



# **MODELAGEM NUMÉRICA DA HIDRODINÂMICA E DOS PROCESSOS DE INTRUSÃO SALINA NO RIO ARARANGUÁ (SC)**

**Preparado para:**

**Acquaplan Tecnologia e Consultoria Ambiental Ltda.**

**Preparado por:**

**Coastal Planning & Engineering do Brasil**

**Outubro de 2010**



## ÍNDICE DE REVISÕES

REV	DESCRIÇÃO E/OU FOLHAS ATINGIDAS								
0	ORIGINAL								
	REV. 0	REV. A	REV. B	REV. C	REV. D	REV. E	REV. F	REV. G	REV. H
DATA	20/10/2010								
PROJETO	BR55								
EXECUÇÃO	João/Fábio								
VERIFICAÇÃO	Leandro								
APROVAÇÃO	Lindino								
AS INFORMAÇÕES DESTE DOCUMENTO SÃO PROPRIEDADE DA COASTAL PLANNING & ENGINEERING DO BRASIL, SENDO PROIBIDA A UTILIZAÇÃO FORA DA SUA FINALIDADE.									
A IMPRESSÃO OU REPRODUÇÃO DESTE DOCUMENTO TORNA A CÓPIA NÃO CONTROLADA.									



# MODELAGEM NUMÉRICA DA HIDRODINÂMICA E DOS PROCESSOS DE INTRUSÃO SALINA NO RIO ARARANGUÁ (SC)

## SUMÁRIO EXECUTIVO

A **Coastal Planning & Engineering do Brasil** foi solicitada pela **Acquaplan Tecnologia e Consultoria Ambiental** para realizar um estudo de modelagem numérica da intrusão salina no rio Araranguá, localizado no litoral sul do Estado de Santa Catarina (SC). O objetivo do estudo é determinar possíveis mudanças nos padrões de intrusão salina associadas às alternativas de retificação e fixação da barra do rio Araranguá, empreendimento que se pretende licenciar junto ao IBAMA.

Foram considerados 4 diferentes cenários de simulação, sendo um o cenário atual e três alternativas de fixação da barra com diferentes configurações de estruturas e definições da batimetria utilizada pelo modelo. A fim de quantificar a influência das estruturas propostas pelas três alternativas, foram analisadas as mudanças nos padrões de transporte de sal para o interior do sistema estuarino.

A modelagem numérica foi executada com o modelo numérico **Delft3D**, desenvolvido pela **Deltares**, sendo considerada a ferramenta mais avançada na atualidade para simulações de ambientes costeiros, estuarinos e fluviais. Para a modelagem da cunha salina foi utilizado o módulo **Delft3D-Flow**.

A batimetria ao longo da área modelada foi definida com base em uma compilação de dados digitalizados de cartas náuticas fornecidas pela DHN e dados provenientes de levantamentos batimétricos realizados em campo.

O modelo hidrodinâmico foi calibrado com dados de corrente e nível do mar medidos na área de estudo no período compreendido entre os dias 24/08/2010 e 08/09/2010. Adicionalmente, o modelo de advecção/difusão de sal foi aferido utilizando dados de perfis verticais medidos ao longo do sistema estuarino.

O objetivo do estudo foi avaliar a influência de 3 diferentes alternativas de fixação da foz do rio nos padrões de intrusão salina no estuário.

Os cenários simulados com as alternativas propostas mostram que, em determinadas



condições de vazão, há um aumento na salinidade do rio em relação ao cenário atual. Em condições de vazão mais elevadas as diferenças se restringem a regiões situadas mais a jusante e mais profundas (próximas ao fundo), devido a uma menor penetração da cunha salina ao longo do estuário. Os resultados da simulação do cenário atual considerando vazão Q15 não mostraram águas salinas no corpo dos rios, sendo essa distribuição restrita à região da desembocadura. Já as simulações considerando as 2 alternativas de intervenção mostraram águas com salinidade de até 35 ups adentrando o Rio Araranguá, mas limitadas à porção inferior da coluna d'água (próxima ao fundo). Para eventos de vazão intermediária, foram observadas diferenças de salinidade entre o cenário atual e 2 alternativas, com valores variando entre 10 a 15 ups, na camada superficial da coluna d'água, entre a balsa e a ponte da BR-101.

Segundo os resultados do estudo, o aprofundamento do canal na desembocadura do Rio Araranguá favorece a penetração da cunha salina. As profundidades na região da desembocadura, para o cenário atual, não ultrapassam 2,5 m. Nos resultados associados às simulações considerando o cenário atual, foi observada uma maior retenção da água salgada proveniente do mar na desembocadura do sistema. Nos resultados dos modelos considerando o cenário atual, independente das vazões atribuídas, não foram observados valores de salinidade superiores a 30 ups nas regiões localizadas a montante da desembocadura. Já para as alternativas de intervenção propostas, nas quais a profundidade da desembocadura ultrapassa os 5 m, são observados valores de salinidade de até 35 ups em regiões situadas nas proximidades da desembocadura, para todas as vazões simuladas. Isso indica que a profundidade do canal tem um papel fundamental no padrão de intrusão salina, permitindo, ou não, a excursão de massas d'água com salinidades maiores para o interior do estuário.

Dentre as alternativas propostas, a alternativa 3, com o fechamento da desembocadura atual, foi a que mostrou menor alteração no padrão de intrusão da água salgada. Entretanto, a diferença entre as três alternativas estudadas é muito pequena quando comparada com as diferenças em relação ao cenário atual. Adicionalmente, o estudo dos efeitos das alternativas de fixação da desembocadura do rio Araranguá no comportamento morfológico da região (CPE, 2009) indicou tendência de fechamento da desembocadura atual após as obras de abertura e fixação da nova desembocadura (alternativas 1 e 2).



## ÍNDICE GERAL

1.	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	DESCRIÇÃO E LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	1
2.	MODELAGEM NUMÉRICA .....	3
2.1	MODELO HIDRODINÂMICO DELFT-FLOW.....	3
2.2	GRADES NUMÉRICAS .....	5
3.	DADOS DE ENTRADA DO MODELO.....	9
3.1	BATIMETRIA .....	9
3.2	MARÉS E CORRENTES .....	12
3.3	HIDROLOGIA .....	17
3.4	SALINIDADE .....	19
4.	CALIBRAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO .....	20
4.1	CALIBRAÇÃO PARA MARÉS.....	21
4.2	CALIBRAÇÃO PARA CORRENTES .....	23
4.3	CALIBRAÇÃO PARA O TRANSPORTE DE SAL .....	27
5.	CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO .....	33
5.1	CENÁRIO ATUAL.....	33
5.2	ALTERNATIVA 1 (PROJETO INPH).....	34
5.3	ALTERNATIVA 2 (PROJETO INPH ABERTO) .....	35
5.4	ALTERNATIVA 3 (PROJETO INPH ABERTO, COM CANAL FECHADO POR DIQUE).....	36
6.	ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA OBRA NA INTRUSÃO SALINA .....	37
7.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	107
8.	AGRADECIMENTOS .....	109
9.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	110



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização da área de estudo. ....	2
Figura 2: Grade computacional em coordenadas $Z$ (painel esquerdo) e coordenadas $\sigma$ (painel direito).....	4
Figura 3: Grade numérica utilizada para a simulação de penetração da cunha salina. ....	5
Figura 4: Detalhe da grade numérica na região da cidade de Araranguá.....	6
Figura 5: Detalhe da grade numérica na região do Morro dos Conventos, próximo à desembocadura.....	6
Figura 6: Gráfico esquemático mostrando a discretização vertical de uma seção de grade entre a embocadura do sistema e a cidade de Araranguá.....	8
Figura 7: Moto aquática ( <i>jet sky</i> ) utilizada nos levantamentos batimétricos ao largo da praia de Araranguá. É possível observar a haste de suporte do transdutor. ....	10
Figura 8: Batimetria final, interpolada e projetada na grade numérica do modelo a partir do módulo Delft3D-QUICKIN. ....	11
Figura 9: Constantes harmônicas de Araranguá – SC. Fonte: FEMAR (2000). ....	12
Figura 10. Localização do ponto de medição nível e corrente utilizado no processo de calibração do modelo hidrodinâmico.....	14
Figura 11. Maré astronômica (filtrada) e medida (painel superior) e maré meteorológica (painel inferior) observada para o período de 24/08/2010 a 08/09/2010.....	15
Figura 12. Maré astronômica (filtrada) e medida (painel superior) e maré meteorológica (painel inferior) observada - Porto de Imbituba.....	16
Figura 13. Relação entre a vazão e a cota para o Rio Itoupava de dados históricos entre 01/01/2000 e 31/08/2004. ....	17
Figura 14: Gráficos das séries temporais da maré medida e calculada pelo modelo.....	22
Figura 15: Série temporal das componentes $u$ e componente $v$ da corrente medida (linha azul) e calculada pelo modelo (linha vermelha) para a célula 1 (fundo da coluna d'água).....	24
Figura 16: Série temporal das componentes $u$ e componente $v$ da corrente medida (linha azul) e calculada pelo modelo (linha vermelha) para a célula 5 (meio da coluna d'água). ....	25
Figura 17: Série temporal das componentes $u$ e componente $v$ da corrente medida (linha azul)	



e calculada pelo modelo (linha vermelha) para a célula 9 (superfície da coluna d'água). .....	26
Figura 18: Mapa de velocidades integradas na vertical para um setor do Rio Araranguá (imagem: Google Earth). .....	27
Figura 19: Mapas de salinidade (cores em ups) referente ao modelo rodado no período de medição dos dados de correntes e maré (vazão Q90). Salinidade na camada superficial (acima) e salinidade junto ao fundo (abaixo).....	29
Figura 20: Seções longitudinais acompanhando o Rio Itoupava – painel superior: cenário atual; painel inferior: alternativas de fixação da barra.....	30
Figura 21: Seções longitudinais acompanhando o Rio Mãe Luzia. – painel superior: cenário atual; painel inferior: alternativas de fixação da barra.....	31
Figura 22: Perfil longitudinal dos rios Araranguá/Itoupava (painel superior) e dos rios Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) com os valores de salinidade (cores em ups). .....	32
Figura 23: Cenário Atual. Batimetria em metros (MSL). A escala de cores limita a apresentação de profundidades de até 20 m.....	33
Figura 24: Cenário proposto pelo INPH, com as estruturas de fixação representadas pelos polígonos pretos. Batimetria em metros (MSL). A escala de cores limita a apresentação de profundidades de até 20 m. ....	34
Figura 25: Cenário de fixação da Alternativa 2, estruturas de fixação representadas pelos polígonos pretos. Batimetria em metros (MSL). A escala de cores limita a apresentação de profundidades de até 20 m. ....	35
Figura 26: Cenário de fixação da Alternativa 3, estruturas de fixação representadas pelos polígonos pretos. Batimetria em metros (MSL). A escala de cores limita a apresentação de profundidades de até 20 m. ....	36
Figura 27: Série temporal de maré usada nas simulações das alternativas.....	38
Figura 28: Série temporal (últimos 15 dias) de nível e os tempos pontuais para análise de intrusão salina. ....	38
Figura 29: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário atual, vazão Q95, em período de maré cheia de quadratura. ....	40
Figura 30: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe	



Luzia (painel inferior) do cenário atual, vazão Q95, em período de maré baixa de quadratura. .....	41
Figura 31: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário atual, vazão Q95, em período de maré cheia de sizígia.....	42
Figura 32: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário atual, vazão Q95, em período de maré baixa de sizígia. ...	43
Figura 33: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário atual, vazão Q55, em período de maré cheia de quadratura. .....	44
Figura 34: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário atual, vazão Q55, em período de maré baixa de quadratura. .....	45
Figura 35: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário atual, vazão Q55, em período de maré cheia de sizígia.....	46
Figura 36: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário atual, vazão Q55, em período de maré baixa de sizígia. ...	47
Figura 37: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário atual, vazão Q15, em período de maré cheia de quadratura. .....	48
Figura 38: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário atual, vazão Q15, em período de maré baixa de quadratura. .....	49
Figura 39: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário atual, vazão Q15, em período de maré cheia de sizígia.....	50
Figura 40: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário atual, vazão Q15, em período de maré baixa de sizígia. ...	51
Figura 41: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 1, vazão Q95, em período de maré cheia de quadratura. ....	52
Figura 42: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe	





Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 1, vazão Q95, em período de maré baixa de quadratura. ....	53
Figura 43: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 1, vazão Q95, em período de maré cheia de sizígia. ....	54
Figura 44: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 1, vazão Q95, em período de maré baixa de sizígia. ....	55
Figura 45: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 1, vazão Q55, em período de maré cheia de quadratura. ....	56
Figura 46: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 1, vazão Q55, em período de maré baixa de quadratura. ....	57
Figura 47: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 1, vazão Q55, em período de maré cheia de sizígia. ....	58
Figura 48: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 1, vazão Q55, em período de maré baixa de sizígia. ....	59
Figura 49: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 1, vazão Q15, em período de maré cheia de quadratura. ....	60
Figura 50: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 1, vazão Q15, em período de maré baixa de quadratura. ....	61
Figura 51: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 1, vazão Q15, em período de maré cheia de sizígia. ....	62
Figura 52: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 1, vazão Q15, em período de maré baixa de	



sizígia.....	63
Figura 53: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 2, vazão Q95, em período de maré cheia de quadratura. ....	64
Figura 54: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 2, vazão Q95, em período de maré baixa de quadratura. ....	65
Figura 55: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 2, vazão Q95, em período de maré cheia de sizígia.....	66
Figura 56: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 2, vazão Q95, em período de maré baixa de sizígia.....	67
Figura 57: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 2, vazão Q55, em período de maré cheia de quadratura. ....	68
Figura 58: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 2, vazão Q55, em período de maré baixa de quadratura. ....	69
Figura 59: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 2, vazão Q55, em período de maré cheia de sizígia.....	70
Figura 60: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 2, vazão Q55, em período de maré baixa de sizígia.....	71
Figura 61: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 2, vazão Q15, em período de maré cheia de quadratura. ....	72
Figura 62: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 2, vazão Q15, em período de maré baixa de quadratura. ....	73



Figura 63: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 2, vazão Q15, em período de maré cheia de sizígia.....	74
Figura 64: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 2, vazão Q15, em período de maré baixa de sizígia.....	75
Figura 65: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 3, vazão Q95, em período de maré cheia de quadratura.....	76
Figura 66: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 3, vazão Q95, em período de maré baixa de quadratura.....	77
Figura 67: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 3, vazão Q95, em período de maré cheia de sizígia.....	78
Figura 68: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 3, vazão Q95, em período de maré baixa de sizígia.....	79
Figura 69: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 3, vazão Q55, em período de maré cheia de quadratura.....	80
Figura 70: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 3, vazão Q55, em período de maré baixa de quadratura.....	81
Figura 71: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 3, vazão Q55, em período de maré cheia de sizígia.....	82
Figura 72: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 3, vazão Q55, em período de maré baixa de sizígia.....	83
Figura 73: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe	



Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 3, vazão Q15, em período de maré cheia de quadratura. ....	84
Figura 74: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 3, vazão Q15, em período de maré baixa de quadratura. ....	85
Figura 75: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 3, vazão Q15, em período de maré cheia de sizígia. ....	86
Figura 76: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 3, vazão Q15, em período de maré baixa de sizígia. ....	87
Figura 77: Pontos de controle utilizados para a apresentação das variações de salinidade ao longo do tempo. ....	89
Figura 78: Série temporal de salinidade próximo da balsa de Araranguá, para os experimentos com vazão Q95. ....	90
Figura 79: Série temporal de salinidade próximo da balsa de Araranguá, para os experimentos com vazão Q55. ....	91
Figura 80: Série temporal de salinidade próximo da balsa de Araranguá, para os experimentos com vazão Q15. ....	92
Figura 81: Série temporal de salinidade próximo da localidade de Manhoso, para os experimentos com vazão Q95. ....	93
Figura 82: Série temporal de salinidade próximo da localidade de Manhoso, para os experimentos com vazão Q55. ....	94
Figura 83: Série temporal de salinidade próximo da localidade de Manhoso, para os experimentos com vazão Q15. ....	95
Figura 84: Série temporal de salinidade próximo da ponte da BR-101, para os experimentos com vazão Q95. ....	96
Figura 85: Série temporal de salinidade próximo da ponte da BR-101, para os experimentos com vazão Q55. ....	97
Figura 86: Série temporal de salinidade próximo da ponte da BR-101, para os experimentos	



com vazão Q15. ....	98
Figura 87: Série temporal de salinidade próximo ao Rio Itoupava, para os experimentos com vazão Q95. ....	99
Figura 88: Série temporal de salinidade próximo ao Rio Itoupava, para os experimentos com vazão Q55. ....	100
Figura 89: Série temporal de salinidade próximo ao Rio Itoupava, para os experimentos com vazão Q15. ....	101
Figura 90: Série temporal de salinidade próximo ao Rio Mãe Luzia, para os experimentos com vazão Q95. ....	102
Figura 91: Série temporal de salinidade próximo ao Rio Mãe Luzia, para os experimentos com vazão Q55. ....	103
Figura 92: Série temporal de salinidade próximo ao Rio Mãe Luzia, para os experimentos com vazão Q15. ....	104

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Discretização vertical adotada na grade numérica de simulação de cunha salina. ....	7
Tabela 2: Curva de Permanência para os rios Itoupava (dados da estação Taquaruçu entre 1943 a 2004 - ANA), Mãe Luíza (dados da estação Foz Manuel Alves entre 1977 e 2004 - ANA) e Manoel Alves (dados da estação Forquilha entre 1942 a 2004 - ANA).....	18
Tabela 3: Dados de vazão utilizados na simulação de calibração do modelo numérico.....	20
Tabela 4: Parâmetros do modelo hidrodinâmico. ....	21
Tabela 5: Distâncias das células de medição do Aquadopp® em relação à superfície.....	23
Tabela 6: Vazões utilizadas nos modelos de análise da influência das alternativas (m <sup>3</sup> /s).....	37



# 1. INTRODUÇÃO

O presente relatório descreve os procedimentos de implementação e os resultados da modelagem numérica computacional dos processos de circulação hidrodinâmica e advecção/difusão de sal na região do rio Araranguá, localizado no litoral sul do Estado de Santa Catarina (SC). O objetivo do estudo foi avaliar a influência de 3 (três) diferentes alternativas de fixação da foz do rio nos padrões de intrusão salina no estuário.

Segundo INPH (1993), diversos estudos relacionados à implantação de estruturas para fixação da desembocadura já foram realizados na região de Araranguá, cuja finalidade é reduzir os efeitos das inundações e facilitar a navegação. Um desses estudos foi conduzido pelo próprio INPH, no ano de 1993.

## 1.1 DESCRIÇÃO E LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O Estado de Santa Catarina possui 293 municípios, distribuídos em 10 regiões hidrográficas, um vasto planalto e duas serras-Serra Geral e Serra do Mar. Sua zona costeira é constituída por 13 municípios, distribuídos em sete bacias hidrográficas.

A área de estudo (Figura 1) está localizada no sul do Estado de Santa Catarina, a aproximadamente 200 km ao sul da capital Florianópolis. A Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá apresenta escoamento em direção ao mar, assumindo uma direção oeste-leste (W-E). Segundo D'Aquino *et al.* (2008), a bacia hidrográfica abrange uma área de 3.020 km<sup>2</sup>, sendo formada pela confluência dos rios Itoupava e Mãe Luzia, recebendo mais um tributário próximo à desembocadura, o rio dos Porcos. O rio Itoupava é formado pelos rios da Pedra, Amola Faca, Turvo e Jundiá. Já o rio Mãe Luzia apresenta como afluentes os rios Guarapari, do Cedro, Manuel Alves, Sangão e Fiorita (SANTA CATARINA, 1997). Nos últimos 7 km do rio, o curso está voltado para a direção nordeste, é paralelo à linha de costa, com seu canal situado entre o continente e a barreira arenosa (ilha-barreira) que limita o canal do oceano adjacente.

O encontro de água doce do rio e de água salgada do mar, em regiões de micro-maré e dominadas pela descarga fluvial e pelo processo de entranhamento, é classificado como um estuário de cunha salina (Miranda, 2002). Esses ambientes possuem grande estratificação vertical, com uma haloclina bem definida. A camada acima da haloclina é dominada pela circulação rio abaixo, enquanto a camada abaixo é dominada pela lenta advecção de água salgada. Devido às variações da descarga e da maré, a cunha salina não se mantém

estacionária, movendo-se lentamente enquanto busca uma posição de equilíbrio em resposta às variações das forçantes (Stommel, 1953a *apud* Miranda, 2002). Em situações em que a energia de maré é alta e a descarga fluvial se torna secundária (eventos de baixa vazão), pode ocorrer um processo de mistura acentuado, erosionando a termoclina. Nesse caso, o tipo de estuário é denominado parcialmente misturado.

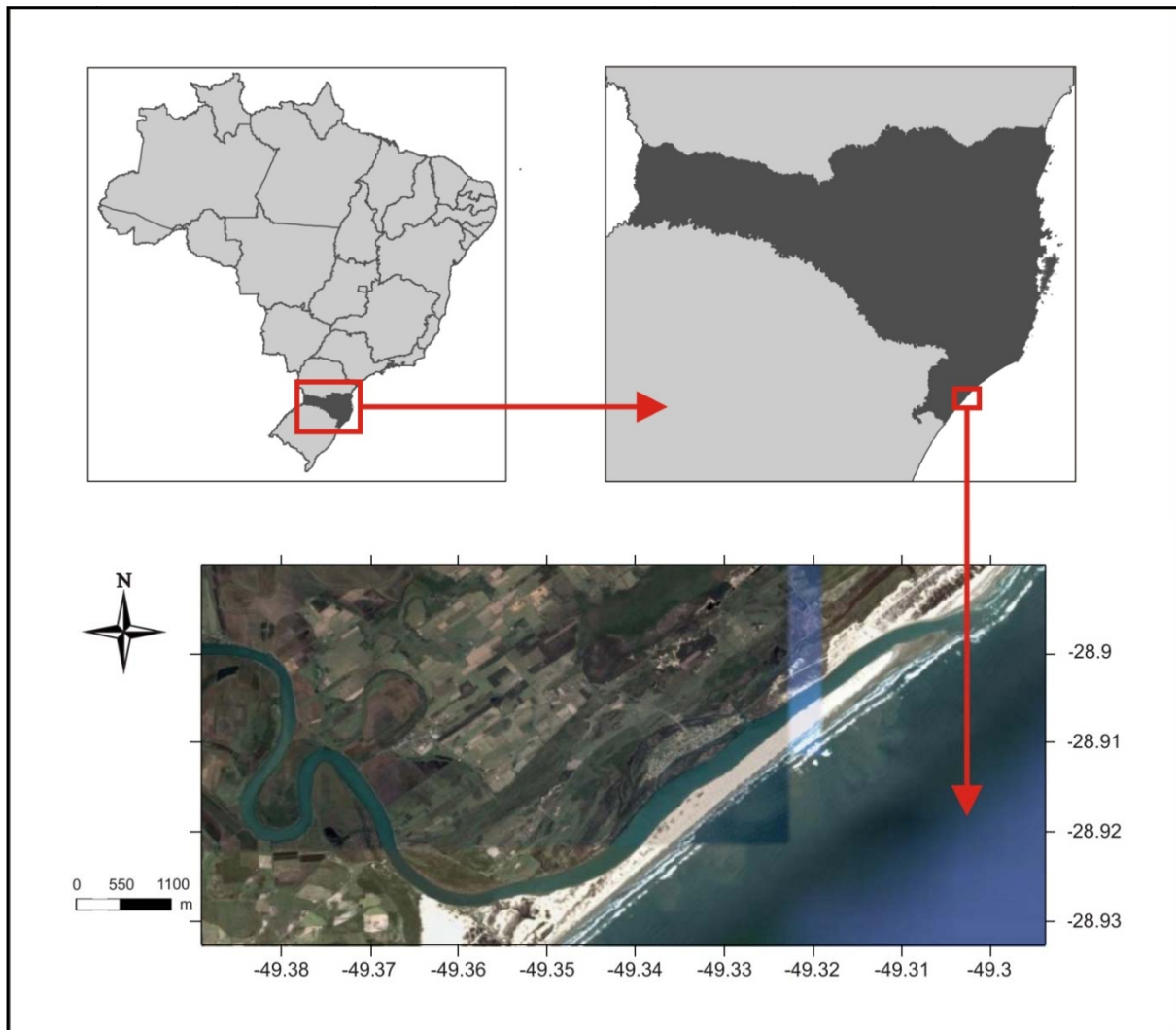


Figura 1. Localização da área de estudo, região do estuário do rio Araranguá.



## 2. MODELAGEM NUMÉRICA

Para o presente estudo foi utilizado o modelo numérico *Delft3D*, desenvolvido pela *Deltares*, em Delft, Holanda. O *Delft3D* constitui-se em um avançado sistema de modelos numéricos 2D/3D (duas e três dimensões) que inclui vários módulos para possibilitar a simulação de processos costeiros complexos, tais como hidrodinâmica, geração e propagação ondas, transporte de sedimentos e mudanças na morfologia (erosão e deposição de sedimentos, variação da topografia de fundo e da linha de costa) e qualidade de água (e.g. advecção/difusão de salinidade). Para a modelagem de intrusão da cunha salina foi utilizado o módulo *Delft3D-Flow*, descrito na seção seguinte.

### 2.1 MODELO HIDRODINÂMICO DELFT-FLOW

O modelo *Delft3D-Flow* resolve um sistema de equações de águas rasas em modo bidimensional (ou integrado na vertical) e tri-dimensional. O sistema de equações empregado neste estudo consiste nas equações horizontais de movimento (*momentum*), na equação da continuidade, equações de difusão-advecção de consituintes e um modelo de fechamento turbulento. A equação vertical de momento é reduzida à relação de pressão hidrostática e as acelerações verticais são assumidas como sendo pequenas em relação à aceleração da gravidade. Isso faz com que o *Delft3D-Flow* seja adequado para a predição de fluxos em mares rasos, áreas costeiras, estuários, lagos, rios e lagoas.

Em regiões costeiras, estuários e lagos, correntes estratificadas ocorrem combinadas a variações de topografia acentuadas. A modelagem numérica em 3 dimensões (3D) dos processos hidrodinâmicos e qualidade de água dessas regiões requer um tratamento acurado dos processos de trocas verticais. A existência de estratificação vertical influencia a troca turbulenta de calor, salinidade e contaminantes passivos. A acurácia da discretização dos processos de trocas verticais é determinada pelo sistema vertical da grade, o qual deve:

- resolver a camada limite próxima ao leito permitindo um cálculo acurado das tensões com o fundo;
- representar de maneira satisfatória a região da picnoclina;
- impedir grandes erros de truncamento na aproximação de gradientes estritamente horizontais.

O sistema de coordenadas verticais sigma ( $\sigma$ ) pode nãoatendera todos esses requisitos. O



sistema de coordenadas verticais  $\sigma$  se ajusta ao fundo, porém nem sempre tem resolução suficiente ao longo da pycnoclina. As linhas da grade interceptam as isolinhas de densidade. As coordenadas  $\sigma$  podem produzir erros significativos na aproximação de gradientes de densidade estritamente horizontais (Leendertse,1990; Stelling& Van Kester, 1994, *apud* Delft3D-FLOW User Manual) em áreas de topografia de fundo acentuada. Por esse motivo, em 2003, um segundo sistema vertical de coordenadas de grade baseado em coordenadas cartesianas (Z-Grid) foi incluído no *Delft3D-FLOW* para simulações 3D de corpos d'água estratificados.

O sistema cartesiano de coordenadas  $Z$  tem linhas horizontais, as quais são praticamente paralelas às interfaces de densidade (isopicnais) em regiões com declives acentuados do fundo. Isso é importante para reduzir a mistura 'artificial' de propriedades escalares tais como temperatura e salinidade. O modelo Z-Grid não é ajustado à fronteira na vertical. O fundo frequentemente não é a própria linha de grade e é representado por 'escadas' (fronteira zig-zag). O número de células de grade na vertical varia ao longo dos pontos de grade horizontais de acordo com as profundidades.

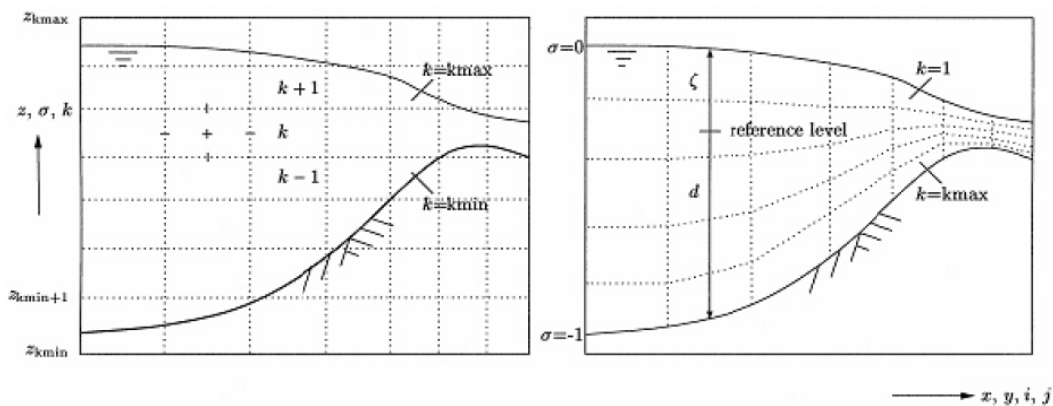


Figura 2: Grade computacional em coordenadas  $Z$  (painel esquerdo) e coordenadas  $\sigma$  (painel direito).

Além disso, o modelo *Delft3D* conta com uma técnica robusta de cálculo de células inundadas e secas (*floodanddrycells*). Vários outros processos, tais como fricção do vento e correntes de densidade são também incluídos na formulação.

O usuário pode escolher a resolução das equações hidrodinâmicas em grades cartesianas retangulares, curvilineares, ortogonais (*boundaryfitted*) ou esféricas (Lesseret *al.*, 2004).

Esse modelo numérico foi extensivamente calibrado e validado através de experimentos de campo e de laboratório e é considerado o estado-da-arte em modelagem hidrodinâmica, de

qualidade de água, transporte de sedimentos e morfologia.

## 2.2 GRADES NUMÉRICAS

Para a simulação da intrusão salina ao longo do estuário foi criada uma grade numérica curvilínea com coordenadas verticais Z (15 camadas). A grade se estendeu desde a região praial adjacente à desembocadura, acompanhando o rio Araranguá, até a região de confluência dos rios Itoupava e Mãe Luzia, seguindo, ainda, aproximadamente 13 km acompanhando o rio Itoupava e aproximadamente 8 km seguindo o curso do rio Mãe Luzia (Figura 3 a Figura 5). As coordenadas horizontais são referentes à projeção UTM, Datum WGS84, zona 22 S. A grade possui 949 x 70 células e 15 camadas verticais. A discretização vertical é apresentada na Tabela 1.

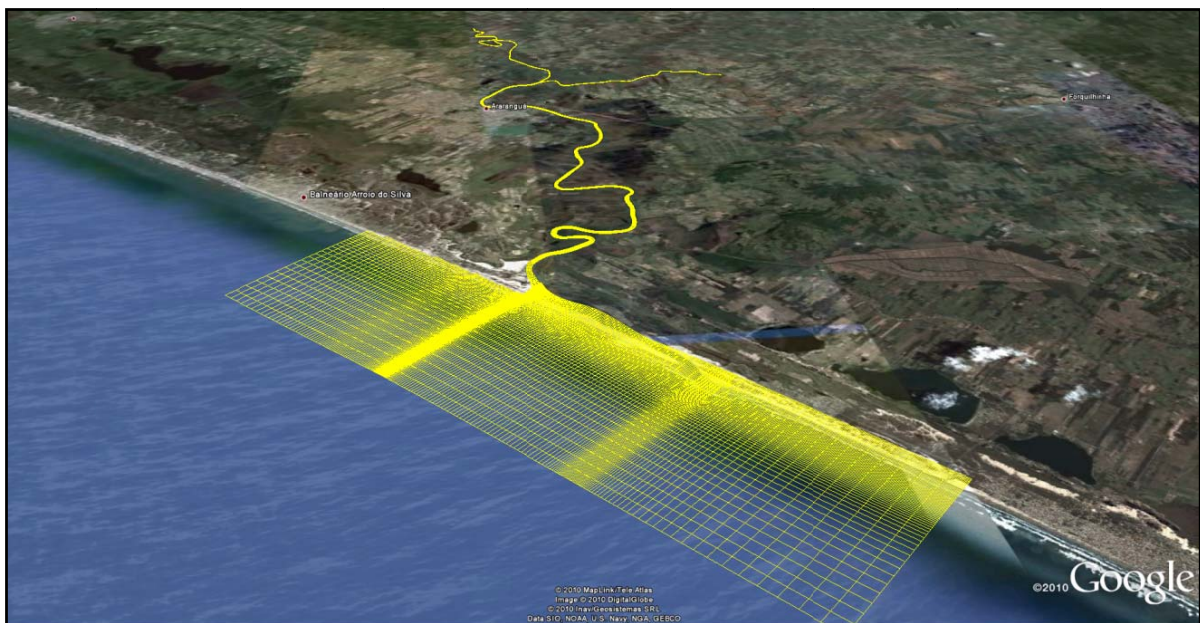


Figura 3: Grade numérica utilizada para a simulação de penetração da cunha salina.



Figura 4: Detalhe da grade numérica na região da cidade de Araranguá.

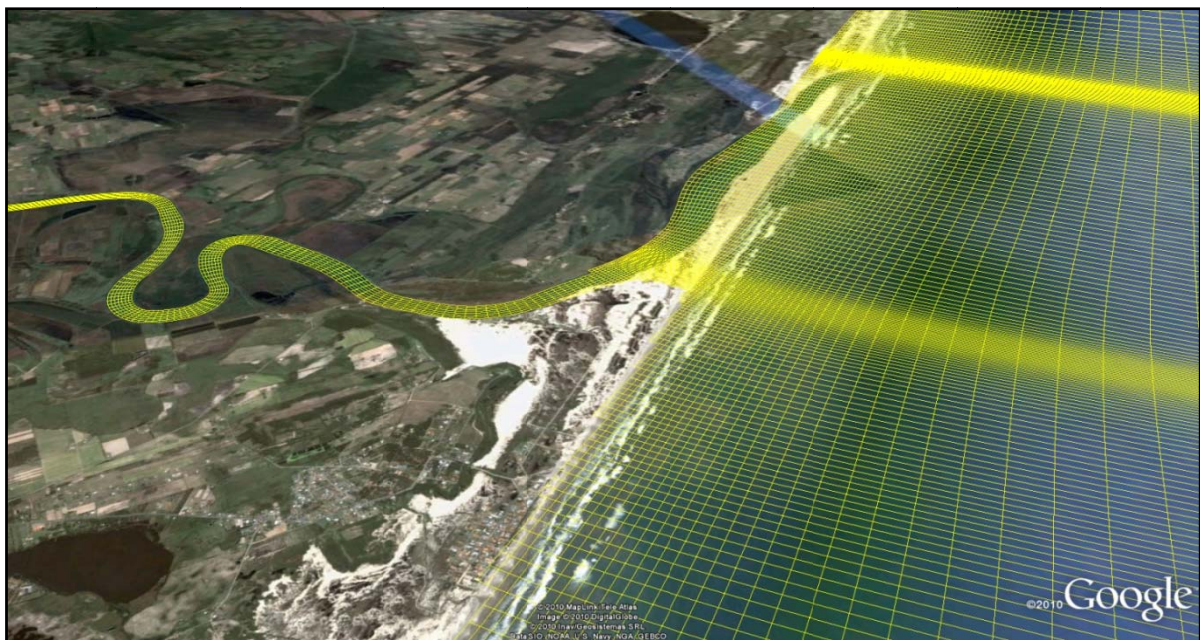


Figura 5: Detalhe da grade numérica na região do Morro dos Conventos, próximo à desembocadura atual do rio Araranguá.



Tabela 1: Discretização vertical adotada na grade numérica de simulação de cunha salina.

<b>Camada</b>	<b>%</b>	<b>Espessura (m)</b>	<b>Limites (m)</b>
<b>15</b>	8	2,72	3 a 0,28
<b>14</b>	4	1,36	0,28 a -1,08
<b>13</b>	2	0,68	-1,08 a -1,76
<b>12</b>	2	0,68	-1,76 a -2,44
<b>11</b>	2	0,68	-2,44 a -3,12
<b>10</b>	2	0,68	-3,12 a -3,8
<b>9</b>	2	0,68	-3,8 a -4,48
<b>8</b>	2	0,68	-4,48 a -5,16
<b>7</b>	2	0,68	-5,16 a -5,84
<b>6</b>	2	0,68	-5,84 a -6,52
<b>5</b>	2	0,68	-6,52 a -7,2
<b>4</b>	4	1,36	-7,2 a -8,56
<b>3</b>	14	4,76	-8,56 a -13,32
<b>2</b>	22	7,48	-13,32 a -20,8
<b>1</b>	30	10,2	-20,8 a -31

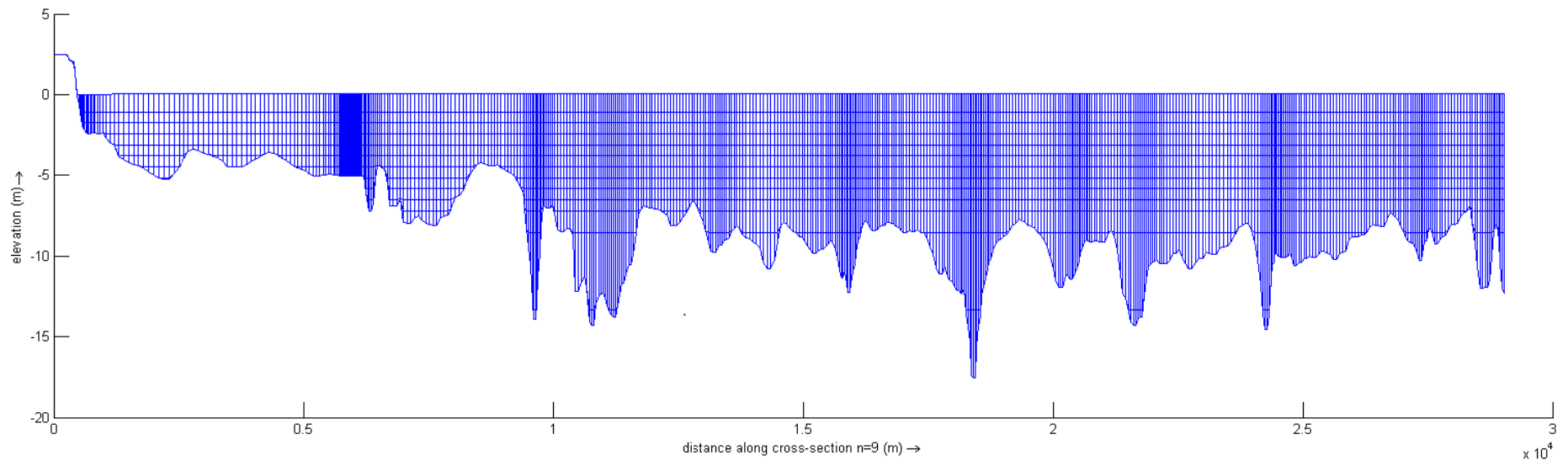


Figura 6: Gráfico esquemático mostrando a discretização vertical de uma seção de grade entre a embocadura do sistema e a cidade de Araranguá.



### 3. DADOS DE ENTRADA DO MODELO

Nesta etapa é apresentada uma descrição detalhada dos dados analisados e utilizados nas modelagens hidrodinâmicas da área de estudo.

#### 3.1 BATIMETRIA

Os dados utilizados na definição da batimetria foram obtidos a partir da composição entre informações digitalizadas das cartas náuticas da DHN<sup>1</sup> disponíveis para a região e dados coletados em campo.

A aquisição de dados na região praias foram feitas pela Coastal Planning & Engineering do Brasil utilizando uma moto aquática (*jetsky*) com sonda batimétrica e sistema de posicionamento sub-métrico (DGPS) acoplado. Esse método torna viável a coleta de dados na zona de surf, onde a presença de ondas gera perigos à navegação de embarcações maiores. Além disso, possibilita amostragens em áreas extremamente rasas ( $\approx 20$  cm de coluna de água), tais como bancos arenosos, deltas de maré vazante e enchente. As linhas de navegação foram planejadas e executadas utilizando o software de navegação Hypack 2008, sendo os dados reduzidos para o RN IBGE, localizado na comunidade de Ilhas (N 6801111,745 e E 662982,254) com altitude 1,749 m (*Datum SAD-1969 MC 51°*). Salienta-se que todos os valores digitalizados foram reduzidos para o mesmo *datum* vertical (IBGE). Na Figura 7 é apresentado o sistema utilizado.

Os dados batimétricos do rio Araraguá, coletados desde a foz até a região da ponte da rodovia BR-101, sobre o rio, foram cedidos pela Dra. Carla de Abreu D'Aquino, que elaborou este levantamento para a sua tese de doutorado. Os dados foram coletados com o suporte do CNPq, contemplando o projeto: 'Transport and retention processes of fine sediment in river dominated estuaries – TRANSEST'. O referenciamento vertical foi feito usando um marógrafo de pressão instalado durante o período do levantamento. Posteriormente, os dados foram referenciados ao nível médio do mar no período de amostragem.

Dados coletados com CTD em perfis verticais definidos ao longo dos rios Araraguá, Itoupava e Mãe Luíza foram disponibilizados pelo acadêmico do Curso de Oceanografia da UNIVALI (Universidade do Vale do Itajaí) Maurício Clezar Coelho. Como não existem fontes de dados

---

<sup>1</sup> Diretoria de Hidrografia e Navegação

batimétricos disponíveis para os rios Itoupava e Mãe Luíza, as profundidades foram extraídas desses perfis. O valor máximo da profundidade adquirida pelo CTD foi assumido como a profundidade do canal naquela seção transversal, visto que os perfis se encontravam no ponto mediano em relação às margens do rio.



Figura 7: Moto aquática (*jetsky*) utilizada nos levantamentos batimétricos ao largo da praia de Araranguá. É possível observar a haste de suporte do transdutor.

A batimetria final foi interpolada utilizando-se o software *Delft3D-QUICKIN*, integrante do pacote de modelagem *Delft3D*. Foi utilizado o método de interpolação por triangulação linear para definir as profundidades em cada ponto de grade. O resultado dessa interpolação e da projeção da batimetria na grade numérica do modelo é apresentado na Figura 8.

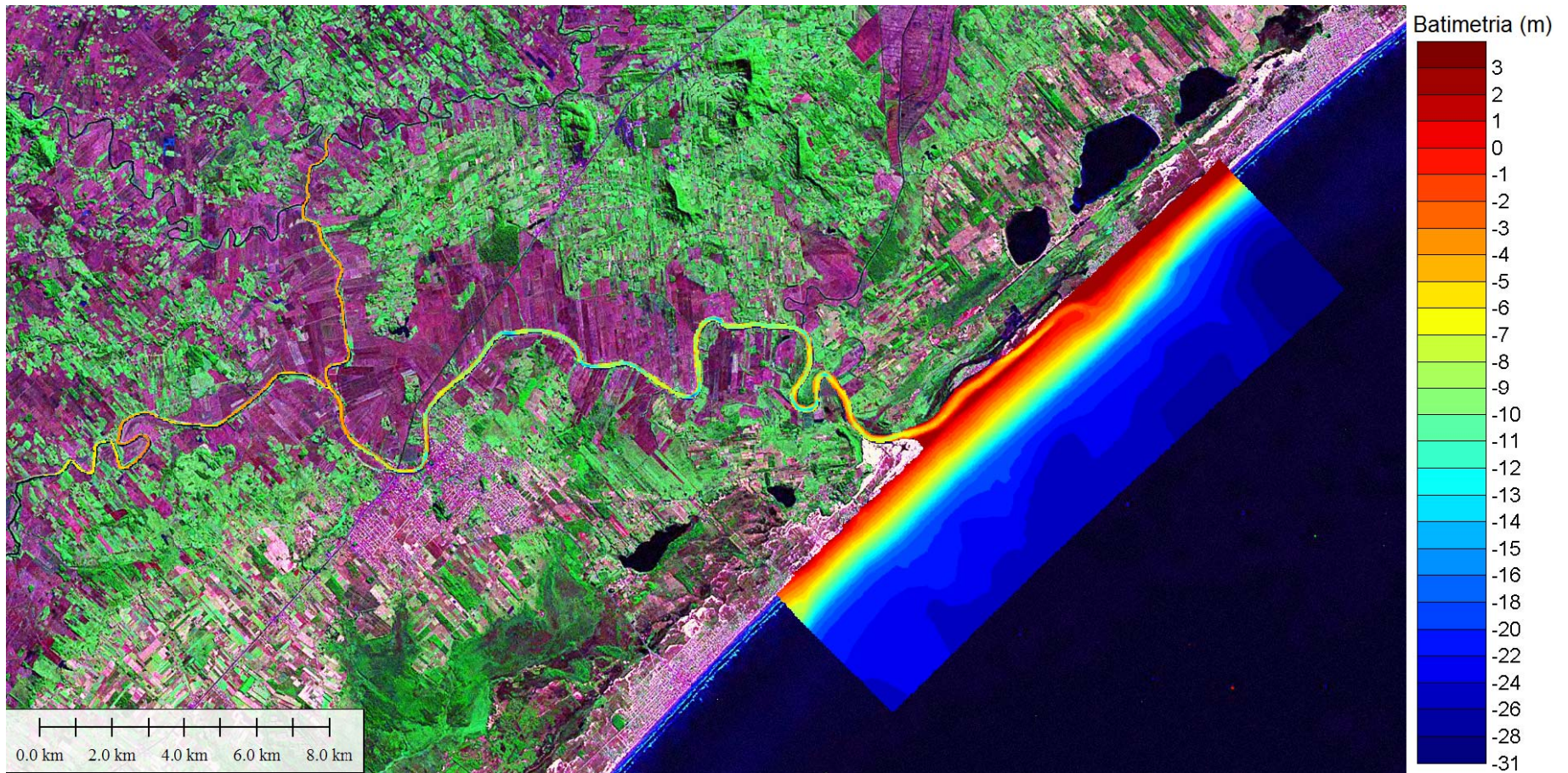


Figura 8: Batimetria final, interpolada e projetada na grade numérica do modelo a partir do módulo *Delft3D-QUICKIN*.





### 3.2 MARÉS E CORRENTES

Valores de amplitude e fase de cada constituinte harmônico foram extraídos de FEMAR (2000). Na Figura 9 são apresentadas as constantes harmônicas da maré para um ponto situado no interior do rio Araranguá (28° 55,2'S - 49° 20,5'W).

<b>Nome da Estação :</b>		<b>ARARANGUÁ – SC</b>			
<b>Localização :</b>		No Trapiche do Iate Clube de Araranguá			
<b>Organ. Responsável :</b>		DHN			
<b>Latitude :</b>	28° 55,2' <b>S</b>	<b>Longitude :</b>	49° 20,5' <b>W</b>		
<b>Período Analisado :</b>	25/07/63 a 22/08/63		<b>Nº de Componentes :</b>	37	
<b>Análise Harmônica :</b>		Método Tidal Liverpool Institute			
<b>Classificação :</b>		Maré de Desigualdades Diurnas			
<b>Estabelecimento do Porto: (HWF&amp;C)</b>	II H 50 min	<b>Nível Médio (Zo):</b>		32 cm acima do NR.	
<b>Média das Preamares Superiores (MHHW) :</b>	55 cm acima do NR.	<b>Média das Preamares Inferiores (MLHW) :</b>	37 cm acima do NR		
<b>Média das Baixa-mares Superiores (MHLW) :</b>	25 cm acima do NR.	<b>Média das Baixa-mares Inferiores (MLLW) :</b>	11 cm acima do NR.		
<b>CONSTANTES HARMÔNICAS SELECIONADAS</b>					
Componentes	Semi-amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)	Componentes	Semi-amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)
Sa	-	-	MU <sub>2</sub>	0,3	341
Ssa	-	-	N <sub>2</sub>	2,5	214
Mm	13,3	345	NU <sub>2</sub>	0,5	214
Mf	-	-	M <sub>2</sub>	6,4	086
MTM	-	-	L <sub>2</sub>	0,9	176
Msf	6,9	351	T <sub>2</sub>	0,4	074
Q <sub>1</sub>	5,2	053	S <sub>2</sub>	7,3	074
O <sub>1</sub>	10,4	077	K <sub>2</sub>	2,0	074
M <sub>1</sub>	0,4	308	MO <sub>3</sub>	0,5	145
P <sub>1</sub>	2,0	136	M <sub>3</sub>	0,6	176
K <sub>1</sub>	6,0	136	MK <sub>3</sub>	0,2	134
J <sub>1</sub>	1,2	136	MN <sub>4</sub>	0,6	052
OO <sub>1</sub>	1,0	230	M <sub>4</sub>	1,6	349
MNS <sub>2</sub>	-	-	SN <sub>4</sub>	1,1	083
2N <sub>2</sub>	0,3	342	MS <sub>4</sub>	0,6	035
<b>Referências de Nível:</b> RNs implantadas no patamar do trapiche do Iate Clube					
<b>Obs:</b> Não há referências a outros períodos					

Figura 9: Constantes harmônicas de Araranguá – SC. Fonte: FEMAR (2000).



O regime de maré para a região do rio Araranguá é de micromaré, com amplitude de maré astronômica de aproximadamente 0,9 m (INPH, 1993), havendo aumento apenas em consequência das marés meteorológicas provocadas pela entrada de frentes frias (Barreto, 2008). A maré na região é caracterizada como semi-diurna com desigualdades diurnas, com número de forma  $NF=1,2$ , definido a partir da seguinte relação entre componentes diurnas e semi-diurnas da maré:  $(K_1+O_1) / (M_2+S_2)$ . Assim, a maré em toda a área de estudo é caracterizada por apresentar duas preamares e duas baixa-mares ao dia.

A elevação do nível do mar torna-se mais pronunciada quando a maré meteorológica coincide com as marés astronômicas de sizígia. A maré meteorológica pode ser obtida a partir da diferença entre a maré astronômica prevista e a maré medida, possui um período de oscilação maior em relação à maré astronômica (menor frequência) e não possui ciclicidade definida (a despeito da maré astronômica). Na costa leste dos continentes situados no hemisfério sul, a elevação do nível do mar devido à maré meteorológica positiva está relacionada à ocorrência de ventos provenientes do quadrante sul/sudoeste, principalmente paralelos à costa, que devido ao efeito de rotação da Terra (Força de Coriolis), geram um transporte de massa de água para o continente. A incidência de ventos do quadrante norte/nordeste resulta em marés meteorológicas negativas. Além da direção e intensidade dos ventos, a amplitude da maré meteorológica é, ainda, influenciada pela pressão atmosférica.

Dados de nível do mar e de correntes foram amostrados no período entre 24/08/2010 e 08/09/2010, utilizando um perfilador acústico de correntes (ADCP), conforme descrito no Relatório de Aquisição de Dados Oceanográficos em Águas Rasas - Araranguá - SC (CPE, 2010). O equipamento foi fundeado na posição  $28^{\circ} 55' 23,16''$  S e  $49^{\circ} 22' 1,96''$  W (SIRGAS-2000) (Figura 10).

A análise das oscilações associadas a eventos meteorológicos foi feita a partir da aplicação de um filtro do tipo *Godin*. A amplitude da maré meteorológica na série analisada é inferior a 0,25 m (Figura 11).



Figura 10. Localização do ponto de medição nível e corrente utilizado no processo de calibração do modelo hidrodinâmico.

Também foram analisados dados de nível do mar medidos em Imbituba e disponibilizados pelo IBGE. Esta análise buscou quantificar o efeito meteorológico nas variações do nível do mar da região utilizando uma série temporal de dados mais extensa (01/05/2008 a 24/08/2008). O Porto de Imbituba, local em que fica instalado o marégrafo, está localizado a aproximadamente 120km de Araranguá. Na Figura 12 pode ser observada a diferença entre a série temporal de nível medida e a série temporal filtrada (ou seja, somente a maré astronômica). A maré meteorológica extraída dos dados de nível do mar medidos em Imbituba apresenta picos de até 0,5 m de amplitude.

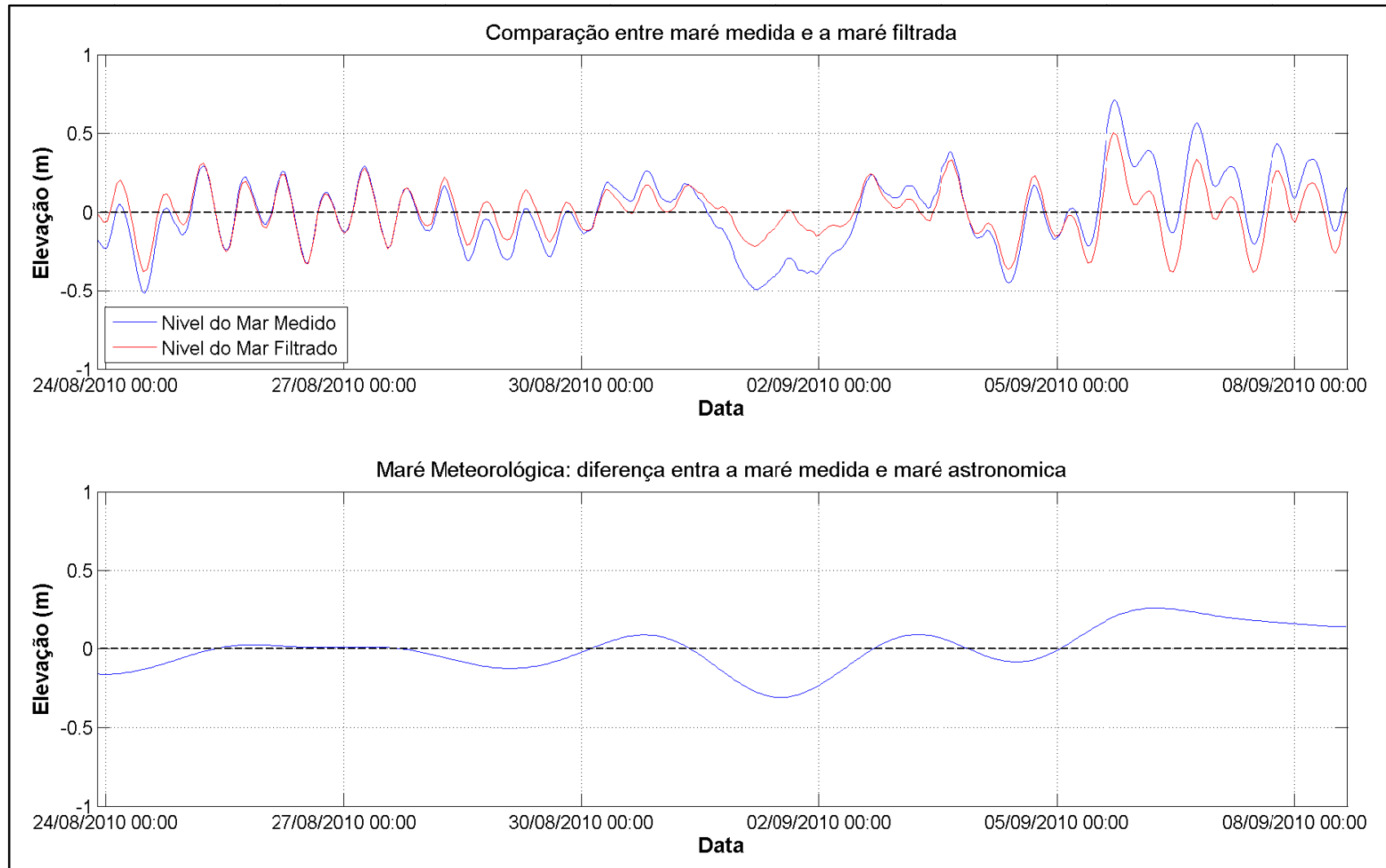


Figura 11. Maré astronômica (filtrada) e medida (painel superior) e maré meteorológica (painel inferior) observada para o período de 24/08/2010 a 08/09/2010.

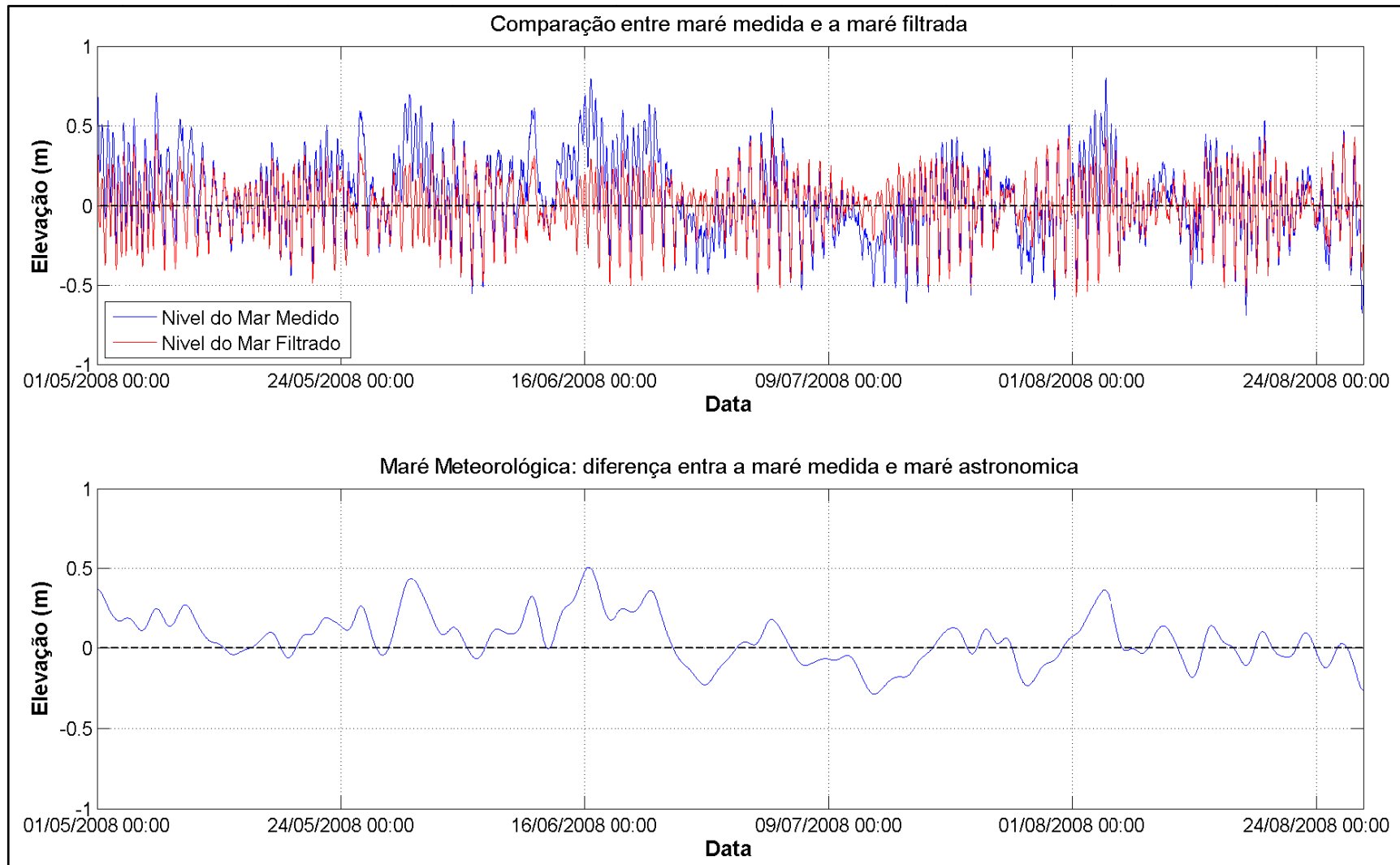


Figura 12. Maré astronômica (filtrada) e medida (painel superior) e maré meteorológica (painel inferior) observada -Porto de Imbituba.

### 3.3 HIDROLOGIA

A descarga fluvial do rio Araranguá é monitorada diariamente em uma série de estações fluviométricas da Agência Nacional das Águas (ANA), sendo que os registros históricos apresentam grande variabilidade temporal e baixo padrão sazonal. As estações situadas mais a jusante, sem influência da maré, são: a Estação de Taquaruçu, que fornece uma vazão histórica (1943 a 2004) média de  $42,2 \pm 73,2 \text{ m}^3/\text{s}$ , com um pico histórico de  $847 \text{ m}^3/\text{s}$ , e a Estação de Forquilha, com vazão histórica (1942 a 2004) média de  $23,5 \pm 51,4 \text{ m}^3/\text{s}$ , com um pico histórico de  $1103 \text{ m}^3/\text{s}$  (D'Aquino *et al.*, 2008). Os mesmos autores afirmam que a dinâmica estuarina muda rapidamente de acordo com os eventos hidrológicos repentinos que ocorrem na região.

Utilizando os dados de vazões e cotas disponibilizados pela ANA por meio do software HydroWeb, no período entre 01/01/2000 e 31/08/2004, foi ajustada uma função polinomial de quarta ordem (Figura 13) que relaciona os valores de cotas e vazões, sendo assim possível estimar a vazão média para períodos em que somente existem informações de cotas do rio.

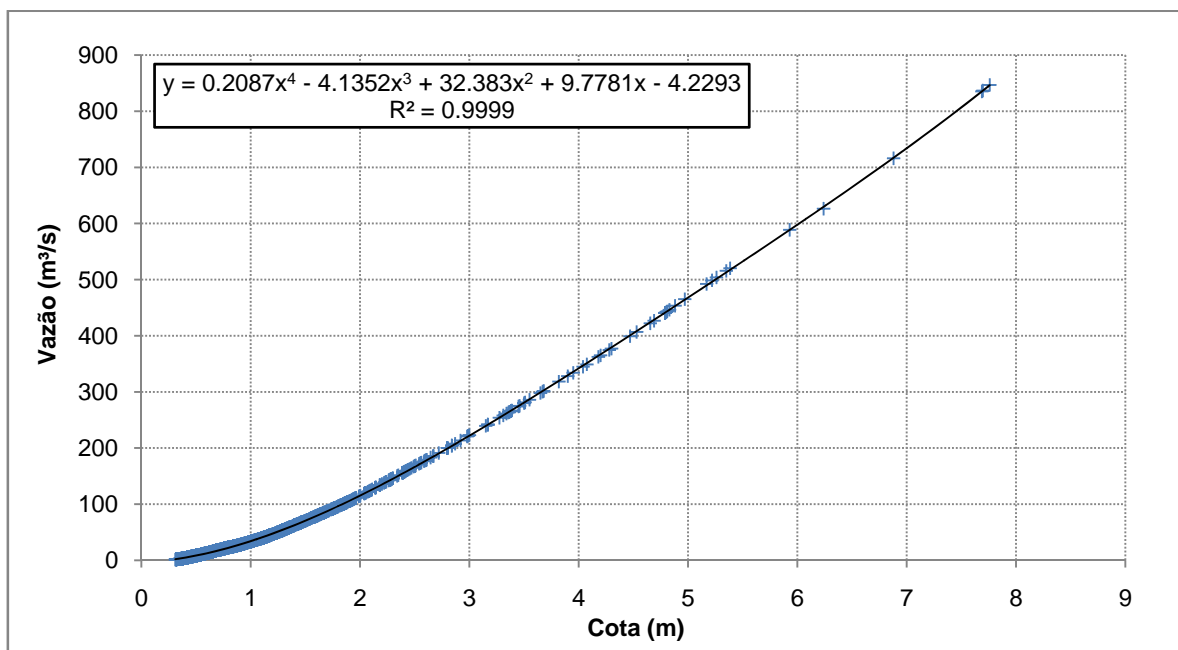


Figura 13. Relação entre a vazão e a cota para o rio Itoupava de dados históricos entre 01/01/2000 e 31/08/2004.

No que se refere a dados de vazão disponíveis para o período de coleta de dados de corrente e maré (24/08/2010 a 08/09/2010), foi obtida a informação que a cota do rio Itoupava era de 36



cm no dia 25/08/2010. Aplicando o polinômio obteve-se um valor de vazão de 3,30 m<sup>3</sup>/s, valor muito próximo ao do Q90 da curva de permanência para o rio Itoupava (Tabela 2). A probabilidade de ocorrer uma vazão igual ou superior ao Q90 de um rio é de 90%, portanto, está relacionada a períodos de estiagem. A partir desse dado assumiu-se que a vazão dos rios Mãe Luíza e Manoel Alves para o mesmo período, foi equivalente aos seus respectivos valores de Q90. Esses dados de vazão fluvial foram utilizados para obter uma mapa de salinidade estável para a área de estudo e para realizar o experimento de calibração do modelo numérico.

Tabela 2: Curva de Permanência para os rios Itoupava (dados da estação Taquaruçu entre 1943 a 2004 - ANA), Mãe Luíza (dados da estação Foz Manuel Alves entre 1977 e 2004 - ANA) e Manoel Alves (dados da estação Forquilha entre 1942 a 2004 - ANA).

<b>Permanência</b>	<b>Rio Itoupava (estação Taquaruçu)</b>	<b>Rio Mãe Luzia (estação Forquilha)</b>	<b>Rio Manuel Alves (estação Foz Manuel Alves)</b>
<b>100%</b>	0	0,086	0,03
<b>95%</b>	1,9	1,21	0,412
<b>90%</b>	3,39	1,8	0,8
<b>85%</b>	4,53	2,37	1,29
<b>80%</b>	5,57	3,12	1,82
<b>75%</b>	6,49	3,63	2,29
<b>70%</b>	7,89	4,14	2,95
<b>65%</b>	9,28	4,65	3,74
<b>60%</b>	10,9	5,36	4,42
<b>55%</b>	12,6	6,43	5,08
<b>50%</b>	14,8	7,47	6,06
<b>45%</b>	17,2	8,73	6,86
<b>40%</b>	20,3	10,3	8,1
<b>35%</b>	23,9	12,6	9,58
<b>30%</b>	28,3	15	11,2
<b>25%</b>	34,2	18	13,5
<b>20%</b>	42,1	22,4	16,7
<b>15%</b>	54,9	29,4	21,4
<b>10%</b>	76,5	41,1	29,3
<b>5%</b>	128	69,7	47,3



### 3.4 SALINIDADE

Dados de perfis verticais de salinidade medidos em diversos pontos ao longo do rio Araranguá, rio Itoupava e rio Mãe Luzia foram disponibilizados pelo acadêmico do curso de Oceanografia da UNIVALI (Universidade do Vale do Itajaí) Maurício Clezar Coelho, que está realizando um trabalho de pesquisa científica na região.

Os perfis verticais utilizados no presente estudo foram coletados ao longo de 35 estações amostrais utilizando um CTD (*Conductivity, Temperature and Depth*). Este equipamento permite a obtenção de perfis verticais de temperatura e salinidade, sendo registradas também a profundidade associada a cada ponto de medição. A atividade de campo foi efetuada no dia 25/08/2010, dentro do período em que foram feitas as medições de maré e correntes (24/08/2010 a 08/09/2010). Neste período a região estava passando por uma época de estiagem e a vazão fluvial apresentava valores baixos. Os dados de salinidade foram usados na verificação e no ajuste do modelo de advecção/difusão de sal.





#### 4. CALIBRAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

O uso de modelos numéricos possibilita que, após a calibração em um único (ou alguns pontos), possamos extrapolar as informações para todo o domínio de cálculo. O processo de calibração centra-se na comparação entre os resultados do modelo e as observações de campo. O princípio mais importante é: quanto menor o desvio entre os resultados do modelo e as observações de campo, melhor o modelo.

Neste trabalho foram realizadas calibrações de nível e de corrente utilizando os dados coletados na área de estudo entre 24/08/2010 e 08/09/2010 (descritos na seção 3.2 e em CPE, 2010).

Para verificar o desempenho do modelo hidrodinâmico em relação aos dados medidos, foi realizada uma rodadapara o mesmo período das medições. O modelo foi forçado com a série temporal de dados de nível medido (levando em conta a maré astronômica e meteorológica). Para definir a descarga dos rios foram empregadas as vazões Q90 (probabilidade de superação de 90%) dos principais contribuintes da região (rio Itoupava, rio Mãe Luzia e rio Manuel Alves) (Tabela 3).

Tabela 3: Dados de vazão utilizados na simulação de calibração do modelo numérico.

Q90 (m <sup>3</sup> /s)	
Rio Itoupava (estação Taquaruçu)	4,53
Rio Mãe Luzia (estação Forquilha)	2,37
Rio Manuel Alves (estação Foz Manuel Alves)	1,29

Os parâmetros finais utilizados na rodada de calibração do modelo hidrodinâmico são apresentados na Tabela 4:



Tabela 4: Parâmetros do modelo hidrodinâmico.

Parâmetro	Valor
Passo de tempo	0.2 min
Aceleração da gravidade	9,81 m/s <sup>2</sup>
Densidade da água	1025 kg/m <sup>3</sup>
Temperatura da água	20 °C
Coefficiente de Chèzy	65 m <sup>0.5</sup> /s
Coefficiente de viscosidade turbulenta horizontal	0,1 m <sup>2</sup> /s
Coefficiente de difusividade turbulenta horizontal	0,1 m <sup>2</sup> /s
Coefficiente de viscosidade turbulenta vertical	0,001 m <sup>2</sup> /s
Coefficiente de difusividade turbulenta vertical	0 m <sup>2</sup> /s

O cálculo do erro médio quadrático ou RMSE (*root meansquareerror*) foi realizado para o procedimento de comparação, seguindo a seguinte formulação:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}$$

onde  $P$  representa a variável prevista e  $O$  a variável observada.

#### 4.1 CALIBRAÇÃO PARA MARÉS

A série temporal dos valores de maré medida e calculada pelo modelo é apresentada na Figura 14. O RMSE entre os valores medido e modelados foi de 0,036 m. A variação de nível reproduziu bem os padrões observados no ambiente.

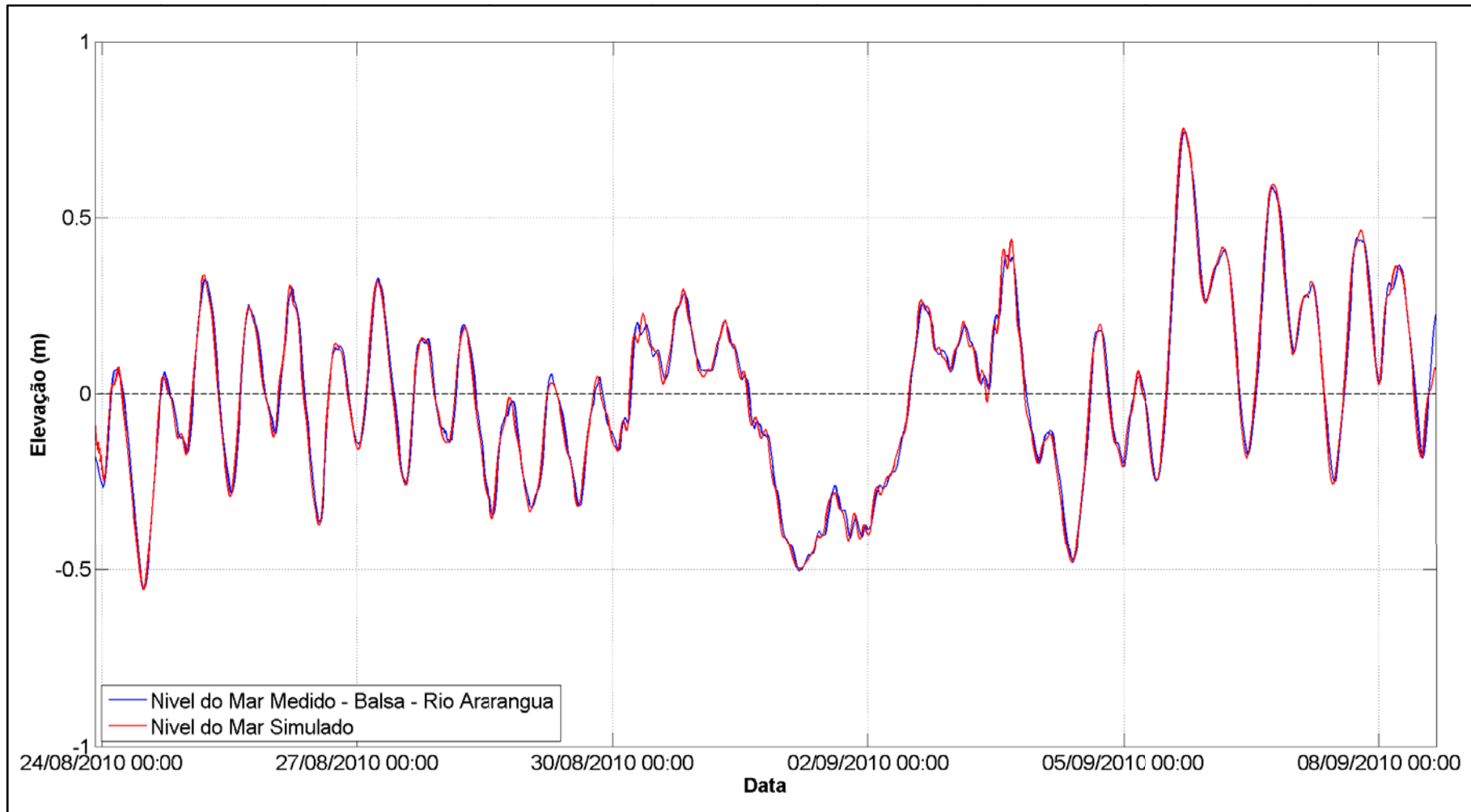


Figura 14: Gráficos das séries temporais da maré medida e calculada pelo modelo.



## 4.2 CALIBRAÇÃO PARA CORRENTES

O ADCP usado nas medições de maré e correntes foi configurado para adquirir informações com intervalo de amostragem de 20 minutos. O valor registrado a cada período de amostragem representa a média de 2 minutos de aquisição, a uma taxa de 1 Hz. As medições de pressão, temperatura e salinidade foram realizadas a cada 20 minutos, sendo que a obtenção dos valores dessas variáveis é realizada instantaneamente pelos sensores do Aquadopp® na posição em que se encontra o equipamento (medições pontuais).

A distância do fundo da estrutura de sustentação do equipamento até o sensor de medição é igual a 0,26 m e o valor do “*blankingdistance*” foi de 0,52 m. Ao longo da coluna d’água, o tamanho das células de medição é igual a 0,5 m e, portanto, a distância do centro da primeira célula de medição em relação ao fundo é igual a 1,03 m. O aparelho foi configurado para funcionar com 24 células e, devido à profundidade do local de fundeio e aos efeitos das marés, 10 células registraram dados consistentes durante todo o período de amostragem. As distâncias das células de medição em relação ao fundo são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5: Distâncias das células de medição do Aquadopp® em relação à superfície.

Número da Célula	Distância a partir do fundo (m)
Célula 1	1,03
Célula 2	1,53
Célula 3	2,03
Célula 4	2,53
Célula 5	3,03
Célula 6	3,53
Célula 7	4,03
Célula 8	4,53
Célula 9	5,03
Célula 10	5,53

As comparações dos valores de corrente medidos e calculados pelo modelo no fundo, meio e superfície da coluna d’água são apresentadas na Figura 15, Figura 16 e Figura 17.

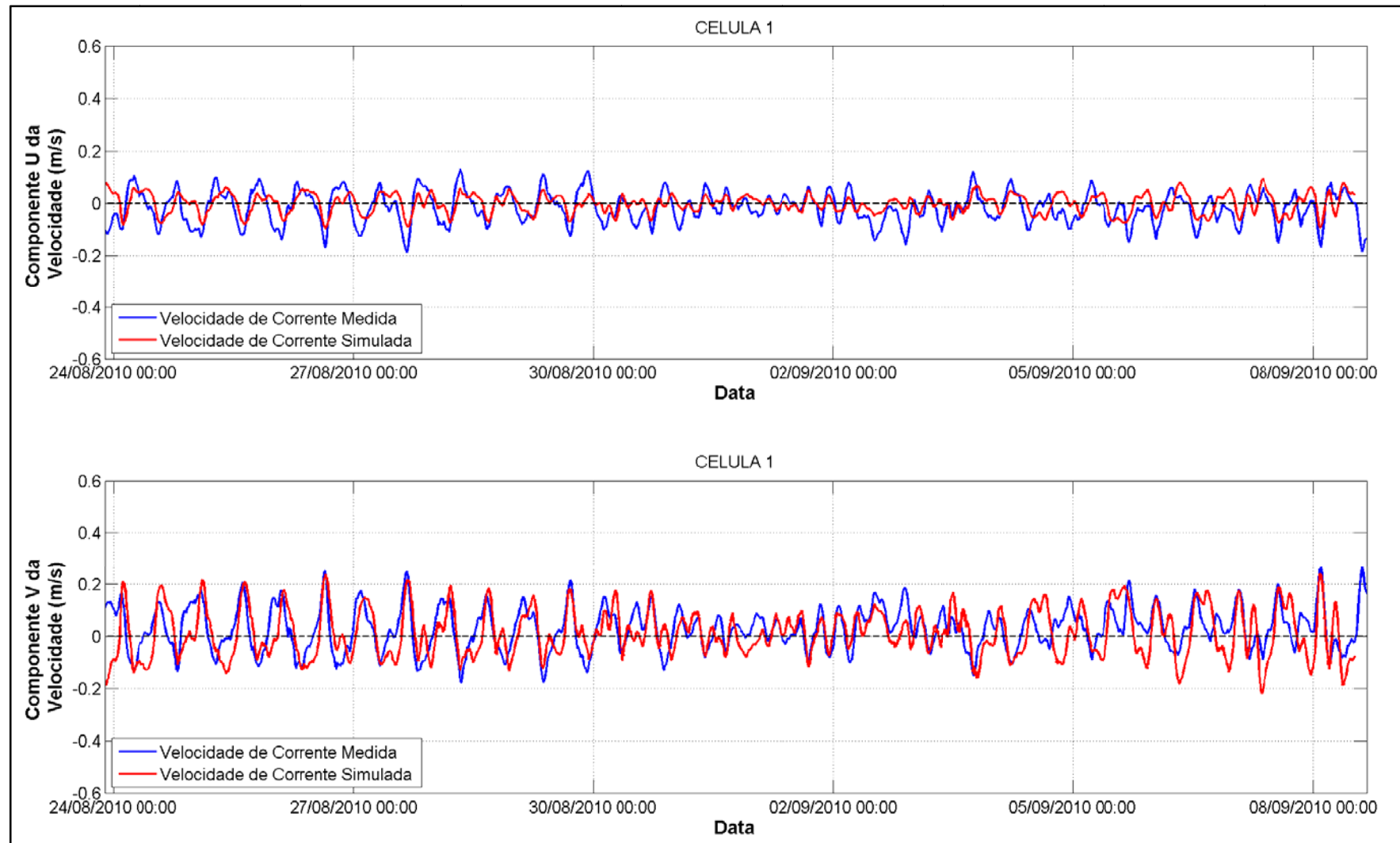


Figura 15: Série temporal das componentes  $u$  e componente  $v$  da corrente medida (linha azul) e calculada pelo modelo (linha vermelha) para a célula 1 (fundo da coluna d'água).

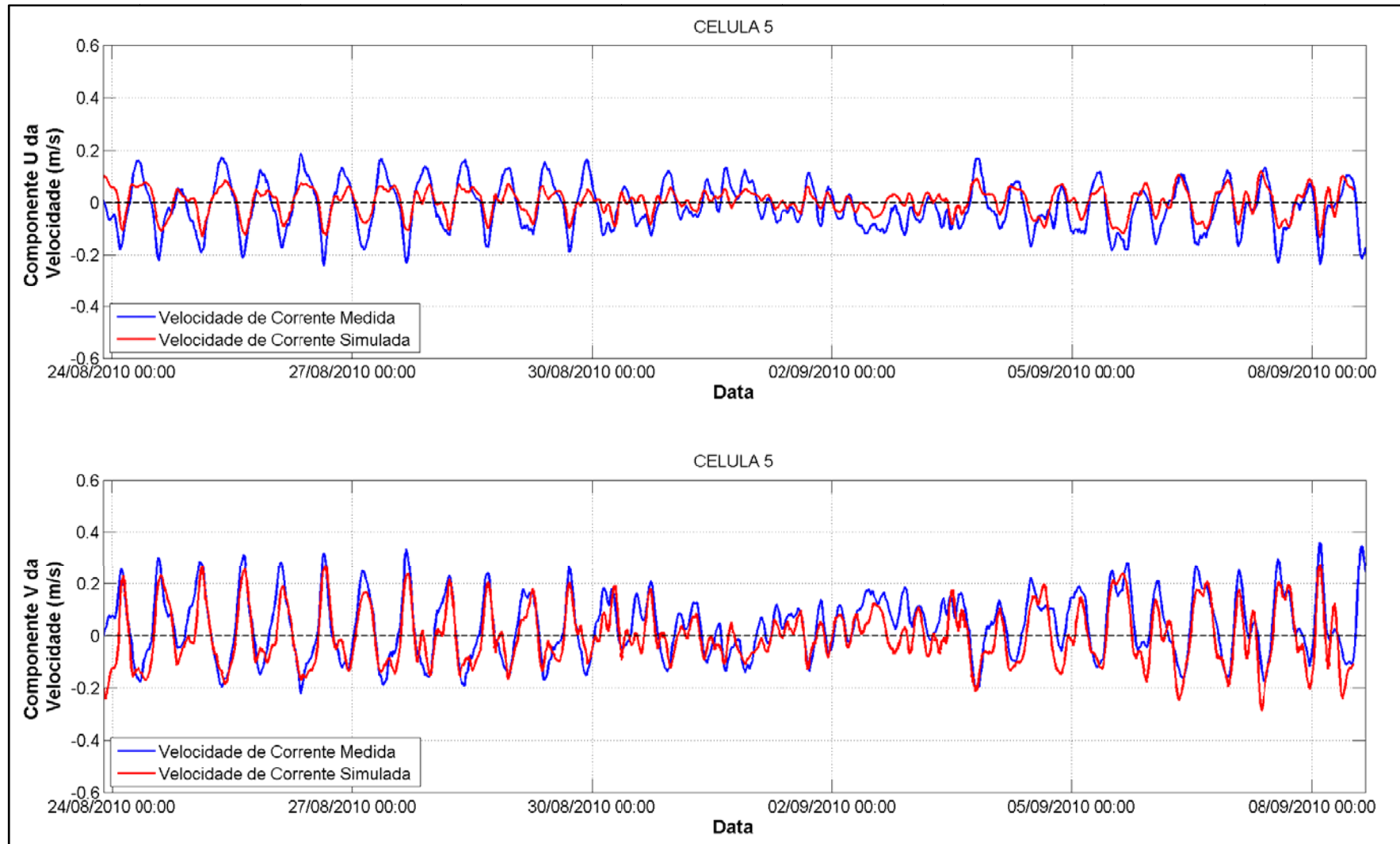


Figura 16: Série temporal das componentes  $u$  e componente  $v$  da corrente medida (linha azul) e calculada pelo modelo (linha vermelha) para a célula 5 (meio da coluna d'água).

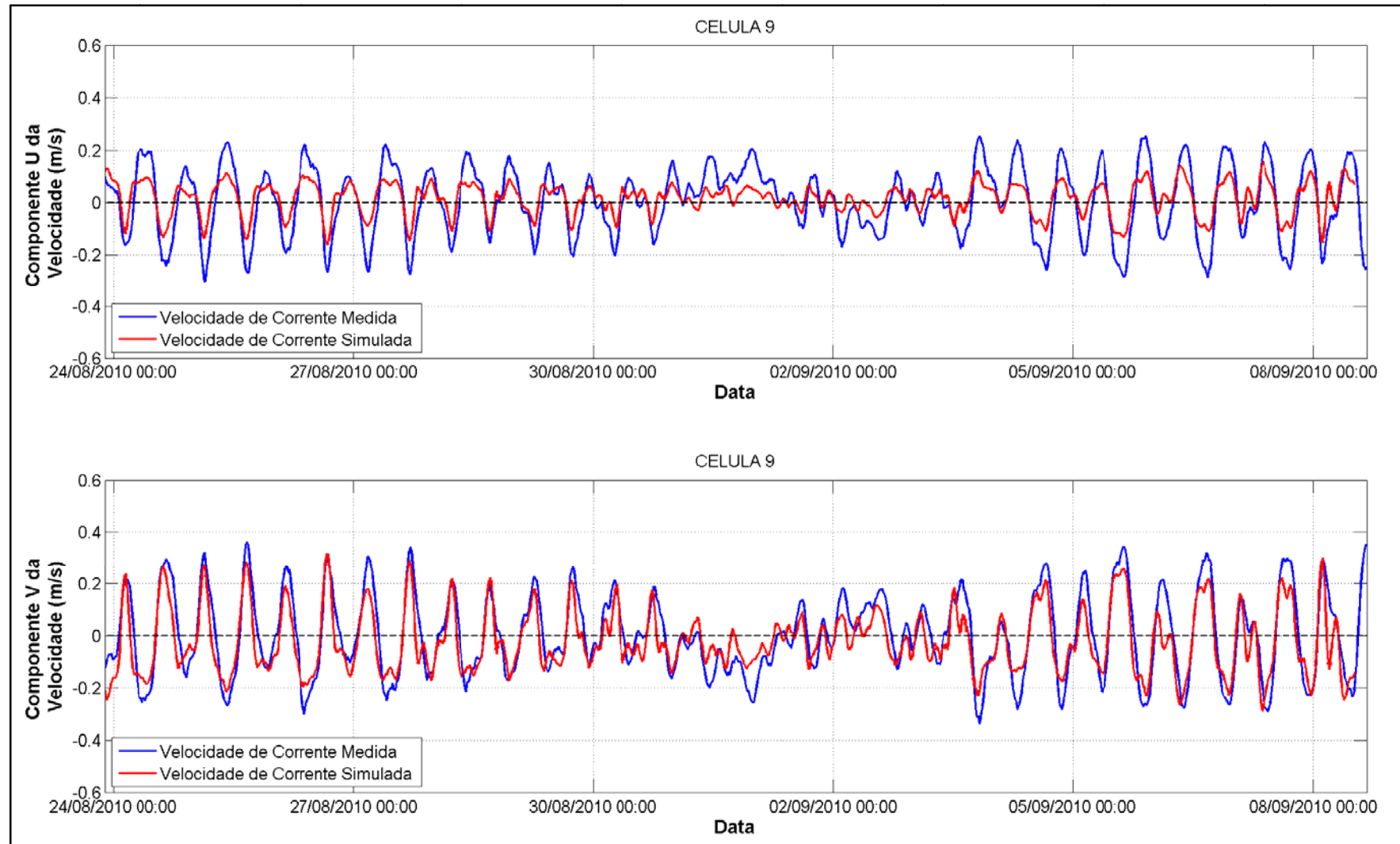


Figura 17: Série temporal das componentes  $u$  e componente  $v$  da corrente medida (linha azul) e calculada pelo modelo (linha vermelha) para a célula 9 (superfície da coluna d'água).

O RMSE entre os valores da componente  $u$  e  $v$  da corrente medida e calculada pelo modelo foi de:

- Célula 2 (fundo):  $RMSE_u = 0,05$  m/s e  $RMSE_v = 0,08$  m/s;
- Célula 5 (meio):  $RMSE_u = 0,06$  m/s e  $RMSE_v = 0,07$  m/s;
- Célula 9 (superfície):  $RMSE_u = 0,08$  m/s e  $RMSE_v = 0,08$  m/s;

Os resultados das comparações indicam que o modelo conseguiu reproduzir os padrões de circulação ao longo da coluna d'água. Junto ao fundo as correntes simuladas mostraram-se menos intensas, assim como medido em campo. A tendência de aumento da intensidade ao longo da coluna d'água observada nas medições foi reproduzida pelo modelo.

Na Figura 18 é apresentado um campo de velocidades de correntes integradas na vertical para um trecho do rio Araranguá.

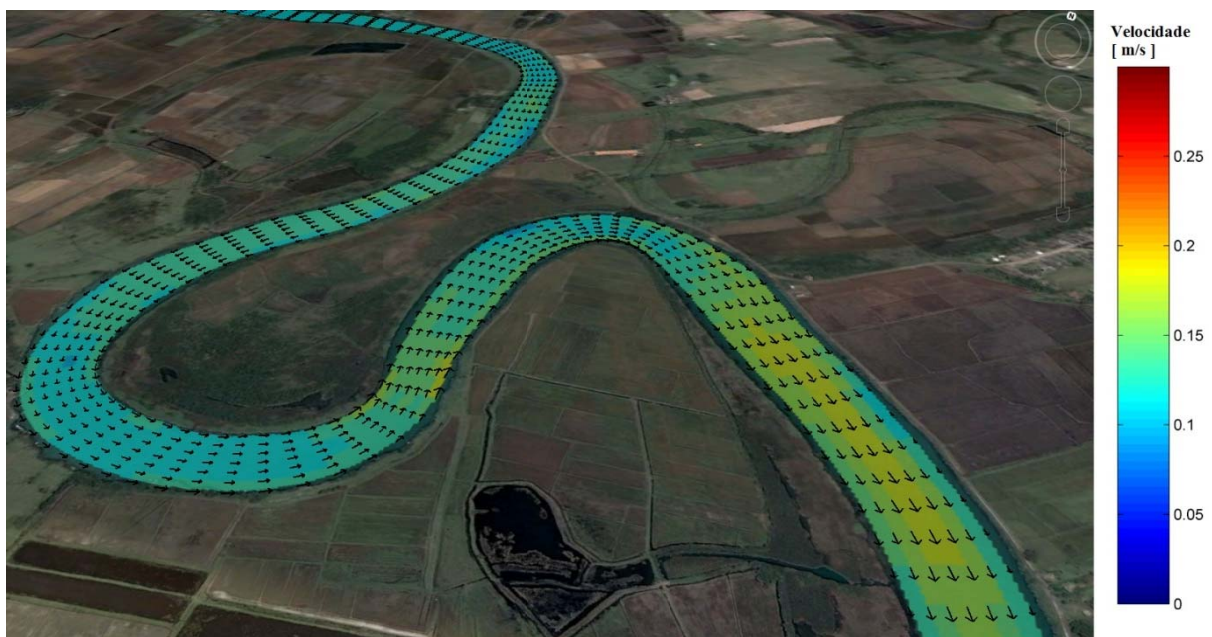


Figura 18: Mapa de velocidades integradas na vertical para um setor do rio Araranguá (imagem: Google Earth).

### 4.3 CALIBRAÇÃO PARA O TRANSPORTE DE SAL

A simulação hidrodinâmica realizada para o período de medição de correntes e maré levou em conta, também, os processos de transporte de sal (salinidade das águas). As fronteiras abertas do modelo foram definidas de modo que os rios fornecem água doce ao ambiente (salinidade igual a zero) e o mar água com salinidade igual a 35 ups (unidade padrão de salinidade).





Os dados de salinidade cedidos pelo acadêmico da UNIVALI (Universidade do Vale do Itajaí) Maurício Clezar Coelho, foram usados para comparar o mapa de salinidade gerado pelo modelo e a estrutura halina observada no ambiente.

Em um perfil vertical de salinidade medido em frente à balsa de Araranguá, foram encontrados valores de salinidade de 10 ups para a superfície e 24 ups para o fundo. Analisando um ponto da grade também localizado próximo à balsa, o mapa de sal do modelo indica salinidade de 10 ups na superfície e 29 ups junto ao fundo. Um perfil próximo à ponte da BR-101 indica salinidades entre 2,9 e 23,4 ups para superfície e fundo, respectivamente, enquanto o modelo, para um ponto próximo, mostra salinidades entre 2 (superfície) e 30 ups (fundo).

Nota-se maior quantidade de sal nas camadas de fundo, evidenciando a presença de estratificação vertical relacionada à penetração da cunha salina no interior do sistema estuarino do rio Araranguá. A massa d'água predominantemente marinha penetra pelo fundo e a massa d'água predominantemente fluvial flui pelas camadas mais superficiais, havendo, entre essas massas d'água, uma picnoclina acentuada.

A simulação da intrusão salina ao longo dos rios Itoupava e Mãe Luzia foi limitada devido à escassez de dados batimétricos. Mesmo assim os padrões de estratificação foram observados nos resultados do modelo, assim como nos dados medidos. Analisando-se o rio Itoupava através de um perfil localizado a aproximadamente 3 km da confluência entre este e o rio Mãe Luzia, o CTD coletou valores de salinidade entre 1 ups na superfície e 21 ups junto ao fundo. O modelo representou valores de salinidade entre 0 ups (superfície) e 20 ups para o fundo. A análise da salinidade do rio Mãe Luzia, em um ponto a aproximadamente 1,5 km da confluência, mostra valores medidos de salinidade de 1,6 ups para a superfície e 21 ups para o fundo. Já o mapa de sal do modelo mostra valores de 4,1 ups para a superfície e 30 ups para o fundo.

Na Figura 19 são apresentados os mapas de salinidade na camada superficial e junto ao fundo na região do rio Itoupava.

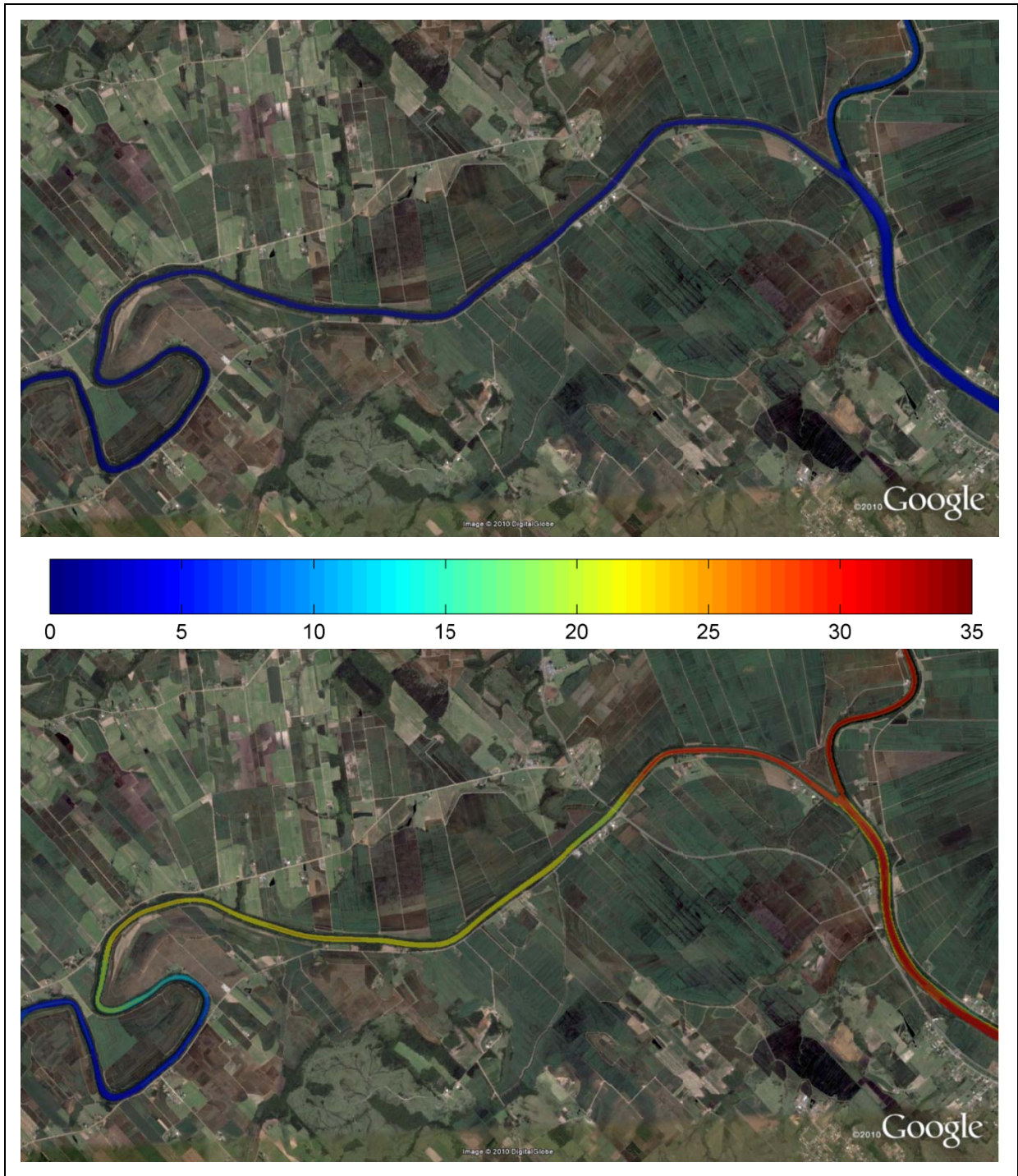


Figura 19: Mapas de salinidade (cores em ups) referente ao modelo rodado no período de medição dos dados de correntes e maré (vazão Q90). Salinidade na camada superficial (acima) e salinidade junto ao fundo (abaixo).

Para visualizar a intrusão da cunha salina pelas camadas de fundo e o escoamento das águas fluviais pelas camadas superficiais ao longo da área de estudo foram definidas seções longitudinais que acompanham o talvegue do rio desde a desembocadura (atual ou das alternativas) até os limites situados a montante do domínio de modelagem. As seções longitudinais acompanhando o rio Itoupava e o rio Mãe Luzia são apresentadas na Figura 20 e Figura 21.

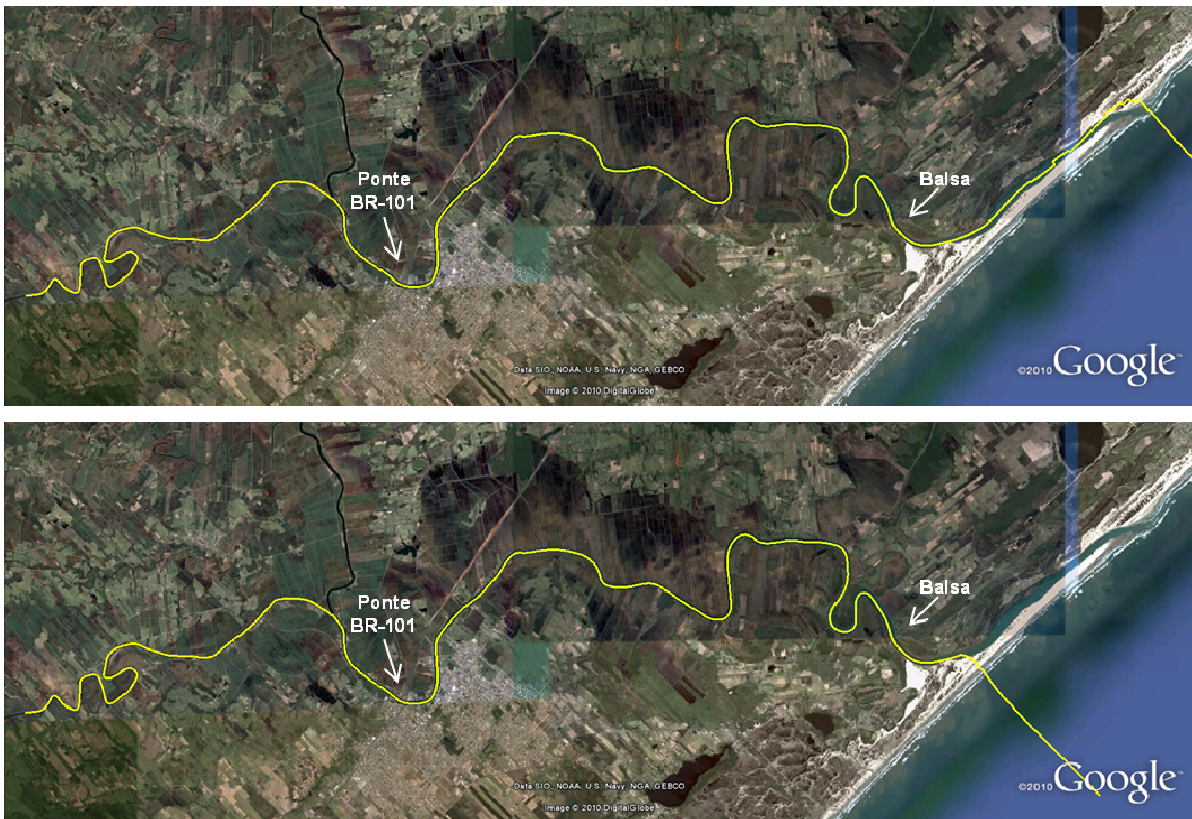


Figura 20: Seções longitudinais acompanhando o rio Itoupava – painel superior: cenário atual; painel inferior: alternativas de fixação da barra.

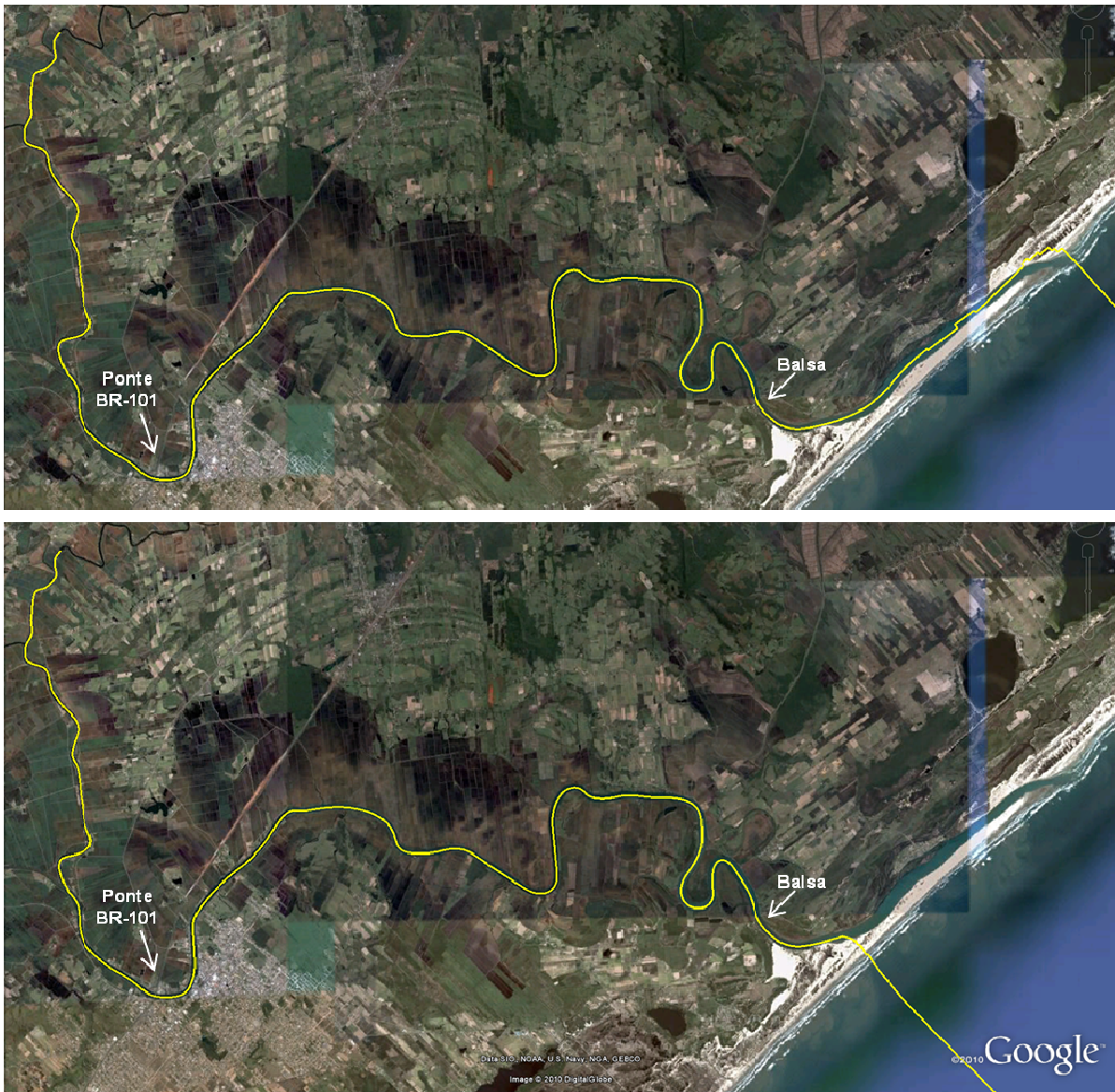


Figura 21: Seções longitudinais acompanhando o rio Mãe Luzia. – painel superior: cenário atual; painel inferior: alternativas de fixação da barra.

A seção longitudinal de salinidade referente à simulação do período de medição dos dados de correntes e nível é apresentada na Figura 22. O perfil longitudinal desta imagem foi gerado a partir de linhas de grade que acompanham o talvegue do canal do rio (Figura 20 e Figura 21).

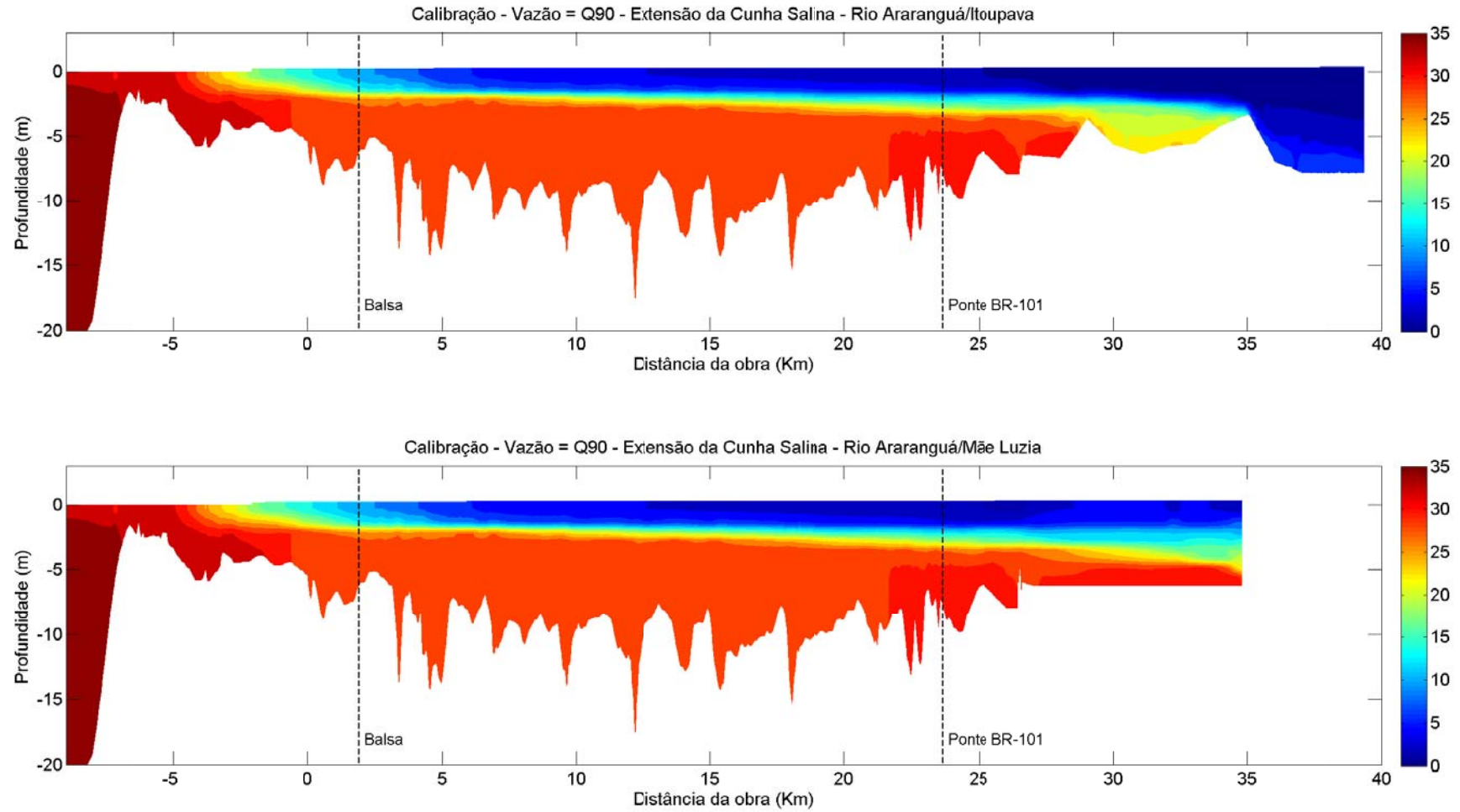


Figura 22: Perfil longitudinal dos rios Araranguá/Itoupava (painel superior) e dos rios Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) com os valores de salinidade (cores em ups).

## 5. CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO

Nas simulações hidrodinâmicas e de advecção/difusão de sal foram simulados quatro cenários com diferentes configurações batimétricas/estruturais.

### 5.1 CENÁRIO ATUAL

Para o cenário atual foi considerada a desembocadura do rio situada na extremidade nordeste. A definição da batimetria deste cenário de simulação envolve dados atualizados de topografia da barreira arenosa e batimétricos ao largo da Praia de Araranguá, incluindo áreas rasas próximas da desembocadura. A batimetria utilizada no modelo para esse cenário é apresentada na Figura 23.

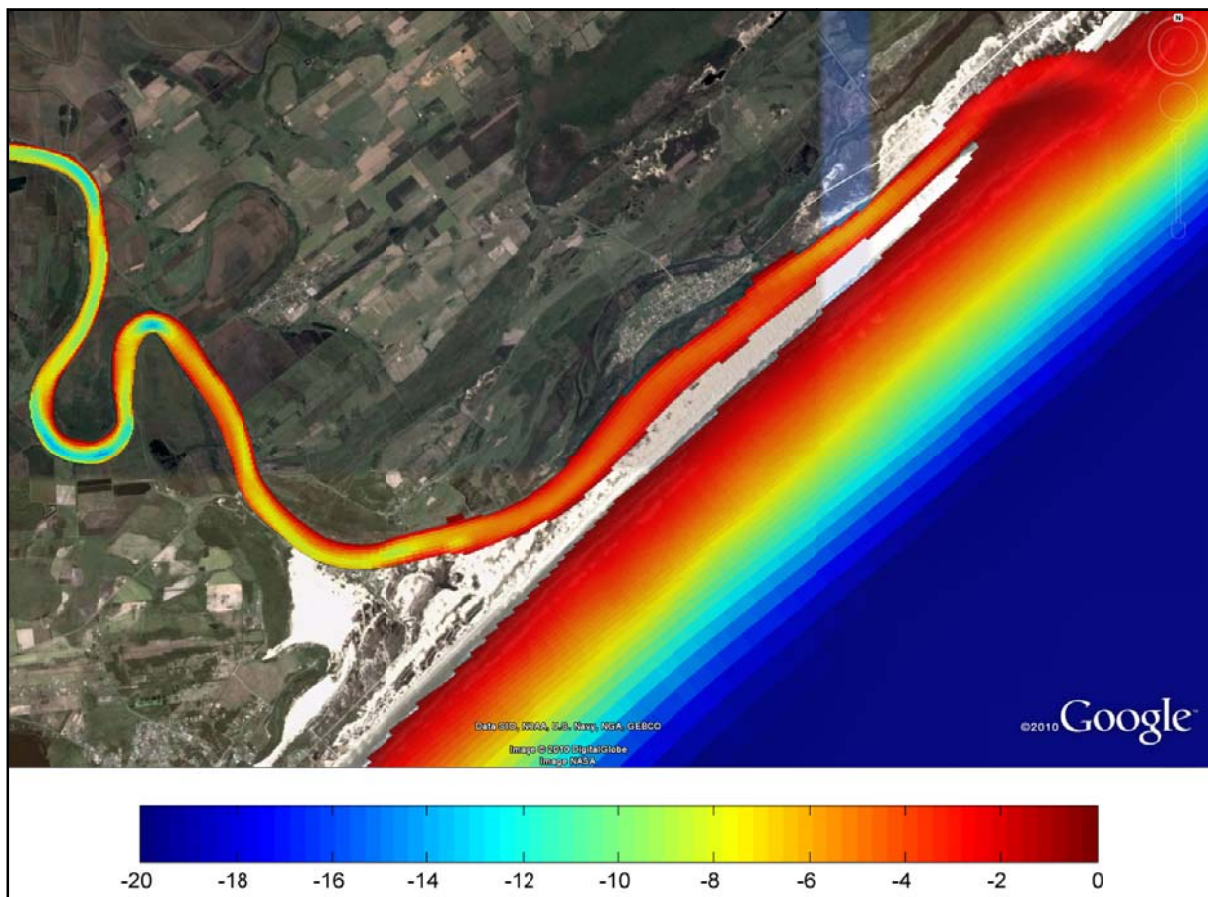


Figura 23: Cenário Atual. Batimetria em metros (MSL). A escala de cores limita a apresentação de profundidades de até 20 m.

## 5.2 ALTERNATIVA 1 (PROJETO INPH)

Corresponde ao cenário proposto pelo projeto do INPH, desenvolvido em 1993 (Figura 24). Neste cenário a geometria dos molhes apresenta forma semi-convergente de montante para jusante. O canal de navegação possui profundidade de 6 m. Nas demais áreas a batimetria é idêntica à utilizada no Cenário Atual.

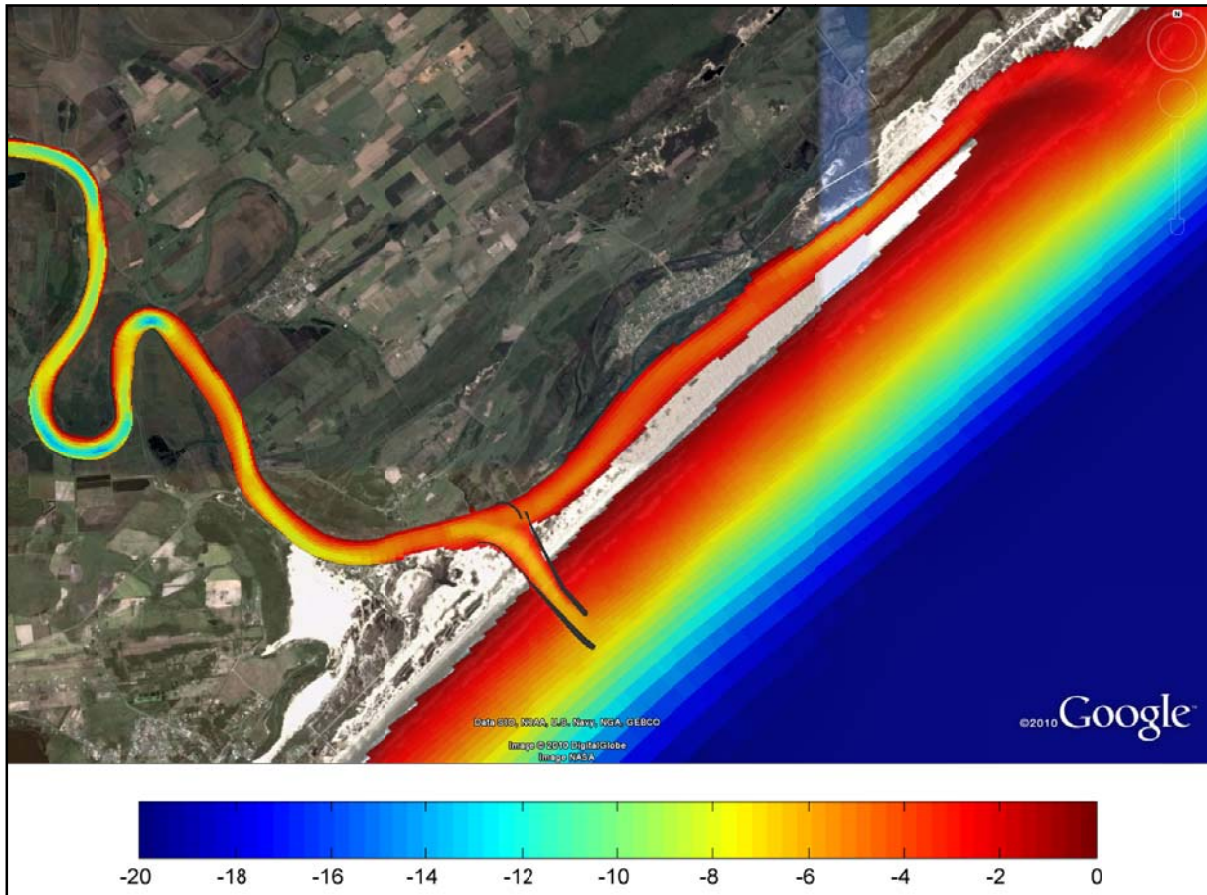


Figura 24: Cenário proposto pelo INPH, com as estruturas de fixação representadas pelos polígonos pretos. Batimetria em metros (MSL). A escala de cores limita a apresentação de profundidades de até 20 m.

### 5.3 ALTERNATIVA 2 (PROJETO INPH ABERTO)

Este cenário de simulação é o mesmo da Alternativa 1, descrita no item anterior, porém, com a ausência do espigão curvado que separa a parte do canal paralelo à costa. Esta alternativa não considera o fechamento da barra localizada ao norte do sistema. Na Figura 25 é apresentada em detalhe a configuração deste cenário.

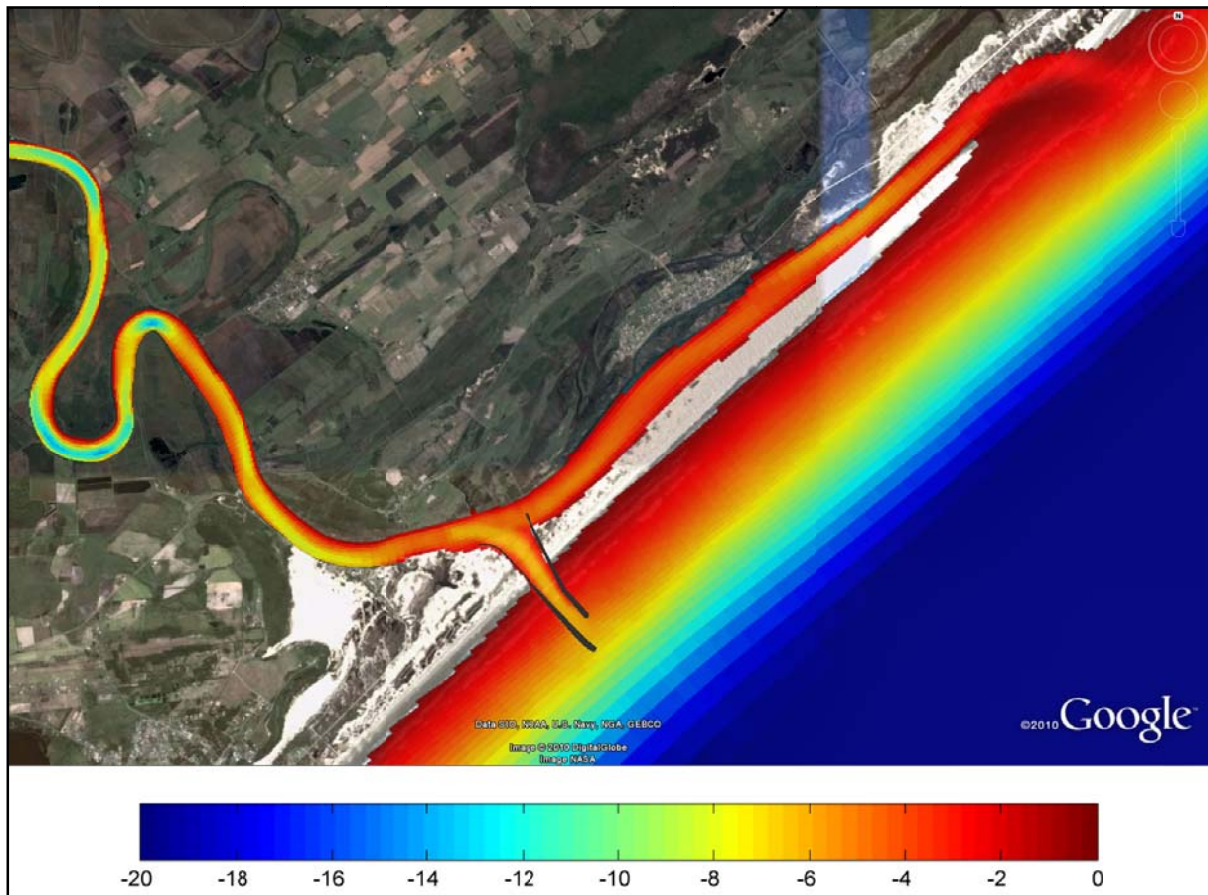


Figura 25: Cenário de fixação da Alternativa 2, estruturas de fixação representadas pelos polígonos pretos. Batimetria em metros (MSL). A escala de cores limita a apresentação de profundidades de até 20 m.



#### 5.4 ALTERNATIVA 3 (PROJETO INPH ABERTO, COM CANAL FECHADO POR DIQUE)

Corresponde às mesmas configurações da Alternativa 2, considerando o possível fechamento da barra atual, situada a norte (Figura 26).

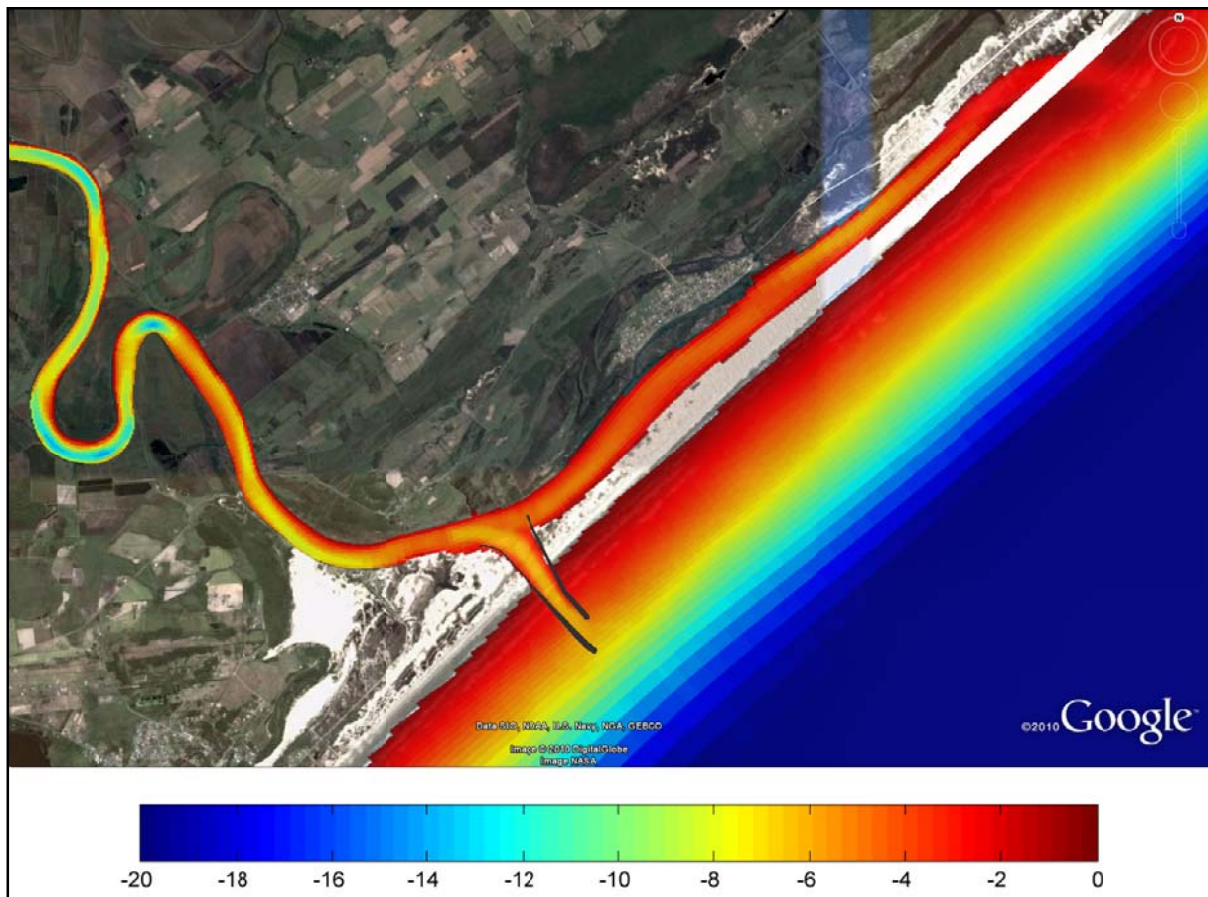


Figura 26: Cenário de fixação da Alternativa 3, estruturas de fixação representadas pelos polígonos pretos. Batimetria em metros (MSL). A escala de cores limita a apresentação de profundidades de até 20 m.



## 6. ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA OBRA NA INTRUSÃO SALINA

Para analisar os efeitos das diferentes alternativas estruturais de fixação da desembocadura do Rio Araranguá e dragagens nos processos de intrusão salina, os cenários propostos foram simulados utilizando três valores de descarga fluvial dos rios Itoupava, Mão Luzia e Manuel Alves. Cada experimento foi simulado por um período de 45 dias para a estabilização do mapa de sal ao longo do domínio de modelagem, sendo analisados os últimos 15 dias (um ciclo de maré - sizígia e quadratura).

As três vazões consideradas nesta etapa do estudo representam uma situação de vazão extremamente baixa (Q95), vazão intermediária (Q55) e vazão alta (Q15), também baseados nos dados históricos da Agência Nacional de Águas para as estações Taquaruçu, Foz Manuel Alves e Forquilha (Tabela 6).

Tabela 6: Vazões utilizadas nos modelos de análise da influência das alternativas (m<sup>3</sup>/s).

Permanência	Rio Itoupava (estação Taquaruçu)	Rio Mãe Luzia (estação Forquilha)	Rio Manuel Alves (estação Foz Manuel Alves)	Total (m <sup>3</sup> /s)
95%	1,9	1,21	0,41	3,52
55%	12,6	6,43	5,08	24,11
15%	54,9	29,4	21,4	105,7

É importante ressaltar que as vazões dos rios correspondentes ao Q95 são extremamente baixas, com recorrência somente em 5% do tempo. O Q55 representa uma condição próxima da mediana e o Q15 uma condição de vazão elevada.

No contorno externo (oceano) o modelo foi forçado por uma série temporal de nível d'água gerada pela composição da maré astronômica e de uma esquematização da maré meteorológica. A maré astronômica foi definida a partir das constantes harmônicas da FEMAR e a maré meteorológica assumiu-se como uma onda com período de sete dias e amplitude de 0,3 m (Figura 27).

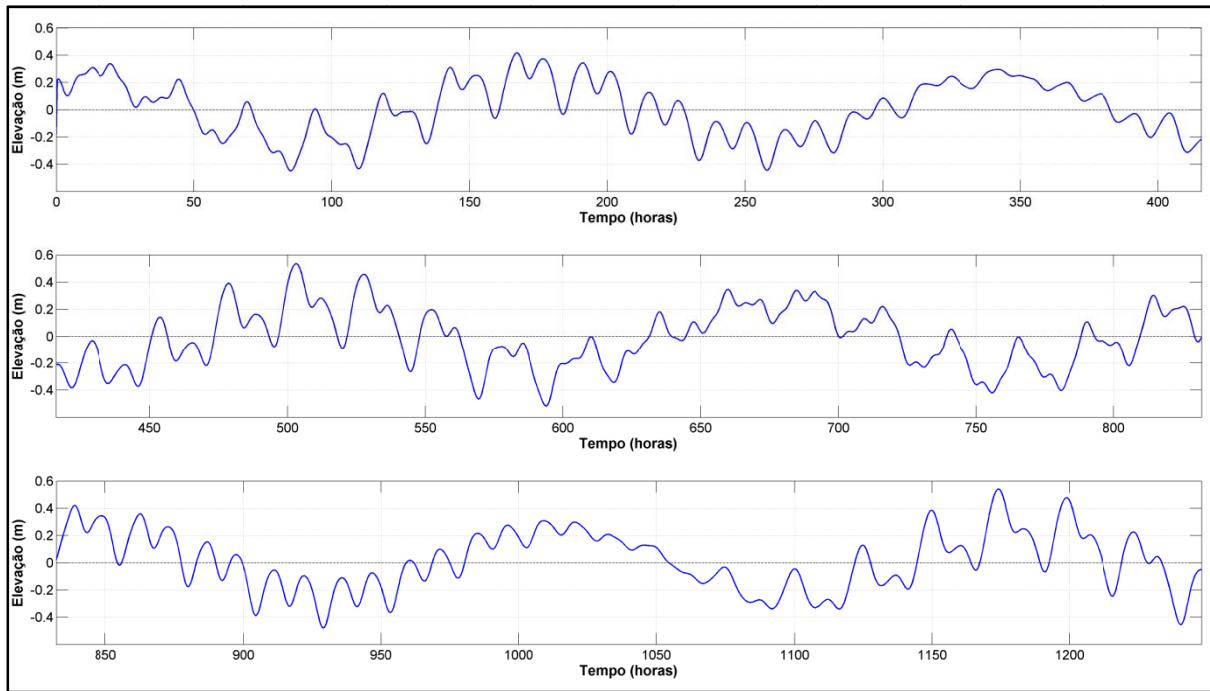


Figura 27: Série temporal de maré usada nas simulações das alternativas.

A análise dos resultados foi focada nos últimos 15 dias de simulação. O período de tempo anterior - um mês - foi destinado à estabilização da distribuição de sal, de acordo com as forçantes de vazão fluvial consideradas. Foram definidos quatro tempos diferentes para a apresentação dos resultados, representando a estufa de maré enchente e estufa de maré vazante para um período de maré de quadratura e de sizigia. Na Figura 28 é apresentada a variação do nível durante a simulação do cenário atual. Em vermelho são apresentados os instantes definidos para análise dos resultados.

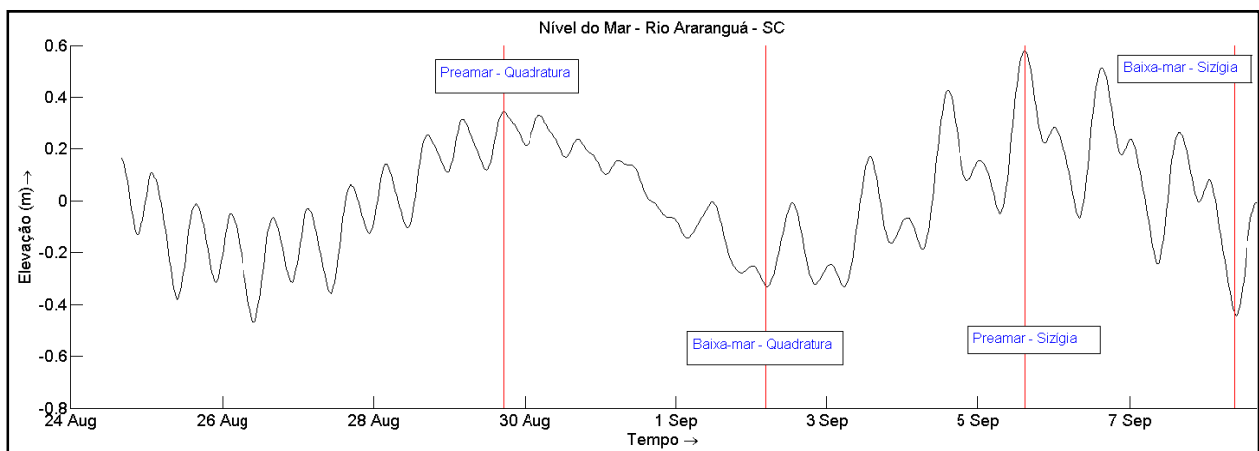


Figura 28: Série temporal (últimos 15 dias) de nível e os tempos pontuais para análise de intrusão salina.



Para cada tempo selecionado foram gerados gráficos de salinidade ao longo das seções longitudinais que seguem o rio Itoupava e o rio Mãe Luzia (Figura 20 e Figura 21), representando a intrusão salina ao longo dos rios. Os resultados das simulações considerando o cenário atual e as alternativas propostas, referentes a cada uma das vazões especificadas, são apresentados da Figura 29 até aFigura 76.

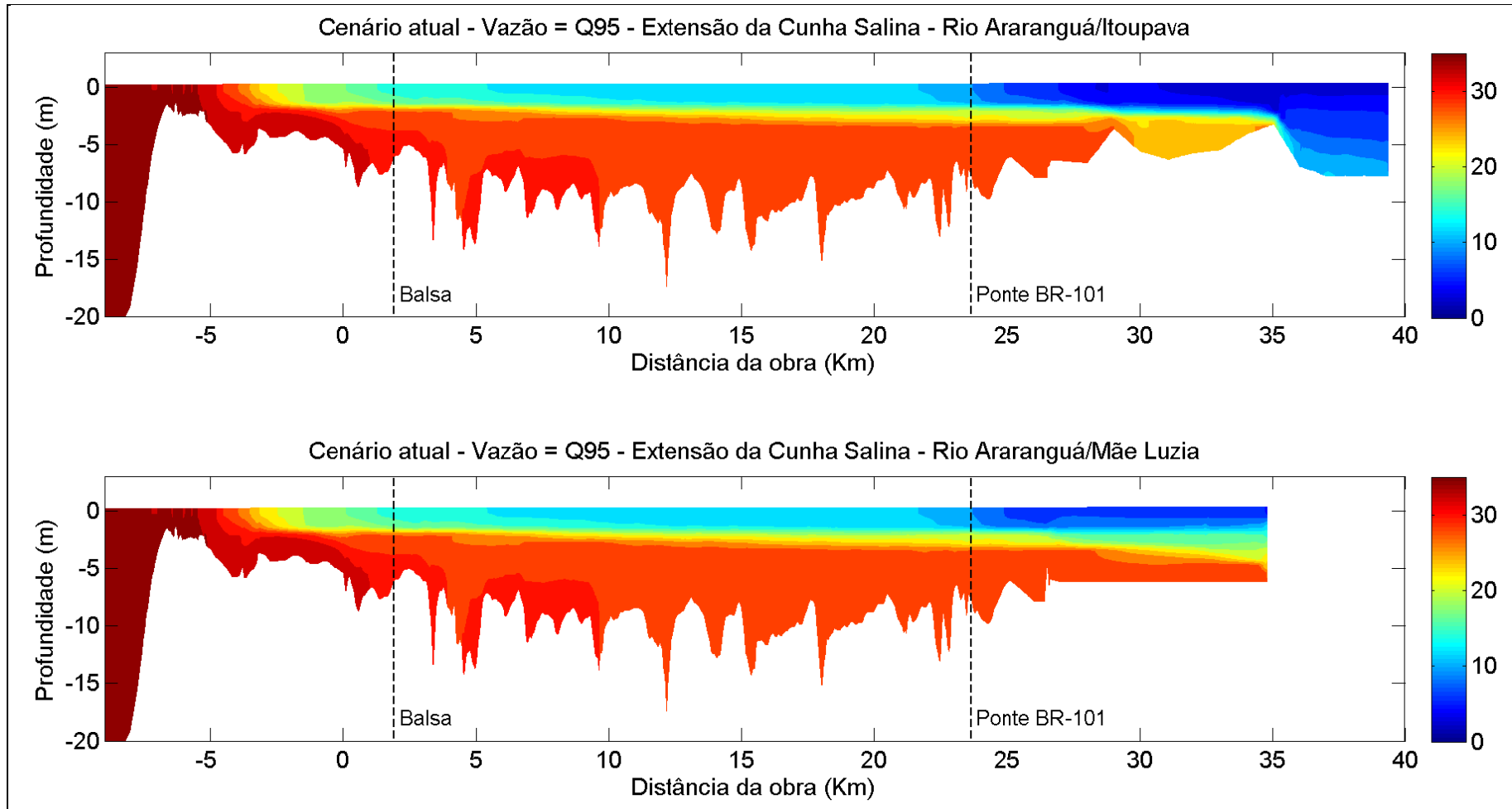


Figura 29: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário atual, vazão Q95, em período de maré cheia de quadratura.

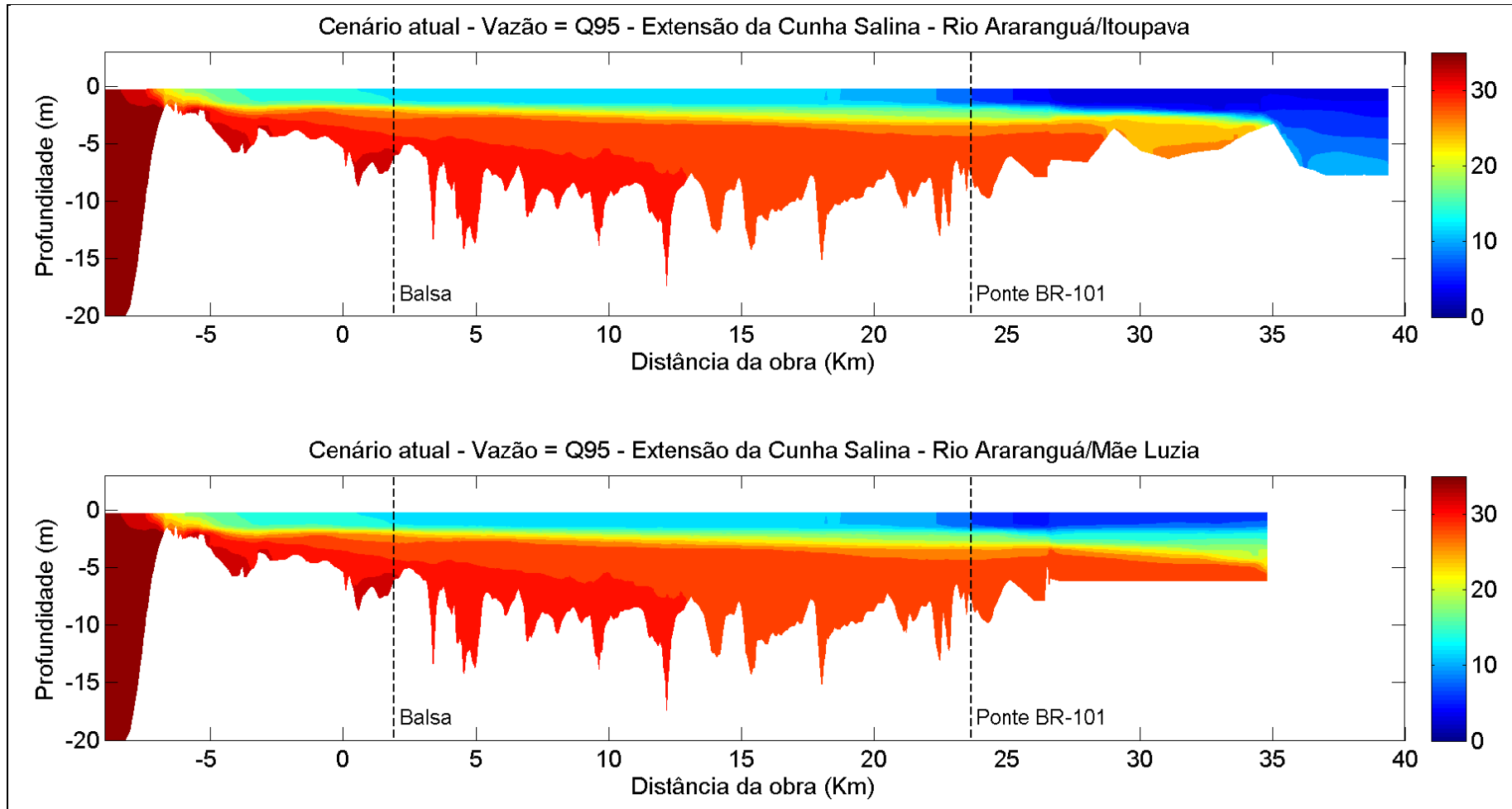


Figura 30: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário atual, vazão Q95, em período de maré baixa de quadratura.

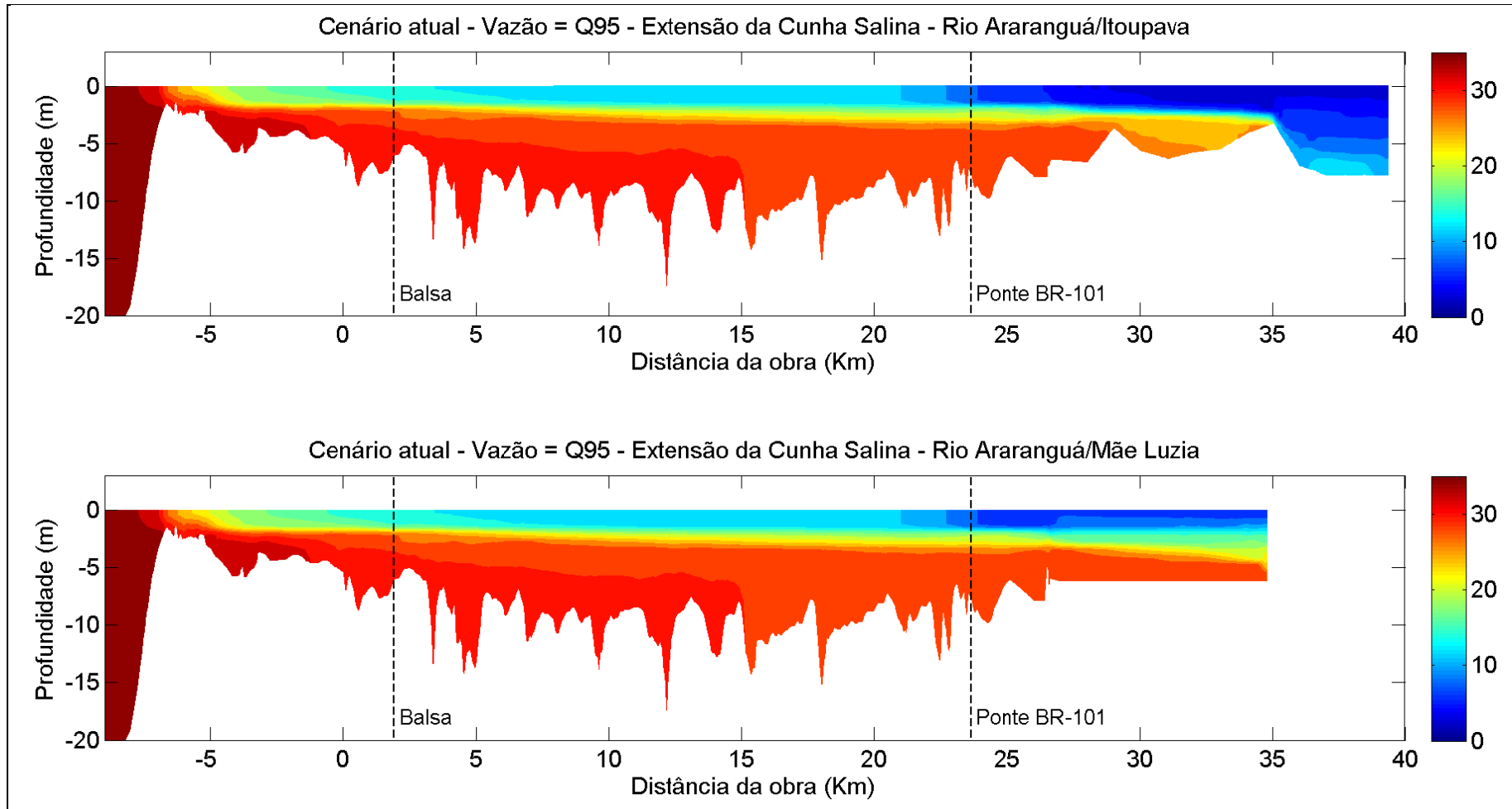


Figura 31: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário atual, vazão Q95, em período de maré cheia de sizígia.

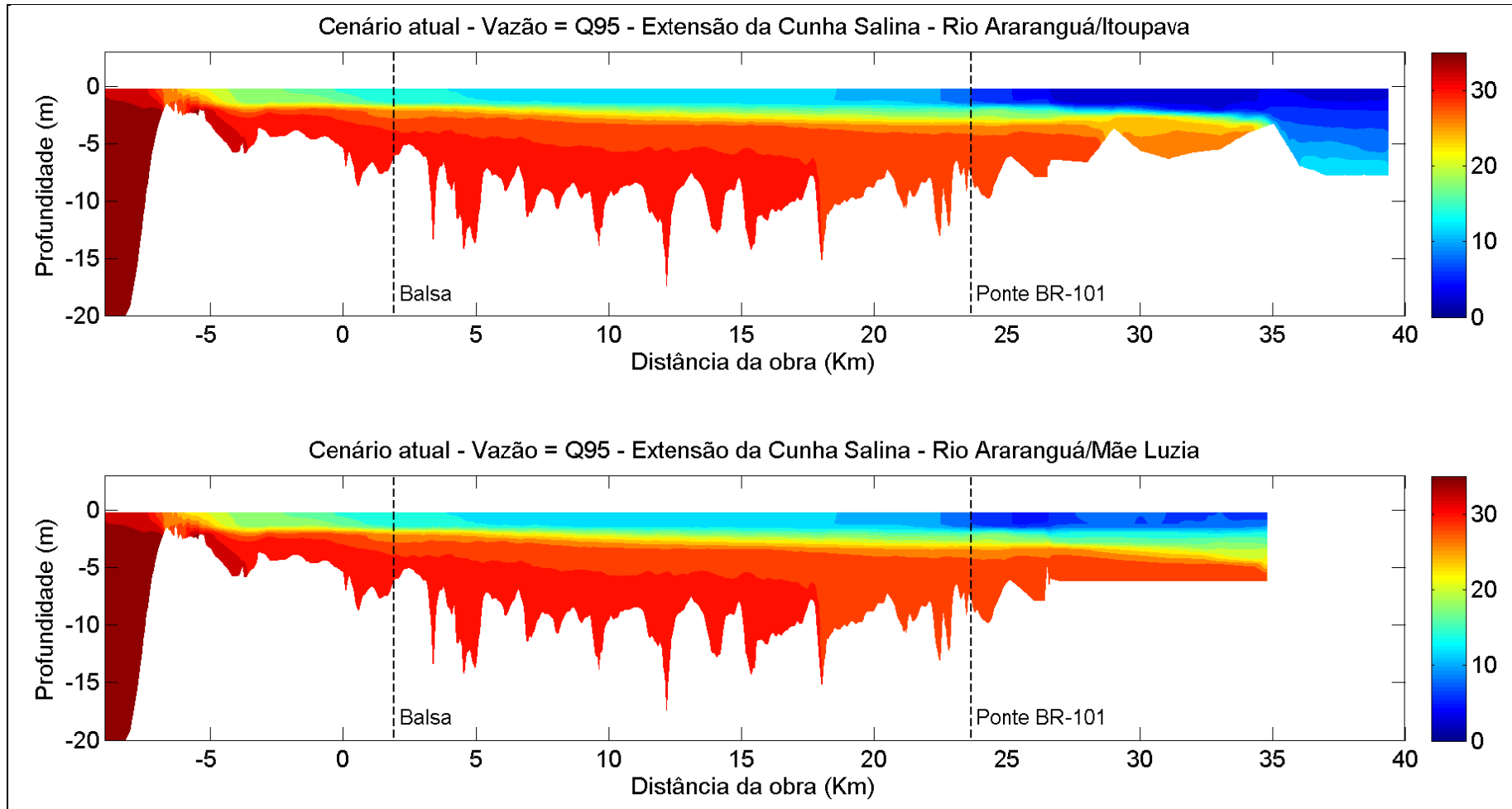


Figura 32: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário atual, vazão Q95, em período de maré baixa de sizígia.



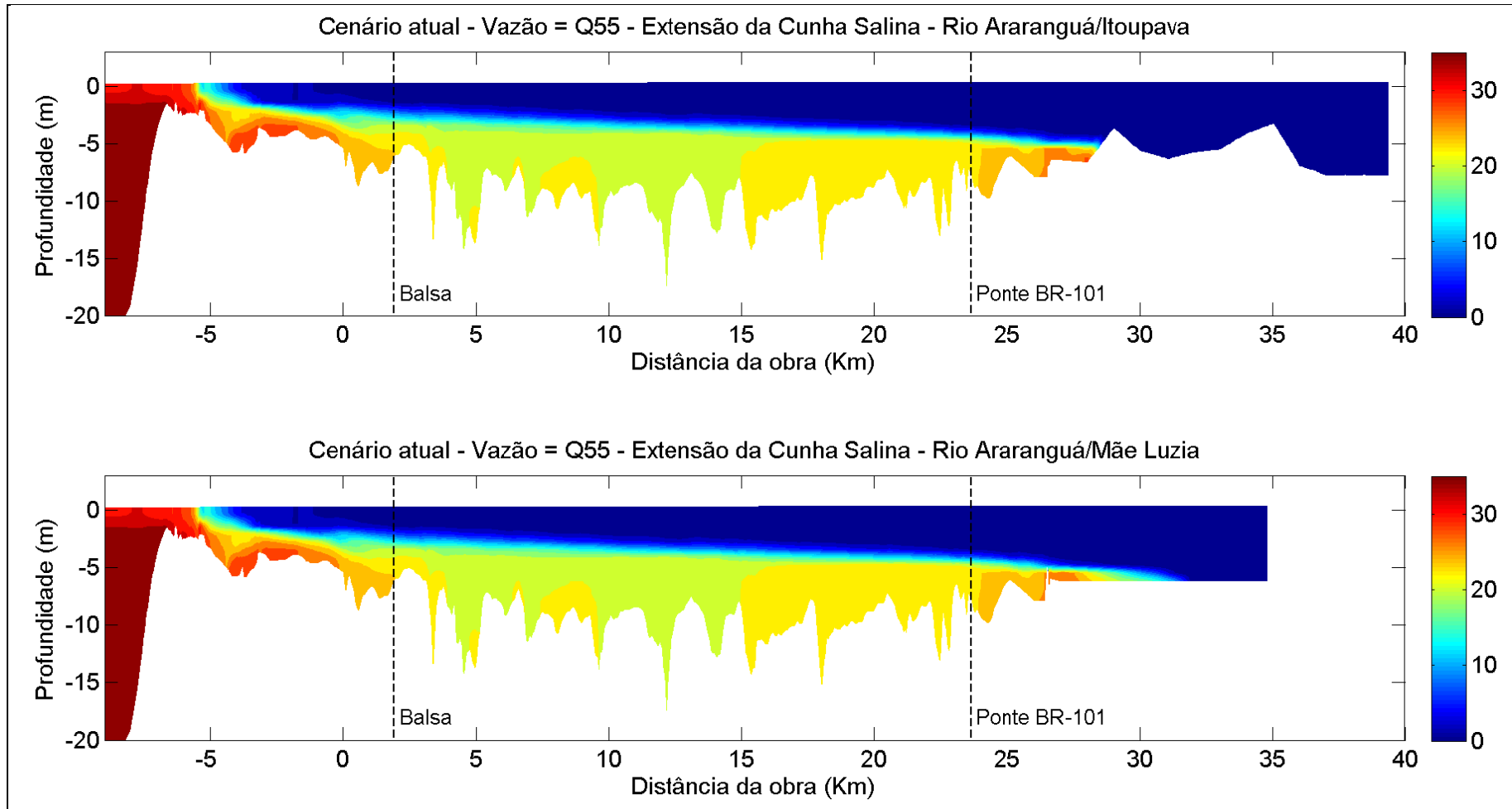


Figura 33: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário atual, vazão Q55, em período de maré cheia de quadratura.

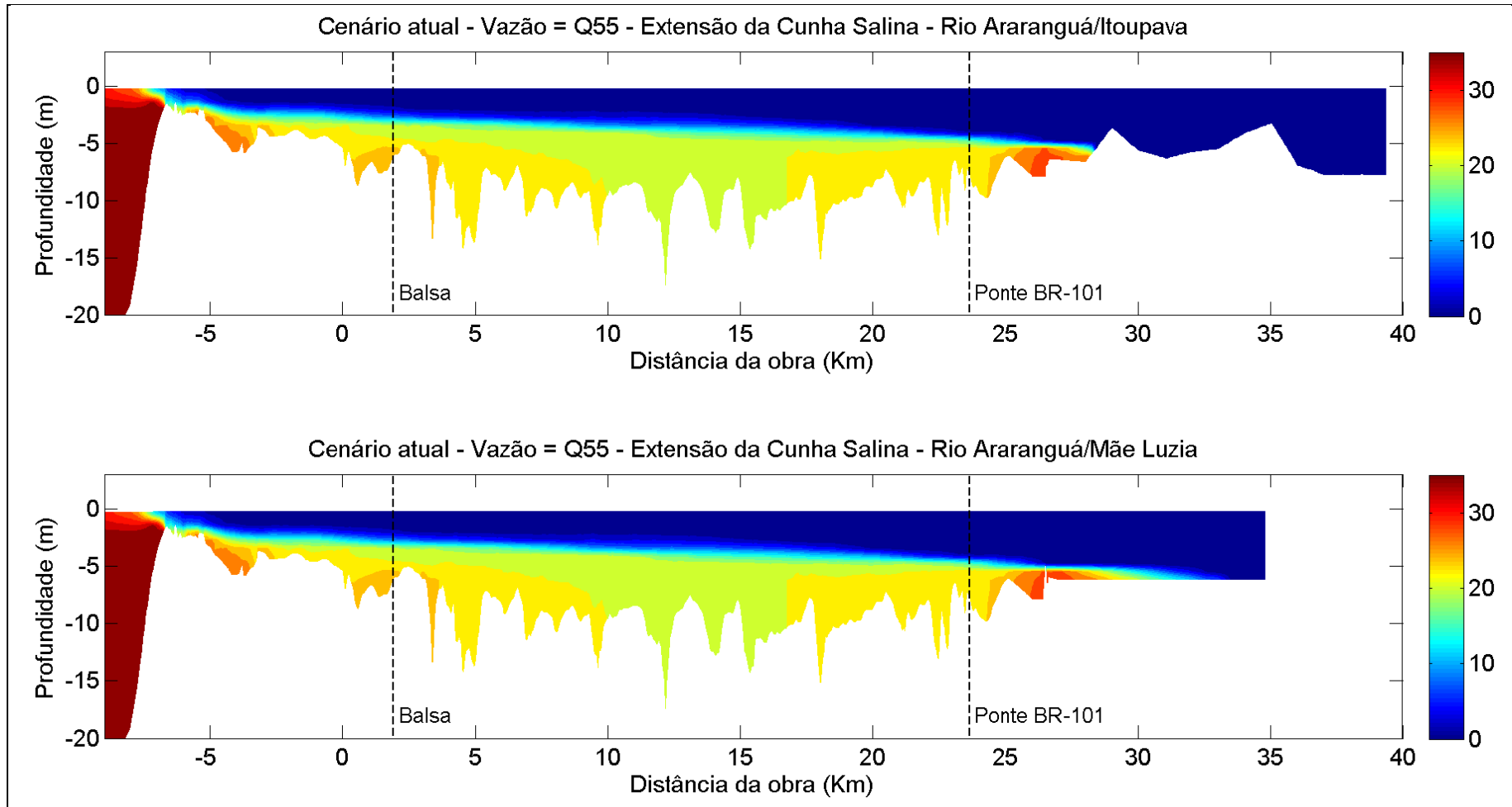


Figura 34: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário atual, vazão Q55, em período de maré baixa de quadratura.

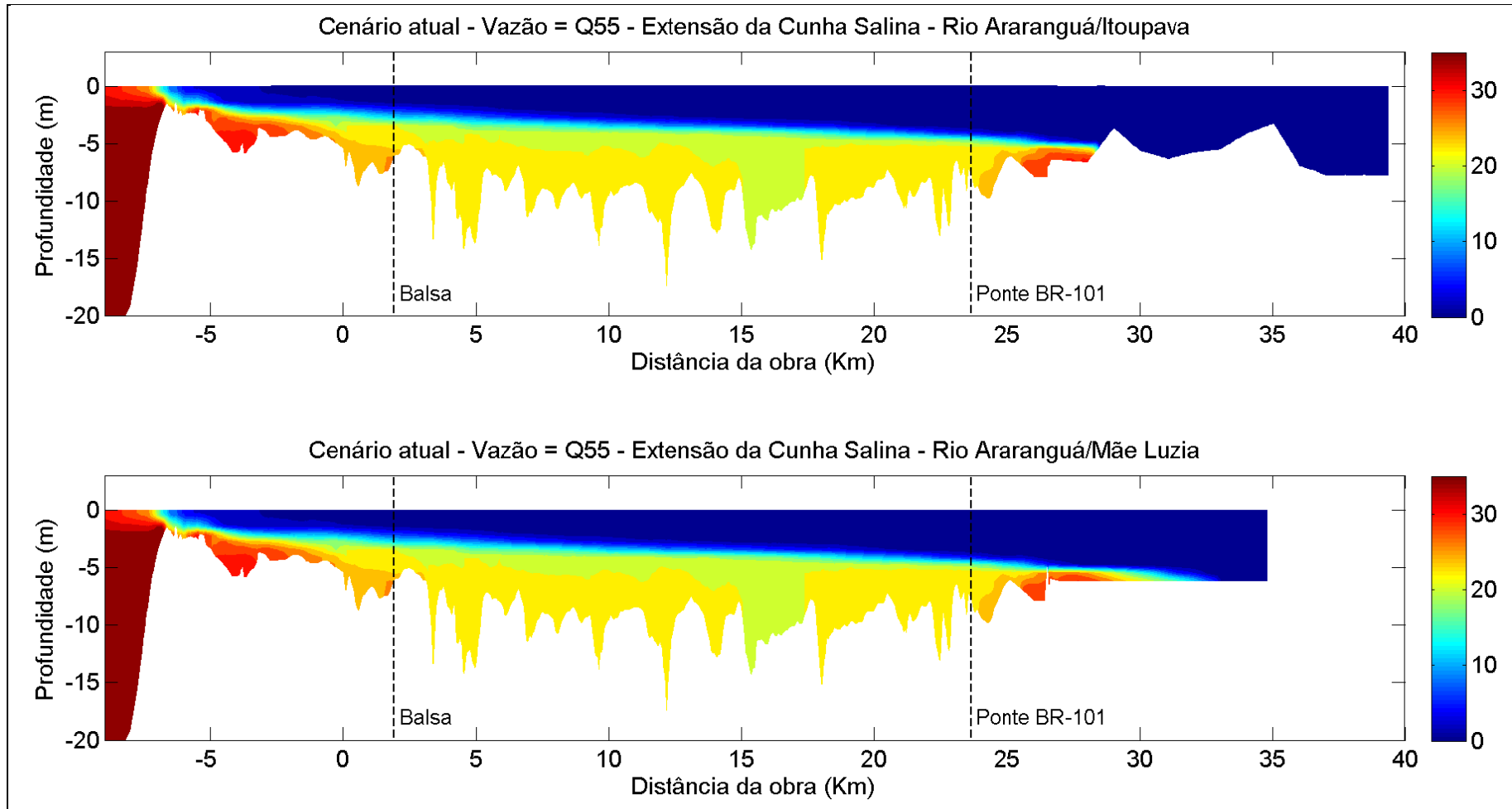


Figura 35: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário atual, vazão Q55, em período de maré cheia de sizígia.

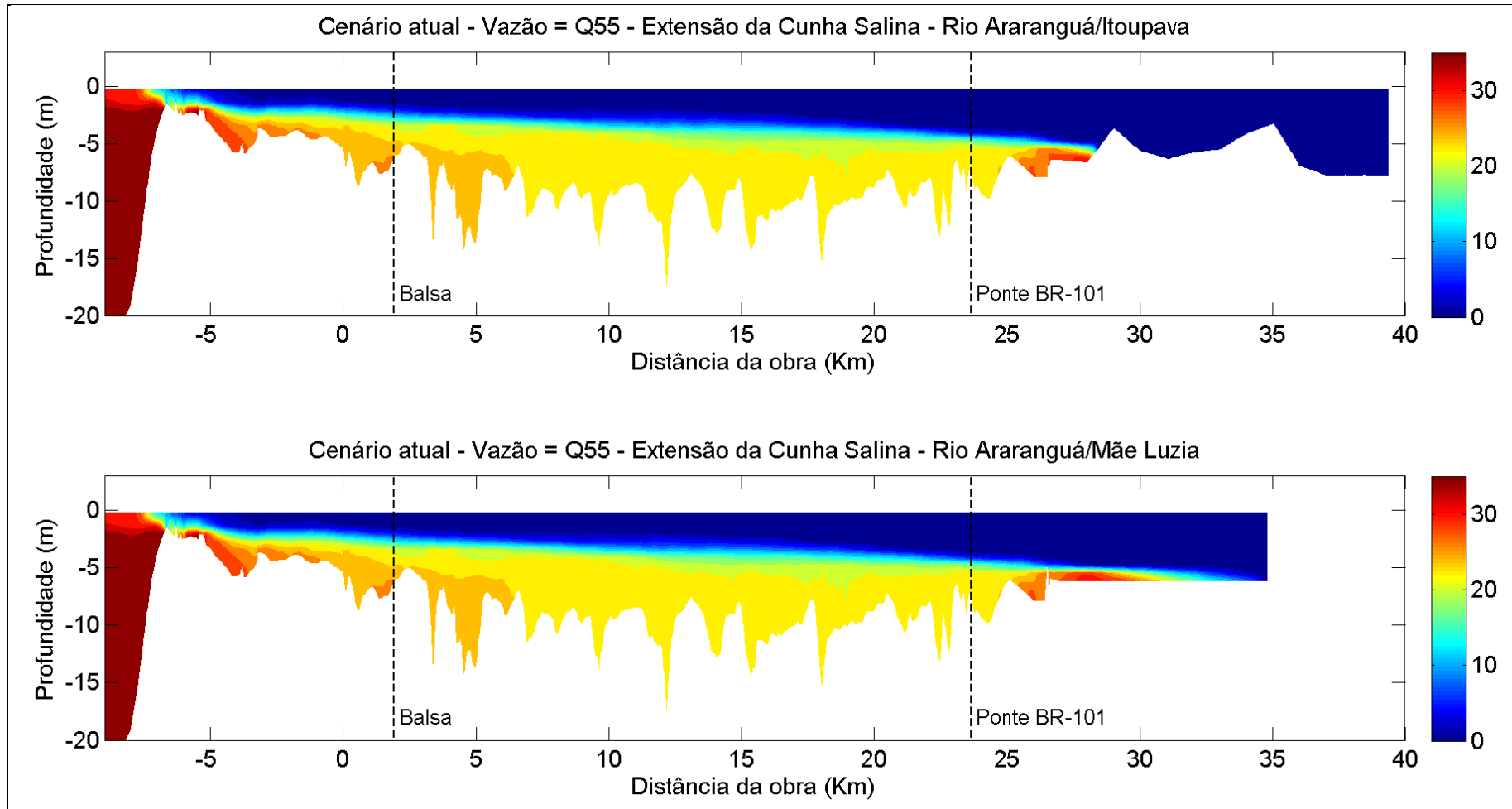


Figura 36: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário atual, vazão Q55, em período de maré baixa de sizígia.

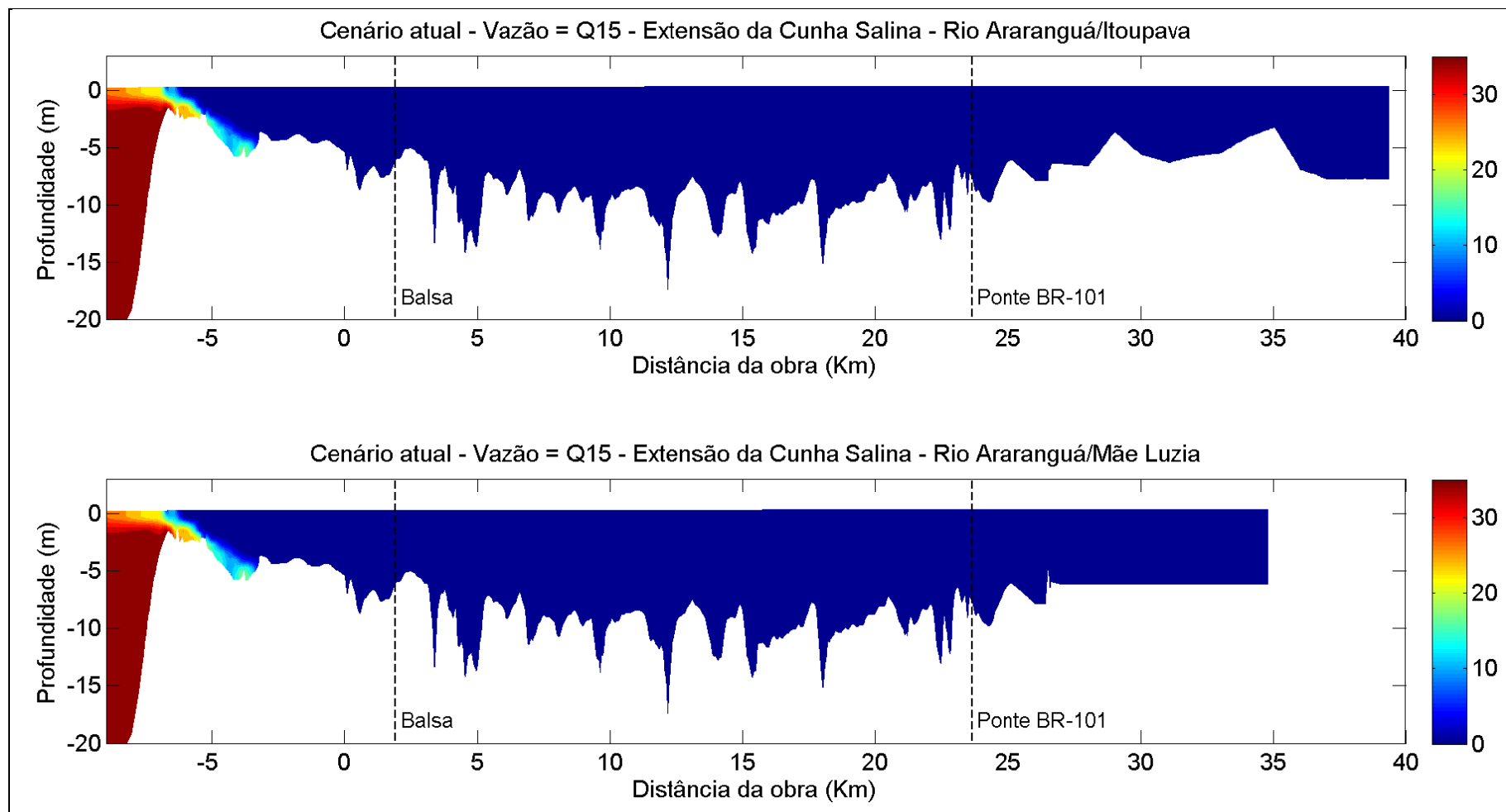


Figura 37: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário atual, vazão Q15, em período de maré cheia de quadratura.

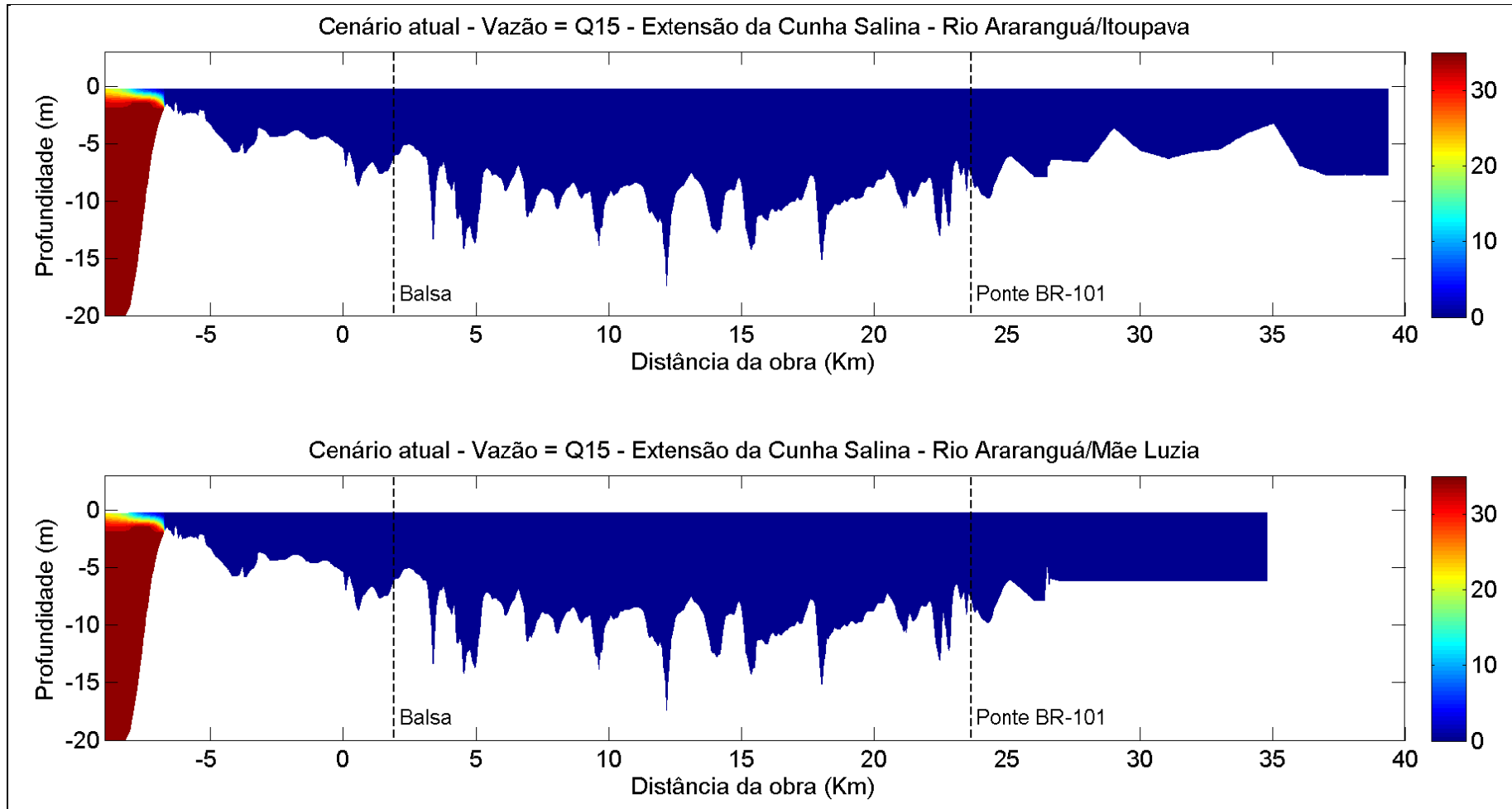


Figura 38: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário atual, vazão Q15, em período de maré baixa de quadratura.

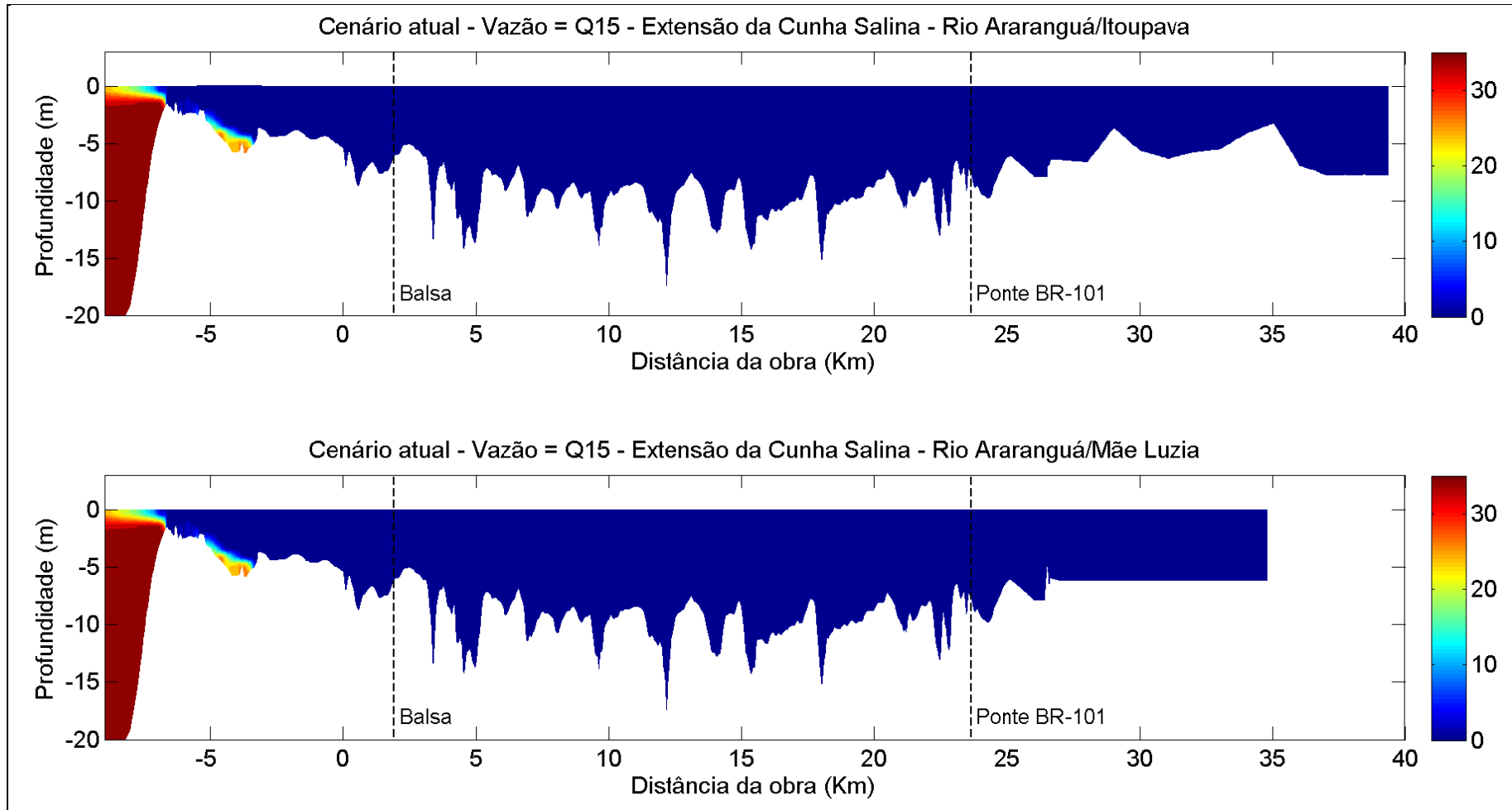


Figura 39: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário atual, vazão Q15, em período de maré cheia de sizígia.

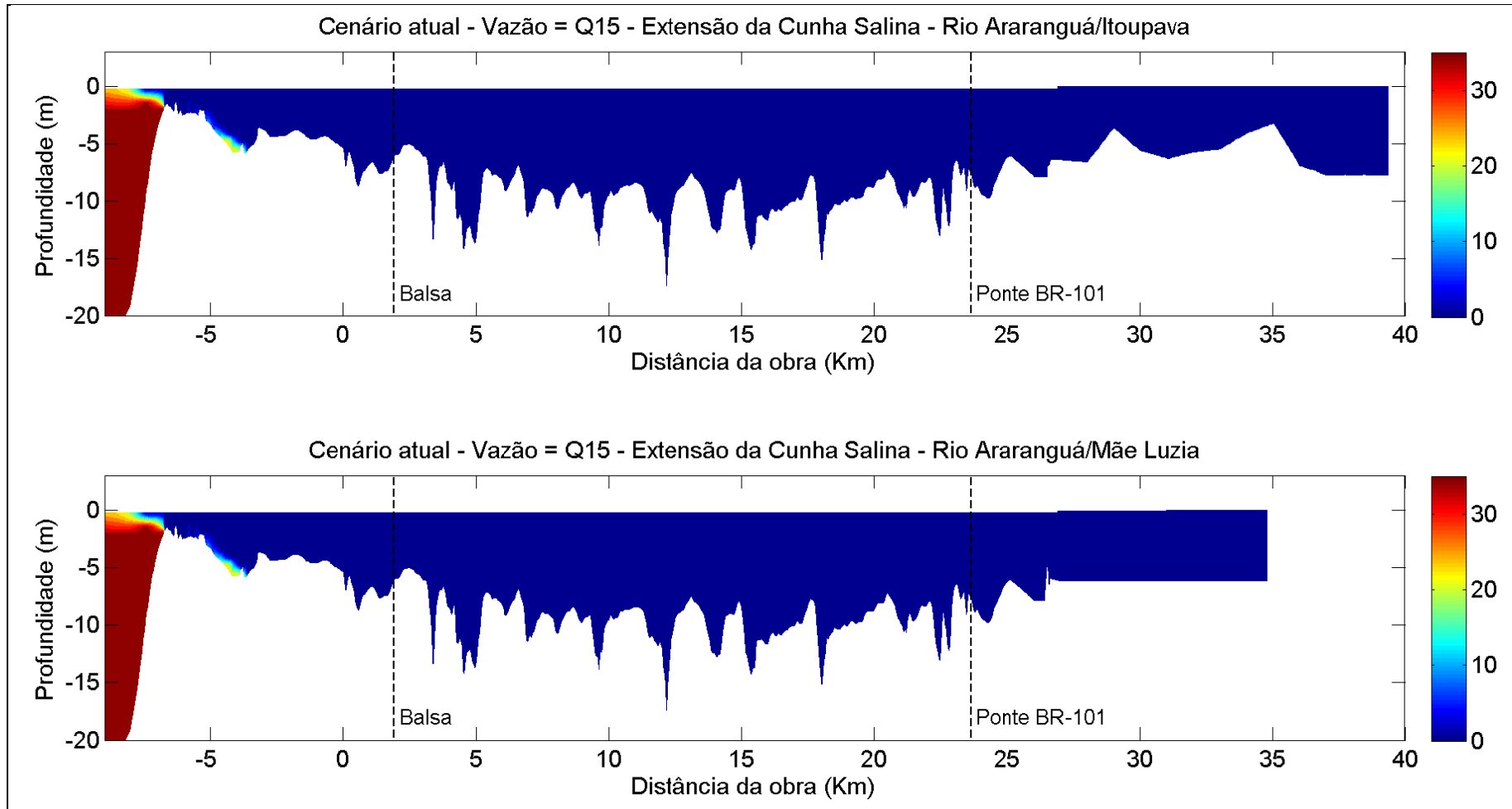


Figura 40: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário atual, vazão Q15, em período de maré baixa de sizígia.



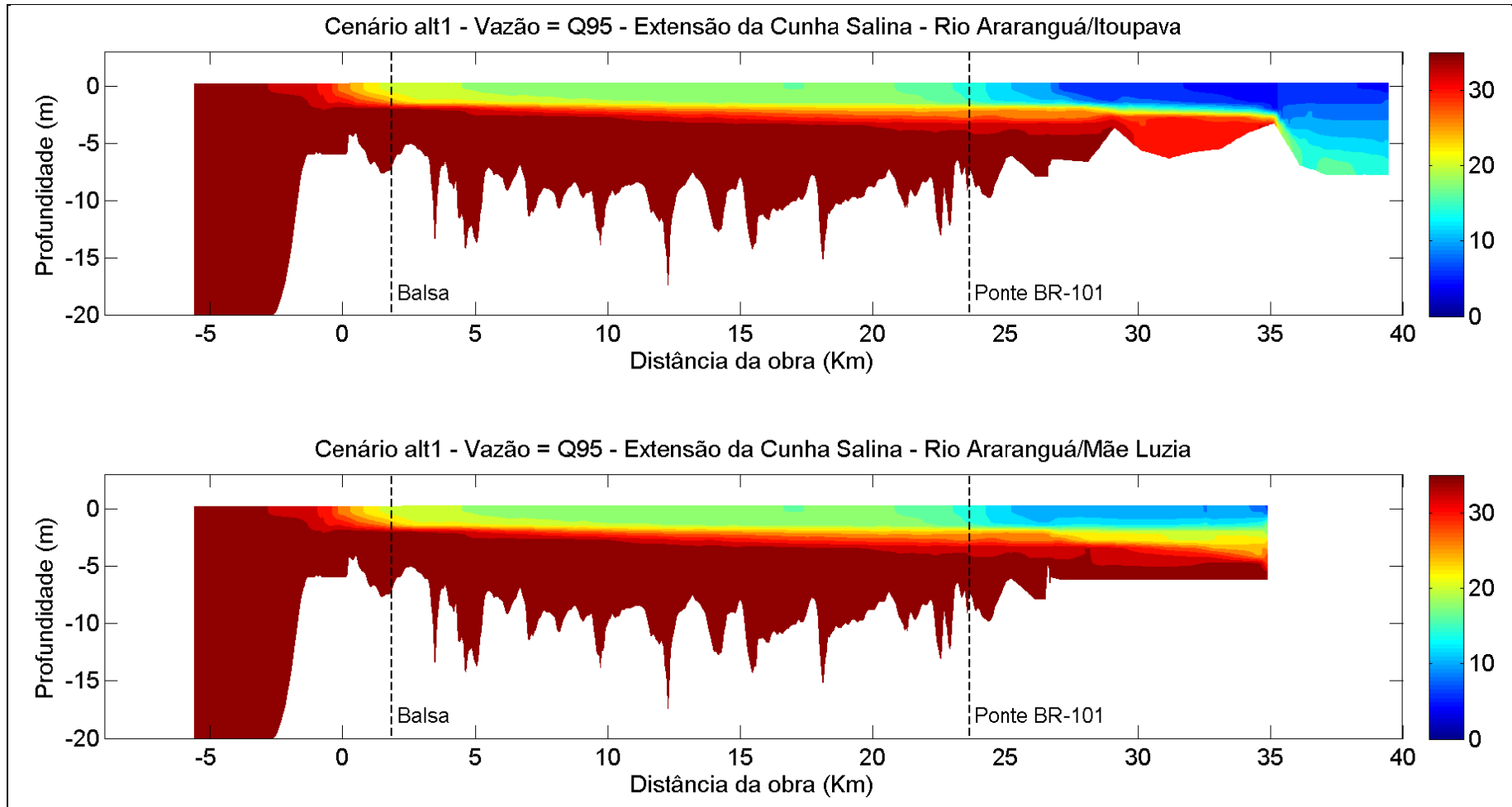


Figura 41: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 1, vazão Q95, em período de maré cheia de quadratura.

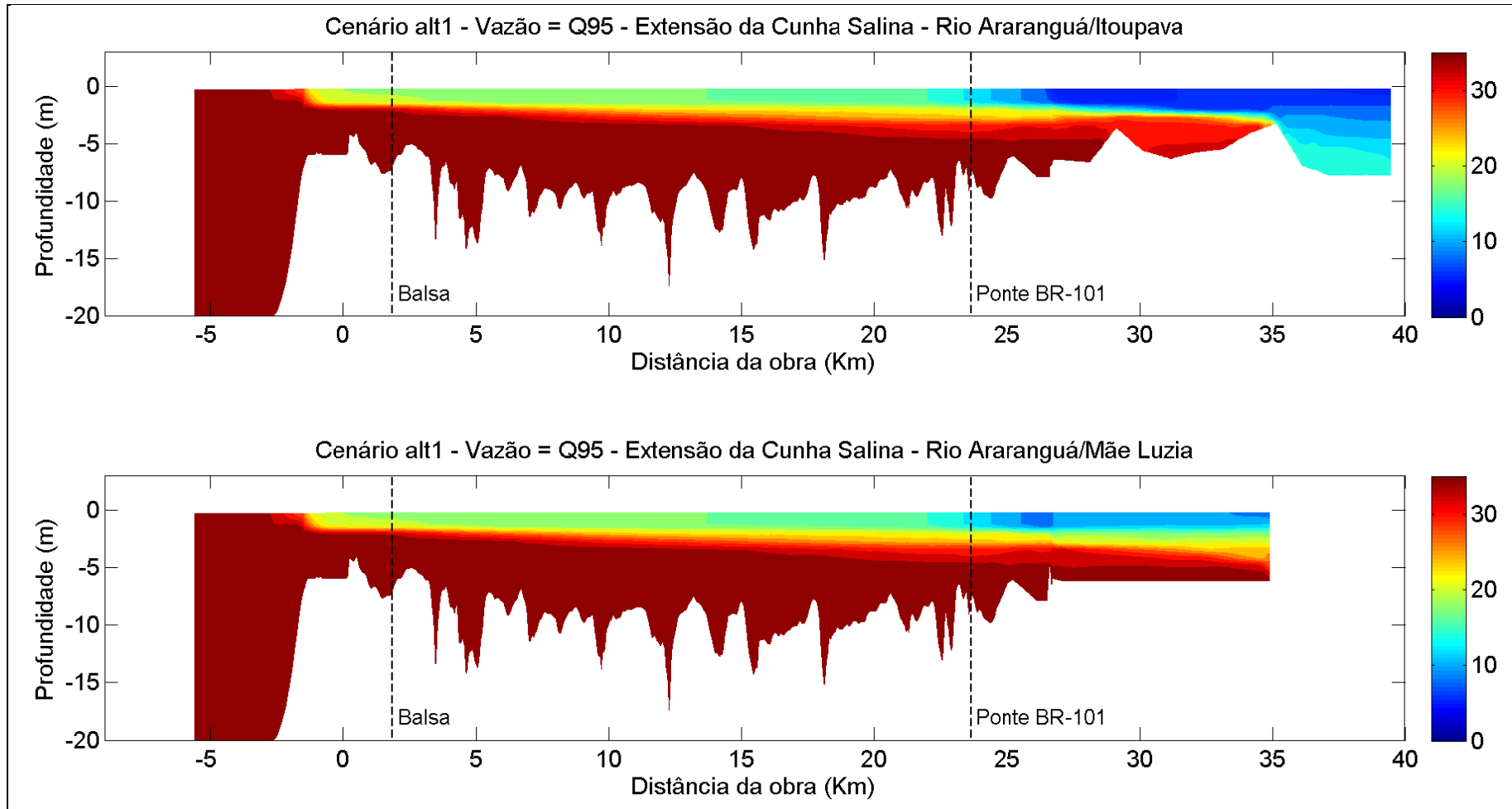


Figura 42: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 1, vazão Q95, em período de maré baixa de quadratura.

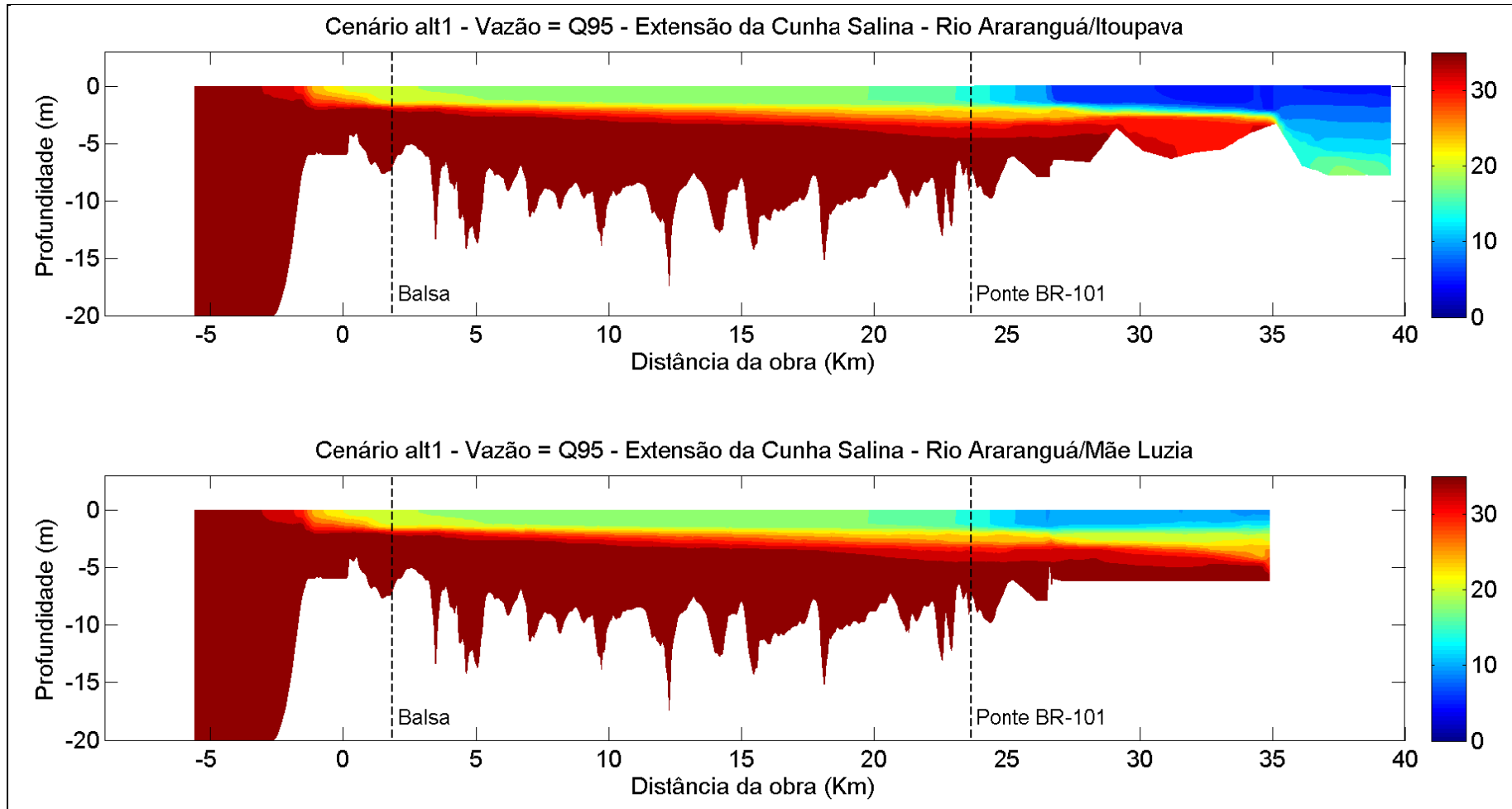


Figura 43: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 1, vazão Q95, em período de maré cheia de sizígia.

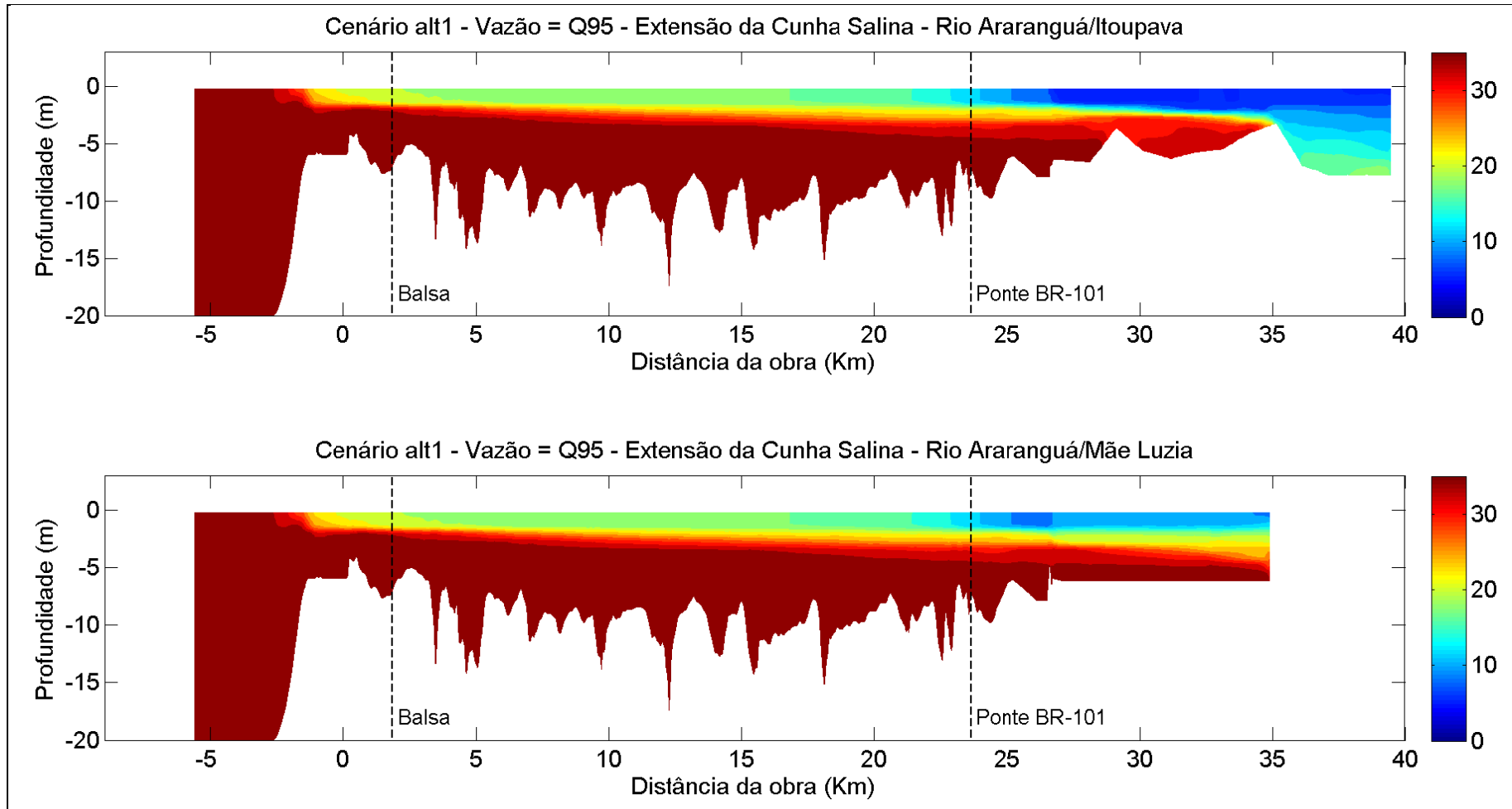


Figura 44: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 1, vazão Q95, em período de maré baixa de sizígia.

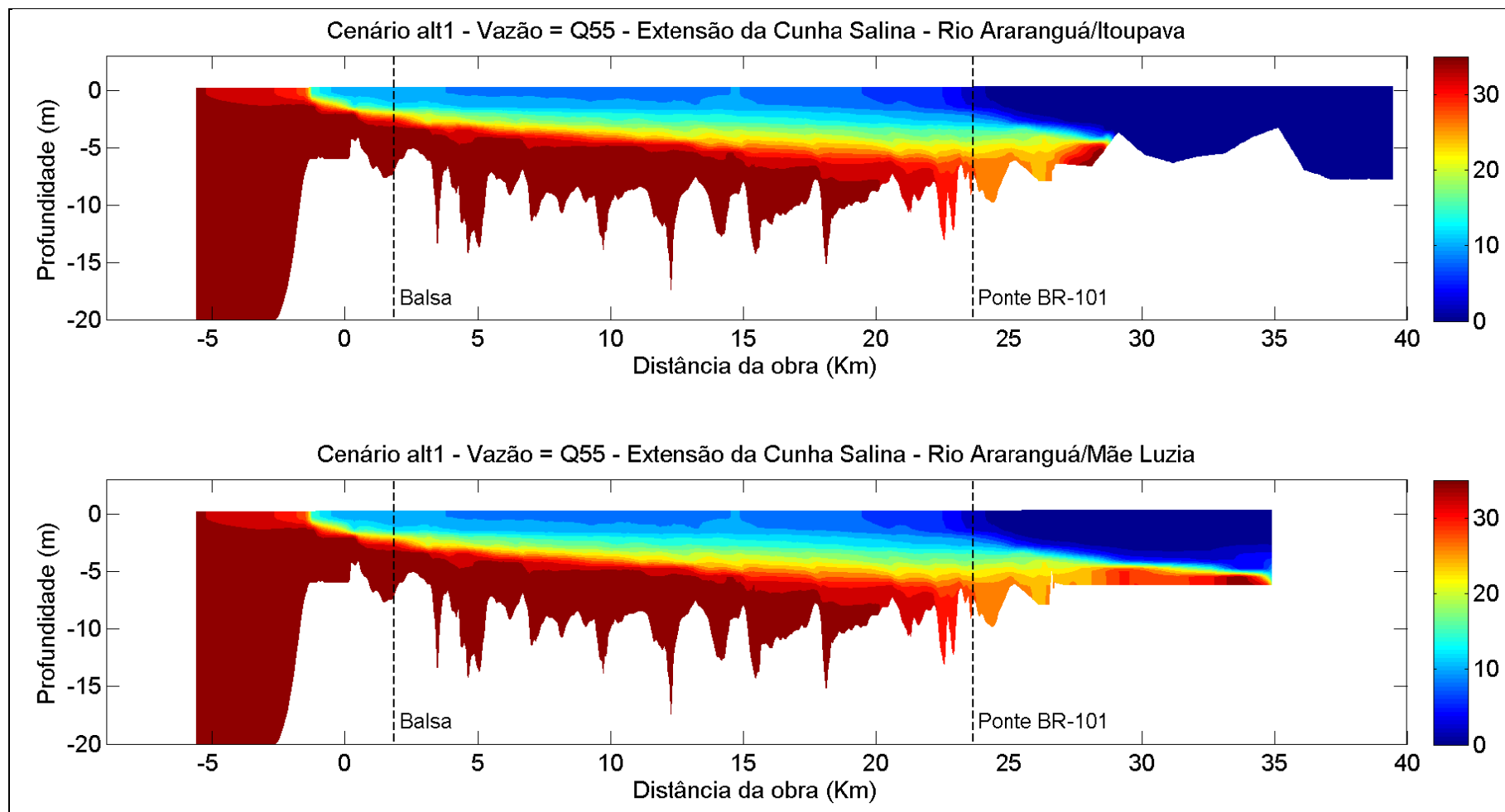


Figura 45: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 1, vazão Q55, em período de maré cheia de quadratura.

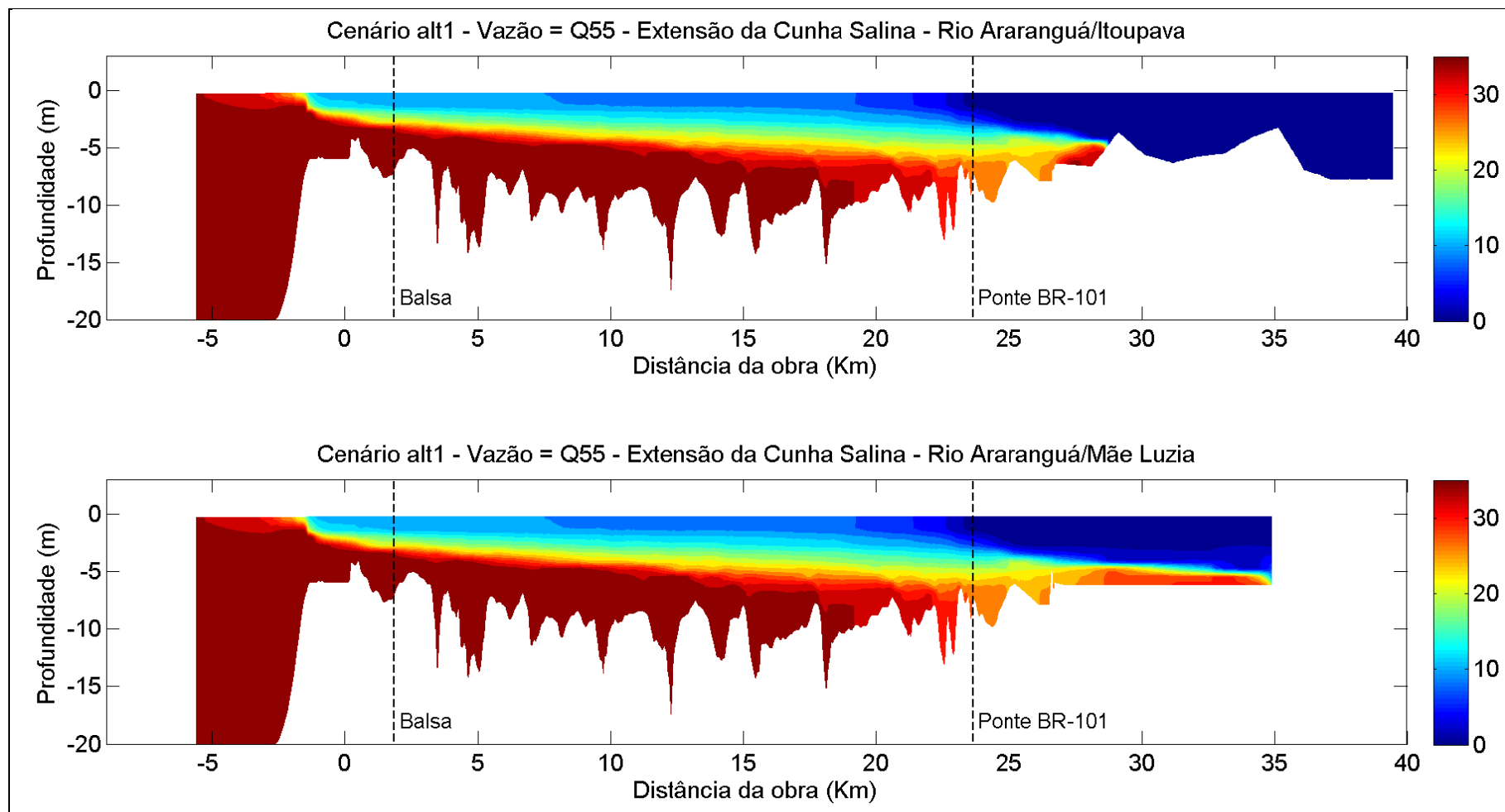


Figura 46: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 1, vazão Q55, em período de maré baixa de quadratura.

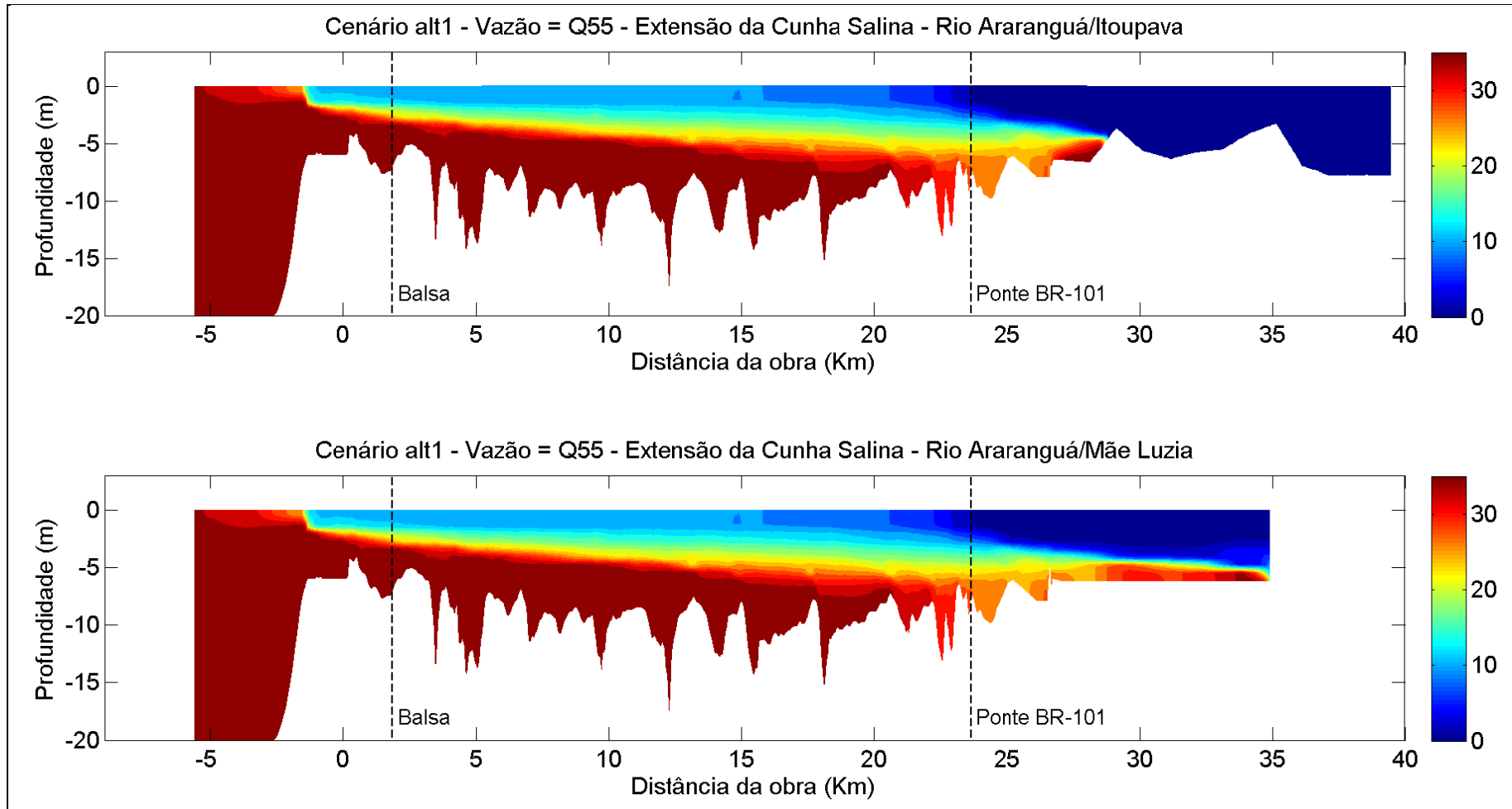


Figura 47: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 1, vazão Q55, em período de maré cheia de sizígia.

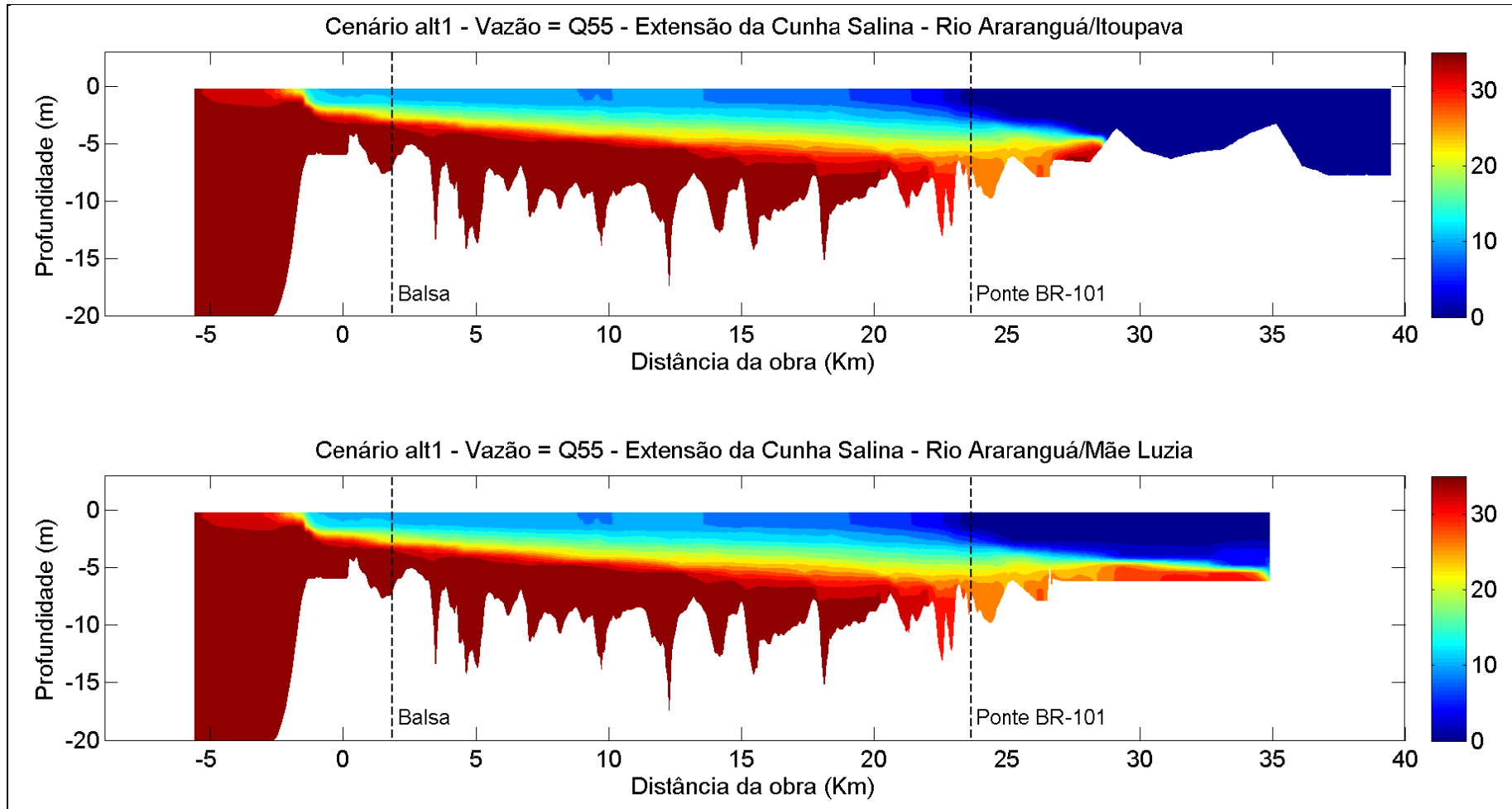


Figura 48: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 1, vazão Q55, em período de maré baixa de sizígia.



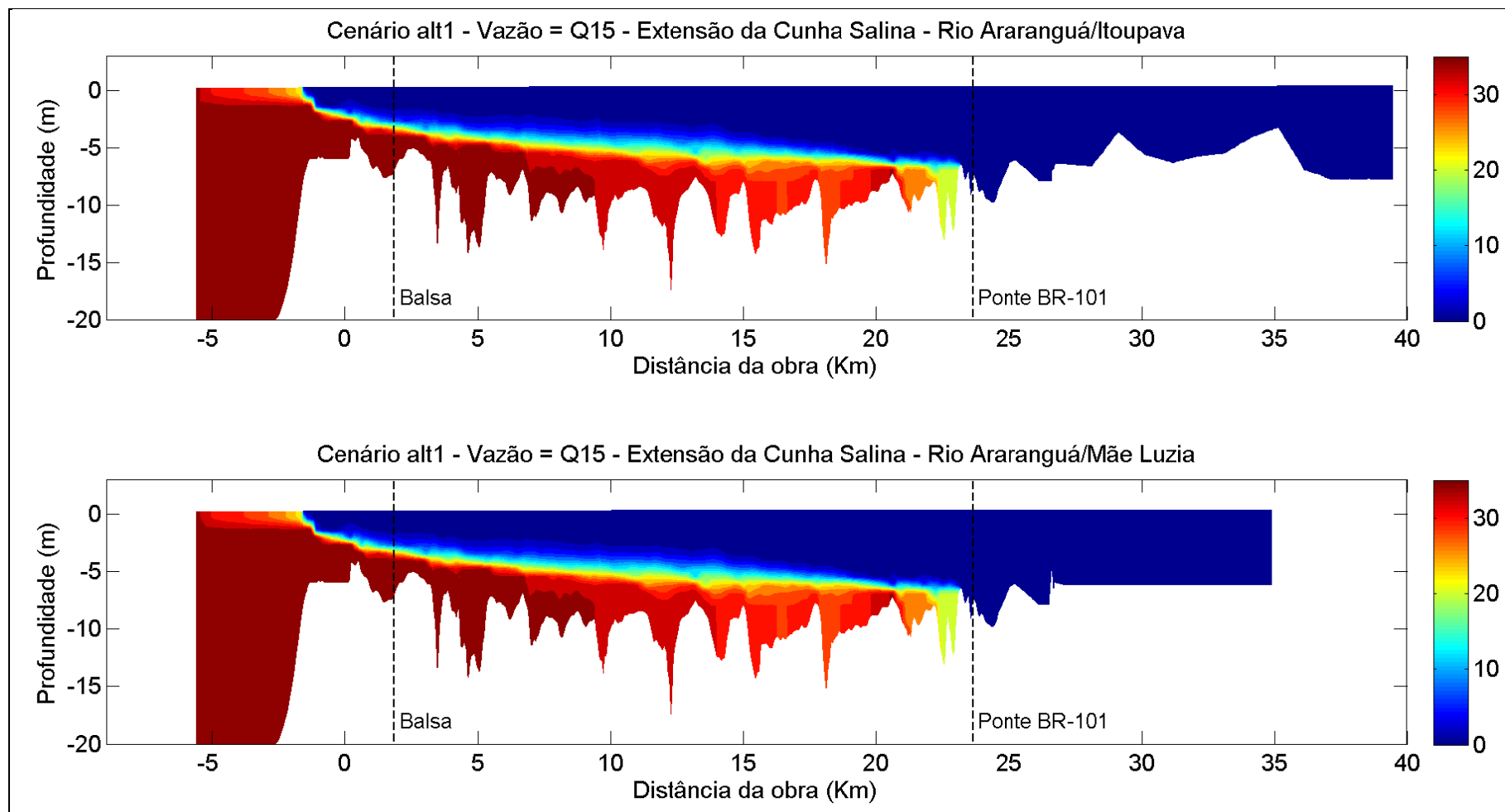


Figura 49: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 1, vazão Q15, em período de maré cheia de quadratura.

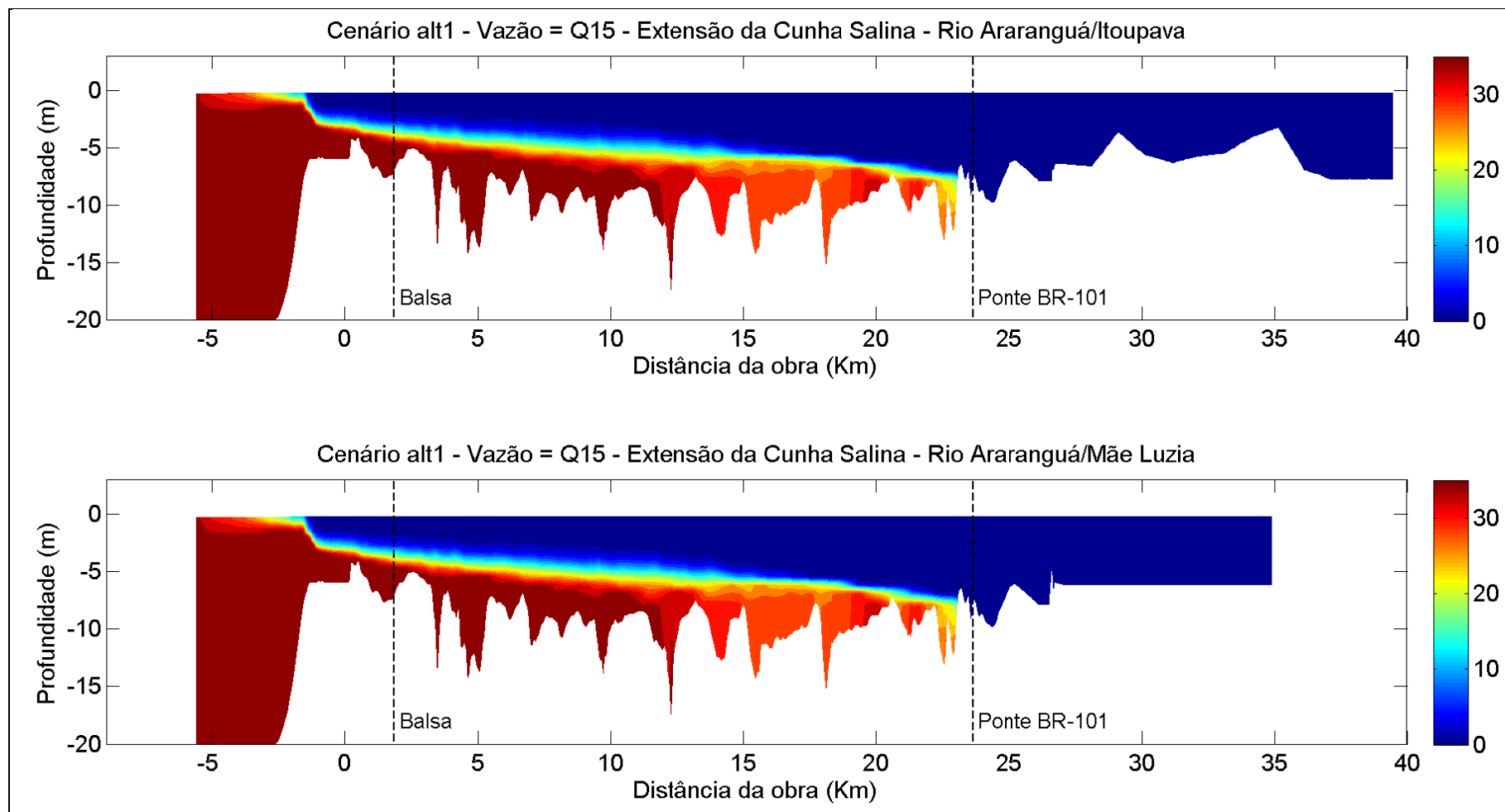


Figura 50: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 1, vazão Q15, em período de maré baixa de quadratura.

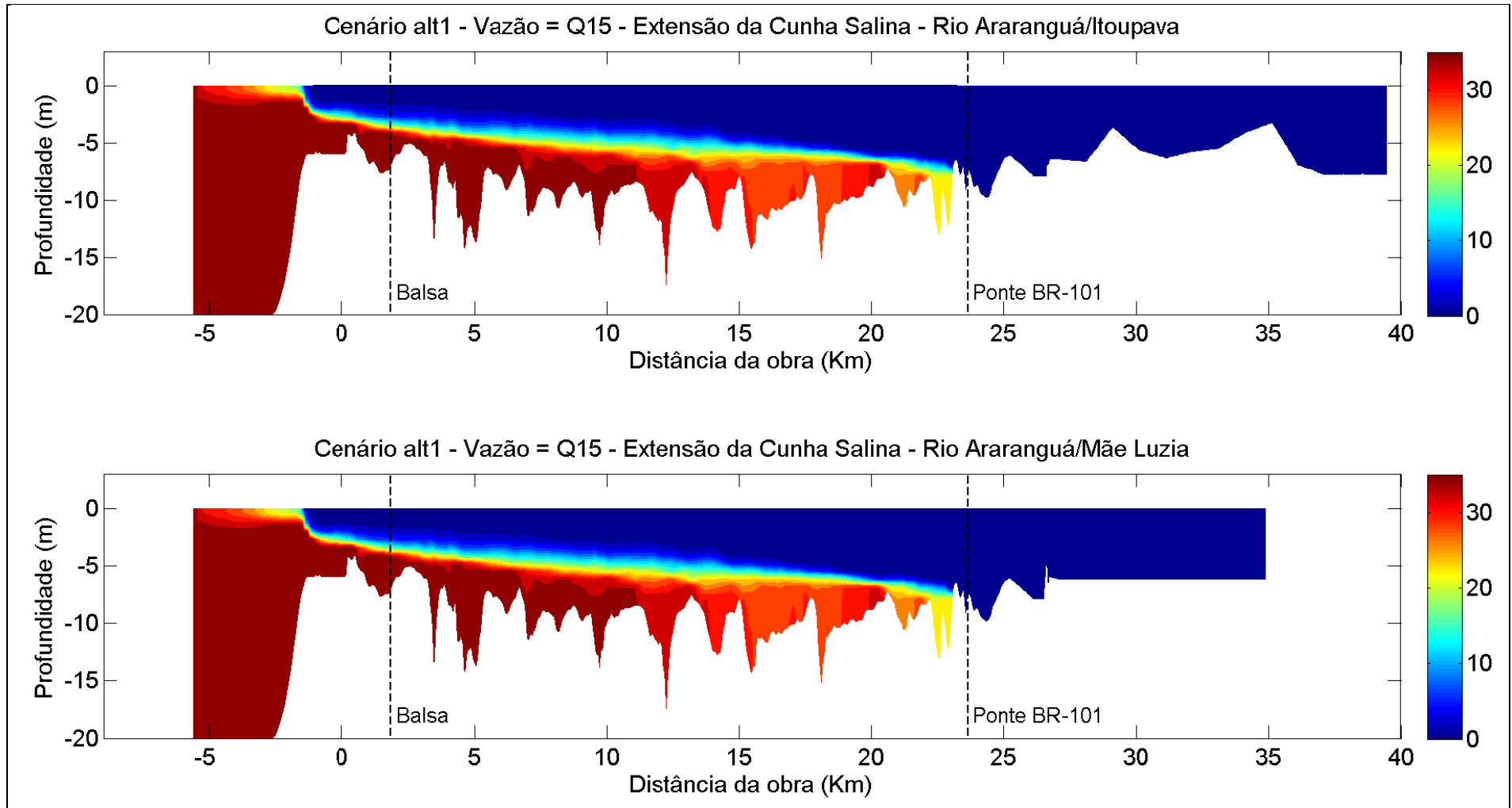


Figura 51: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 1, vazão Q15, em período de maré cheia de sizígia.

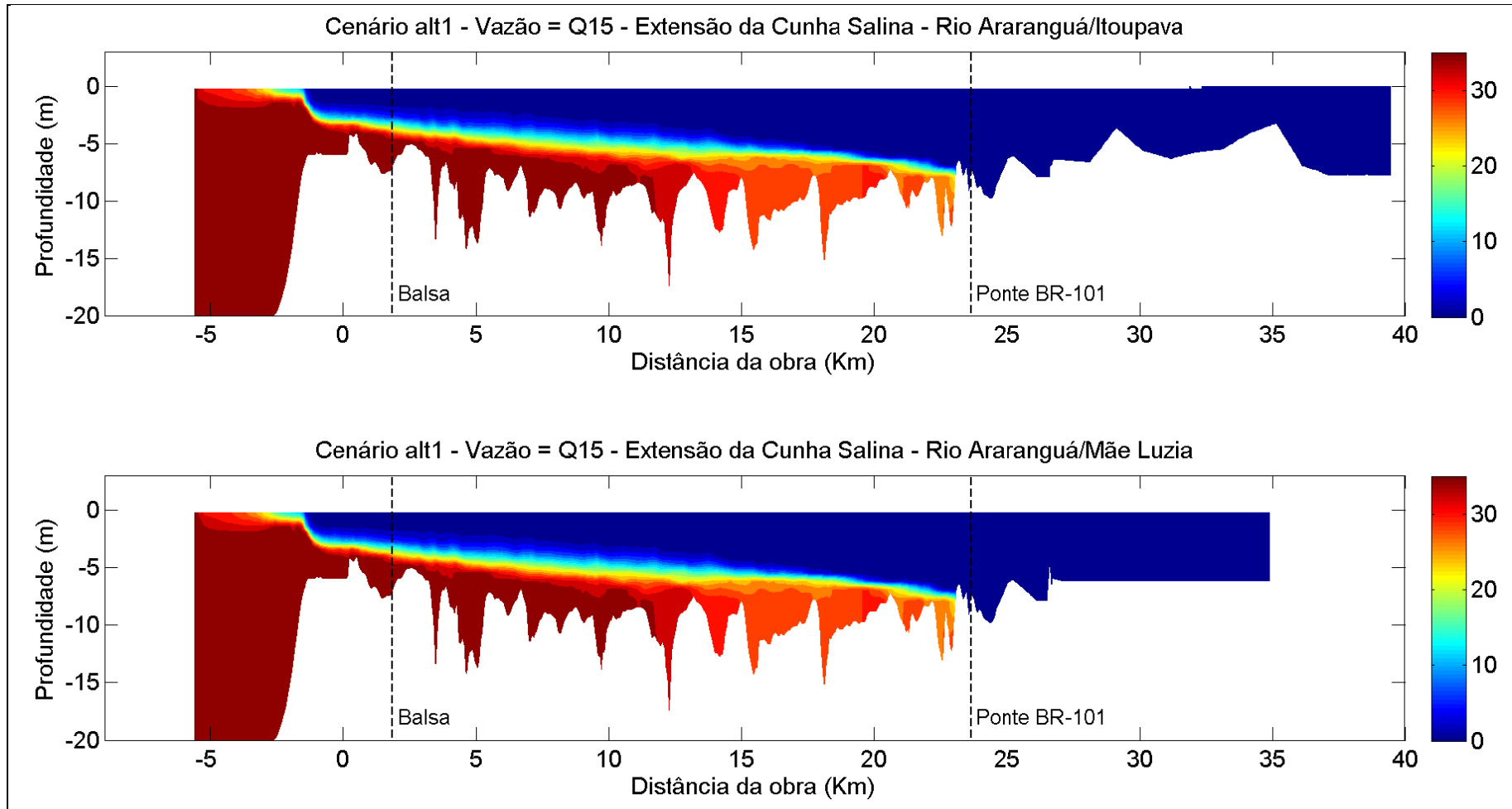


Figura 52: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 1, vazão Q15, em período de maré baixa de sizígia.

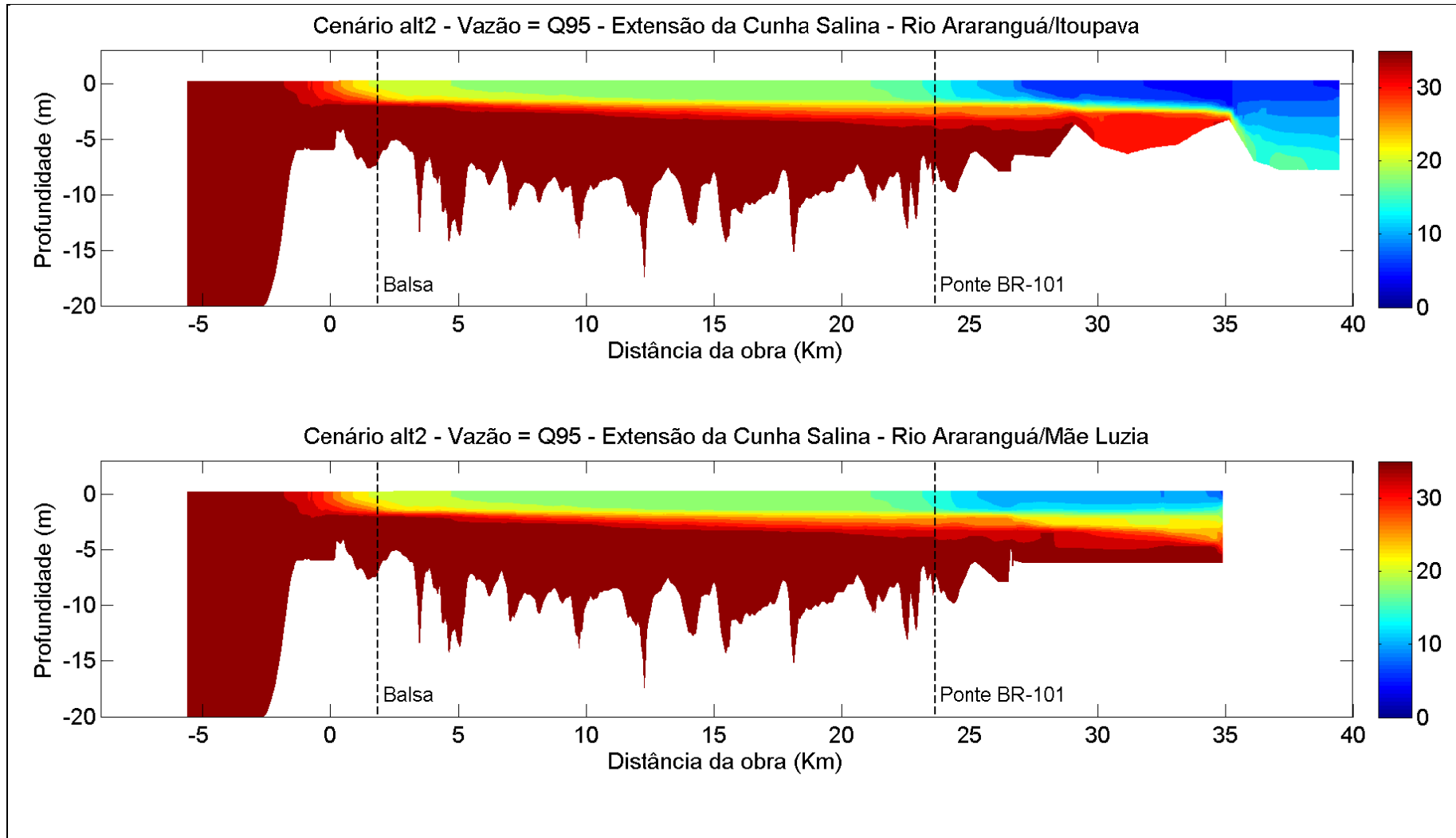


Figura 53: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 2, vazão Q95, em período de maré cheia de quadratura.

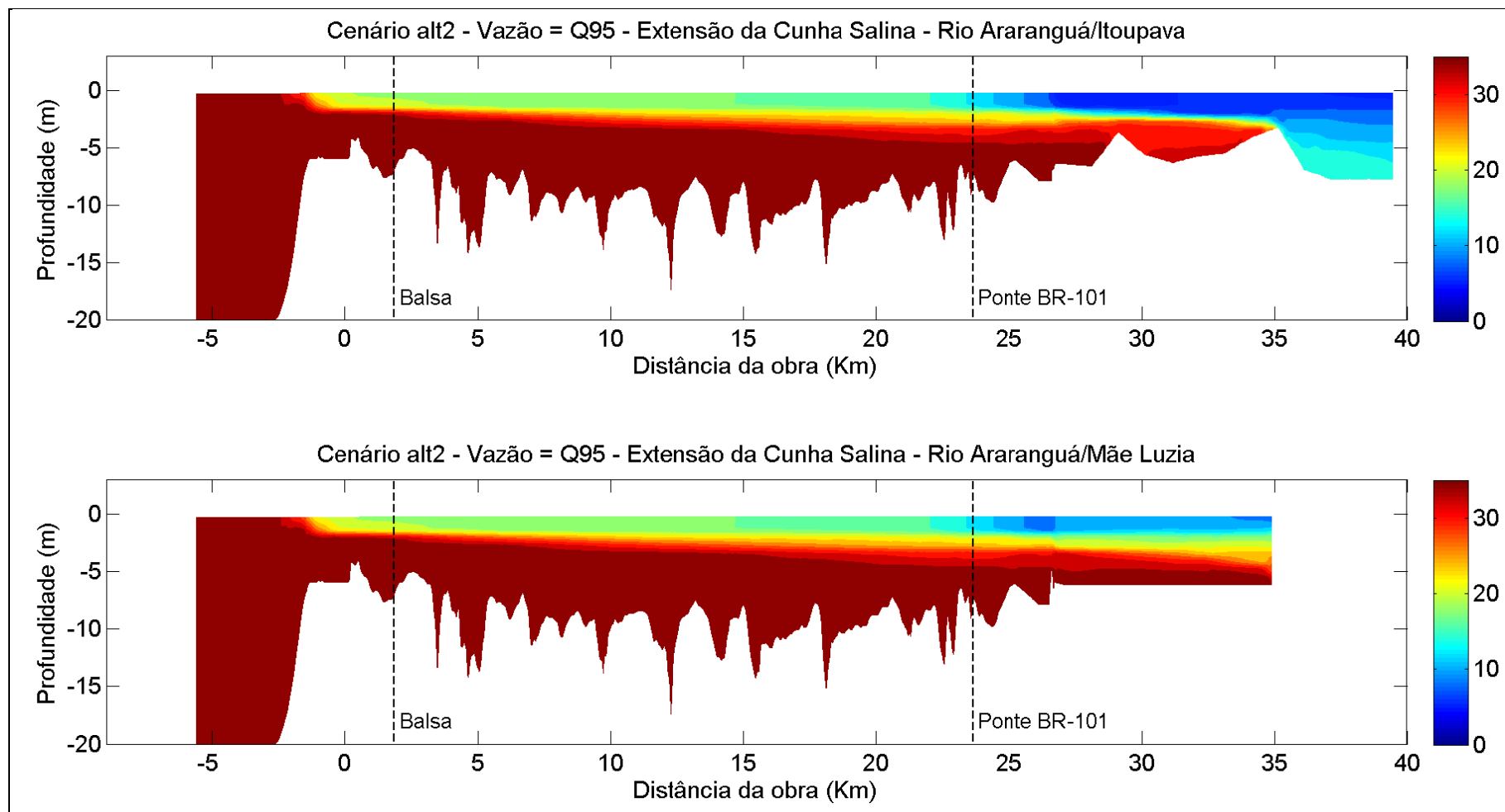


Figura 54: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 2, vazão Q95, em período de maré baixa de quadratura.

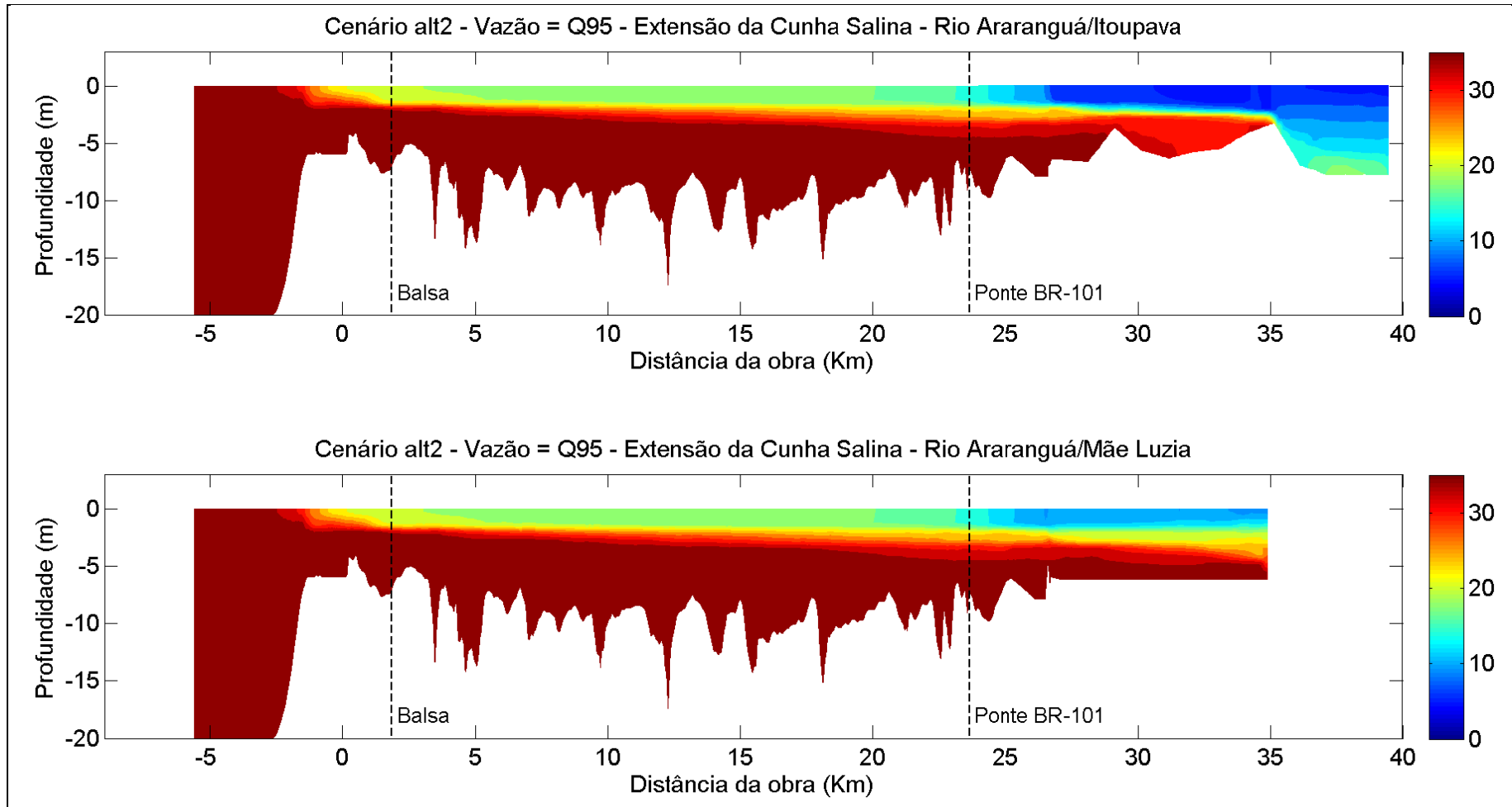


Figura 55: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 2, vazão Q95, em período de maré cheia de sizígia.

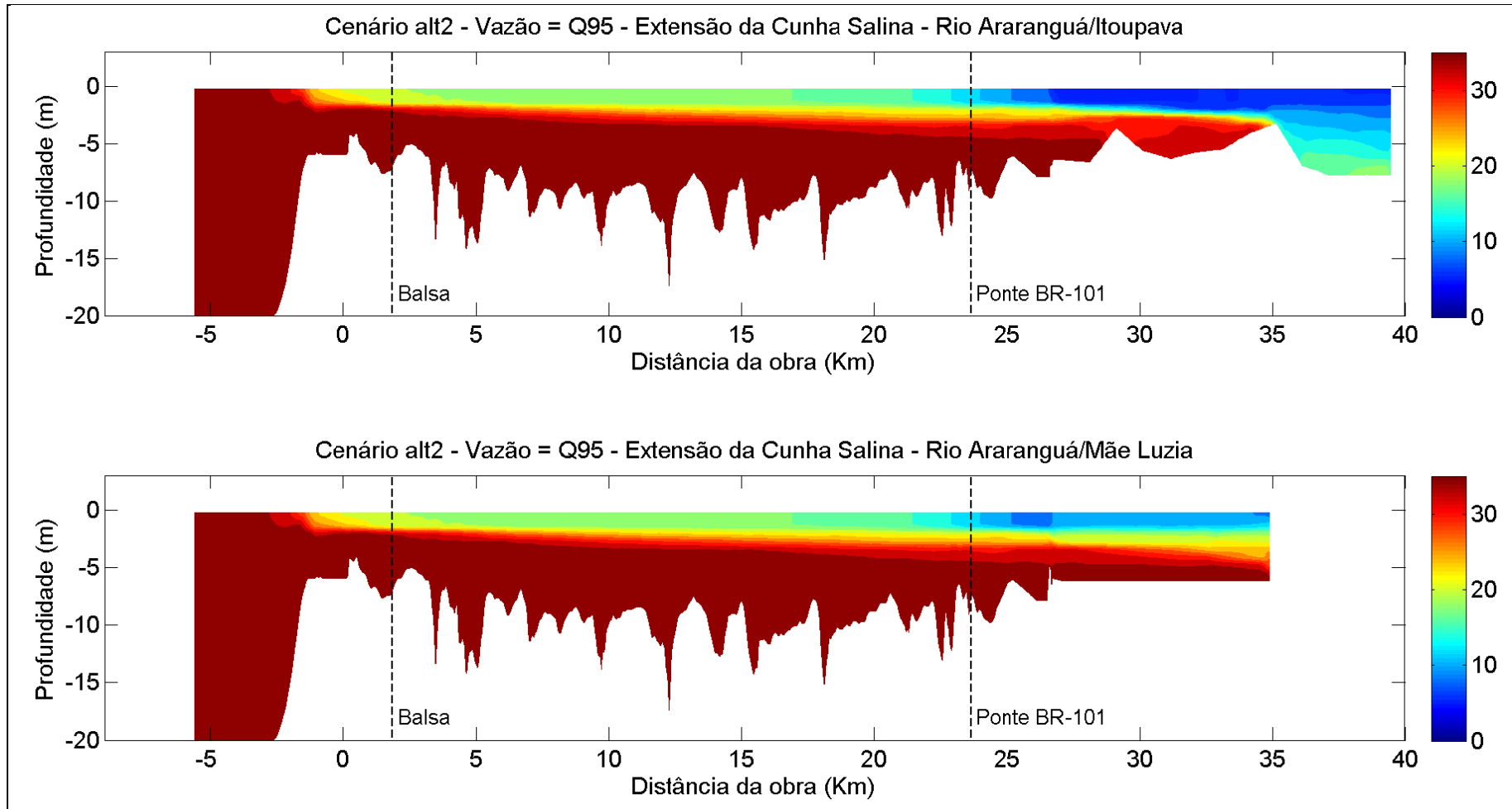


Figura 56: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 2, vazão Q95, em período de maré baixa de sizígia.



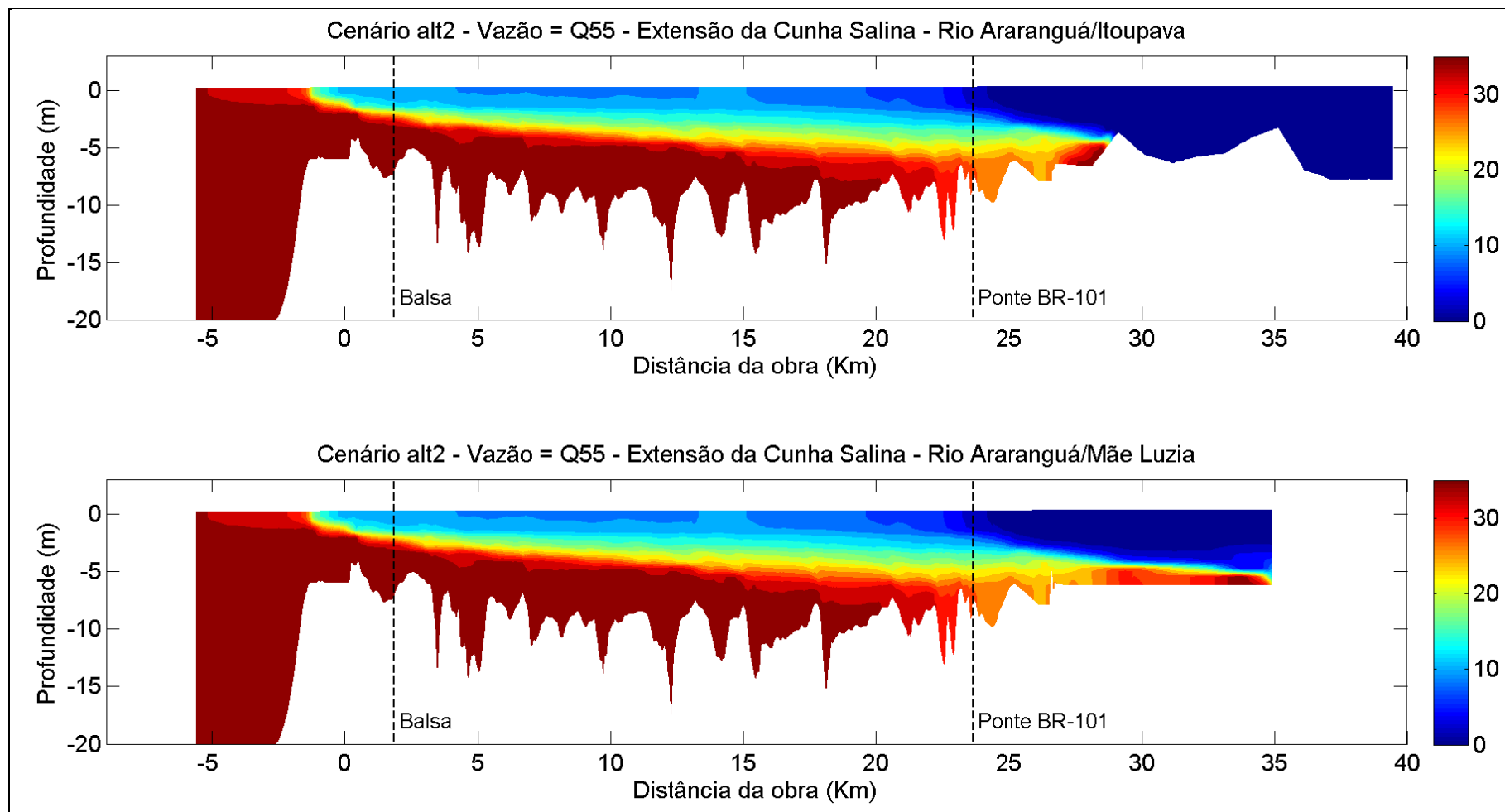


Figura 57: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 2, vazão Q55, em período de maré cheia de quadratura.

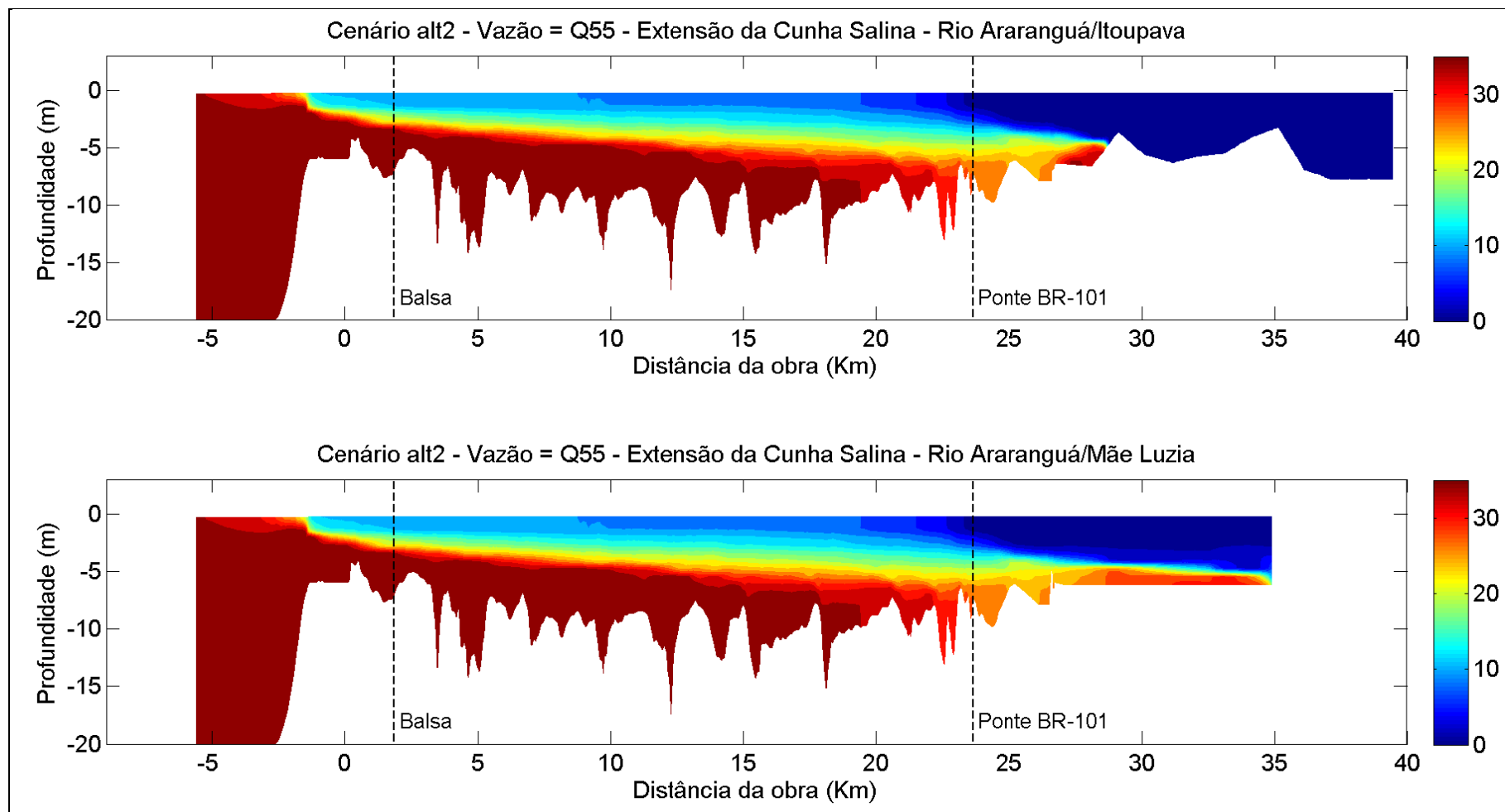


Figura 58: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 2, vazão Q55, em período de maré baixa de quadratura.

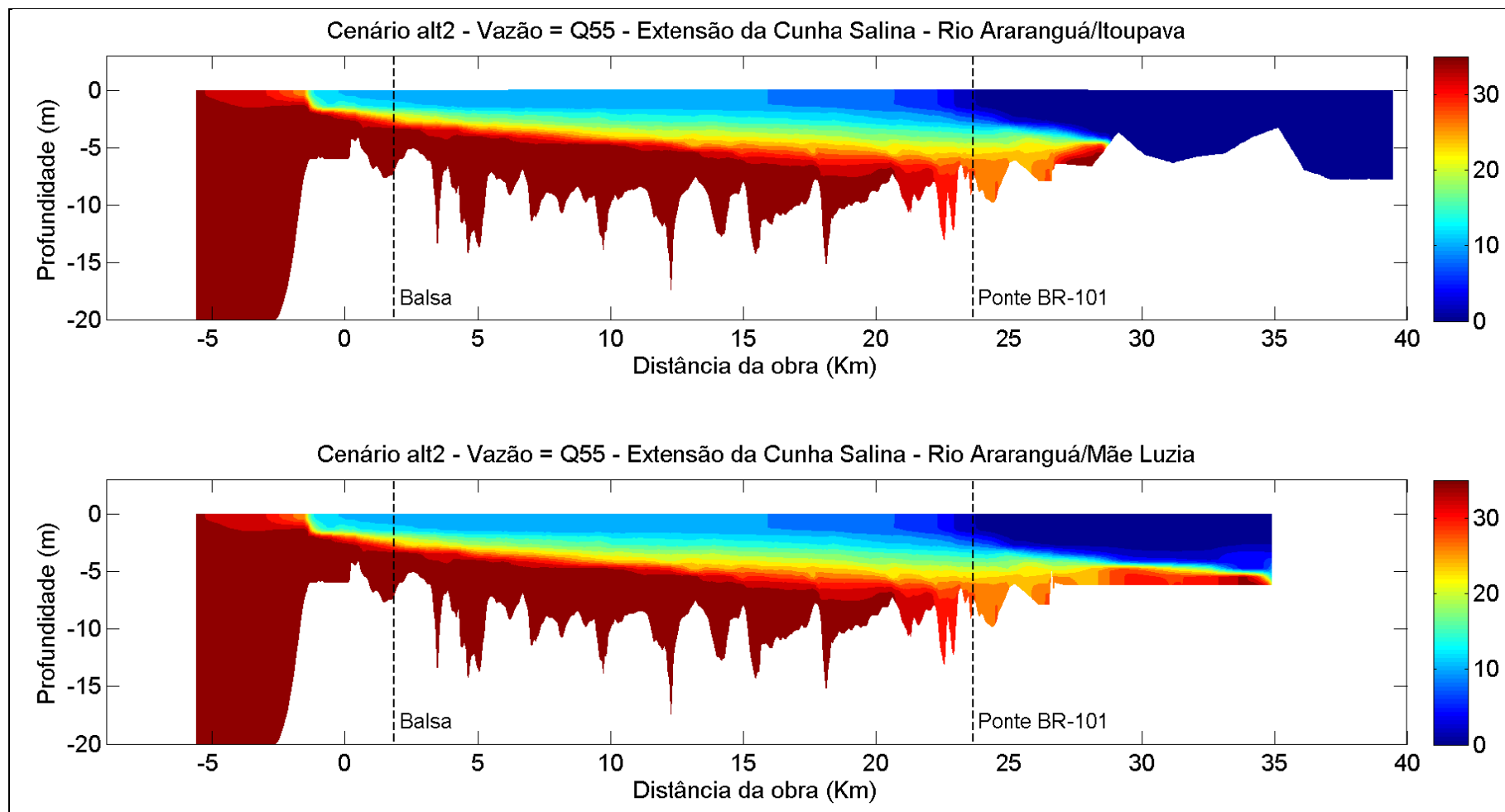


Figura 59: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 2, vazão Q55, em período de maré cheia de sizígia.

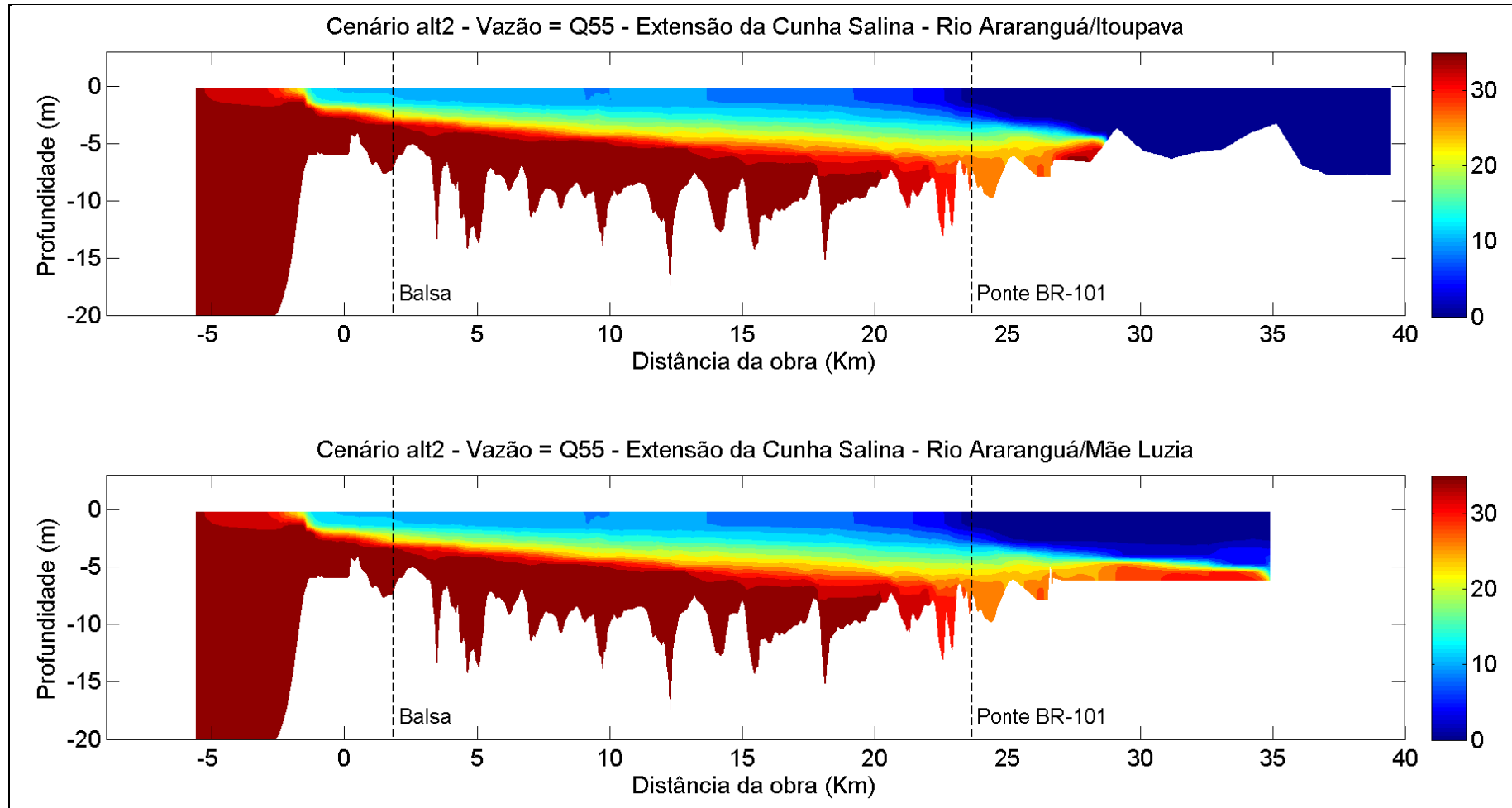


Figura 60: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 2, vazão Q55, em período de maré baixa de sizígia.

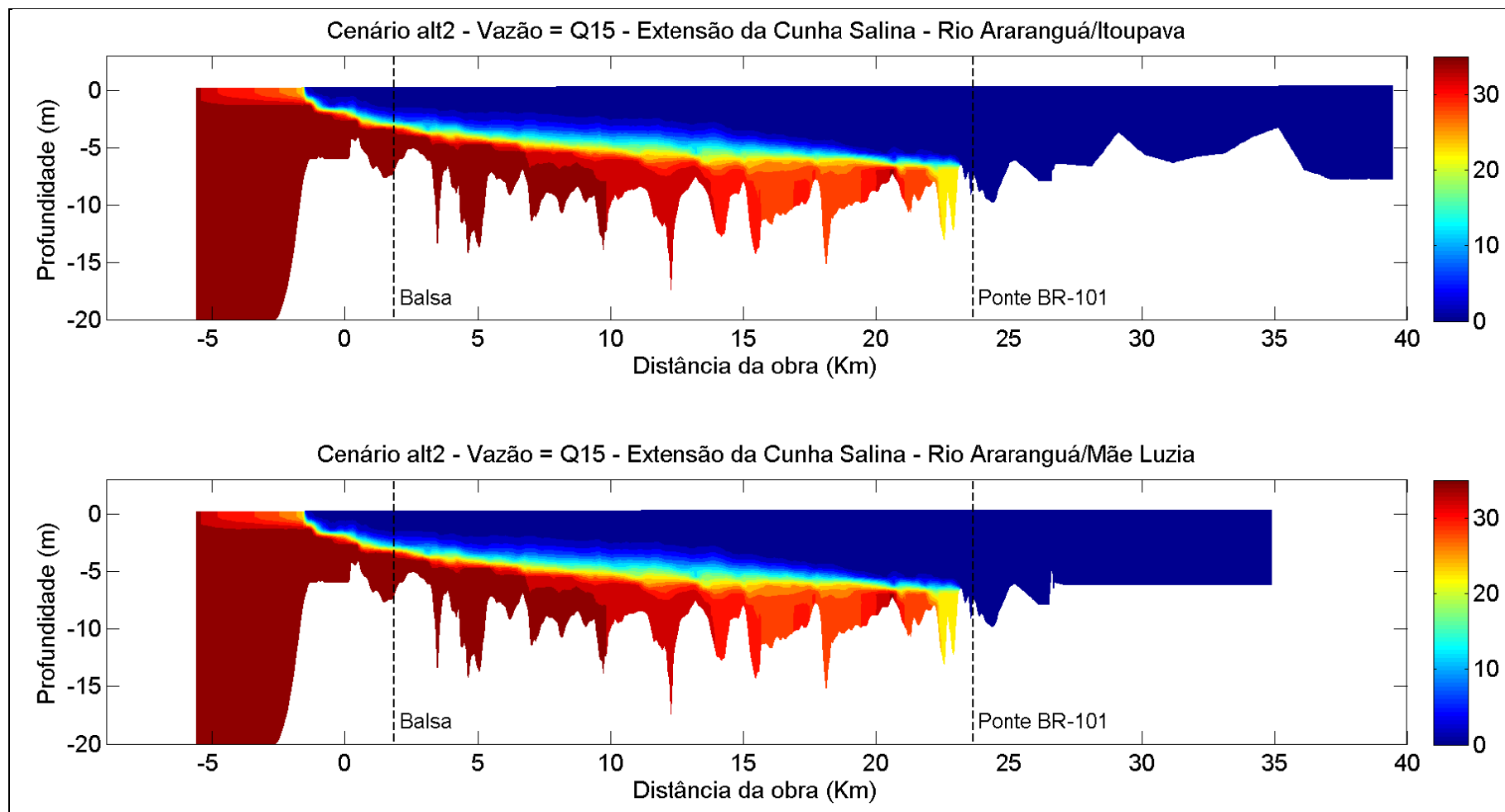


Figura 61: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 2, vazão Q15, em período de maré cheia de quadratura.

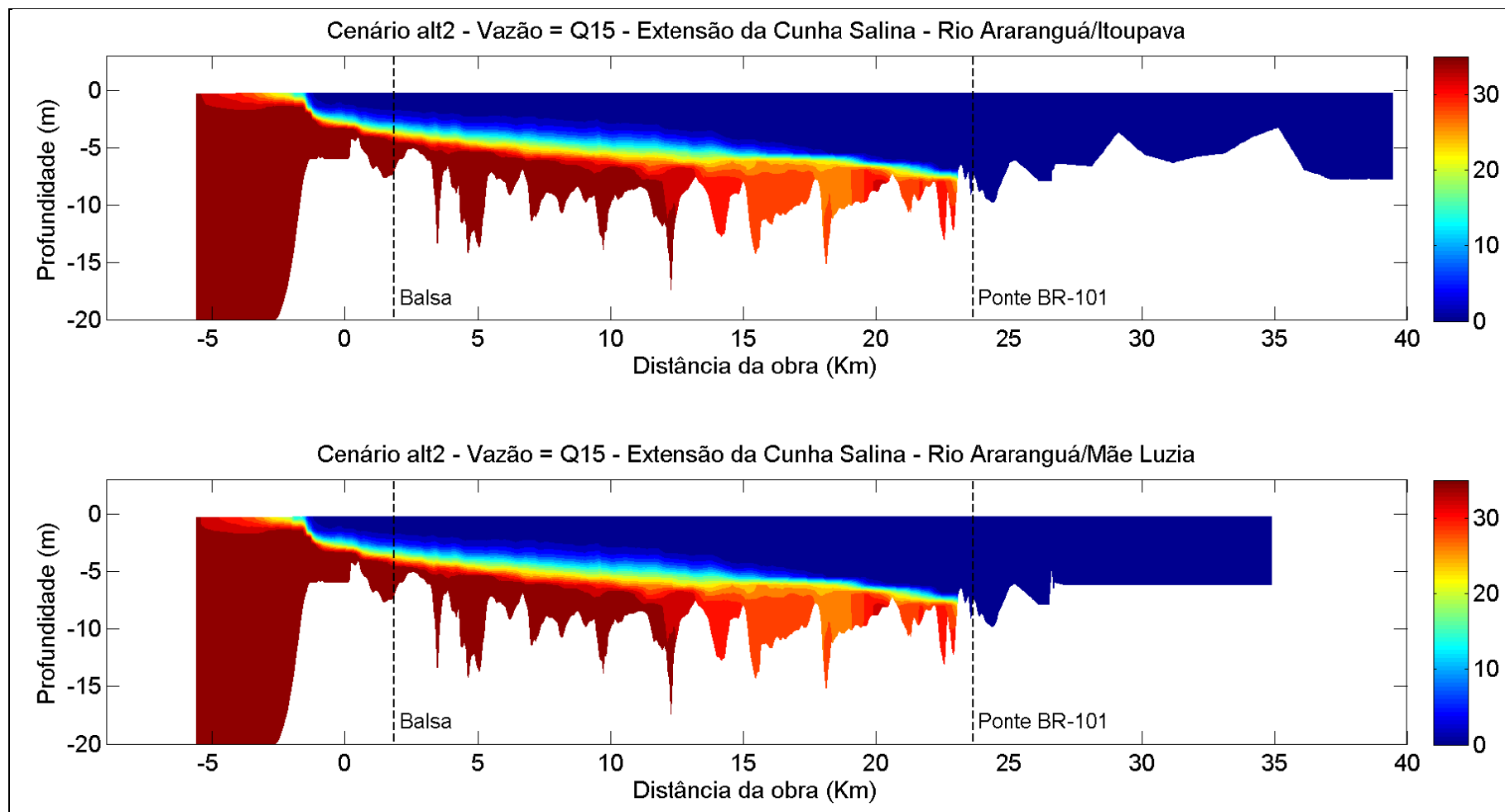


Figura 62: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 2, vazão Q15, em período de maré baixa de quadratura.

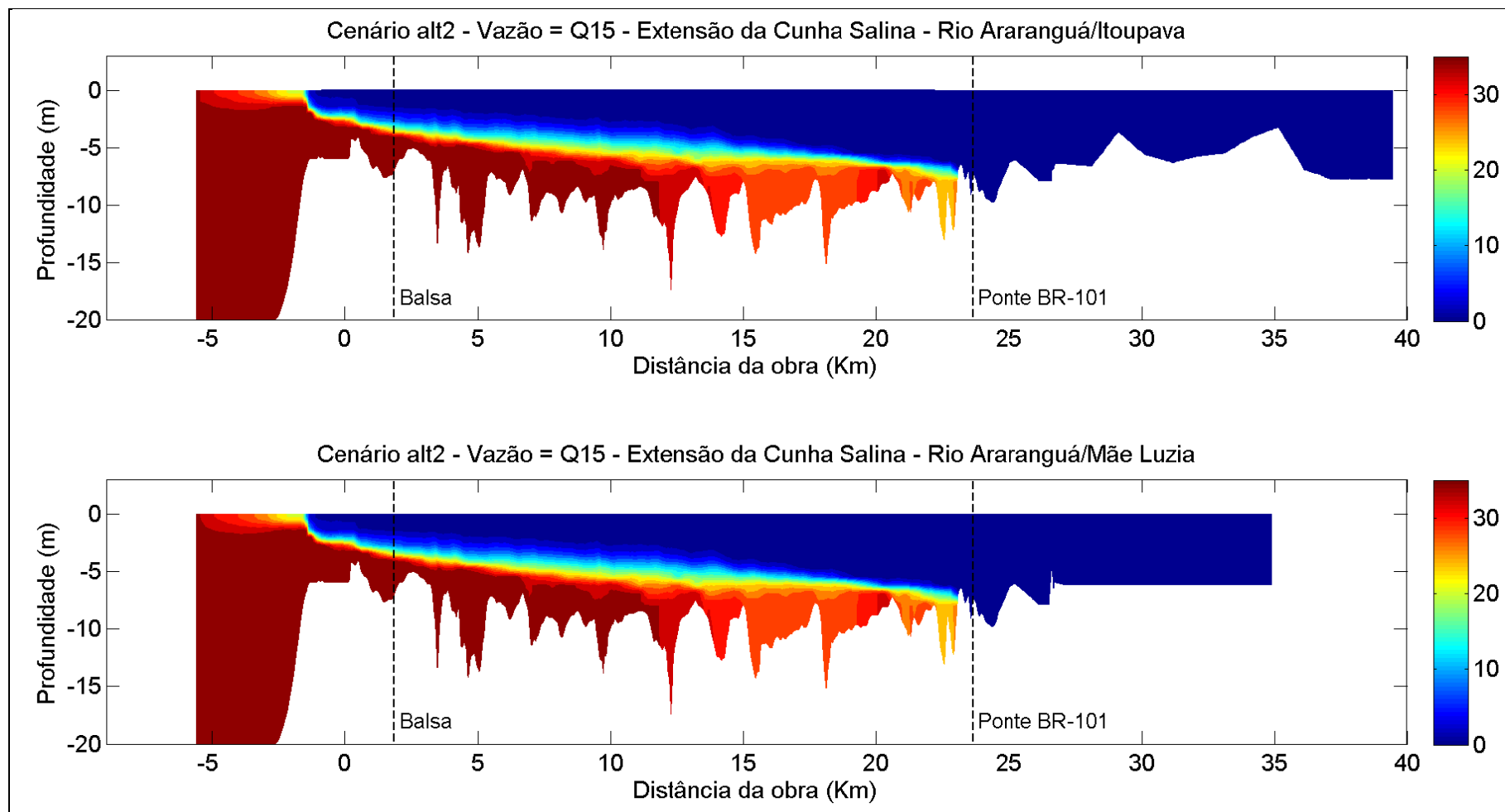


Figura 63: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 2, vazão Q15, em período de maré cheia de sizígia.

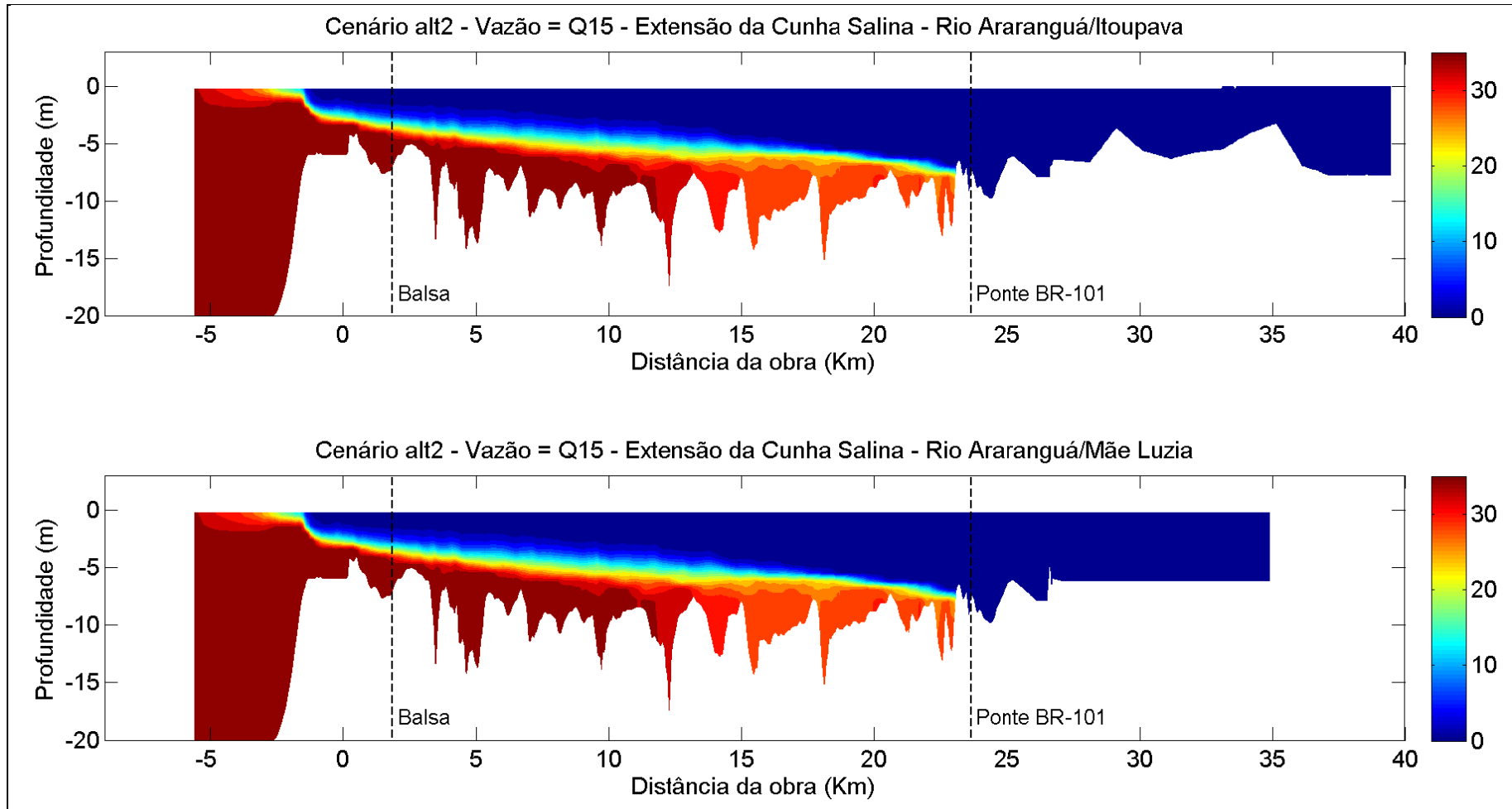


Figura 64: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 2, vazão Q15, em período de maré baixa de sizígia.



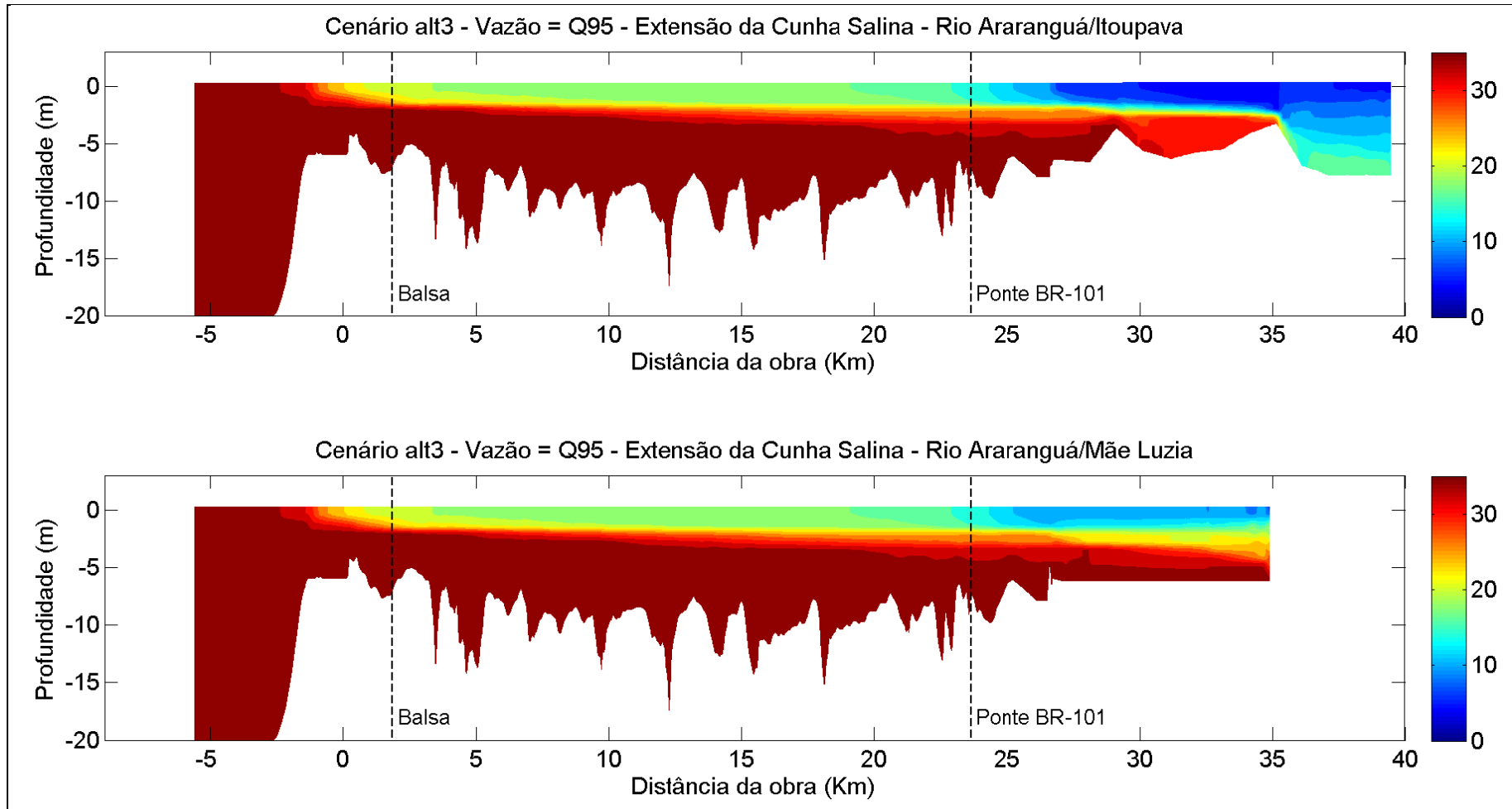


Figura 65: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 3, vazão Q95, em período de maré cheia de quadratura.

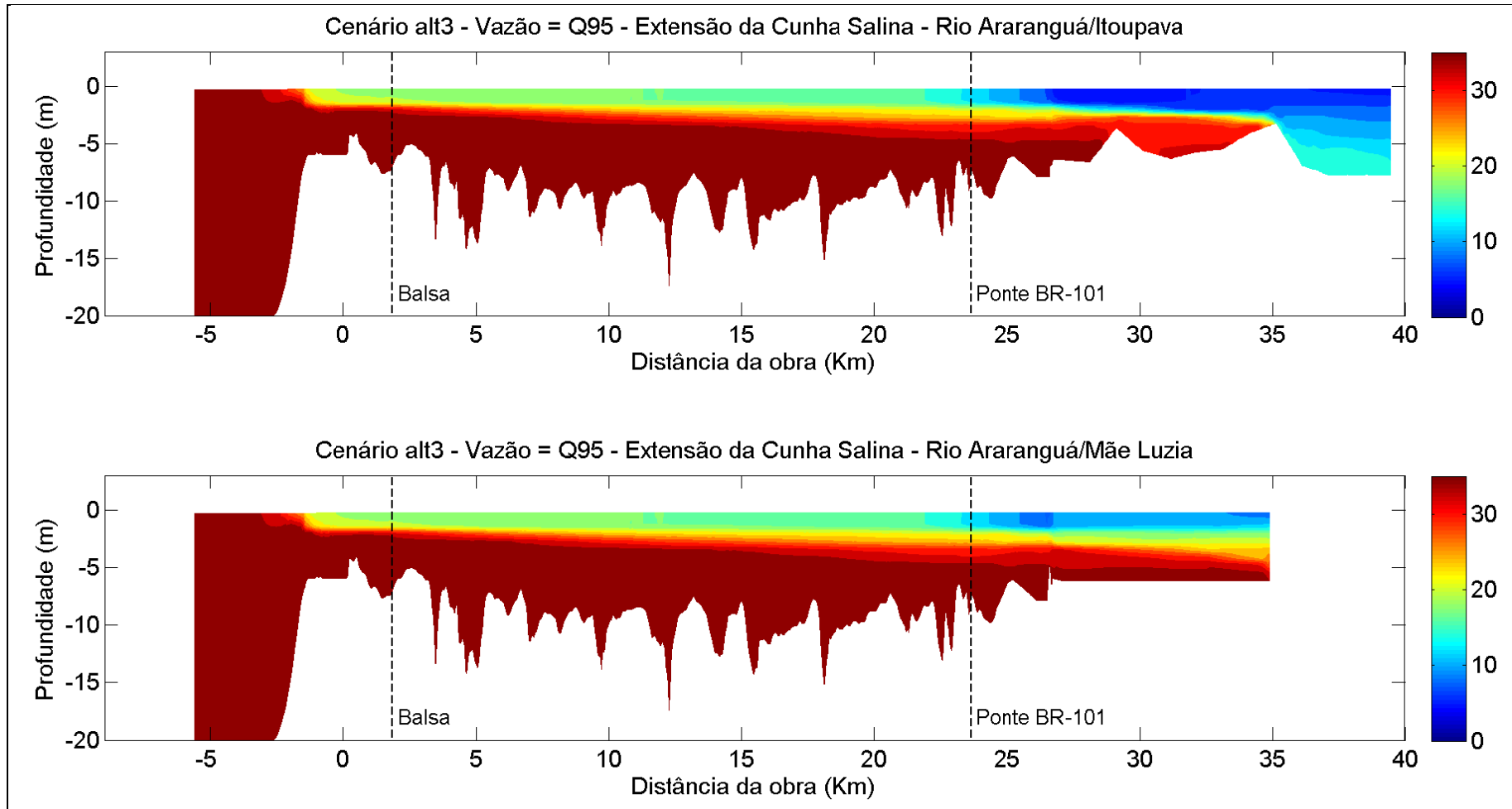


Figura 66: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 3, vazão Q95, em período de maré baixa de quadratura.

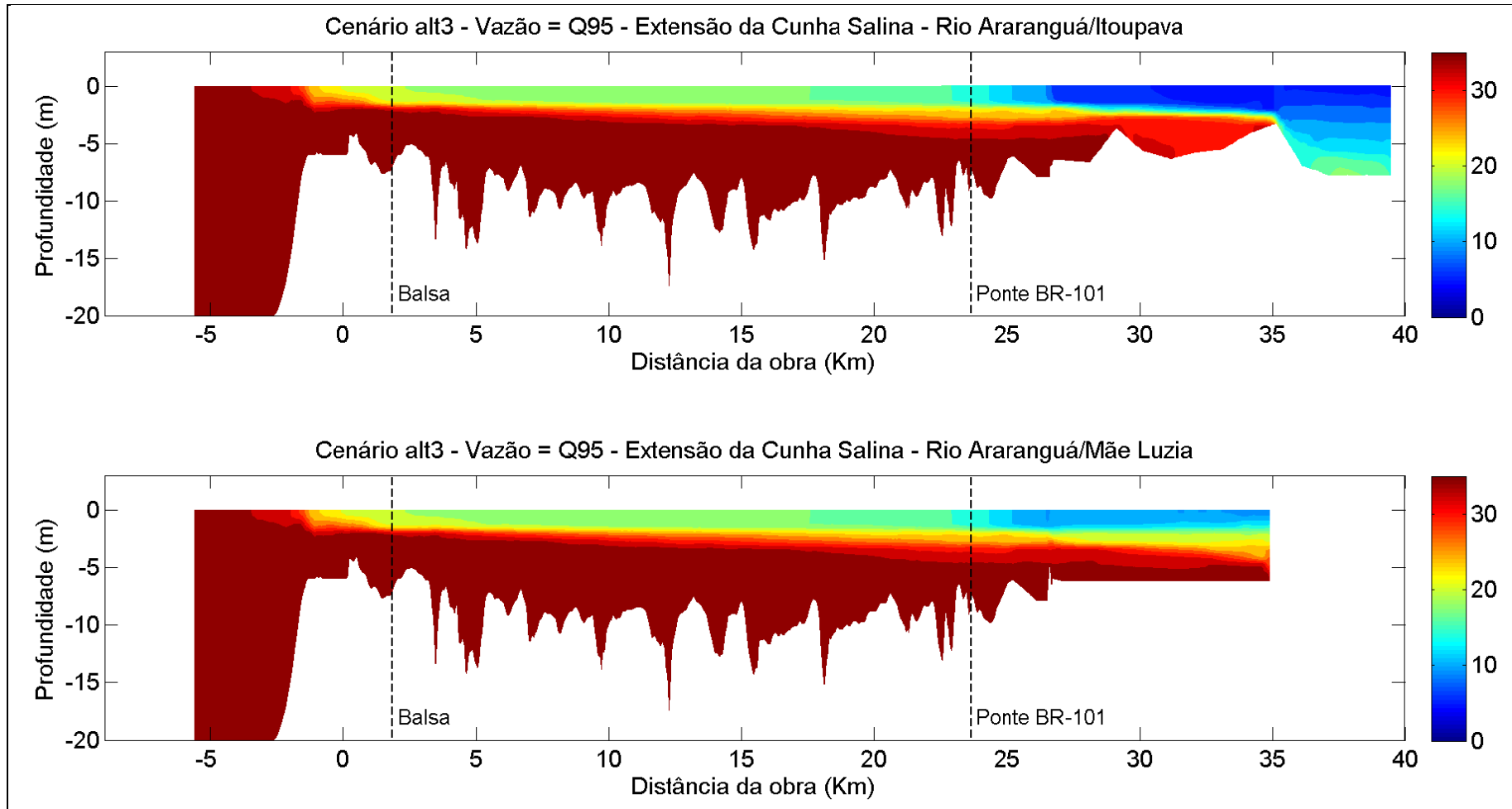


Figura 67: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 3, vazão Q95, em período de maré cheia de sizígia.

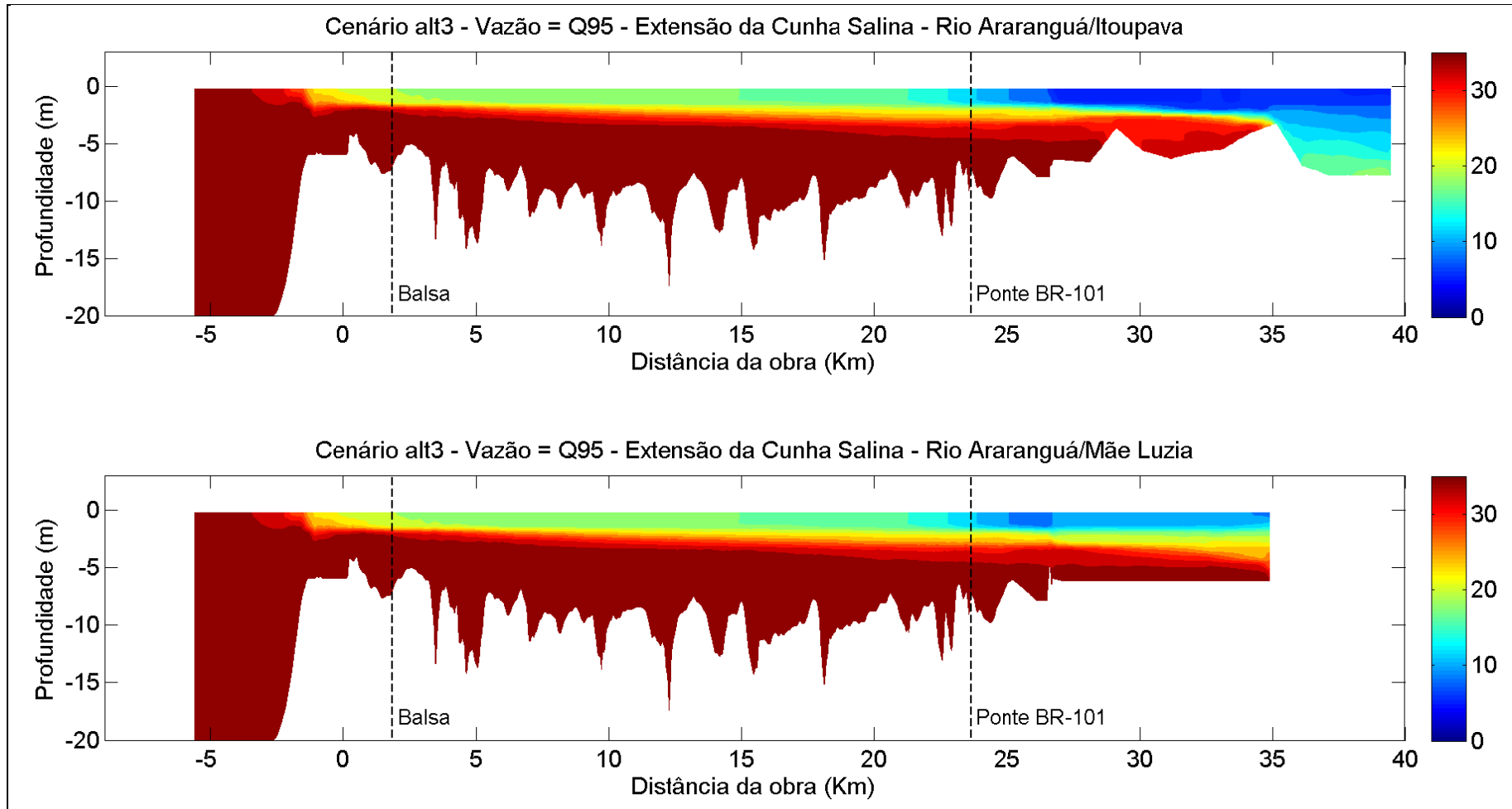


Figura 68: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 3, vazão Q95, em período de maré baixa de sizígia.

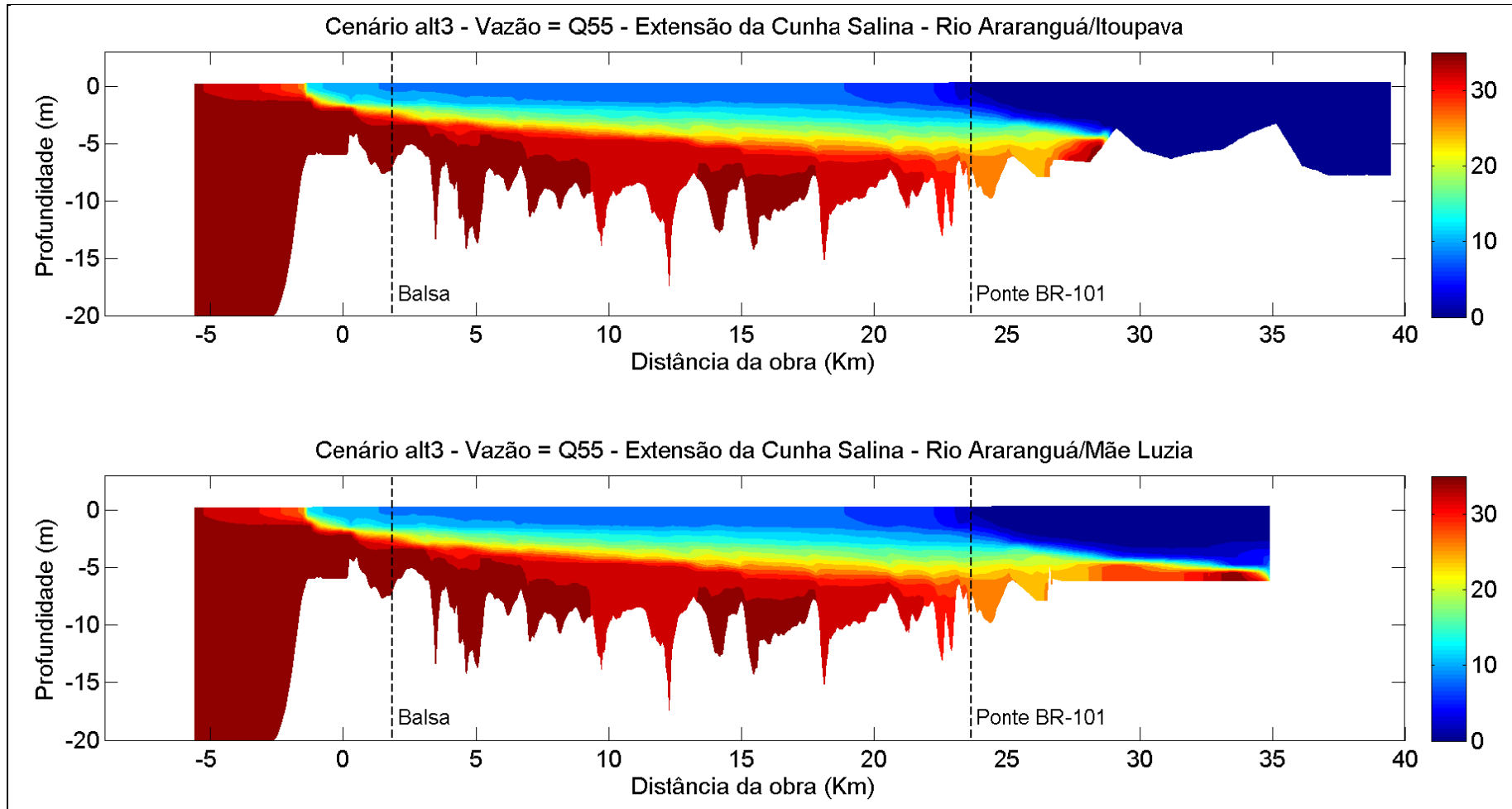


Figura 69: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 3, vazão Q55, em período de maré cheia de quadratura.

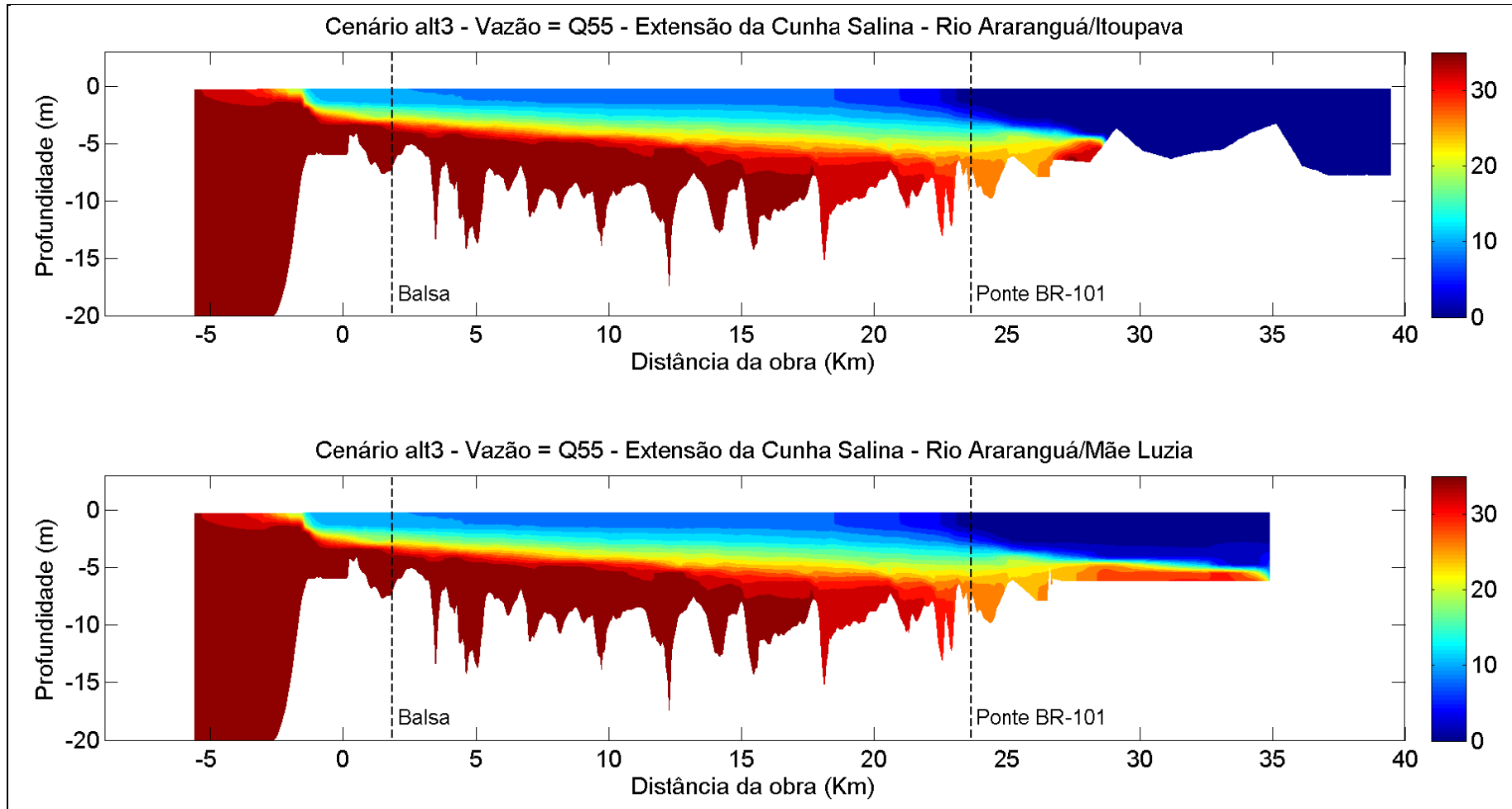


Figura 70: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 3, vazão Q55, em período de maré baixa de quadratura.

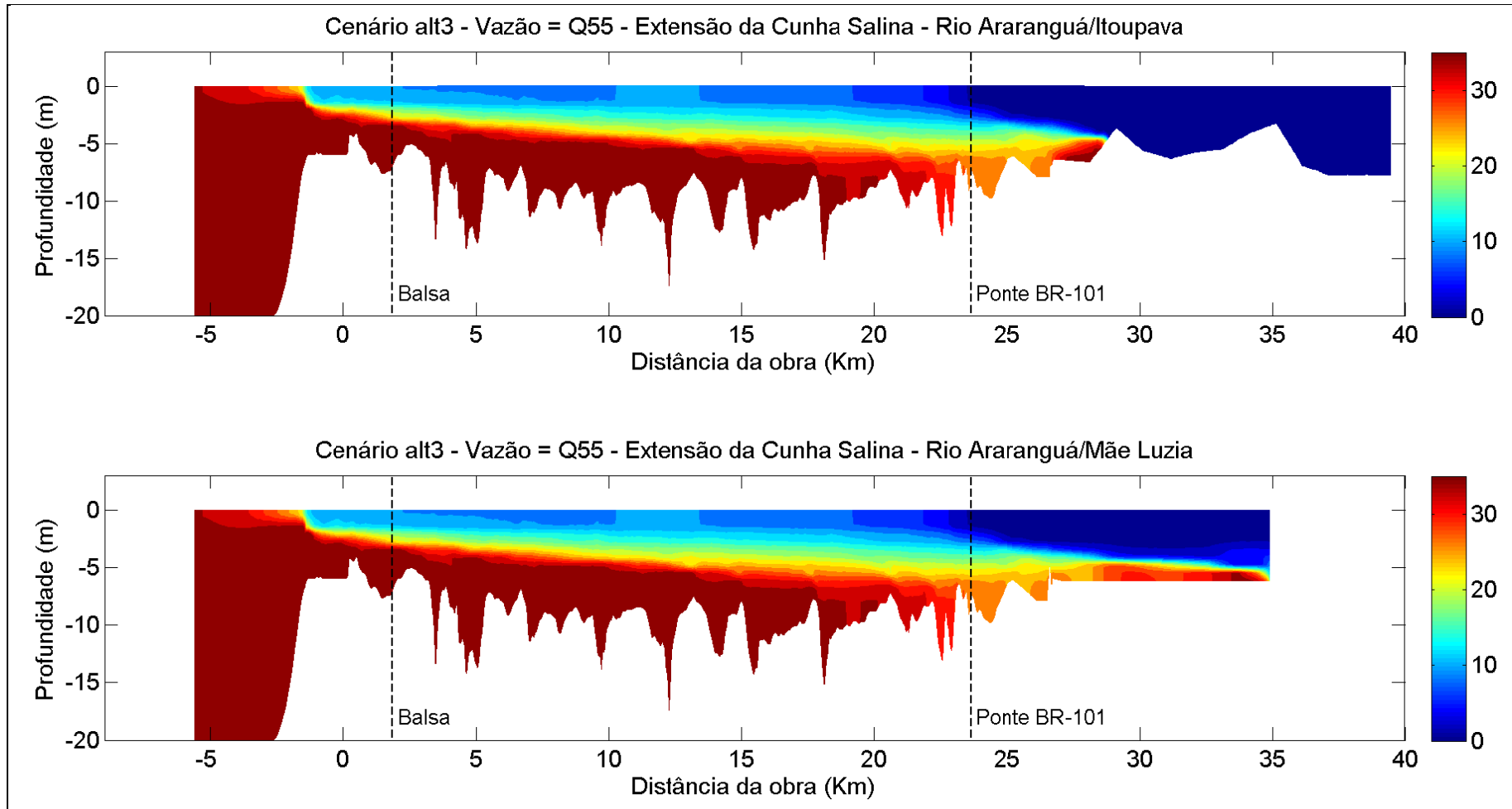


Figura 71: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 3, vazão Q55, em período de maré cheia de sizígia.

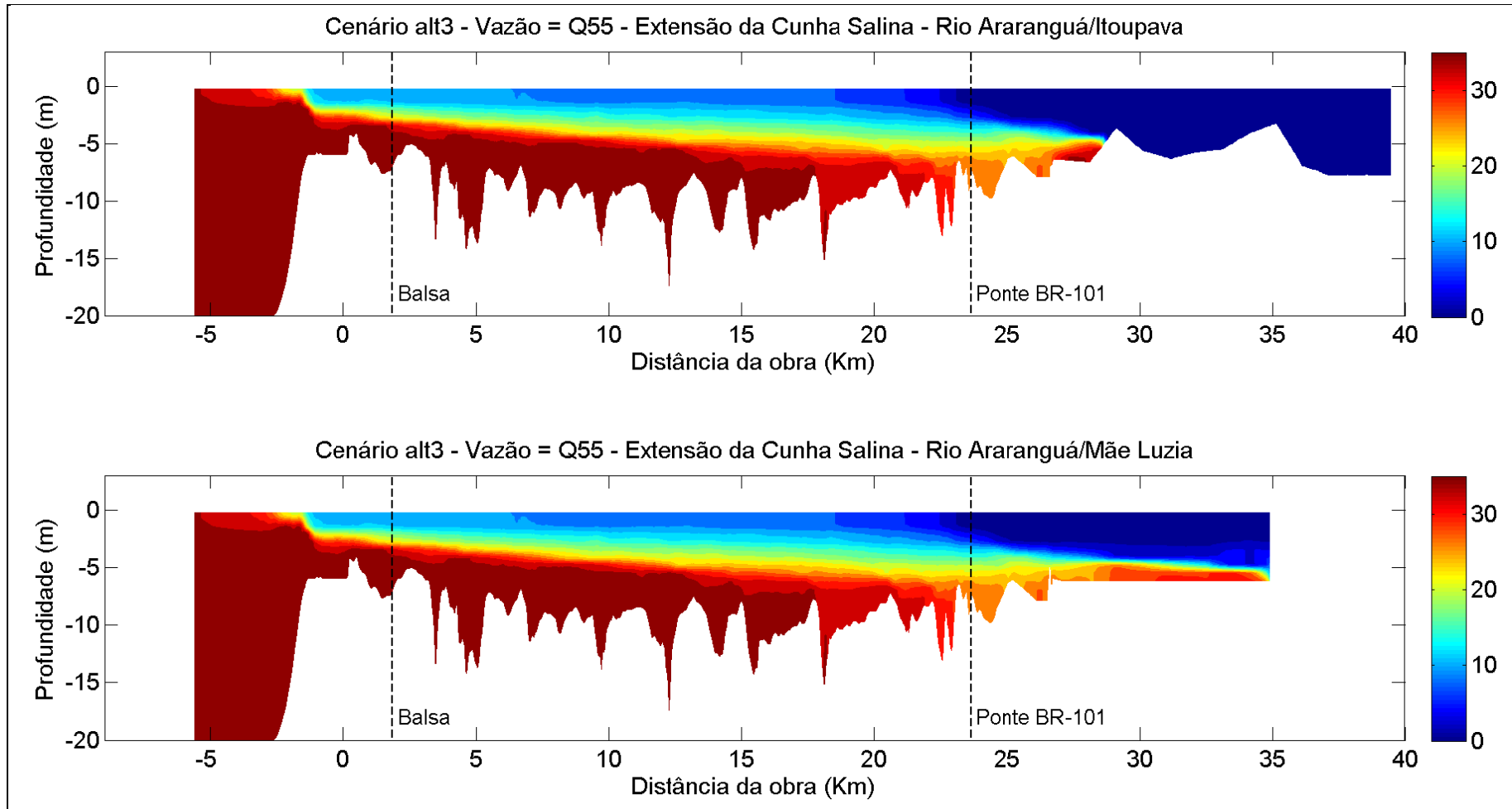


Figura 72: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 3, vazão Q55, em período de maré baixa de sizígia.



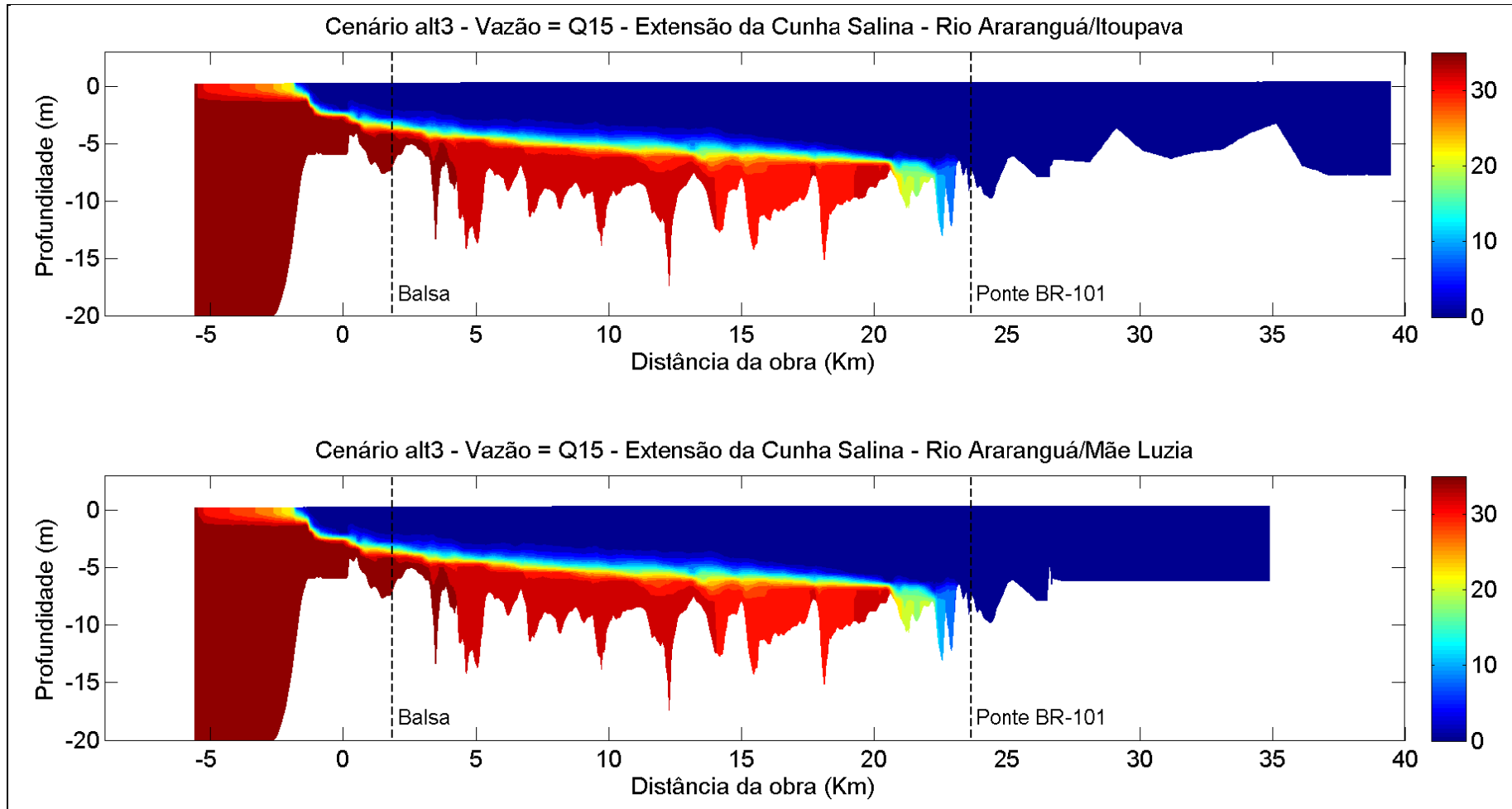


Figura 73: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 3, vazão Q15, em período de maré cheia de quadratura.

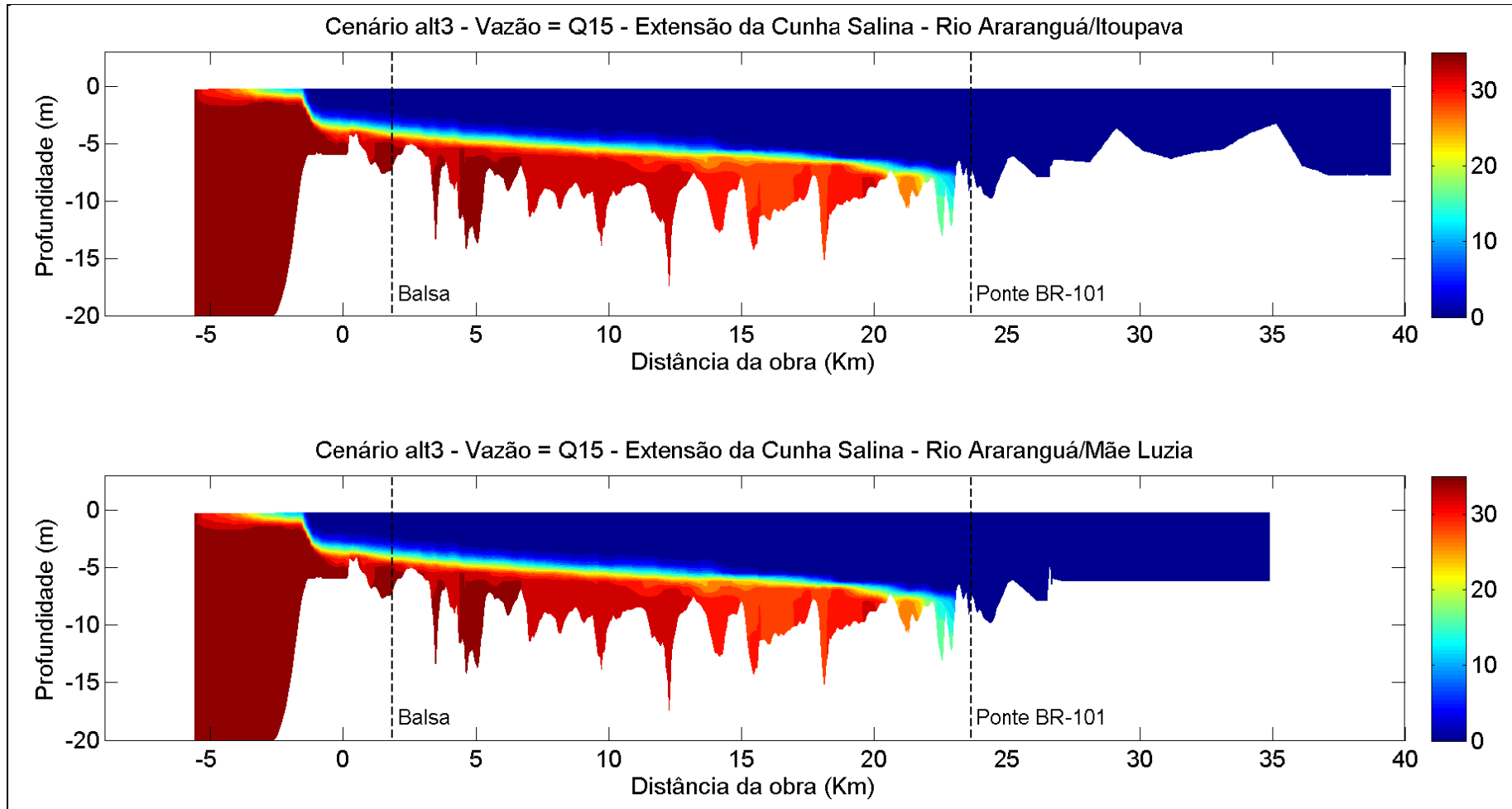


Figura 74: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 3, vazão Q15, em período de maré baixa de quadratura.

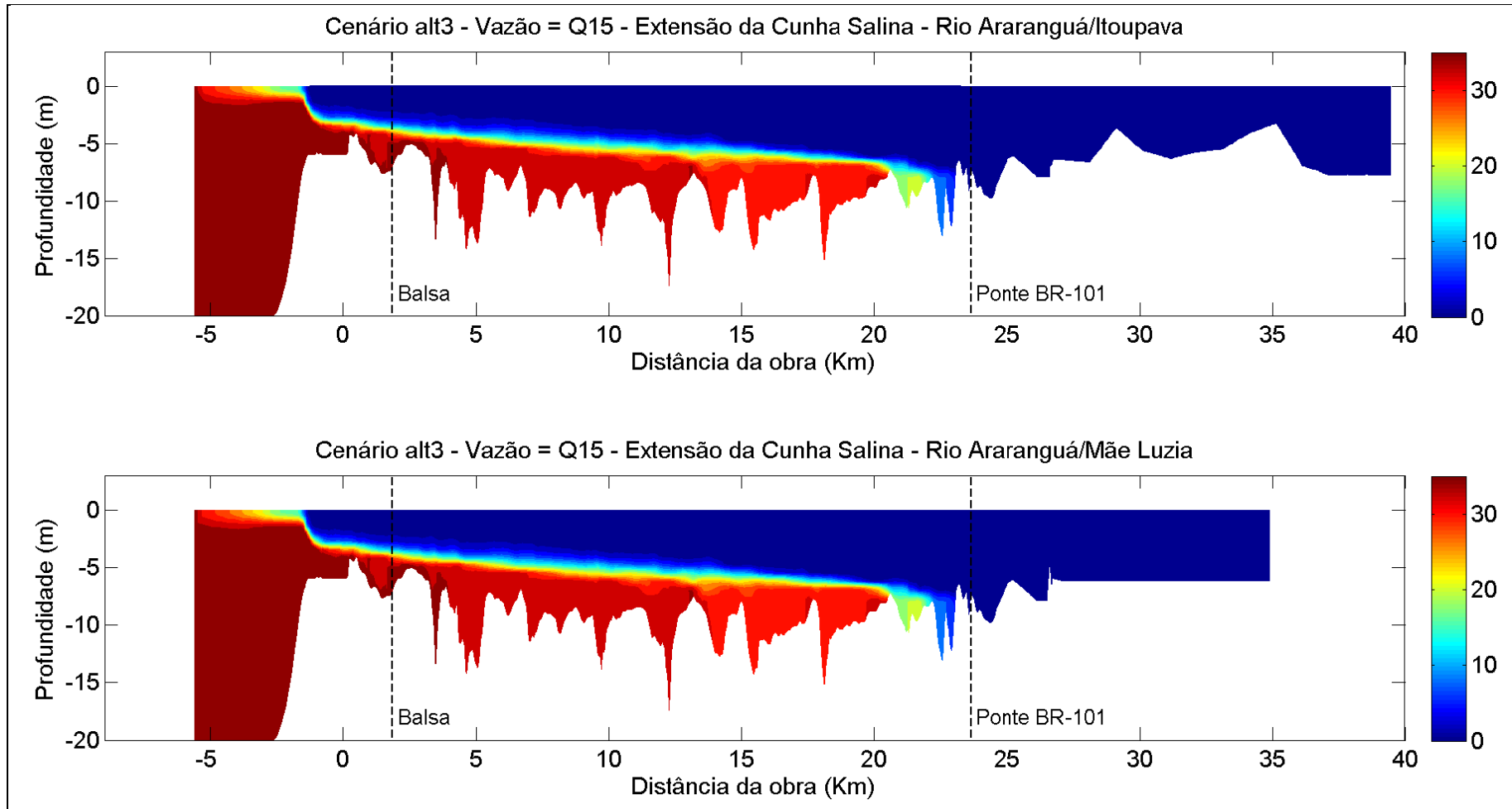


Figura 75: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 3, vazão Q15, em período de maré cheia de sizígia.

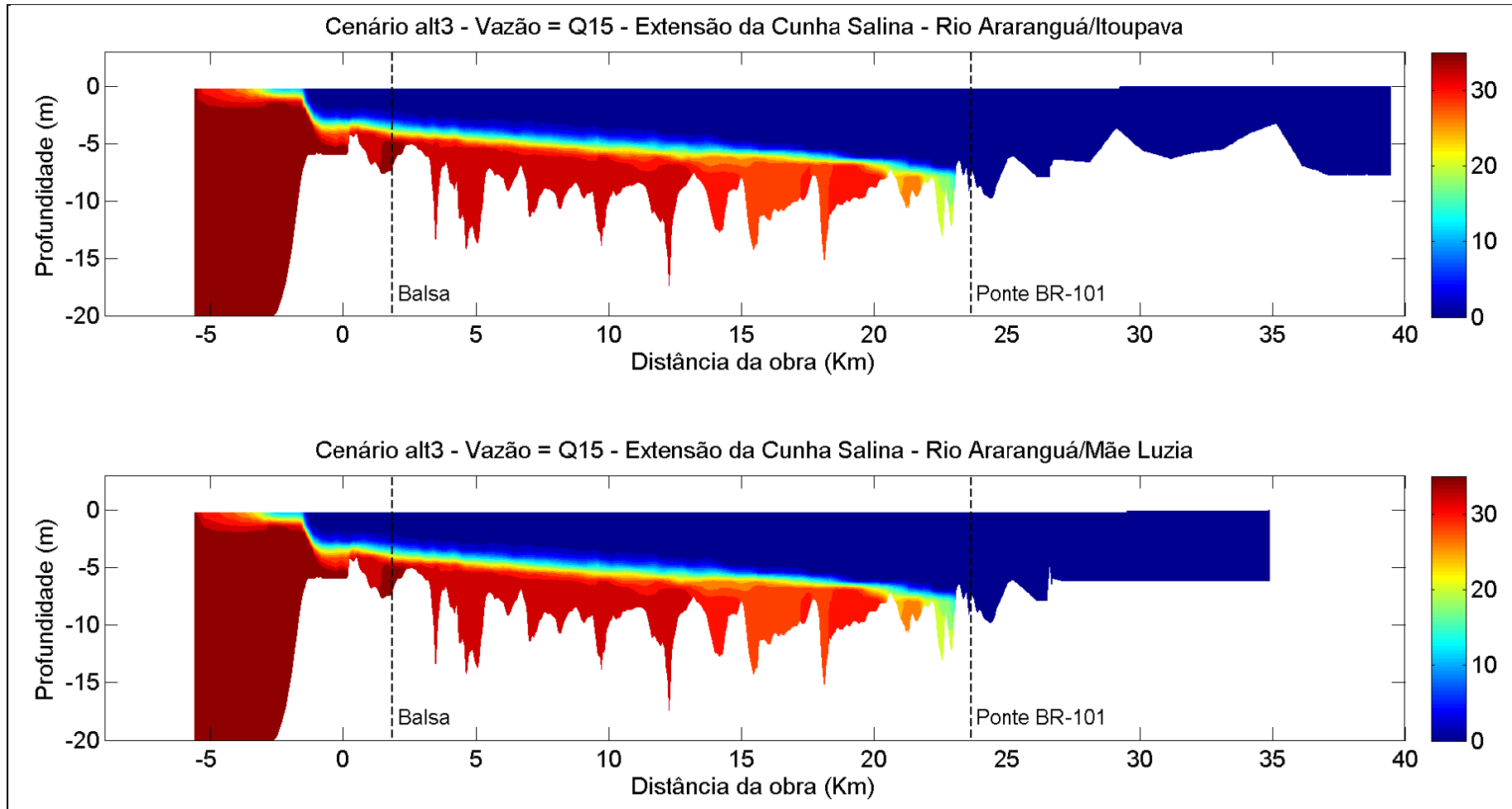


Figura 76: Seção longitudinal do rio Araranguá/Itoupava (painel superior) e Araranguá/Mãe Luzia (painel inferior) do cenário da alternativa 3, vazão Q15, em período de maré baixa de sizígia.



Os resultados das simulações para o cenário atual, considerando a vazão Q95, mostraram o perfil do rio parcialmente misturado, com uma estratificação vertical não tão acentuada como a observada em períodos de maior vazão do rio. Para essa condição, massas d'água com salinidade entre 20 e 30 ups ultrapassaram a ponte da rodovia BR-101, chegando até os rios Itoupava e Mãe Luzia. Água mais salinas, com valores próximos a 35 ups, ficaram restritas à região da desembocadura do rio Araranguá, adentrando o corpo do rio em períodos de maré cheia. Para o experimento com vazão Q55, os resultados mostraram água doce nos rios Itoupava e Mãe Luzia, além de boa parte da coluna superficial do rio Araranguá. Foi possível notar a cunha salina bem formada. Na região entre a balsa e a ponte da BR-101 foram calculadas águas com salinidade entre 15 e 25 ups junto à camada de fundo. Em eventos de maior vazão, como o caso do experimento com Q15, a cunha salina ficou restrita à região da desembocadura do rio Araranguá, com água doce aparecendo somente no percurso dos rios Araranguá, Itoupava e Mãe Luzia. As variações na distribuição de salinidades ao longo do estuário mostraram-se mais influenciadas pelas variações nos valores de vazão fluvial que pela fase da maré.

Para o cenário alternativa 1, com vazão Q95, foram observados valores de salinidade de até 35 ups na região da desembocadura e na parte inferior da coluna d'água ao longo do rio Araranguá. A estratificação neste cenário não é muito acentuada, sendo observados valores de salinidade em torno de 15 ups, próximos à superfície. Ao longo do rio Itoupava foi possível observar águas menos salgadas, com cerca de 5 ups na superfície e 30 ups junto ao fundo. Para este cenário, o rio Mãe Luzia se mostrou mais salgado em comparação com o Itoupava. Em períodos de preamar houve uma maior excursão de águas salgadas para o interior do rio Araranguá, em comparação com períodos de baixa-mar. Os resultados para o cenário Alternativa 1, considerando vazão Q55, mostram águas com menores salinidades, principalmente nos rios Itoupava (toda a coluna d'água), Mãe Luzia (meio e superfície da coluna) e Araranguá (restrita a superfície), em relação aos resultados da simulação considerando vazões menores. Águas mais salgadas se concentraram no fundo do Rio Araranguá e na região externa da desembocadura (nos cenários das alternativas, é considerada como desembocadura a barra fixada). Existe uma maior estratificação vertical no rio Araranguá quando comparado a um período de menor vazão. O experimento com alta vazão (Q15) mostrou os rios Itoupava e Mãe Luzia completamente livres de águas salgadas, enquanto o rio Araranguá manteve uma salinidade mais elevada junto ao fundo, com valores de até 35 ups. Ainda é possível verificar a baixa influência da maré neste caso, sendo a cunha

salina determinada pela vazão do rio.

A alternativa 2 se mostrou muito semelhante à alternativa 1, em termos de penetração da cunha salina sob diferentes condições de vazão e fases da maré. Todavia, os resultados indicam uma penetração levemente maior de sal na alternativa 2, principalmente na região da obra. Para o experimento de maior vazão (Q15), existe um aumento de salinidade junto ao fundo no Rio Araranguá, próximo à região de confluência dos rios Itoupava e Mãe Luzia.

Os resultados da alternativa 3 também são semelhanças aos resultados da alternativa 1 e alternativa 2. A cunha salina possui uma penetração muito parecida em relação às demais alternativas, para todos os casos de vazões e marés. Uma pequena diferença em relação às outras alternativas é notada na região da obra, onde a alternativa 3 se mostrou menos salina. Maiores diferenças são observadas em condições de maior vazão (Q15), principalmente na porção junto ao fundo ao longo do Rio Araranguá, onde o cenário da alternativa 3 se mostrou menos salino que o cenário da alternativa 1 (diferenças na ordem de 5-10 ups).

A seguir são apresentadas as séries temporais de salinidade para cinco pontos selecionados ao longo dos rios Araranguá, Itoupava e Mãe Luzia (Figura 77), referentes às camadas de superfície, meio e fundo da coluna d'água (da Figura 78 até a Figura 92).



Figura 77: Pontos de controle utilizados para a apresentação das variações de salinidade ao longo do tempo.

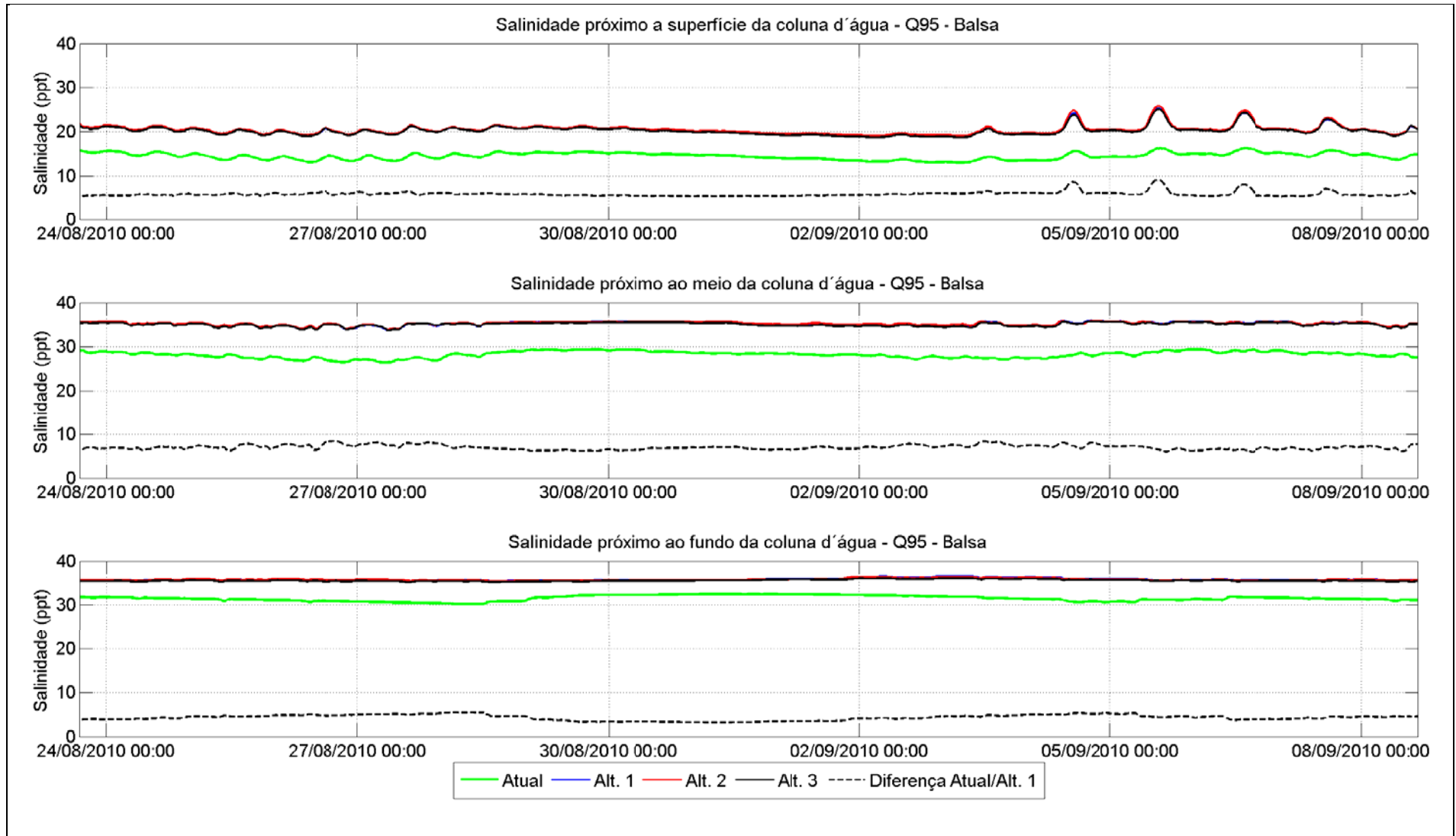


Figura 78: Série temporal de salinidade próximo da balsa de Araranguá, para os experimentos com vazão Q95.

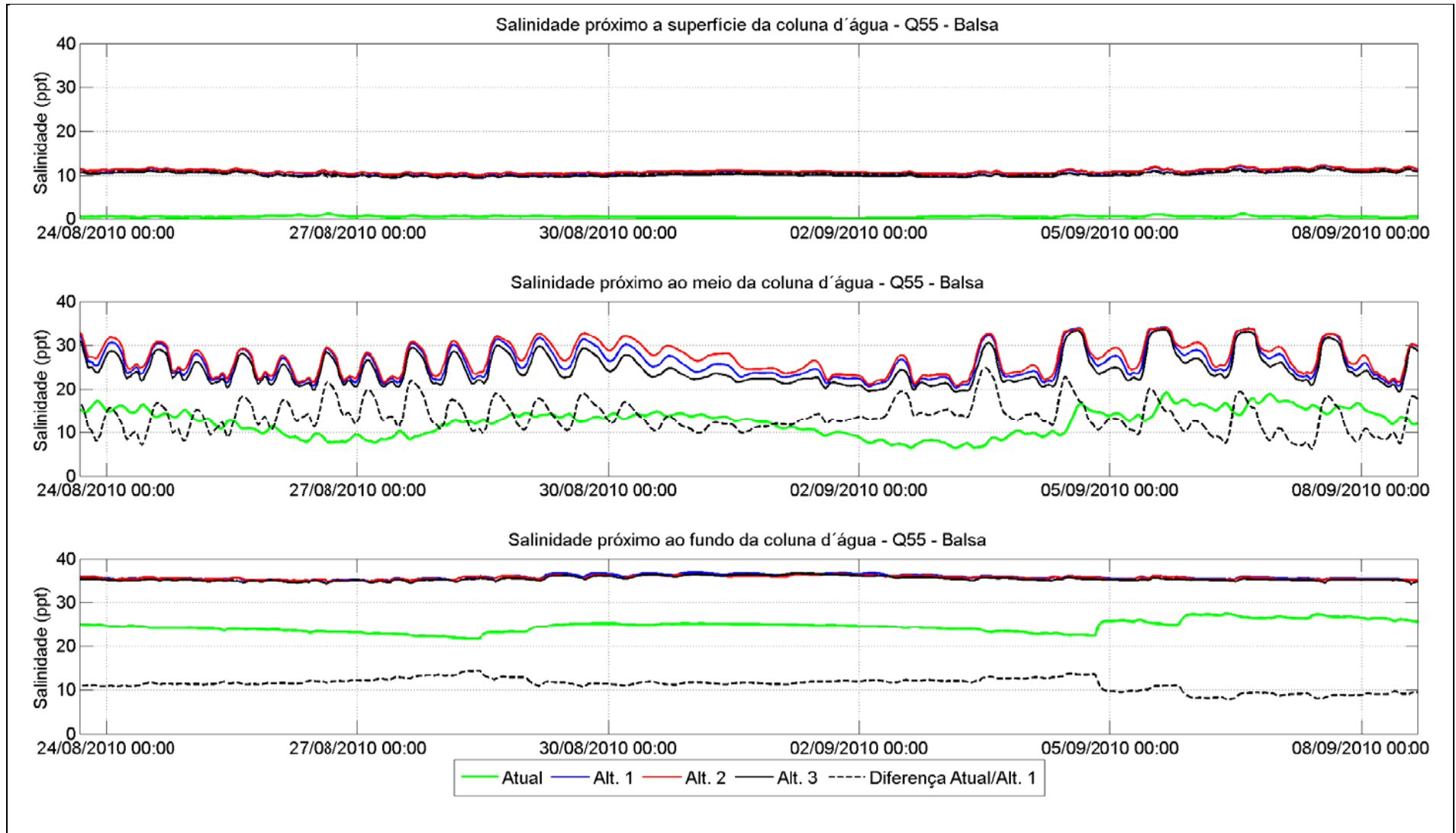


Figura 79: Série temporal de salinidade próximo da balsa de Araranguá, para os experimentos com vazão Q55.



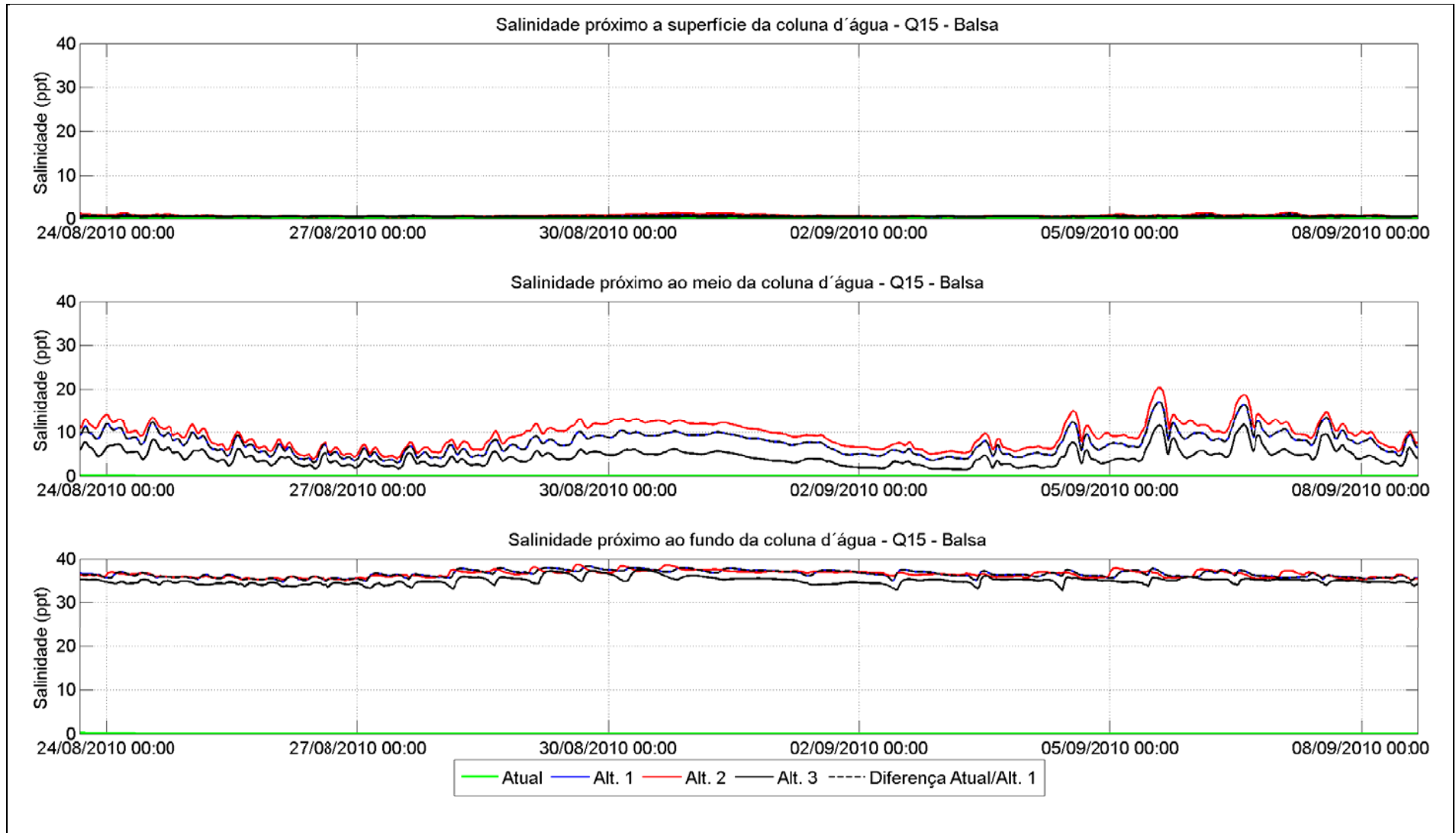


Figura 80: Série temporal de salinidade próximo da balsa de Araranguá, para os experimentos com vazão Q15.

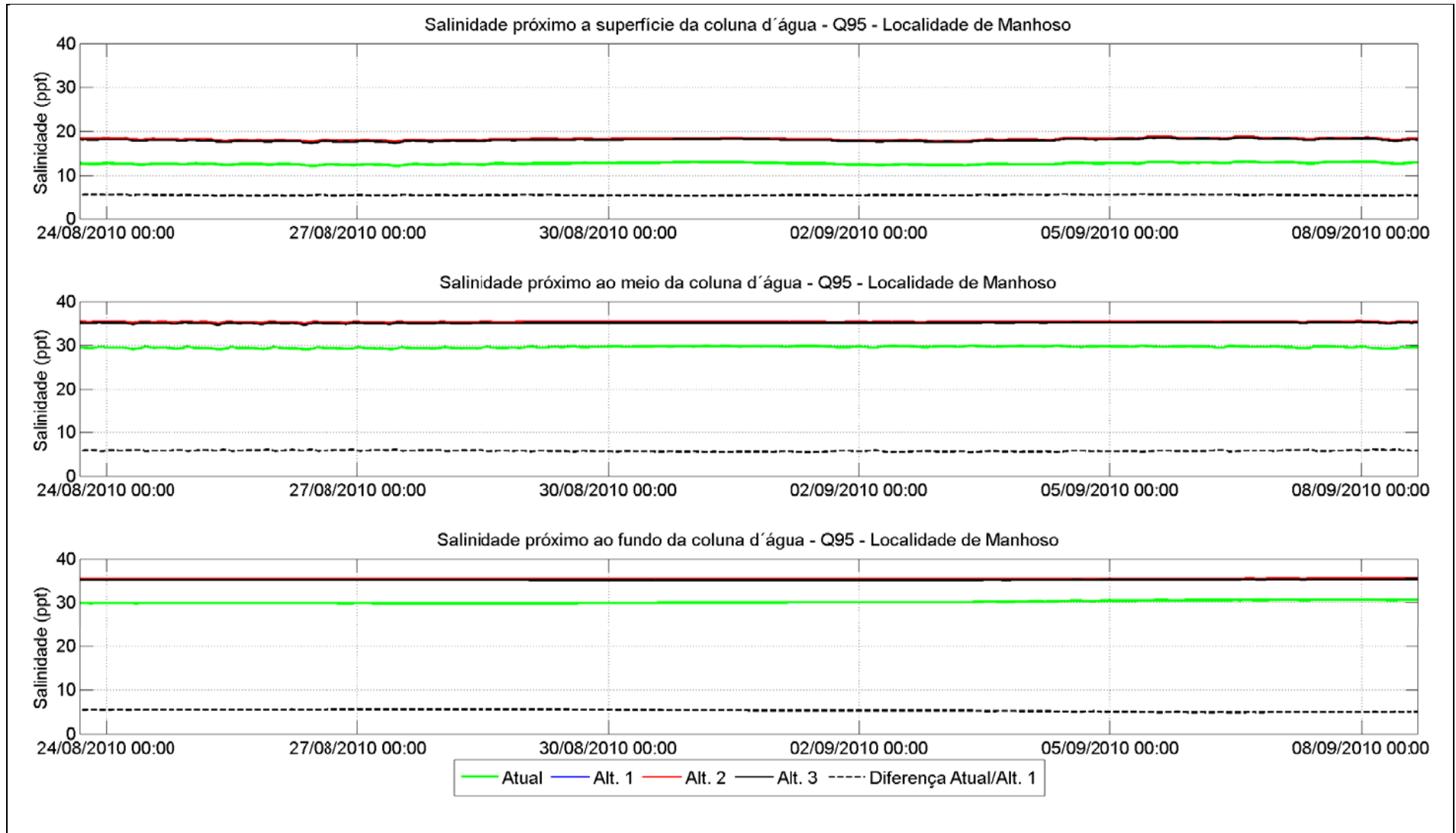


Figura 81: Série temporal de salinidade próximo da localidade de Manhoso, para os experimentos com vazão Q95.

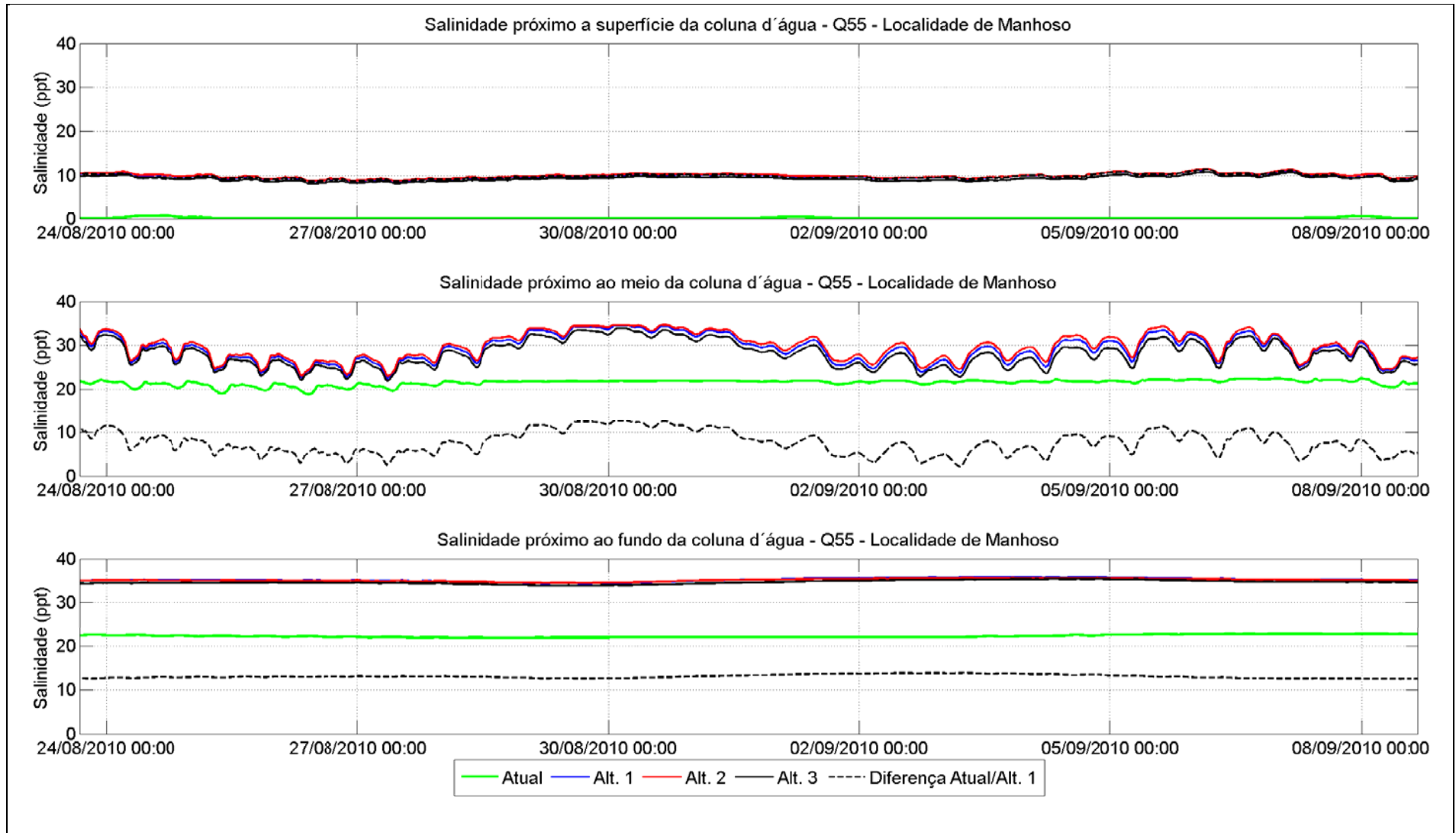


Figura 82: Série temporal de salinidade próximo da localidade de Manhoso, para os experimentos com vazão Q55.

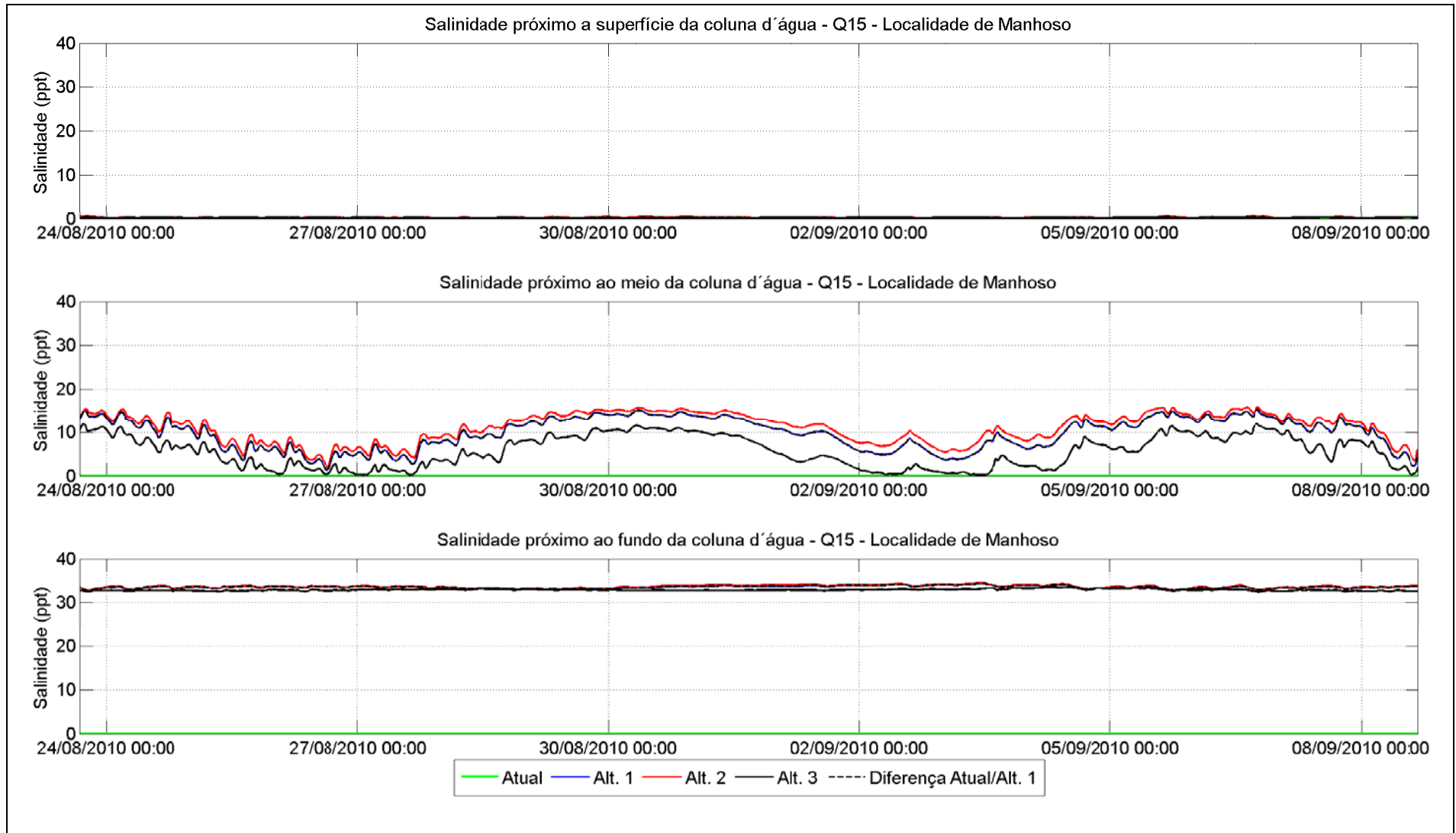


Figura 83: Série temporal de salinidade próximo da localidade de Manhoso, para os experimentos com vazão Q15.

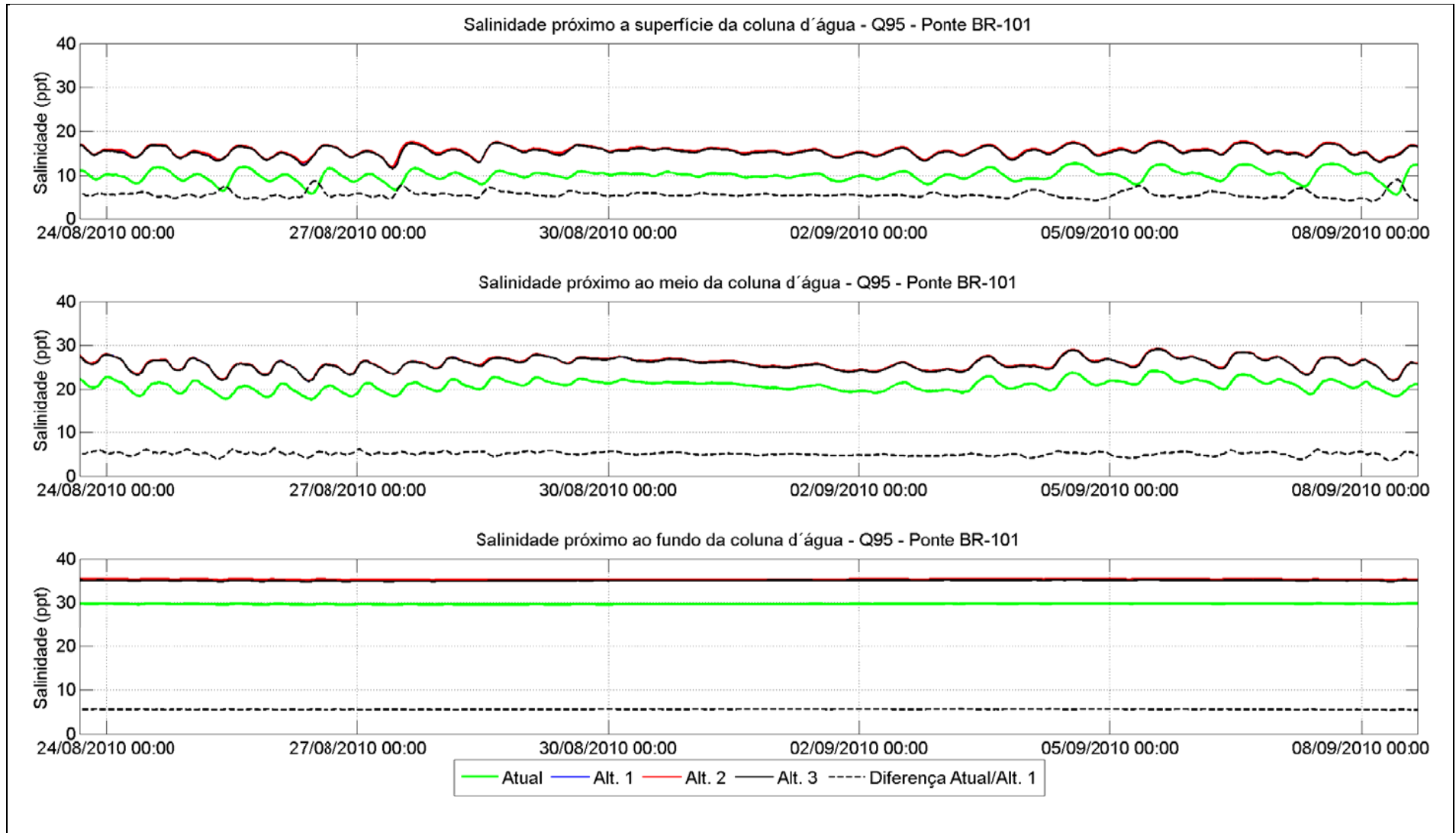


Figura 84: Série temporal de salinidade próximo da ponte da BR-101, para os experimentos com vazão Q95.

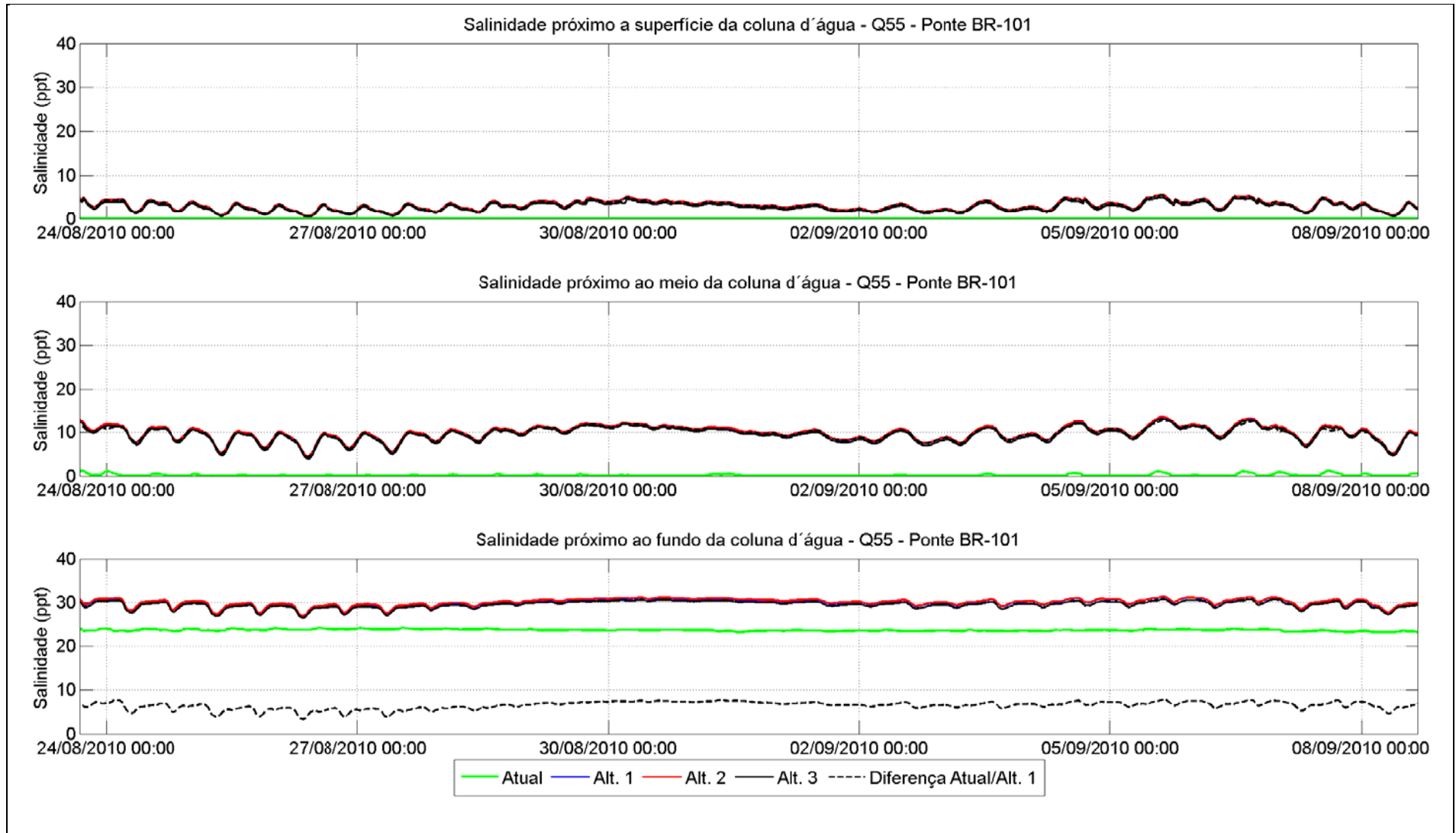


Figura 85: Série temporal de salinidade próxima da ponte da BR-101, para os experimentos com vazão Q55.

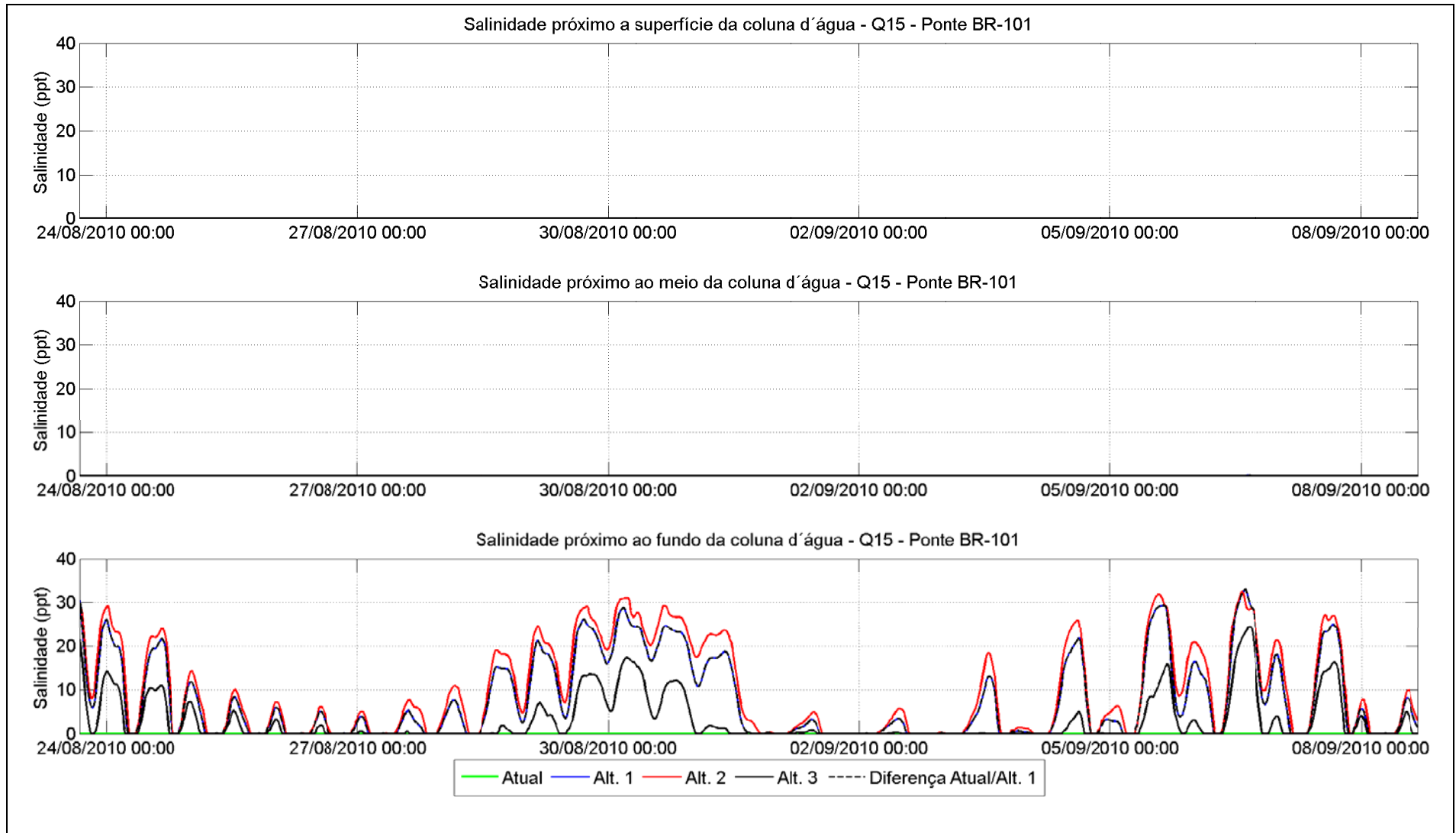


Figura 86: Série temporal de salinidade próximo da ponte da BR-101, para os experimentos com vazão Q15.

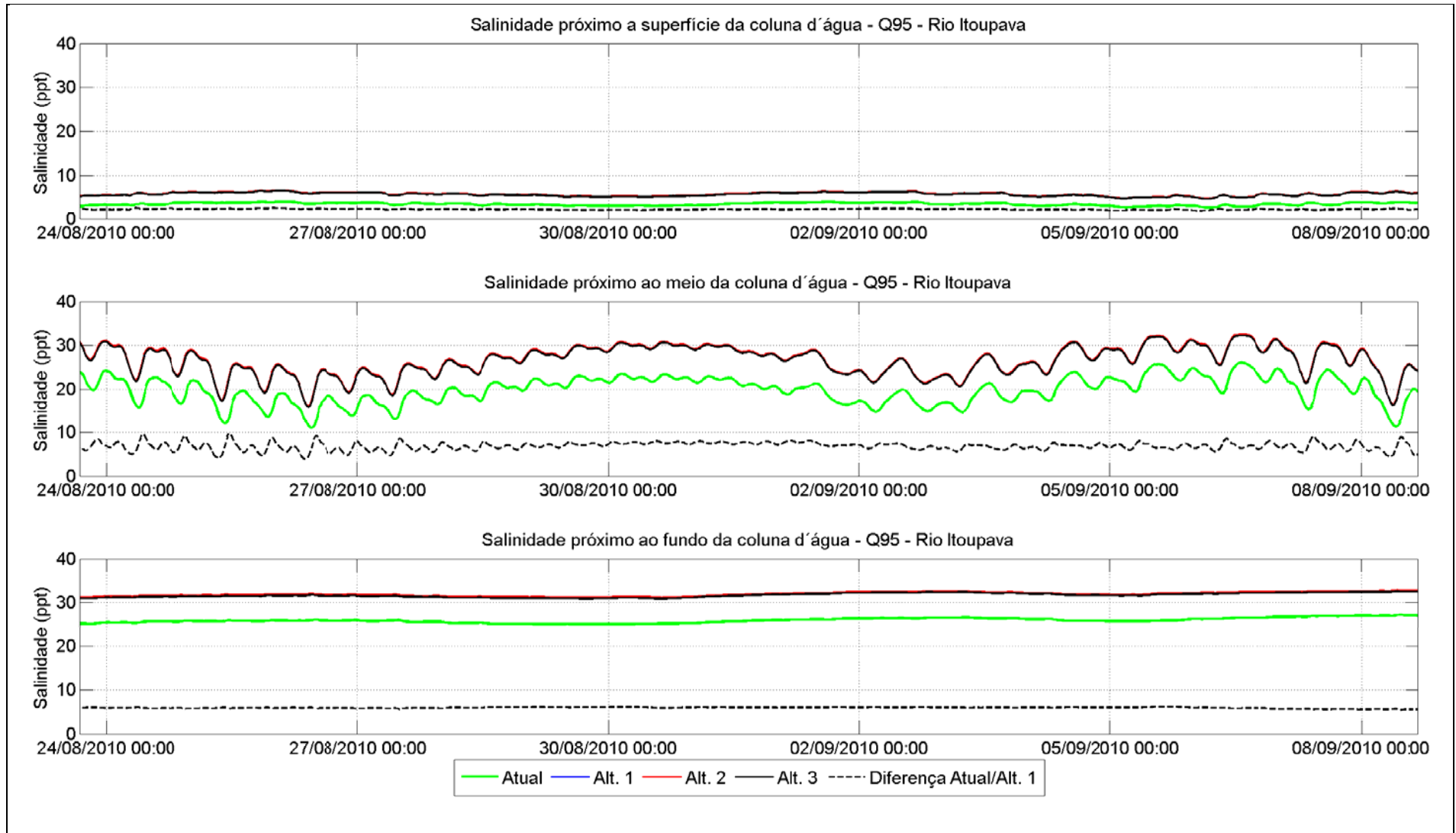


Figura 87: Série temporal de salinidade próximo ao Rio Itoupava, para os experimentos com vazão Q95.



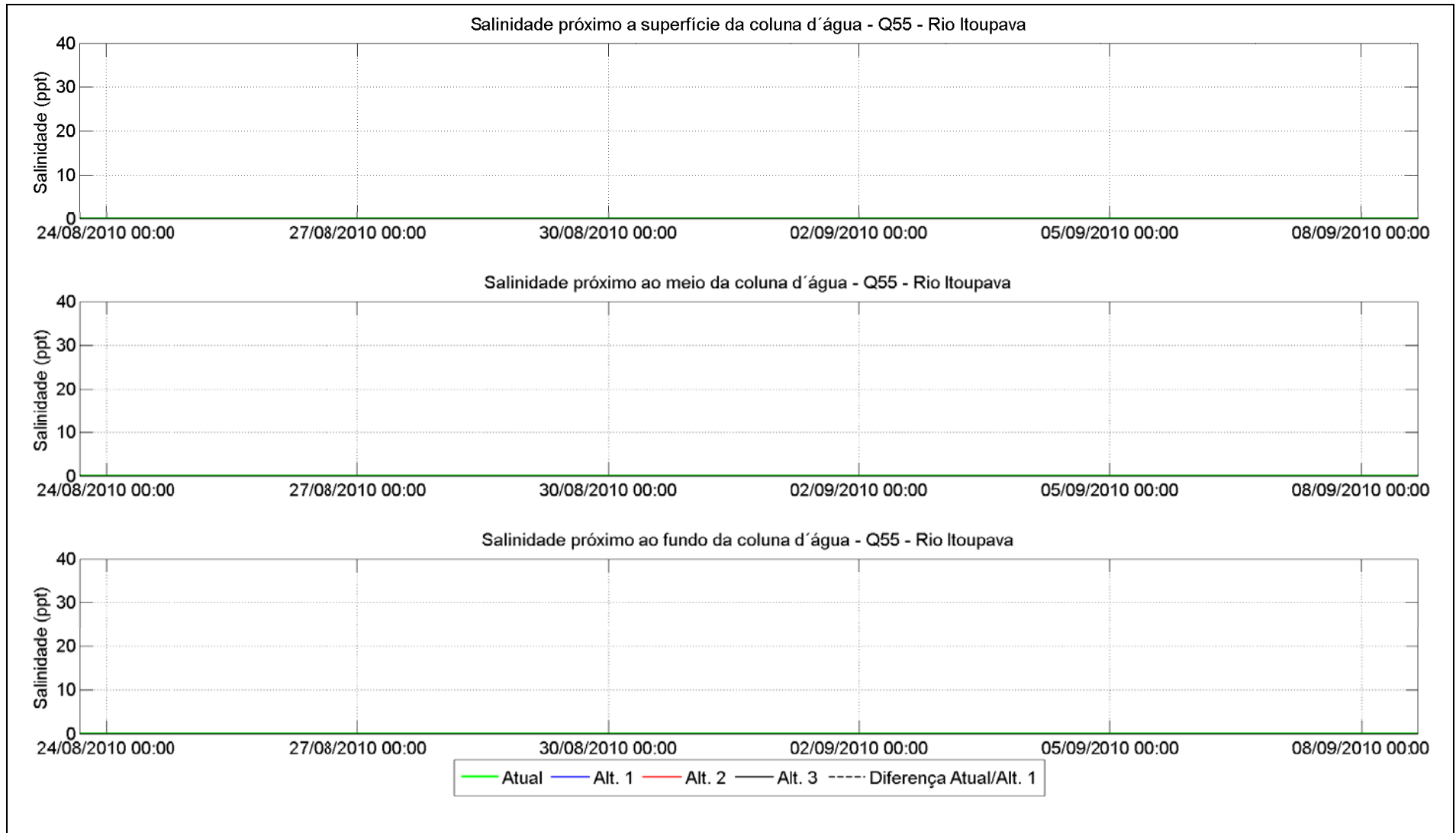


Figura 88: Série temporal de salinidade próximo ao Rio Itoupava, para os experimentos com vazão Q55.

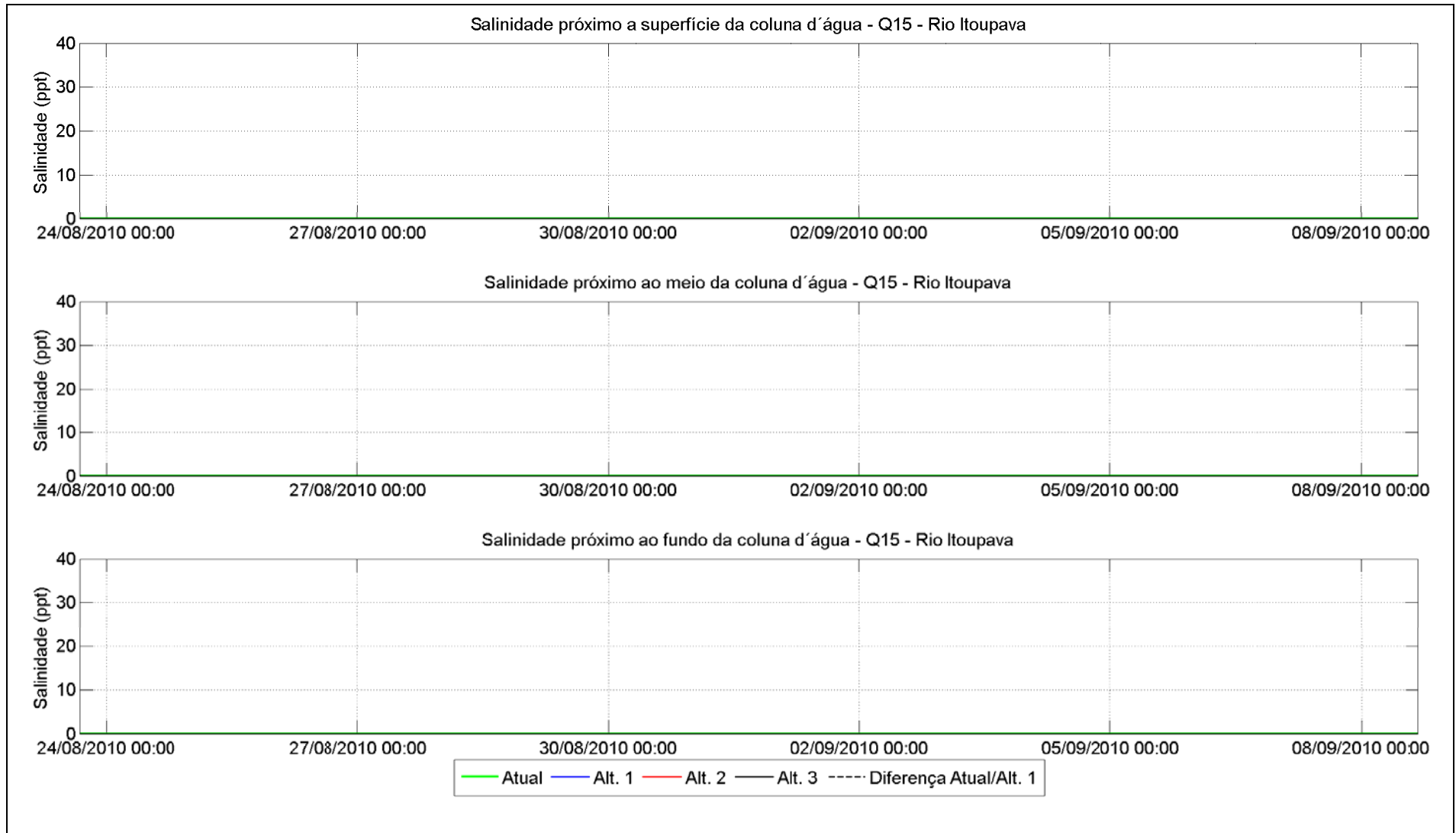


Figura 89: Série temporal de salinidade próximo ao Rio Itoupava, para os experimentos com vazão Q15.

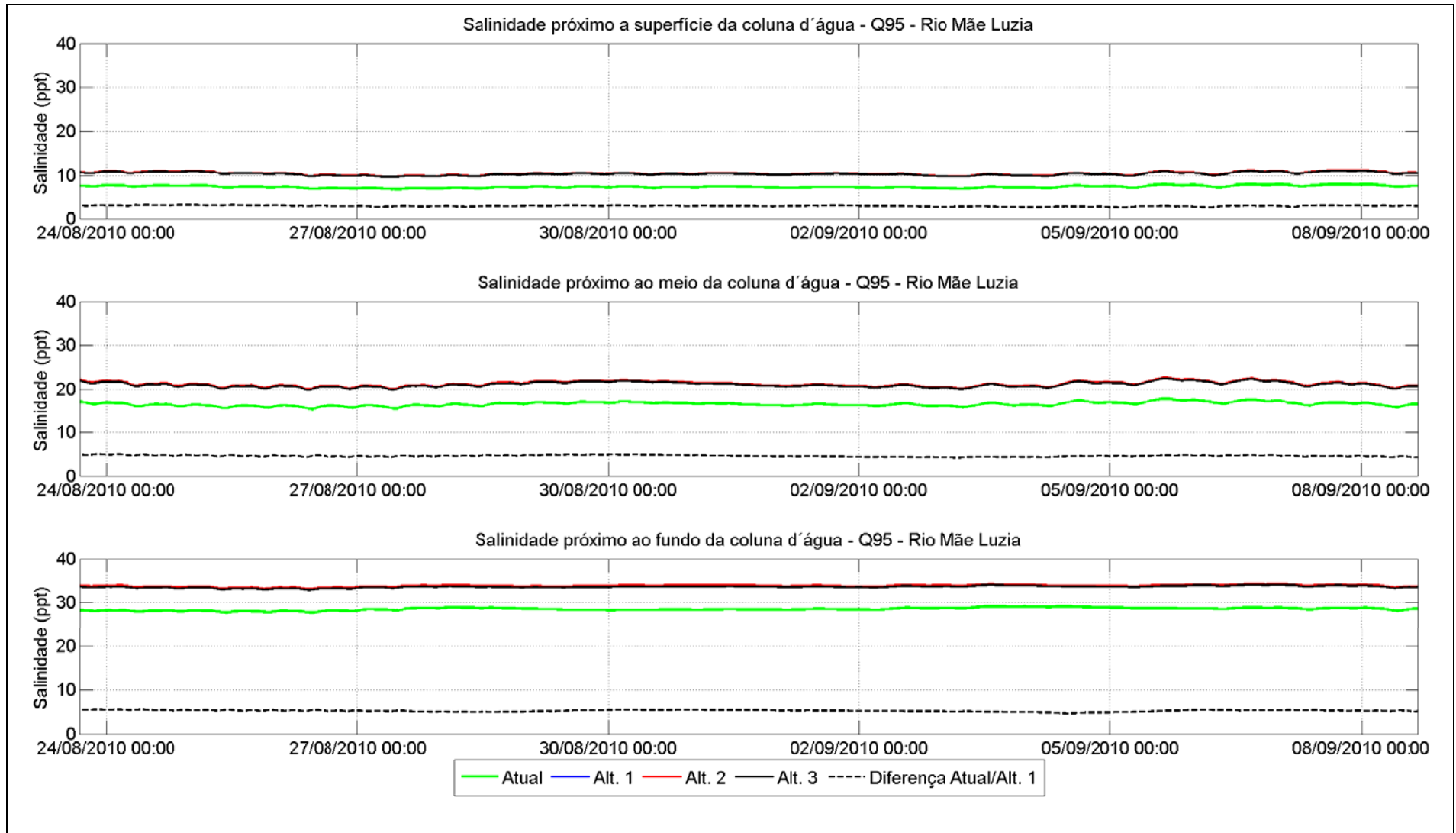


Figura 90: Série temporal de salinidade próximo ao Rio Mãe Luzia, para os experimentos com vazão Q95.

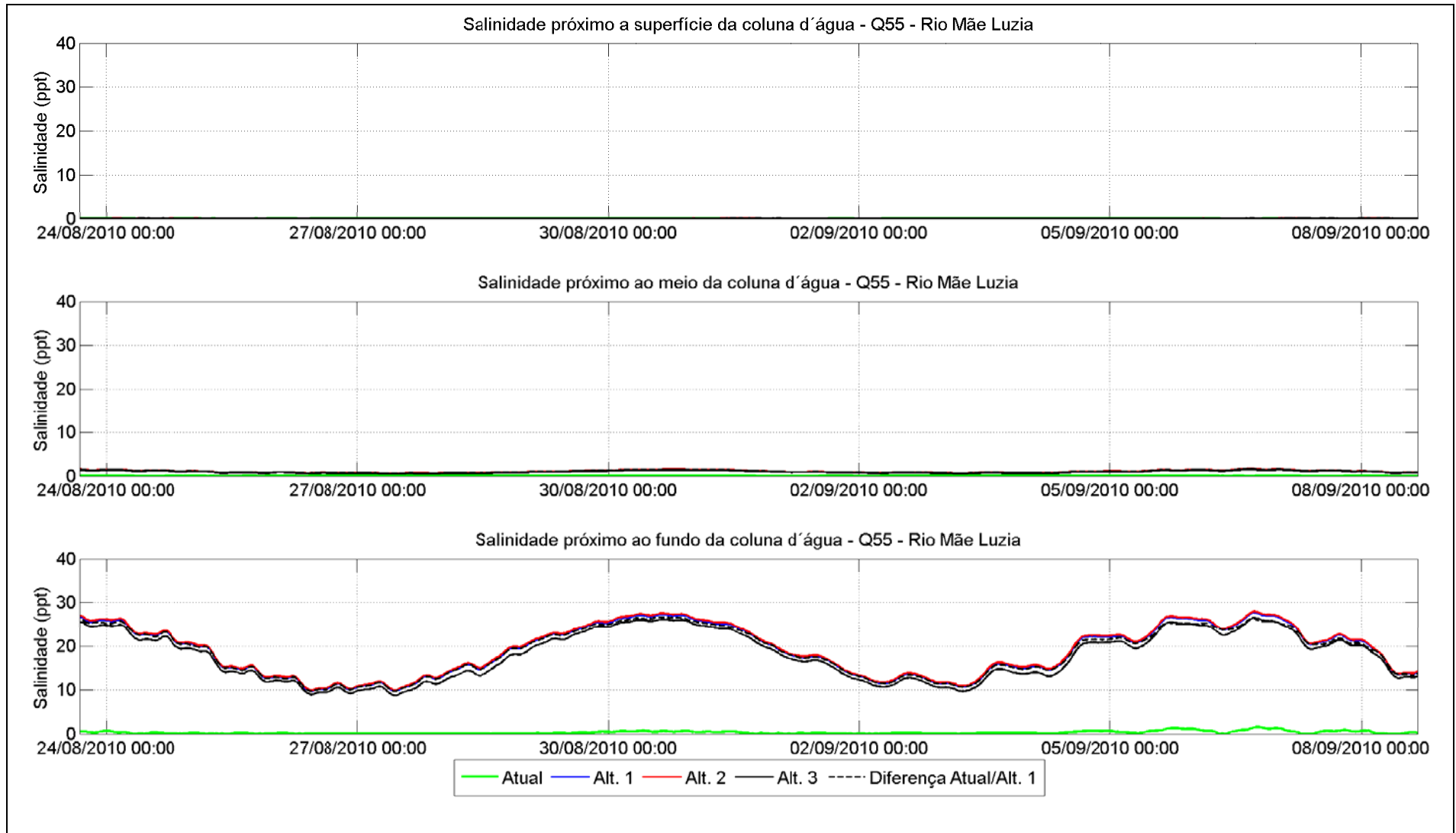


Figura 91: Série temporal de salinidade próximo ao Rio Mãe Luzia, para os experimentos com vazão Q55.

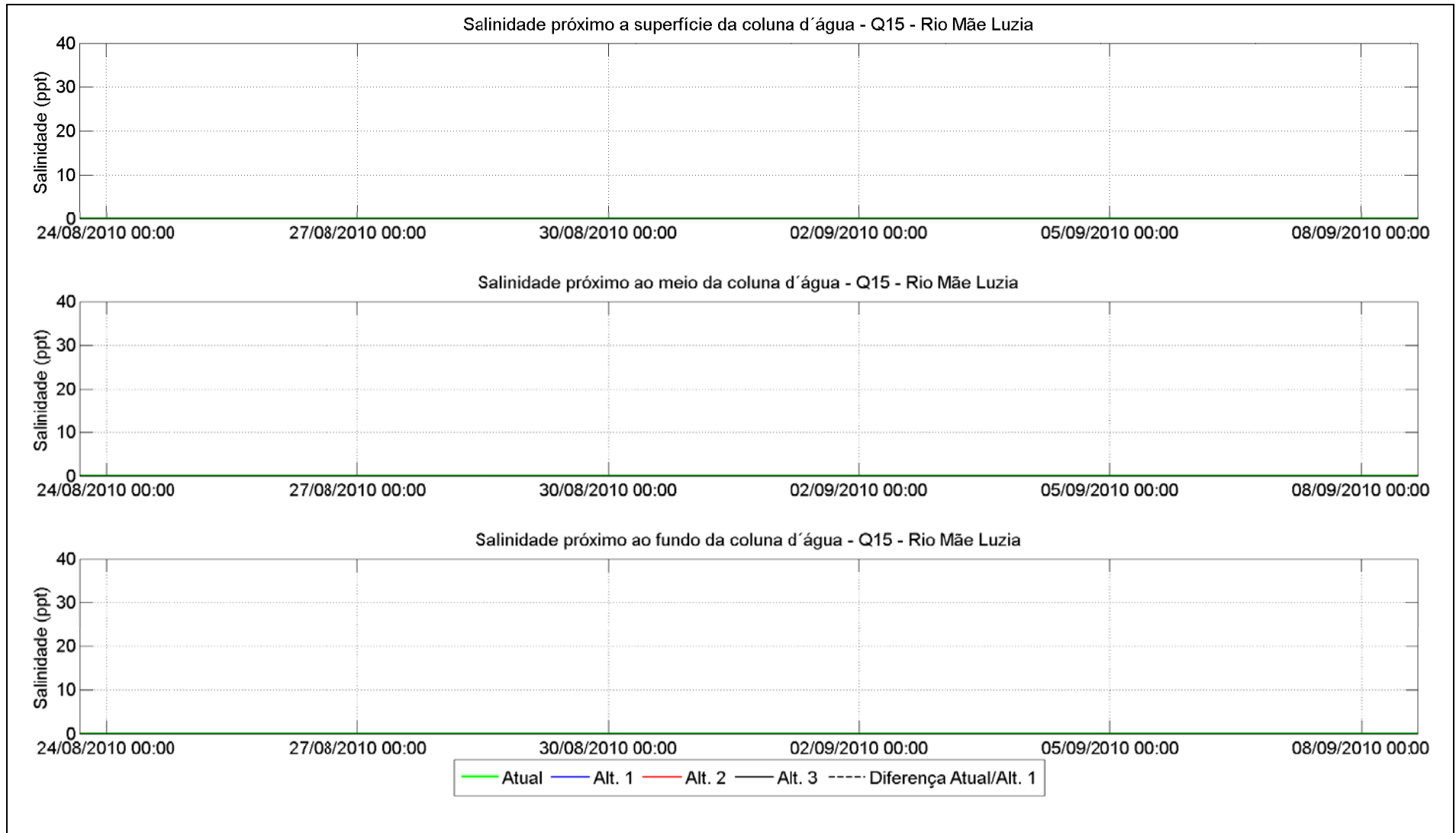


Figura 92: Série temporal de salinidade próximo ao Rio Mãe Luzia, para os experimentos com vazão Q15.



Para a localidade da Balsa, com vazão extremamente baixa (Q95), as diferenças entre o experimento do cenário atual e da alternativa 1, tanto para superfície como para as camadas mais próximas do fundo, ficam em torno de 8-10 ups. Com a vazão Q55, tanto para o fundo como para a superfície, foi calculada uma diferença de, aproximadamente, 10-12 ups entre os cenários. No caso simulado com alta vazão (Q15), existe uma mudança no padrão de salinidade no fundo que chega a até 35 ups entre os cenários. Enquanto no cenário atual a coluna da água inteira possui salinidade muito próxima de 0 ups, nas demais alternativas há uma grande salinização nesta região, com exceção da parte superficial da coluna, onde a diferença entre o cenário atual e a alternativa 1 é menor que 3 ups.

Analisando a série temporal de salinidade obtida na localidade do Manhoso, para vazão Q95, é possível observar uma variação parecida com a localidade da Balsa. Tanto em superfície como no fundo, a diferença entre o cenário atual e a alternativa 1 é em torno de 5-7 ups. Com o aumento da vazão (Q55), as diferenças aumentam ao longo da coluna d'água, ficando na ordem de 10-12 ups. Assim como acontece próximo à Balsa, as maiores diferenças de salinidade nesta localidade ocorrem junto ao fundo em casos com vazão alta (Q15), chegando ao valor de 20 ups.

Os resultados do modelo mostraram que, com as alternativas propostas, comparativamente ao cenário atual, na região próxima à ponte da BR-101, em condições de baixa vazão (Q95), houve um aumento de salinidades ao longo da coluna d'água, da ordem de 5-7 ups. Em condições de vazão intermediária (Q55), a maior diferença entre os cenários foi observada no meio da coluna d'água, chegando a valores de 15 ups. Para a superfície e fundo, essa variação é menor, não ultrapassando valores de 10 ups. Os resultados das simulações com maior vazão (Q15), mostraram que praticamente não há diferença de salinidade na superfície até o meio da coluna d'água, pois todos os cenários apresentaram salinidade muito próxima a 0 ups. Já na parte inferior da coluna d'água foi observada uma variação cíclica de salinidade, relacionada com as variações da maré. Existem períodos em que a diferença de salinidade entre o cenário atual e as alternativas chega a ser nula e períodos em que essa diferença chega a até 30 ups.

A série temporal extraída no ponto situado no rio Itoupava só apresentou diferenças de salinidade entre os cenários simulados para o caso com baixa vazão (Q95). A diferença entre o cenário atual e a alternativa 1, próximo à superfície, não ultrapassou 5 ups. Já no fundo e no meio da coluna d'água, foi observada uma diferença de, no máximo, 10 ups. Nos experimentos com vazões intermediárias (Q55) e altas (Q15), não ocorreu essa variação entre o cenário



atual e com as alternativas – a água é doce ao longo de toda a coluna d'água.

O rio Mãe Luzia não apresenta o mesmo padrão observado no rio Itoupava. Com a vazão Q95 a diferença para toda a coluna d'água ficou em torno de 5-7 ups. Nas simulações com vazão Q55, a superfície da coluna ficou totalmente livre de sal, enquanto no meio da coluna as alternativas se mostraram mais salgadas que o cenário atual. Com a implementação das estruturas de fixação da barra ocorreu uma salinização junto ao fundo, da ordem de 10 a 30 ups. No experimento com vazões altas (Q15) não foram observadas variações significativas entre o cenário atual e com as alternativas – a água é doce ao longo de toda a coluna d'água.



## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A dinâmica de sal no estuário do Rio Araranguá é fortemente influenciada pela vazão fluvial. Coelho (2010) realizou oito campanhas medindo perfis verticais de salinidade ao longo do estuário. Os resultados mostraram grande variabilidade temporal na distribuição da salinidade: em uma das campanhas foram observados valores de salinidade próximos a 20 ups em um ponto situado a aproximadamente 35 km da desembocadura (no Rio Itoupava), enquanto em outra campanha a distribuição de sal limitou-se aos primeiros 5 km do estuário.

Os cenários simulados com as alternativas de fixação propostas mostram que em determinadas condições de vazão há um aumento na salinidade do rio em relação ao cenário atual. Nas simulações com vazões Q95 e Q55 são observadas diferenças em todo o domínio de modelagem, ao longo dos rios Araranguá, Itoupava e Mãe Luzia. Considerando as vazões Q15 as diferenças se restringem a regiões a jusante da ponte da BR-101 (situada a aproximadamente 24 quilômetros da obra proposta) e regiões mais profundas (próximas ao fundo), devido a uma menor penetração da cunha salina ao longo do estuário. As diferenças variam ao longo da seção longitudinal dos rios.

Para eventos de vazão intermediária (Q55) as diferenças entre os resultados das simulações considerando o cenário atual e as alternativas variaram entre 10 e 15 ups na camada superficial da coluna d'água, entre a balsa e a ponte da BR-101.

Os resultados da simulação do cenário atual considerando vazão Q15 não mostraram águas salinas no corpo dos rios Araranguá, Itoupava e Mãe Luzia, sendo a distribuição de sal restrita à região da desembocadura. Já as simulações considerando as três alternativas de intervenção mostraram águas com salinidade de até 35 ups adentrando aproximadamente 10 km no Rio Araranguá, mas limitadas à porção inferior da coluna d'água (próxima ao fundo). Nestes cenários o limite de influência da cunha salina a montante foi a região da ponte da BR-101, distante aproximadamente 24 km da obra proposta.

As profundidades na região da desembocadura, para o cenário atual, não ultrapassam 2,5 m. Nos resultados associados às simulações considerando o cenário atual foi observada uma maior retenção da água salgada proveniente do mar na desembocadura do sistema. Nos resultados dos modelos considerando o cenário atual, independente das vazões atribuídas, não foram observados valores de salinidade superiores a 30 ups nas regiões localizadas a montante da desembocadura. Já para as alternativas de intervenção propostas, nas quais a





profundidade da desembocadura ultrapassa os 5 m, o modelo indicou valores de salinidade de até 35 ups em regiões situadas nas proximidades da desembocadura, para todas as vazões simuladas. Isso indica que a profundidade do canal tem um papel fundamental no padrão de intrusão salina, permitindo, ou não, a excursão de massas d'água com salinidades maiores para o interior do estuário.

Os resultados das simulações indicam que, para alguns pontos/profundidades analisados (comparações de séries temporais), a alternativa 3, com o fechamento da desembocadura atual, gera uma menor alteração no padrão de intrusão da água salgada em relação às outras alternativas. Entretanto, as diferenças existentes entre as três alternativas estudadas (uma em relação à outra) são pequenas em comparação com as diferenças entre as alternativas e o cenário atual.

Adicionalmente, o estudo dos efeitos das alternativas de fixação da desembocadura do Rio Araranguá no comportamento morfológico da região (CPE, 2009) indicou para as alternativas 1 e 2 (com estruturas/dragagem mas sem o dique de areia na desembocadura atual) tendência de deposição de sedimentos e fechamento da desembocadura atual dentro de 1 ano após a implantação da obra. Dessa forma, as alternativas 1 e 2 assumiriam as características da alternativa 3, reduzindo ainda mais as diferenças existentes entre as alternativas de fixação da desembocadura quanto aos padrões de intrusão salina no estuário.



## **8. AGRADECIMENTOS**

A Coastal Planning & Engineering do Brasil agradece a colaboração da professora Doutora Carla de Abreu D'aquino e do acadêmico da Universidade do Vale de Itajaí (UNIVALI) Maurício Clezar Coelho, que cederam gentilmente dados de batimetria e salinidade da região de estudo e acompanharam os trabalhos de modelagem.



## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARRETO, G.A.M. Calibração de perfiladores acústicos de correntes por efeito Döppler para a aquisição de dados de material particulado em suspensão no estuário do rio Araranguá, SC.Itajaí, 2008. 65 f. Monografia (Bacharel em Oceanografia) – CTTMar, UNIVALI.

CPE – COASTAL PLANNING AND ENGINEERING, 2010. Aquisição de dados oceanográficos em águas rasas – Araranguá – Campanha 1. 39 pp.

D'AQUINO, C.A., SCHETTINI, C.A.F., PEREIRA Fo. J., 2008. Fluvial Modulation of Salt Transport in a Highly Stratified Estuary. Revista. (no prelo)

FEMAR, 2000. Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras. Rio de Janeiro.

INPH – Instituto de Pesquisa Hidroviária. (1993). Projeto de Abertura e Fixação da Barra do Rio Araranguá-SC. Vol 1.

LEENDERTSE,1990, STELLING e VAN KESTER, 1994, *apud* Delft3D-FLOW User Manual

MIRANDA, L. B., Castro, B. M. e Kjerve, B., 2002. Princípios de Oceanografia Física de Estuários. EDUSP, São Paulo. 411 pp.

SANTA CATARINA, SECRETARIA DE ESTADO DO DESENVOLVIMENTO URBANO E MEIO AMBIENTE. Plano Básico de Desenvolvimento Ecológico-Econômico-Associação dos Municípios da Região Carbonífera. Florianópolis, SDM. 1997.

STOMMEL, H., 1953. The Role of Density Currents in Estuaries. *Proc. Minnesota International Hydraulics Convention*, Minneapolis, University of Minnesota, pp. 305-312.