) - compreende porção com poucas raízes, predominando as características acima apresentadas.

Para Hessing (1976 *apud* MACHADO FILHO, 2000) e Wolle (1981), o solo superficial apresenta extensão generalizada, pouco espesso (aproximamente 1,0 m), podendo ser denominado de solo residual maduro, quando formado *in-situ* e coluvião, ou solo coluvionar, quando transportado. Apresentam-se lateritizados, com coloração amarelada a avermelhada.

- **Solo saprolítico** (ou residual): formado *in-situ*, podendo ser movimentado pela dinâmica superficial das encostas, apresenta vestígios da rocha original, como xistosidade, fraturas e núcleos menos intemperizados. Apresentam estrutura maciça. Assim como para os solos coluvionares, estes apresentam textura areno-argilosa para as regiões onde predominam as unidades gnáissicas a graníticas, e silto-argilo-arenosas para as regiões xistosas.

Possuem espessura errática, podendo atingir vários metros, porém, predominam as espessuras na faixa entre 1,0 e 3,0 m, por vezes ausente em alguns locais e com uma dezena de metros em outros locais. Pode apresentar cores nas tonalidades avermelhadas e arroxeadas.

- **Saprolito** (zona de blocos ou de transição): representa a transição entre os materiais terrosos e rochosos, predominando blocos de rocha, desde totalmente alterados a quase integralmente preservados. A presença de trincas é intensa, atribuindo natureza descontínua a este horizonte, as quais podem apresentar-se abertas ou preenchidas por material de alteração ou por materiais das unidades subjacentes.
- **Rocha:** esta unidade compreende o maciço rochoso subjacente, sendo que nos primeiros 10,0 m apresenta grande erraticidade em termos de grau de alteração e fraturamento, os quais conferiram alteração diferencial devido às foliações, bandeamento e faixas de diferentes composições (granito-gnáissicas a xistosas), bem como pelos próprios fraturamentos. Segundo Wolle & Carvalho (1989), o topo rochoso é extremamente irregular, apresentando fraturas abertas intercomunicantes, com alternância de zonas mais ou menos intemperizadas.

Segundo IPT (1976), assim como observado por Hessing (1976 *apud* MACHADO FILHO, 2000) e Wolle & Carvalho (1989), os solos não apresentam distribuição uniforme na região da Serra do Mar, porém, costuma-se observar que os mesmos são mais espessos nas proximidades do Planalto Paulistano, ficando menos espessos nas encostas e espessando novamente próximo ao sopé das encostas, devido ao acúmulo de material coluvionar.

4.3.3.3. *Sedimentos Quaternários*

Sobrepondo os conjuntos do Embasamento Cristalino são observadas unidades cenozóicas, representadas por:

- Sedimentos Cenozóicos (formações Sete Barras e Pariquera-Açu);
- Sedimentos Quaternários (formações Morro de Icapara, Cananéia e Ilha Comprida) e;
- Sedimentos Aluvionares e Coluvionares e depósitos de movimentação de massa recentes.

A distribuição destas unidades na região de estudo é mostrada na **Figura 15**.

Segundo IPT (1986), os cones de dejeção se caracterizam por serem depósitos de sopé das encostas, geralmente associadas às calhas de drenagens, sendo estreitos a montante com alargamento para sua porção frontal (ou jusante) na forma de leques, interdigitando-se com os depósitos aluvionares das drenagens principais.

Similares a estes, porém, com extensões bem mais pronunciadas, ocorrem os depósitos de corridas de detritos ou de massas, denominados de *debris flows*, os quais são caracterizados por movimentação na forma de escoamento viscoso de um fluido geralmente denso, composto por uma mistura de blocos de rochas, solos (cascalho, areia e lama), material orgânico (galhos e troncos de árvores) e quantidades variáveis de água (IPT, 2002).

As condições favoráveis à ocorrência de *debris flows* são a presença de material inconsolidado em abundância, encostas íngremes, fonte abundante de água, inclusive, atingindo os materiais suscetíveis e vegetação esparsa. A sua movimentação ocorre ao longo dos canais de drenagens na forma de ondas e pulsos, condicionando a forma de ocorrência destes depósitos, conforme mostrado na **Figura 17**.

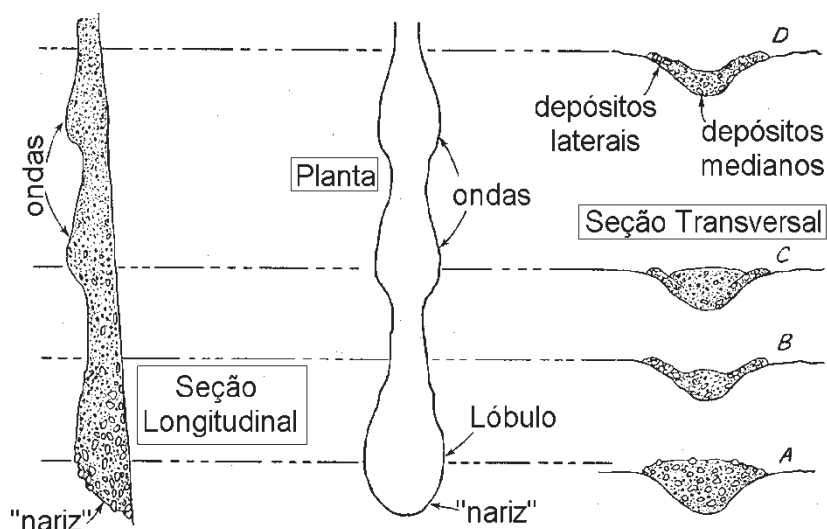


Figura 17. Detalhe das características dos depósitos de *debris flows*

Fonte: Johnson (1970 apud GRAMANI, 2001).

Os depósitos alveolares formam-se ao longo dos principais canais de drenagens, desenvolvendo-se a montante de soleiras litológicas, constituindo-se por acumulações de blocos e matacões de composição variada, tendo aumento de matriz para o topo (IPT, 1986).

Estes depósitos foram objeto de caracterização local, por não ter publicações específicas para esta área. Esta caracterização foi realizada com base nos dados compilados de sondagens a percussão e poços de monitoramento.

4.3.4. Hidrogeologia Regional

4.3.4.1. Unidades/Sistemas Hidrogeológicos

Segundo CETEC (2002), a região da área de estudo é dividida nos dois sistemas hidrogeológicos abaixo, conforme características apresentadas na **Tabela 5**:

- Sistema Aquífero Cristalino (SAC) e
- Sistema Aquífero Sedimentar Litorâneo (SASL).

Estas denominações foram mantidas por DAEE/IG/IPT/CPRM (2005), os quais intitularam o primeiro de Aquífero Cristalino e o segundo de Aquífero Litorâneo, distribuídos no extremo sudeste do Estado de São Paulo, conforme apresentado no mapa hidrogeológico do Estado de São Paulo da **Figura 18** e na seção geológico-hidrogeológica da **Figura 19**.

Na região de estudo a distribuição dos sistemas aquíferos citados acima é apresentada na **Figura 20**.

Tabela 5. Características dos sistemas aquíferos presentes na UGRHI 7.

Sistema Aquífero	Extensão	Espessura	Porosidade Efetiva	Recarga	Transmissividade	Vazão Específica
	(Km)	(m)	(%)	(mm/ano)	(m ² /dia)	(m ³ /h/m)
Cristalino	1.588,0	50,0	3,0	661,0	15,0	3,77
Sedimentar	1.299,0	50,0	15,0	661,0	205,0	1,20

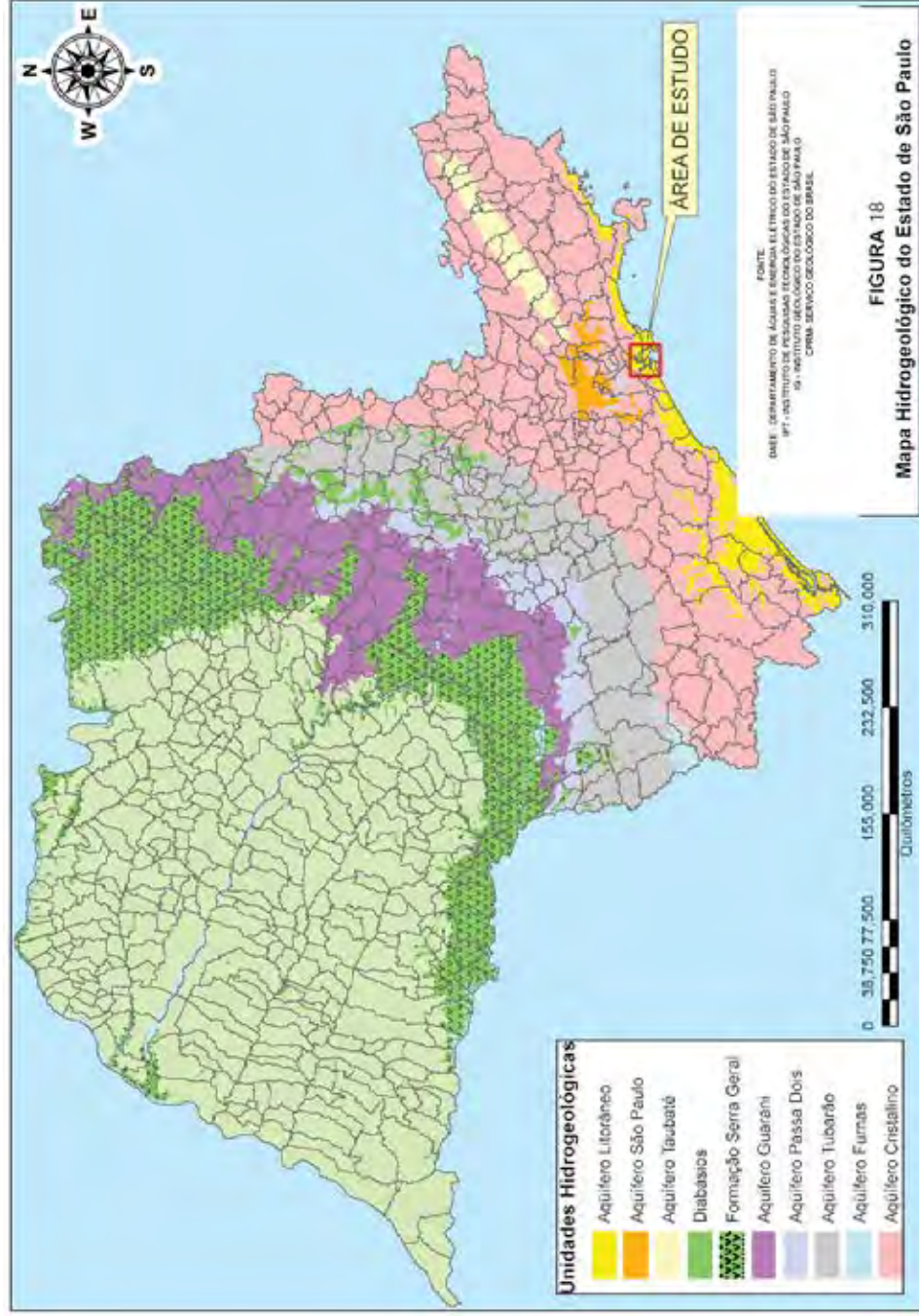


Figura 18. Mapa hidrogeológico do Estado de São Paulo

Fonte: (DAEE/IG/IPT/CPRM, 2005).

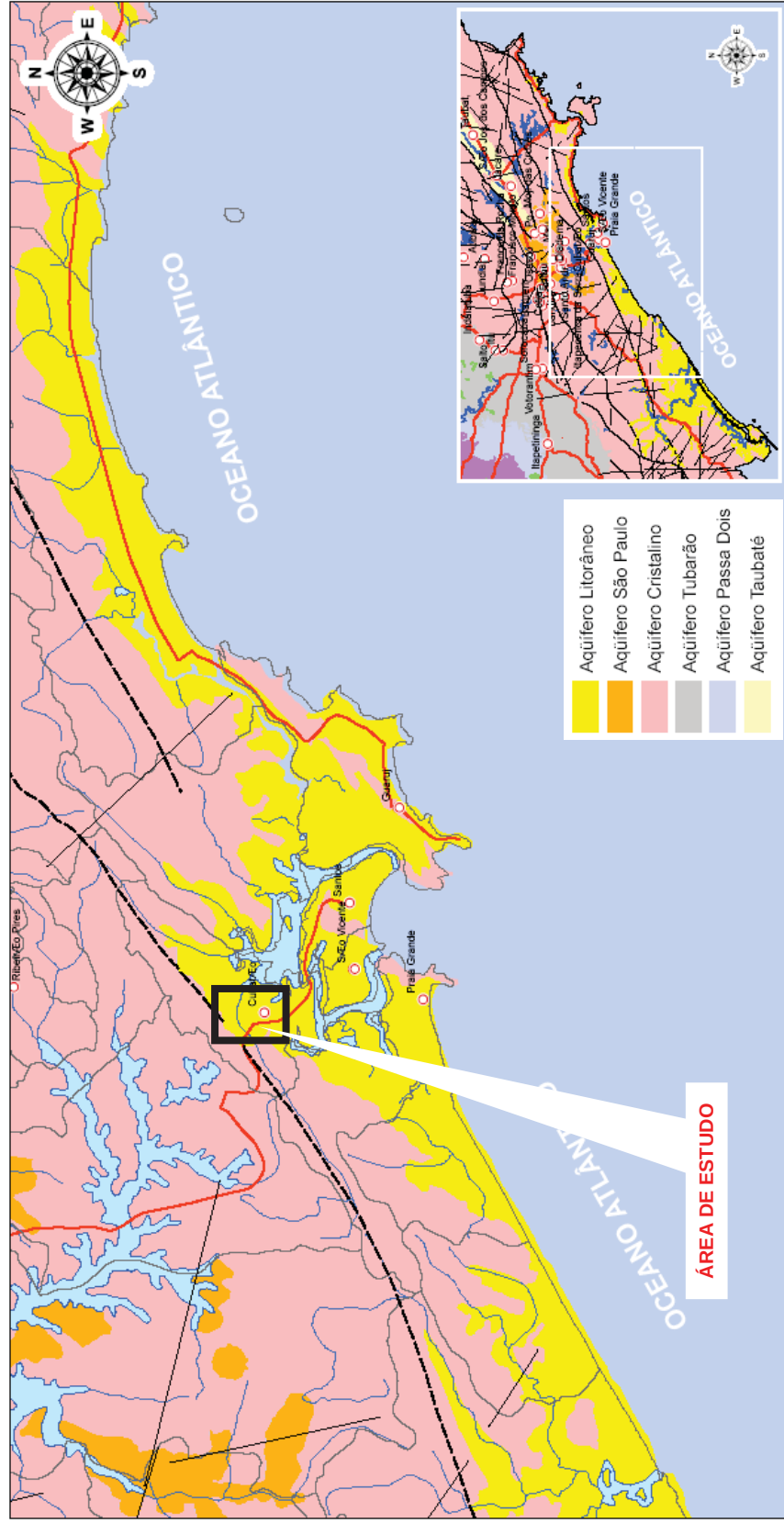


Figura 20. Distribuição das unidades aquíferas SAC e SASL na região de estudo.

Fonte: (DAEE/IG/IPT/CPRM, 2005)

4.3.4.2. Sistema Aquífero Cristalino

Na região de estudo, é mais importante o fluxo nas porções alteradas deste sistema aquífero, conforme observações efetuadas em piezômetros instalados nos horizontes de solos de alteração do Embasamento Cristalino na Serra do Mar, com o intuito de monitorar os processos envolvidos na instabilização de taludes e encostas.

IPT (2002) não registrou a presença de redes de fluxo da água subterrânea para os horizontes e profundidades abaixo da zona de alteração, sendo que somente alguns piezômetros apresentaram nível d'água instantâneo durante e após precipitação de grande intensidade, situação atribuída a um comportamento local, provavelmente associado a descontinuidades no maciço.

Ainda neste estudo, foram realizados ensaios para determinação da condutividade hidráulica (K), sendo obtidos valores da ordem de 10^{-4} a 10^{-6} cm/s, tanto para solos de natureza coluvionar como para solos residuais (alteração intempérica das rochas).

Ainda referente aos solos residuais ou coluvionares, Hessing (1976 *apud* MACHADO FILHO, 2000) e Wolle (1981) descrevem que este solo tem porosidade elevada, o que lhes confere alta permeabilidade.

Quanto aos solos saprolíticos, IPT (2002) descreve que estes podem apresentar permeabilidade da ordem de 10^{-4} cm/s, seja pela presença do sistema de descontinuidades presentes, como pela sua matriz, conferindo a esta unidade condutividade hidráulica elevada.

4.3.4.3. *Sistema Aquífero Sedimentar Litorâneo*

Segundo DAEE/IG/IPT/CPRM (2005), o SASL apresenta distribuição irregular ao longo da costa paulista, segmentado pelas rochas do Embasamento Cristalino, desde a região de Cananéia até Caraguatatuba/Ubatuba, conforme mostrado na **Figura 20**.

Este sistema é caracterizado por depósitos da planície sedimentar da Planície Litorânea, chegando até 70,0 Km de largura nas planícies do Vale do rio Ribeira de Iguape, com redução para nordeste, a partir de Itanhaém, Santos e Bertioga, a partir de então, apresentando pequenos bolsões isolados de 300,0 m de extensão (DAEE/IG/IPT/CPRM, 2005).

São constituintes deste sistema as formações sedimentares que preenchem a Planície Litorânea, sendo as formações Pariquera-Açu e Cananéia na região do Vale do rio Ribeira de Iguape e por depósitos continentais indiferenciados e depósitos litorâneo-flúvio-lagunares de idade holocênica, típicos do ambiente de sedimentação da área de estudo, limitado na base pelas rochas do Embasamento Cristalino, com cotas aproximadas de 50,0 m abaixo do nível do mar, as quais diminuem em direção à linha costeira, podendo atingir até 200,0 m abaixo do nível do mar, comportamento acompanhado pela espessura destes sedimentos (DAEE/IG/IPT/CPRM, 2005).

Este sistema é de porosidade granular, livre, de extensão limitada e transmissividade média a elevada, com camadas de areia formando aquíferos lenticulares, quando intercalados às camadas argilosas e siltosas.

Pode apresentar influência oceânica pela intrusão de águas salobras e até mesmo da presença de cunha salina, por canais de maré e braços de mar (DAEE/IG/IPT/CPRM, 2005).

A superfície potenciométrica apresenta-se entre 0,0 e 20,0 m acima do nível do mar, com valores mais elevados próximos às escarpas da Serra do Mar, tendo linhas de fluxo com sentido de escoamento da água subterrânea para o oceano, exceto quando interceptadas pelas drenagens locais (DAEE/IG/IPT/CPRM, 2005).

4.4. GEOLOGIA E HIDROGEOLOGIA DA ÁREA DE ESTUDO

4.4.1. Investigações realizadas

Para a realização da caracterização geológico-hidrogeológico local foram utilizados dados obtidos em diversas campanhas de investigação realizadas na área, nos quais foram realizados ensaios geofísicos, granulométricos e hidrogeológicos, em sondagens e poços de monitoramento instalados na área de estudo.

De acordo com os dados obtidos pelas 160 sondagens elétricas verticais (SEVs) realizadas no ano de 2000 na área de estudo, conforme distribuição mostrada na **Figura 21**, foi definido o seguinte modelo eletrofaciológico (**Figura 22**):

- *Zona não saturada*: sedimentos secos superficiais;
- *Zona saturada*: sedimentos predominantemente arenosos e/ou argilosos;
- *Rocha*: embasamento cristalino.

Na zona não saturada, as faixas muito condutoras foram associadas à provável contaminação por compostos inorgânicos e orgânicos, uma vez que a presença de íons dissolvidos reflete diretamente no aumento da condutividade elétrica.

No caso de orgânicos derivados do petróleo, o aumento da condutividade se deve a transformação bioquímica de degradação dos hidrocarbonetos, produzindo como um dos subprodutos ácidos orgânicos. Nesta zona foi possível distinguir sedimentos não contaminados com $\rho > 200,0$ ohm.m e sedimentos com provável contaminação com $\rho < 200,0$ ohm.m.

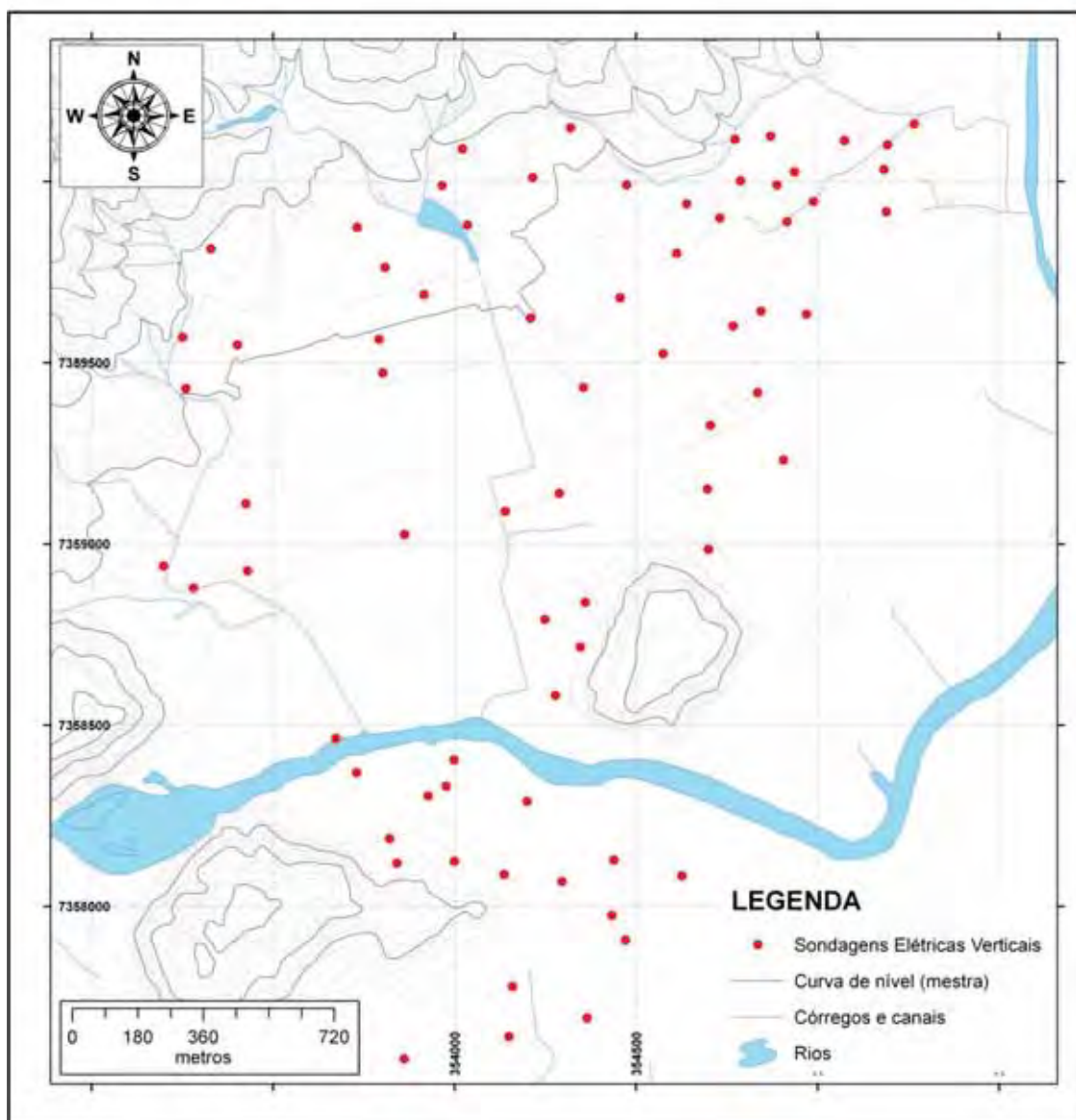


Figura 21. Localização das SEVs

Na zona saturada foi possível identificar a litologia dos materiais em subsuperfície, em termos de predominância de sedimentos arenosos e argilosos. Identificou-se, então, sedimentos predominantemente arenosos com $\rho > 40,0 \text{ ohm.m}$, sedimentos argilosos e/ou arenosos com provável contaminação com $10,0 < \rho < 40,0 \text{ ohm.m}$ e sedimentos provavelmente contaminados com $\rho < 10,0 \text{ ohm.m}$

Para o Embasamento Cristalino foram observados valores de $\rho < 500,0 \text{ ohm.m}$ para zonas de rochas fraturadas e $\rho > 500,0 \text{ ohm.m}$ para zonas de rochas sem fraturas.

A **Figura 22** sintetiza o modelo geoeletrico final, correlacionando os estratos geoeletricos definidos com as prováveis litologias presentes, conforme as faixas de variação dos valores de resistividade considerados.

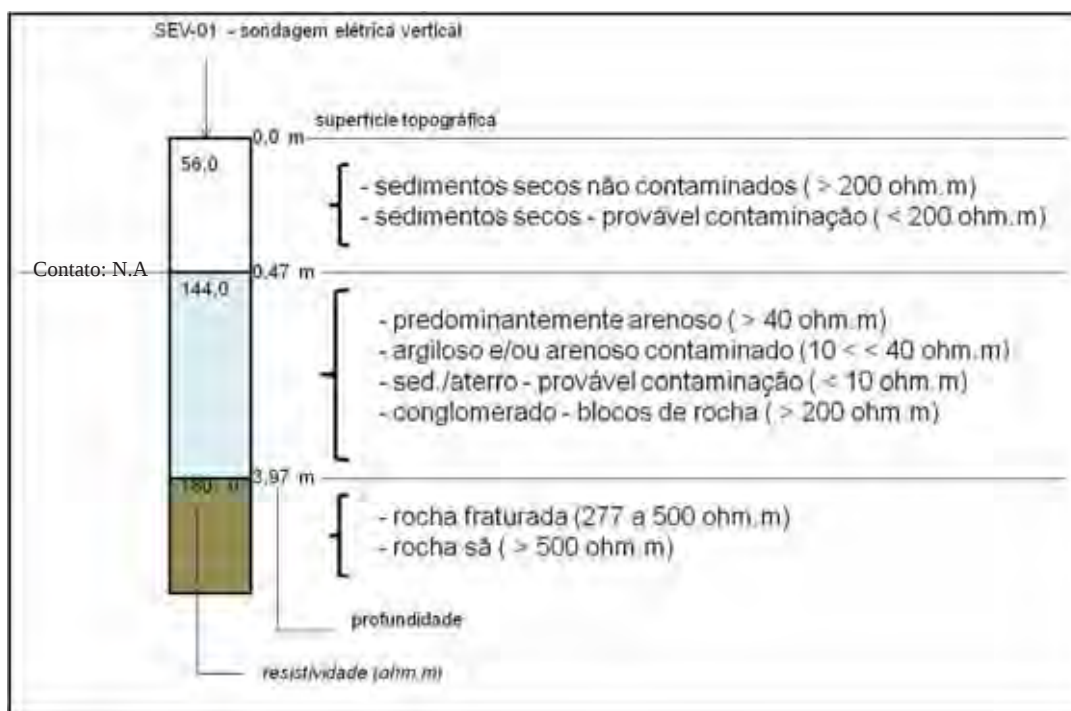


Figura 22. Modelo geoeletrico final

O modelo geoeletrico definido foi comprovado pelas descrições observadas em sondagens geotécnicas realizadas na área de estudo, as quais foram utilizadas para complementação da caracterização geológica da área de estudo, tendo sido compiladas aproximadamente 1200 sondagens a percussão (SPTs), efetuadas entre a década de 1950 e o ano de 2008, para descrição das litologias locais e a definição do modelo geológico conceitual.

Para tal caracterização, as descrições apresentadas nos perfis das SPTs foram tabuladas e depois agrupadas quanto a sua classificação textural, sua possível gênese e por similaridade das descrições, o que não foi apresentado neste trabalho, tendo em vista a extensa quantidade de informações disponíveis.

A **Figura 23** mostra a localização das SPTs efetuadas na área e na **Figura 24** é apresentado um dos perfis de sondagem a percussão utilizado nesta avaliação, dos quais foram obtidos dados referentes à sua localização geográfica, cota altimétrica, profundidades das formações e/ou unidades litológicas, profundidade do Embasamento Cristalino, entre outras informações pertinentes a este estudo.

O uso das sondagens geotécnicas (SPTs) para a caracterização geológica de detalhe se deu em função da maior sistematização na descrição das unidades, quando de sua execução, em relação aos dados descritos nos boletins de sondagens ambientais e poços de monitoramento.

Aliado a sistematização, por disponibilizar o índice de resistência à penetração (número de golpes), estas sondagens auxiliaram na determinação das propriedades de cada unidade e seu agrupamento segundo as unidades litofaciológicas descritas no item de geologia local.

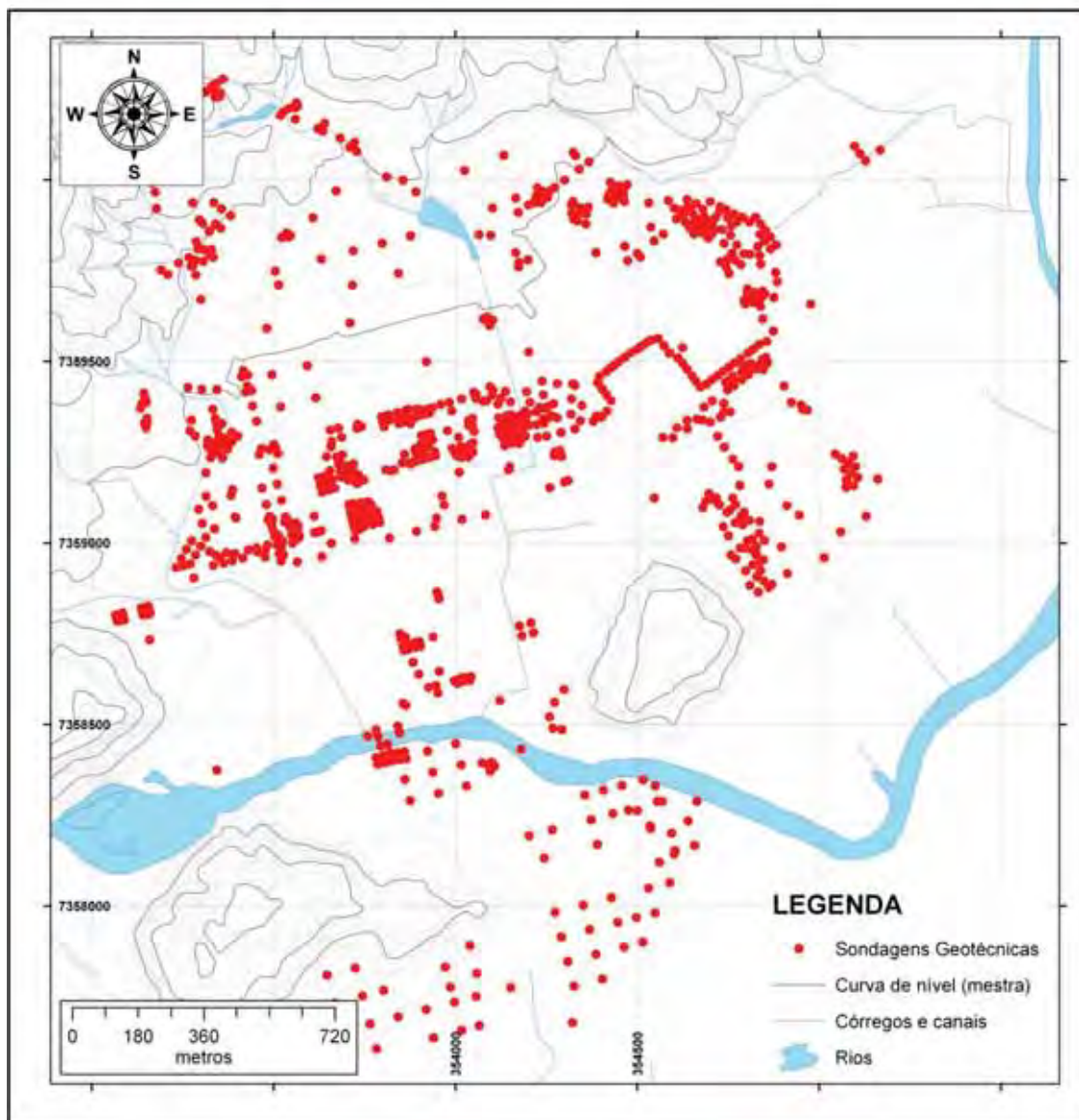


Figura 23. Localização das sondagens geotécnicas.

Cota em relação ao R.L.	Amoleta	Profundidade da camada (m)	Penetração : (golpes/30cm)		Revestimento Ø		78.2		mm						
			1ª e 2ª penetrações		2ª e 3ª penetrações		Amostrador		{ Ø interno: 34.9 Ø externo: 50.8		mm				
Nível d'água			Nº de golpes 1ª e 2ª	2ª e 3ª	T max T res	Gráfico				Peso 85 Kg - Altura da queda 75 cm					
			10	20	30	40	CLASSIFICAÇÃO DO MATERIAL								
7.70			12	14	15 / 17										com pedregulho médio Marrom Mediamente compacto (Alamo)
		2.68	9	13	20 / 18										Silo argiloso Amarelo Mediamente compacto e compacto (Alamo)
5			13	18	30 / 31										
		4.80	22	30	40 / 38										
			21	30	+										Silo argiloso Marrom Compacto e mediamente compacto
			7	10	25 / 24										
		8.70	6	13	30 / 28										
0			4	4	10 / 8										
			3	4	8 / 8										
			4	6	12 / 10										
			7	9	17 / 15										Silo argiloso Marrom Mole e médio
			6	8	15 / 13										
5			6	10	15 / 13										
		15.00	10	15	30 / 28										
CONTINUA NA PRÓXIMA FOLHA															
PROFUNDIDADE DO NÍVEL D'ÁGUA (m)			INICIAL		FINAL		AMOSTRA NÃO RECUPERADA		Q _M		O AMOSTRADOR PENETROU NAH SOB O PESO DAS HASTES				
			3.31		1.74		T _{max}		R _M		O AMOSTRADOR PENETROU NAH SOB O PESO DAS HASTES-PESO BATENTE				
							T _{res}								
							NFO		NFE		NÍVEL D'ÁGUA NÃO FOI OBSERVADO				
23/11/2006			22/11/2006				NÍVEL D'ÁGUA NÃO FOI OBSERVADO				NÍVEL D'ÁGUA NÃO FOI ENCONTRADO				

Figura 24. Perfil típico de uma sondagem geotécnica.

Em 87 sondagens ambientais, para conhecimento da granulometria das unidades hidrofaciológicas, foram efetuadas 164 análises granulométricas em amostras de solo coletadas na área de estudo, entre os anos de 2007 e 2009.

Os resultados obtidos indicaram variadas granulometrias para as diferentes unidades observadas na área de estudo.

De forma resumida, as granulometrias encontradas apresentam as seguintes características, de acordo com a sua localização.

- **Porção central:** na maioria das amostras ocorre areia fina a média, com presença de pedregulhos, sendo que, em algumas amostras, o silte pode estar associado. Ainda nesta porção da área, as amostras apresentaram predominância de frações de areia com pedregulhos, ocorrendo também, em menor proporção, areia siltosa e areia argilosa, esta última em raros pontos. Ainda neste setor, pode ocorrer areia fina, em algumas amostras, com silte associado e, nas amostras coletadas entre 7,0 e 8,0 m de profundidade, ocorrem pedregulhos.
- **Porção centro-oeste:** nesta porção é registrada a presença, principalmente, de silte até a profundidade de 1,5 m, podendo ocorrer, secundariamente, areia com pedregulhos grossos.
- **Porção centro-sul:** predominância de areia fina, por vezes média, silto-argilosa. Em algumas amostras foi observada a presença de pedregulhos, principalmente após os 4,0 m de profundidade;
- **Porção sul:** predominam os sedimentos finos, siltosos e argilosos, com areias finas presentes.
- **Porção norte:** ocorrem granulometrias de areia fina a média, argilo-siltosa, até os 4,5 m, profundidade máxima amostrada nesta porção, ocorrendo pedregulhos, com frequência.

Tendo em vista a necessidade de se conhecer as características hidrogeológicas das unidades, foram utilizados dados de poços de monitoramento existentes na área, referentes ao nível d'água, medidos entre os anos de 2004 e 2009, e ensaios hidrogeológicos realizados para determinação da condutividade hidráulica.

Estes poços foram construídos com seções filtrantes em profundidades variadas, visando caracterizar as diferentes unidades hidrofaciológicas e as relações hidráulicas entre estas unidades.

Para caracterização da área de estudo, foram selecionados 158 poços de monitoramento, distribuídos de maneira uniforme na área de estudo e que contemplassem as distintas unidades hidrofaciológicas presentes. A **Figura 25** apresenta a localização dos poços de monitoramento utilizados neste trabalho.

Os dados obtidos apresentam níveis d'água entre 0,28 m e 6,05 m de profundidade, diminuindo de norte para sul, quando se aproxima das drenagens e cursos d'água superficiais. A variação mínima observada dos níveis d'água foi de 0,21 m e a máxima de 2,88 m. A **Tabela 6** apresenta os dados de nível d'água da área, conforme medições realizadas no ano de 2009, entre os meses de setembro e outubro.

Em 429 poços de monitoramento foram realizados ensaios hidrogeológicos para determinação da condutividade hidráulica das unidades hidrofaciológicas presentes na área, por meio de *slug tests* na zona saturada, os quais foram executados de acordo com os procedimentos descritos em Pede (2004), entre os anos de 2005 e 2009, em diversos estudos ambientais realizados na área, e na zona não-saturada a condutividade hidráulica foi realizada por meio de 32 ensaios de permeabilidade, utilizando-se o permeâmetro *Guelph*, que tem seu funcionamento regido pelo princípio do Sifão de Mariote.

A localização dos ensaios é apresentada nas **Figuras 26 e 27**, respectivamente para os ensaios da zona não-saturada e saturada.

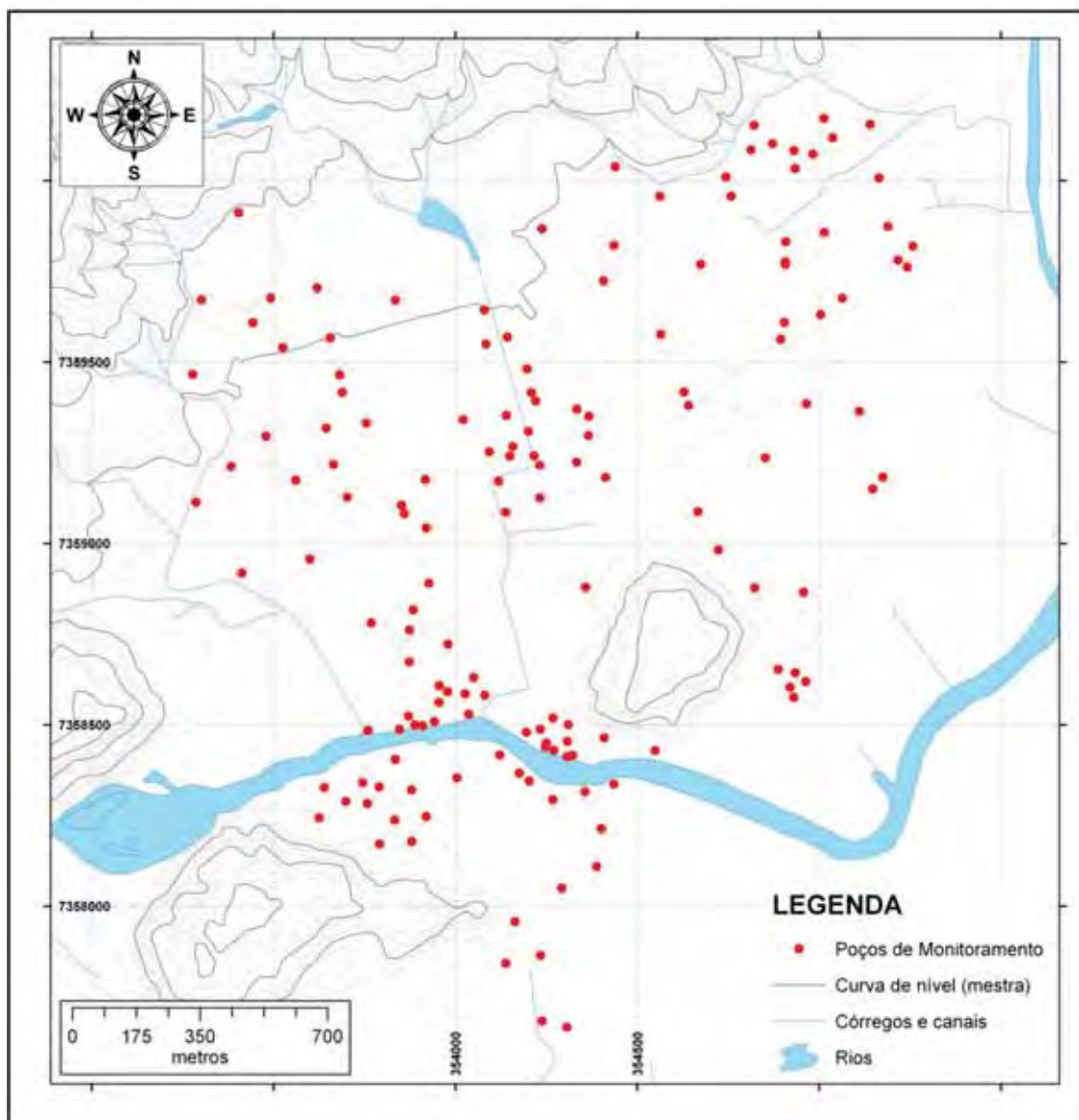


Figura 25. Localização dos poços de monitoramento e piezômetros.

Tabela 6. Níveis d'água dos poços de monitoramento selecionados

POÇO	NÍVEL D'ÁGUA	POÇO	NÍVEL D'ÁGUA	POÇO	NÍVEL D'ÁGUA
	(m)		(m)		(m)
PM-01	3,120	PM-55	1,305	PM-109	3,420
PM-02	1,940	PM-56	3,050	PM-110	3,280
PM-03	3,290	PM-57	2,210	PM-111	3,420
PM-04	2,480	PM-58	3,050	PM-112	3,625
PM-05	1,400	PM-59	2,030	PM-113	3,200
PM-06	4,780	PM-60	4,220	PM-114	2,090
PM-07	0,880	PM-61	2,500	PM-115	3,000
PM-08	3,410	PM-62	2,105	PM-116	3,280
PM-09	3,000	PM-63	2,800	PM-117	1,620
PM-10	2,940	PM-64	4,220	PM-118	2,750
PM-11	2,910	PM-65	4,140	PM-119	2,880
PM-12	2,390	PM-66	3,715	PM-120	2,760
PM-13	1,500	PM-67	2,820	PM-121	2,860
PM-14	0,820	PM-68	3,420	PM-122	3,000
PM-15	3,565	PM-69	2,200	PM-123	3,220
PM-16	1,340	PM-70	3,560	PM-124	2,890
PM-17	3,355	PM-71	3,720	PM-125	2,900
PM-18	4,000	PM-72	3,510	PM-126	0,800
PM-19	3,050	PM-73	2,780	PM-127	0,300
PM-20	2,680	PM-74	2,150	PM-128	0,420
PM-21	4,010	PM-75	2,200	PM-129	1,830
PM-22	3,820	PM-76	2,150	PM-130	2,050
PM-23	1,030	PM-77	2,330	PM-131	2,500
PM-24	2,000	PM-78	3,390	PM-132	0,550
PM-25	2,420	PM-79	2,310	PM-133	2,950
PM-26	2,700	PM-80	1,920	PM-134	4,750
PM-27	3,020	PM-81	0,820	PM-135	4,830
PM-28	2,830	PM-82	0,400	PM-136	1,340
PM-29	0,820	PM-83	2,300	PM-137	3,290
PM-30	2,380	PM-84	0,250	PM-138	7,150
PM-31	2,000	PM-85	2,700	PM-139	6,730
PM-32	3,050	PM-86	0,400	PM-140	4,810
PM-33	1,110	PM-87	3,590	PM-141	4,220
PM-34	1,820	PM-88	1,240	PM-142	0,850
PM-35	3,300	PM-89	4,740	PM-143	3,500
PM-36	2,405	PM-90	4,780	PM-144	1,290
PM-37	2,620	PM-91	4,910	PM-145	2,370
PM-38	1,300	PM-92	2,500	PM-146	2,540
PM-39	1,355	PM-93	3,030	PM-147	2,060
PM-40	1,690	PM-94	1,510	PM-148	0,550
PM-41	2,300	PM-95	0,84	PM-149	seco
PM-42	2,820	PM-96	0,300	PM-150	3,980
PM-43	3,380	PM-97	0,565	PM-151	2,020
PM-44	2,550	PM-98	0,845	PM-152	3,690
PM-45	2,740	PM-99	0,710	PM-153	2,190
PM-46	1,440	PM-100	3,160	PM-154	1,690
PM-47	2,840	PM-101	3,600	PM-155	5,580
PM-48	2,860	PM-102	3,360	PM-156	3,560
PM-49	1,350	PM-103	2,890	PM-157	4,810
PM-50	2,000	PM-104	3,480	PM-158	4,880
PM-51	0,050	PM-105	3,620		
PM-52	3,080	PM-106	1,695		
PM-53	1,610	PM-107	2,680		
PM-54	2,240	PM-108	3,150		

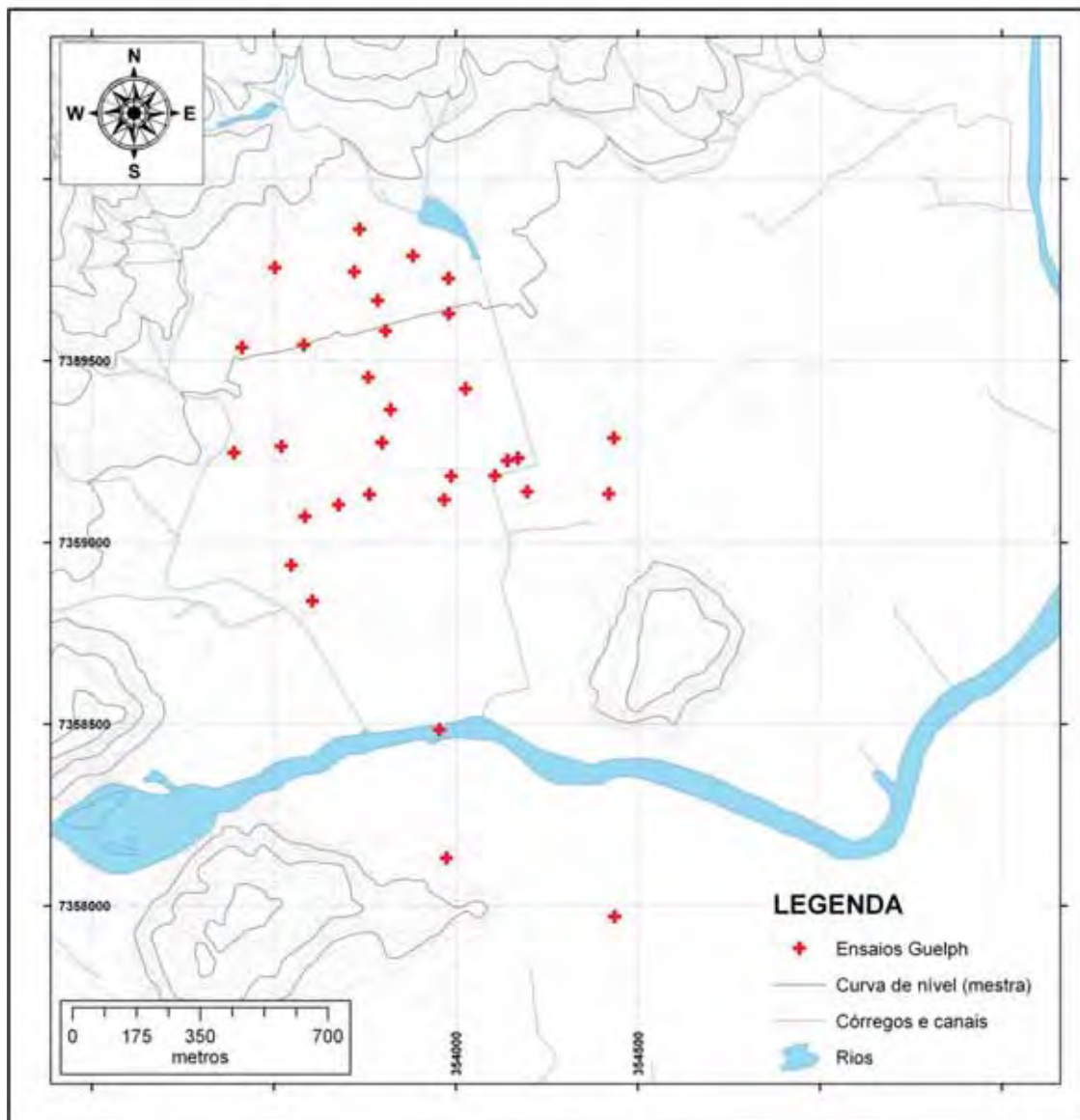


Figura 26. Localização dos ensaios hidrogeológicos – zona não-saturada

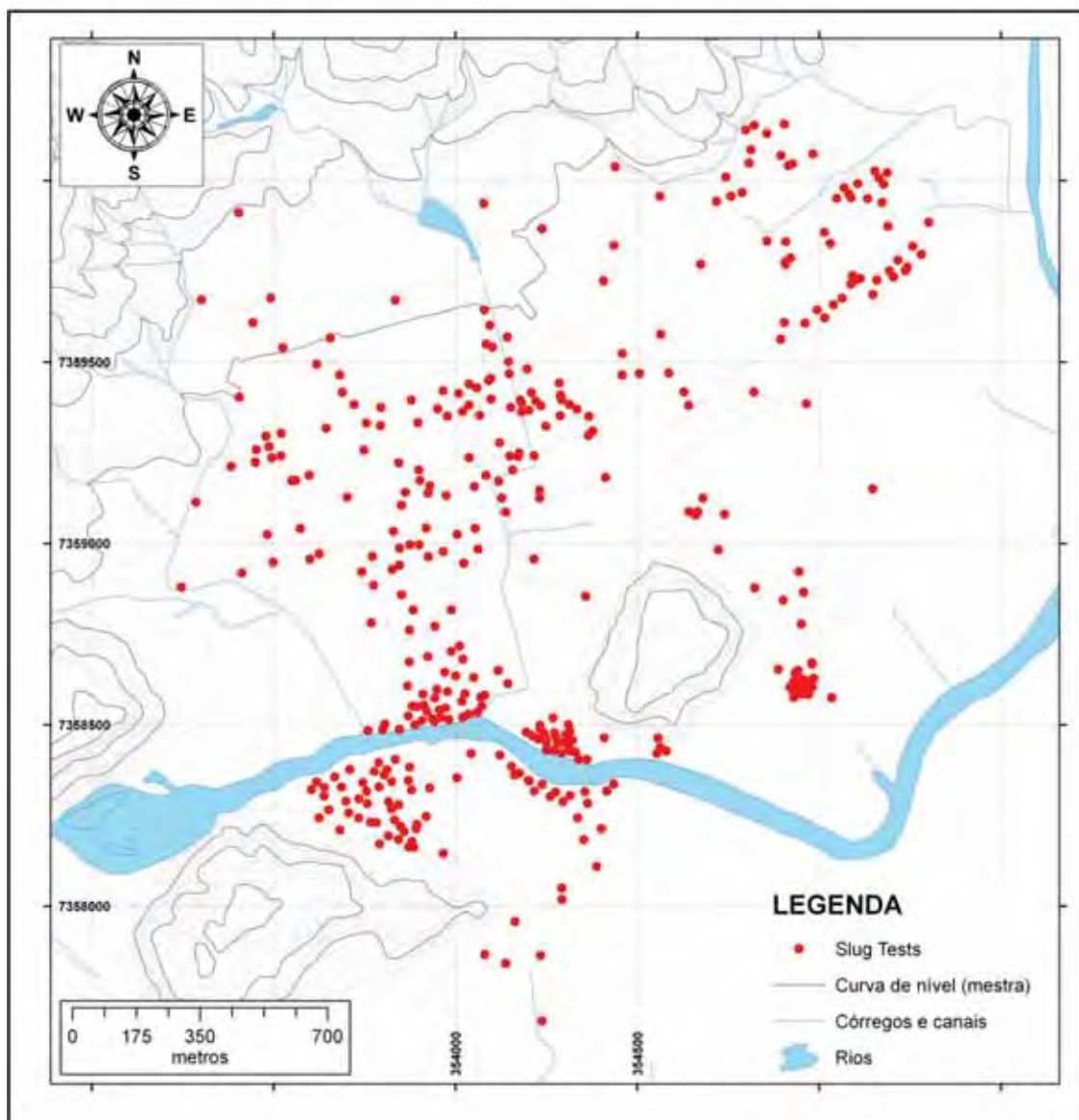


Figura 27. Localização dos ensaios hidrogeológicos – zona saturada.

A **Tabela 7** apresenta as condutividades hidráulicas obtidas para a zona não-saturada tendo média de $1,54 \times 10^{-3}$ cm/s, variando entre $1,98 \times 10^{-2}$ e $1,00 \times 10^{-6}$ cm/s e a **Tabela 8** apresenta as condutividades hidráulicas obtidas para a zona saturada, obtendo-se valores entre $1,12 \times 10^{-7}$ e $8,03 \times 10^{-2}$ cm/s, com média de $5,82 \times 10^{-4}$ cm/s.

Tabela 7. Condutividade hidráulica da zona não-saturada (ensaios *Guelph*)

PONTOS	CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA
	(cm/s)
K01	1,69E-04
K02	3,36E-05
K03	1,49E-05
K04	1,15E-03
K05	3,90E-04
K06	1,98E-02
K07	1,03E-03
K08	1,00E-06
K09	1,00E-06
K10	2,38E-03
K11	2,98E-04
K12	3,20E-06
K13	5,42E-06
K14	4,27E-04
K15	1,81E-05
K16	3,91E-03
K17	5,77E-04
K18	2,07E-03
K19	2,98E-04
K20	1,04E-04
K21	3,59E-03
K22	1,99E-06
K23	5,97E-05
K24	3,65E-04
K25	4,47E-04
K26	5,97E-05
K27	1,77E-03
K28	8,29E-03
K29	1,00E-06
K30	1,04E-03
K31	3,67E-04
K32	5,19E-04

Tabela 8. Condutividade hidráulica da zona saturada

POÇO	COND. HIDR.	POÇO	COND. HIDR.	POÇO	COND. HIDR.
	(cm/s)		(cm/s)		(cm/s)
KS-01	7,00E-05	KS-45	3,79E-04	KS-90	8,90E-04
KS-02	7,20E-05	KS-46	1,85E-04	KS-91	6,21E-04
KS-03	7,17E-06	KS-47	1,36E-04	KS-92	2,16E-04
KS-04	2,03E-02	KS-48	1,77E-04	KS-93	4,50E-06
KS-05	1,70E-04	KS-49	2,18E-04	KS-94	1,08E-04
KS-06	9,13E-03	KS-50	1,05E-04	KS-95	2,74E-04
KS-07	1,26E-05	KS-51	5,57E-05	KS-96	3,79E-04
KS-08	3,31E-05	KS-52	2,40E-04	KS-97	2,14E-05
KS-09	5,78E-06	KS-53	9,20E-05	KS-98	5,09E-05
KS-10	3,71E-04	KS-54	1,58E-04	KS-99	1,10E-05
KS-11	6,02E-05	KS-55	1,64E-04	KS-100	7,93E-04
KS-12	3,13E-04	KS-56	1,88E-03	KS-101	2,56E-04
KS-13	6,15E-05	KS-57	1,47E-03	KS-102	1,16E-05
KS-14	4,04E-05	KS-58	1,51E-03	KS-103	1,85E-04
KS-15	6,00E-05	KS-59	8,36E-05	KS-104	5,05E-05
KS-16	8,71E-05	KS-60	1,04E-04	KS-105	8,94E-05
KS-17	2,09E-06	KS-61	2,81E-04	KS-106	2,20E-04
KS-18	8,77E-05	KS-62	2,23E-04	KS-107	2,41E-05
KS-19	4,52E-05	KS-63	7,60E-05	KS-108	1,78E-04
KS-19	5,16E-06	KS-64	1,35E-04	KS-109	9,42E-05
KS-20	1,58E-05	KS-65	1,87E-04	KS-110	1,11E-04
KS-21	2,24E-05	KS-66	1,60E-04	KS-111	3,52E-06
KS-22	1,15E-06	KS-67	1,66E-04	KS-112	1,01E-04
KS-23	3,43E-06	KS-68	1,00E-04	KS-113	7,61E-05
KS-24	5,83E-05	KS-69	3,29E-05	KS-114	3,26E-05
KS-25	2,61E-06	KS-70	2,75E-04	KS-115	7,55E-05
KS-26	1,43E-05	KS-71	1,11E-04	KS-116	6,48E-05
KS-27	9,50E-06	KS-72	8,53E-04	KS-117	1,76E-03
KS-28	3,08E-05	KS-73	2,23E-04	KS-118	2,04E-04
KS-29	4,12E-05	KS-74	2,10E-04	KS-119	6,74E-04
KS-30	4,99E-04	KS-75	5,32E-04	KS-120	1,22E-05
KS-31	1,92E-05	KS-76	4,86E-04	KS-121	6,03E-05
KS-32	2,96E-04	KS-77	3,62E-04	KS-122	7,22E-06
KS-33	4,65E-06	KS-78	2,34E-03	KS-123	2,13E-04
KS-34	2,51E-06	KS-79	5,84E-04	KS-124	2,29E-05
KS-35	7,64E-06	KS-80	1,53E-04	KS-125	8,75E-05
KS-36	2,82E-06	KS-81	2,12E-04	KS-126	4,46E-04
KS-37	8,95E-05	KS-82	1,13E-04	KS-127	1,06E-04
KS-38	4,50E-04	KS-83	5,75E-04	KS-128	3,10E-05
KS-39	1,49E-04	KS-84	2,50E-05	KS-129	2,23E-04
KS-40	1,59E-04	KS-85	1,68E-03	KS-130	3,78E-05
KS-41	7,65E-05	KS-86	2,64E-04	KS-131	1,38E-03
KS-42	2,93E-04	KS-87	5,31E-04	KS-132	1,80E-04
KS-43	1,27E-04	KS-88	4,29E-04	KS-133	1,14E-05
KS-44	9,31E-05	KS-89	1,44E-03	KS-134	3,98E-05

Tabela 8. Condutividade hidráulica da zona saturada (CONT.)

POÇO	COND. HIDR.	POÇO	COND. HIDR.	POÇO	COND. HIDR.
	(cm/s)		(cm/s)		(cm/s)
KS-135	1,04E-05	KS-182	3,67E-05	KS-229	5,06E-04
KS-136	8,80E-06	KS-183	5,31E-04	KS-230	8,00E-04
KS-137	1,08E-05	KS-184	2,67E-05	KS-231	8,23E-06
KS-138	1,25E-05	KS-185	1,11E-04	KS-232	2,63E-05
KS-139	1,14E-05	KS-186	2,65E-05	KS-233	2,27E-04
KS-140	2,59E-05	KS-187	2,11E-05	KS-234	1,32E-05
KS-141	9,14E-06	KS-188	3,43E-05	KS-235	1,72E-05
KS-142	1,51E-05	KS-189	1,01E-04	KS-236	9,61E-04
KS-143	5,84E-05	KS-190	2,11E-05	KS-237	2,17E-04
KS-144	1,42E-04	KS-191	3,43E-05	KS-238	8,08E-05
KS-145	4,79E-05	KS-192	1,01E-04	KS-239	1,04E-04
KS-146	7,20E-05	KS-193	8,58E-05	KS-240	4,52E-05
KS-147	7,50E-05	KS-194	9,33E-07	KS-241	2,83E-05
KS-148	9,43E-05	KS-195	3,82E-07	KS-242	1,22E-04
KS-149	8,58E-05	KS-196	1,92E-04	KS-243	3,22E-05
KS-150	3,89E-05	KS-197	1,52E-04	KS-244	8,69E-05
KS-151	1,31E-04	KS-198	8,66E-05	KS-245	1,58E-04
KS-152	4,80E-06	KS-199	6,21E-05	KS-246	7,23E-05
KS-153	5,01E-05	KS-200	1,55E-04	KS-247	1,37E-04
KS-154	8,16E-05	KS-201	5,56E-07	KS-248	2,87E-05
KS-155	5,34E-05	KS-202	1,64E-04	KS-249	2,73E-05
KS-156	1,93E-04	KS-203	3,76E-05	KS-250	1,54E-04
KS-157	9,57E-05	KS-204	3,54E-05	KS-251	1,05E-04
KS-158	8,56E-05	KS-205	1,39E-05	KS-252	6,79E-05
KS-159	1,07E-04	KS-206	3,14E-05	KS-253	1,34E-05
KS-160	3,43E-03	KS-207	3,68E-05	KS-254	8,29E-04
KS-161	8,56E-05	KS-208	3,81E-05	KS-255	1,17E-05
KS-162	4,17E-05	KS-209	2,73E-04	KS-256	6,36E-04
KS-163	2,43E-04	KS-210	4,59E-05	KS-257	9,04E-05
KS-164	6,90E-04	KS-211	4,25E-05	KS-258	7,02E-05
KS-165	1,56E-03	KS-212	4,69E-05	KS-259	6,96E-05
KS-166	1,23E-04	KS-213	1,12E-07	KS-260	6,00E-06
KS-167	2,91E-03	KS-214	7,50E-05	KS-261	6,65E-05
KS-168	7,83E-04	KS-215	2,17E-05	KS-262	1,03E-05
KS-169	7,40E-04	KS-216	2,98E-04	KS-263	3,56E-05
K-170	6,42E-04	KS-217	2,58E-05	KS-264	9,19E-06
KS-171	5,76E-03	KS-218	2,11E-04	KS-265	3,44E-05
KS-172	5,81E-05	KS-219	7,59E-06	KS-266	9,75E-04
KS-173	1,95E-02	KS-220	8,49E-05	KS-267	3,22E-05
KS-174	1,83E-03	KS-221	9,95E-06	KS-268	1,77E-04
KS-175	1,13E-03	KS-222	1,35E-04	KS-269	1,08E-05
KS-176	8,58E-04	KS-223	9,37E-04	KS-270	4,89E-04
KS-177	4,18E-04	KS-224	9,36E-05	KS-271	1,29E-04
KS-178	3,42E-05	KS-225	7,96E-05	KS-272	1,79E-04
KS-179	4,70E-05	KS-226	3,33E-05	KS-273	2,38E-05
KS-180	1,87E-05	KS-227	2,25E-05	KS-274	1,00E-05
KS-181	7,10E-05	KS-228	3,97E-05	KS-275	5,17E-06

Tabela 8. Condutividade hidráulica da zona saturada (CONT.)

POÇO	COND. HIDR.	POÇO	COND. HIDR.	POÇO	COND. HIDR.
	(cm/s)		(cm/s)		(cm/s)
KS-276	8,62E-06	KS-323	4,94E-05	KS-370	2,21E-04
KS-277	9,71E-06	KS-324	6,00E-05	KS-371	3,66E-03
KS-278	2,42E-05	KS-325	3,90E-05	KS-372	2,27E-03
KS-279	5,71E-04	KS-326	1,46E-05	KS-373	2,79E-06
KS-280	3,64E-05	KS-327	6,87E-04	KS-374	9,91E-05
KS-281	3,58E-05	KS-328	2,69E-04	KS-375	1,28E-04
KS-282	8,12E-06	KS-329	1,37E-04	KS-376	9,96E-05
KS-283	1,05E-06	KS-330	1,18E-03	KS-377	1,12E-04
KS-284	9,60E-05	KS-331	1,54E-04	KS-378	3,94E-04
KS-285	1,36E-05	KS-332	4,43E-04	KS-379	1,68E-04
KS-286	7,17E-04	KS-333	1,41E-04	KS-380	3,01E-04
KS-287	4,20E-04	KS-334	7,57E-05	KS-381	7,43E-06
KS-288	3,92E-04	KS-335	7,68E-05	KS-382	8,66E-04
KS-289	2,28E-04	KS-336	1,77E-04	KS-383	4,70E-05
KS-290	1,58E-04	KS-337	1,02E-04	KS-384	7,61E-05
KS-291	1,10E-04	KS-338	5,17E-05	KS-385	2,37E-05
KS-292	2,62E-04	KS-339	4,11E-05	KS-386	1,36E-05
KS-293	7,77E-05	KS-340	3,62E-04	KS-387	1,43E-04
KS-294	3,95E-04	KS-341	1,52E-03	KS-388	5,13E-06
KS-295	3,99E-04	KS-342	6,04E-04	KS-389	6,00E-05
KS-296	1,64E-05	KS-343	4,36E-04	KS-390	2,34E-05
KS-297	2,72E-04	KS-344	2,45E-03	KS-391	1,59E-05
KS-298	1,62E-04	KS-345	6,92E-04	KS-392	8,04E-05
KS-299	2,64E-05	KS-346	6,15E-04	KS-393	2,50E-05
KS-300	5,30E-05	KS-347	1,36E-05	KS-394	2,11E-05
KS-301	4,22E-05	KS-348	1,52E-05	KS-395	1,65E-05
KS-302	1,40E-05	KS-349	2,23E-05	KS-396	3,89E-06
KS-303	4,79E-05	KS-350	1,45E-05	KS-397	4,13E-04
KS-304	4,14E-05	KS-351	2,80E-05	KS-398	7,00E-05
KS-305	3,23E-06	KS-352	6,20E-04	KS-399	1,70E-04
KS-306	4,95E-05	KS-353	1,36E-03	KS-400	6,00E-05
KS-307	1,51E-04	KS-354	2,93E-04	KS-401	7,71E-05
KS-308	4,45E-05	KS-355	6,12E-03	KS-402	9,16E-05
KS-309	2,63E-05	KS-356	2,13E-04	KS-403	2,92E-04
KS-310	4,34E-05	KS-357	2,45E-04	KS-404	3,24E-05
KS-311	9,15E-05	KS-358	7,25E-04	KS-405	9,00E-05
KS-312	2,63E-06	KS-359	4,30E-05	KS-406	1,26E-05
KS-313	1,26E-04	KS-360	5,03E-04	KS-407	8,17E-04
KS-314	1,37E-04	KS-361	7,07E-05	KS-408	3,93E-04
KS-315	7,02E-05	KS-362	3,99E-04	KS-409	2,87E-04
KS-316	1,44E-05	KS-363	2,23E-05	KS-410	8,03E-02
KS-317	2,83E-05	KS-364	8,93E-05	KS-411	6,97E-04
KS-318	5,66E-05	KS-365	1,76E-05	KS-412	3,04E-05
KS-319	1,46E-04	KS-366	6,37E-05	KS-413	2,94E-04
KS-320	8,03E-05	KS-367	2,48E-04	KS-414	8,15E-04
KS-321	5,14E-05	KS-368	6,27E-04	KS-415	1,38E-03
KS-322	1,06E-04	KS-369	6,93E-05	KS-416	1,80E-04

Tabela 8. Condutividade hidráulica da zona saturada (CONT.)

POÇO	COND. HIDR.	POÇO	COND. HIDR.	POÇO	COND. HIDR.
	(cm/s)		(cm/s)		(cm/s)
KS-417	6,90E-04	KS-421	3,30E-04	KS-425	9,54E-05
KS-418	2,00E-05	KS-422	7,09E-04	KS-426	3,00E-05
KS-419	7,00E-05	KS-423	8,68E-06	KS-427	5,00E-05
KS-420	3,95E-05	KS-424	1,52E-04	KS-428	4,00E-05
				KS-429	1,84E-05

4.4.2. Hidrogeologia local

Com base nos dados obtidos pelas investigações e compilações de dados da área de estudo, este capítulo apresenta a caracterização hidrogeológica local.

4.4.2.1. Unidades hidrofaciológicas

A área de estudo está situada no domínio da Baixada Santista, junto às escarpas da Serra do Mar. O substrato geológico local é complexo e característico de zona de transição entre as encostas da Serra do Mar e a Planície Sedimentar Costeira.

As escarpas da Serra do Mar são sustentadas por rochas Pré-Cambrianas, ocorrendo, principalmente, migmatitos com características gnáissicas e até xistosas.

Os sedimentos da Planície Costeira da Baixada Santista são formados, essencialmente, por depósitos quaternários, em ambientes marinhos ou flúvio-lagunares e por depósitos detríticos de encosta (rampas de colúvio e leques aluviais), interdigitados a depósitos de mangues e aluviões atuais.

As coberturas detríticas, que recobrem de modo irregular o sopé e a meia encosta das vertentes, constituem registros da atuação pretérita de fenômenos de movimentação de massas (escorregamentos, corridas de massas, entre outros).

Registra-se, ainda, a existência de morros-testemunho de rochas Pré-Cambrianas, remanescentes da erosão diferencial das escarpas da Serra do Mar, em meio aos sedimentos.

É importante registrar que, em toda a área de estudo, ocorrem aterros indiferenciados, capeando as unidades aqui descritas.

Diante deste cenário de ampla complexidade geológica, a seguir é apresentada a caracterização das diferentes hidrofácies identificadas na área de estudo, as quais são dotadas de características hidráulicas diferenciadas.

Diante desta realidade, para o entendimento das heterogeneidades que controlam o fluxo da água subterrânea local, fez-se necessário o aprimoramento do entendimento do arcabouço geológico local, apresentado neste item.

Com base nas características geológicas regionais e nas descrições obtidas por esta caracterização, conceitualmente, são distinguíveis três grandes unidades geológicas, todas recobertas por camada de aterro:

- Unidades Sedimentares Flúvio-Marinho-Lacustres,
- Embasamento Cristalino Alterado e
- *Embasamento Cristalino São*, que compreende a base da estratigrafia local.

4.4.2.1.1. Aterro

Parte do material empregado para a terraplanagem da área de estudo originou-se do acúmulo de depósitos detríticos, outra parte, proveio do solo de alteração das rochas Pré-Cambrianas, assim como do desmonte de blocos das escarpas rochosas da Serra do Mar, conforme observado em fotos históricas da década de 1950 (**Figuras 28 e 29**).



Figura 28. Registro histórico do desmonte das encostas rochosas da Serra do Mar.



Figura 29. Registro histórico de terraplanagem com blocos rochosos da Serra do Mar.

Embora seja registrada uma ampla variação textural dos solos que compõem o aterro, é nítida a predominância de pedregulhos com matriz arenosa ou silto-arenosa, conforme observado nas curvas granulométricas da **Figura 30**, observando-se pedregulhos de tamanhos diferenciados.

Os aterros recobrem os sedimentos quaternários nos locais de topografia mais baixa, encontrando-se ausentes em algumas porções topograficamente mais elevadas, principalmente onde afloram os morros-testemunho da Serra do Mar.

Nos locais onde existe a camada de aterro, as espessuras médias observadas encontram-se em torno de 2,0 m, podendo alcançar, localmente, mais de 8,0 m de espessura (**Figura 31**), em locais muito específicos.

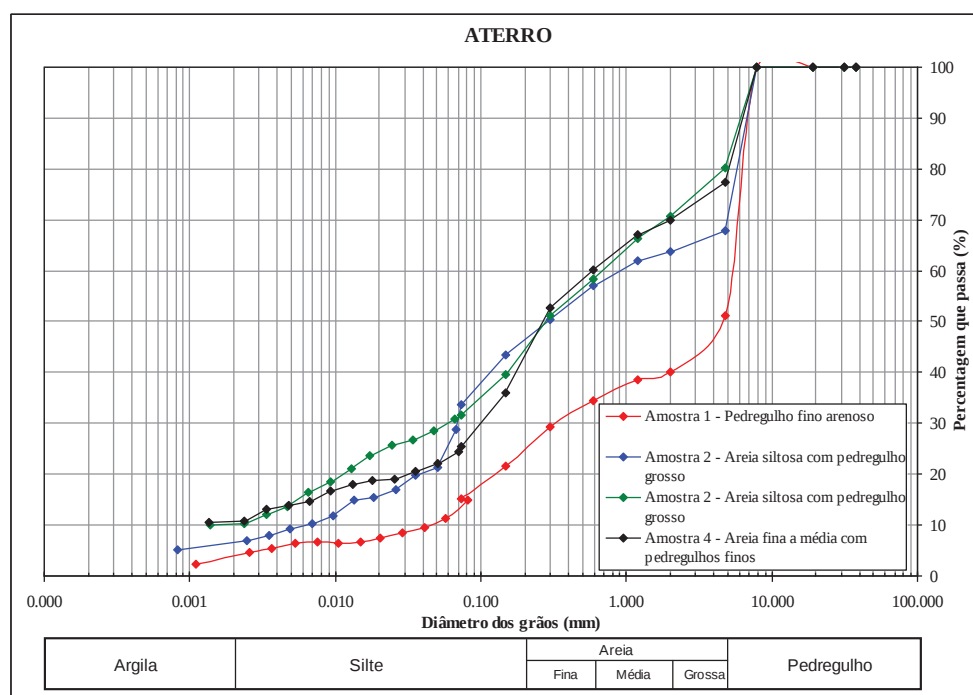


Figura 30. Curvas granulométricas da cobertura de aterros.

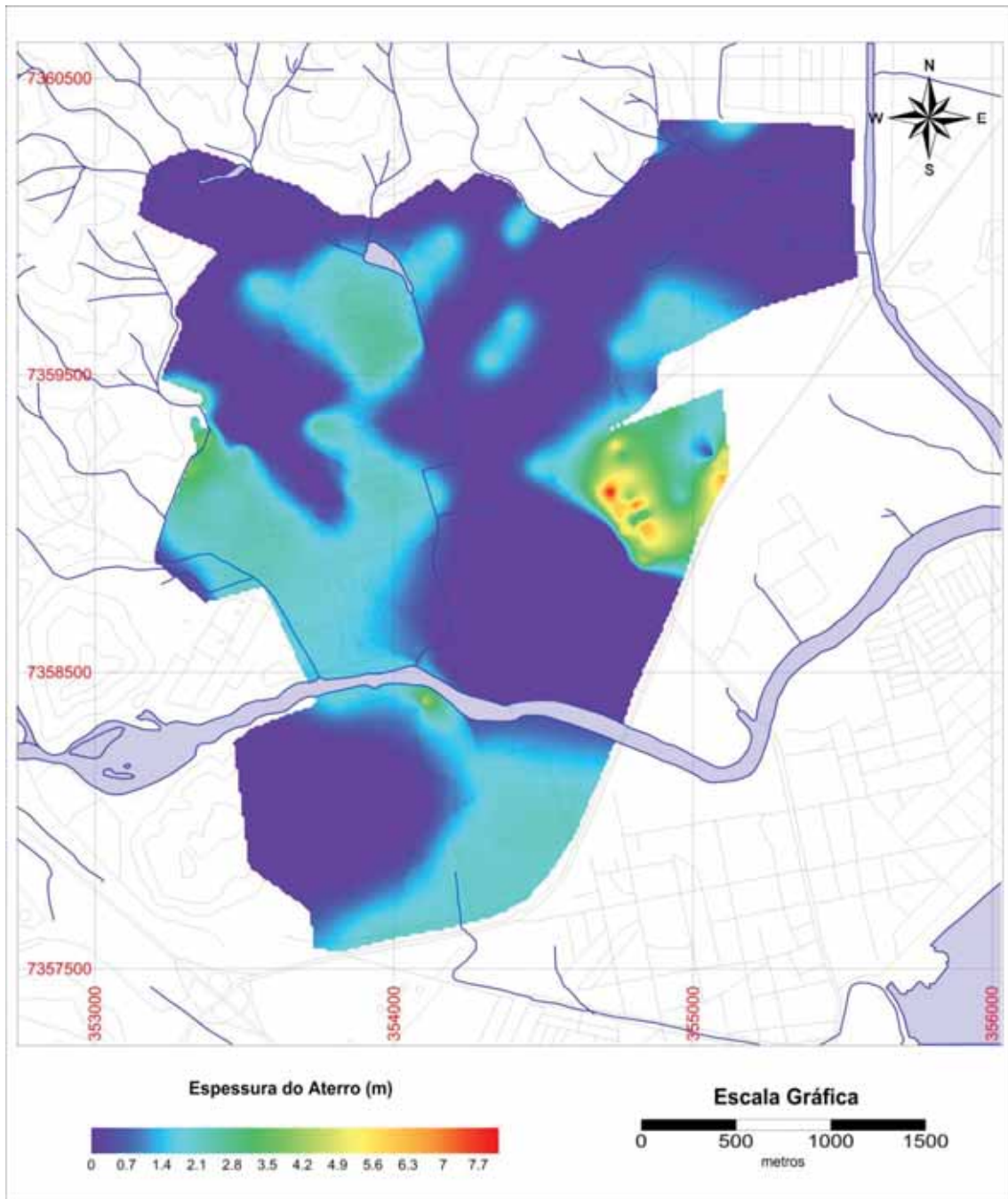


Figura 31. Mapa de isoespessura de aterro.

O aterro se caracteriza por fortes variações nos valores de condutividade hidráulica, controladas por suas variações texturais e pelo seu grau de compactação. Esta unidade exerce forte controle no fluxo da água subterrânea local, pois, em grande parte da área, recobre as hidrofácies argilosas menos permeáveis. Apresenta condutividades hidráulicas entre 10^{-6} e 10^{-3} cm/s.

4.4.2.1.2. Depósitos Sedimentares da Planície Costeira

Os depósitos sedimentares presentes na Planície Costeira da Baixada Santista mostram uma interação de ambientes continentais, marinhos e mistos.

Esta planície, onde se insere a área de estudo, conforme descrevem Suguio & Martin (1978), possui 40,0 km de extensão por 15,0 km de largura máxima, sendo limitada nas suas extremidades pela Serra de Mongaguá ao Sul e pela parte rochosa da Ilha de Santo Amaro ao norte.

Nas porções central e nordeste, esta planície é drenada por uma rede de lagunas e canais de maré que delimitam as Ilhas de São Vicente e de Santo Amaro.

É essencialmente formado por depósitos quaternários marinhos ou flúvio-lagunares, sendo encontrados morros testemunhos de rochas Pré-Cambrianas em meio a estes sedimentos.

A formação dos sedimentos marinhos das planícies costeiras brasileiras sofreu forte influência das variações do nível relativo do mar durante o Quaternário.

Na Baixada Santista teriam ocorrido pelo menos dois ciclos de sedimentação, entremeados por intenso evento erosivo, associados à pelo menos dois episódios transgressivos, de níveis marinhos mais elevados que o atual, que deram origem a sedimentos com propriedades distintas. Esta gênese torna possível explicar diferenças nas características destes sedimentos (consistência, permeabilidade e sobre-adsensamento).

Há, segundo Suguio & Martin (1978) e Massad (1998), evidências sedimentológicas, biológicas, e geotécnicas que comprovam esta história geológica.

O nível atual do mar foi ultrapassado há aproximadamente 7.000 anos e o auge desse evento, denominado de Transgressão Santos, ocorreu por volta de 5.100 anos A.P., quando o mar atingiu seu nível máximo, em torno de 4,5 m acima da sua posição atual, na região de Santos e Bertioga. Posteriormente, entrou em fase de regressão contínua, até atingir seu nível atual.

A evolução desta variação do nível relativo do mar, para a região de Santos/SP, está mostrada na **Figura 32**, conforme Pirazzoli (1991), que compila diversos trabalhos sobre a evolução do nível relativo do mar em toda a costa brasileira.

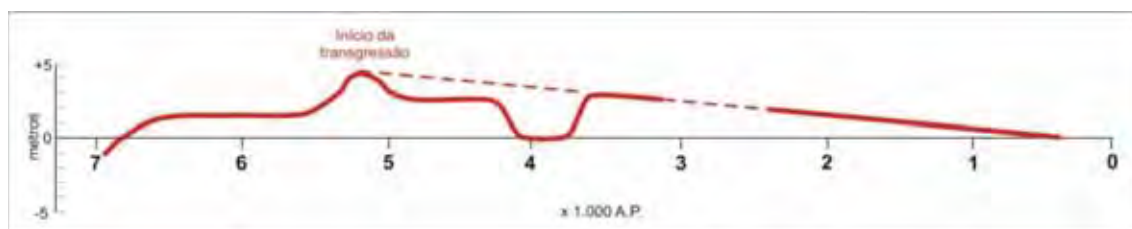


Figura 32. Evolução da variação do nível relativo do mar na região de Santos (SP).

Fonte: Pirazzoli (1991)

Além da Transgressão Santos, há evidências de três outras transgressões mais antigas na costa sudeste do Brasil.

O nível do mar atingiu $8,0 \pm 2,0$ m acima do nível atual, na penúltima transgressão, denominada de Transgressão Cananéia, ocorrida no Pleistoceno, cujo máximo ocorreu há 123.000 anos.

A maior parte dos depósitos sedimentares das planícies costeiras está relacionada a estes episódios transgressivos que geraram dois tipos diferentes de sedimentos.

Os primeiros, de idade Pleistocênica, foram depositados em ambiente misto, continental e marinho, e apresentam texturas argilosas ou arenosas na base, e arenosas no topo, denominados de Areias Transgressivas. Os sedimentos arenosos do topo formam terraços alçados em 6,0 a 7,0 m, em relação ao nível do mar atual.

Os sedimentos de idade Holocênica também são constituídos por argilas e areias, com a presença frequente de conchas e fragmentos vegetais. Estes foram depositados em locais de erosão dos Sedimentos Pleistocênicos, em feições como canais, lagunas, baías ou estuários, constituindo antigas áreas de desembocaduras fluviais afogadas.

Além dos sedimentos Pleistocênicos e Holocênicos, relacionados aos episódios transgressivos descritos acima, ocorrem areias e argilas de mangues e aluviões, depositados pela rede de drenagem atual e areias marinhas na faixa litorânea.

Uma característica comum à maior parte dos sedimentos da Planície Costeira é sua grande heterogeneidade, observada nos perfis das sondagens consultadas, observando-se alternância entre camadas de argila e areia, e, entre estas, transições de camadas de argila arenosa, argila siltosa, areia argilosa ou areia siltosa.

Esta heterogeneidade, conseqüentemente, se manifesta nas propriedades físicas e hidráulicas (condutividade hidráulica) desses diferentes materiais.

A espessura total dos sedimentos, especificamente na área de estudo, pode chegar a 26,0 m, sendo particularmente espesso na região sul e ausente em grande parte da área norte, acompanhando uma tendência de espessamento na direção sul (**Figura 33**).

Em decorrência da dificuldade de individualização espacial destes depósitos, por sua idade ou critérios genéticos, em virtude da atuação conjugada de diversos processos deposicionais, os sedimentos da Planície Costeira, identificados na área de estudo, foram segregados em dois grandes grupos: Sedimentos Flúvio-Costeiros e *Debris Flow*, conforme descritos a seguir.

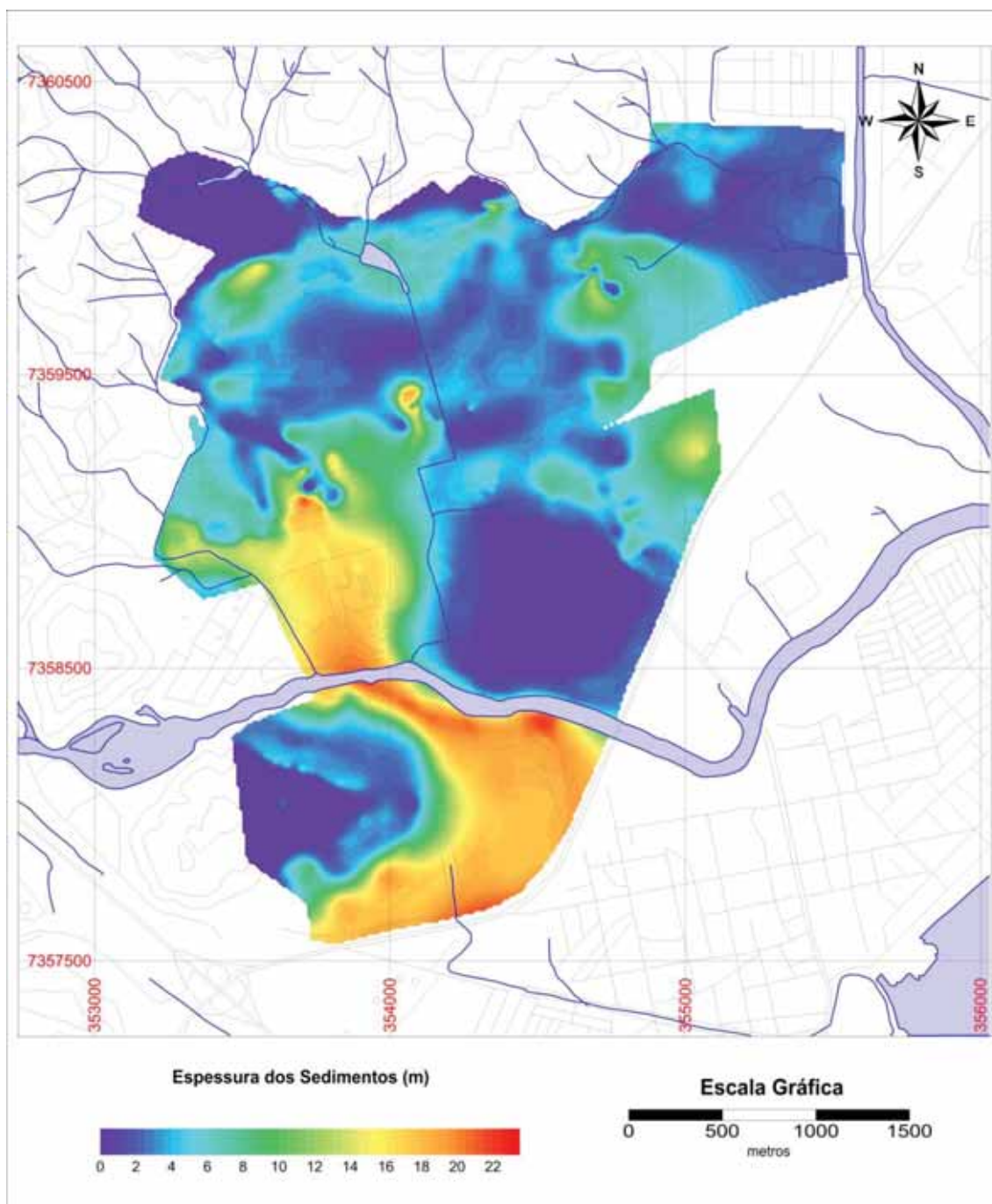


Figura 33. Mapa de isoespessura de sedimentos.

4.4.2.1.2.1. Sedimentos Flúvio-Costeiros

4.4.2.1.2.1.1. Hidrofácies arenosa

A Hidrofácies Arenosa é representada por sedimentos com visíveis variações texturais, relacionadas à diversidade de processos deposicionais atuantes na gênese destes.

Predominam, entretanto, areias finas a médias, pouco a muito siltosas, normalmente intercaladas com lentes de sedimentos argilosos e siltosos, de coloração cinza, cinza escura ou amarela, conforme mostrado nas curvas granulométricas da **Figura 34**.

Em alguns testemunhos recuperados durante a perfuração de sondagens, foi verificada a existência de perfis marcados por granodecrescência ascendente (*fining upward*), típico de sedimentos de barra de pontal, como mostrado na **Figura 35**.

Apresentam espessuras centimétricas a decimétricas, com extensão lateral limitada, fato verificado a partir da comparação de diferentes perfis descritivos das sondagens geotécnicas utilizadas para as descrições deste estudo.

Em relação à composição mineralógica, estes sedimentos se caracterizam pela grande quantidade de muscovita e feldspato (albita), atestando seu baixo grau de maturidade sedimentar, sendo similar à composição dos solos de alteração do Embasamento Cristalino. Estas características podem ser observadas na microfotografia da **Figura 36** e pelo resultado do ensaio difratométrico mostrado na **Figura 37**.

A similaridade da composição mineralógica desta hidrofácies, com aquela do Embasamento Cristalino Alterado, bem como a baixa maturidade destes sedimentos, atestam que a sua área-fonte encontra-se nas proximidades dos locais de deposição.

A espessura desta hidrofácies varia de poucos centímetros até superar 5,0 m, predominando sua ocorrência na porção central da área de estudo, encontrando-se interdigitada com lentes argilosas e com os depósitos de *debris flow* (**Figura 38**).

Dentre as hidrofácies sedimentares, representa os litotipos com os maiores valores de permeabilidade, impondo elevados valores de velocidade no fluxo da água subterrânea, com valores de condutividade hidráulica entre 10^{-3} e 10^{-2} cm/s.

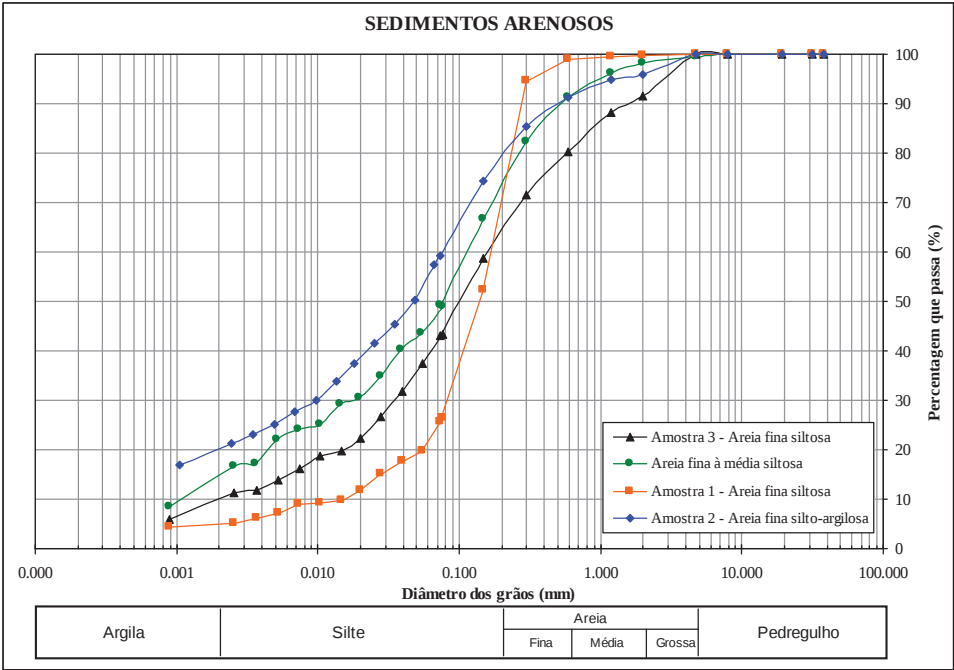


Figura 34. Curvas granulométricas da hidrofácies arenosa

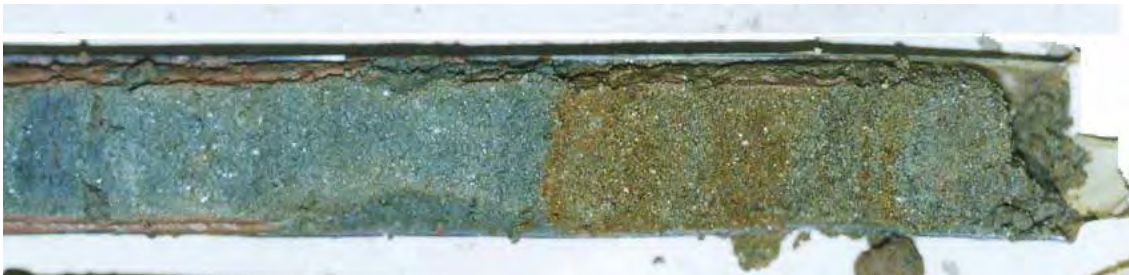


Figura 35. Hidrofácies arenosa com granodecrescência ascendente

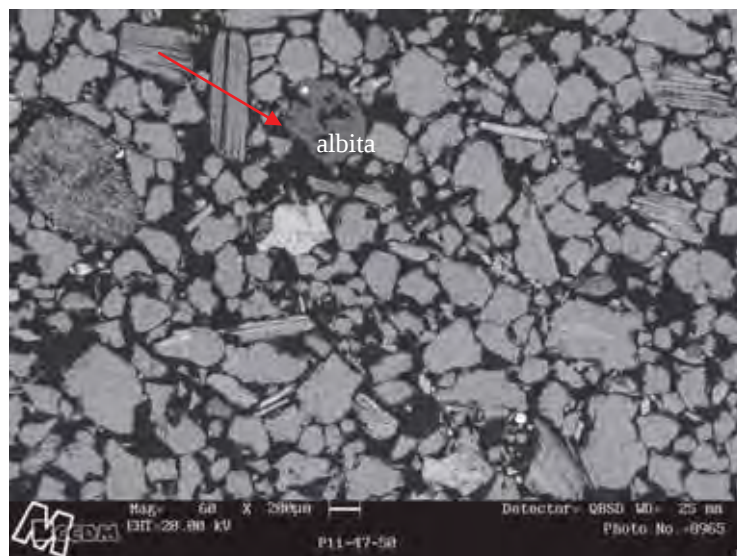


Figura 36. Microfotografia (MEV) da hidrofácies arenosa, mostrando a presença do feldspato albita.

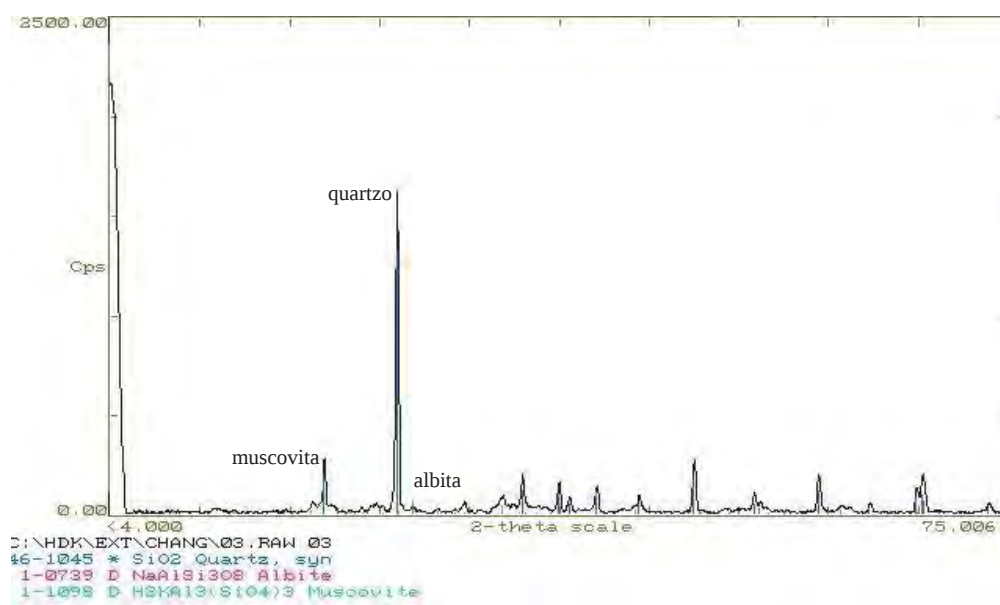


Figura 37. Composição mineralógica predominante da hidrofácies arenosa (quartzo, albita e muscovita) por difração de raios-X.



Figura 38. Interdigitação entre as hidrofácies arenosa e *debris flow*

4.4.2.1.2.1.2. Hidrofácies siltosa e argilo-siltosa

A hidrofácies siltosa é constituída por sedimentos silto-arenosos, de coloração acinzentada, possivelmente representando depósitos de planícies de inundação, associados aos sedimentos arenosos de canais. As **Figuras 39 e 40** mostram, respectivamente, a composição mineralógica predominante desta hidrofácies e as curvas dos ensaios granulométricos realizados em amostras representativas desta litologia.

A hidrofácies argilo-siltosa é representada por sedimentos argilo-siltosos, silto-argilosos ou argilo-arenosos, de coloração cinza, preta ou esverdeada, apresentando abundante matéria orgânica e detritos vegetais, conforme mostrado na **Figura 41**. A granulometria desta unidade, conforme descrição acima, está representada nas curvas granulométricas da **Figura 42**.

Estas hidrofácies predominam na porção sul da área, sendo mais espessas no limite sul da área estudada, onde as espessuras observadas alcançam mais de 10,0 m.

Caracterizam-se por valores reduzidos de condutividade hidráulica, entre 10^{-7} e 10^{-6} cm/s, verificando-se baixos gradientes hidráulicos nas regiões onde esta predomina.

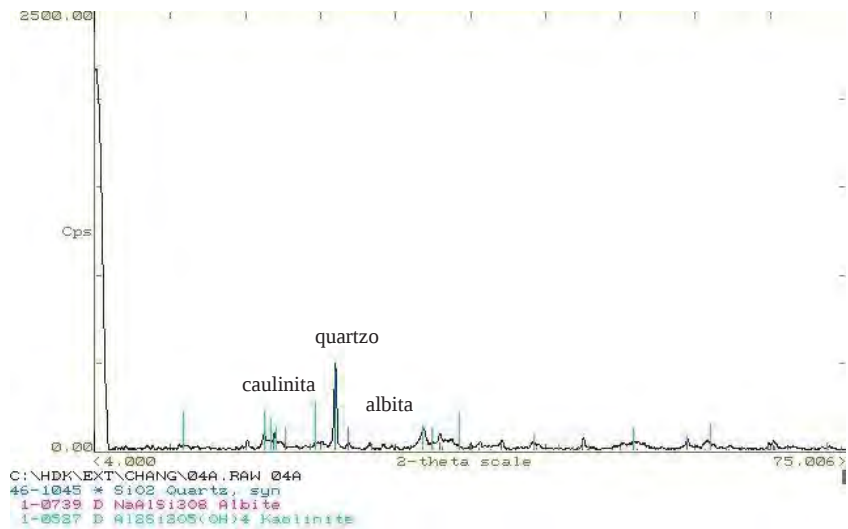


Figura 39. Composição mineralógica predominante da hidrofácies siltosa (quartzo, caulinita e albita) por difração de raios-X

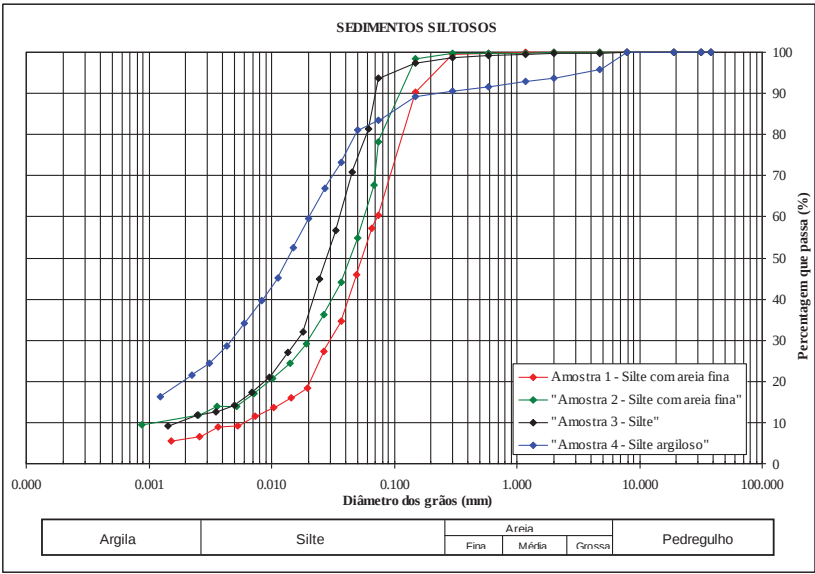


Figura 40. Curvas granulométricas da hidrofácies siltosa

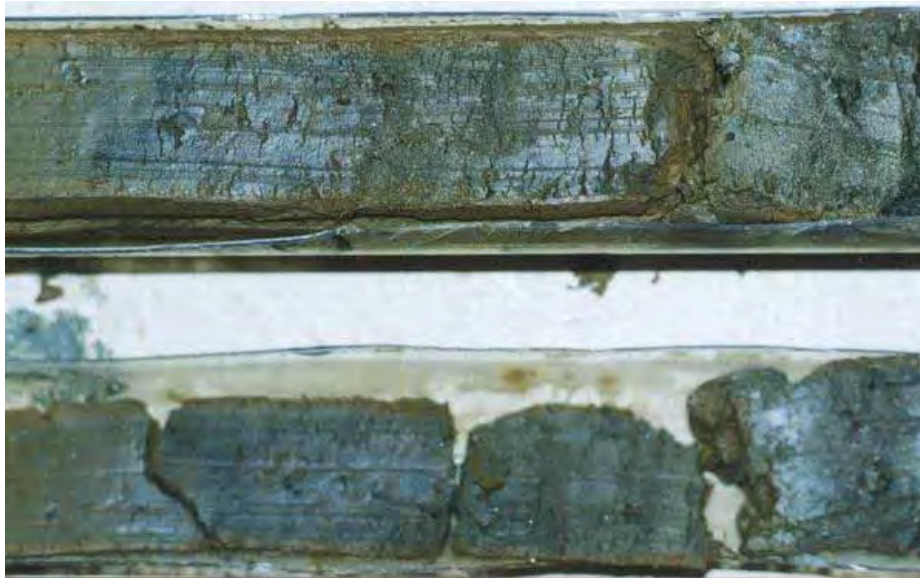


Figura 41. Aspectos da hidrofácies argilo-siltosa, com abundância de matéria orgânica.

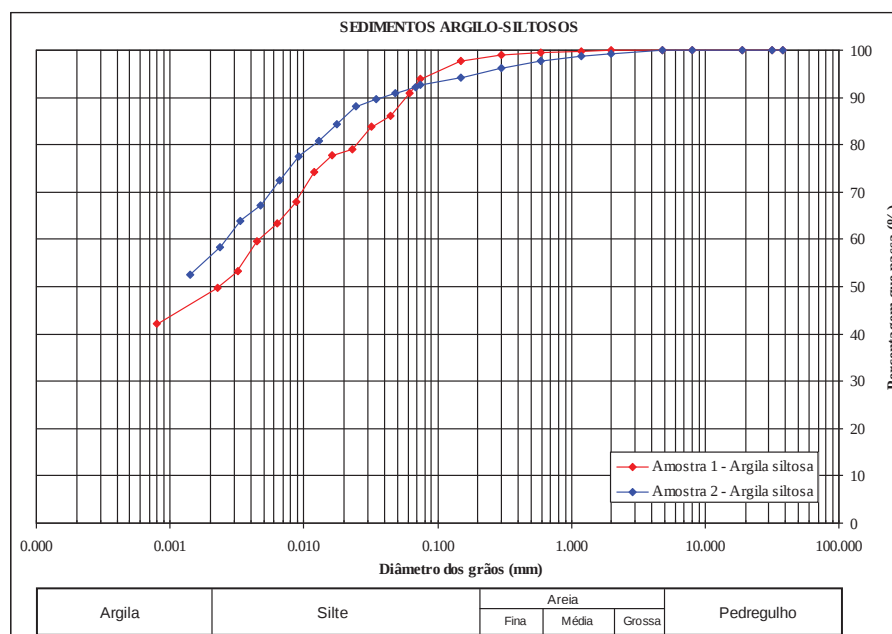


Figura 42. Curvas granulométricas da hidrofácies argilo-siltosa.

4.4.2.1.2.2. Hidrofácies *debris flow*

A hidrofácies *debris flow* está geneticamente vinculada ao deslocamento de massas por processos gravitacionais, relacionados a eventos de elevado índice pluviométrico e às altas declividades das encostas da Serra do Mar, responsáveis por escorregamentos e fluxos de detritos, os quais mobilizam grandes volumes de massas detríticas.

Os detritos acompanham a morfologia das encostas, espessando-se da meia encosta para o sopé e nas reentrâncias de vertentes. Nas proximidades da base da serra e na planície aluvionar, estes depósitos formam rampas mais suaves, que podem se interdigitar com depósitos fluviais e estuarinos (**Figura 38**). Estes depósitos apresentam acréscimo das frações granulométricas, à medida que se afastam da encosta, conforme apresentado por Johnson (1970, *apud* Gramani, 2001), que mostra seções com as principais feições apresentadas por uma corrida de detritos, na área do canal de drenagem (**Figura 12**).

A atuação de processos sedimentares fluviais é responsável pelo arredondamento dos blocos e matacões, frequentemente verificados neste tipo de sedimento (**Figura 43**).

Os fluxos detríticos são movimentos de massa de grandes proporções, que se deslocam na forma de escoamento rápido. Caracterizam-se por movimentos semelhantes ao de um líquido viscoso, pelo grande volume de material mobilizado, incluindo solo, rocha, detritos, troncos de árvores, água, entre outros, e pelo extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas, podendo atingir até alguns quilômetros.

O grau de fluidez dessas corridas de massa é extremamente variável, podendo ocorrer desde massas com elevadas densidades e viscosidades até suspensões fluidas.

As corridas de massas detríticas podem ter origem primária, quando formadas pela desestruturação total do material mobilizado de escorregamentos anteriores nas encostas, ou origem secundária, quando grandes volumes de água se concentram nas drenagens principais das encostas, originados em momentos de elevada precipitação pluviométrica.

Para a origem secundária, o fenômeno ocorre pela remobilização de detritos acumulados no leito, acrescidos do material proveniente de escorregamentos anteriores nas encostas, aumentando seu alcance e poder destrutivo.

Há diversos registros de ocorrência de corrida de detritos (*debris flow*) na Serra do Mar, mais especificamente no município de Cubatão/SP, os quais ocorreram nos anos de 1976, 1985, 1994 e 1996, conforme dados apresentados por Massad *et al.* (1997) e compilados na **Tabela 9**.



Figura 43. Depósito de *debris flow* em uma encosta da Serra do Mar, com seixos decimétricos

Tabela 9. Eventos de corridas de massa na Serra de Cubatão

DATA	CURSO D'ÁGUA	ÁREA TOTAL DA BACIA
28/01/1976	Córrego da Cachoeira	4,00 Km ²
28/01/1976	Córrego Braço Norte	1,60 Km ²
22 a 24/01/1985	Rio Perequê	11,40 Km ²
22 a 24/01/1985	Córrego das Pedras	2,64 Km ²
20 a 22/01/2988	Rio das Pedras	3,40 Km ²
06/02/1994	Córrego das Pedras	2,64 Km ²
09/03/1996	Tributário principal do Córrego das Pedras	0,80 Km ²

(modificado de KANJI *et al.*, 2007)

Verifica-se nesta tabela, que o Córrego das Pedras, curso d'água que cruza a área de estudo, tem maior frequência de ocorrência deste tipo de eventos, sendo uma das principais áreas-fonte de sedimentos associados a esta hidrofacies.

O episódio ocorrido em fevereiro de 1994, que atingiu a área de estudo, e foi originado a partir da bacia do Córrego das Pedras, exigiu, segundo Massad *et al.* (1997) e Kanji *et al.* (1997; 2007), a remoção de aproximadamente 280.000 m³ de sedimentos (lama, areia, cascalho e blocos).

Do ponto de vista textural, estes depósitos são representados por sedimentos arenosos conglomeráticos mal selecionados, com seixos de dimensões centimétricas a decimétricas, em meio à matriz argilo-siltosa. Os seixos desta hidrofacies são representados por fragmentos de rocha arredondados, com dimensões centimétricas a decimétricas, mostrando atuação intensiva de processos fluviais.

Esta unidade hidrofaciológica ocorre predominantemente na porção norte da área de estudo, nas adjacências das encostas da Serra do Mar, se estendendo até a porção centro-sul, onde se interdigitam com sedimentos flúvio-costeiros (**Figura 38**).

Em virtude de sua ampla variação textural, se observa variação significativa nos valores de condutividade hidráulica desta hidrofacies, variando entre 10⁻⁵ e 10⁻³ cm/s. Por apresentarem espessuras de até 10,0 m e aflorar em grande parte da porção centro-norte, exercem significativo controle na dinâmica do fluxo local da água subterrânea.

4.4.2.1.2.3. Embasamento Cristalino Alterado

Nas alta e média encostas da Serra do Mar, sob um horizonte de solo superficial pouco espesso, ocorre solo saprolítico, em diferentes estágios de intemperismo, representando a hidrofacies correspondente à alteração das rochas do Embasamento Cristalino.

Caracteriza-se por matriz predominantemente silto-arenosa ou areno-siltosa, coloração amarelada, cinza ou avermelhada, com blocos menos intemperizados, além de estruturas reliquiares herdadas da rocha matriz (**Figura 44**).

É comum a presença de seixos angulosos de quartzo ou feldspato plagioclásio. A intemperização atuante na região, em virtude dos elevados índices pluviométricos, é responsável pela transformação destes minerais feldspáticos em argilo-minerais, particularmente a caulinita, abundantes nesta unidade (**Figura 45**).

A espessura do Embasamento Cristalino Alterado é amplamente variável, e pode alcançar até 28,0 m na porção centro-norte da área de estudo, conforme observado no mapa de isoespessuras da **Figura 46**.

Esta unidade apresenta variação de até 3 ordens de grandeza em seus valores de condutividade hidráulica, pelo diferenciado grau de intemperismo observado nas rochas do Embasamento Cristalino. Em porções mais rasas, ou seja, mais intemperizadas, os valores registrados de condutividade hidráulica são mais elevados (em torno de 10^{-3} cm/s) e decrescem progressivamente em profundidade, podendo atingir valores de 10^{-6} cm/s, à medida que se aproxima do topo rochoso do Embasamento Cristalino São.

4.4.2.1.2.4. Embasamento Cristalino São

As rochas sãs do Embasamento Cristalino são aflorantes em algumas porções da área de estudo, como nos morros situados na porção sul e nas encostas da Serra do Mar, porém, restritas a algumas paredes desnudadas.

De maneira geral, estas rochas foram encontradas somente na descrição dos perfis das sondagens geotécnicas (SPTs) ou por apresentar-se impenetrável a percussão, em algumas destas sondagens, estando a profundidades menores nas proximidades da Serra do Mar e dos morros, aumentando a profundidade de sua ocorrência em direção a sul e, também, nos levantamentos geofísicos efetuados, conforme mapa do topo do Embasamento Cristalino apresentado na **Figura 47**.

Esta unidade é representada por litologias praticamente impermeáveis, conforme observações em afloramentos da área, que não apresentam significativo aporte de água em suas fraturas.



Figura 44. Aspectos do embasamento cristalino alterado, mostrando estruturas reliquiares da rocha gnáissica original

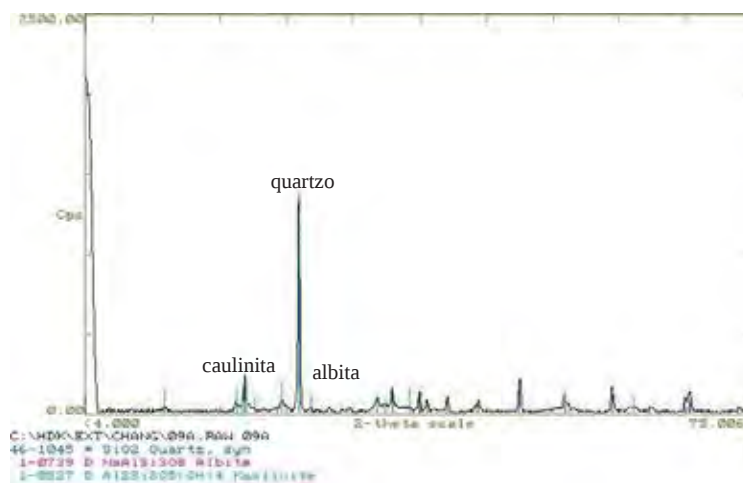


Figura 45. Composição mineralógica predominante do Embasamento Cristalino Alterado (quartzo, albite e caulinite) por difração de raio-X

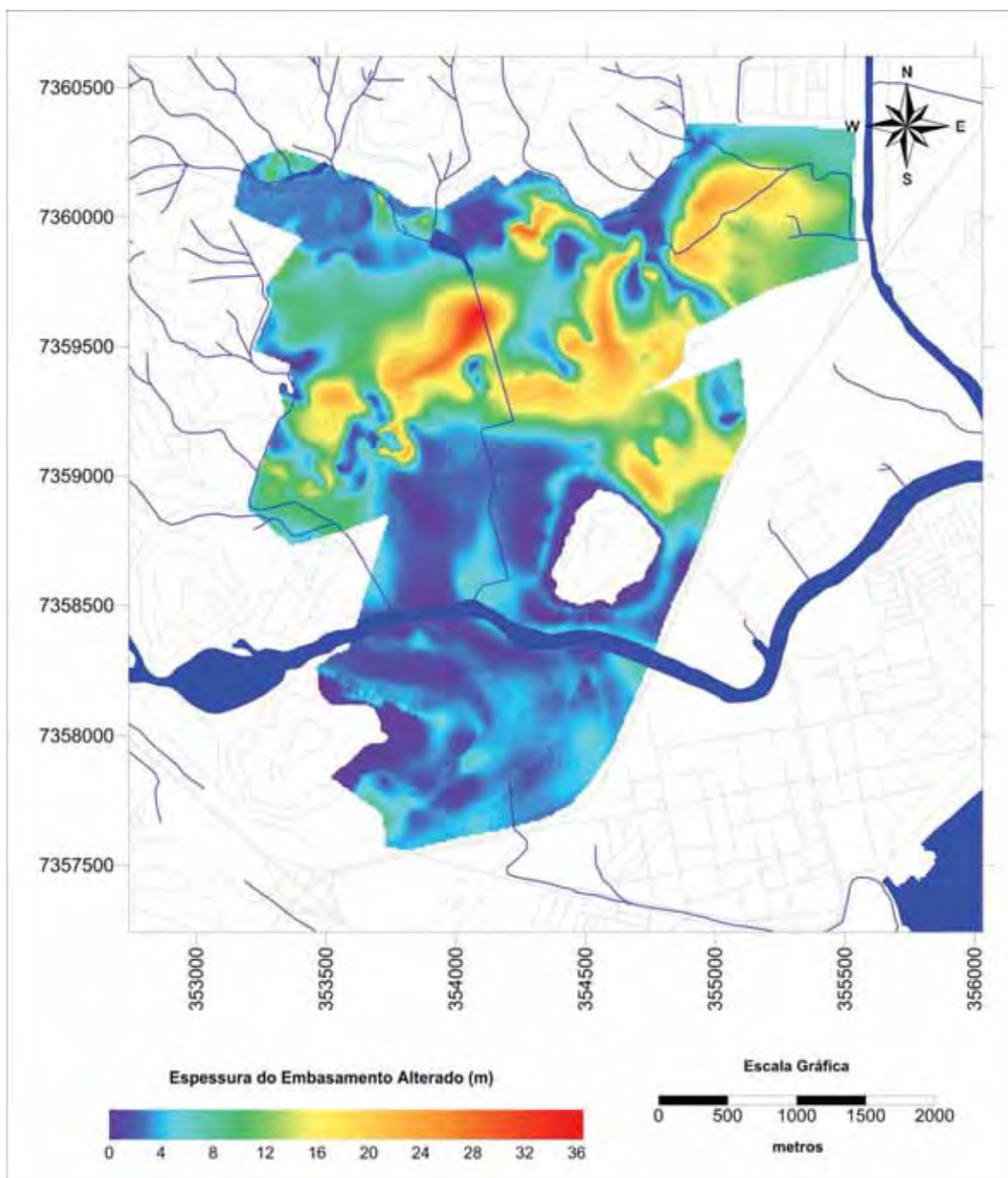


Figura 46. Mapa de isoespessura do Embasamento Cristalino Alterado.

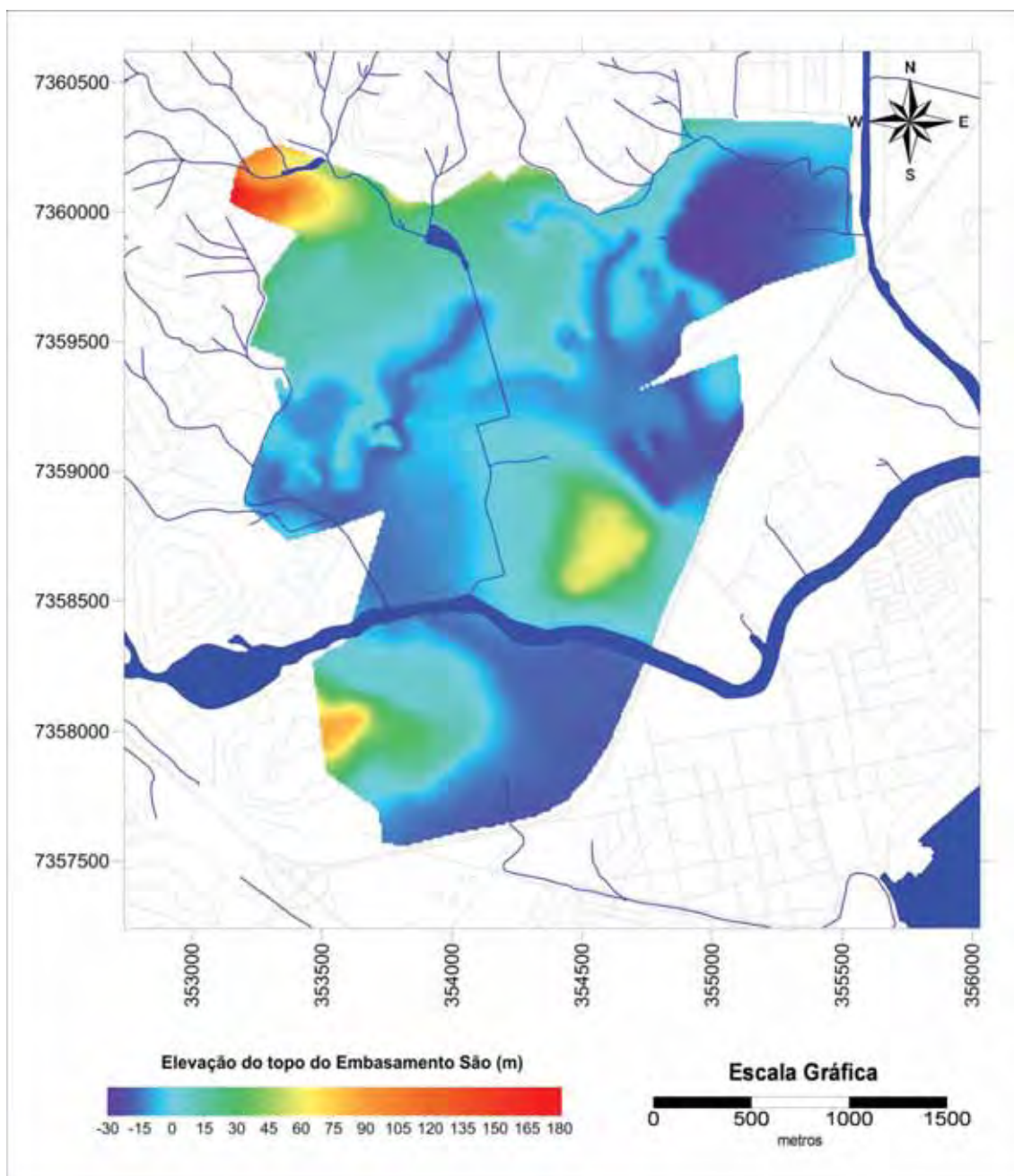


Figura 47. Mapa do topo do Embasamento Cristalino São.

As seções geológico-hidrogeológicas mostradas nas **Figuras 48 a 53** ilustram a distribuição das unidades hidrofaciológicas descritas, em diversos cortes da área de estudo, contemplando:

- **Seção A-B** – corte longitudinal norte-sul, abrangendo todos os compartimentos litológicos e geomorfológicos, desde a Serra do Mar até a margem do Rio Cubatão.
- **Seção C-D** – corte transversal leste-oeste, abrangendo desde a Serra do Mar até o Rio Perequê, também abrangendo grande parte dos domínios litológicos e geomorfológicos locais, predominantemente as áreas com maior ocorrência de depósitos de *debris flow*.
- **Seção E-F** – corte transversal, paralelo à seção C-D, porém, com abrangência para a porção central da área de estudo, onde ocorre a transição entre os depósitos de *debris flow* e os sedimentos aluvionares.
- **Seção G-H** – corte longitudinal, paralelo à seção A-B, situado na porção leste da área de estudo, com o objetivo de ilustrar as ocorrências predominantes de sedimentos aluvionares, sem grandes contribuições de depósitos de *debris flow*.
- **Seção I-J** – corte situado na margem direita do Rio Cubatão, em compartimento hidrogeológico distinto das demais seções, mostrando a predominância de sedimentos flúvio-costeiros.
- **Seção K-L** – corte noroeste-sudeste, cortando todos os domínios litológicos e geomorfológicos locais.

B

A

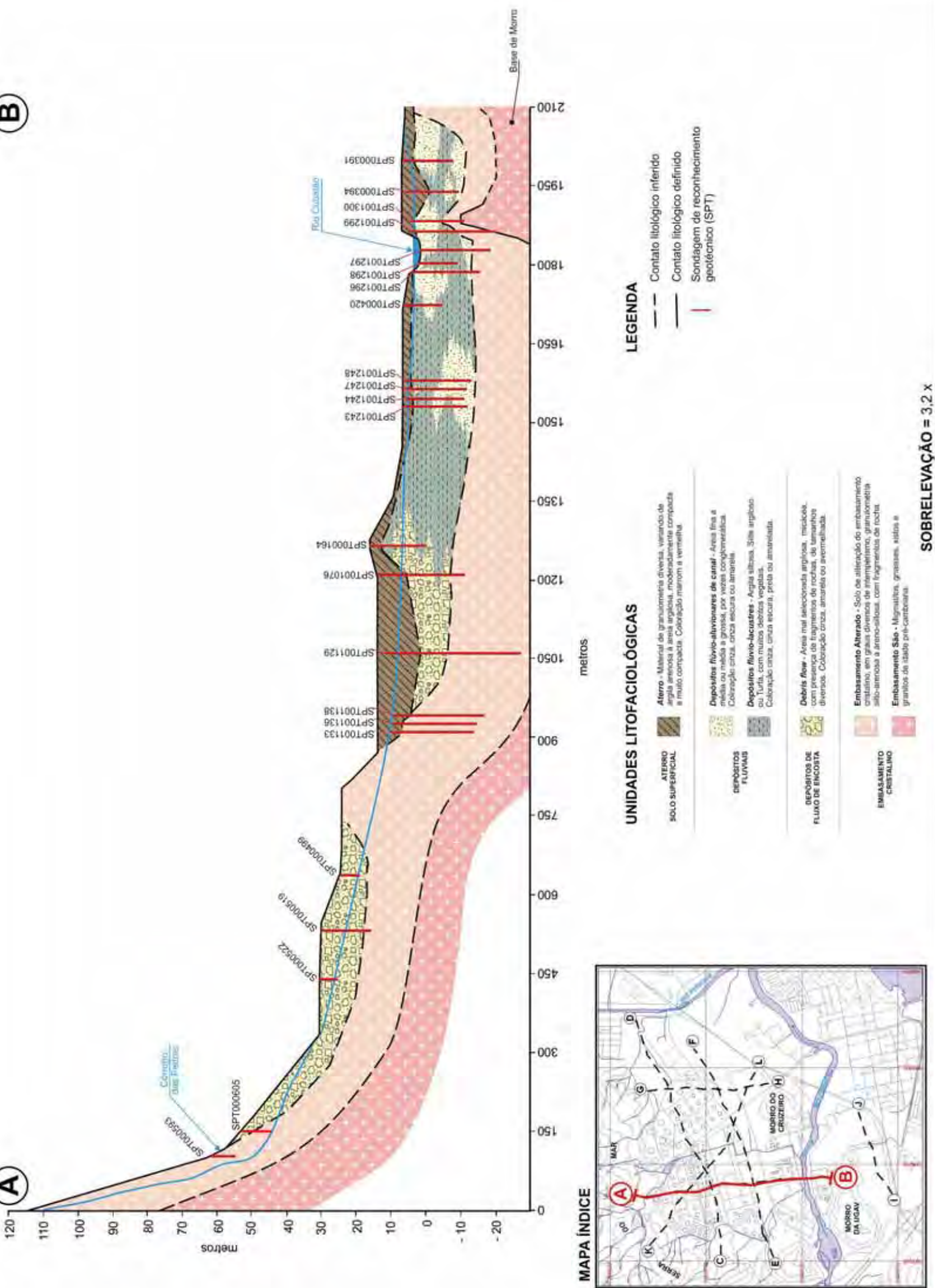


Figura 48. Seção geológico-hidrogeológica A-B.

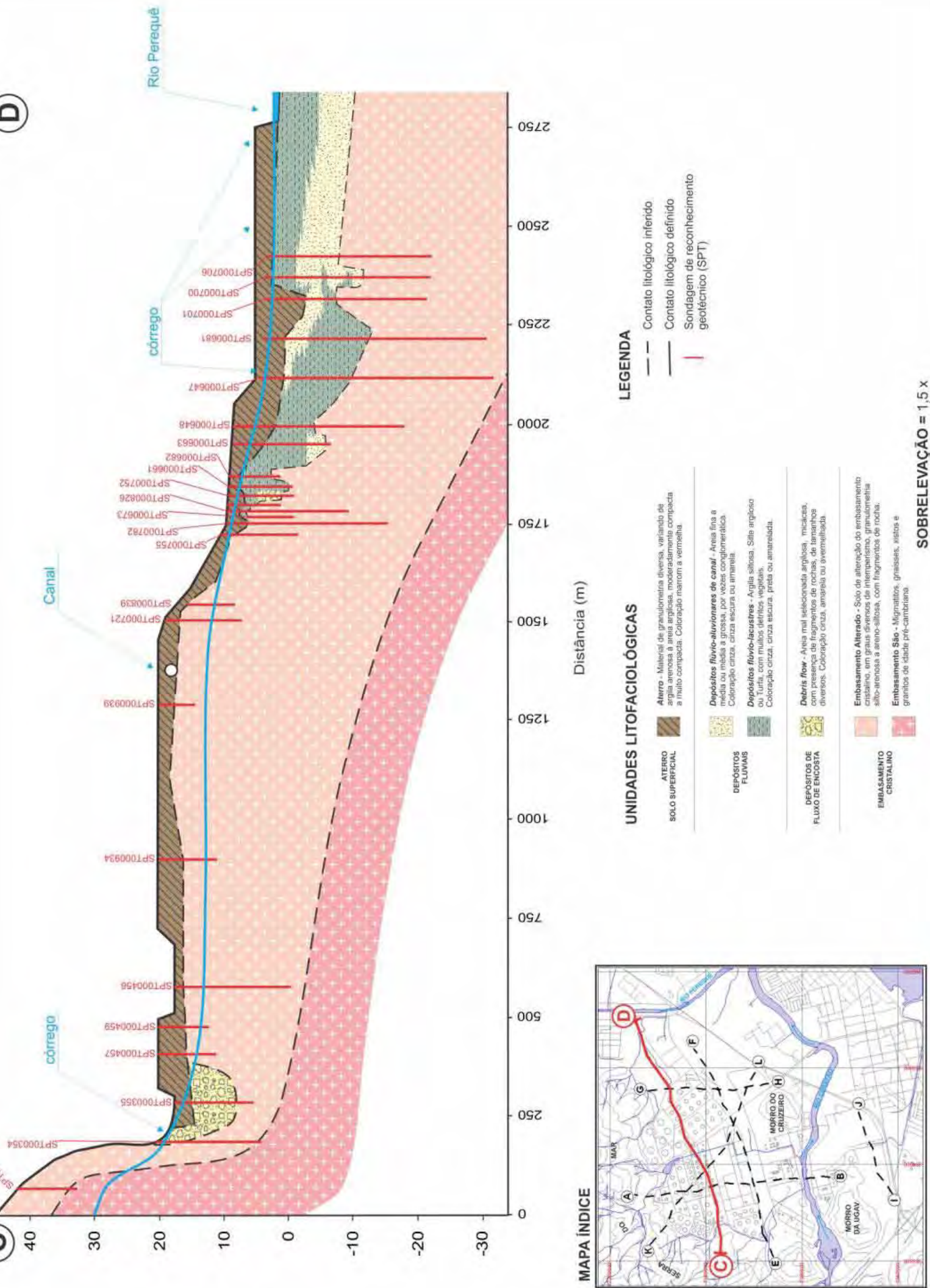


Figura 49. Seção geológico-hidrogeológica C-D.

F

E

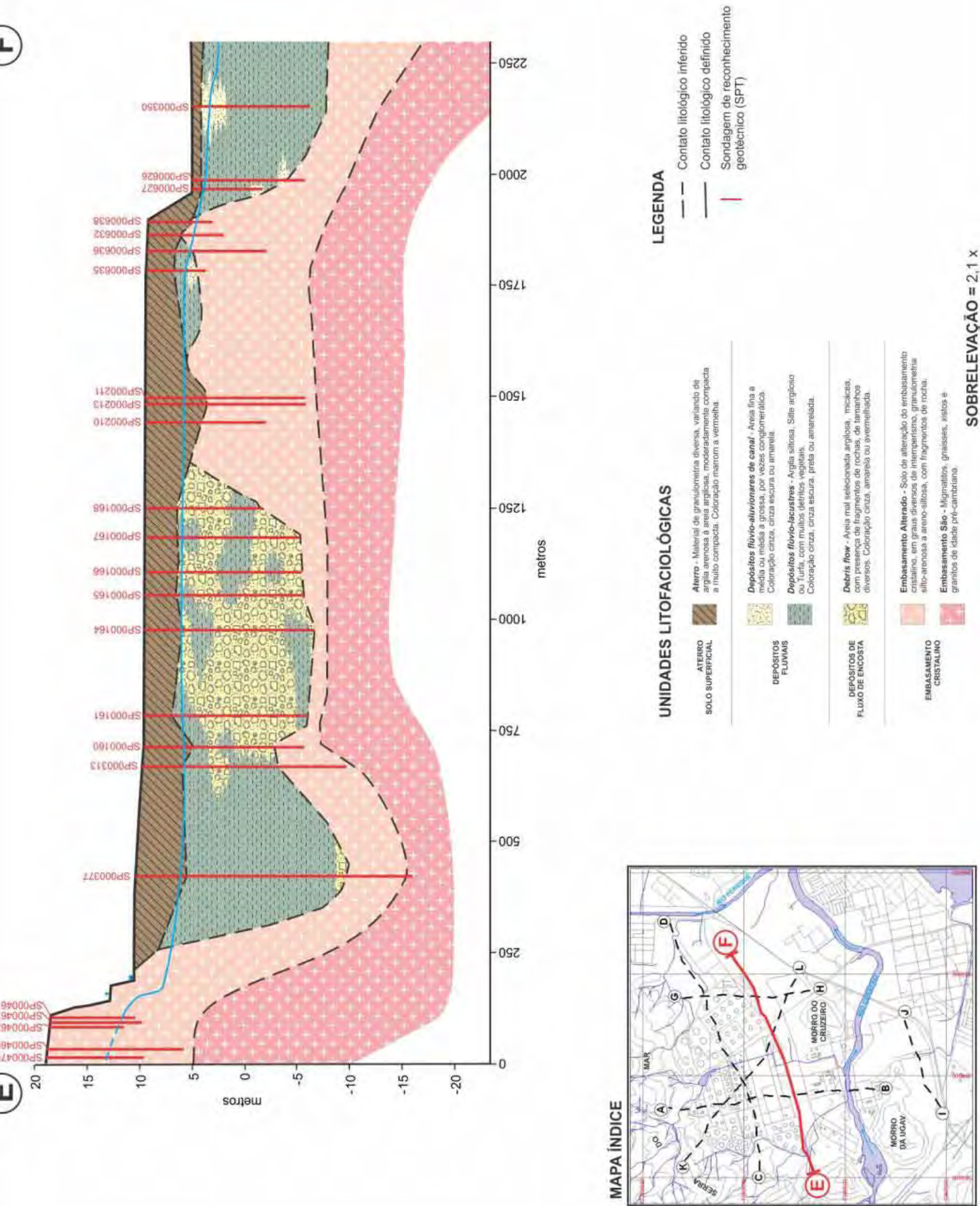
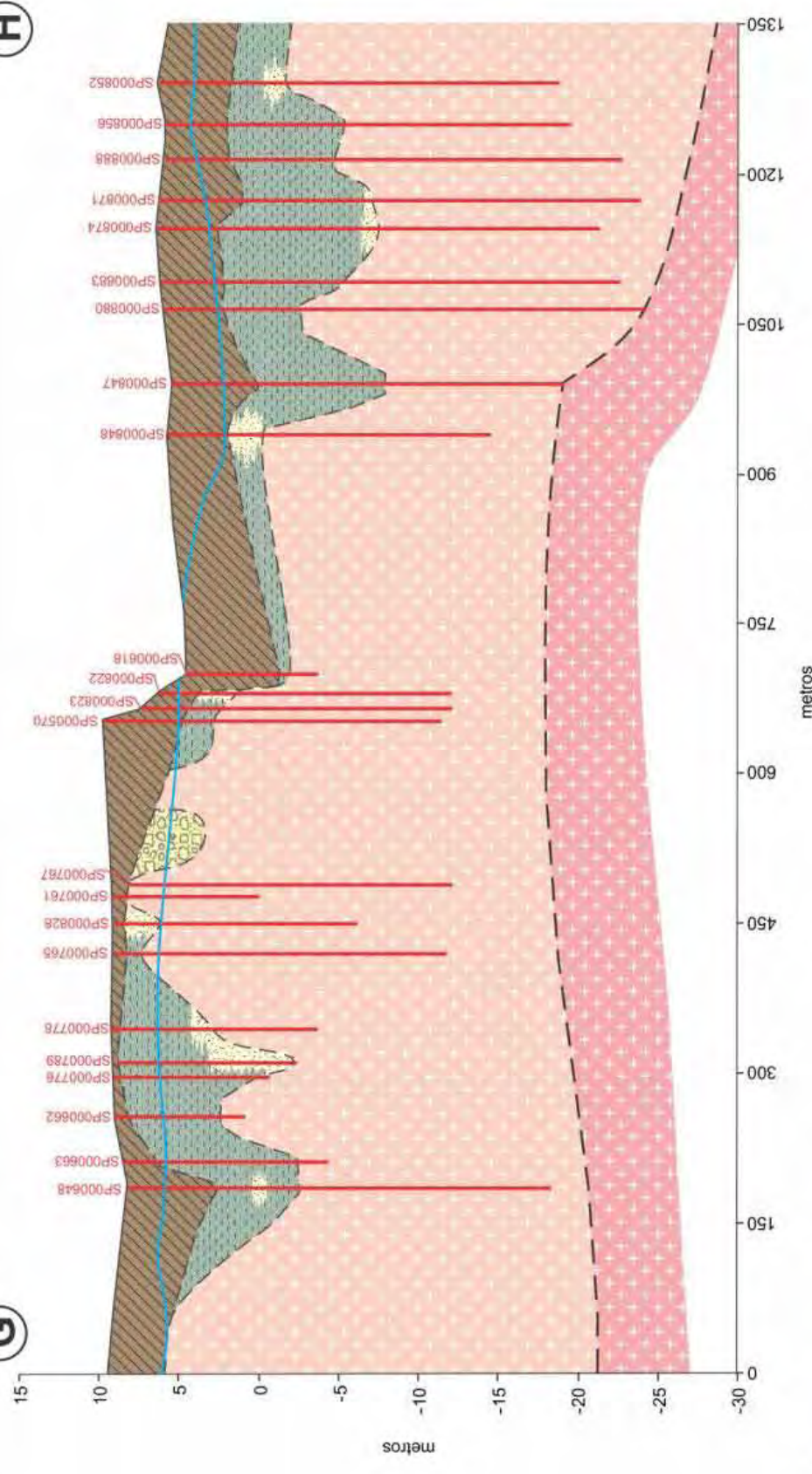


Figura 50. Seção geológico-hidrogeológica E-F.

H

G



LEGENDA

- Contato litológico inferido
- Contato litológico definido
- Sondagem de reconhecimento geotécnico (SPT)

UNIDADES LITOFACIOLÓGICAS

	ATERRO	ATERRO - Material de granulometria diversa, variando da argila arenosa a areia argilosa, moderadamente compacta a muito compacta. Coloração marrom a vermelha.
	DEPÓSITOS FLUVIAIS	Depósitos flúvio-aluvionares de canal - Areia fina a média ou média a grossa, por vezes conglomerática. Coloração cinza, cinza escura ou amarela.
	DEPÓSITOS DE FLUXO DE ENCOSTA	Depósitos flúvio-lacustres - Argila silteosa. Silte argiloso ou turfa, com muitos detritos vegetais. Coloração cinza, cinza escura, preta ou amarelada.
	DEBRIS FLOW	Debris flow - Areia mal selecionada argilosa, micácea, com presença de fragmentos de rochas, de lamitos diversos. Coloração cinza, amarela ou avermelhada.
	EMBASAMENTO CRISTALINO	Embasamento Alterado - Solo de alteração do embasamento cristalino, em graus diversos de intemperismo, granulometria silto-arenosa a areno-silteosa, com fragmentos de rocha.
		Embasamento São - Migmatitos, gnaisses, xistos e granitos de idade pré-cambriana.

SOBRELEVAÇÃO = 15,2 x

MAPA ÍNDICE

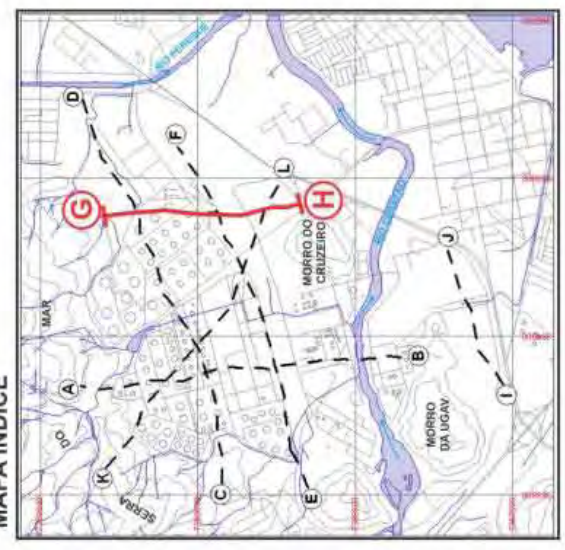


Figura 51. Seção geológico-hidrogeológica G-H.

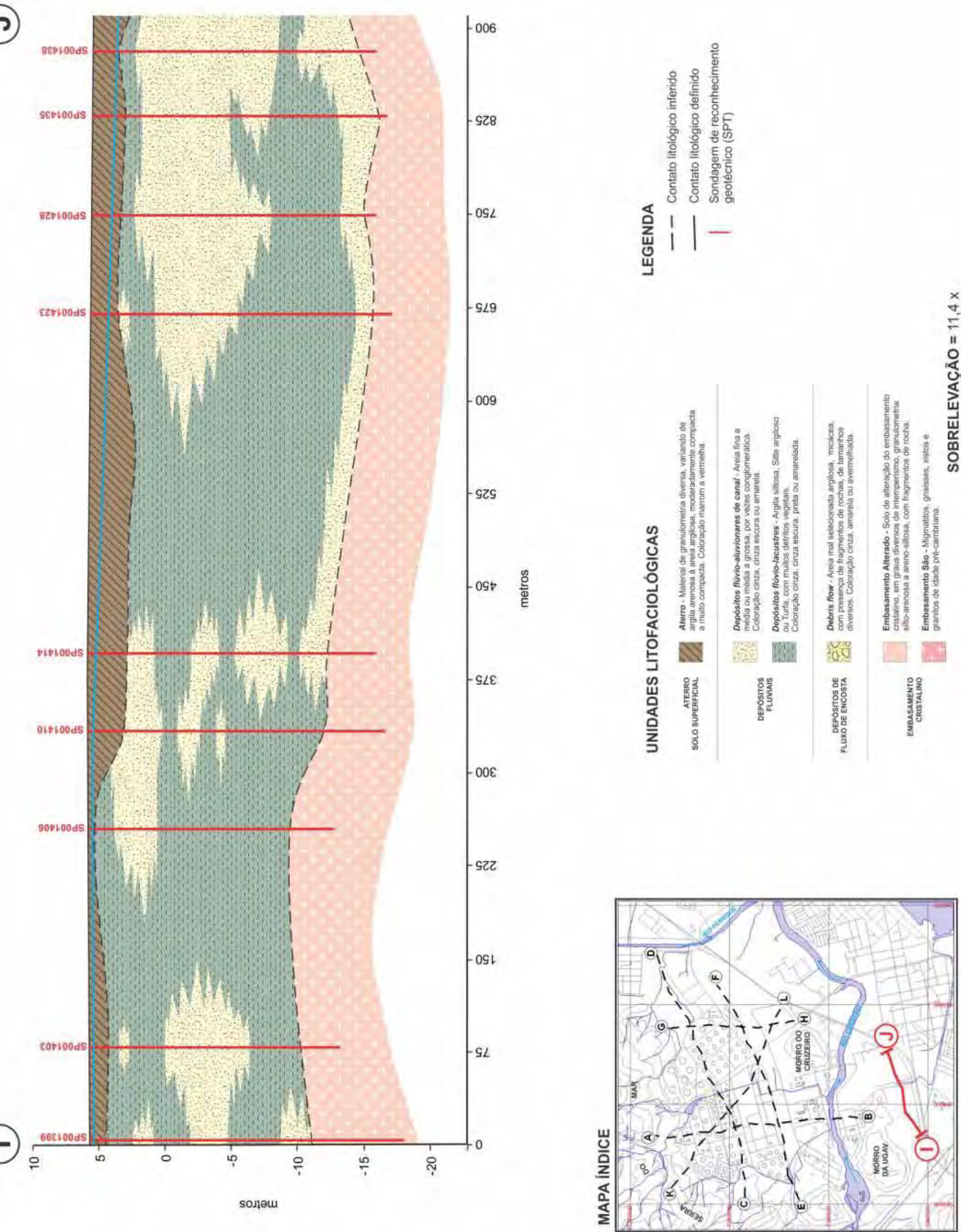


Figura 52. Seção geológico-hidrogeológica I-J.

L

M

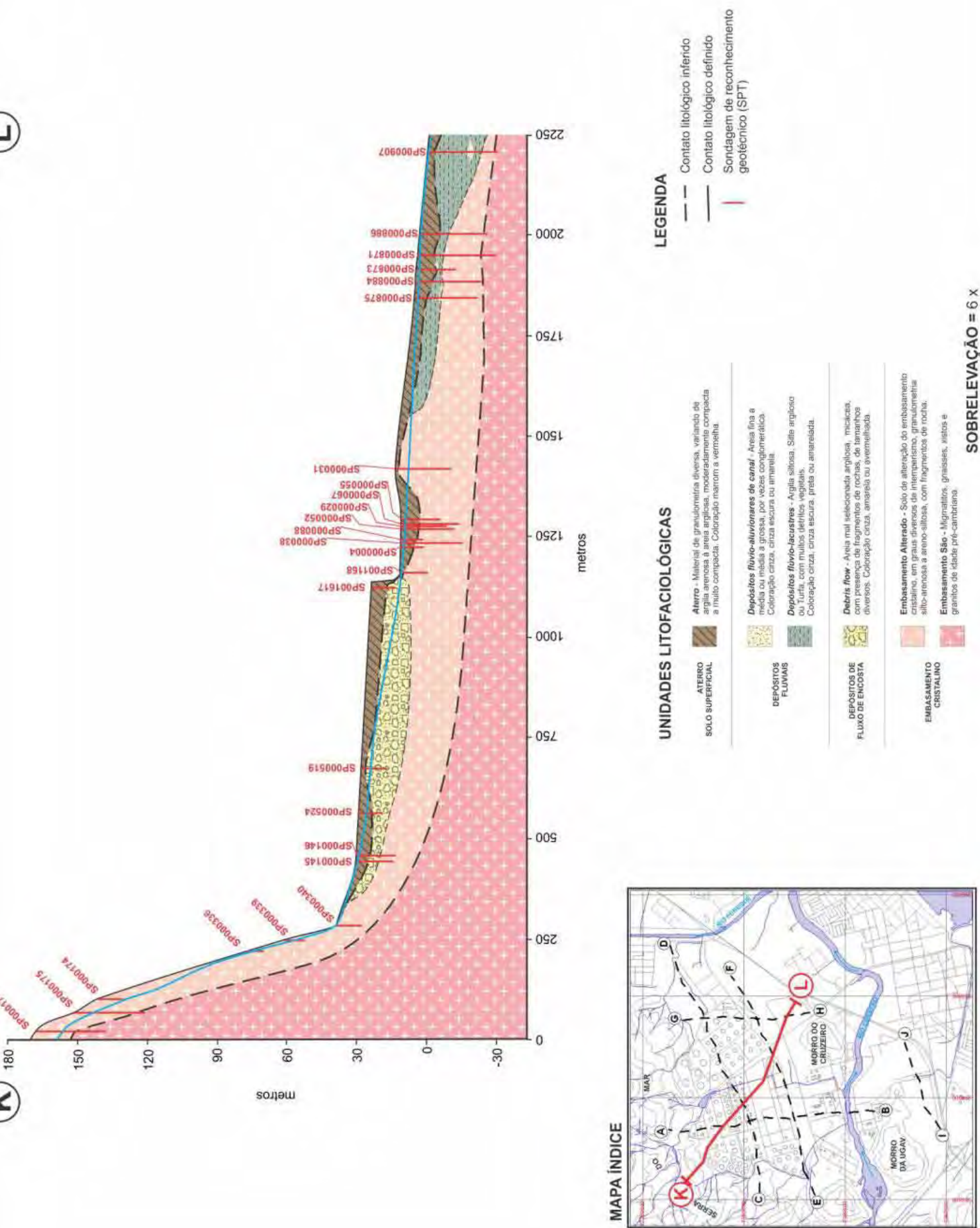


Figura 53. Seção geológico-hidrogeológica K-L.

4.4.2.2. *Fluxo da água subterrânea*

De acordo com os dados de carga hidráulica obtidos nos poços monitorados na área, entre setembro e outubro/2009, e os níveis dos rios e córregos presentes que cortam ou fazem limite com a área, foi elaborado mapa potenciométrico, mostrado na **Figura 54**, para representação das condições regionais de fluxo da água subterrânea.

Este mapa potenciométrico mostra que o fluxo ocorre predominantemente de norte para sul, com inflexões associadas à influência dos cursos d'água e pelas diferentes condutividades hidráulicas de cada unidade hidrofaciológica.

A feição regional de descarga das águas subterrâneas é o Rio Cubatão e, secundariamente, o Rio Perequê. Localmente, os cursos d'água que cortam a área de estudo, também representam feições de descarga, porém, com influência restrita a sua ocorrência. A carga hidráulica medida em piezômetros instalados no leito do Rio Cubatão e de seus tributários é superior ao nível d'água dos mesmos, indicando a atuação de fluxo ascendente, com influxo de água do aquífero para o mesmo, comprovando as condições de descarga.

Outro aspecto observável na ponteciometria local é a atuação de altos do Embasamento Cristalino São, que geram restrições locais de fluxo, segmentando o aquífero em regiões com diferentes velocidades de fluxo.

Em virtude da espessura pronunciada da zona saturada na área de estudo, que em algumas regiões excede 30,0 m, pode se admitir a existência de duas regiões com velocidades de fluxo diferentes, porém, constituintes do mesmo aquífero, como ilustrado na **Figura 55**, a qual foi avaliada pela modelagem matemática realizada neste estudo.

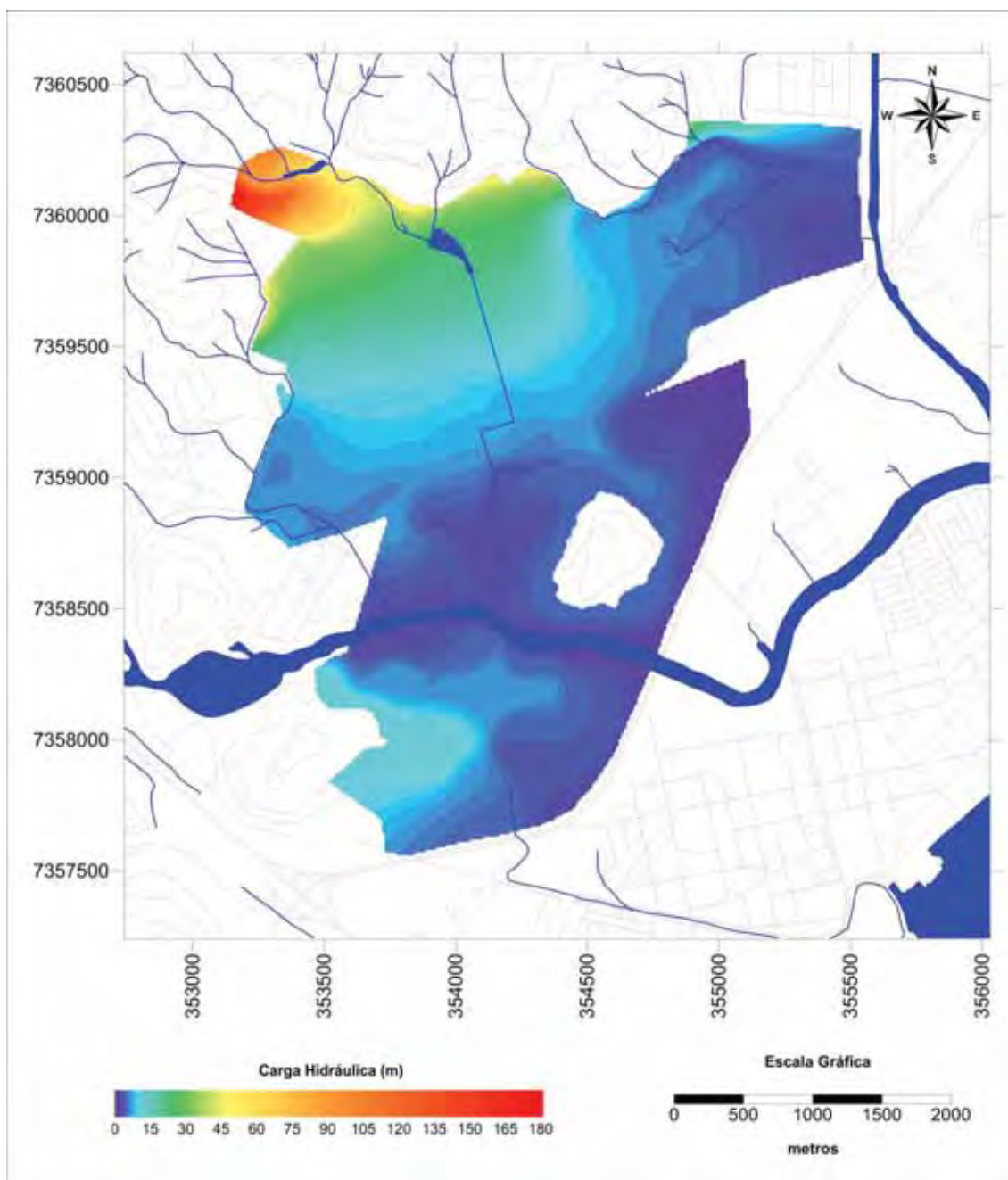


Figura 54. Mapa potenciométrico da área de estudo.

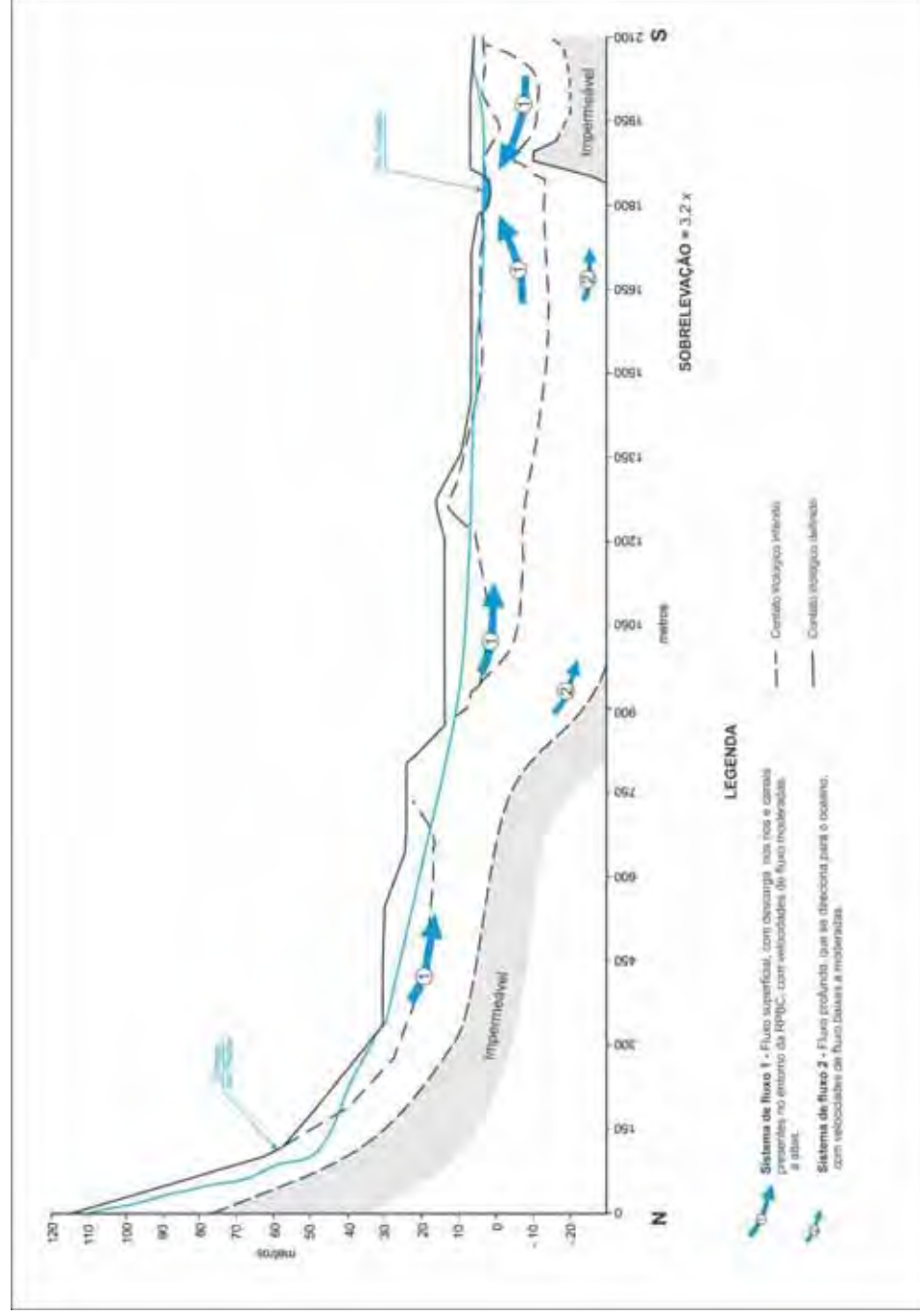


Figura 55. Seção mostrando as diferentes velocidades de fluxo nas regiões superficiais e profundas do aquífero

A primeira região de fluxo é representada pela água que circula em porções superficiais do aquífero, com descarga nos rios e canais. Já a segunda região de fluxo é representada pela circulação de água em porções profundas da zona saturada do aquífero, apresentando descarga no Rio Cubatão.

A influência destas regiões na hidrogeologia da área de estudo será considerada na modelagem, para verificar sua validade quanto às condições reais.

Em virtude da existência de litologias mais permeáveis nas porções mais rasas da zona saturada, representadas pelos hidrofácies flúvio-lacustre-costeiras, as velocidades de fluxo na porção superficial apresentam valores mais elevados que no sistema de fluxo nas porções profundas do aquífero.

É importante salientar que estas duas regiões de fluxo não representam dois sistemas aquíferos separados, mas apenas um único aquífero, porém, com diferenças associadas à condutividade hidráulica refletida pelas litologias de cada unidade hidroestratigráfica considerada, não sendo observada litologia que divida a região de estudo em aquíferos distintos.

4.4.3. Simulação Numérica

Para realização da simulação numérica deste trabalho foram seguidas as etapas apresentadas nos fluxogramas propostos por diversos autores, para elaboração de modelos matemáticos de fluxo da água subterrânea, conforme compilação de Alberto (2005).

Este fluxograma, denominado Protocolos para Aplicação de Modelos Matemáticos – PAMMs, apresenta o esboço metodológico e segrega as etapas contidas no processo de simulação matemática.

Nestes PAMMs verifica-se que na construção de modelos matemáticos é necessária a realização sequencial de etapas que precisam ser adequadamente efetuadas para viabilizar as etapas posteriores.

Diversos autores têm propostos PAMMs em suas publicações, entretanto, estes exibem algumas diferenças metodológicas, como pode ser verificado a partir da comparação do trabalho de autores como Bear (1972), Anderson & Woessner (1992), Kresic (1997), Spitz e Moreno (1996), entre outros.

A **Figura 56** ilustra cinco protocolos, de maneira comparativa, efetuada por Alberto (2005), demonstrando que, a despeito de divergências em aspectos pormenorizados destes protocolos, as etapas contidas nos PAMMs comparados podem ser agrupadas em três etapas principais: Preparação, Calibração e Aplicação.

A primeira etapa, de Preparação, consiste na compilação e interpretação dos diversos dados obtidos durante o processo de investigação geológico/hidrogeológico, tais como litologias, níveis d'água e condutividade hidráulica das áreas estudadas, permitindo a formulação de um modelo hidrogeológico conceitual para as mesmas.

Com base no modelo conceitual elaborado foram definidas a discretização do domínio do modelo definindo-se o número de camadas e de elementos discretos do modelo, e as condições de contorno do modelo matemático, representados pelas feições naturais presentes na área.

As simulações numéricas de fluxo foram realizadas por meio do aplicativo *VisualMODFLOW 4.2*[®] (Schlumberger, 2008), em regime permanente de fluxo.

A calibração do modelo (Etapa 2) foi efetuada por meio da alteração sucessiva dos parâmetros de entrada, principalmente a condutividade hidráulica, até que se atingisse uma relação satisfatória entre os valores de carga hidráulica mensuradas em campo e aqueles calculados pela simulação (coeficientes de correlação e erros).

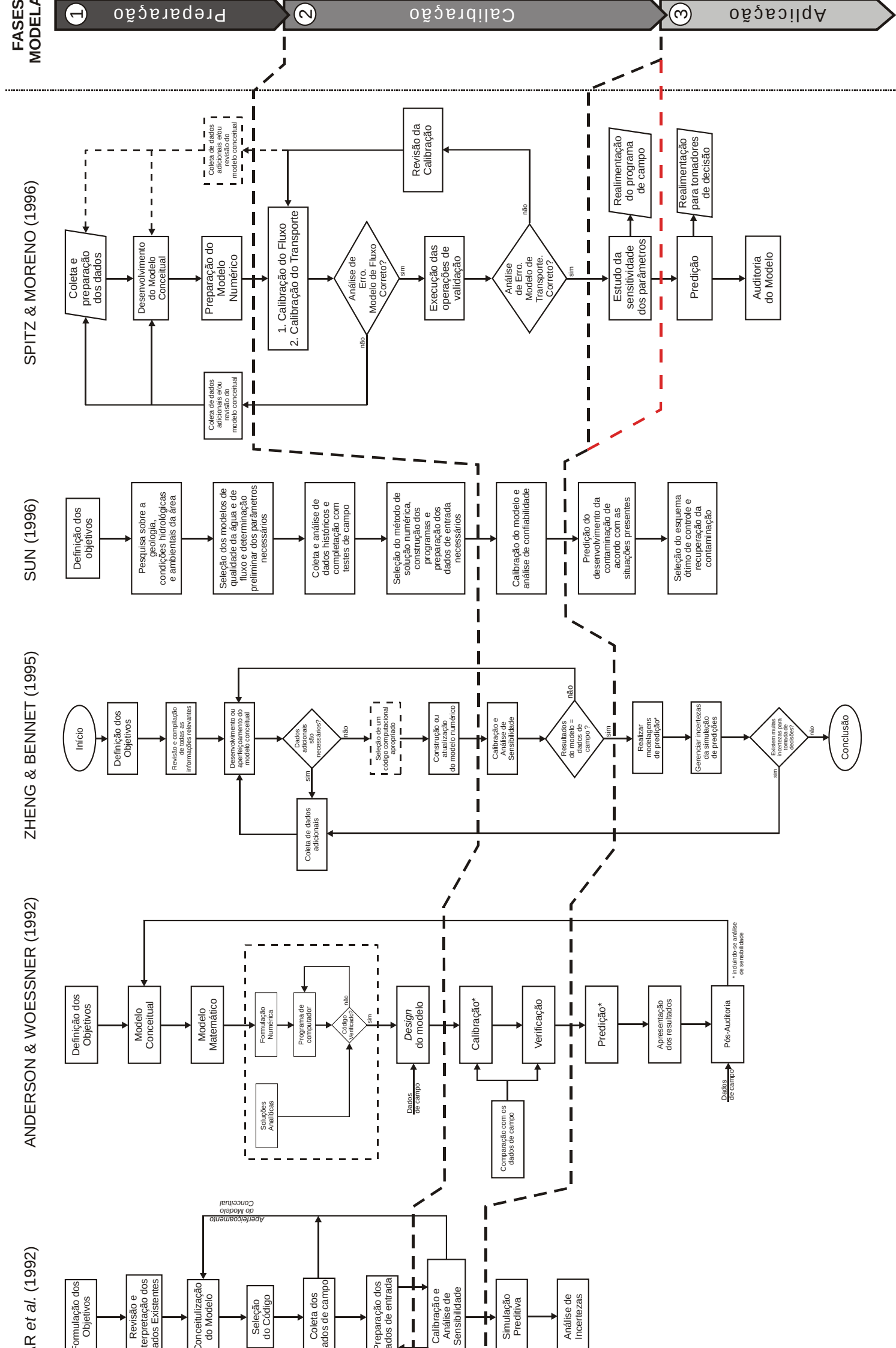


Figura 56. Comparação de Protocolos de Aplicação de Modelos Matemáticos - PAMMs (ALBERTO, 2005).

Para a simulação realizada, foram considerados como parâmetros de convergência os índices mostrados na **Tabela 10**.

Tabela 10. Parâmetros de convergência utilizados nas simulações realizadas

ÍNDICE	SIGLA	EQUAÇÃO
Resíduo Médio	M	$M = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (cal_i - obs_i)$
Variância do resíduo	VAR	$VAR = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [(cal_i - obs_i) - M]^2$
Média absoluta do resíduo	MA	$MA = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(cal_i - obs_i)]^{1/2}$
Raiz média do erro residual quadrático	RMS	$RMS = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (cal_i - obs_i)^2 \right]^{1/2}$
Coefficiente de correlação linear entre os valores de cargas hidráulicas reais e calculadas	R	$r = \frac{\sum_{i=1}^N (cal_i - \overline{cal})(obs_i - \overline{obs})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (cal_i - \overline{cal})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (obs_i - \overline{obs})^2}}$

onde:

cal_i - carga hidráulica calculada.

obs_i - carga hidráulica observada.

$\overline{cal}$ - valor médio de carga hidráulica calculada.

$\overline{obs}$ - valor médio de carga hidráulica observada.

Existem inúmeras técnicas de calibração como aquela descrita por Yeh & Mock (1997) e códigos para calibração automática. Para a calibração do presente modelo foi empregada a metodologia de “tentativa e erro” (*trial and error*), descrita no trabalho de Anderson & Woessner (1992).

A condutividade hidráulica foi alterada, de acordo com critérios da distribuição geológico-hidrogeológica apresentada no capítulo 5, para que se preservasse o modelo conceitual apresentado e fosse considerada situação geologicamente possível no local.

A cada alteração foi realizado um evento de simulação para avaliação dos resultados após as modificações.

Este processo prosseguiu até que se atingisse o nível satisfatório de convergência entre os parâmetros hidrogeológicos mensurados em campo e aqueles calculados pelos eventos de simulação.

4.4.3.1. *Modelo Conceitual*

Com base na caracterização geológico-hidrogeológica realizada, na potenciométrica da área e nas feições hidrológicas existentes, foi estabelecido o modelo conceitual, que serviu de base para a simulação numérica do fluxo da água subterrânea.

Para que a simulação de fluxo da água subterrânea apresentasse maior estabilidade numérica e menor complexidade na discretização do domínio modelado, foram criadas 7 camadas, englobando as diferentes unidades litofaciológicas descritas anteriormente, sendo que estas camadas podem apresentar mais de uma unidade litofaciológica, representada por zonas distintas de condutividade hidráulica.

Para tanto, foram comparados os valores de condutividade hidráulica obtidos na área, por meio da distribuição espacial dos poços de monitoramento que dispunham resultados de ensaios hidrogeológicos, para definição do intervalo de valores de cada unidade hidrofaciológica. Na **Figura 57** são apresentadas as regiões de isocondutividades hidráulicas, para cada camada considerada para realização da simulação, consideradas como condições iniciais da modelagem.

O topo das rochas do Embasamento Cristalino São foi considerado como a base do aquífero local (**Figura 47**) que, em profundidade, apresenta fluxo limitado, praticamente impermeável, sendo representado como condição de contorno de fluxo ausente (*no-flow boundary*). Esta condição de contorno também foi considerada para os afloramentos desta unidade, ocorrentes no Morro do Cruzeiro e em outros morrotes presentes na área.

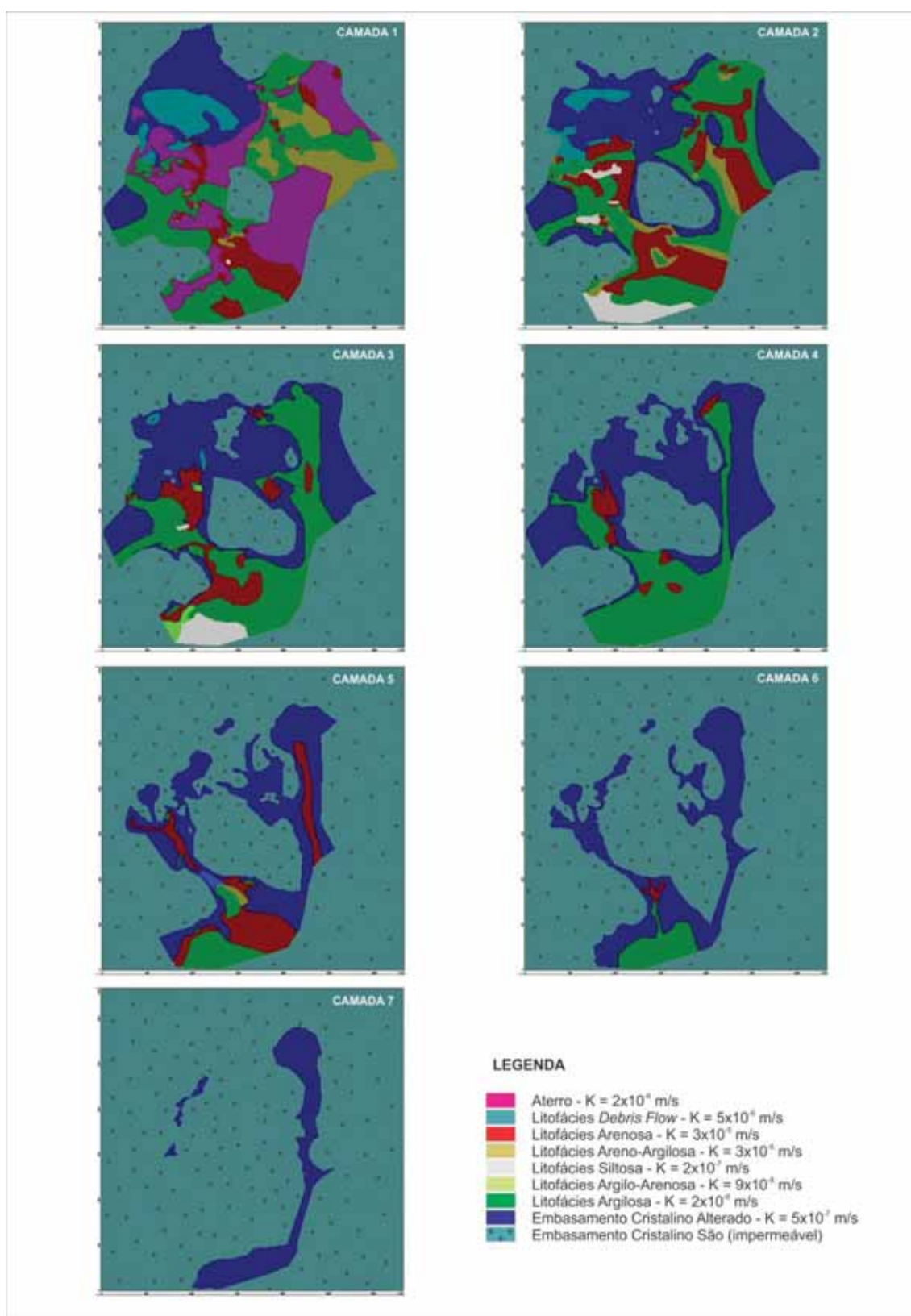


Figura 57. Mapa de distribuição das condutividades hidráulicas iniciais nas 7 camadas.

As condições de contorno utilizadas para os rios e córregos foram aquelas de 3º tipo, *fluxo dependente da carga hidráulica*, sendo que os Rios Cubatão e Perequê foram conectados em todas as camadas, por representar o fluxo de base regional e, os demais, foram conectados somente às camadas mais superficiais, por apresentarem influência restrita à sua área de ocorrência.

4.4.3.2. Configuração geométrica do domínio simulado

A discretização do domínio simulado foi realizada pela segmentação em 400 colunas, 400 linhas e 7 camadas. O espaçamento uniforme entre as linhas e colunas foi de 8,32 m e a espessura das camadas variaram de 1,0 a 5,0 m, a depender da forma de ocorrência de cada litologia e sua distribuição espacial. Deste modo, os limites das camadas foram definidos de modo a representar as heterogeneidades verticais identificadas nas sondagens geotécnicas.

A **Figura 58** ilustra a transposição da hidroestratigrafia identificada na área para o modelo matemático.

A **Figura 59** mostra a distribuição das células inativas e ativas para as 7 camadas definidas para as simulações realizadas neste estudo, as quais definiram as condições de contorno de fluxo nulo, condicionadas pela forma do topo rochoso. Verifica-se, nestas figuras, um sucessivo incremento de células inativas em relação às células ativas em camadas mais profundas, em virtude da maior abrangência do Embasamento Cristalino São, o qual foi adotado como base impermeável do modelo.

As **Figuras 60 e 61** ilustram duas seções, W-E e N-S, para mostrar a discretização vertical do modelo.

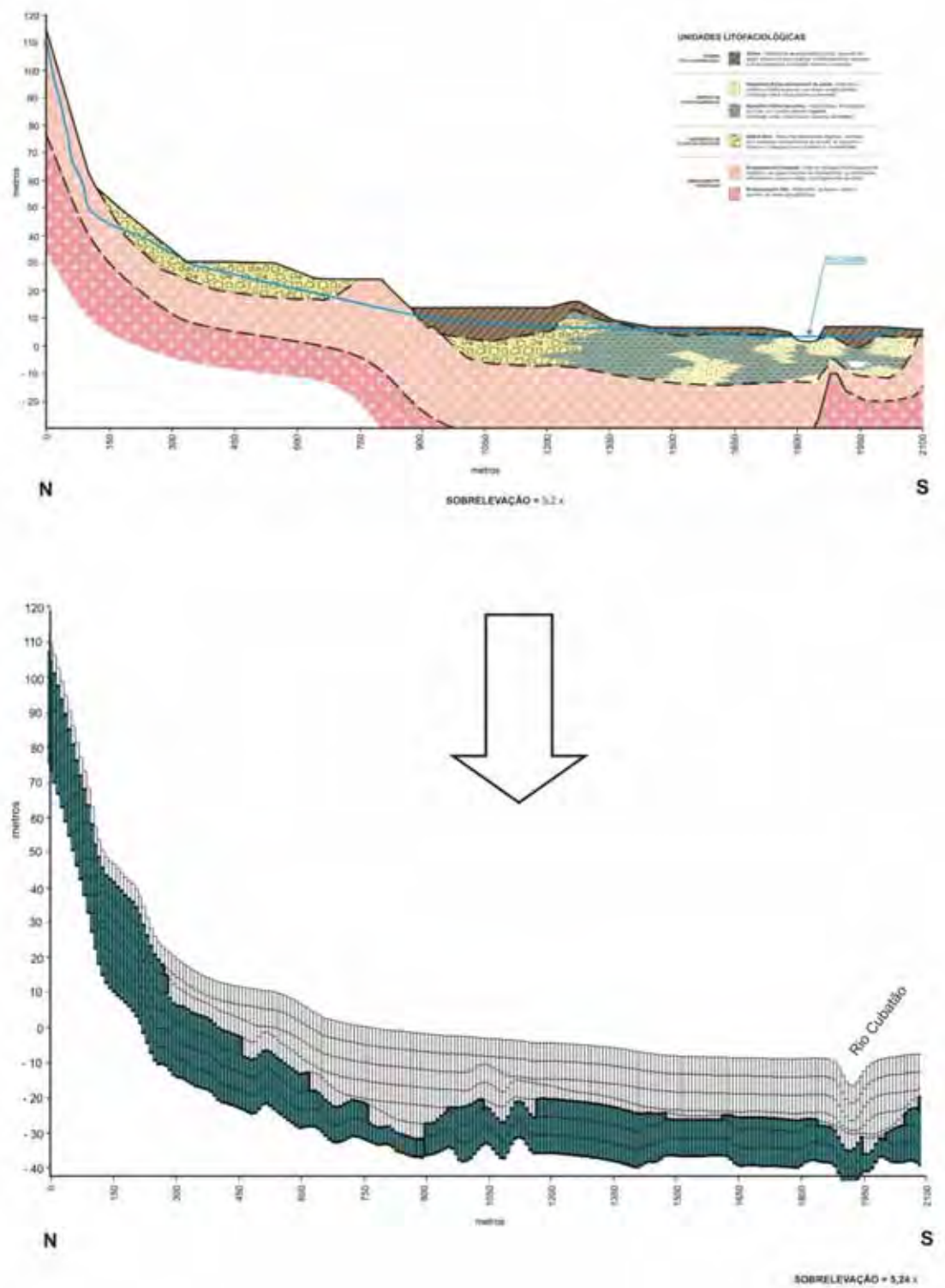


Figura 58. Transposição da hidroestratigrafia para o modelo matemático.

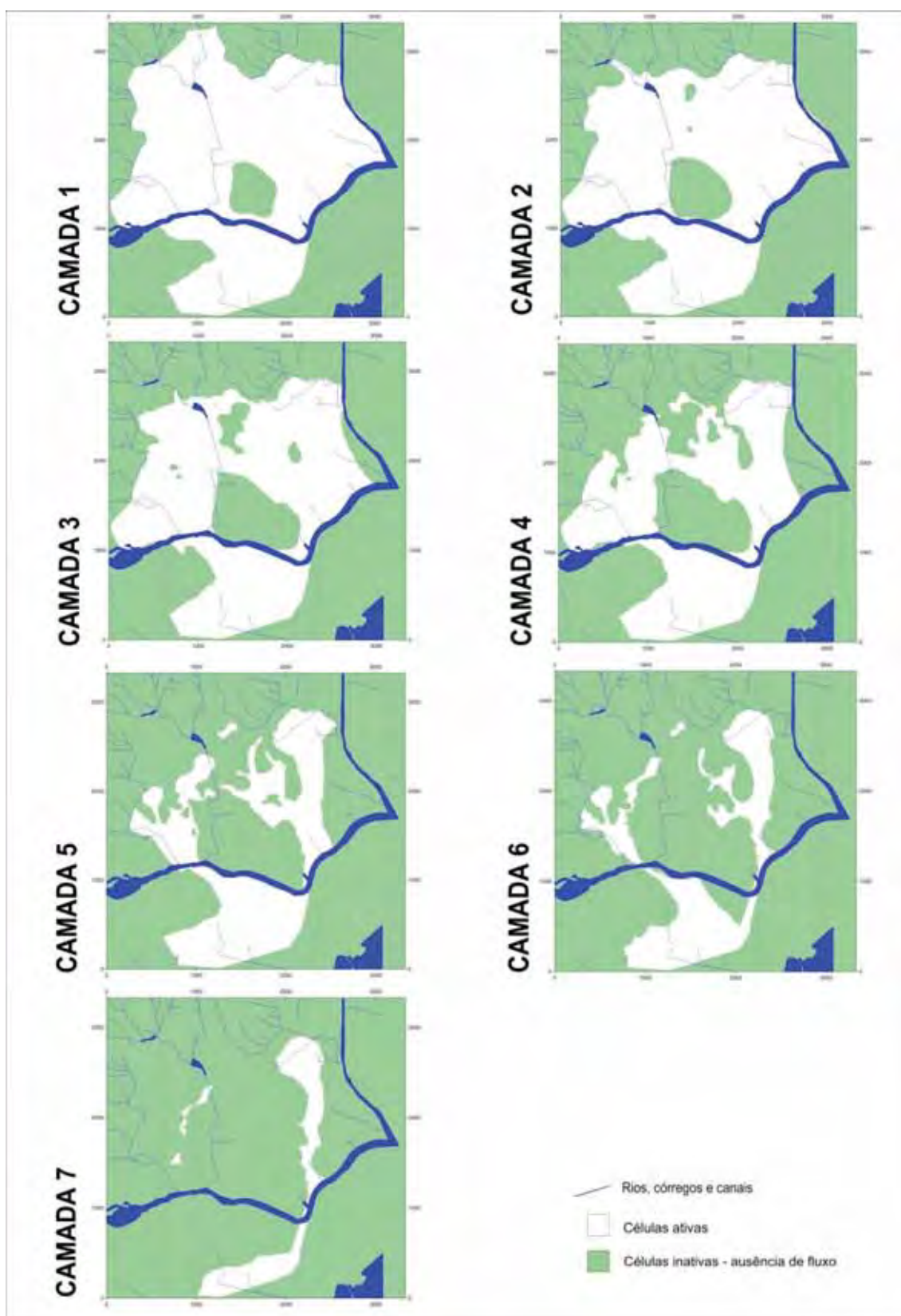


Figura 59. Distribuição das células ativas e inativas nas 7 camadas.

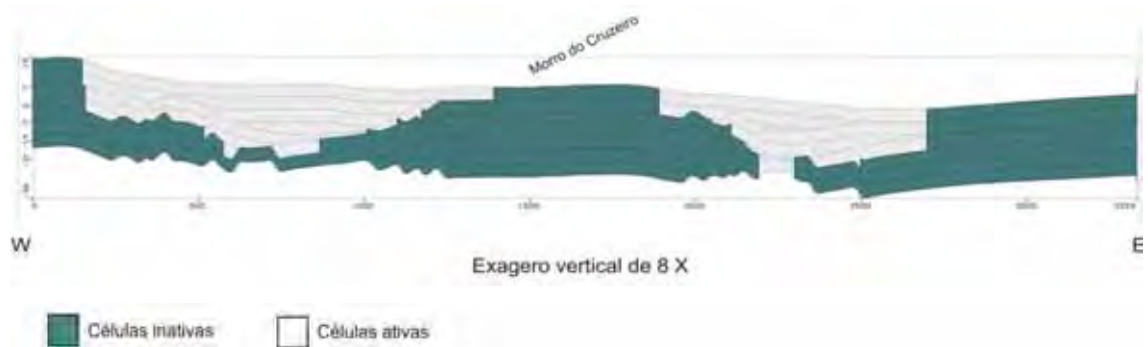


Figura 60. Seção W-E na porção central do modelo

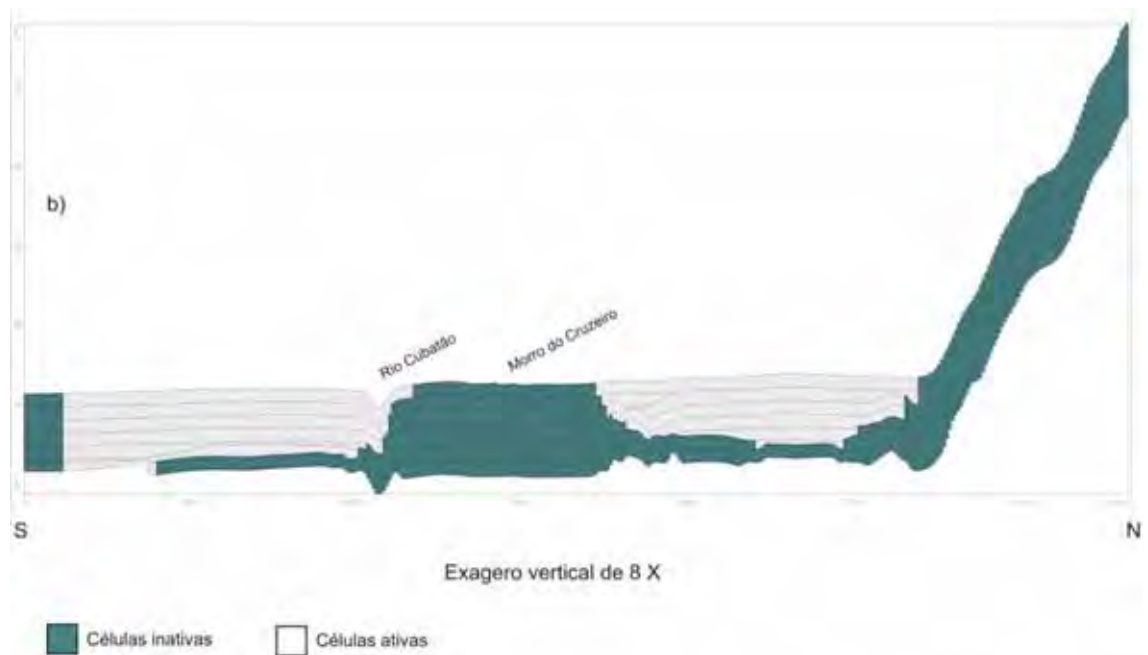


Figura 61. Seção N-S na porção central do modelo.

4.4.3.3. *Condições de Contorno*

As condições de contorno, localizadas nas fronteiras do modelo, são elementos essenciais à sua solução, pois são as referências atribuídas para permitir os cálculos dos valores de carga hidráulica no domínio considerado para simulação.

As condições de contorno adotadas neste modelo correspondem a elementos físicos como rios, canais e litologias praticamente impermeáveis, além das feições observados por meio do mapa potenciométrico, tais como: divisores de fluxo e linhas de fluxo.

As condições de contorno utilizadas nas simulações deste estudo são mostradas na **Figura 62**.

Salienta-se que as cargas hidráulicas atribuídas aos rios e cursos d'água da área, condições de contorno de 1º tipo, foram obtidas do mapa topográfico da área, anotando-se as cotas das curvas de nível que são interceptadas pelos rios e canais.

A seguir são descritas as condições de contorno consideradas para este estudo.

4.4.3.3.1. Recarga

A entrada de água no modelo foi assumida como oriunda exclusivamente do influxo de água pela recarga externa.

Inicialmente, foram adotados valores únicos de recarga, assumindo uma taxa de 364,0 mm/ano, correspondente a 12,0 % da precipitação acumulada total anual, conforme valor atribuído para o Estado de São Paulo (DAEE/IPT/IG/CPRM, 2005).

Estes valores foram reavaliados ao longo dos eventos de modelagem, sendo apresentada a distribuição espacial da recarga da área, com base nos resultados finais da modelagem apresentada neste relatório, tendo em vista a calibração realizada.

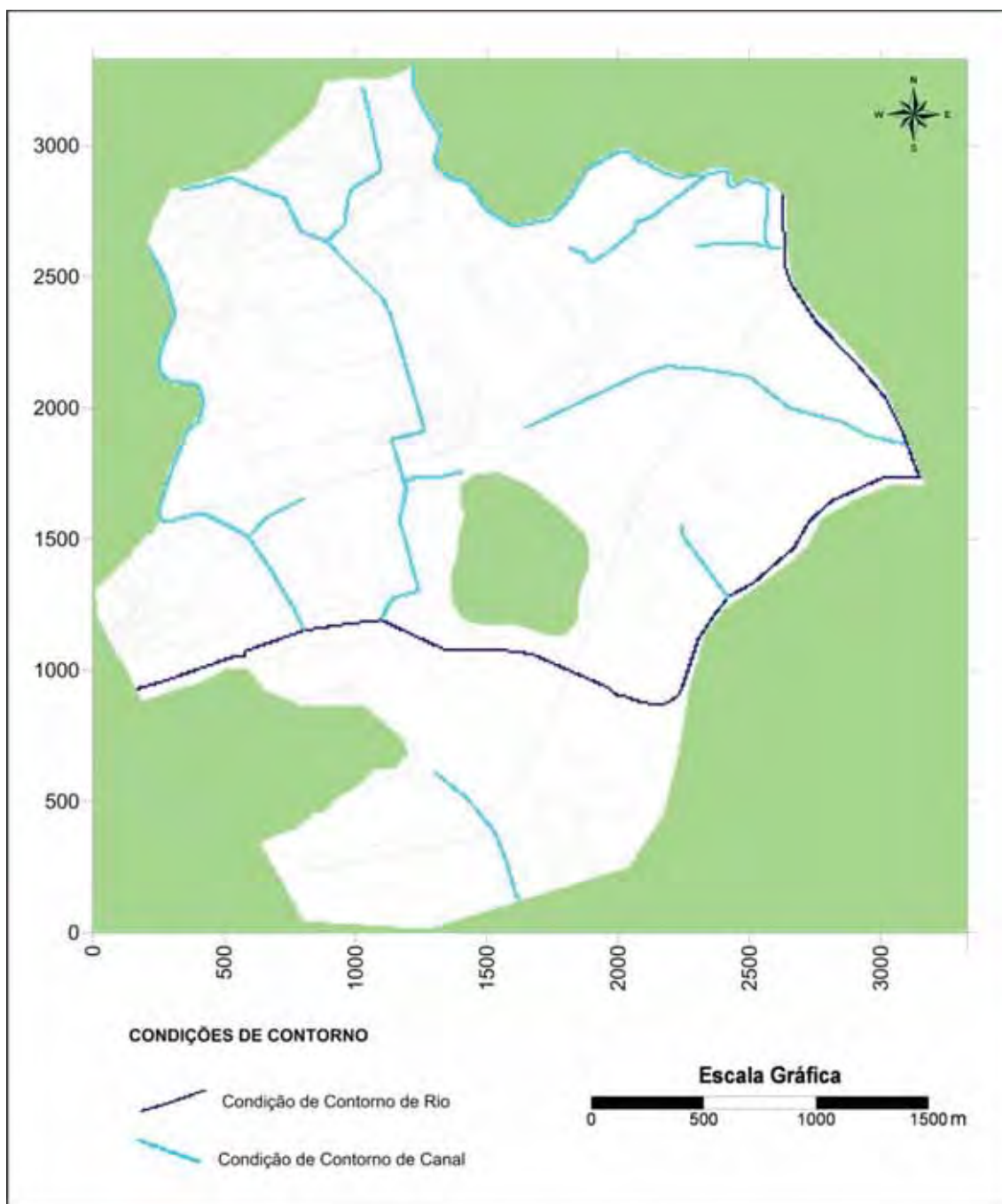


Figura 62. Mapa de distribuição das condições de contorno.

4.4.3.3.2. Condições de 3º tipo

4.4.3.3.2.1. Canais

Para representar os diversos canais e córregos presentes no interior e nos limites do domínio modelado, foi empregado o pacote *Stream*, conforme descrito por Prudic (1989) pela equação apresentada abaixo.

$$Q_1 = CSTR(H_s - H_a)$$

onde:

Q_1 = vazão para ou do aquífero através do leito do canal, (L³/T).

H_s = carga hidráulica do canal (L).

H_a = carga hidráulica do aquífero adjacente ao canal (L).

$CSTR$ = condutância do leito do canal (L²/T), que expressa uma variável calculada através da multiplicação da condutividade hidráulica do leito do canal pela largura do canal e seu tamanho, dividido pela espessura do leito do mesmo.

Os valores de condutividade hidráulica do leito do rio variaram de 3,0x10⁻⁴ cm/s para canais naturais ou desprovidos de leito de concreto e de 3,0x10⁻⁶ cm/s para canais com leito de concreto.

4.4.3.3.2.2. Rios

Em toda a extensão dos Rios Cubatão e Perequê, no interior do domínio simulado, foi empregado o pacote *River*, conforme equação a seguir:

$$Q_{rio} = CSTR(H_r - H_a)$$

onde:

Q_{rio} = vazão para ou do aquífero através do leito do canal, (L^3/T).

H_r = carga hidráulica do rio (L).

H_a = carga hidráulica do aquífero adjacente ao rio (L).

$CSTR$ = condutância do leito do rio (L^2/T), que expressa uma variável calculada através da multiplicação da condutividade hidráulica do leito do rio pela largura do rio e seu tamanho, dividido pela espessura do leito do mesmo.

4.4.3.3.2.3. Condições de fluxo nulo

As condições de contorno de fluxo nulo foram aplicadas às linhas de fluxo nos limites do domínio modelado, condicionadas pelo mapa potenciométrico da **Figura 54**, divisores de fluxo da água subterrânea e superfícies impermeáveis, como o topo do Embasamento Cristalino São e os morros-testemunho desta unidade, apresentadas na **Figura 59**, como células inativas.

4.4.3.4. Valores iniciais de condutividade hidráulica

Com base nos resultados dos ensaios de *slug test* realizados nos poços da área e em comparação aos perfis descritivos das sondagens realizadas, foram estabelecidos valores médios de condutividade hidráulica para cada hidrofacies identificada neste trabalho, mostrados de forma resumida na **Tabela 11**, pela média geométrica dos valores obtidos.

Tabela 11. Relação entre as hidrofacies e os valores médios de condutividade hidráulica.

LITOFÁCIES		CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA MÉDIA
Aterro		$3,0 \times 10^{-4}$ cm/s
Sedimentos Flúvio-Costeiros	Areias	$5,0 \times 10^{-2}$ cm/s
	Argilas	$7,0 \times 10^{-6}$ cm/s
	Siltes	$5,0 \times 10^{-5}$ cm/s
	Aproximadamente 50% de camadas arenosas e 50% de camadas argilosas	$2,0 \times 10^{-4}$ cm/s
Embasamento Cristalino Alterado		$4,0 \times 10^{-4}$ cm/s

Nos locais com ausência de informação, os valores de condutividade hidráulica foram inferidos e corrigidos, posteriormente, pelo processo de calibração do modelo, respeitando-se sempre uma disposição geologicamente possível, de acordo com o modelo geológico conceitual estabelecido.

A **Figura 57** apresenta a distribuição inicial das condutividades hidráulicas consideradas para o modelo geológico concebido, previamente a calibração do modelo, nas 7 camadas.

4.4.3.5. Calibração

Após todos os passos de calibração do modelo, foi obtido um coeficiente de correlação de 0,982 entre os valores de carga hidráulica calculadas pela simulação e aqueles obtidas em campo, conforme medições efetuadas nos poços de monitoramento. Este coeficiente indica elevada correlação entre estes valores.

O resíduo absoluto médio de 0,96 m, e o erro normalizado quadrático de 3,426 % indicam que o erro médio absoluto entre os valores calculados e aqueles de campo é de no máximo $\pm 0,96$ m, ou quase 1,0 m, bastante satisfatório para a área de interesse, por representar aproximadamente 5,0 % entre os valores mínimo e máximo das cargas hidráulicas medidas na área.

A **Figura 63** mostra a reta de calibração no gráfico de dispersão entre os dados simulados e observados, com os respectivos indicadores de calibração.

4.4.3.6. Balanço Hídrico

O balanço de fluxo, ou seja, a diferença entre a quantidade de entrada de água no domínio modelado e a quantidade de saída de água deste sistema, apresenta uma discrepância de $-3,13 \times 10^{-4}$ % (**Tabela 12**), o que permite afirmar que seus resultados são bastante satisfatórios.

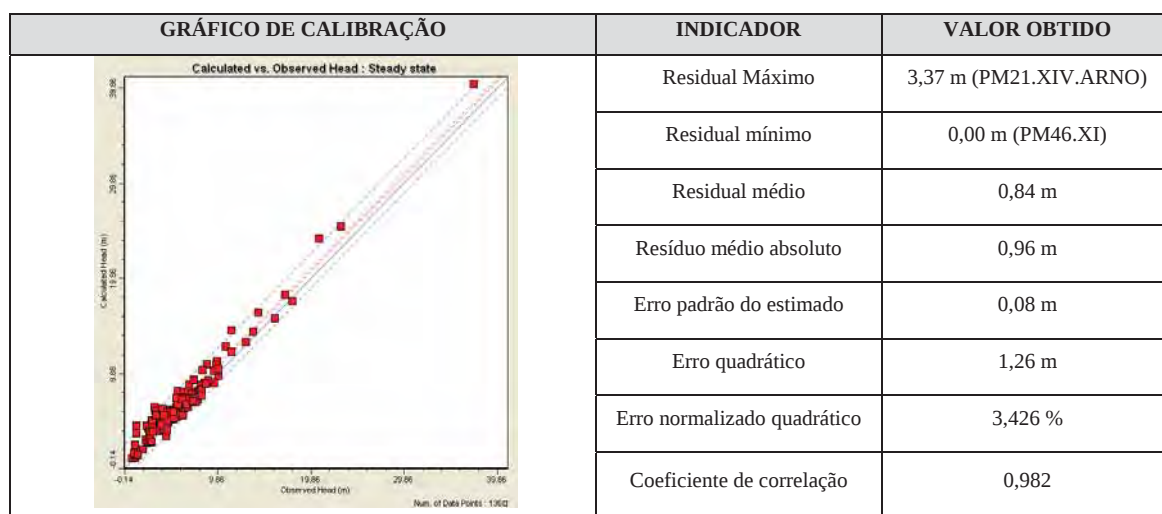


Figura 63. Gráfico de dispersão dos valores de carga hidráulica calculados vs. campo e indicadores de calibração.

A **Figura 64** mostra as entradas e saídas de água do sistema, verificando-se que a entrada de água se dá, essencialmente, pela recarga proveniente da precipitação pluviométrica e, subordinadamente, tem entrada de água pelos canais que cruzam a área de estudo.

A saída de água ocorre quase totalmente pelos canais e rios, sendo mais significativa a saída de água pelos canais que cruzam a área de estudo e, secundariamente, pelos rios, considerando-se que o fluxo da água subterrânea é mais significativo nas porções superficiais do aquífero.

A saída de água pelo contorno de carga constante é incipiente em relação às demais feições.

Tabela 12. Balanço hídrico (m^3) da simulação realizada na área de estudo.

CONTORNO	ENTRADA	SAÍDA	BALANÇO
Recarga	574,30	0,00	+ 574,3
Canais	31,85	467,98	- 436,13
Rios	0,03	133,13	- 133,10
Carga constante	0,00	5,26	- 5,26
Total	606,18	606,37	- 0,19

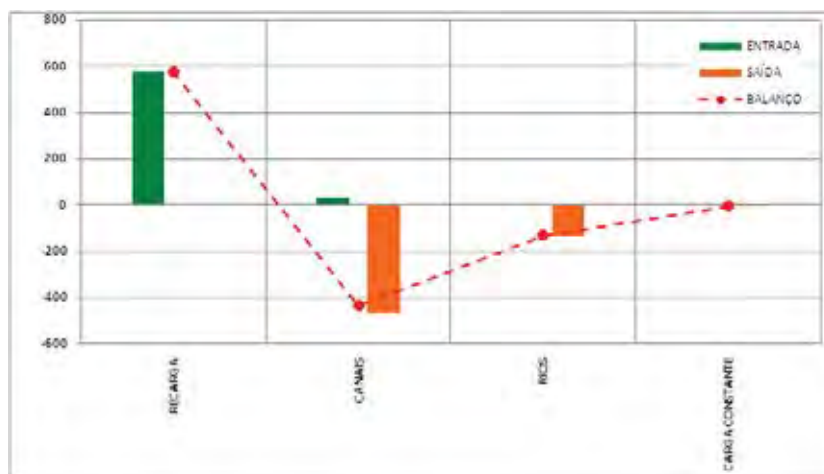


Figura 64. Gráfico de balanço hídrico do sistema simulado.

4.4.3.7. Potenciometria simulada

Os resultados da simulação mostraram correspondência entre a potenciometria simulada e aquela observada em campo.

Como descrito anteriormente, a presença de altos do Embasamento Cristalino São segmentam, parcialmente, os aquíferos, gerando sistemas independentes de fluxo. Pequenos divisores de fluxo locais (**Figura 65**) ocorrem nas proximidades dos morros situados na porção sul da área.

Verifica-se que em todas as camadas do modelo o fluxo se direciona para os rios e canais. Tal fato indica que os corpos d'água superficiais influenciam não somente as porções mais rasas dos aquíferos, mas também porções profundas dos mesmos, através da atuação de um sistema de fluxo ascendente, principalmente para aqueles que representam as feições regionais de descarga, os rios Cubatão e Perequê.

As **Figuras 65 a 71** mostram a potenciometria e a indicação do sentido de fluxo das águas subterrâneas, respectivamente, da primeira a sétima camada do modelo.

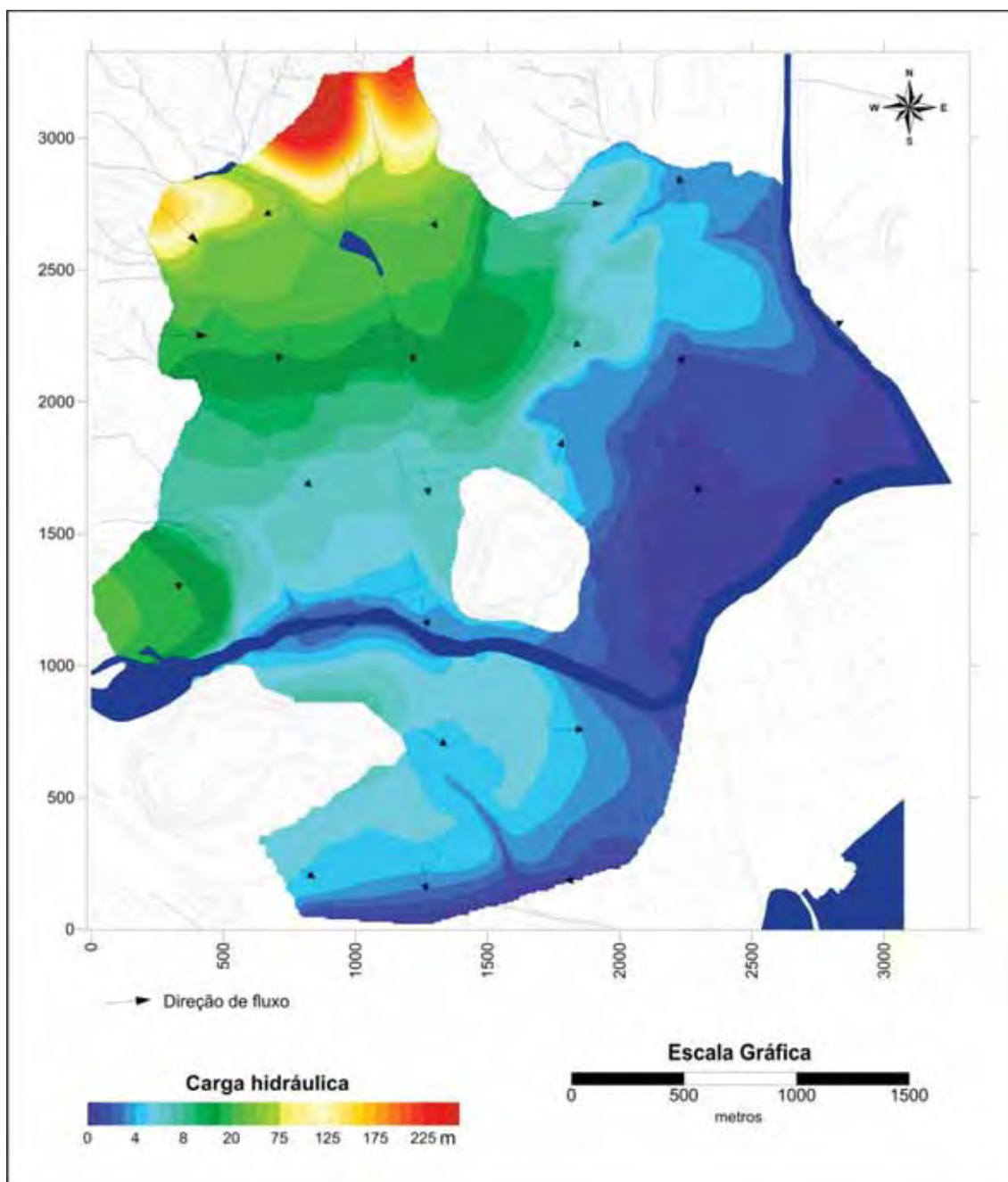


Figura 65. Mapa potenciométrico simulado - primeira camada.

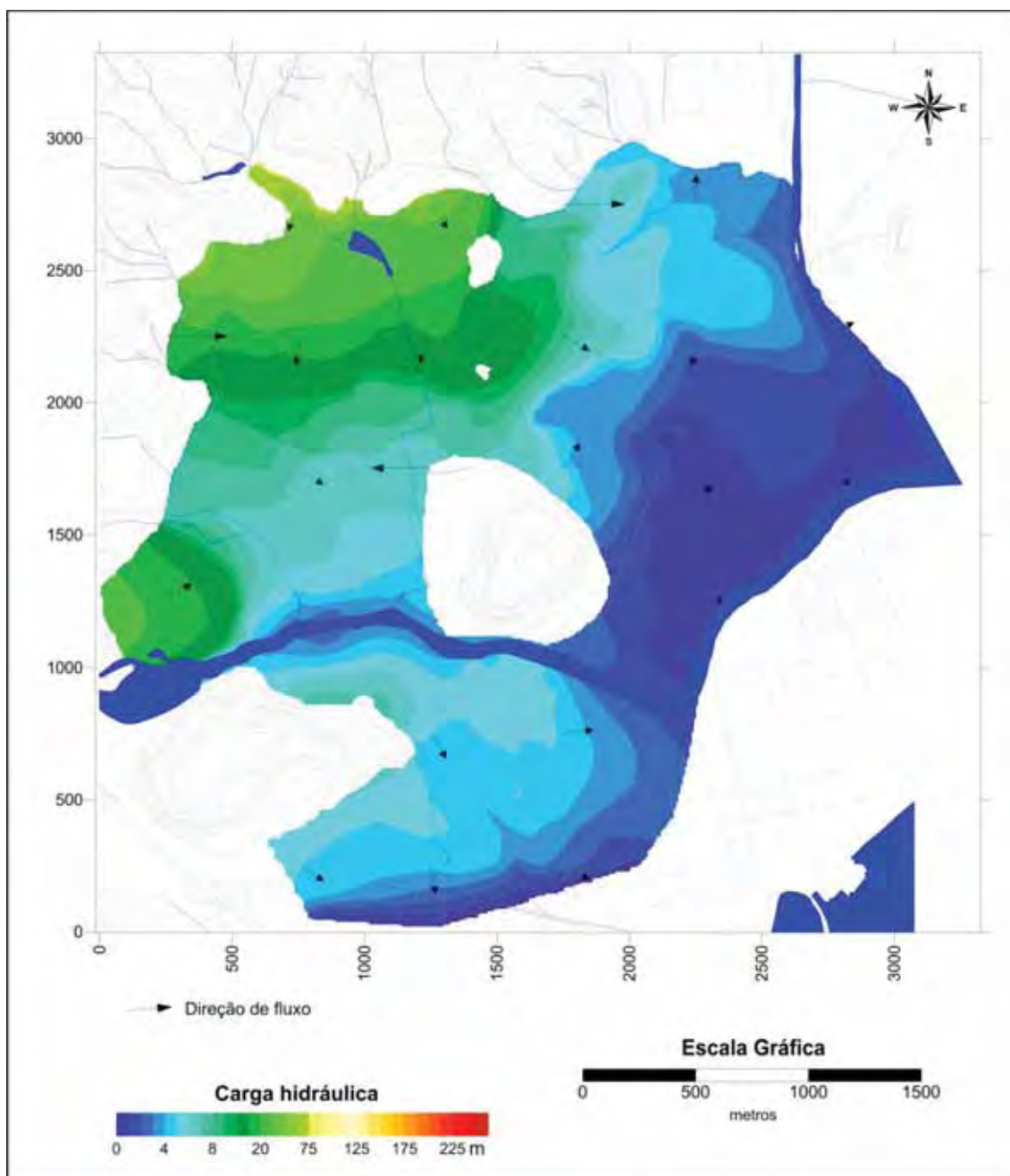


Figura 66. Mapa potenciométrico simulado - segunda camada.

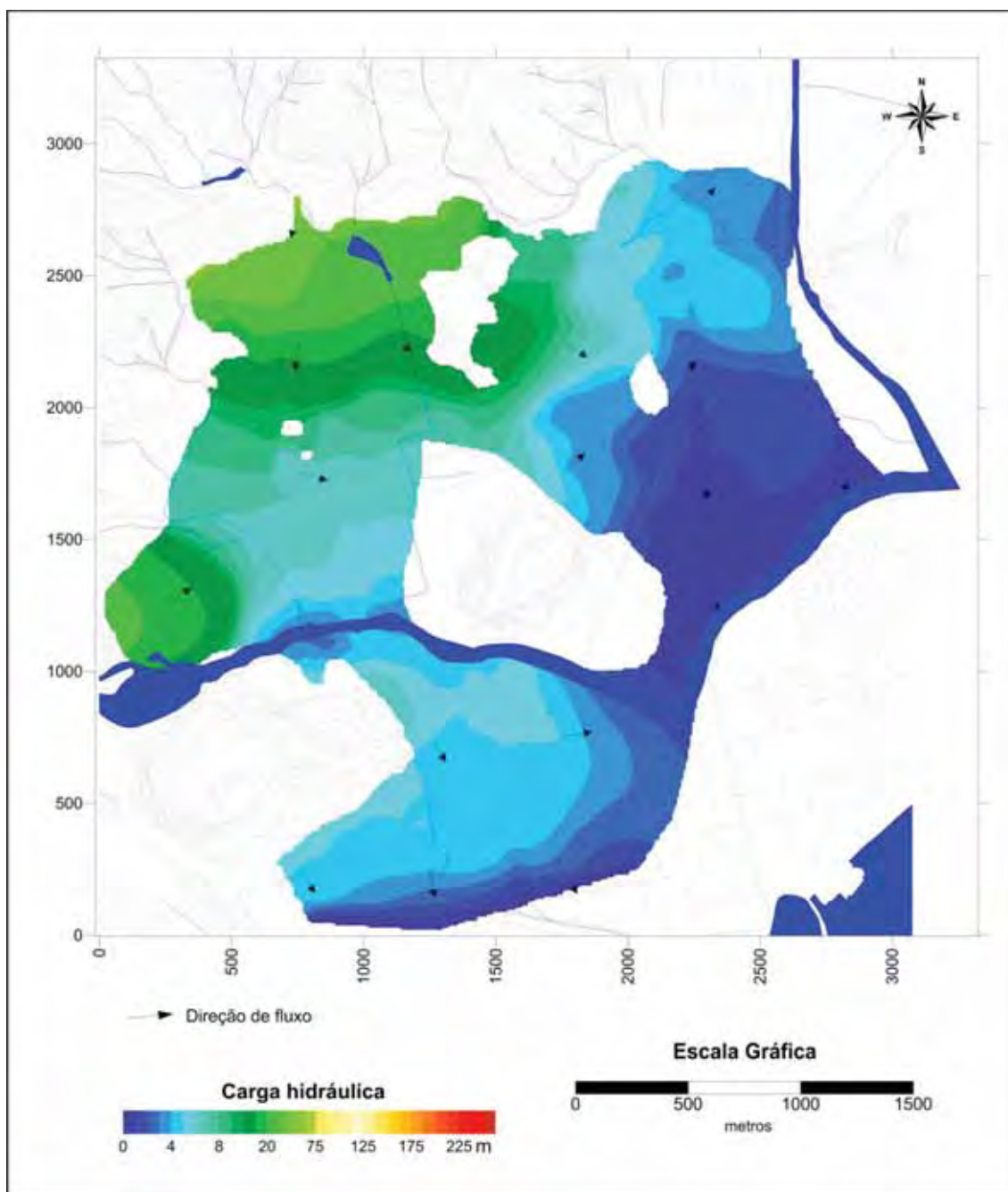


Figura 67. Mapa potenciométrico simulado - terceira camada.

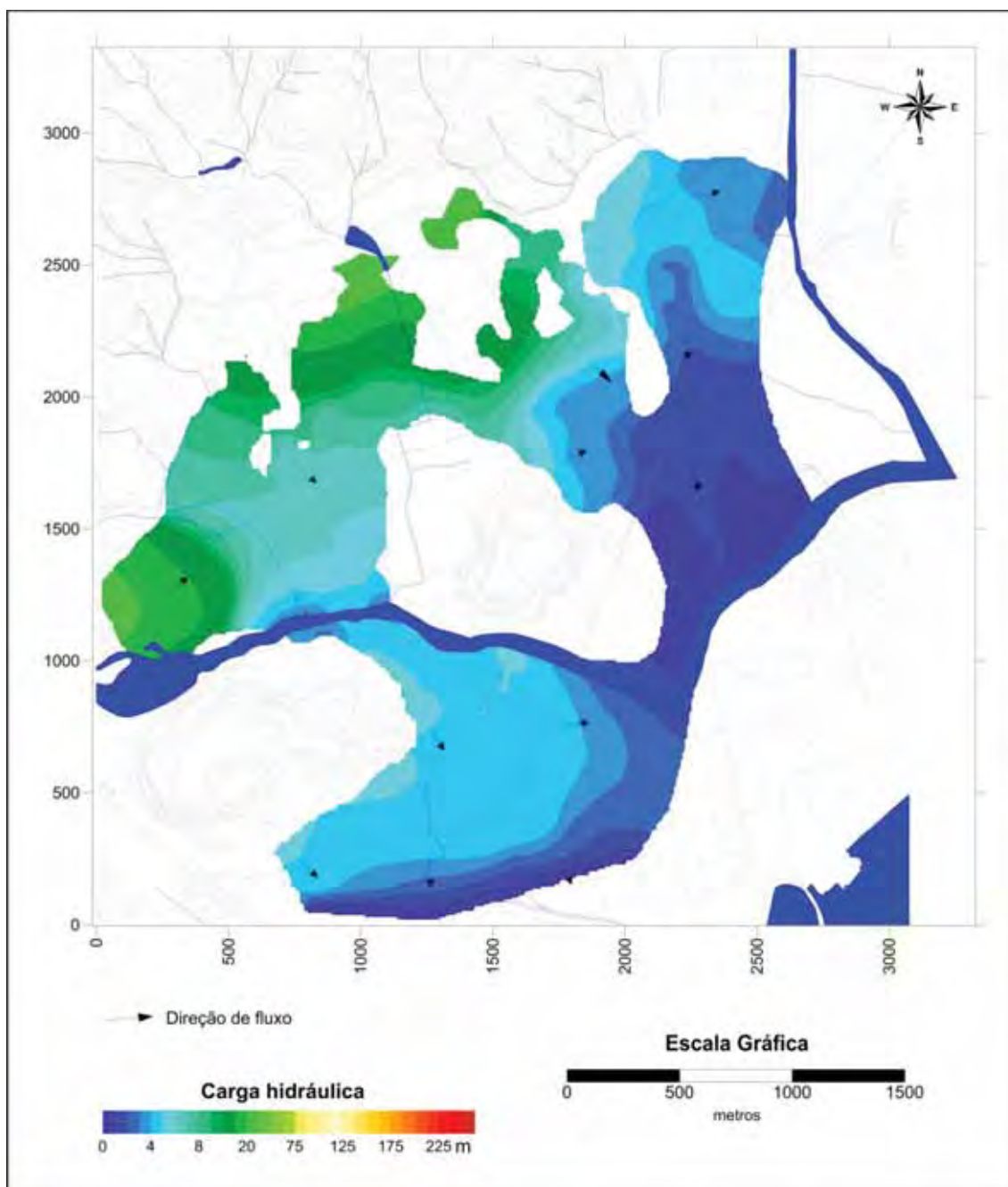


Figura 68. Mapa potenciométrico simulado - quarta camada.

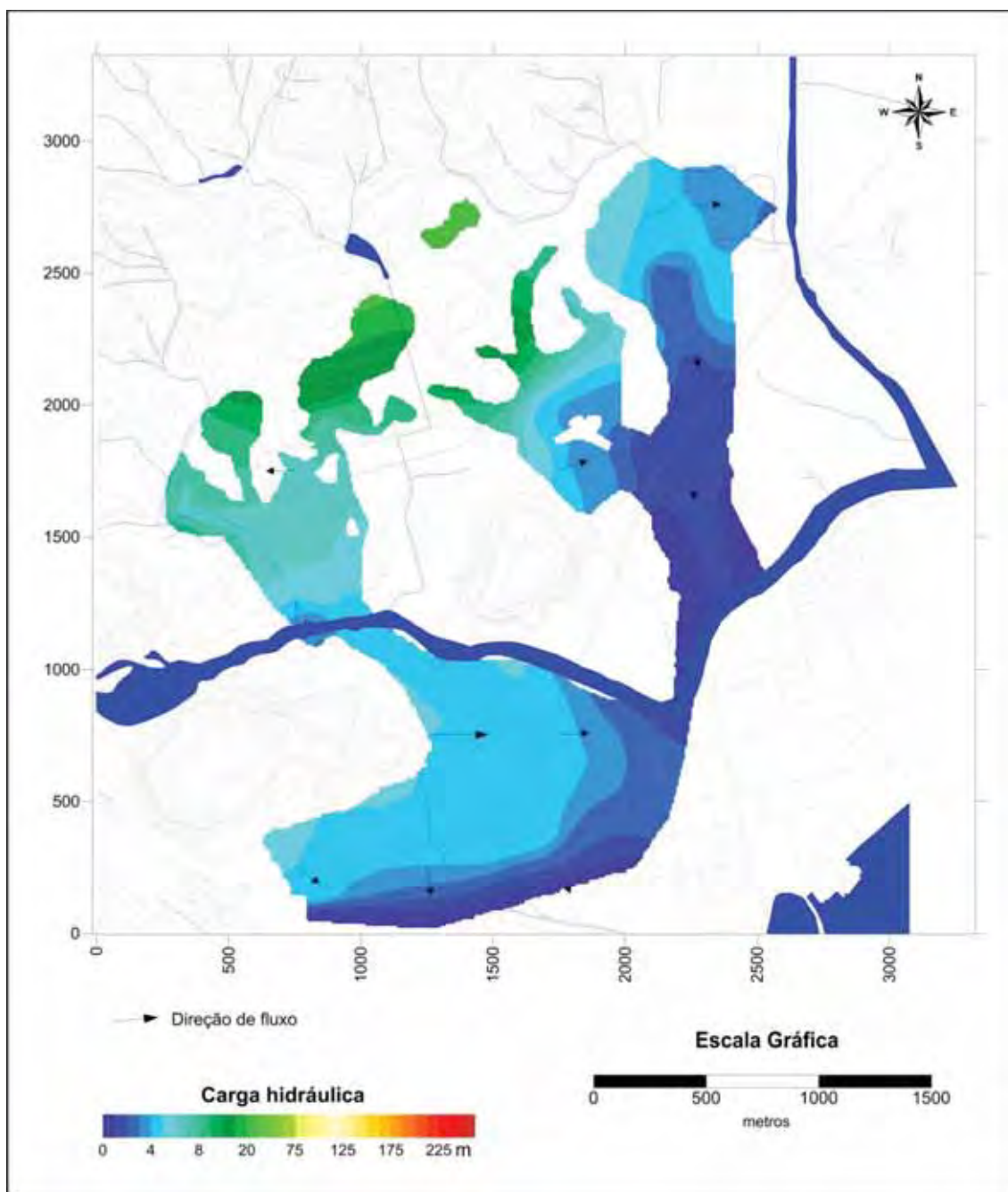


Figura 69. Mapa potenciométrico simulado - quinta camada.

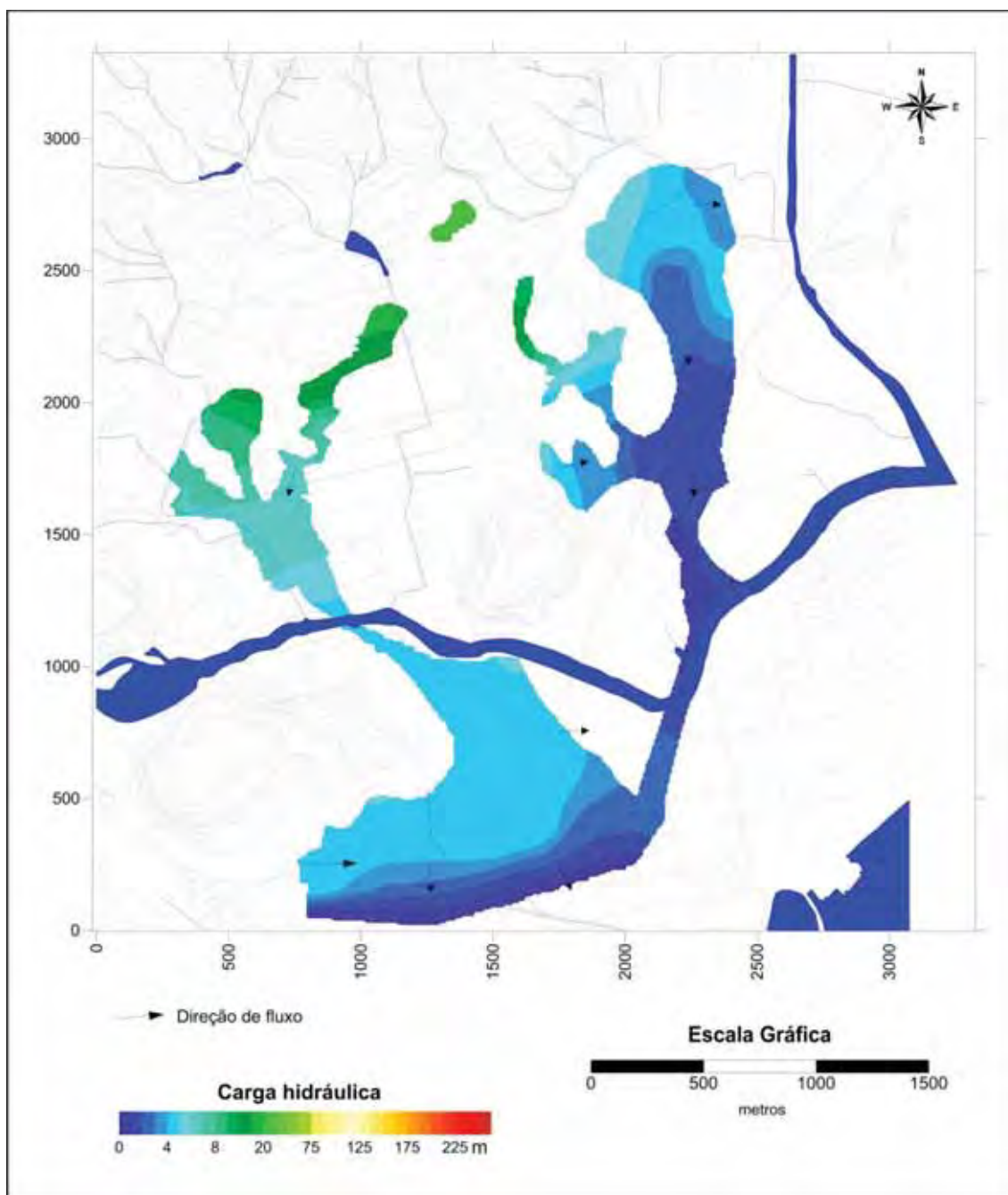


Figura 70. Mapa potenciométrico simulado - sexta camada.

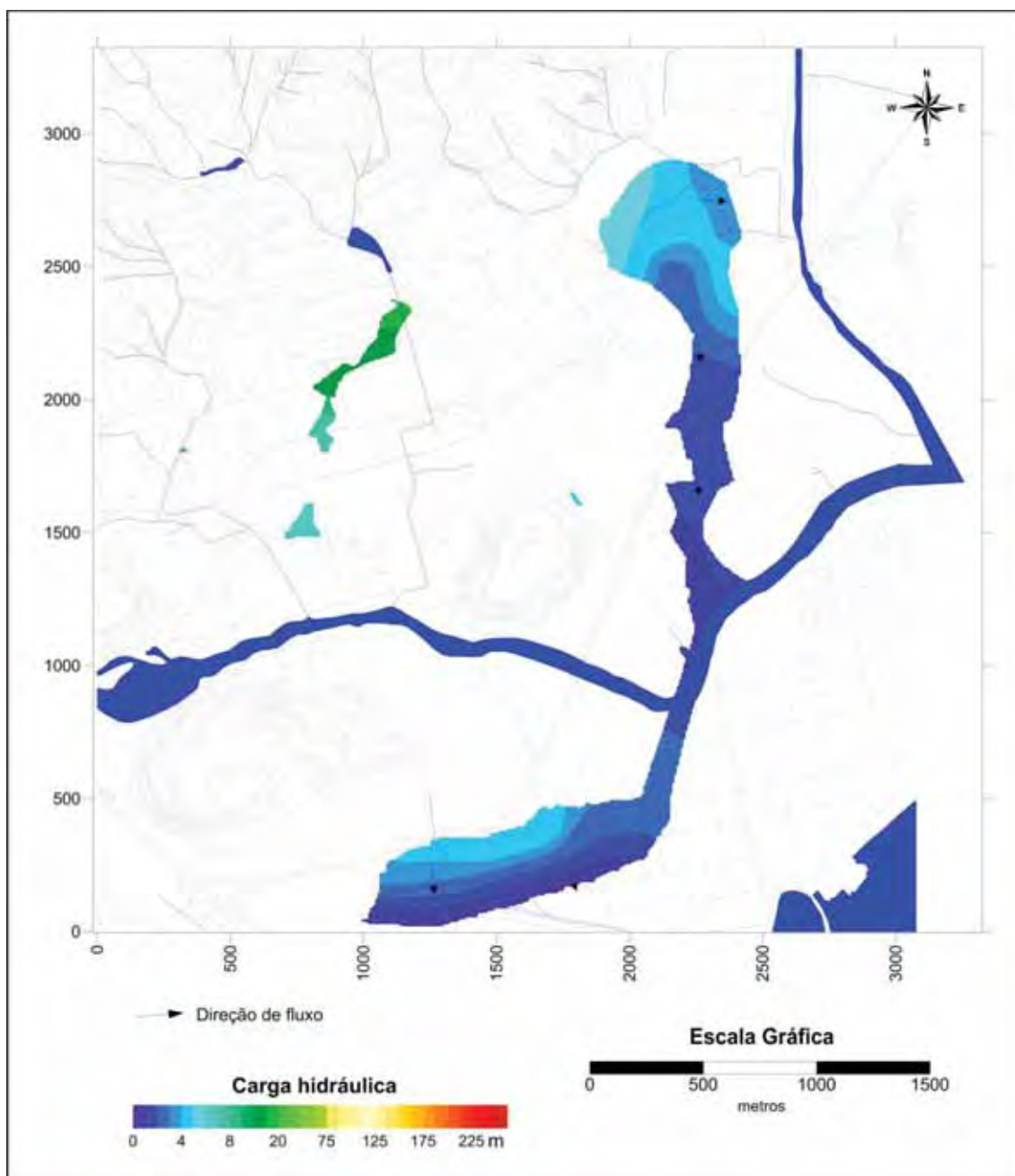


Figura 71. Mapa potenciométrico simulado - sétima camada.

4.4.3.8. *Distribuição final dos valores de condutividade hidráulica*

Ao fim da calibração do modelo, um dos objetivos das simulações foi obter a distribuição dos valores de condutividade hidráulica nas diferentes camadas que compõe a área de estudo.

É importante salientar que as alterações efetuadas nos valores de condutividade hidráulica para cada região, pela calibração do modelo, seguiram os intervalos de valores obtidos em campo pelos testes de *slug* disponíveis.

Os elevados valores de K, de $9,0 \times 10^{-1}$ cm/s, estão associados a regiões com predominância de areias na porção central da região simulada, nas proximidades do Rio Cubatão.

As **Figuras 72 a 78** mostram a distribuição das condutividades hidráulicas para cada camada considerada no modelo.

4.4.3.9. *Recarga*

A recarga é um parâmetro de extrema importância para o entendimento das características hidrogeológicas da área, pois, define não somente a quantidade de entrada de água no sistema, como influencia diretamente nas condições de fluxo.

Sendo assim, este parâmetro também foi alterado durante a calibração, o qual foi alterado do valor inicial constante, de 150,0 mm/ano, para a distribuição de valores apresentada na **Figura 79**, auxiliando na determinação da distribuição das condutividades hidráulicas e da potenciometria simulada.

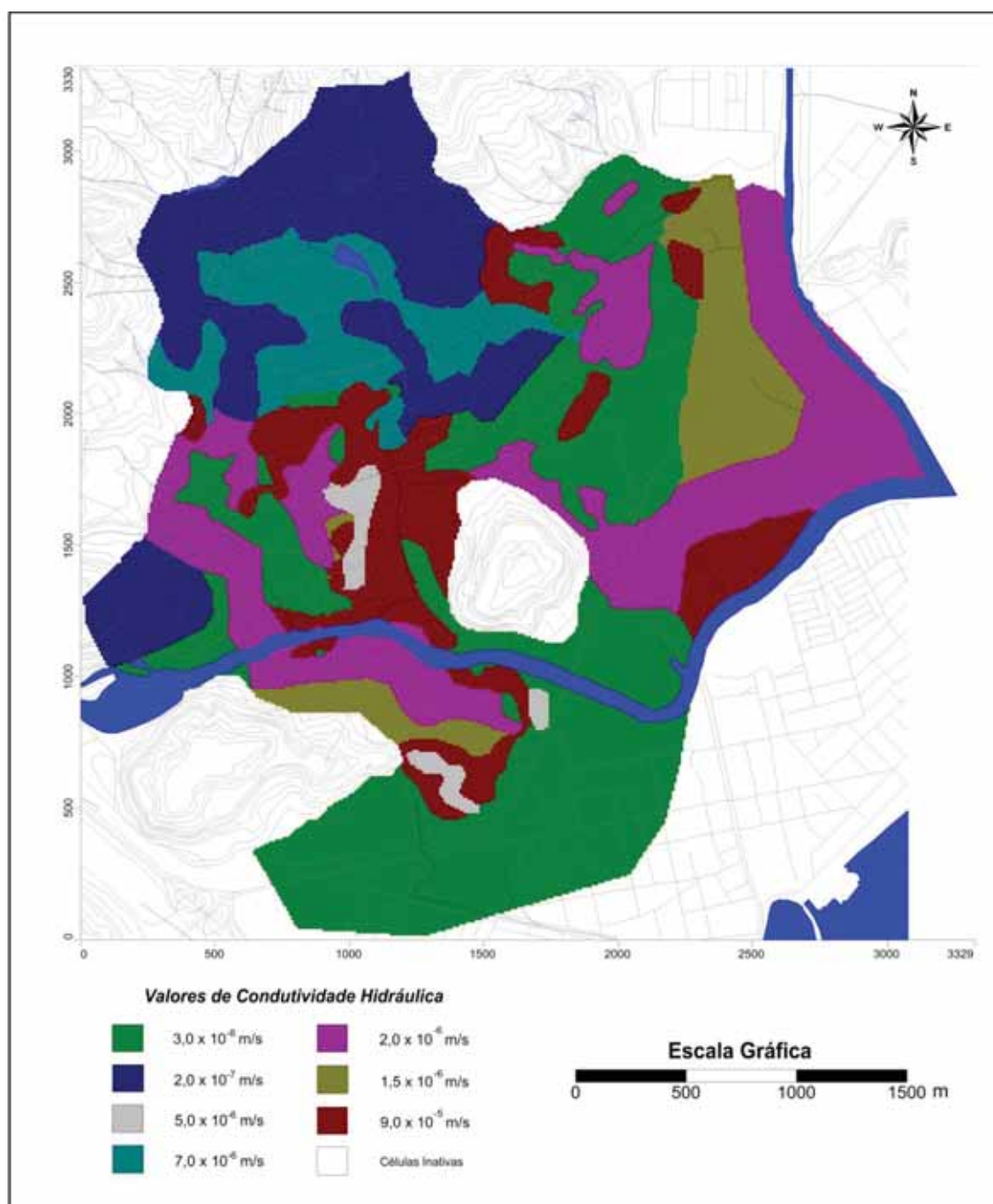


Figura 72. Distribuição da condutividade hidráulica na primeira camada.

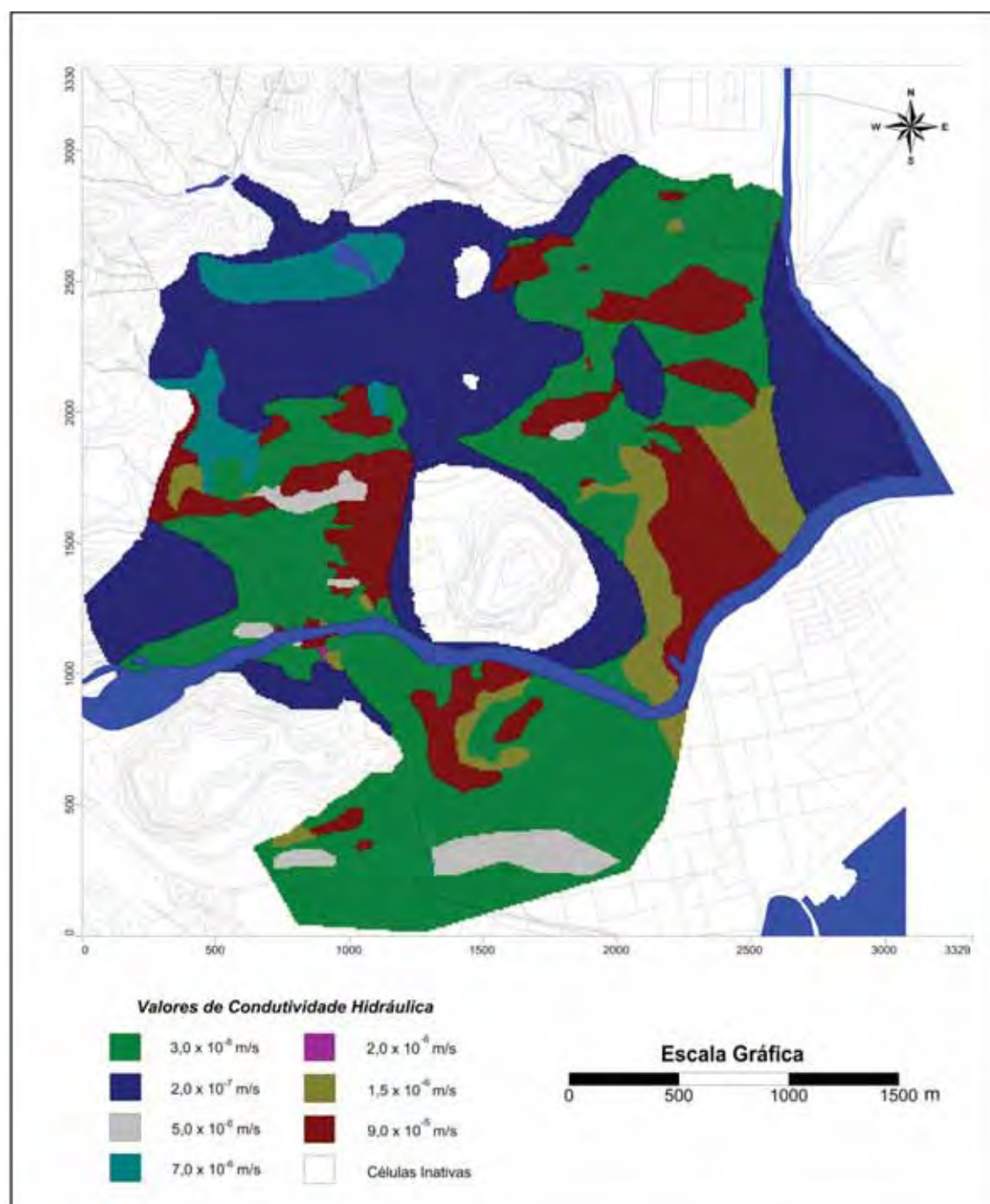


Figura 73. Distribuição da condutividade hidráulica na segunda camada.

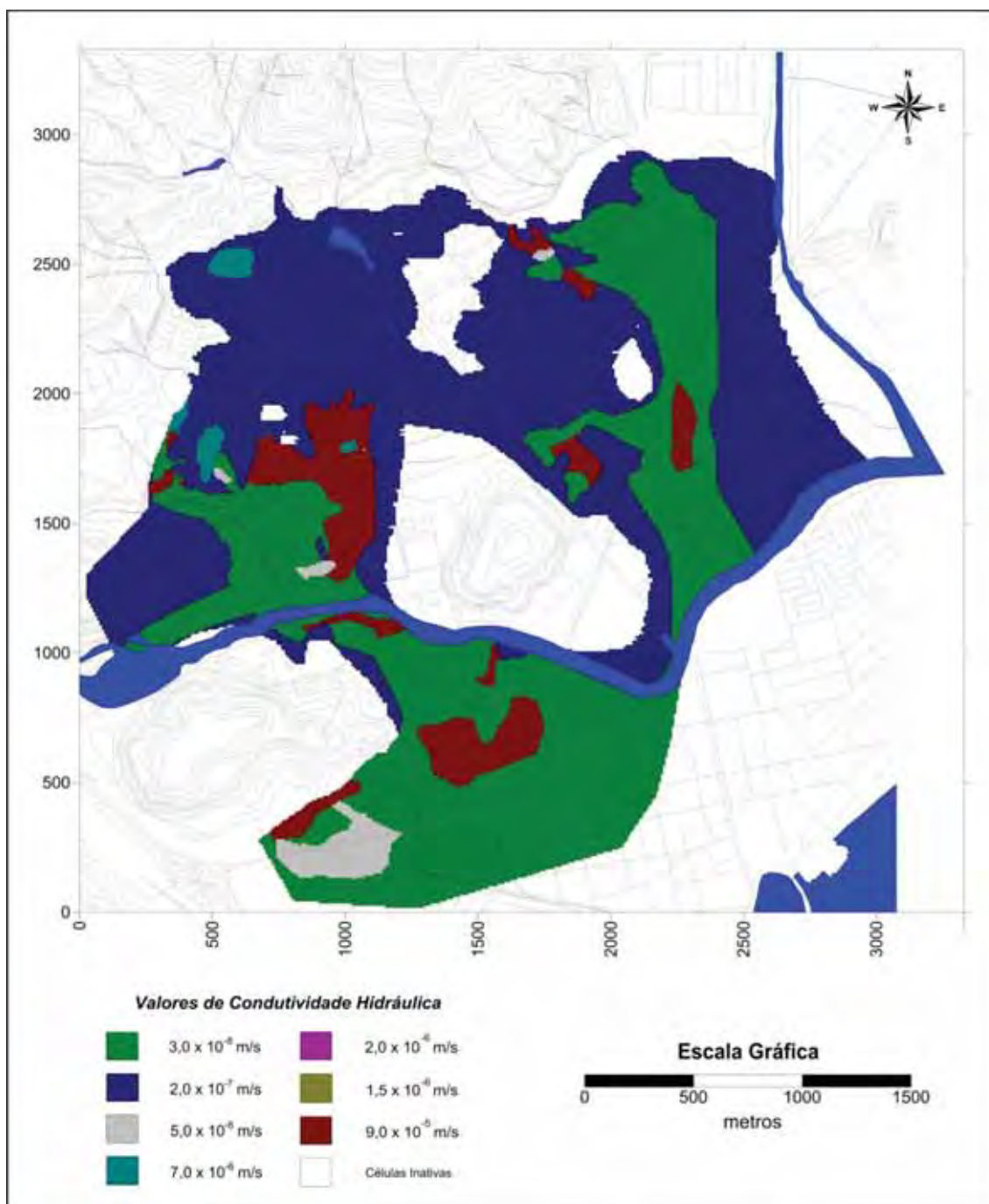


Figura 74. Distribuição da condutividade hidráulica na terceira camada.

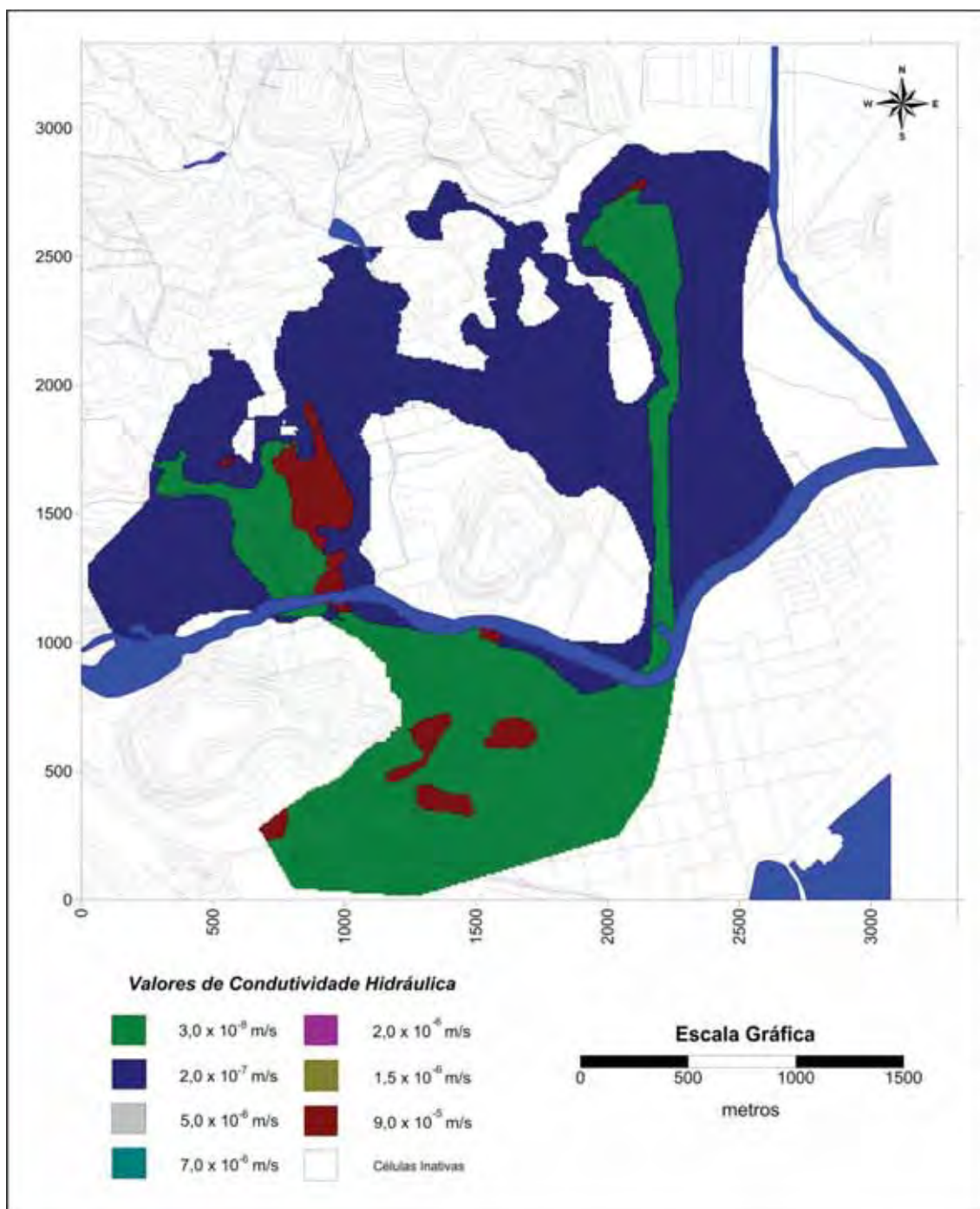


Figura 75. Distribuição da condutividade hidráulica na quarta camada.

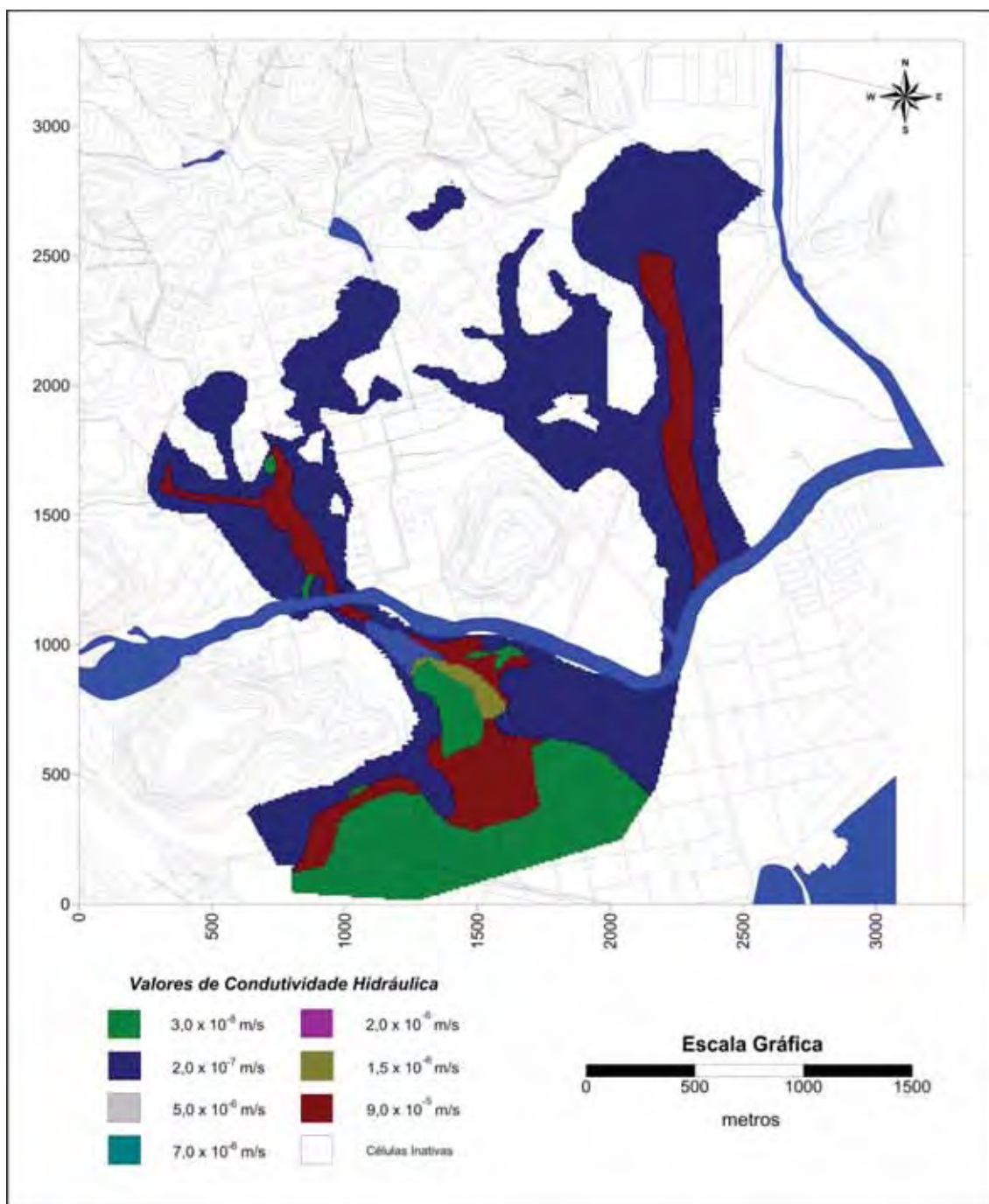


Figura 76. Distribuição da condutividade hidráulica na quinta camada.

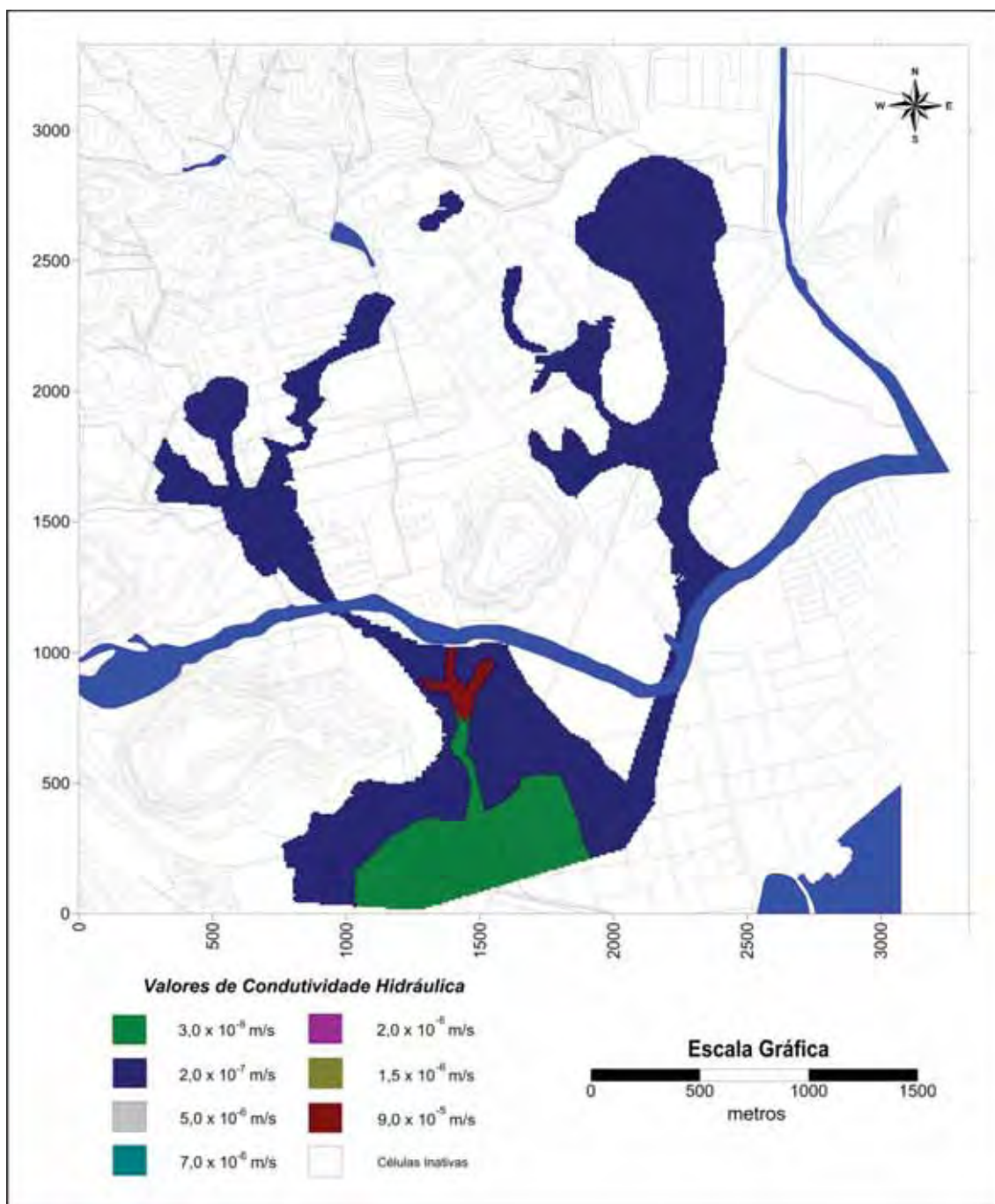


Figura 77. Distribuição da condutividade hidráulica na sexta camada.

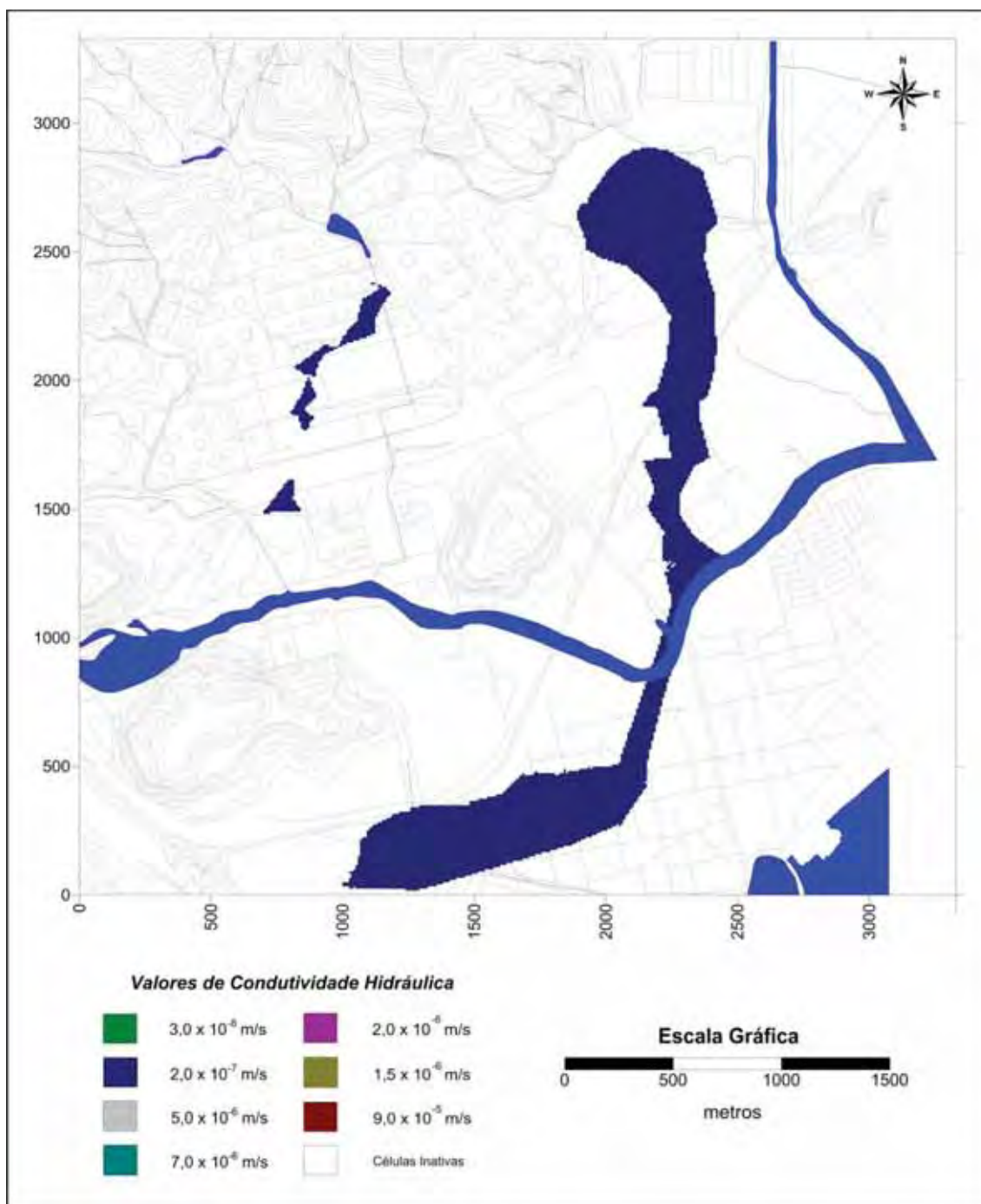


Figura 78. Distribuição da condutividade hidráulica na sétima camada.

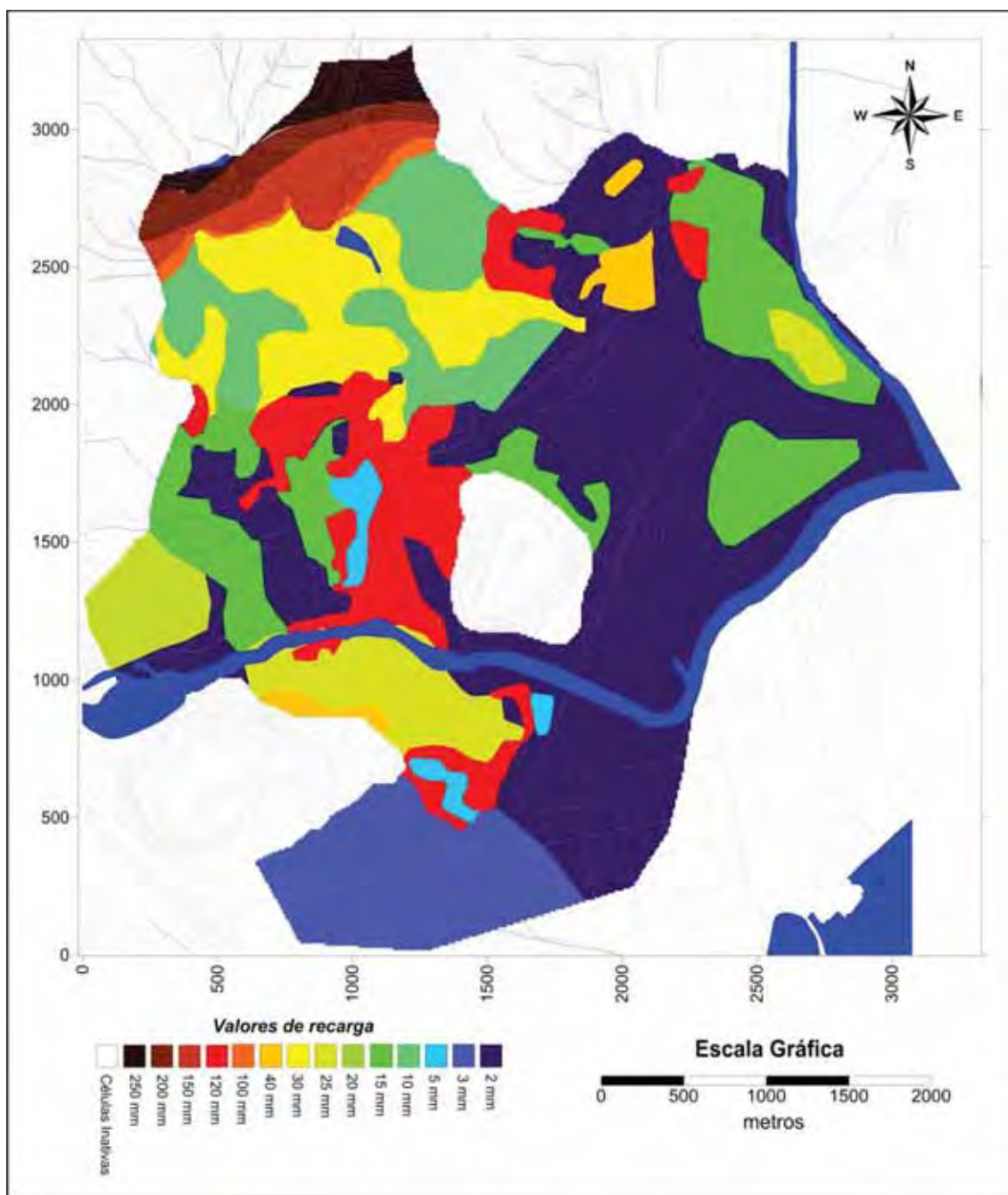


Figura 79. Distribuição dos valores de recarga após calibração.

Nesta figura se observa que os maiores valores de recarga estão situados nas encostas da Serra do Mar e nas áreas onde não há impermeabilização, praticamente da porção central da área até o Rio Cubatão. Os menores valores de recarga estão presentes em áreas próximas às feições de descarga (rios Perequê e Cubatão), para leste-sudeste da área. Os valores predominantes, entre 10,0 e 30,0 mm, estão situados nas áreas norte e central.

Os resultados obtidos com a caracterização hidrogeológica realizada na área de estudo atingiram os objetivos para a escala avaliada, pois define, regionalmente, as condições de fluxo da água subterrânea.

Para avaliações de previsão, o enfoque deve priorizar a segregação da área estudada, em pequenas regiões, respeitando-se as características hidrogeológicas e feições naturais importantes para determinação das condições locais de fluxo, mudando a observação da área para escala de detalhe, pois, para escalas menores de observação, estes locais específicos, segregados para estudos de previsão, praticamente apresentam “homogeneidade” do meio, tendo em vista a simplificação dos dados obtidos, para poder obter uma avaliação na escala em que a caracterização foi realizada.

Isto se deve ao complexo contexto geológico observado nesta área de estudo, o que seria negligenciável em uma área com características homogêneas.

Para avaliação preditiva de bombeamento das águas subterrâneas para remediação de eventual contaminação presente em um determinado local da área de estudo, deve-se atentar para a distribuição específica das propriedades hidráulicas no mesmo, devendo-se enfocar avaliações em nível detalhado, tendo em vista a possibilidade de aumentar a representação da geologia em escalas maiores de trabalho.

Para esta avaliação preditiva, neste trabalho, visando a redução de incertezas, associadas ao conhecimento da distribuição das unidades hidrofaciológicas, em um local específico da área de estudo, foram realizadas simulações numéricas de fluxo da água subterrânea, considerando a necessidade de determinação da zona de captura do bombeamento supracitado, com base na distribuição das unidades hidrofaciológicas definidas por simulações estocásticas.

5. AVALIAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO DA ZONA DE CAPTURA DE UM POÇO DE BOMBEAMENTO

Tendo em vista o conhecimento adquirido pela caracterização hidrogeológica regional, efetuada por meio do método determinístico, a qual permitiu o reconhecimento geral das propriedades que regem o fluxo da água subterrânea, observou-se que, para a obtenção de previsão das dimensões e formatos da zona de captura de um poço em bombeamento, em um local específico, situado a sul da área estudada, os resultados obtidos pela caracterização regional proporcionariam previsões com incertezas associadas à distribuição específica das propriedades hidráulicas do aquífero neste local, tendo em vista o grau de detalhamento necessário para conhecimento desta distribuição, gerando uma única configuração para a zona de captura do poço, que pode não representar a realidade deste local.

Sendo assim, mesmo de posse de informações detalhadas, a distribuição das propriedades do meio, condicionadas diretamente pelos processos geológicos que formaram as unidades hidrofaciológicas, com origem associada a ambientes sedimentares diversos, contando com depósitos aluvionares, com ocorrência de sedimentos de canal e de várzeas, interdigitados a depósitos de corridas de massa, verifica-se que, dificilmente, os modelos determinísticos poderiam representar, adequadamente, a distribuição exata destas unidades, tendo diversas possibilidades de arranjo espacial das mesmas no local, com base nos mesmos dados disponíveis.

Para estes tipos de ambientes deposicionais, de acordo com Sharp *et al* (2003), as fácies sedimentares refletem seu ambiente deposicional original. Também, definem as tendências, dimensões, conectividades e as heterogeneidades internas das zonas transmissivas em aquíferos clásticos. Neste contexto, heterogeneidade está associada à variabilidade espacial na permeabilidade, causada pelas variações texturais nos sedimentos aluvionares e pelo fraturamento de unidades de baixa permeabilidade.

Segundo estes autores, existem três estilos de heterogeneidade – camada de bolo (*layer cake*), zigue-zague (*jigsaw puzzle*) e labirinto (*labyrinth*), conforme mostrado na **Figura 80**, os quais refletem um aumento no grau de complexidade da geologia local. Estes estilos são determinados pela origem deposicional do aquífero.

As heterogeneidades macroscópicas, que ocorrem na escala deposicional de fácies, definidas por estes autores, incluem:

- compartimentalização das litologias em função de barreiras de fluxo entre as fácies e extensas unidades permeáveis;
- gradientes de permeabilidade vertical e lateral originados pelos padrões de tamanho e seleção dos grãos;
- estratificação de sedimentos finos de baixa permeabilidade, os quais podem desorientar o fluxo, sendo, então, criada a anisotropia.

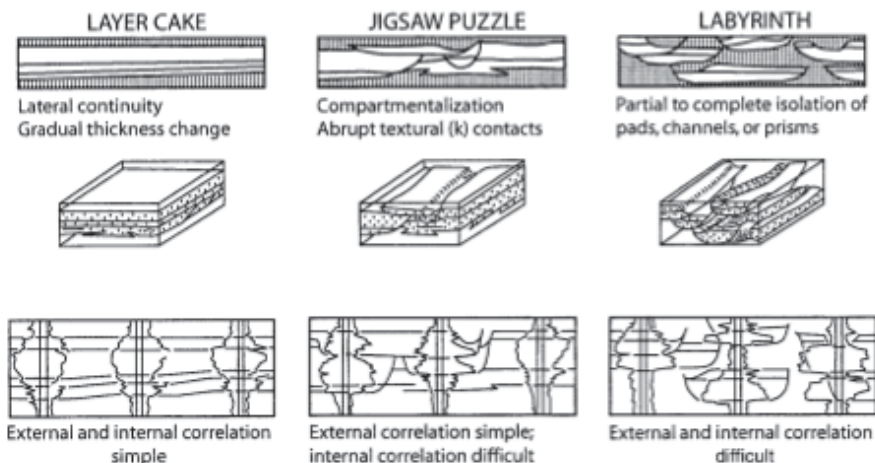


Figura 80. Estilos de heterogeneidades em ambientes sedimentares aluvionares

Fonte: Sharp *et al* (2003)

Para estes autores, todas as escalas de estruturas heterogêneas podem ser descritas, quantificadas, interpoladas e, por vezes, previstas conforme o arcabouço de seu sistema deposicional e pode ser, subsequentemente, modificado pela diagênese e pelo fraturamento. O arcabouço do sistema deposicional e suas modificações refletem diretamente nos valores de condutividade hidráulica das unidades que a compõem.

Desta maneira, neste item são apresentadas simulações de fluxo da água subterrânea, para avaliação do formato e dimensões da zona de captura de um poço em bombeamento no local selecionado, sendo que a distribuição das propriedades hidráulicas baseou-se em simulações estocásticas para definição dos possíveis arranjos espaciais das unidades hidrofaciológicas neste local e, conseqüentemente, da distribuição espacial da condutividade hidráulica para cada arranjo litológico obtido.

Salienta-se que para a realização das simulações estocásticas foi utilizado o código computacional T-PROGS (CARLE, 1999), desenvolvidos para a realização de simulação estocástica condicionada por eventos sedimentares, que são bem representados pelo método das Cadeias de Markov, utilizados como base para o desenvolvimento deste aplicativo.

5.1. Cadeias de Markov e a hidrogeologia

A utilização dos modelos estocásticos baseados em Cadeias de Markov para solução de problemas hidrogeológicos vêm sendo crescente na última década, onde diversos autores apresentaram publicações referentes a esta metodologia, principalmente para sistemas aquíferos aluvionares.

Em Cai *et al* (1996), a contaminação da água subterrânea foi investigada pela analogia do processo difusivo de Markov na teoria da probabilidade, com ênfase para:

- A quantidade de contaminantes entrando na zona de proteção;
- Propriedades estatísticas e distribuição da probabilidade do tempo aleatório para uma partícula traçadora para alcançar a zona de proteção;
- O tempo de chegada da contaminação na zona de proteção.

No livro de Elfeki *et al* (1997), o tema de incertezas associadas à heterogeneidade é amplamente discutido, com ênfase para os métodos estocásticos na determinação das propriedades do meio físico, sendo que a utilização de Cadeias de Markov, em problemas de contaminação de águas subterrâneas, é citado em todo livro, mas abordado nos capítulos 3 e 4.

No artigo de Rijud *et al* (2000), foi utilizada a abordagem de probabilidade de transição por cadeias de Markov, para representação estocástica de sedimentos de canal com alta permeabilidade, em uma sequência aluvionar. O modelo foi considerado como apropriado para o gerenciamento de riscos de forma conservadora, para os tempos de chegada de soluções salinas, onde apenas foi considerado o transporte pelos depósitos de canais, enquanto que os processos de difusão e transporte em unidades menos permeáveis foi negligenciado.

De acordo com Lu *et al.* (2000), foi desenvolvido o método conjugado de Cadeias de Markov e Monte Carlo (MCMC – Markov Chain Monte Carlo) conjugados para estimar o campo de condutividades hidráulicas, condicionado por medições diretas deste parâmetro a medidas indiretas de variáveis dependentes como carga hidráulica na zona saturada em um meio poroso aleatoriamente heterogêneo.

Segundo Weissmann (2005), a heterogeneidade das propriedades hidráulicas, em diversas escalas de observação, em um aquífero aluvionar, é consideravelmente controlada pela distribuição das fácies sedimentares associadas a este ambiente. Para tanto, os autores utilizaram modelos estratigráficos e sedimentológicos quantificáveis para incorporar esta variabilidade espacial das propriedades hidráulicas em simulações de fluxo da água subterrânea e de transporte e migração de contaminantes.

A abordagem utilizada por Weissmann (2005) utiliza-se dos conceitos de estratigrafia de sequências, desenvolvida para ambiente sedimentar de delta aluvionar continental para:

- o delinear as unidades estratigráficas, em escala regional, do aquífero aluvionar;
- o prever os padrões gerais de fácies do aquífero e;
- o subsidiar o desenvolvimento de modelos de cadeias de Markov para a geoestatística de probabilidade de transição.

Os resultados das simulações geoestatísticas foram utilizados por Weissmann (2005) para simulações do fluxo da água subterrânea, com o objetivo de definição da distribuição das idades da água subterrânea, avaliar estratégias de remediação e modelar a configuração de testes de aquífero, em um contexto heterogêneo.

As cadeias de Markov foram desenvolvidas, com base nesta abordagem, especificamente para cada tipo de depósito encontrado na área de estudo, seguindo as etapas abaixo para desenvolver e aplicar cadeias de Markov na definição da variabilidade espacial (Weissmann & Fogg, 1999):

- os dados de sondagens e perfilagem geofísica de poços foram distinguidos em hidrofácies distintas;
- Foi medida a probabilidade de transição vertical dos dados em cada unidade estratigráfica ou tipo de depósito, com o ajuste visual das curvas do modelo de Markov para estes resultados das medidas de probabilidade de transição;
- Foi estimado modelo lateral de cadeias de Markov para cada depósito, baseado em:

- o Comprimento médio estimado de fácies do mapeamento geológico, pesquisas geofísicas, modelos conceituais e analogia com observação de afloramento;
- o Estimadas as probabilidades de transição para as tendências de justaposição de fácies, aplicando-se a Lei de Walther, mapeamento geológico, modelos conceituais e analogia com observação de afloramentos;
- Foi simulada cada sequência, separadamente, usando dados condicionais de cada sequência, e combinadas todas as sequências individuais em uma realização final.

Com esta abordagem, os autores indicaram vantagens em relação à definição da distribuição espacial litológica sem utilizar análise estratigráfica, sendo estas:

- Os limites das sequências são marcadas por desconformidades, onde a fácies que existe de um lado da desconformidade não é correlata a fácies presente do outro lado da mesma, sendo que a correlação através da desconformidade foi realizada utilizando-se da abordagem proposta neste artigo;
- As simulações geoestatísticas assumem estacionariedade, ou seja, homogeneidade estatística por toda a região modelada, onde a frequência de ocorrência de uma determinada litologia ou sequência litológica é respeitada para as simulações estocásticas.

Desta maneira, o autor ressalta que, por meio desta abordagem, os geólogos puderam quantificar as interpretações geológicas conceituais e formular realizações da heterogeneidade subsuperficial que, razoavelmente, reflete as características complexas da estratigrafia de aquíferos aluvionares.

Lee *et al* (2007) realizaram a comparação de dois tipos de modelos geoestatísticos para a representação de heterogeneidades geológicas e seus efeitos na resposta hidráulica da simulação de um poço em bombeamento.

Um dos modelos geoestatísticos utilizados foi o modelo baseado em cadeias de Markov, calculando-se as probabilidades de transição, preconizado por Carle & Fogg (1997), desenvolvedores do aplicativo T-PROGS e o outro foi o método de Simulação Gaussiana Sequencial (SGS).

Os referidos autores objetivaram demonstrar as diferenças obtidas para cada método geoestatístico, onde os campos de condutividade hidráulica desenvolvidos por estes métodos foram transferidos para um modelo de fluxo da água subterrânea para simular o poço em bombeamento.

Os resultados desta pesquisa mostraram que as simulações geoestatísticas baseadas em cadeias de Markov geraram corpos, de maior condutividade hidráulica, mais conectados, representativos de corpos arenosos depositados por canais fluviais, o que não foi reproduzido pelo outro método.

Assim, a simulação de fluxo da água subterrânea, com um poço em bombeamento, mostraram distintas zonas de captura para o poço, quando comparados os campos de condutividade hidráulica obtidos por ambas as simulações. Desta forma, os autores concluíram que os resultados mostram que as características geológicas são importantes e podem não ser capturadas por alguns modelos de covariância espacial.

Hassan *et al* (2009) utilizaram uma plataforma de trabalho por estatística Bayesiana para solução inversa e desenvolvimento da distribuição espacial dos parâmetros de um modelo de fluxo da água subterrânea na interface de água doce-água salina em uma zona costeira.

A plataforma Bayesiana utilizada foi implementada usando-se o método de amostragem de cadeias de Markov conjugado a Monte Carlo (MCMC).

Os dados utilizados pelos autores foram informações hidroquímicas, medidas magnetotélúricas e potenciometria, sendo que os dois primeiros condicionaram a primeira simulação da distribuição espacial das propriedades do meio e as cargas hidráulicas foram usadas em segundo lugar como condição a esta definição, obtendo-se uma redução significativa das incertezas na distribuição dos parâmetros do meio físico.

5.2. T-PROGS

O aplicativo T-PROGS é usado para a realização de simulações geoestatísticas pela abordagem da probabilidade de transição, utilizando dados litológicos de sondagens realizadas na área em que se deseja avaliar a distribuição das unidades litológicas, para modelar a variabilidade espacial por meio de Cadeias de Markov e equações de co-krigagem indicativa, formulando a função objetivo para simulação por arrefecimento (*annealing simulation*).

Segundo Carle (1997), a implementação da simulação geoestatística envolve três passos principais:

- cálculo dos índices de probabilidade de transição;
- modelagem da variabilidade espacial por meio das Cadeias de Markov (CARLE & FOGG, 1997) e;
- simulação estocástica condicional (CARLE & FOGG, *op.cit*).

As vantagens da utilização da probabilidade de transição em relação aos métodos tradicionais de krigagem indicativa são:

- considera tendências assimétricas de justa-posição, como por exemplo, sequências sedimentares granodecrescentes ascendentes;
- a plataforma conceitual de trabalho incorpora interpretações geológicas no desenvolvimento da correlação cruzada da variabilidade espacial;

- o ajuste da curva do modelo variográfico indicativo cruzado não é exclusivamente empírico, sendo adequado para avaliação de dados geológicos, pois, o desenvolvimento de modelos espaciais baseados em dados geológicos, geralmente, somente é adequado na direção vertical, utilizando-se, então, modelo matemático simples e compacto, baseado nas Cadeias de Markov.

A utilização das cadeias de Markov neste tipo de estudo é permitido pela correlação dos atributos fundamentais observáveis, referentes a comprimentos médios, proporção de litologias, anisotropia e justa-posição, com os parâmetros do modelo matemático das cadeias de Markov.

Este aplicativo tem como saída um conjunto de n conjuntos litológicos em uma malha tridimensional (**Figura 81**), sendo que cada conjunto litológico n está condicionado pelos dados das sondagens, e a proporção e a transição das litologias entre as sondagens segue a tendência observada nas descrições litológicas destas sondagens.

Esta metodologia auxilia na interpretação geológica, bem como aprimora as correlações espaciais cruzadas no desenvolvimento dos modelos geoestatísticos (CARLE, 1997).

Para o cálculo dos índices de probabilidade de transição (t_{jk}) é utilizada a equação a seguir. Conforme **Figura 82**, dada uma determinada propriedade ou valor de j , ocorrente em x , é determinada a probabilidade (Pr) de um valor ou propriedade k ou mesmo a propriedade j , ocorrer na posição $x+h$.

$$t_{jk}(h) = Pr\{k \text{ ocorrer em } x+h | j \text{ ocorrer em } x\}$$

A expressão da probabilidade pode ser apresentada como segue.

$$Pr\{B'|A\} = \frac{Pr\{AeB'\}}{Pr\{A\}}$$

onde A representa $\{j, \text{ ocorre em } x\}$ e B' representa $\{k \text{ que ocorre em } x+h\}$.



Figura 81. Distribuição tridimensional de materiais litológicos, simulados pelo T-PROGS.

Fonte: http://www.ems-i.com/gmshelp/Interpolation/T-PROGS/T-PROGS_Interface.htm

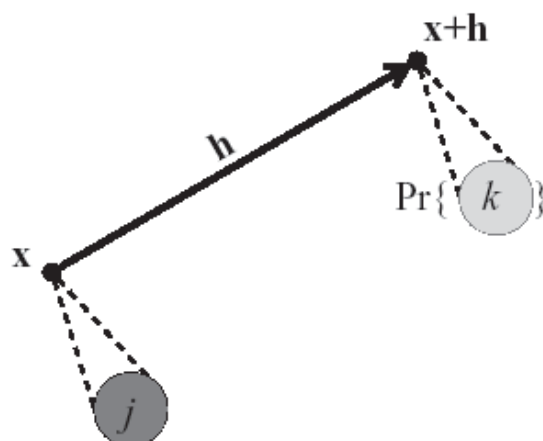


Figura 82. Representação gráfica da transição de probabilidade entre j e k .

Fonte: Carle (1997)

A simulação condicional tem como objetivo analisar a variabilidade espacial das propriedades hidráulicas gerando diversas realizações, as quais serão utilizadas para simulação numérica do fluxo da água subterrânea, identificando-se quais das realizações melhor se adequem às observações de campo e que apresentem os menores erros associados.

O objetivo de avaliar modelos estratigráficos e simulações estocásticas em conjunto é de obter-se um modelo hidrogeológico preciso, que possa representar melhor as condições reais observadas em campo.

Os dados das sondagens são introduzidos no aplicativo, indicando-se a posição tridimensional do material litológico presente, e a sua identificação por meio de números. Um utilitário associado ao T-PROGS, GAMEAS, calcula um conjunto de curvas de probabilidade de transição dos materiais litológicos presentes, em função de uma distância do passo (*lag*) para cada categoria em um determinado intervalo de amostragem, sendo que cada curva apresentada representa a probabilidade de transição do material *j* para o material *k*, conforme exemplo mostrado na **Figura 83**.

As curvas na diagonal representam as probabilidades de auto-transição e as demais curvas representam as probabilidades de transição cruzada.

O próximo passo nesta análise é o de desenvolvimento do modelo pela Cadeia de Markov para a direção vertical que se ajusta aos dados da probabilidade de transição vertical observados. As curvas das cadeias de Markov são mostradas pelas linhas sólidas na **Figura 81**. Matematicamente, o modelo por cadeias de Markov, quando aplicados a dados categóricos unidimensionais na direção ϕ , assumem a forma de matriz exponencial, conforme mostrado a seguir.

$$\tau(h_{\phi}) = \exp(R_{\phi} h_{\phi})$$

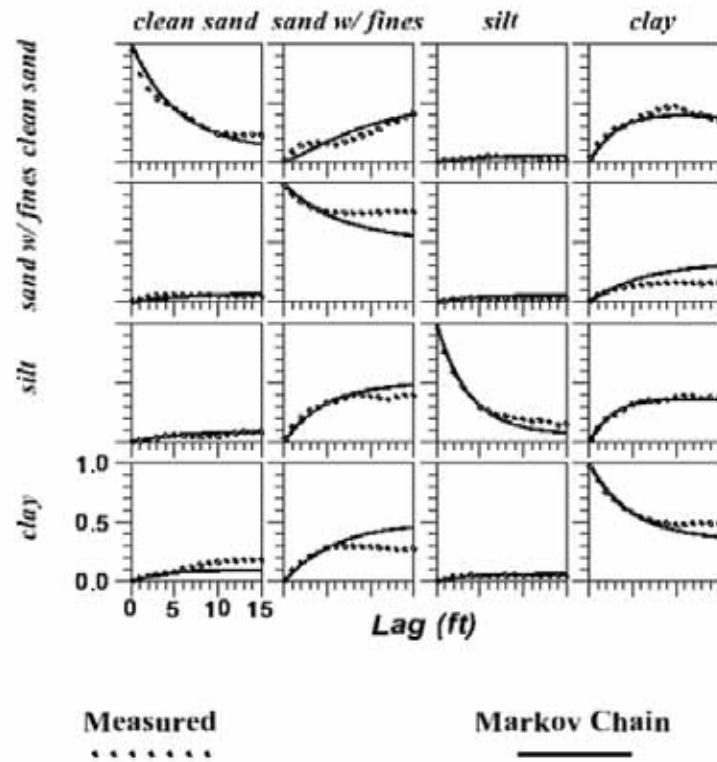


Figura 83. Conjunto de curvas de probabilidade de transição.

Fonte: http://www.ems-i.com/gmshelp/Interpolation/T-PROGS/T-PROGS_Interface.htm

Onde h denota um passo (lag) na direção ϕ , e R_ϕ denota a matriz de valores de transição:

$$R_\phi = \begin{bmatrix} I_{11,\phi} & L & r_{1k,\phi} \\ M & O & M \\ I_{k1,\phi} & L & r_{kk,\phi} \end{bmatrix}$$

com as entradas $r_{jk,\phi}$ representando a taxa de mudança da categoria j para a categoria k (condicionada pela presença de j), por unidade de comprimento na direção ϕ .

As taxas de transição são ajustadas para garantir a melhor correlação entre o modelo por cadeias de Markov e os dados de probabilidade de transição observados.

Uma vez que foi desenvolvido o modelo por cadeias de Markov para a direção z, a partir dos dados das sondagens, um modelo de variabilidade espacial deve ser desenvolvido para as direções x e y, salientando que os dados de sondagens são tipicamente insuficientemente densos nestas direções.

Entretanto, o modelo por cadeias de Markov pode ser desenvolvido nestas direções assumindo-se que as tendências de justaposição e as proporções observadas na direção vertical também são verdadeiras nas direções horizontais, x e y, sendo necessário o estabelecimento de estimativas da razão do comprimento médio nas direções x e y relativos à direção vertical, z, permitindo-se o cálculo das matrizes de valores de transição para as direções horizontais.

As cadeias de Markov nas direções x, y e z são então convertidas para um meio contínuo tridimensional, baseado em cadeias de Markov, utilizando-se o aplicativo MCMOD.

Finalmente, na definição dos parâmetros da análise de probabilidades de transição, utilizando-se o aplicativo T-PROGS, cria-se uma malha, especificando o número de conjuntos n de arranjos requeridos, rodando-se o aplicativo TSIM, o qual se utiliza do meio contínuo tridimensional baseado em cadeias de Markov para criar as equações da cokrigagem indicativa e a função objetivo da simulação por arrefecimento (*annealing simulation*), gerando as simulações estocásticas por meio da combinação de versões modificadas dos códigos SISIM e ANNEAL do pacote geostatístico GSLIB.

Os passos descritos anteriormente foram utilizados para as simulações apresentadas no item a seguir, referentes ao estabelecimento dos arranjos espaciais da litologia, bidimensional, para a simulação das possíveis zonas de captura de um poço em bombeamento, em dez cenários distintos de distribuição litológica no local avaliado.

5.3. DESCRIÇÃO DO LOCAL

O local selecionado para avaliação da configuração da zona de captura de um poço em bombeamento está situado na porção centro-sul da área estudada neste trabalho, conforme localização mostrada na **Figura 84**, e está inserido no contexto de transição entre a sedimentação proveniente das encostas da Serra do Mar, áreas de várzea e depósitos sedimentares aluvionares de rios e córregos que cortam a área de estudo.

Desta maneira, a complexidade litológica do local é acentuada, sendo aplicados os conceitos apresentados anteriormente para avaliação das incertezas associadas à variabilidade espacial dos atributos do meio físico.

Geologicamente, a área apresenta em sua porção sul predominância de sedimentos aluvionares, originados pela deposição no canal do Rio Cubatão, interdigitados a sedimentos argilo-siltosos das várzeas dos rios e córregos para norte, os quais são, por sua vez, interdigitados por depósitos de *debris flows* provenientes das encostas da Serra do Mar. A **Figura 85** mostra um detalhe da seção geológico-hidrogeológica A-B, com destaque para o local selecionado.

Para o conhecimento da distribuição espacial das litologias presentes neste local foram utilizados dados de 51 sondagens geotécnicas dos 1542 perfis de sondagens obtidos no banco de dados local, conforme localização apresentada na **Figura 86**, utilizando-se inclusive de dados situados adjacentes a este local, para que se considerasse os compartimentos geológicos laterais ao local em avaliação.

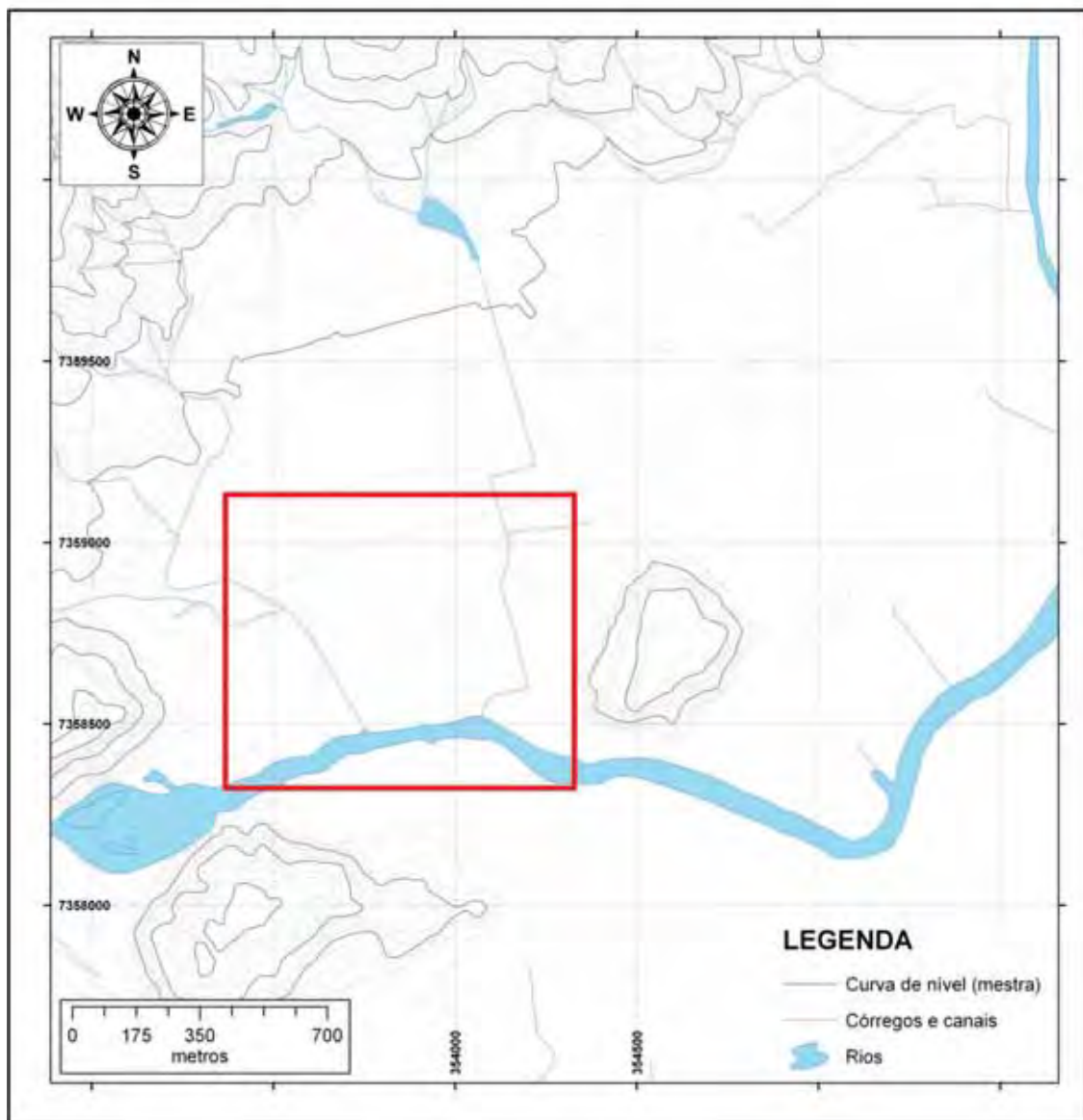


Figura 84. Localização da área selecionada para realização das simulações estocásticas.

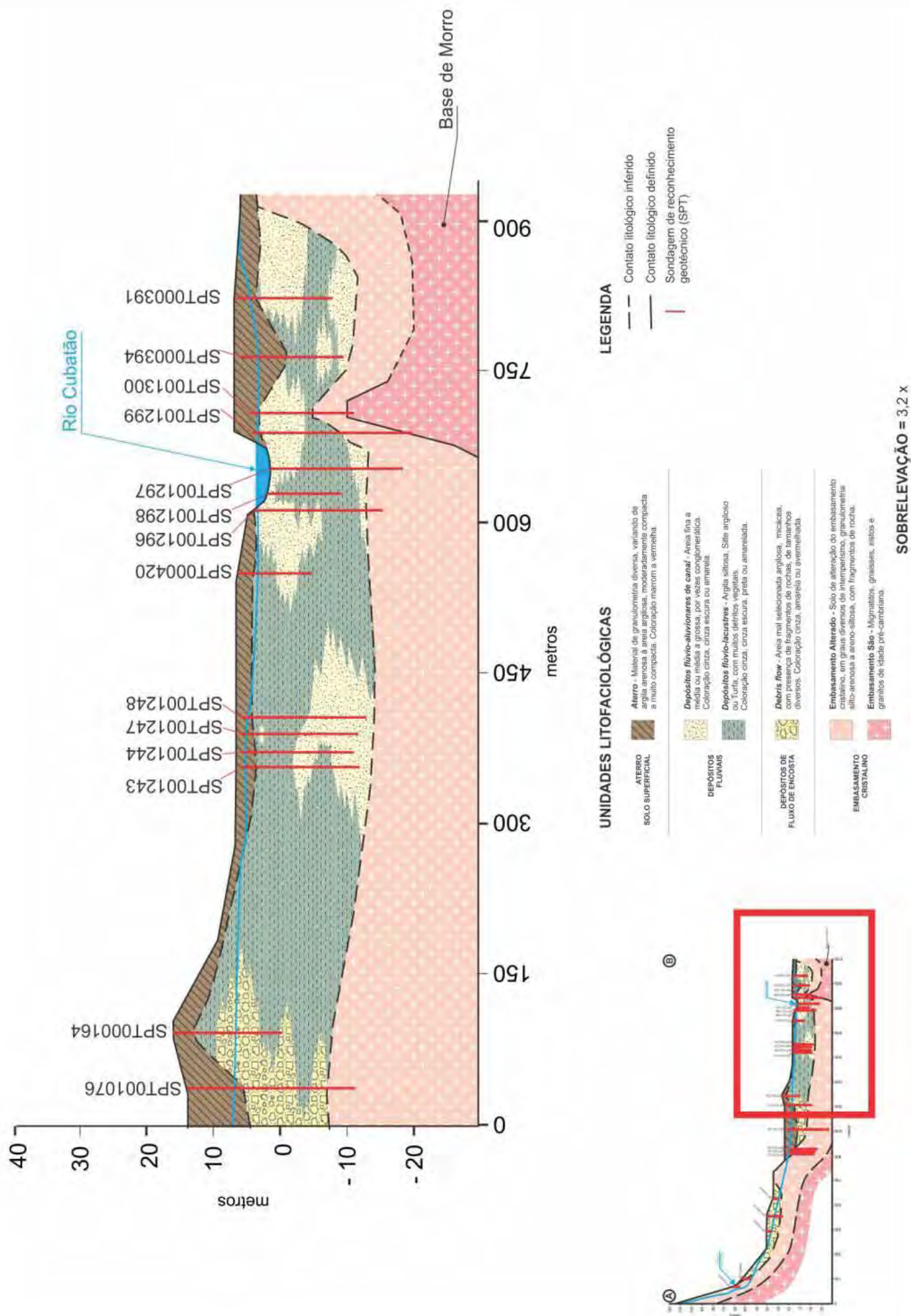


Figura 85. Detalhe da seção geológico-hidrogeológica A-B

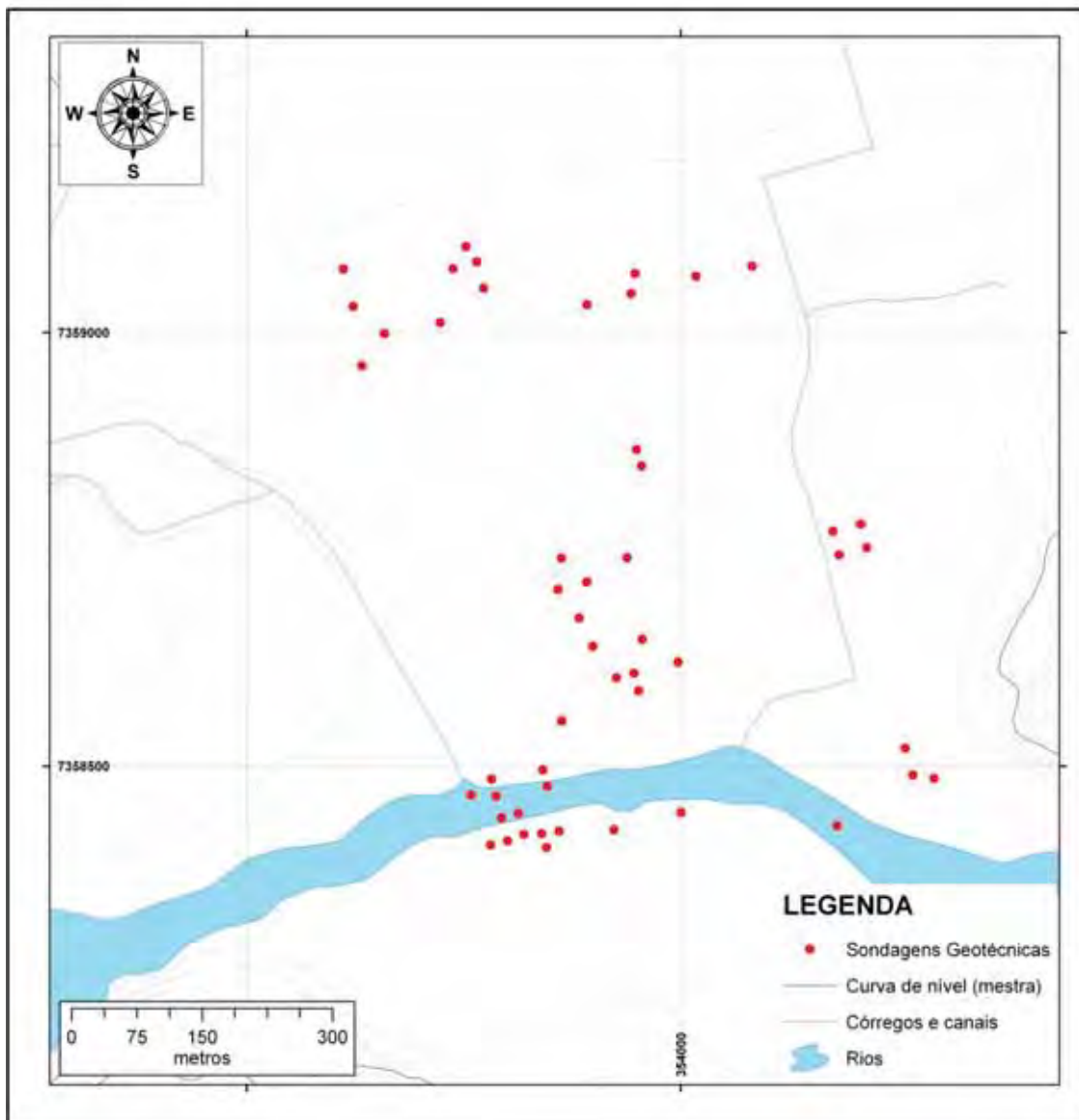


Figura 86. Localização das sondagens geotécnicas utilizadas para as simulações estocásticas no local selecionado e entorno.

5.3.1. Distribuição da condutividade hidráulica

Com base nos dados das sondagens geotécnicas, observa-se uma predominância da hidrofácies argilo-siltosa (40%), seguida das unidades hidrofaciológicas de areias limpas (24%), praticamente sem siltes ou argilas, referentes à deposição fluvial direta e, da unidade areia com finos (18%), referente a deposição de sedimentos na interface entre o rio e as várzeas locais. Com menor proporção, ocorrem as litologias referentes às unidades hidrofaciológicas siltosa (8,5 %) e *debris flows* (8,5%), esta última com predominância espacial para a porção norte do local selecionado.

Salienta-se que as simulações estocásticas realizadas respeitaram esta distribuição de litologias em todos os cenários avaliados, porém, alterando o arranjo espacial das mesmas.

As simulações estocásticas para definição dos dez arranjos espaciais das litologias foram realizadas com base nos dados disponíveis nas sondagens geotécnicas existentes no local e no entorno imediato, sendo que, às litologias descritas nas mesmas foram atribuídas as unidades hidrofaciológicas correspondentes resumidas na **Tabela 13** a seguir.

Tabela 13. Identificação das unidades hidrofaciológicas consideradas para as simulações estocásticas

IDENTIFICAÇÃO	UNIDADE	DESCRIÇÃO SUCINTA	CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA (m/s)
1	Areia Limpa	Hidrofácies Arenosa – é predominantemente constituída por areias bem selecionadas, não contendo, praticamente, argilas e/ou siltes	6,91
2	Areia com finos	Hidrofácies Arenosa – é predominantemente constituída por areias bem selecionadas, contendo matriz argilosa a siltosa	2,60
3	Argila	Hidrofácies Argilosa – é predominantemente constituída por argilas e, subordinadamente por siltes	0,0004
4	Debris Flows	Hidrofácies Debris Flows – é constituída por seixos, blocos e matacões, envoltos por matriz argilo-siltosa	0,0432
5	Silte	Hidrofácies Siltosa a Silto-Argilosa – é predominantemente constituída por siltes e, subordinadamente por siltes argilosos e arenosos	0,432

De acordo com os passos para realização das simulações estocásticas, foram calculadas as taxas de probabilidade de transição vertical entre as unidades hidrofaciológicas, conforme gráficos mostrados na **Figura 87**, para as quais foram utilizados os seguintes parâmetros:

- **Espaçamento do passo vertical** (*vertical lag spacing*): 0,3 m;
- **Máxima distância do passo** (*maximum lag distance*): 6,3 m (calculado pelo modelo, em função do espaçamento vertical);
- **Ajuste de curvas**: considerando 10 passos (lags).

Com base nestes parâmetros, foram obtidos, a partir do modelo por cadeias de Markov, os seguintes comprimentos verticais de lentes para cada material litológico considerado:

- **Areia limpa**: 3,5 m;
- **Areia com finos**: 2,0 m;
- **Argila**: 4,0 m;
- **Debris flows**: 3,6 m;
- **Silte**: 2,5 m.

A partir destes parâmetros de ajuste das curvas de probabilidade de transição, foram obtidas as taxas de probabilidade de transição vertical mostradas na **Tabela 14** e as taxas de probabilidade de transição horizontal, nas direções x e y, mostradas na **Tabela 15**.

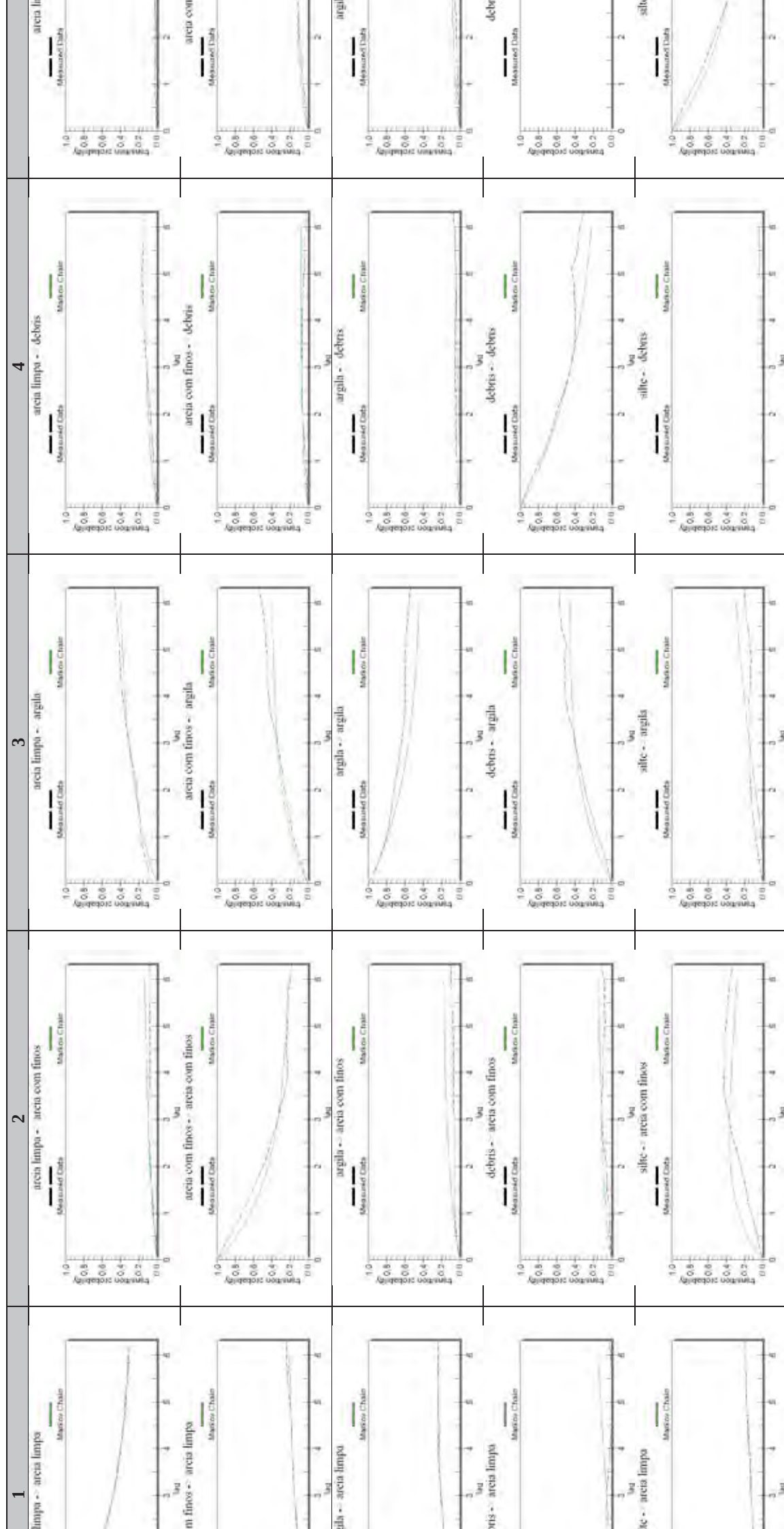


Tabela 14. Taxas de probabilidade de transição para o eixo vertical (Z)

	1	2	3	4	5	Comprimento vertical de lentes
1	-0.2864236	0.04751351	0.16989093	0.07772101	-0.0087017	3.4913314043891
2	0.07259067	-0.4910836	0.25517417	0.05845395	0.10486489	2.0363128271249
3	0.12845696	0.08161772	-0.2541108	-0.0083940	0.0524303	3.9352899314191
4	-0.0239181	0.07453539	0.25948152	-0.2742820	-0.0358167	3.6458825928787
5	0.05574927	0.41135058	-0.0322393	-0.0400428	-0.3948178	2.5328146391389

1 – areia limpa
2 – areia com finos
3 – argila
4 –debris flows
5 – silte

Tabela 15. Taxas de probabilidade de transição para os eixos horizontais (X e Y) para uma distância de passo de 100 m

	1	2	3	4	5	Razão de lentes
1	-0.0286423	0.00245637	0.0218988	0.00269512	0.00159208	9.9999999998779
2	0.00330311	-0.0491083	0.03983824	0.00128492	0.00468209	10.0000000000069
3	0.0128036	0.0173214	-0.0389906	0.00324042	0.00562526	6.5172200669531
4	0.0080412	0.00285095	0.01653605	-0.0274282	0	10.0000000000346
5	0.00427746	0.00935476	0.02584955	0	-0.0394817	10.0000000000012

1 – areia limpa
2 – areia com finos
3 – argila
4 –debris flows
5 – silte

A partir destes parâmetros e taxas de transição vertical e horizontais, foram obtidos os dez cenários de distribuição bidimensional das unidades hidrofaciológicas consideradas, conforme mostrado nas **Figuras 88 a 97**, onde há ocorrência de argila (amarelo escuro) em todo o domínio simulado, respeitando-se sua predominância de ocorrência na área. As areias limpas (preto) ocorrem com mais frequência na porção central do local avaliado, em quase todos os cenários estabelecidos. A unidade de areia com finos (amarelo claro) ocorre de forma dispersa na área, geralmente, em pequenos corpos de extensão limitada, o que ocorre também para as unidades *debris flows* (marrom) e silte (laranja).

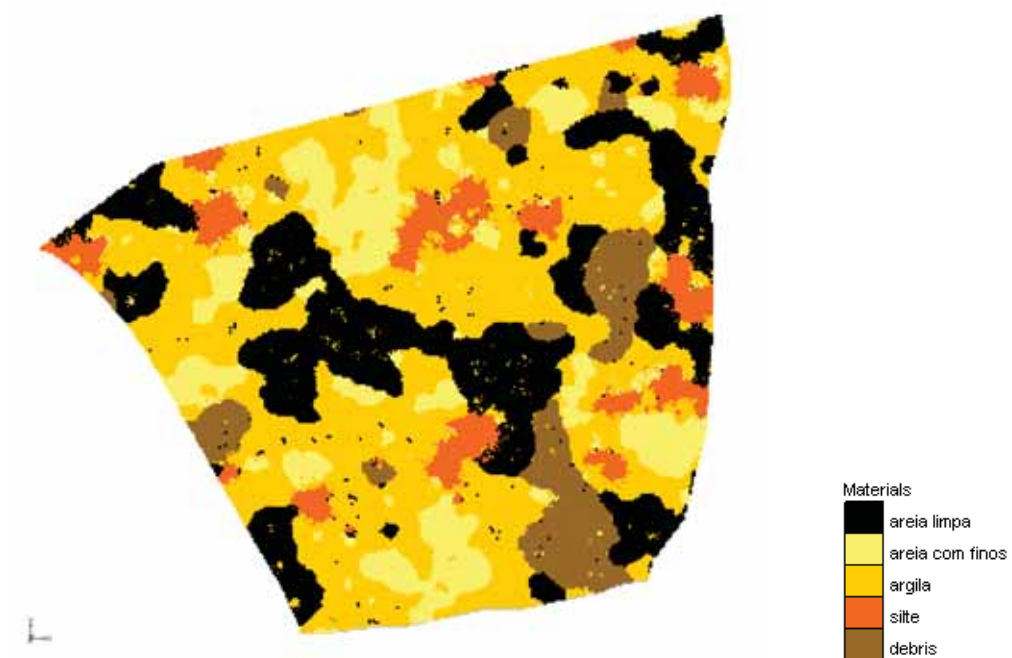


Figura 88. Distribuição espacial da condutividade hidráulica por simulação estocástica – Cenário 1.

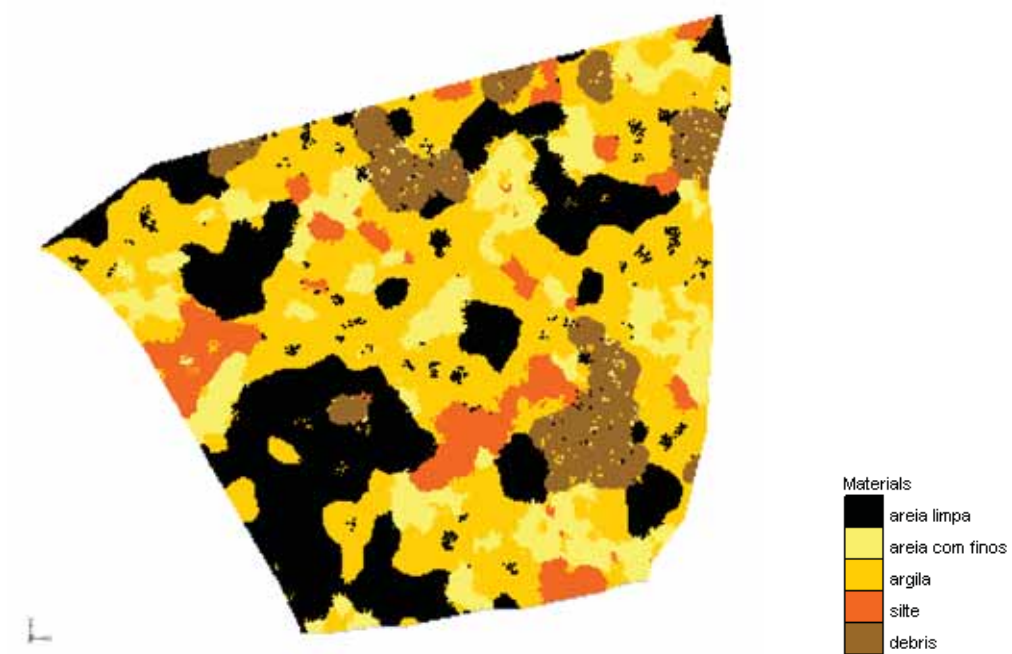


Figura 89. Distribuição espacial da condutividade hidráulica por simulação estocástica – Cenário 2.

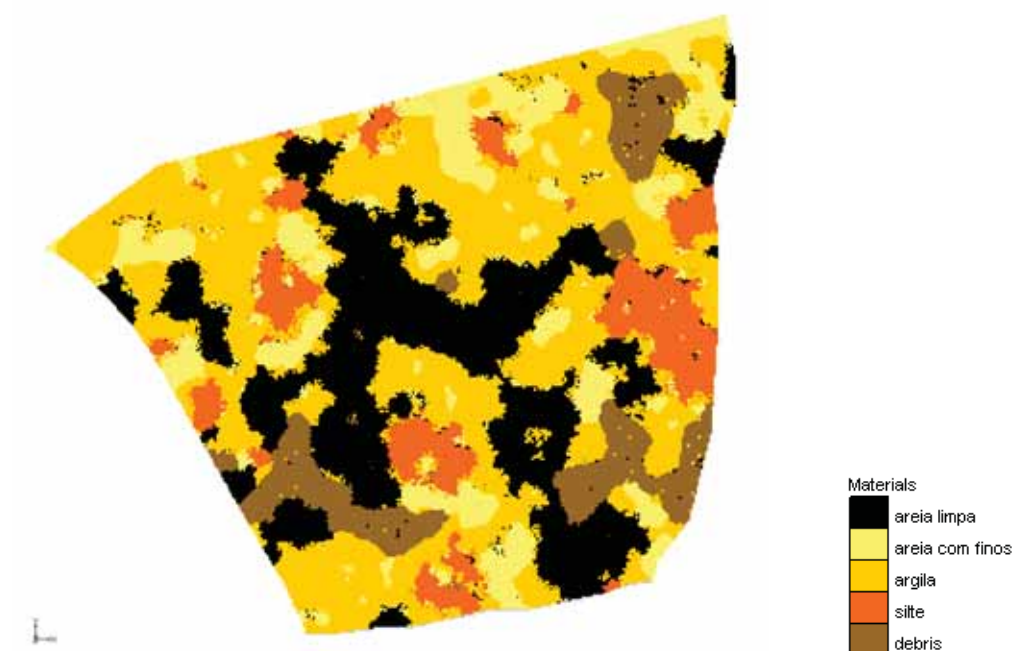


Figura 90. Distribuição espacial da condutividade hidráulica por simulação estocástica – Cenário 3.



Figura 91. Distribuição espacial da condutividade hidráulica por simulação estocástica – Cenário 4.



Figura 92. Distribuição espacial da condutividade hidráulica por simulação estocástica – Cenário 5.

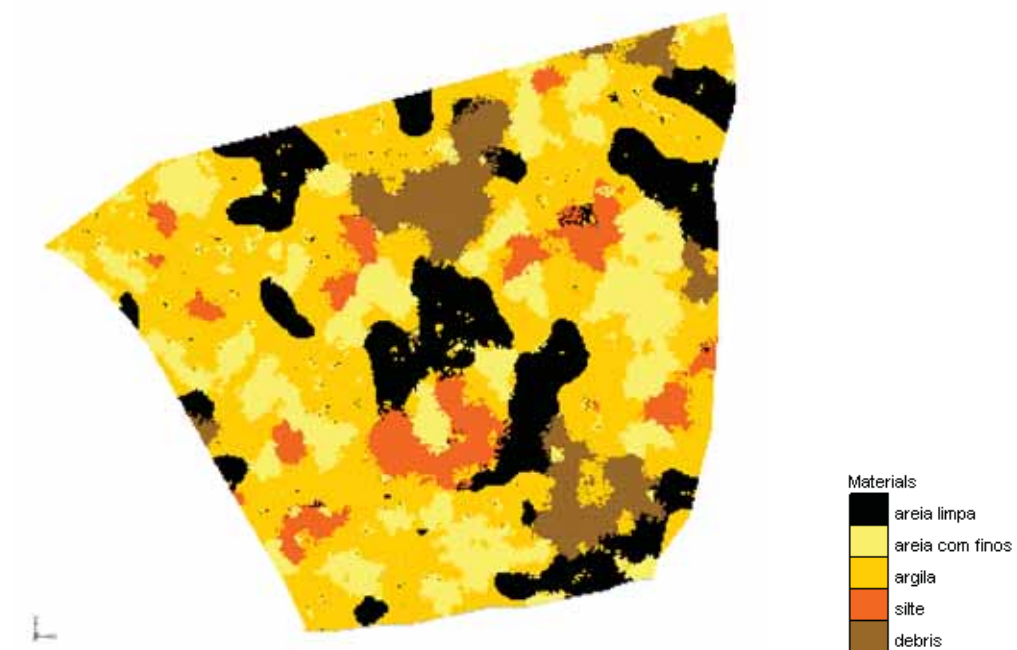


Figura 93. Distribuição espacial da condutividade hidráulica por simulação estocástica – Cenário 6.

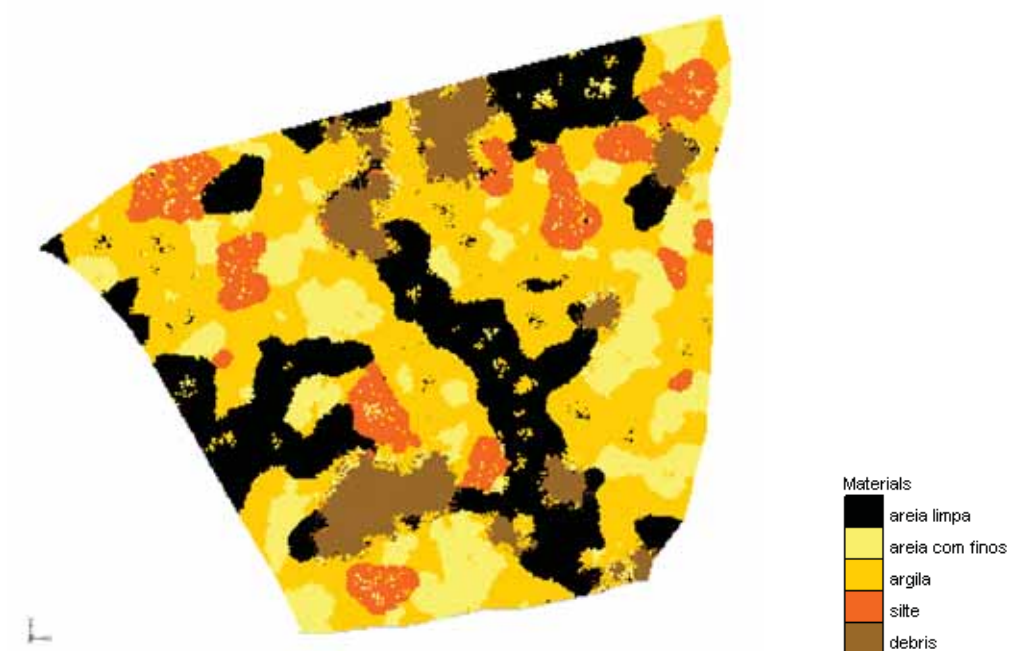


Figura 94. Distribuição espacial da condutividade hidráulica por simulação estocástica – Cenário 7.

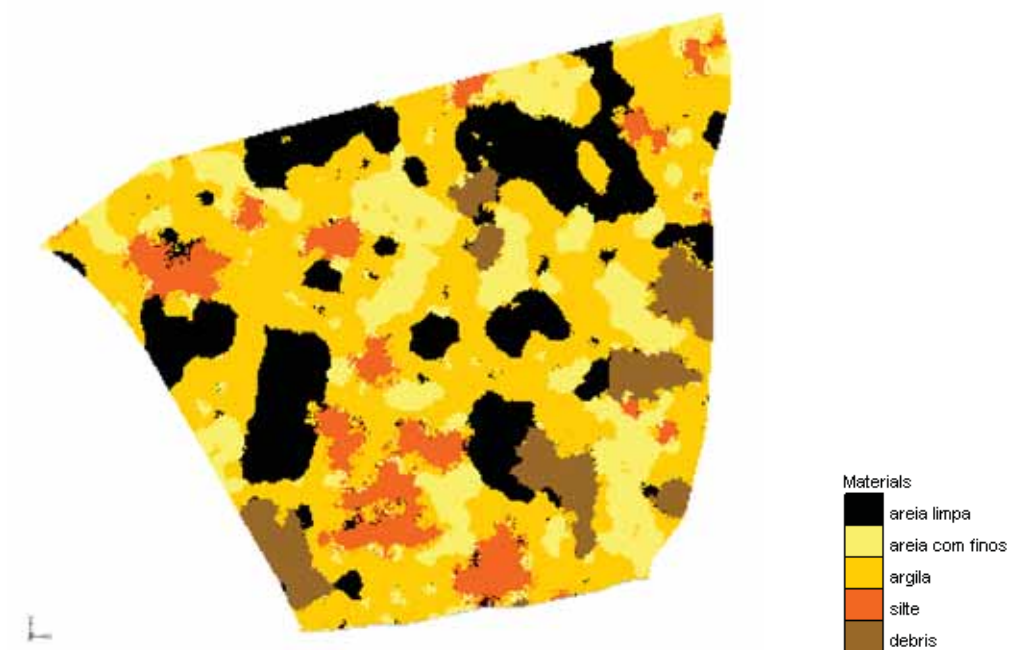


Figura 95. Distribuição espacial da condutividade hidráulica por simulação estocástica – Cenário 8.

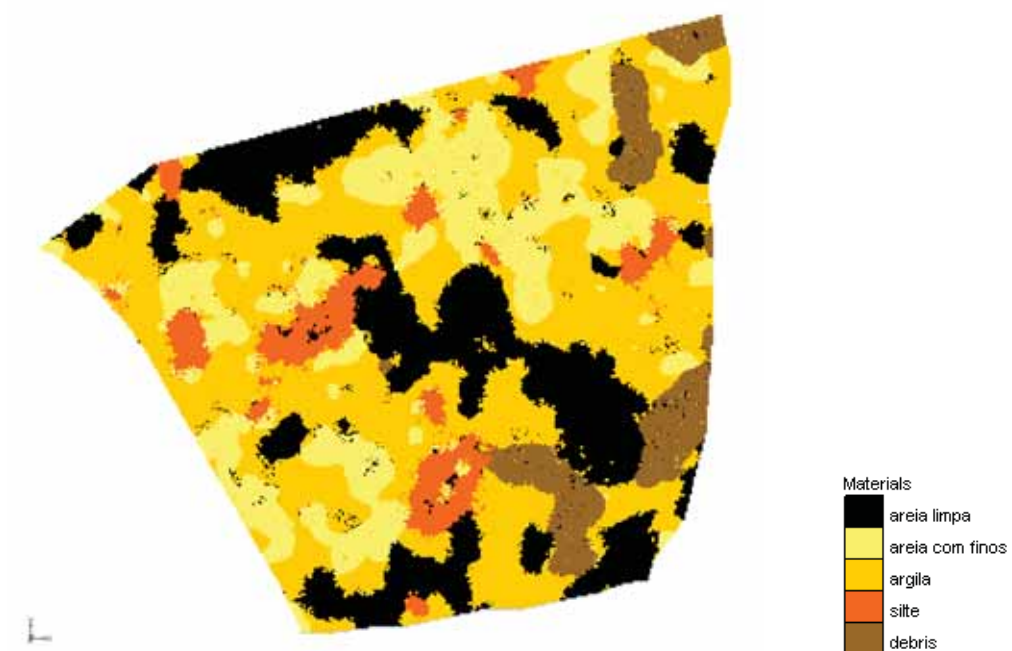


Figura 96. Distribuição espacial da condutividade hidráulica por simulação estocástica – Cenário 9.

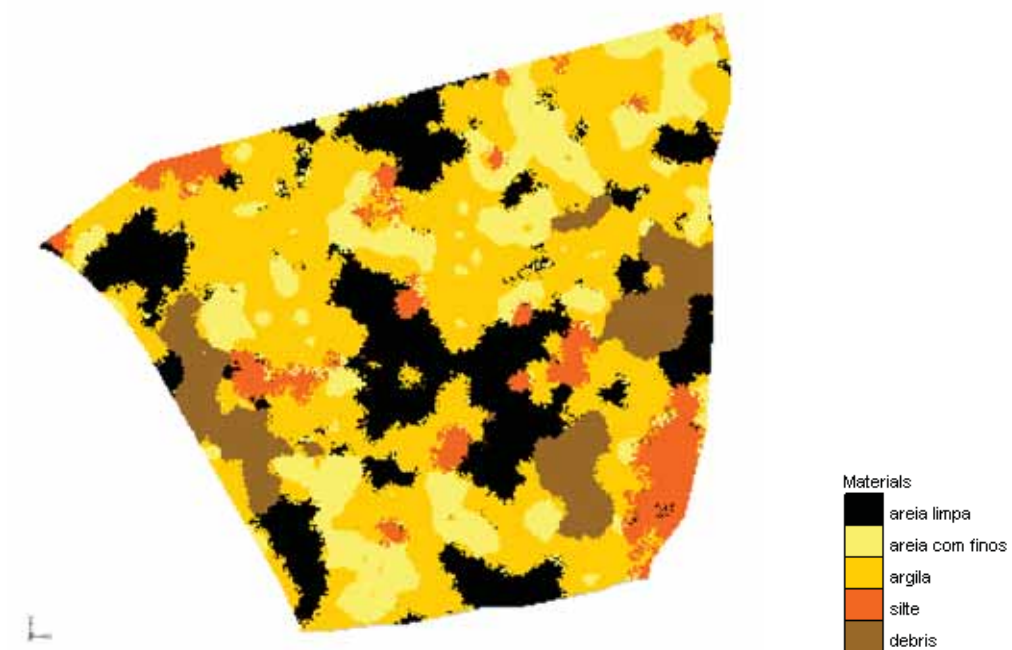


Figura 97. Distribuição espacial da condutividade hidráulica por simulação estocástica – Cenário 10.

5.3.2. Determinação das zonas de captura

Para avaliar a configuração as zonas de captura de um poço hipotético, para bombeamento das águas subterrâneas, para o caso de necessidade de remediação da área, foram realizadas simulações numéricas de fluxo da água subterrânea para os dez cenários estocásticos de distribuição da condutividade hidráulica.

Foi realizada simulação numérica por meio do aplicativo Visual MODFLOW 4.2 (Schlumberger, 2008), em regime transiente de fluxo para um período de 365 dias, sendo avaliada a zona de captura no 150º dia, escolhido arbitrariamente.

Foi considerada condição de contorno de 1º tipo (carga hidráulica especificada) na extremidade norte do modelo, tendo em vista a pouco significativa variação do nível d'água. Para a extremidade sul foi utilizado o Pacote *River*, representando o rio Cubatão, o qual apresenta gradiente baixo. Para os limites laterais, leste e oeste, foram consideradas condições de contorno de fluxo nulo.

A malha utilizada para simulação foi configurada com espaçamento de 2,0 m para cada célula, contendo 365 x 350 células, em uma área de 700 x 730 m, sendo que este espaçamento foi considerado para compatibilizar ao máximo possível o tamanho da célula com a existência de um poço, o qual assume o tamanho da célula em que foi posicionado. Para este poço foi considerada vazão de 240 L/h, conforme dados obtidos de teste realizado na área de estudo, com seção filtrante plena, sendo que a espessura do modelo foi considerada constante de 10,0 m, tendo em vista o fluxo da água subterrânea mostrar-se predominante nas porções superficiais do aquífero.

A **Figura 98** ilustra o domínio do modelo, a posição do poço e as condições de contorno utilizadas.

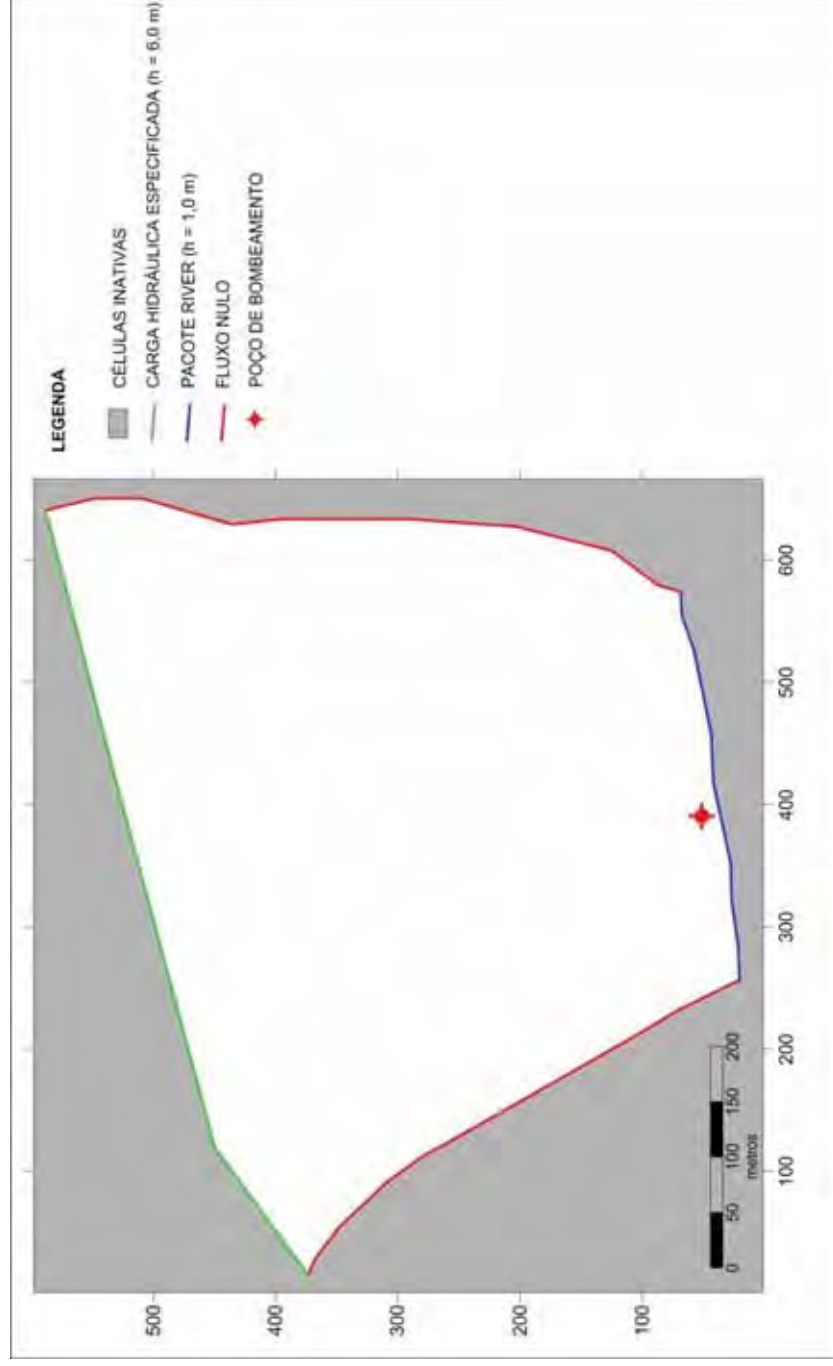


Figura 98. Domínio do modelo e condições de contorno.

Os cenários de distribuição espacial das litologias foram transferidos para o aplicativo Visual MODFLOW 4.2, utilizando-se, em todos os cenários, as mesmas vazões e condições de contorno para se verificar o efeito dos distintos arranjos espaciais obtidos pelas simulações estocásticas.

Os resultados das simulações numéricas para determinação da configuração das zonas de captura são mostrados nas **Figuras 99 a 108**, conforme descrito abaixo:

- **Cenário 1:** a zona de captura é fortemente condicionada pelo corpo de areia com finos presente na proximidades do poço de bombeamento, apresentando rebaixamento não superior a 0,4. O comprimento maior da zona de captura tem 150 m longitudinalmente ao fluxo da água subterrânea (**Figura 99**);
- **Cenário 2:** para este cenário, a configuração da zona de captura mostra comprimento maior transversal a direção de fluxo da água subterrânea, com aproximadamente 120 m de comprimento, condicionado pelos corpos de areia limpa e areia com finos, presentes a oeste do poço em bombeamento, não apresentando rebaixamento superior a 0,2 m (**Figura 100**);
- **Cenário 3:** para este cenário observa-se zona de captura mais abrangente, provavelmente pela presença de frações granulométricas mais finas, bem como pela presença de matriz silto-argilosa. O rebaixamento observado é superior a 3,0 m nas proximidades imediatas ao poço, associada a litologia siltosa presente no local onde foi inserido este poço (**Figura 101**);
- **Cenário 4:** a zona de captura, nas proximidades do poço apresenta comportamento similar ao Cenário 3, porém, a sua abrangência é muito maior, extrapolando os limites físicos da área. Isto se deve a pouca ocorrência de corpos arenosos na porção sul deste arranjo, situadas na porção central a centro-norte do local. O rebaixamento observado é superior a 3,0 m conforme observado para o cenário 3. A abertura das ZCs para leste e oeste estão diretamente condicionadas por corpos de maiores granulometrias (corpos arenosos limpos e com finos – **Figura 102**);

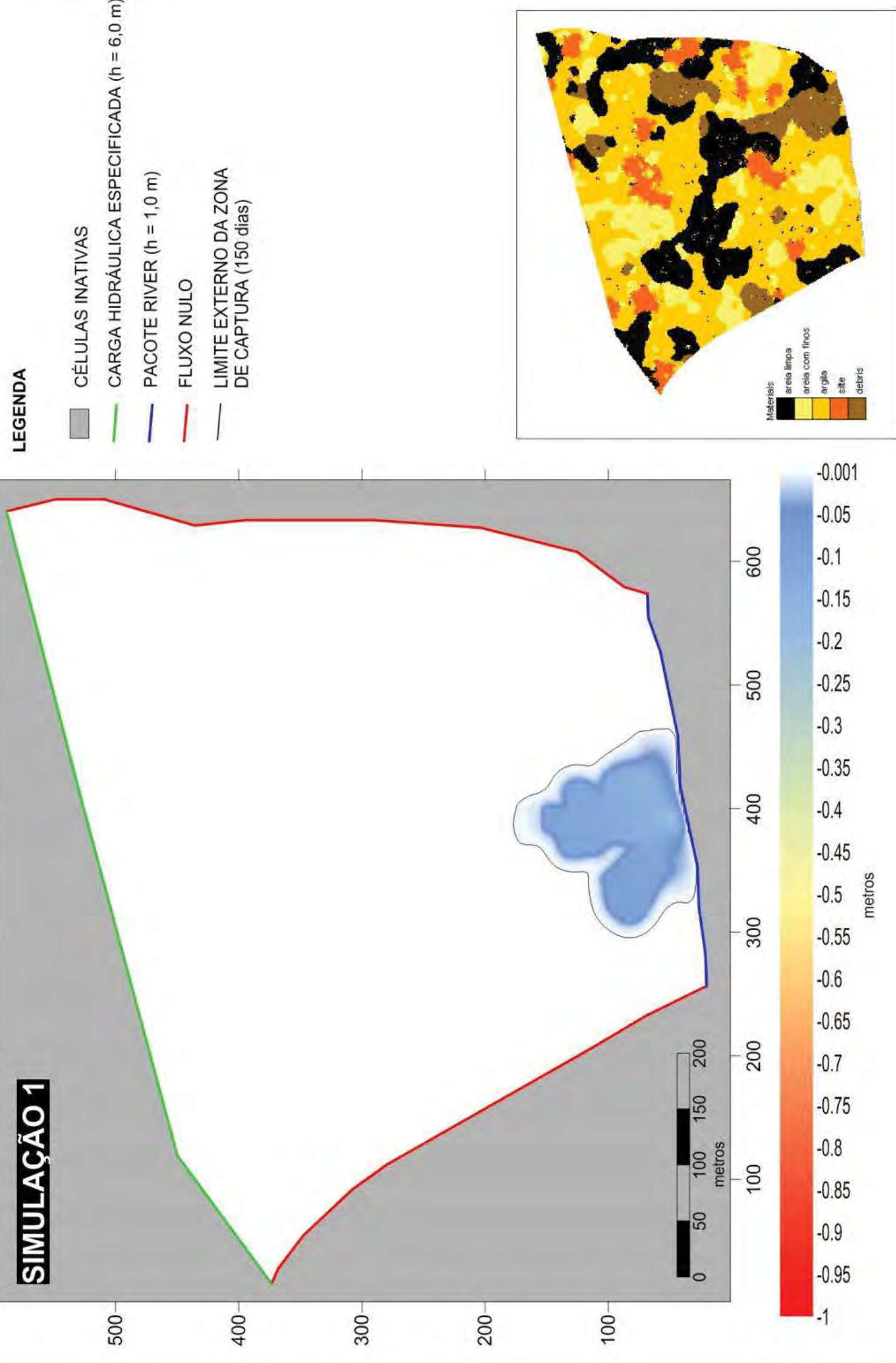
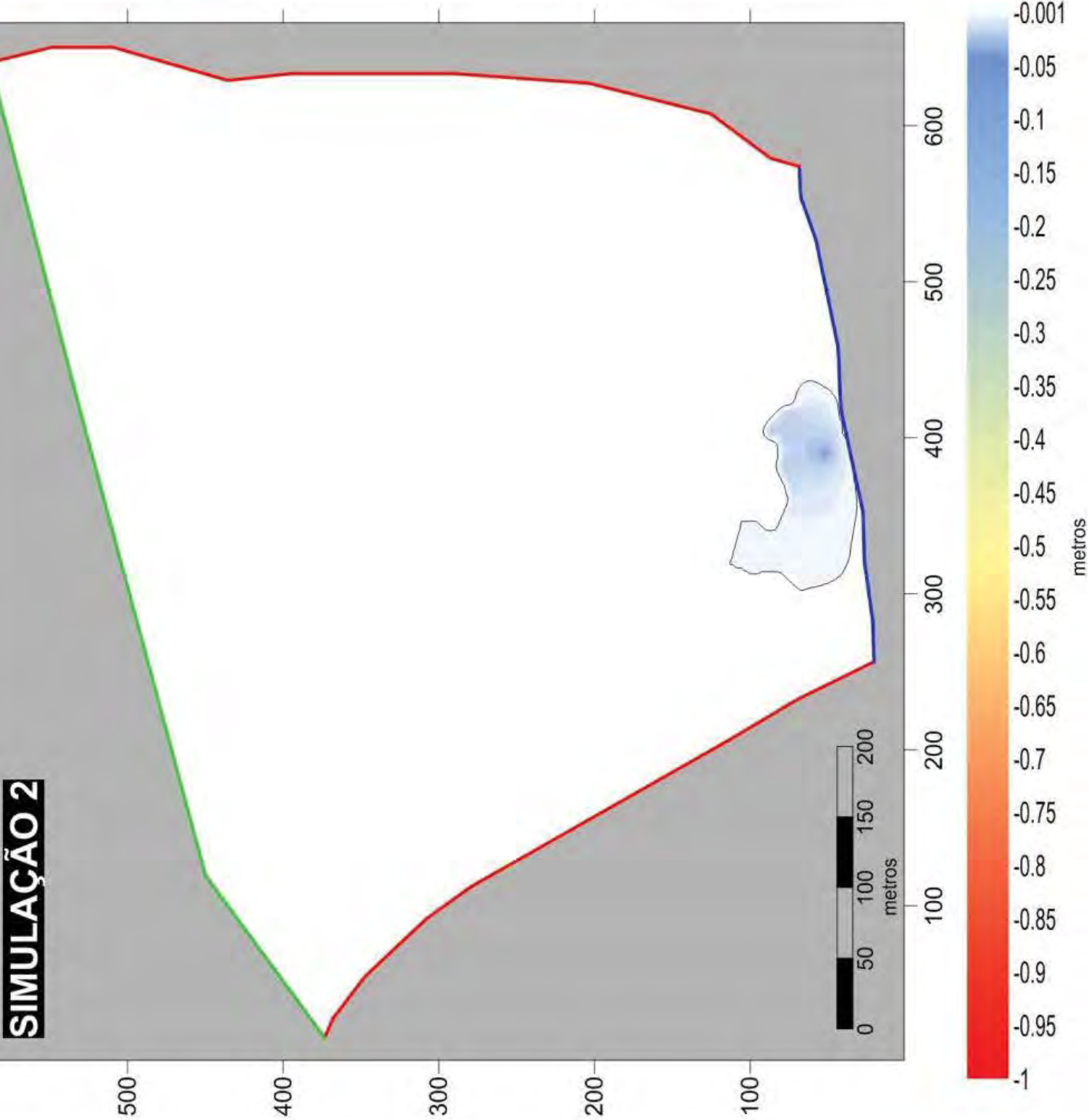


Figura 99. Configuração da zona de captura – Cenário 1.

SIMULAÇÃO 2



LEGENDA

- CÉLULAS INATIVAS
- CARGA HIDRÁULICA ESPECIFICADA ($h = 6,0 \text{ m}$)
- PACOTE RIVER ($h = 1,0 \text{ m}$)
- FLUXO NULO
- LIMITE EXTERNO DA ZONA DE CAPTURA (150 dias)

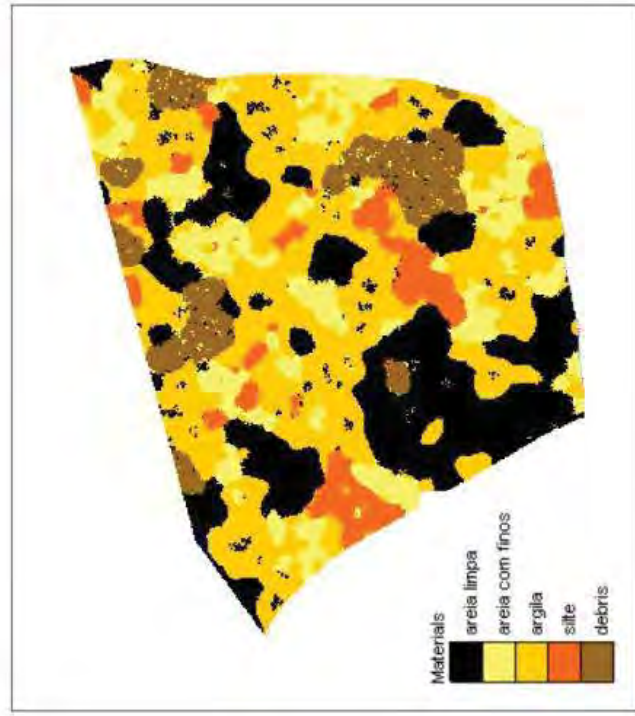
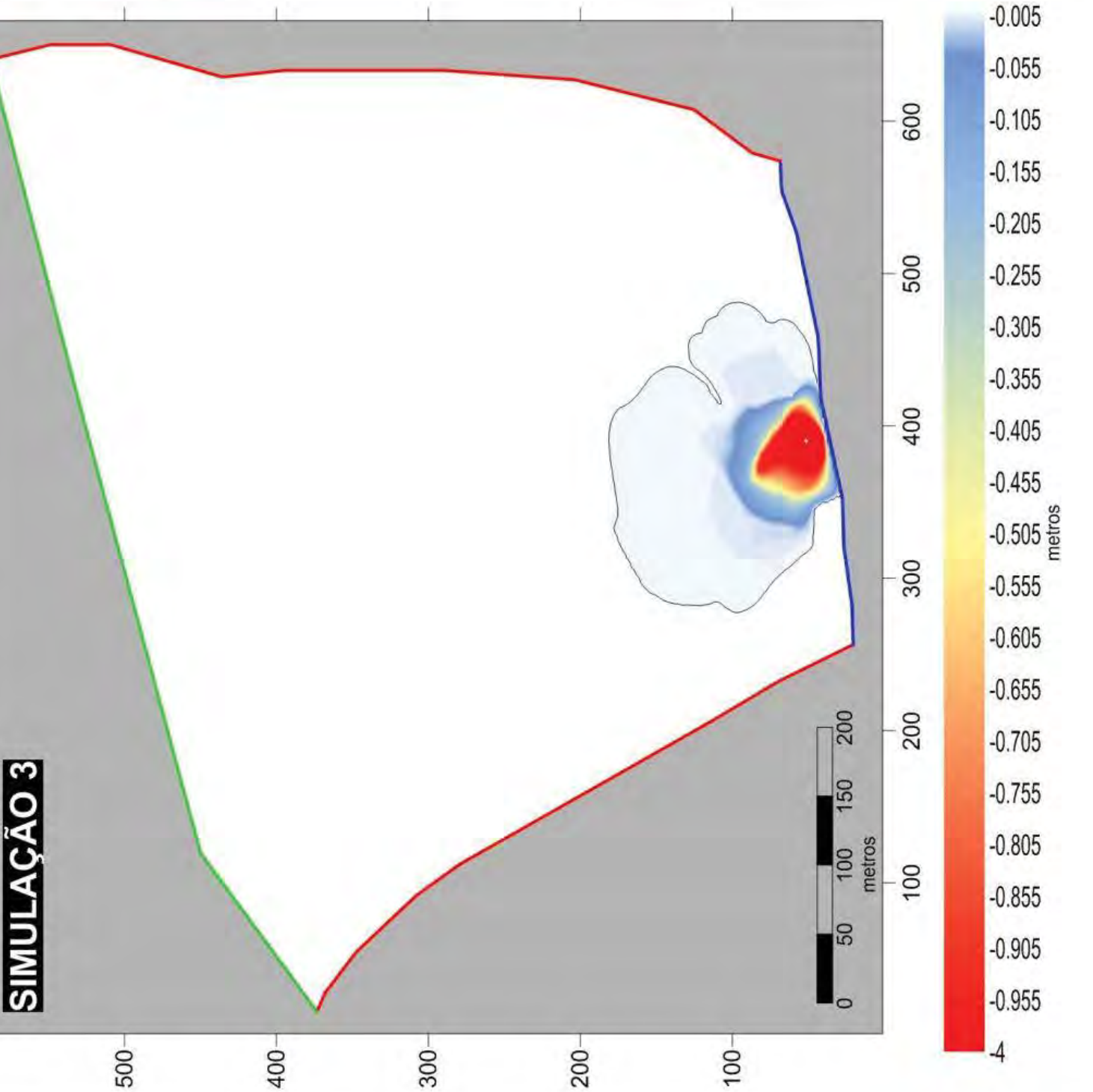


Figura 100. Configuração da zona de captura – Cenário 2.

SIMULAÇÃO 3



LEGENDA

- CÉLULAS INATIVAS
- CARGA HIDRÁULICA ESPECIFICADA ($h = 6,0 \text{ m}$)
- PACOTE RIVER ($h = 1,0 \text{ m}$)
- FLUXO NULO
- LIMITE EXTERNO DA ZONA DE CAPTURA (150 dias)

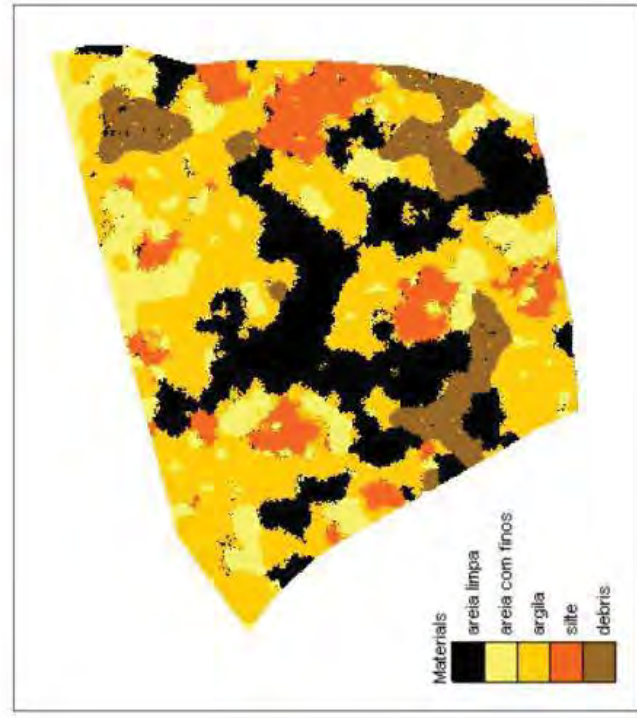
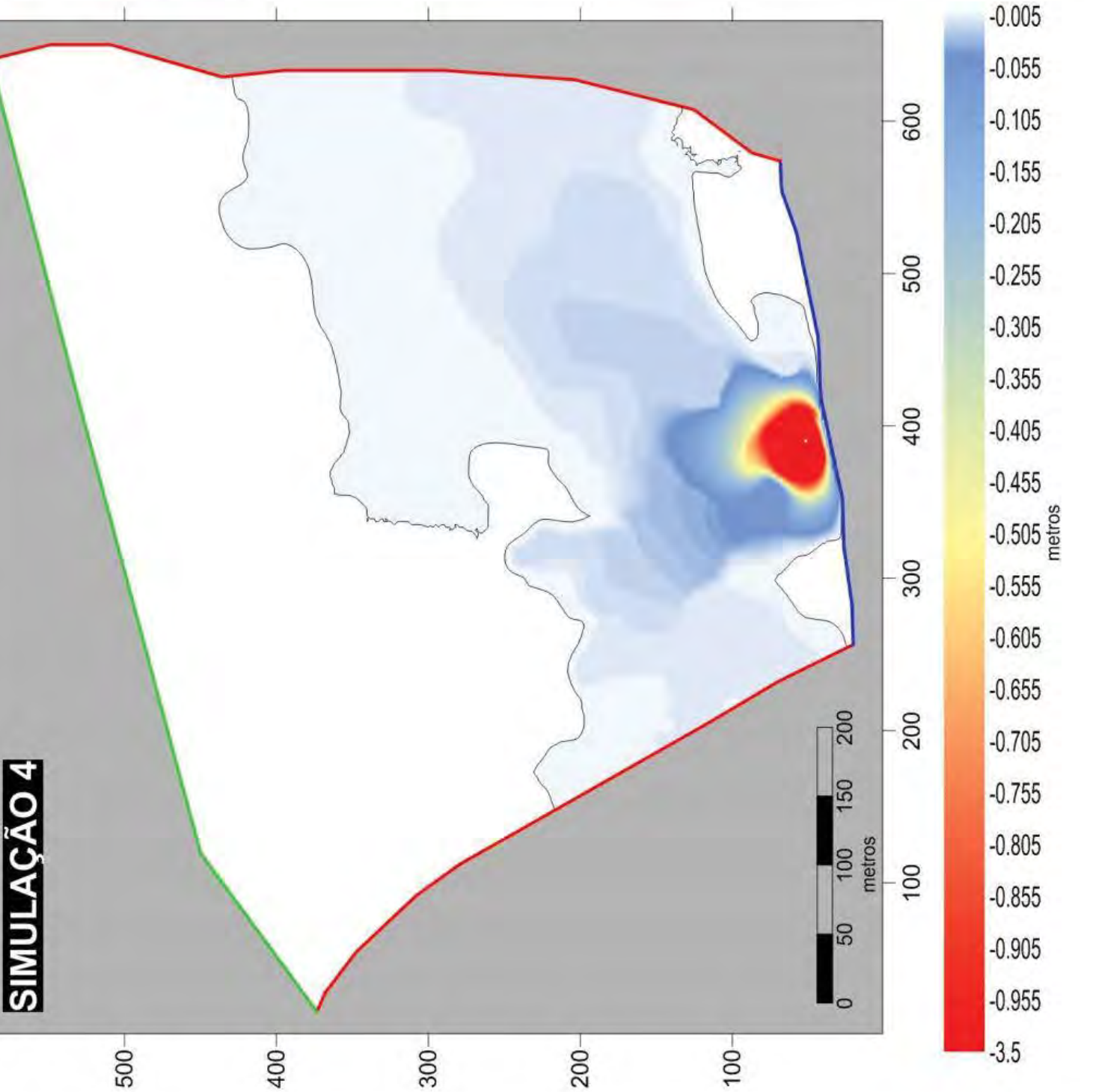


Figura 101. Configuração da zona de captura – Cenário 3.

SIMULAÇÃO 4



LEGENDA

- CÉLULAS INATIVAS
- CARGA HIDRÁULICA ESPECIFICADA ($h = 6,0\text{ m}$)
- PACOTE RIVER ($h = 1,0\text{ m}$)
- FLUXO NULO
- LIMITE EXTERNO DA ZONA DE CAPTURA (150 dias)

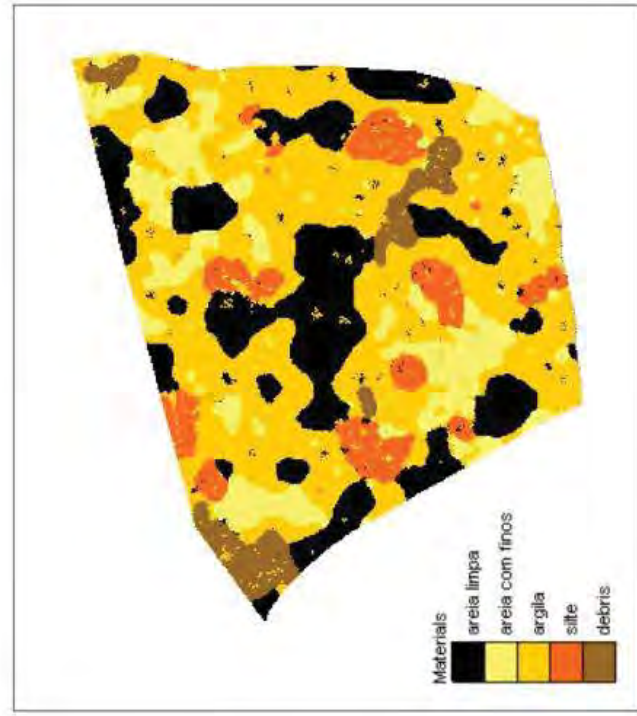
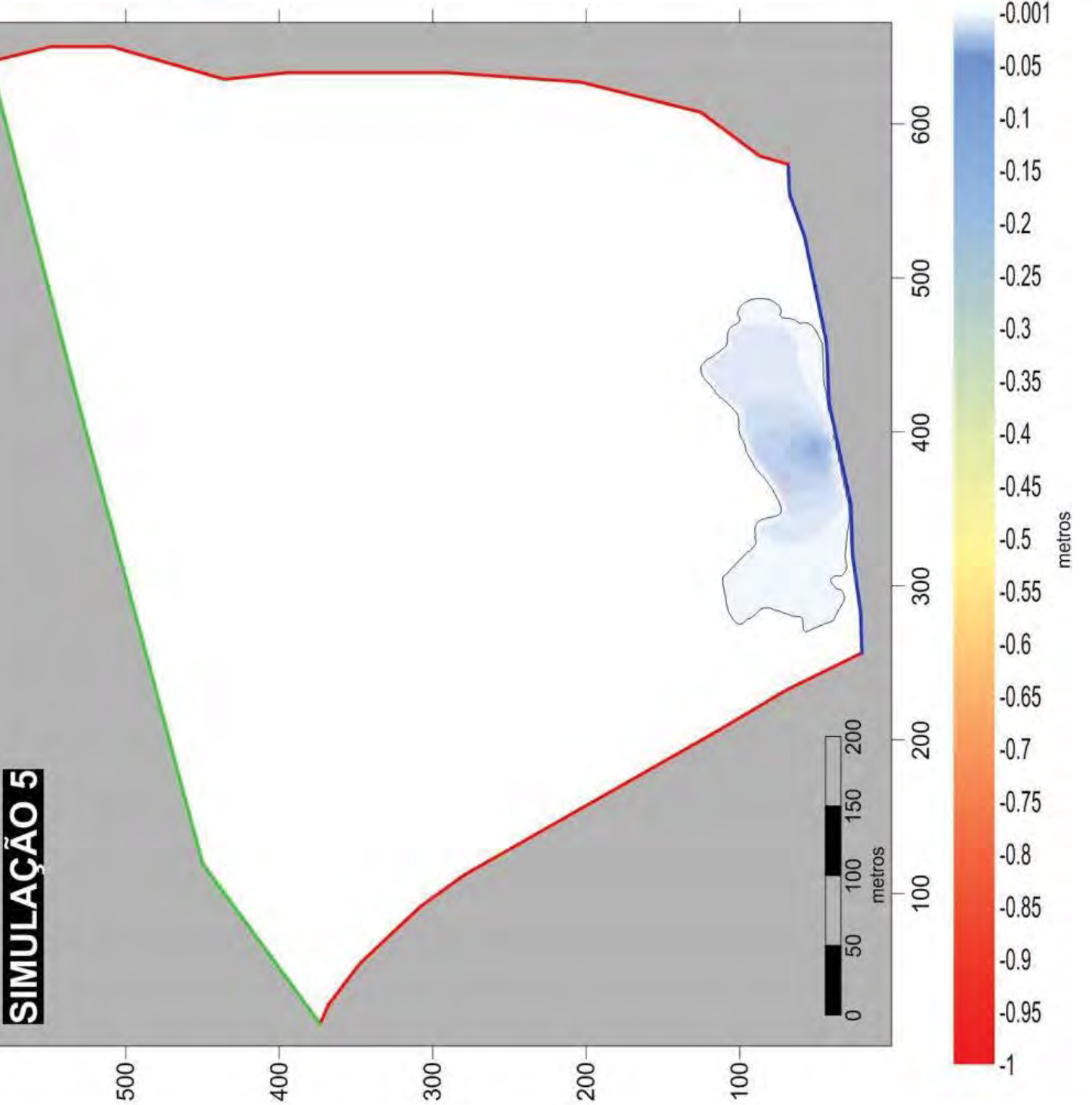


Figura 102. Configuração da zona de captura – Cenário 4.

SIMULAÇÃO 5



LEGENDA

- CÉLULAS INATIVAS
- CARGA HIDRÁULICA ESPECIFICADA ($h = 6,0 \text{ m}$)
- PACOTE RIVER ($h = 1,0 \text{ m}$)
- FLUXO NULO
- LIMITE EXTERNO DA ZONA DE CAPTURA (150 dias)

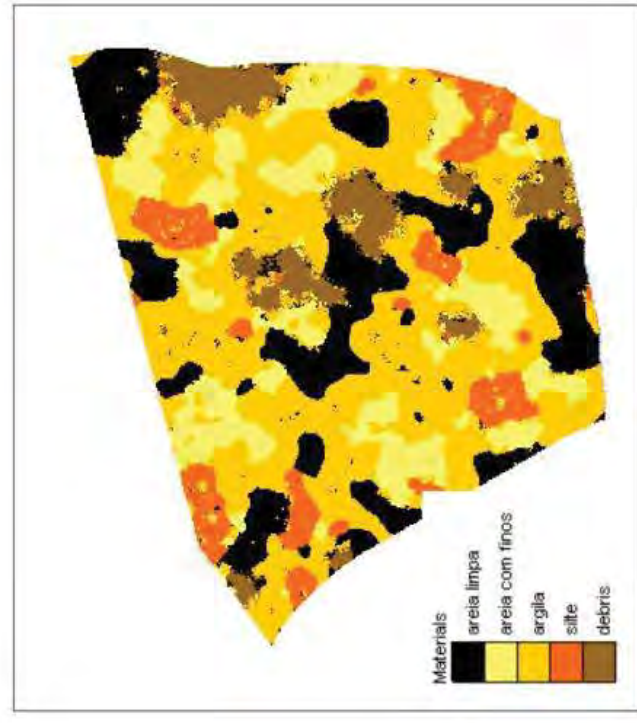


Figura 103. Configuração da zona de captura – Cenário 5.

SIMULAÇÃO 6

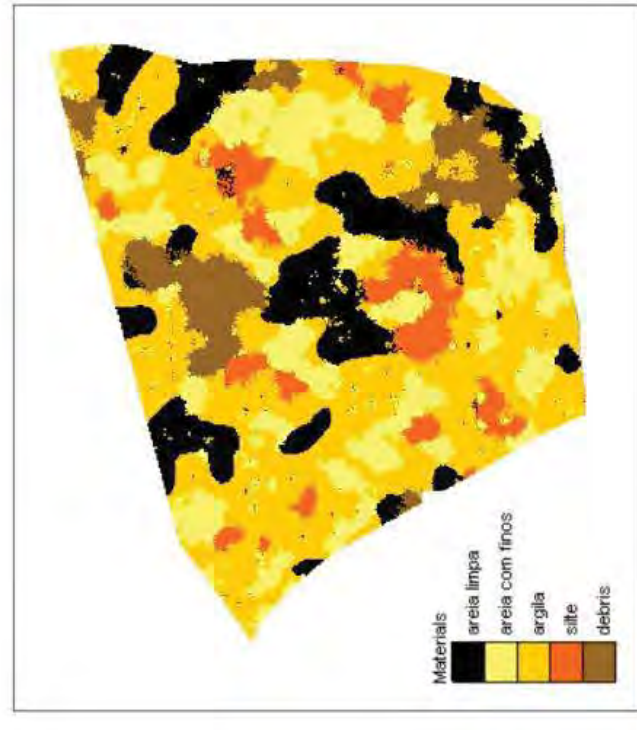
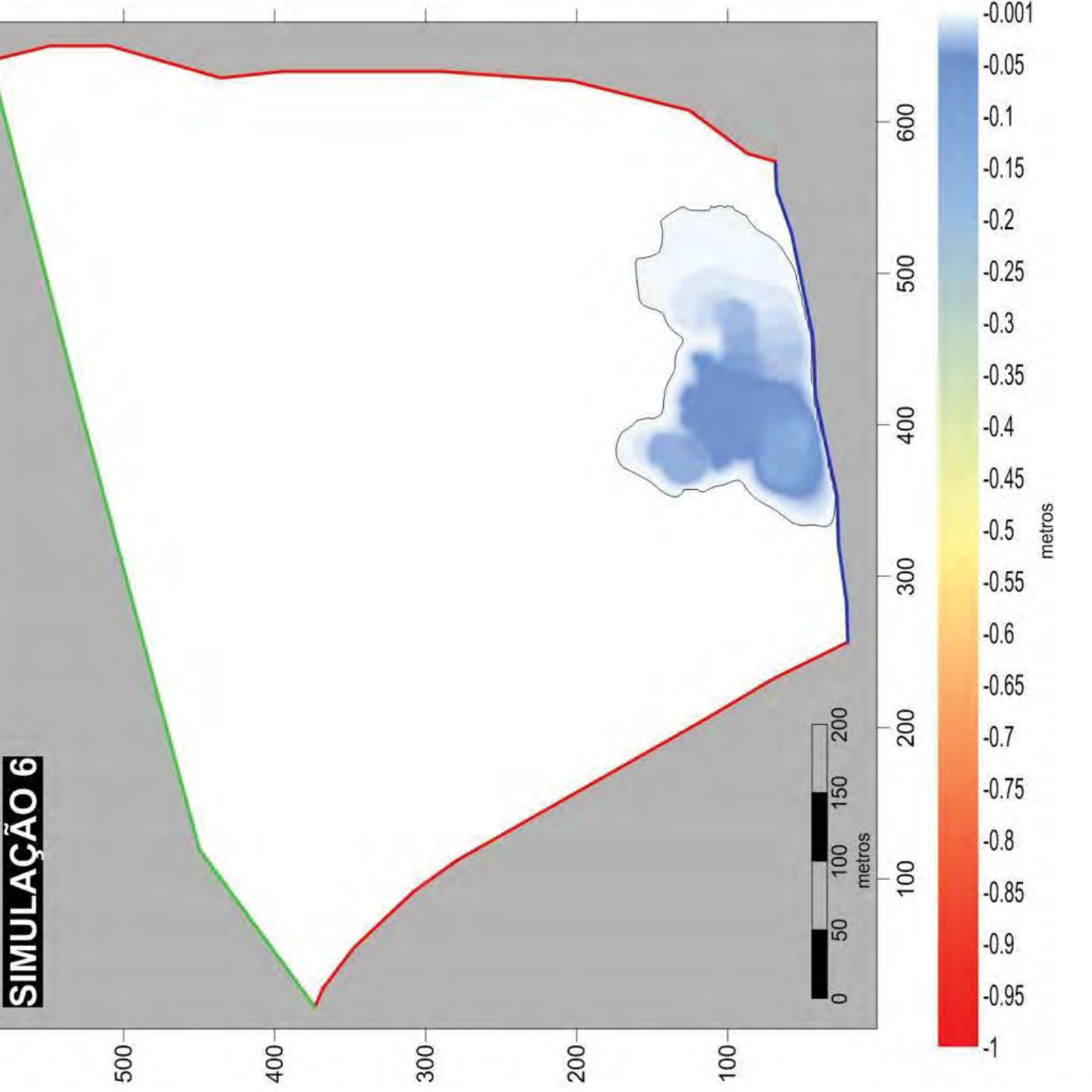
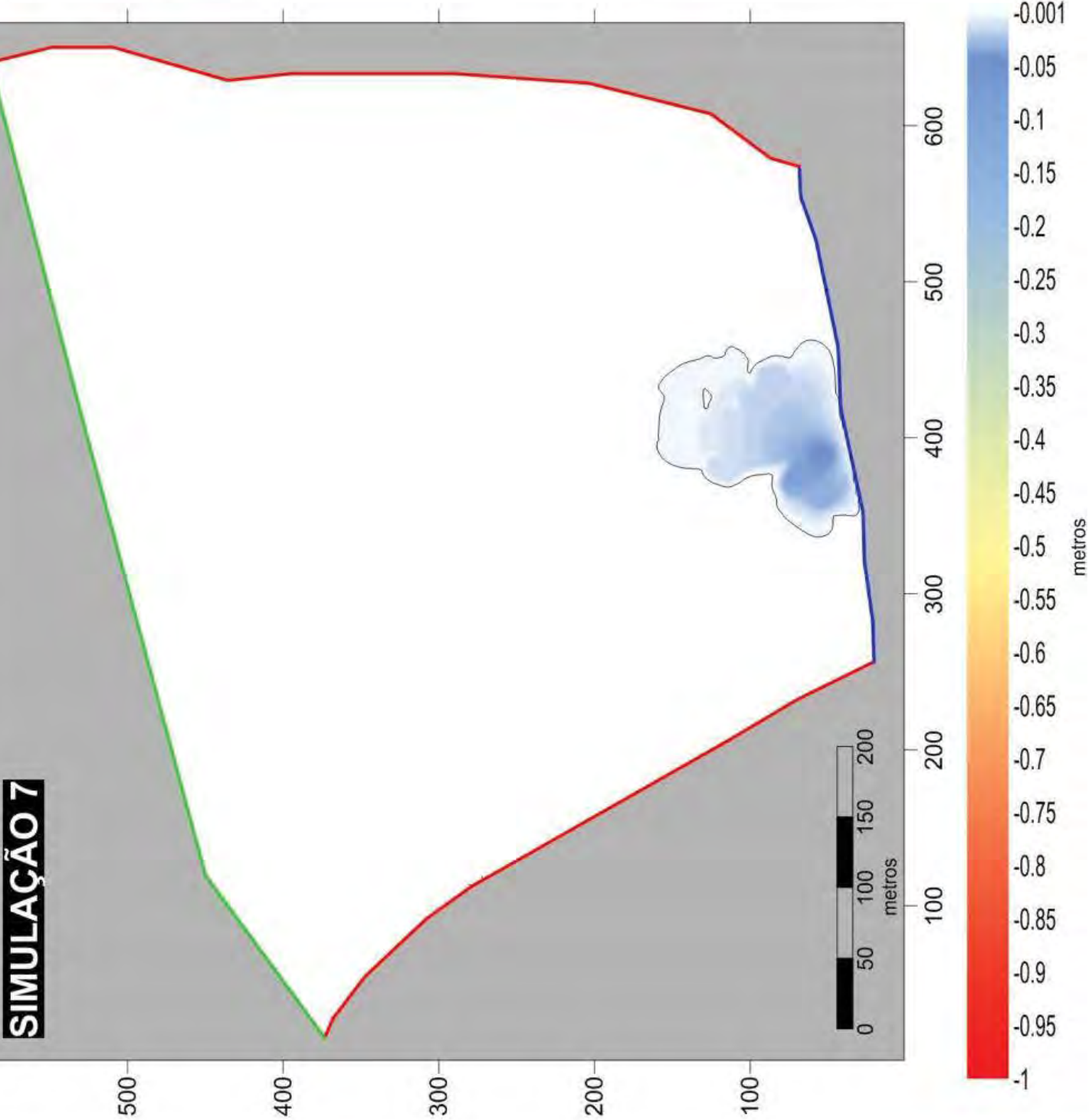


Figura 104. Configuração da zona de captura – Cenário 6.

SIMULAÇÃO 7



LEGENDA

- CÉLULAS INATIVAS
- CARGA HIDRÁULICA ESPECIFICADA ($h = 6,0 \text{ m}$)
- PACOTE RIVER ($h = 1,0 \text{ m}$)
- FLUXO NULO
- LIMITE EXTERNO DA ZONA DE CAPTURA (150 dias)

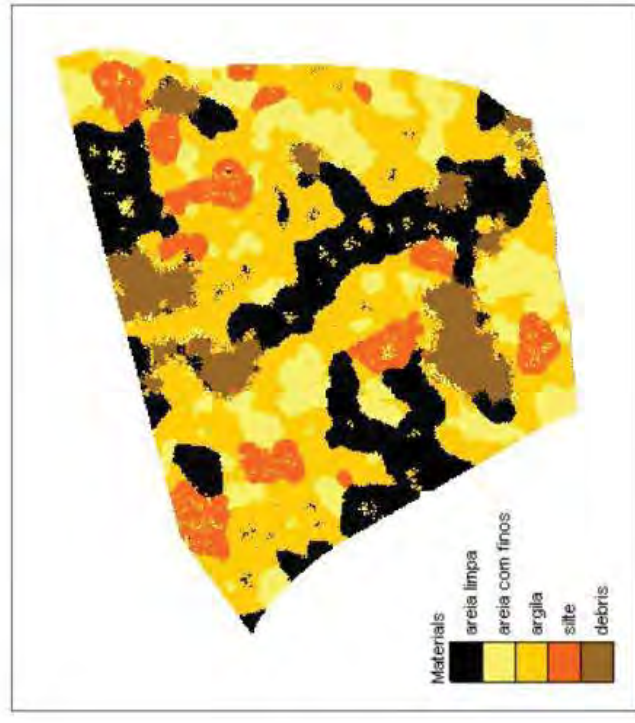
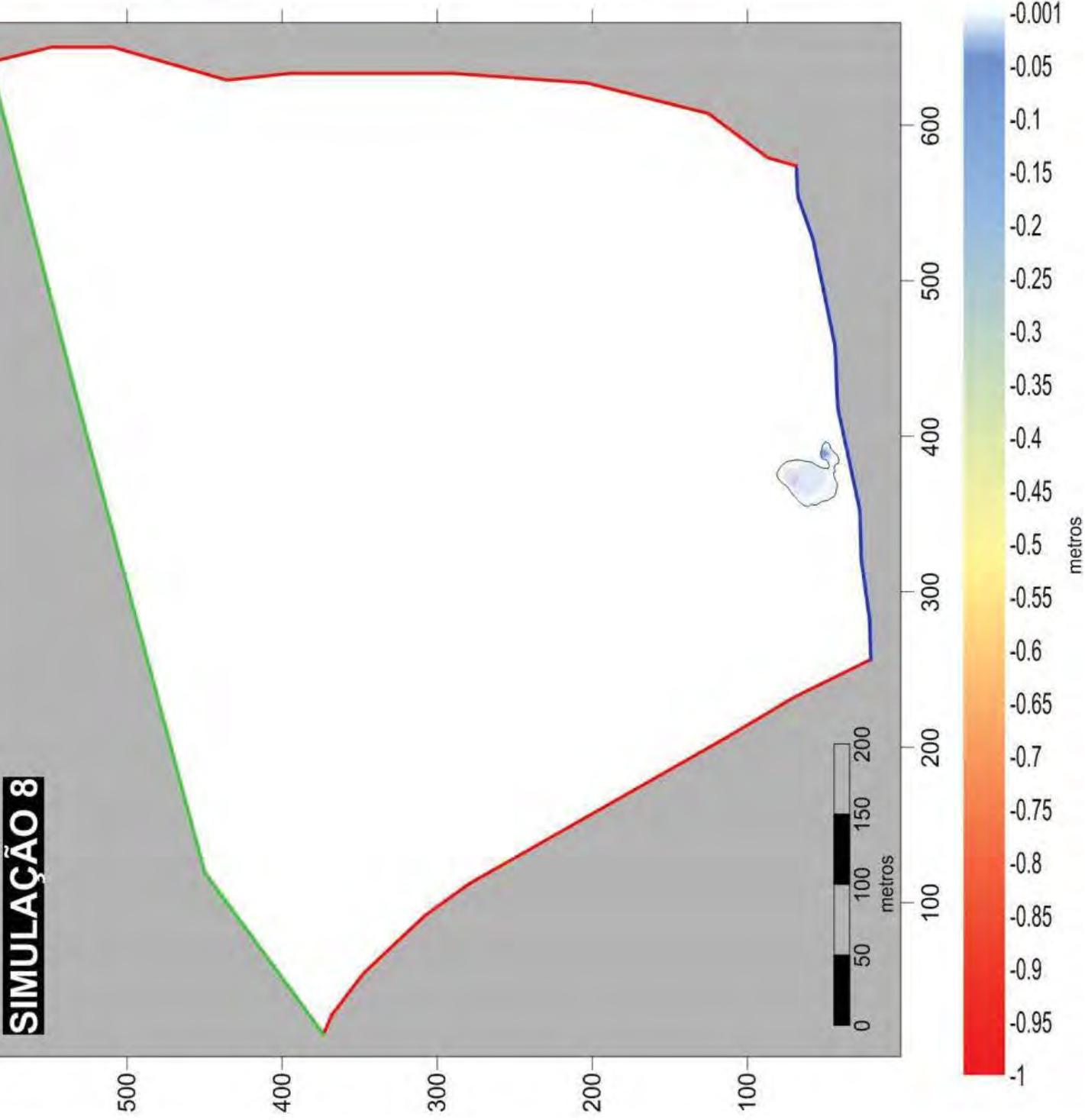


Figura 105. Configuração da zona de captura – Cenário 7.

SIMULAÇÃO 8



LEGENDA

- CÉLULAS INATIVAS
- CARGA HIDRÁULICA ESPECIFICADA ($h = 6,0 \text{ m}$)
- PACOTE RIVER ($h = 1,0 \text{ m}$)
- FLUXO NULO
- LIMITE EXTERNO DA ZONA DE CAPTURA (150 dias)

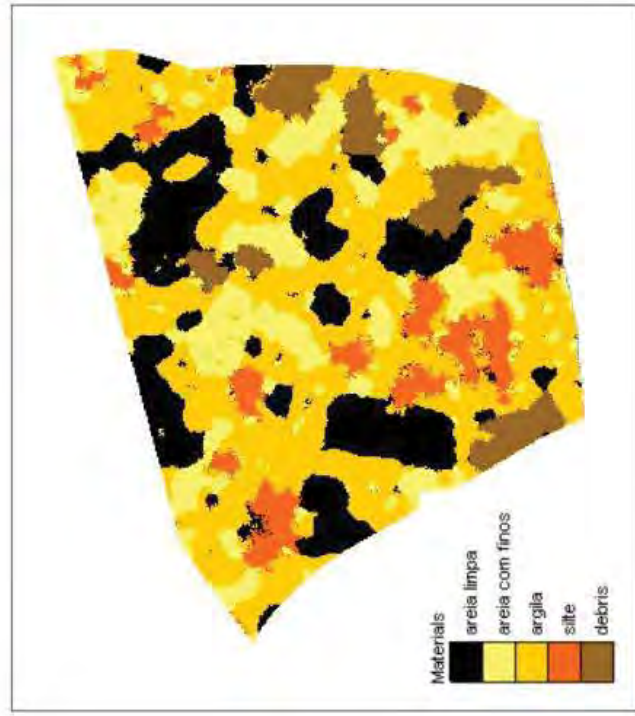
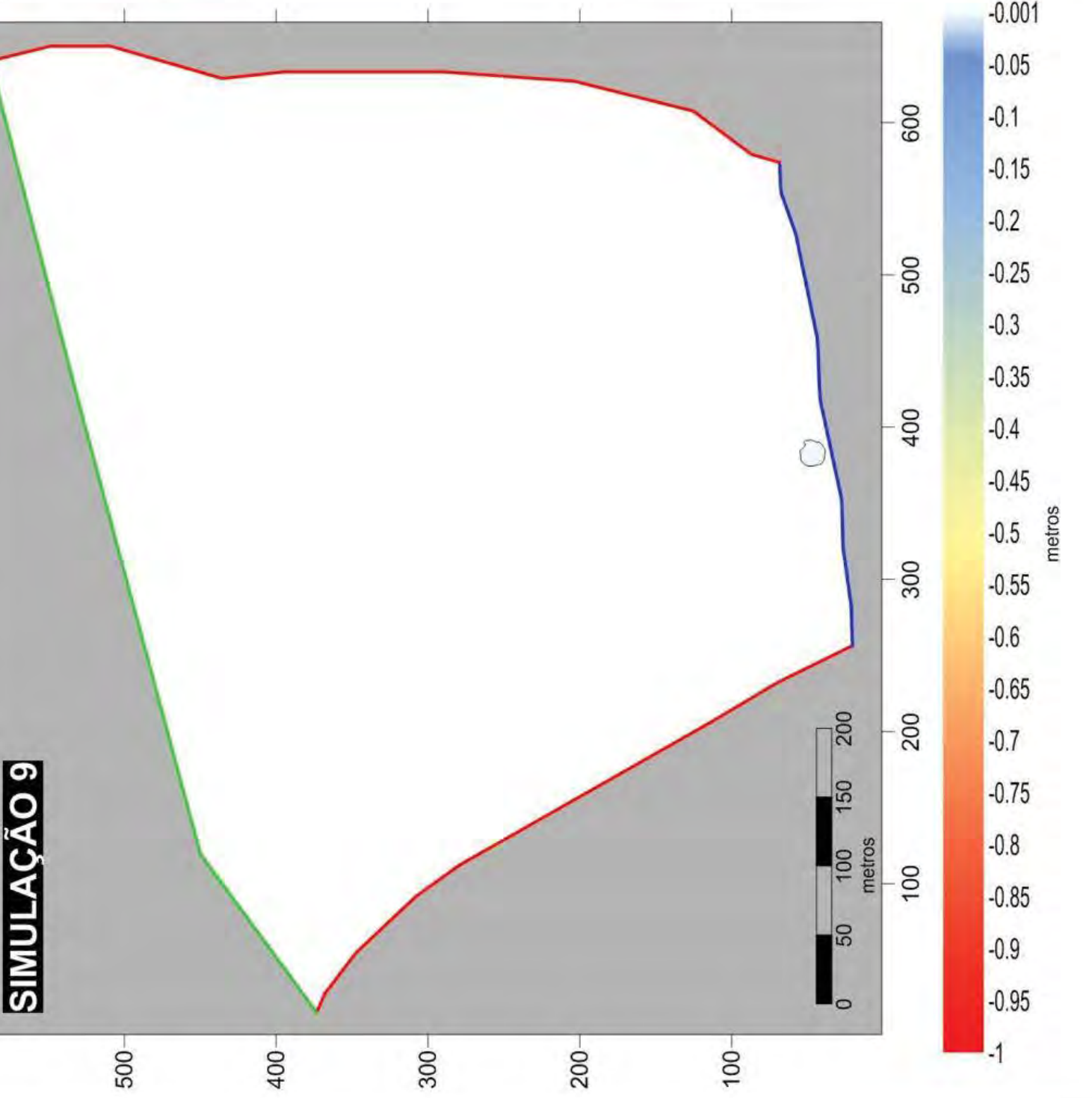


Figura 106. Configuração da zona de captura – Cenário 8.

SIMULAÇÃO 9



LEGENDA

- CÉLULAS INATIVAS
- CARGA HIDRÁULICA ESPECIFICADA ($h = 6,0 \text{ m}$)
- PACOTE RIVER ($h = 1,0 \text{ m}$)
- FLUXO NULO
- LIMITE EXTERNO DA ZONA DE CAPTURA (150 dias)

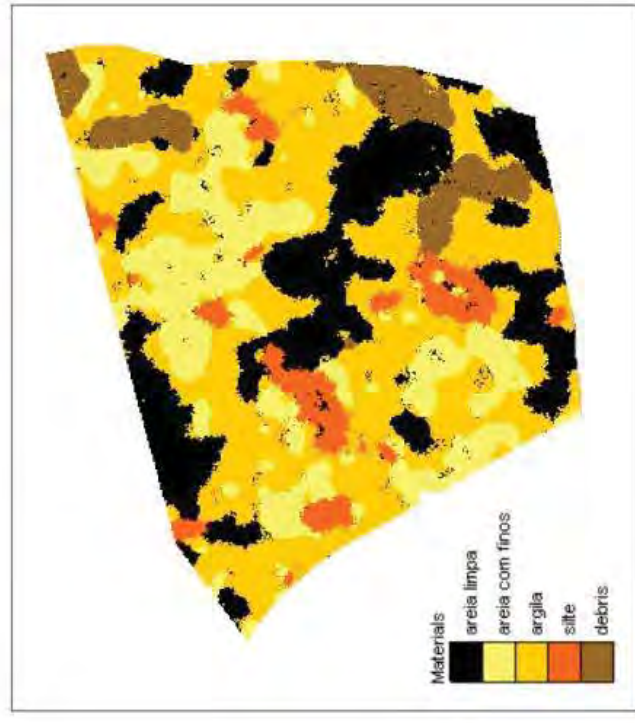
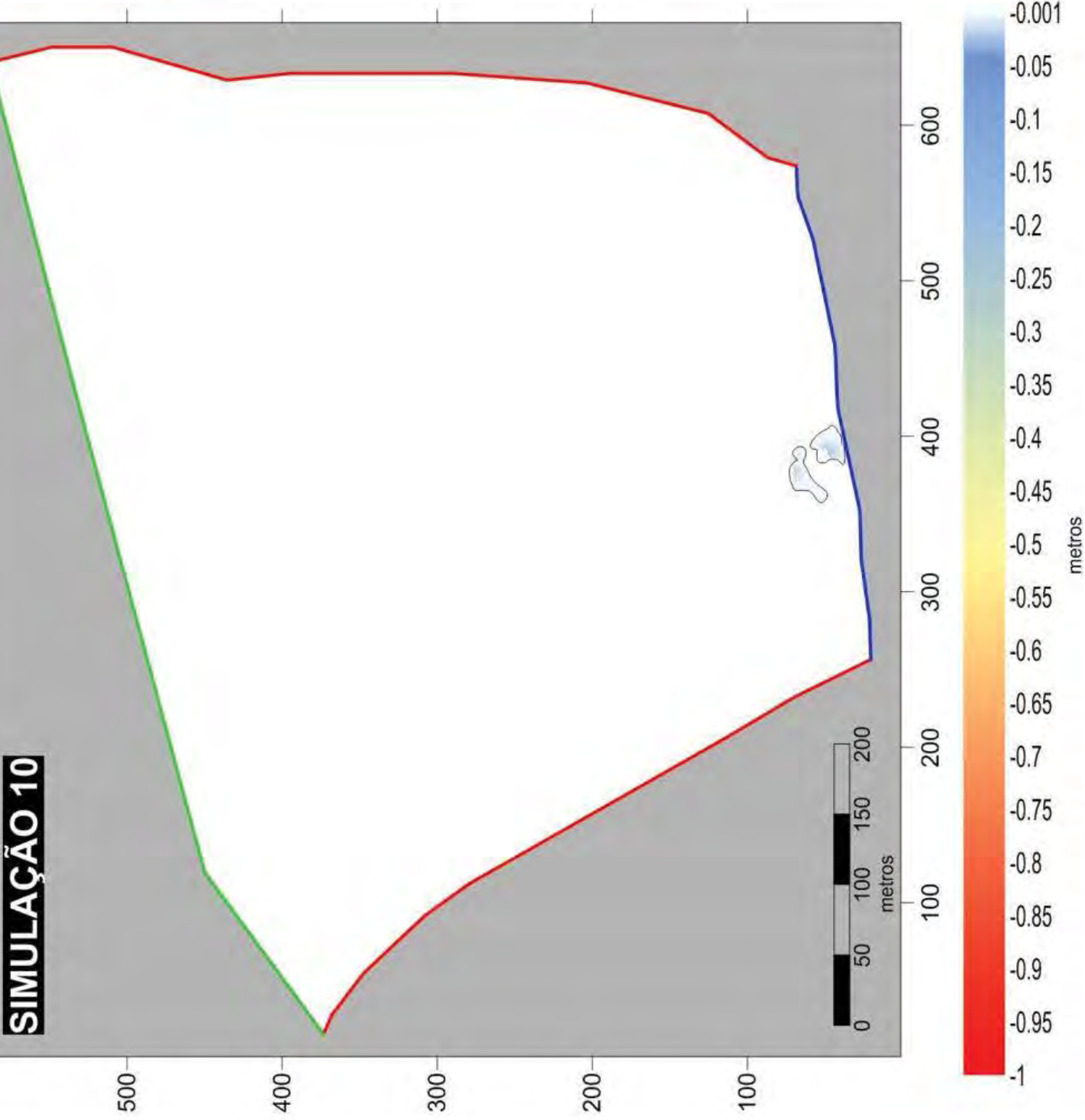


Figura 107. Configuração da zona de captura – Cenário 9.

SIMULAÇÃO 10



LEGENDA

- CÉLULAS INATIVAS
- CARGA HIDRÁULICA ESPECIFICADA ($h = 6,0 \text{ m}$)
- PACOTE RIVER ($h = 1,0 \text{ m}$)
- FLUXO NULO
- LIMITE EXTERNO DA ZONA DE CAPTURA (150 dias)

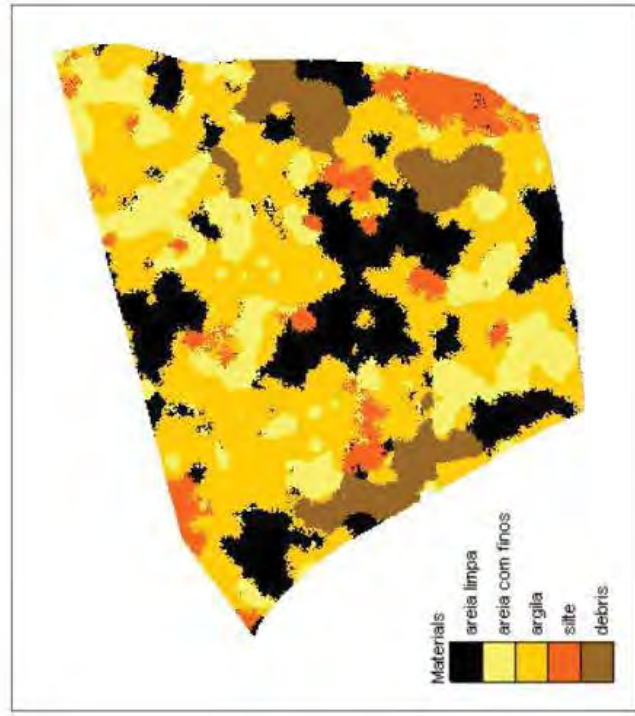


Figura 108. Configuração da zona de captura – Cenário 10.

- **Cenário 5:** a ZC deste cenário tem um comportamento bastante semelhante àquele do Cenário 2, porém, apresenta maior abrangência lateral em relação ao cenário 2, condicionado ao corpo de areia limpa alinhado a extremidade sul da área avaliada, apresentando rebaixamentos inferiores a 0,1 m (**Figura 103**);
- **Cenário 6:** a ZC deste arranjo espacial das condutividades hidráulicas está diretamente associada aos corpos arenosos presentes na porção sul da área avaliada, sendo que na parte centro-sul está um corpo arenoso com finos e para leste ocorre um corpo de areia limpa, assim como um corpo de *debris flows*. O rebaixamento máximo observado para este cenário é de 0,35 m (**Figura 104**);
- **Cenário 7:** a zona de captura simulada para este cenário mostra-se similar àquela do cenário 6, exceto pelo fato de que está limitada para leste, pela existência de corpos argilosos para esta direção. Outra diferença em relação ao cenário 6 é o rebaixamento que naquele caso ocorre até 0,35 m, e neste cenário apresenta rebaixamento de no máximo 0,1 m (**Figura 105**);
- **Cenários 8 a 10:** estes cenários apresentaram resposta bastante similar em relação a configuração das suas respectivas zonas de captura, pois, nas simulações estocásticas, se registram somente corpos argilosos e siltsos, não permitindo grandes zonas de captura, conforme mostrado nas **Figuras 106 a 108**, inclusive com rebaixamentos inexpressivos.

Conforme observado pelas simulações descritas anteriormente, a configuração das zonas de captura de um poço em bombeamento, de acordo com os diferentes cenários de distribuição das litologias simuladas, é bastante diferenciada, sendo mais expressivas quando existem litologias arenosas condicionando o fluxo da água subterrânea e pouco expressivos quando se observa a presença de litologias argilosas a siltsos.

Estas distintas configurações demonstram que a heterogeneidade litológica imprime incertezas na definição de um projeto de remediação que utilize o bombeamento das águas subterrâneas, podendo, inclusive, subestimar ou superestimar a captura de um determinado contaminante, eventualmente presente, consequentemente elevando os custos de remediação ou permitindo a exposição de eventuais receptores, quando estes contaminantes não são devidamente capturados pelo bombeamento.

6. CONCLUSÕES

As conclusões deste trabalho serão divididas em dois aspectos, referentes aos efeitos observados na hidrogeologia e quanto ao gerenciamento de áreas contaminadas.

Quanto à hidrogeologia

Em relação à caracterização hidrogeológica, realizada para toda a área de estudo, foi possível verificar que a quantidade e a qualidade das informações utilizadas permitiram o entendimento satisfatório da área, principalmente quanto à formulação de um modelo geológico-hidrogeológico conceitual regional consistente.

Os resultados obtidos pela simulação numérica de toda a área, em regime de fluxo permanente, são representativos para as condições reais na escala de observação adotada, em nível regional, em função das características indicadas a seguir.

- Foi obtido elevado coeficiente de correlação entre os valores de carga hidráulica medidas em campo e aquelas calculadas pela simulação, indicando que o modelo conceitual estabelecido, representa adequadamente a hidrogeologia na escala regional, pois, a conformação das linhas equipotenciais simuladas assemelha-se àquelas obtidas em campo e os indicadores de calibração mostraram erros mínimos e aceitáveis para as condições hidrogeológicas da área, validando o modelo conceitual estabelecido para a escala regional.
- As variações nos valores de condutividade hidráulica estão diretamente associadas às variações litológicas, conforme observado pelo modelo conceitual e comprovado pela simulação numérica.
- As litologias mais permeáveis são representadas pelos litotipos arenosos, oriundos de depósitos de canais fluviais. Contudo, não é verificada continuidade lateral destes corpos arenosos, sugerindo, assim, que estes depósitos se originaram pela deposição em canais meandrantos. Estes depósitos se alternam lateralmente e verticalmente, de forma interdigitada, com litologias argilosas e siltosas, depositadas nas várzeas entre os canais fluviais, que possuem valores reduzidos de condutividade hidráulica.
- Os valores de recarga excepcionalmente reduzidos são justificados pelo fato de corresponderem ao montante de água necessário para a manutenção dos valores de carga hidráulica medidos em campo, em regime de fluxo permanente (*steady-state*), onde:
 - o O predomínio dos baixos valores de recarga estão associados a grande abrangência de litologias pouco permeáveis (hidrofácies siltosas, argilo-siltosas e argilosas).
 - o Os maiores valores de recarga estão associados à litologias mais permeáveis, sobretudo nas regiões marcadas pela presença de litologias arenosas, e em regiões topograficamente mais elevadas, decrescendo para as regiões argilosas e nas proximidades das zonas de descarga, representadas, regionalmente, pelos Rios Cubatão e Perequê.

- O modelo conceitual inicial foi definido tendo descarga no Rio Cubatão apenas nas 3 primeiras camadas, porém, com a calibração, verificou-se, pelo cálculo do balanço hídrico, que o escoamento de água em porções mais profundas do aquífero é restrita, e uma pequena parcela do montante total de fluxo se dá através do contorno de carga especificada nas camadas 4 a 7, representando menos de 1,0 % do total de água que sai do modelo, mostrando que apesar deste fluxo ocorrer, é pouco significativo, e tem provável descarga nas áreas do Estuário de Santos, o que não foi verificado por este estudo.
- A velocidade de fluxo destas 4 camadas se apresentou bastante limitada e a migração de contaminantes nestas pode ser considerada praticamente inexistente, a depender do tipo de substância que possa estar presente na área de interesse.
- As drenagens (canais, rios e córregos), que cortam a área de estudo, representam as zonas de descarga mais importantes no regime de fluxo local, com aproximadamente 77,0 % de afluxo (saída de água), mesmo sendo adotados valores reduzidos de condutância para estes canais, em função dos mesmos estarem canalizados com concreto.
- A simulação, em escala regional e regime de fluxo permanente, permitiu calibrar, com precisão, a distribuição dos valores de condutividade hidráulica e dos valores de recarga.
- O processo de calibração possibilitou elaborar mapas de distribuição da condutividade hidráulica (K) na zona saturada, que expressam diretamente as diferentes litologias identificadas na área de estudo.

- A distribuição dos tipos litológicos arenosos, indicada pelos valores elevados de condutividade hidráulica, indica que os sedimentos arenosos são descontínuos e delimitados lateralmente por sedimentos argilosos, estes últimos representados por regiões de condutividade hidráulica reduzida, corroborando com a origem fluvial indicada anteriormente.

De acordo com as características descritas acima, destaca-se que, em escala regional, o modelo conceitual foi verificado pelas simulações numéricas, indicando que este é representativo para as condições regionais de fluxo da água subterrânea. Contudo, quando necessária a caracterização em escala de detalhe, as simulações realizadas e o modelo conceitual exigem maior conhecimento da distribuição litológica, em escala local, tendo em vista o alto grau de heterogeneidade em tal escala.

Porém, em função do alto grau de heterogeneidade litológica, mesmo que conduzidas investigações de detalhe na área, incertezas estarão presentes tendo em vista a grande variabilidade espacial das litologias.

Desta forma, foram empregados modelos estocásticos, com base em cadeias de Markov, para a definição dos possíveis cenários de distribuição das litologias presentes na área para o mesmo conjunto de informações, verificando-se que:

- A frequência de ocorrência das litologias consideradas para estas simulações é respeitada, pois, a técnica utilizada tem como premissa respeitar os dados disponibilizados para o cálculo das probabilidades de transição.
- A distribuição espacial das litologias apresenta variações específicas para cada cenário obtido, não tendo similaridade entre os cenários simulados, marcando efetivamente a existência da heterogeneidade litológica local, com variabilidade espacial acentuada, desde pequenos corpos até extensos corpos, para todas as litologias consideradas.

Para avaliar o efeito desta variabilidade espacial, foram simuladas as possíveis configurações das zonas de captura de um poço em bombeamento, situado no limite sul da área, onde observou-se que:

- Considerando-se as mesmas taxas de bombeamento, as diferentes distribuições espaciais da litologia local alteram significativamente a configuração da zona de captura do poço.
- As zonas de captura são mais acentuadas quando presentes corpos litológicos arenosos e são limitadas pela presença de corpos com menor condutividade hidráulica.
- A direção de captura dos poços está diretamente condicionada pela configuração dos corpos arenosos, podendo inclusive mostrar mais de uma direção em cada cenário avaliado.
- As extensões longitudinal e transversal das zonas de captura são incondicionalmente controladas pela configuração dos corpos arenosos, sendo que a presença de litologias menos permeáveis são limitadoras destas extensões, indicando que em litologias com menores condutividades hidráulicas as taxas e volumes de bombeamento serão limitados.
- Os rebaixamentos observados por estas simulações mostraram valores máximos entre 0,1 e 4,0 m, sendo que os maiores valores ocorrem quando presentes litologias argilo-siltosas, argilosas e siltosas.

Quanto ao gerenciamento de áreas contaminadas

As características hidrogeológicas de um local são o controle da migração de contaminantes, mas, também, são os fatores a ser considerados na definição das ações necessárias para a implementação de uma ação de remediação. Desta forma, os resultados obtidos por este trabalho indicam que:

- Quanto à caracterização em nível regional:
 - o A disposição espacial limitada dos litotipos arenosos indica que os sedimentos argilosos, que representam a litologia predominante em subsuperfície, podem atuar como barreira, restringindo a migração de eventuais contaminantes.
 - o A predominância de sedimentos argilosos confere velocidades reduzidas ao fluxo da água subterrânea e, conseqüentemente, na migração de eventuais contaminantes dissolvidos em água subterrânea.
 - o Estas características são importantes na definição e no dimensionamento de técnicas de remediação, bem como na previsão de seu comportamento, sendo que, em litologias arenosas será maior o grau de obtenção de sucesso na aplicação das mais diversas técnicas de remediação, o que é positivo, tendo em vista a migração de contaminantes neste tipo de litologia ser mais rápida.
 - o Portanto, as zonas com condutividades hidráulicas maiores devem ter maior atenção em relação à migração de contaminantes e aquelas onde predominam as litologias argilo-siltosas devem ter concepções diferenciadas em relação à remediação, haja visto a possibilidade de insucesso com as técnicas aplicáveis para litologias arenosas, as quais são as mais consagradas.
 - o Sendo assim, para a elaboração de projetos de remediação na área de estudo, devem ser avaliadas, em detalhe, as características geológico-hidrogeológicas da mesma.

- Quanto à caracterização em nível de detalhe, tem-se que:
 - o A distribuição espacial das litologias pode apresentar diversas configurações para o mesmo conjunto de dados utilizados, o que altera significativamente as condições de fluxo da água subterrânea nesta escala de detalhe.
 - o As diferentes condições de fluxo da água subterrânea, marcadas pelos distintos arranjos espaciais da litologia, condicionam a configuração da zona de captura de bombeamento da água subterrânea, uma das principais técnicas utilizadas para remediação de áreas contaminadas, podendo subestimar ou superestimar a remediação na área, inclusive permitindo que contaminantes não sejam totalmente capturados e possam migrar para jusante.
 - o Não somente a configuração do formato das zonas de captura são afetadas, mas também a intensidade do rebaixamento, o qual é limitado em corpos arenosos e mais acentuados em corpos litológicos argilo-siltosos, que, a depender do tipo de substância em remediação, pode trazer prejuízos na projeção de um sistema de remediação.
 - o Mesmo que os corpos litológicos argilo-siltosos apresentem rebaixamentos mais pronunciados, a abrangência das zonas de captura nestes corpos é limitada, tendo em vista a baixa transmissividade destes corpos, o que é inverso nos corpos litológicos arenosos, também trazendo prejuízos na projeção de um sistema de remediação.
 - o Observa-se, nesta área de estudo, que há uma predominância de corpos argilo-siltosos, mostrando que, geralmente, as técnicas de remediação que se utilizem de bombeamento das águas subterrâneas terão zonas de captura limitadas, condicionando a necessidade de conjugação de técnicas de remediação, incluindo aquelas que não sejam tão consagradas no mercado brasileiro.

- o Em contrapartida, apesar das limitações da remediação nesta área, a migração dos contaminantes também será limitada, aspecto positivo para o gerenciamento de contaminações nesta área.

Sendo assim, para o gerenciamento de áreas contaminadas é essencial o conhecimento geológico-hidrogeológico da área, tanto em escala regional, como na escala de detalhe, devendo utilizá-las conforme as fases do gerenciamento propostas por CETESB (2001), onde:

- O conhecimento regional é de extrema importância para definição das unidades hidroestratigráficas presentes, sua origem, modelos de sedimentação e a relação espacial entre estas unidades.
- A caracterização em nível regional deve subsidiar a definição dos locais mais vulneráveis quanto à possível migração de contaminantes e, também, as possíveis técnicas de remediação a serem aplicadas na área, tendo em vista os diferentes compartimentos geológicos existentes, que condicionam o sucesso de uma determinada técnica de remediação, possibilitando a definição daquelas que terão mais sucesso no local em investigação.
- Em escala de detalhe, é importante a visualização das diferentes possibilidades de distribuição das litologias presentes, utilizando-se métodos probabilísticos, pois, as distintas combinações espaciais das litologias condicionam, consideravelmente, o fluxo da água subterrânea e, consequentemente, o formato, extensão e intensidade das zonas de captura do bombeamento de águas subterrâneas.

A ampla disparidade nas respostas obtidas pelos diferentes cenários simulados revela uma situação dominada por incertezas, no que se refere ao conhecimento geológico de subsuperfície, face à forte heterogeneidade litológica local. Este fato reforça a necessidade de investigações com elevado grau de detalhamento, de modo a minimizar as incertezas no dimensionamento inadequado dos sistemas de remediação.

A utilização de modelos estocásticos permite inferir, qualitativamente e quantitativamente, o grau de incertezas existente na área onde se deseja implantar um sistema de remediação, em função da quantidade e distribuição das informações disponíveis. A existência de variações significativas nas respostas dos sistemas de remediação, verificadas pelos modelos estocásticos, releva a necessidade de aquisição de informações adicionais, tendo em vista que as incertezas presentes são significativas e a eficiência das técnicas de remediação propostas não podem ser asseguradas e dependem de informações detalhadas e de qualidade.

Desta forma, as ações de caracterização apresentadas neste trabalho sugerem a necessidade de se estabelecer uma metodologia de investigação que tenha como objetivo avaliar a hidrogeologia de uma determinada área com base nas características regionais e levando-se em consideração as incertezas associadas à variabilidade espacial das litologias, quando em escala de detalhe.

A experiência na área de estudo demonstra que as corporações, no processo de gerenciamento de áreas contaminadas, devem assegurar a qualidade e a padronização das informações obtidas.

Nesta área de estudo, com base na compilação dos dados disponíveis, principalmente aqueles que foram executados com o objetivo de conhecimento de problemas ambientais, é notável a incompatibilidade das informações, metodologias, técnicas e critérios empregados pelas empresas executoras que realizaram serviços de investigação e remediação no Brasil.

A ausência de coesão das informações obtidas por tais empresas impediram o aprimoramento do modelo geológico conceitual da área, e desta maneira com conseqüente aumento de incertezas quanto ao controle geológico na migração de contaminantes em sub-superfície.

A inexistência de compatibilidade entre as informações obtidas por empresas distintas, inclusive na investigação de um local específico, foi responsável por gastos desnecessários na obtenção de informações redundantes, muitas vezes de baixa qualidade técnica, levando, muitas vezes, a adoção de decisões técnicas equivocadas.

Recomenda-se, portanto, que sejam implementadas ações para o aperfeiçoamento do entendimento das características geológicas/hidrogeológicas no controle de contaminantes no processo de Gerenciamento de Áreas Contaminadas, conforme apresentado a seguir

- Na realização de avaliações ambientais preliminares, é importante que se busque o conhecimento geológico-hidrogeológico da área em estudo, para subsidiar as ações futuras de investigação, onde será possível identificar as áreas mais vulneráveis, conjugando os aspectos operacionais do local e as características levantadas. Em praticamente todos os locais onde se encontram instaladas atividades industriais são obtidos dados geotécnicos, e conseqüentemente geológicos e hidrogeológicos, por meio da execução de sondagens geotécnicas, utilizadas para definição das características construtivas das edificações e de fundações. Sendo assim, as informações de sondagens geotécnicas são relevantes para subsidiar os trabalhos de investigação ambiental subsequentes, tendo em vista a disponibilização de informações preciosas, muitas vezes anterior à realização de alterações no terreno estudado, podendo se formar o modelo conceitual da área, até em nível de detalhe, se for o caso, o qual auxiliará na condução das futuras investigações, delineando os possíveis caminhos e comportamentos de contaminantes que por ventura estejam presentes na área.
- Ainda na avaliação ambiental preliminar, as corporações devem implementar políticas que assegurem aos seus gestores a possibilidade de reconhecer eventos e situações que possam ter sido geradoras de contaminação, contribuindo para a determinação dos locais onde se possa ter a presença de contaminantes.

- Elaboração de padrões normativos para a condução de investigações de modo a se obter uniformidade nas informações obtidas, atendendo à determinação dos órgãos ambientais e, paralelamente, permitindo o aprimoramento progressivo do modelo geológico-hidrogeológico da área. A sucessiva inclusão de informações adicionais permitirá a redução de incertezas, possibilitando a otimização de gastos com investigações adicionais.
- Cadastramento, em plataforma SIG – Sistema de Informações Geográficas, das informações geológicas (descrições litológicas, análises granulométricas, microscopia eletrônica de varredura, fotos, entre outras) e hidrogeológicas (ensaios hidrogeológicos), permitindo a compilação e a integração destas informações e, conseqüentemente, o aperfeiçoamento do entendimento geológico local. A existência de um banco de dados unificado permitirá consultas eficientes e ágeis das informações disponíveis e sua relação com as plumas de contaminação que por ventura sejam identificadas, uma vez que o comportamento destas é função das características geológico-hidrogeológicas.

Por fim, é necessário reforçar que a tradicional negligência em relação ao controle exercido pela presença de heterogeneidades litológicas, tem sido responsável pelos insucessos nos sistemas de remediação, principalmente naqueles que se realiza extração de água subterrânea contaminadas. Sendo assim, faz-se necessária a adoção de abordagens distintas daquelas empregadas atualmente para a caracterização geológica detalhada em áreas marcadas por forte heterogeneidade litológica. A utilização de modelos estocásticos em contextos desta natureza, em detrimento de modelos determinísticos, ganha relevância à medida que tais modelos possibilitam vislumbrar diferentes respostas para o mesmo conjunto de informações, permitindo avaliar o grau de incerteza existente, com descrito por diversos autores.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHERN, J. A.; LILLY, M. R.; HINZMAN, L. D. *Ground-Water Capture Zone Delineation of Hypothetical Systems: Methodology Comparison and Real-World Applications*. American Geophysical Union, Fall Meeting 2003.

ALBERTO, M.C. Fluxo da água subterrânea em sistema de encosta-rio, município de Paulínia: caracterização e simulação numérica. Dissertação de Mestrado, UNESP/IGCE/Rio Claro (SP), 117p., 2005.

ALMEIDA F. F. M. de. Origem e Evolução da Plataforma Brasileira., Rio de Janeiro: 36 p. Departamento Nacional de Produção Mineral - B. Divisão de Geologia e Mineralogia, nº 241, 1976.

ALMEIDA, F. F. M.; CARNEIRO, C. D. Origem e evolução da Serra do Mar. Revista Brasileira de Geociências, v. 28, n. 2, p. 135 - 150, 1998.

ALMEIDA, F. F. M. & HASUI, Y. **O Pré-Cambriano do Brasil**. São Paulo: E. Blücher, 1984. 374p.

ANDERSON, M. P. & WOESSNER, W. W. *Applied Groundwater: Simulation of Flow and Advective Transport*. Academic Press, Inc., 381p., London. 1992.

BEAR, J. *Dynamics of fluids in porous media*. New York, American Elsevier Publishing Company, 764p. New York, 1972.

CAI, G. Q.; QIU, X. SU, T. C. & LIN, Y. K. *Markov process modeling of groundwater contamination problems. Probabilistic Engineering Mechanics*, 11: p.243-250, 1996.

CARLE, S.F. T-PROGS: *Transition Probability Software v2.1*. Hydrologic Sciences Graduate Group, University of California, 1999.

CARLE, S.F. & FOGG, G.E. *Modeling spatial variability with one- and multidimensional continuous-lag Markov chains*. *Mathematical Geology*, v. 29, (2): p. 891–917, 1997.

CETEC. Diagnóstico da situação dos recursos hídricos do Tietê/Batalha – UGRHI-16. São Paulo, p. 13-16 e 22-25, 2002

CETESB – COMPANHIA DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Manual para o Gerenciamento de Áreas Contaminadas. Convênio CETESB/GTZ, 1999/2001.

_____. Procedimento para gerenciamento de áreas contaminadas. Decisão de Diretoria nº 103/2007/C/E, 2007.

CHANG HK, KOWSMANN RO, FIGUEREDO AMF & BENDER AA. 1992. *Tectonics and stratigraphy of the East Brazil rift system: an overview*. *Tectonophysics*, 213: 97–138.

COLE, B. E. & SILLIMAN, S. E. *Utility of Simple Models of Capture Zone Delineation in Heterogeneous Unconfined Aquifers*. *Groundwater*, v.38(5): p. 665-672, 2000.

COPTY, N. K. & FINDIKAKIS, A. N. *Uncertainty analysis of a well capture zone under multiple scales of heterogeneity. Calibration and Reliability In Groundwater Modelling: A Few Steps Closer to Reality. Proceedings of ModelCARE/2002. Prague. Czech Republic. June 2002. IAHS Publ. no. 277, 2002.*

CORDANI, U.G.; NEVES, B.B.N.; FUCK, R.A.; PORTO, R.; THOMAZ FILHO, A.; CUNHA, F.M.B. Estudo preliminar de integração do Pré-Cambriano com os eventos tectônicos das bacias sedimentares brasileiras. *Boletim Ciência-Técnica-Petróleo*, 15, 70p., 1984.

COUTINHO, J.M.V. O falhamento de Cubatão. *Anais do XXV Congresso Brasileiro de Geologia, Boletim Especial nº 1*, p. 130-131 (Resumo), 1971.

CRUZ, O. Contribuição geomorfológica ao estudo de escarpas da Serra do Mar. *Revista do Instituto Geológico*, 8-10, 11(1): p. 9-20, 1980.

DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica; IG - Instituto Geológico; IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo; CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Mapa das águas subterrâneas do Estado de São Paulo. Escala 1:1.000.000 nota explicativa / [coordenação geral Gerônimo Rocha]. Obra em 3 v. Inclui CD-ROM e mapa escala, São Paulo, 2005.

ELFEKI, A.M.M.; UFFINK, G.J.M. & BARENDSE, F.B.J. ***Groundwater Contaminant Transport: Impact of Heterogeneous Characterization***. ISBN 90 5410 665 4. A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 1997.

ENDO, I. & MACHADO, R., 1993. O sistema de cisalhamento transatlântico: um modelo neotectônico transpressional para o neoproterozóico do Brasil Oriental. IV Simp. Nac. Estudos Tectônicos, Belo Horizonte, 12: 356-359

FÚLFARO, V.J. & SUGUIO, K. O cenozóico paulista: gênese e idade. Anais do XXVIII Congresso Brasileiro de Geologia, v.3, SBG, Porto Alegre, 1974.

FÚLFARO, V.J. & PONÇANO, W.L. *Recent tectonic features in the Serra do Mar Region, State of São Paulo, Brazil, and its importance to Engineering Geology*. Proceedings of the International IAEG Congress, v.1, São Paulo, 1974).

GIGLIOTTI, M.S.; OLIVEIRA, R.C. de; DIAS, R.L. & GOBBI, E.S. Caracterização da Compartimentação geomorfológica da região metropolitana da baixada santista - sp a partir do uso de imagens landsat 7 etm+ e análise morfométrica em SIG. EGAL'2009 – 12º Encuentro de Geógrafos de América Latina, Montevideo-UY, Programa on-line, 3 a 7 de Abril de 2009. <Disponível em <http://egal2009.easyplanners.info/>> Consulta realizada em 01/12/2009.

GRAMANI, M. F. Caracterização geológico-geotécnica das corridas de detritos ("debris flows") no Brasil e comparação com alguns casos internacionais.. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 372 p., São Paulo, 2001.

GUADAGNINI, A., & S. FRANZETTI. *Time-Related Capture Zones For Contaminants In Randomly Heterogeneous Formations*. *Groundwater*, 37(2), 253-260, 1999.

HARTT, C.F. *Geologia e Geografia Física do Brasil* (1870). São Paulo, Editora Nacional, 1941, 649p.apud VARGAS, M. Revisão histórico-conceitual dos escorregamentos da Serra do Mar. *Revista Solos e Rochas*, v.22 (1): p. 53-83, 1999.

HASSAN, A.E.; BEKHIT, H.M. & CHAPMAN, J.B. *Using Markov Chain Monte Carlo to quantify parameter uncertainty and its effect on predictions of a groundwater flow model*. *Environmental Modelling & Software*, 24: p.749–763, 2009.

HASUI, Y. & SADOWSKI, G.R. Evolução geológica do Pré-Cambriano na região sudeste do Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências* v. 6(3): p.180-200, 1976.

HASUI, Y.; MIOTO, J.A. & MORALES, N. Geologia do Pré-Cambriano. In: A. Negrão Jr., A.A. Ferreira, R. Alonzo, P.A.C. Luz, F.F. Falconi, R.Q. Frota (Coordenadores), **Solos do Litoral de São Paulo**. São Paulo, Associação Brasileira de Mecânica de Solos. p. 41-67, 1995.

HESSING, J. Estudos geológicos geotécnicos no trecho serra da Rodovia dos Imigrantes. In: Seminário DERSA Rodovia dos Imigrantes, 1, São Paulo: Anais, São Paulo, DERSA, p. 31-46, 1976

INDELMAN, P. LESSOFF, S.C., DAGAN, G.. *Analytical solution to transport in three-dimensional heterogeneous well capture zones. Journal of Contaminant Hydrology* 87: p. 1–21, 2006.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT. Programa Serra do Mar – Estudos Geotécnicos dos Principais Mecanismos de Instabilização na Serra do Mar. Relatório nº 25.957, 1976.

_____. Geologia da Região Administrativa 3 (Vale do Paraíba) e parte da região Administrativa 2 (Litoral). Monografias, n. 1, IPT, São Paulo, 1978.

_____. Levantamentos Básicos nas folhas de Santos e Riacho Grande. Relatório nº 23.394, 1986.

_____. Compartimentação estrutural e evolução tectônica do Estado de São Paulo (Relatório IPT 27.394). IPT/Programa de Desenvolvimento de Recursos Minerais do Estado de São Paulo, São Paulo, 1989.

_____. Mapa geológico do Pré-Cambriano de São Paulo, 1:500.000. UNESP/Programa de Desenvolvimento de Recursos Minerais do Estado de São Paulo, São Paulo, 1993.

_____. Reconhecimento e Caracterização da Potencialidade de Instabilizações na Serra do Mar na Área de Influência do Sistema Anchieta-Imigrantes, Relatório Final. São Paulo-SP. (Relatório Técnico n. 63885), 2002.

JOHNSON, A. M. ***Physical Processes in Geology***. Freeman, Cooper & Co., San Francisco, 1970

KANJI, M.A.; MASSAD, F. & CRUZ, P.T. *Debris flow affecting the Cubatão Oil Refinery, Brazil*. Landslides 5:71–82, Springer-Verlag, 2007.

KANJI, M.A.; CRUZ, P.T.; MASSAD, F. & ARAÚJO FILHO, H.A. *Basic and common characteristics on debris flows*. In: Anais... Panamerican Symposium Landslides, 2º COBRAE, p.223-231, Rio de Janeiro/RJ, 1997.

KINZELBACH, W.; VASSOLO, S. & LI, G.-M. *Determination of capture zones of wells by Monte Carlo simulation. Calibration and Reliability in Groundwater Modelling (Proceedings of the ModelCARE 96 Conference held at Golden, Colorado, September 1996)*. IAHS Publ. no. 237, 1996.

KRESIC, N. ***Quantitative Solutions in Hydrogeology and Groundwater Modeling***. Boca Raton: Lewis Publishers. 445 p., 1997.

LEE, S-Y.; CARLE, S. F. & FOGG, G. E. *Geologic heterogeneity and a comparison of two geostatistical models: Sequential Gaussian and transition probability-based geostatistical simulation*. *Advances in Water Resources*, 30: p. 1914-1932, 2007.

LU, Z. M. & ZHANG, D. X. *On stochastic study of well capture zones in bounded, randomly heterogeneous media*. *Water Resources Research*, v. 39 (4): p. 1100-1111, 2003.

LU, Z. M.; HIGDON, D. M. & ZHANG, D. X. *A Markov Chain Monte Carlo Method for the Groundwater Inverse Problem*. 15th International Conference on Computational Methods in Water Resources. 2000.

MACHADO FILHO, J.G. Estabilidade de encostas e condicionantes geológicos, geomorfológicos e estruturais num trecho da Serra de Cubatão, Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências/USP, 172p., 2000.

MASSAD, F. Baixada Santista: Implicações da História Geológica no Projeto de Fundações. Solos e Rochas - Revista Latino-Americana de Geotecnia, v.22(1): p.3-49, São Paulo/SP, 1998.

MASSAD, F.; CRUZ, P.T.; KANJI, M.A. & ARAÚJO FILHO, H.A. *Comparison between estimated and measured debris flow discharges and volume of sediments*. In: Anais... Panamerican Symposium Landslides, 2º COBRAE: p.213-222, Rio de Janeiro/RJ, 1997.

MCDONALD, M. G. & HARBAUGH, B. R. *A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model*. Techniques of Groundwater of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey, Book 6, Chapter A1. Washington: US Government Printing Office, 1988.

OLIVEIRA, A.I & LEONARDOS, O.H. Geologia do Brasil. 2ª Ed., Serv. Inf. Agrícola, Série Didática, nº 2, 813p., Rio de Janeiro, 1943.

PEDE, M.A.Z. Caracterização da condutividade hidráulica do Embasamento Cristalino Alterado na Região Metropolitana de São Paulo. Dissertação de Mestrado apresentada junto ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2004.

PIRAZZOLI, P. A. *World Atlas of Holocene: Sea Level Changes*. New York/EUA: Elsevier. 300p., 1991.

PONÇANO, W.L.; CARNEIRO, C.D.R.; BISTRICHI, C.A.; ALMEIDA, F.F.M.; PRANDINI, F.L. Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo. IPT- Série Monografias-5, São Paulo. 1981.

PRUDIC, D.E. *Documentation of a Computer Program to Simulate Stream-Aquifer Relations Using a Modular Finite-Difference Groundwater Flow Model*, U.S. Geological Survey, Open-File Report 88-729. 1989

RICCOMINI, C. Tectônica e sedimentação no sistema de rifts continentais da Serra do mar (bacias de Volta Redonda, Resende, Taubaté e São Paulo). In: Simpósio de Geologia, 1. Anais, Rio de Janeiro, SBG, p. 253-298, 1987.

RIJUD, N. C.; HARTER, T.; WEISSMANN, G. S. & FOGG, G. E. *Conditional geostatistical modelling of an alluvial aquifer system characterized by poor-quality shallow groundwater. Calibration and Reliability in Groundwater Modelling, Proceedings of the ModelCARE'99 Conference, Zurich, Switzerland, September 1999.* IAHS Publication n° 265, 2000.

RODRIGUES, R. Características Geológicas e Geotécnicas Intervenientes na Estabilidades de Massas Coluviais da Serra do Mar. Dissertação. EESC-USP. São Carlos-SP. 116p, 1992.

SADOWSKI, G. R. Tectônica da Serra do Cubatão, SP. São Paulo. Instituto de Geociências/USP. Tese de Doutorado, 1974.

SADOWSKI, G. R. A Megafalha de Cubatão no Sudeste Brasileiro. Boletim IG-USP, Série Científica, vol 22: p. 15-28, 1991.

SADOWSKI, G. R. & MOTIDOME, M. *Brazilian Megafaults*. Revista Geologica del Chile, v. 31, n. Especial, p. 61-75, 1987.

SCHLUMBERGER WATER SERVICES. *Visual MODFLOW Groundwater Modeling Software v. 4.2*. 2008.

SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D. A.; DERZE, G. R.; ASMUS, H. E. Geologia do Brasil. DNPM. 86-87p., 1984.

SHARP JR., J.M.; SHI, M. & GALLOWAY, W.E. *Heterogeneity of fluvial systems – control on density-driven flow transport*. Environmental & Engineering Geology, vol IX (1): p. 5-17. Association of Engineering Geologists, Geological Society of America, Feb/2003.

SPITZ, K. & MORENO, J. *A Practical Guide to Groundwater and Solute Transport Modeling*. New York : John Wiley e Sons. Inc. 461 p., 1996.

SUGUIO, K. & MARTIN, L. Formações Quaternárias Marinhas do Litoral Paulista e Sul Fluminense. Publicação Especial nº 1. In: *International Symposium on Coastal Evolution in the Quaternary*, 55p., São Paulo/SP, 1978.

SUGUIO, K. & MARTIN, L. Geologia do Quaternário. In: FALCONNI, F.F. & NIGRO JR., A. **Solos do Litoral Paulista**. ABMS/São Paulo, p. 69-97, 1994.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. *Basics of Pump-and-Treat Ground-Water Remediation Technology*. Publ. EPA/600/8-90/003, Mar/1990.

_____. *A Systematic Approach for Evaluation of Capture Zones at Pump and Treat Systems. Final Project Report*. Publicação nº EPA/600/R-08/003, Jan/2008.

VAN LEEUWEN, M.; BUTLER, A. P.; TOMPKINS, J. A. & STROET, C. B. M. TE. *Stochastic well capture zones in fully, leaky, and randomly confined, heterogeneous aquifers. Calibration and Reliability In Groundwater Modelling (Proceedings of the ModelCARE 99 Conference held at Zurich, Switzerland, September 1999)*. IAHS Publ. no. 265, 2000.

VARGAS, M. Revisão histórico-conceitual dos escorregamentos da Serra do Mar. *Revista Solos e Rochas*, v.22 (1): p. 53-83, 1999.

WANG, H. F. & ANDERSON, M. P. ***Introduction to Growdwater Modeling: Finite Difference and Finite Element Methods***. Sand Diego, California, USA: Academic Press. 237 p. , 1982.

WEISSMANN, G.S. *Application Of Transition Probability Geostatistics In A Detailed Stratigraphic Framework. Three-Dimensional Geological Mapping for Groundwater Applications Workshops*, 2005. Disponível em <http://www.isgs.illinois.edu/research/3DWorkshop/2005/pdf-files/weissman2005.pdf>

WEISSMANN, G.S. & FOGG, G.E. *Multi-scale alluvial fan heterogeneity modeled with transition probability geostatistics in a sequence stratigraphic framework*. *Journal of Hydrology*, v. 226: p. 48-65, 1999.

WOLLE, C.M. Microescorregamentos na Serra do Mar. In: *Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia*, Rio de Janeiro, Anais, v.1: p. 773-785, 1981.

WOLLE, C.M. & CARVALHO, C.S. Deslizamentos em Encostas na Serra do Mar – Brasil. In: *Solos e Rochas*, São Paulo, ABMS, v 12: p. 27-36, 1989.

YEH, T.-C. J. & MOCK, P. A. *A Structured Approach for Calibrating Steady-State Ground-Water Flow Models*. *Groundwater*, 34 (3): 444-450, 1997.

ZALÁN PV, WOLFF S, CONCEIÇÃO JCJ, ASTOLF MAM, VIEIRA IS, APPI VT & ZANOTTO OA. Tectônica e sedimentação da Bacia do Paraná. In: Simpósio sul-brasileiro de geologia, III, Curitiba: Sociedade Brasileira de Geologia, 1: 441-473, 1987

ZHANG, D. X. & LU, Z. M.. *Stochastic delineation of well capture zones. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* Volume 18, Number 1, 39-46, 2004