

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA OCEÂNICA

ESTUDO DOS PROCESSOS DE SEDIMENTAÇÃO NO PORTO DO RIO GRANDE
(RIO GRANDE DO SUL, BRASIL)

por

Marine Jusiane Bastos da Silva

Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Oceânica

Rio Grande, janeiro, 2019

ESTUDO DOS PROCESSOS DE SEDIMENTAÇÃO NO PORTO DO RIO GRANDE
(RIO GRANDE DO SUL, BRASIL)

Por

Marine Jusiane Bastos da Silva
Engenheira civil costeira e portuária

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica (PPGEO) da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Área de Concentração: Engenharia Costeira

Orientador: Prof. Dr. Lauro Julio Calliari

Co-orientador: Prof. Dr. José Antônio Scotti Fontoura

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Diego de Freitas Fagundes

PPGEO/FURG

Prof. Dr. Miguel da Guia Albuquerque

IFRS – Campus Rio Grande

Prof. Dr. Christian Garcia Serpa

EE/FURG

Prof. Dr. Liércio André Isoldi
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica

Rio Grande, 25, janeiro de 2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter guiado meu caminho até aqui. Sou grata por sempre ter me abençoado com grandes oportunidades.

Agradeço à minha mãe, Ivani, por sempre estar ao meu lado e ser minha grande amiga. Obrigada por sempre ter priorizado minha educação, dedicando seu tempo e proporcionando sempre as melhores condições possíveis para que eu fosse atrás dos meus sonhos. Obrigada por ser um exemplo de mãe... Sou uma pessoa de sorte!

Agradeço ao meu pai, Jones, (*in memoriam*) por tudo o que fez por mim, pela sua amizade e por sempre ter estado ao meu lado, confiando em mim e apoiando meus sonhos.

Agradeço aos meus avós, Leonilda e Orlando (*in memoriam*). Obrigada por sempre terem dedicado tempo para estar comigo e terem estado sempre ao meu lado, vibrando com as minhas conquistas.

Agradeço ao meu tio, Nazareno, pelo companheirismo e pela sua amizade.

Aos meus orientadores, prof. Dr. Lauro Calliari e prof. Dr. José Fontoura, agradeço por terem aceitado me acompanhar nesta jornada. Obrigada por estarem sempre dispostos a sanar minhas dúvidas e transmitir seus conhecimentos, sempre com paciência, humildade e atenção. Foi um privilégio ser orientada por esta super dupla! Muito obrigada por tudo!

Ao prof. Dr. Christian Serpa, obrigada por ser sempre tão prestativo, por sua dedicação exemplar e atenção para me ajudar sempre que necessitei. Agradeço, em especial, por ter me ensinado e criado a metodologia empregada neste estudo junto comigo. Muito obrigada!

Aos técnicos do Laboratório de Engenharia Costeira, Veridiana Herreira e Marcelo Goulart, muito obrigada por serem sempre prestativos e dedicados. Obrigada pela parceria ao longo de todos esses anos em que estou no laboratório, pela amizade e pelo incentivo!

A toda equipe do Laboratório de Engenharia Costeira da FURG, agradeço pelos momentos compartilhados e pelo apoio ao longo desta caminhada. Em especial, agradeço à minha amiga, Natalia, por sempre ter me ajudado e me incentivado a ir atrás dos meus objetivos. Destaco, também, meus agradecimentos ao Willian, um grande amigo desde a faculdade; à Luiza, ao Gilberto e à Laís, um trio maravilhoso que muito me apoiou.

Agradeço às minhas amigas, Ana Paula e Tainã, pelo incentivo, pela amizade e por estarem sempre presentes. E às minhas amigas Marcelle, Manoela, Caroline e Bruna, agradeço pelo companheirismo e pelo apoio de sempre.

À equipe da Lancha Larus (FURG), agradeço por toda atenção e dedicação na realização do embarque para coleta de dados. O trabalho de vocês é essencial para a nossa pesquisa. Obrigada pela

disposição em auxiliar sempre que necessário. Agradeço, também, ao prof. Lauro, prof. José Fontoura, prof. Christian, téc. Marcelo e ao colega Marcos pelo empenho e pela força, literalmente, na realização do embarque.

À Superintendência do Porto do Rio Grande, agradeço pelo fornecimento de dados utilizados neste estudo. Em especial, ao Engenheiro Sávio Novo e ao Mário Dutra, gostaria de agradecer pela disponibilidade de tirar minhas dúvidas e repassar todas as informações necessárias. O apoio da SUPRG foi essencial. Obrigada!

Agradeço à Escola de Engenharia e à Universidade Federal do Rio Grande pela oportunidade de realizar este estudo. Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, agradeço pelo apoio ao longo do curso e por disponibilizar recursos para a realização desta pesquisa. Agradeço, em especial, à CAPES pelas condições oferecidas para o desenvolvimento desta dissertação.

RESUMO

O assoreamento de canais de navegação é um processo natural na maioria dos portos do mundo. O Porto do Rio Grande, situado na região estuarina da Lagoa dos Patos, experimenta um processo de assoreamento acentuado. Embora detenham grande importância para o planejamento e otimização de operações de dragagem, ainda são escassos os estudos acerca dos processos de sedimentação neste porto. Neste contexto, o presente trabalho tem por objetivo estimar as taxas de sedimentação e erosão de cada trecho do Canal Externo e do Canal Interno de Acesso ao Porto do Rio Grande em relação à cota de projeto e analisar o comportamento do fundo nesses locais, avaliando, separadamente, os cenários anterior e posterior à dragagem de aprofundamento do canal de acesso ao porto. A metodologia para estimativa das taxas de sedimentação e de erosão baseou-se em levantamentos batimétricos disponibilizados pela Superintendência do Porto do Rio Grande do período compreendido entre os anos de 2001 e 2018. Além disso, foram coletados testemunhos (dados sedimentológicos) em pontos localizados na região de interesse. Os resultados demonstraram que, para a configuração anterior à dragagem de aprofundamento do Canal de Acesso ao Porto do Rio Grande, as taxas médias de sedimentação e de erosão foram, respectivamente, 2,31 cm/mês e 1,18 cm/mês para o Trecho 1; 1,97 cm/mês e 4,57 cm/mês para o Trecho 2; 0,05 cm/mês e 4,61 cm/mês para o Trecho 3; 0,50 cm/mês e 4,28 cm/mês para o Trecho 4; todas em relação à cota de projeto de -14,00 metros (NR/DHN). Já para a configuração atual, após o aprofundamento, as taxas médias de sedimentação e de erosão em relação à cota de projeto foram, respectivamente, de 0,56 cm/mês e 0,23 cm/mês no Trecho I; 18,06 cm/mês e 0,72 cm/mês no Trecho II; 24,80 cm/mês e 5,29 cm/mês no Trecho III; 22,76 cm/mês e 0,00 cm/mês no Trecho IV; 6,65 cm/mês e 5,22 cm/mês no Trecho V. Constatou-se que o aprofundamento induziu a maiores taxas de sedimentação, principalmente na porção interna do canal. Em ambos os traçados geométricos do Porto do Rio Grande, as maiores taxas de sedimentação médias foram observadas na região entre os Molhes da Barra do Rio Grande. Os testemunhos coletados, por sua vez, demonstraram a predominância das classes de areia fina e lama no canal. O fluxo bidirecional predominante na região, de vazante e de enchente, imprime nos padrões de sedimentação a presença de intercalações de diferentes fácies sedimentares. Quanto ao comportamento da região mediante forçantes ambientais, foi possível identificar que fenômenos de El Niño de intensidade moderada ou forte geram fluxos de vazante intensos no baixo estuário da Lagoa dos Patos, capazes de ressuspender o sedimento junto ao fundo do Canal Interno e transportá-lo para a região costeira adjacente e para o Canal Externo.

Palavras-chaves: assoreamento, sedimentação portuária, Porto do Rio Grande.

ABSTRACT

Sedimentation in navigation channels is a natural process in most ports around the world. The Port of Rio Grande, which is located in the estuarine area of Patos Lagoon, suffers a intense sedimentation process. In this context, this study aims to estimate sedimentation rates in each stretch of the External and the Internal Rio Grande's Port Channel. Although it has a great importance to dredging processes planning and optimization, studies about sedimentation process are still scarce for this port. In this context, this work aims to estimate sedimentation and erosion rates of each External and Internal Channel stretch, taking into account project depth, for design before and after the deepening dredging. The methodology for estimating sedimentation and erosion rates was based on bathymetry data from 2001 to 2018 provided by Superintendência do Porto do Rio Grande. Besides that, sediment cores were collected in region of interest. Results demonstrated that the mean sedimentation and erosion rates were, in this order, 2,31 cm/month and 1,18 cm/month at Stretch 1; 1,97 cm/month and 4,57 cm/month at Stretch 2; 0,05 cm/month and 4,61 cm/month at Stretch 3; 0,50 cm/month and 4,28 cm/month at Stretch 4; taking into account project depth of -14,00 meters (NR/DHN). For current design, after the deepening dredging, mean sedimentation and erosion rates are, in this order, 0,56 cm/month and 0,23 cm/month at Stretch I; 18,06 cm/month and 0,72 cm/month no Stretch II; 24,80 cm/month and 5,29 cm/month at Stretch III; 22,76 cm/month and 0,00 cm/month no Stretch IV; 6,65 cm/month and 5,22 cm/month at Stretch V. Therefore, it was verified that chanel's deepening induced to higher sedimentation rates, mainly in the inner portion of the channel. In both geometric design of Port of Rio Grande, the highest average sedimentation rates were observed in the region between Rio Grande Jetties. Sediment cores demonstrated the dominance of the fine sand and mud in the channel. The bidirectional currents in the region induced the presence of different sediment layers interleaved. Moreover, it was possible to identify that strong and moderate El Niño events generates strong ebb flows in the estuarine area of Patos Lagoon, which are capable to erode bottom sediment in Internal Channel and carry this sediment to External Channel and adjacent coastal region.

Keywords: harbor sedimentation, harbor siltation, Port of Rio Grande

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	18
2. ÁREA DE ESTUDO: O PORTO DO RIO GRANDE	19
3. OBJETIVOS	23
3.1. Objetivo Geral	23
3.2. Objetivos Específicos	23
4. REFERENCIAL TEÓRICO	24
4.1. Lagoa dos Patos	24
4.1.1. Estuário da Lagoa dos Patos	25
Geologia	26
Clima	27
Hidrodinâmica	29
Tipos de estuário e salinidade	34
Batimetria	35
Sedimentologia	36
4.2. Breve histórico do Porto do Rio Grande e dos estudos sobre sedimentação	42
5. METODOLOGIA	59
5.1. Descrição do método desenvolvido por Bastos da Silva (2016)	59
5.2. Aquisição, padronização e organização de levantamentos batimétricos	61
5.3. Levantamento do histórico de dragagens	62
5.4. Subdivisão em retângulos e organização cronológica dos dados (levantamentos batimétricos e histórico de dragagens) de cada trecho	64
5.4.1. Configuração geométrica anterior à dragagem de aprofundamento do Canal de Acesso ao Porto do Rio Grande	64
Subdivisão em setores	64
Levantamentos batimétricos disponíveis e dragagens realizadas em cada trecho	72
5.4.2. Configuração geométrica posterior à dragagem de aprofundamento do Canal de Acesso ao Porto do Rio Grande	75
Subdivisão em setores	75
Levantamentos batimétricos disponíveis e dragagens realizadas em cada trecho	82
5.5. Tratamento dos dados batimétricos para elaboração de Modelos Digitais de Elevação (MDEs)	85
5.6. Elaboração de modelos digitais de elevação (MDEs)	85

5.7. Cálculo das taxas de sedimentação e erosão em relação às cotas atingidas após dragagens	86
5.8. Elaboração de mapas de evolução do fundo em relação às cotas de projeto para o traçado geométrico atual do canal do Porto do Rio Grande	90
5.9. Levantamento e análise de dados sedimentológicos	91
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	95
6.1. Configuração do traçado geométrico anterior à dragagem de aprofundamento	95
6.2. Configuração do traçado geométrico posterior à dragagem de aprofundamento	100
6.3. Comparação entre a configuração atual e a configuração anterior à dragagem de aprofundamento, em relação à cota de projeto	115
6.4. Observação acerca das taxas de sedimentação e de erosão estimadas	116
6.5. Comportamento do ambiente	117
6.6. Determinação de zonas críticas no traçado geométrico atual em relação à cota de projeto	119
7. CONCLUSÕES	121
8. REFERÊNCIAS	124
APÊNDICE A – Taxas de sedimentação e de erosão de cada retângulo da configuração anterior à dragagem de aprofundamento do Porto do Rio Grande	128
Trecho 1	129
Trecho 2	133
Trecho 3	140
Trecho 4	149
APÊNDICE B – Taxas de sedimentação e de erosão de cada retângulo da configuração posterior à dragagem de aprofundamento do Porto do Rio Grande	159
Trecho I	160
Trecho II	162
Trecho III	165
Trecho IV	168
Trecho V	172
APÊNDICE C – Fotografias dos testemunhos coletados no Canal de Acesso ao Porto do Rio Grande	177

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Mapa de localização da área de estudo com traçado geométrico do Canal do Porto do Rio Grande anterior à dragagem de aprofundamento. Os Molhes da Barra do Rio Grande estão apresentados conforme a configuração atual.	20
Figura 2.2: Mapa de localização da área de estudo com traçado geométrico do Canal do Porto do Rio Grande posterior à dragagem de aprofundamento (configuração atual).	21
Figura 4.1: Lagoa dos Patos e principais localidades. Fonte: Schwochow e Zanboni (2007).	24
Figura 4.2: Estuário da Lagoa dos Patos. Fonte: Hartmann (1996) apud Torres (2000), adaptado.	26
Figura 4.3: Mapa geológico simplificado da Planície Costeira do Rio Grande do Sul. Fonte: Tomazelli e Villwock (2000), modificado de Tomazelli e Villwock (1996).	27
Figura 4.4: Representação esquemática das oscilações do nível induzidas pelo vento NE (a) e vento SO (b). Fonte: Möller et al. (2001, apud Calliari et al., 2009), adaptado.	31
Figura 4.5: Comportamento do fluxo de enchente e de vazante no Canal do Rio Grande (Hemisfério Sul). Fonte: Hartmann (1996), adaptado.	32
Figura 4.6: Batimetria utilizada para modelagem hidrodinâmica pelo Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias. Fonte: Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias (2014).	33
Figura 4.7: Modelagem hidrodinâmica para situação de vazante ($8.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) e vento de noroeste (15 m s^{-1}). Fonte: Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias (2014).	33
Figura 4.8: Modelagem hidrodinâmica para situação de enchente ($-2.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) e vento de sudoeste (15 m s^{-1}). Fonte: Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias (2014).	34
Figura 4.9: Profundidades médias no estuário da Lagoa dos Patos. Fonte: Tagliani (1997, apud Kerstner, 2003).	35
Figura 4.10: Distribuição espacial dos sedimentos no estuário da Lagoa dos Patos, elaborado por Calliari (1980). Fonte: Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias (2014).	36
Figura 4.11: Zoneamento hidrodinâmico no canal de acesso à Barra do Rio Grande. Fonte: Antikeira e Calliari (2005).	37
Figura 4.12: Zoneamento hidrodinâmico e identificação das faces sedimentares na região da desembocadura da Lagoa dos Patos. Fonte: Antikeira e Calliari (2005).	37
Figura 4.13: Testemunhos coletados ao longo do Canal Interno do Porto do Rio Grande. Fonte: Relatório de Sondagem Geológica, Geoquímica e Geotécnica (2000).	38
Figura 4.14: Testemunhos coletados ao longo do canal do Porto do Rio Grande e as respectivas localizações. Fonte: Relatório de Sondagem Geológica, Geoquímica e Geotécnica (2000, apud Antikeira e Calliari, 2005).	39

Figura 4.15: Mapa de localização dos testemunhos apresentados no Relatório de Sondagem Geológica, Geoquímica e Geotécnica (2000) e em Antiqueira e Calliari (2005).	41
Figura 4.16: Localização do Canal da Barca e Canal da Boia, que contornam a Coroa do Ladino. Fonte: Calliari (1980), adaptado.	43
Figura 4.17: Bacia do Porto Novo, Canal de Ligação e Canal de Acesso. Fonte: Calliari (1980). ...	45
Figura 4.18: Comparação entre o ciclo do assoreamento na Bacia do Porto Novo e as temperaturas médias mensais. Fonte: Calliari (1980), adaptado.	47
Figura 4.19: Zoneamento do Porto do Rio Grande para cálculo das taxas de assoreamento entre 2009 e 2014, pelo Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias. Fonte: Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias (2014).	49
Figura 4.20: Setor da bacia do Porto Novo de Rio Grande. Fonte: Bastos da Silva (2016).	50
Figura 4.21: Subdivisão em retângulos do Canal de Acesso ao Porto Novo do Rio Grande, devido à geometria curvilínea. Fonte: Bastos da Silva (2016).	50
Figura 4.22: Curvas de sedimentação nos períodos entre dragagens na Bacia do Porto Novo do Rio Grande. Fonte: Bastos da Silva (2016).	52
Figura 4.23: Mapas de erosão e acresção em relação à cota de projeto - Bacia de Evolução do Porto Novo. Tons avermelhados representam áreas de assoreamento e tons azulados representam áreas de erosão de sedimentos. Fonte: Bastos da Silva (2016).	53
Figura 4.24: Mapas de erosão e acresção em relação à cota de projeto – Retângulo 1: Canal de Acesso ao Porto Novo. Tons avermelhados indicam acresção e tons azulados indicam erosão. Fonte: Bastos da Silva (2016).	54
Figura 4.25: Mapas de erosão e acresção em relação à cota de projeto – Retângulo 1: Canal de Acesso ao Porto Novo. Tons avermelhados indicam acresção e tons azulados indicam erosão. Fonte: Bastos da Silva (2016).	55
Figura 4.26: Mapas de erosão e acresção em relação à cota de projeto – Retângulo 3: Canal de Acesso ao Porto Novo. Tons avermelhados indicam acresção e tons azulados indicam erosão. Fonte: Bastos da Silva (2016).	56
Figura 4.27: Mapas de erosão e acresção em relação à cota de projeto – Retângulo 4: Canal de Acesso ao Porto Novo. Tons avermelhados indicam acresção e tons azulados indicam erosão. Fonte: Bastos da Silva (2016).	57
Figura 4.28: Mapas de erosão e acresção em relação à cota de projeto – Retângulo 5: Canal de Acesso ao Porto Novo. Tons avermelhados indicam acresção e tons azulados indicam erosão. Fonte: Bastos da Silva (2016).	58
Figura 5.1: Delimitação dos pontos ao limite do retângulo. Fonte: Bastos da Silva et al. (2018).	60

Figura 5.2: Rotação do conjunto de dados em torno de um ponto conhecido de forma que o eixo principal do retângulo fique alinhado na vertical. Fonte: Bastos da Silva et al. (2018).	60
Figura 5.3: Esquema do processo de transformação de datum para a padronização do sistema de referência. Fonte: Bastos da Silva (2016).	62
Figura 5.4: Subdivisão em retângulos do Trecho 1 – Configuração anterior à dragagem de aprofundamento ocorrida nos anos de 2009 e 2010.....	65
Figura 5.5: Subdivisão em retângulos do Trecho 2 – Configuração anterior à dragagem de aprofundamento ocorrida nos anos de 2009 e 2010. Na planta está ilustrado os segmentos referentes ao prolongamento dos Molhes da Barra do Rio Grande.	66
Figura 5.6: Subdivisão em retângulos do Trecho 3 – Configuração anterior à dragagem de aprofundamento ocorrida nos anos de 2009 e 2010. Na planta está ilustrado os segmentos referentes ao prolongamento dos Molhes da Barra do Rio Grande.	67
Figura 5.7: Subdivisão em retângulos do Trecho 4 – Configuração anterior à dragagem de aprofundamento ocorrida nos anos de 2009 e 2010. Na planta está ilustrado os segmentos referentes ao prolongamento dos Molhes da Barra do Rio Grande.	68
Figura 5.8: Subdivisão em retângulos do Trecho I – Configuração posterior à dragagem de aprofundamento ocorrida nos anos de 2009 e 2010.....	76
Figura 5.9: Subdivisão em retângulos do Trecho II – Configuração posterior à dragagem de aprofundamento ocorrida nos anos de 2009 e 2010.....	76
Figura 5.10: Subdivisão em retângulos do Trecho III – Configuração posterior à dragagem de aprofundamento ocorrida nos anos de 2009 e 2010.....	77
Figura 5.11: Subdivisão em retângulos do Trecho IV – Configuração posterior à dragagem de aprofundamento ocorrida nos anos de 2009 e 2010.....	78
Figura 5.12: Subdivisão em retângulos do Trecho V – Configuração posterior à dragagem de aprofundamento ocorrida nos anos de 2009 e 2010.....	79
Figura 5.13: Representação esquemática do cálculo de volumes assoreado e erodido em relação à cota de projeto.....	87
Figura 5.14: Traçado geométrico do retângulo IV B, onde há o aumento gradual da cota de projeto, de -18,00 a -16,00 m (NR/DHN).	89
Figura 5.15: Equipamento utilizado para coleta de testemunhos (amostrador).	91
Figura 5.16: Mapa de localização dos testemunhos coletados na área de estudo.	93
Figura 5.17: Corte e abertura dos testemunhos em mesa especial e utilizando serra de corte.	94
Figura 5.18: Análise dos testemunhos.....	94
Figura 6.1: Mapa de evolução do fundo do Trecho I do Canal Externo de Acesso ao Porto do Rio	

Grande entre julho de 2010 (término da dragagem de aprofundamento) e fevereiro de 2018.	103
Figura 6.2: Mapa de evolução do fundo do Canal de Acesso ao Porto do Rio Grande entre julho de 2010 (término da dragagem de aprofundamento) e fevereiro de 2011.	105
Figura 6.3: Mapa de evolução do fundo do Canal de Acesso ao Porto do Rio Grande entre fevereiro de 2014 (término da dragagem emergencial) e novembro de 2015. O Trecho I não foi analisado neste mapa.	106
Figura 6.4: Mapa de evolução do fundo do Canal de Acesso ao Porto do Rio Grande entre fevereiro de 2014 (término da dragagem emergencial) e fevereiro de 2018. O Trecho I não foi analisado neste mapa.	107
Figura 6.5: Representação gráfica das camadas do testemunho 06 (Trecho III), com base em análise da textura do sedimento.	110
Figura 6.6: Representação gráfica das camadas do testemunho 05 (Trecho IV), com base em análise da textura do sedimento.	111
Figura 6.7: Representação gráfica das camadas dos testemunhos 04, 10 e 12 (Trecho V), com base em análise da textura do sedimento.	113
Figura C.1: Fotografias dos testemunhos 04, 05 e 10.	178
Figura C.2: Fotografias dos testemunhos 06 e 12.	179

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Configuração geométrica dos trechos antes da dragagem de aprofundamento do Canal Interno e do Canal Externo e do prolongamento dos Molhes da Barra do Rio Grande. Cotas de projeto em relação ao nível de redução (NR) da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN).	22
Tabela 2.2: Configuração geométrica dos trechos após a dragagem de aprofundamento do Canal Interno e do Canal Externo e o prolongamento dos Molhes da Barra do Rio Grande. Cotas de projeto em relação ao nível de redução (NR) da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN).	22
Tabela 4.1: Anos de ocorrência e intensidade dos fenômenos El Niño e La Niña. Fonte: Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE).	28
Tabela 4.2: Coordenadas dos pontos de coleta dos testemunhos apresentados no Relatório de Sondagem Geológica, Geoquímica e Geotécnica (2000) e em Antiqueira e Calliari (2005).	40
Tabela 4.3: Valores médios de assoreamento mensal na Bacia do Porto Novo, conforme dados de 1923 a 1944, estimados por pesquisadores do DNPRC. Fonte: Calliari (1980).....	46
Tabela 4.4: Assoreamento no Porto do Rio Grande entre os anos de 1975 e 1979. Fonte: Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias (2008).	48
Tabela 4.5: Assoreamento no Porto do Rio Grande entre os anos de 2009 e 2014. Fonte: Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias (2014).	49
Tabela 4.6: Taxas de assoreamento médias da Bacia do Porto Novo e do Canal de Acesso ao Porto Novo, conforme Bastos da Silva (2016).	51
Tabela 5.1: Histórico de dragagens entre 1998 e 2014.	63
Tabela 5.2: Coordenadas dos vértices dos retângulos correspondentes a cada trecho do traçado geométrico anterior à dragagem de aprofundamento. O vértice 1 corresponde ao canto inferior direito de todos os retângulos e os demais seguem no sentido horário em relação ao vértice 1.	69
Tabela 5.3: Dimensões dos retângulos correspondentes ao traçado anterior à dragagem de aprofundamento e percentual de cobertura de cada trecho.	71
Tabela 5.4: Levantamentos batimétricos e dragagens realizadas no Trecho 1, em ordem cronológica.	72
Tabela 5.5: Levantamentos batimétricos e dragagens realizadas no Trecho 2, em ordem cronológica.	73
Tabela 5.6: Levantamentos batimétricos e dragagens realizadas no Trecho 3, em ordem cronológica.	74
Tabela 5.7: Levantamentos batimétricos e dragagens realizadas no Trecho 4, em ordem cronológica.	74

Tabela 5.8: Coordenadas dos vértices dos retângulos correspondentes a cada trecho do traçado geométrico posterior à dragagem de aprofundamento. O vértice 1 corresponde ao canto inferior direito de todos os retângulos e os demais seguem no sentido horário em relação ao vértice 1.....	80
Tabela 5.9: Dimensões dos retângulos correspondentes ao traçado pós dragagem de aprofundamento e percentual de cobertura de cada trecho.	82
Tabela 5.10: Levantamentos batimétricos e dragagens realizadas no Trecho I, em ordem cronológica.	83
Tabela 5.11: Levantamentos batimétricos e dragagens realizadas no Trecho II, em ordem cronológica.	83
Tabela 5.12: Levantamentos batimétricos e dragagens realizadas no Trecho III, em ordem cronológica.....	83
Tabela 5.13: Levantamentos batimétricos e dragagens realizadas no Trecho IV, em ordem cronológica.....	84
Tabela 5.14: Levantamentos batimétricos e dragagens realizadas no Trecho V, em ordem cronológica.	84
Tabela 5.15: Coordenadas UTM dos pontos de coleta dos testemunhos.	92
Tabela 6.1: Taxas médias de sedimentação e de erosão de cada retângulo e de cada trecho em relação à cota de projeto.	96
Tabela 6.2: Taxas médias de sedimentação e de erosão de cada retângulo e de cada trecho em relação à cota de projeto. Traçado geométrico atual.	101
Tabela 6.3: Taxas médias de sedimentação e de erosão de cada retângulo e de cada trecho em relação à cota de atingida na dragagem emergencial. Traçado geométrico atual.	102
Tabela 7.1: Taxas médias de sedimentação e taxas médias de erosão, em relação à cota de projeto, de cada trecho do traçado anterior à dragagem de aprofundamento do Porto do Rio Grande.	121
Tabela 7.2: Taxas médias de sedimentação e taxas médias de erosão, em relação à cota de projeto, de cada trecho do traçado posterior à dragagem de aprofundamento do Porto do Rio Grande (atual).	121
Tabela 7.3: Taxas médias de sedimentação e taxas médias de erosão, em relação à cota de -14,50 m (NR/DHN), de cada trecho do traçado posterior à dragagem de aprofundamento do Porto do Rio Grande (atual).	121
Tabela A.1: Taxas de sedimentação e erosão do retângulo 1A (Trecho 1).....	130
Tabela A.2 - Taxas de sedimentação e erosão do retângulo 1B (Trecho 1).	131
Tabela A.3: Taxas de sedimentação e erosão do retângulo 1C (Trecho 1).....	132
Tabela A.4: Taxas de sedimentação e erosão do retângulo 2A (Trecho 2).....	134
Tabela A.5: Taxas de sedimentação e erosão do retângulo 2B (Trecho 2).....	135

Tabela A.6: Taxas de sedimentação e erosão do retângulo 2C (Trecho 2).....	136
Tabela A.7: Taxas de sedimentação e erosão do retângulo 2D (Trecho 2).....	137
Tabela A.8: Taxas de sedimentação e erosão do retângulo 2E (Trecho 2).....	138
Tabela A.9: Taxas de sedimentação e erosão do retângulo 2F (Trecho 2).	139
Tabela A.10: Taxas de sedimentação e erosão do retângulo 3A (Trecho 3).....	141
Tabela A.11: Taxas de sedimentação e erosão do retângulo 3B (Trecho 3).....	142
Tabela A.12: Taxas de sedimentação e erosão do retângulo 3C (Trecho 3).....	143
Tabela A.13: Taxas de sedimentação e erosão do retângulo 3D (Trecho 3).	144
Tabela A.14: Taxas de sedimentação e erosão do retângulo 3E (Trecho 3).....	145
Tabela A.15: Taxas de sedimentação e erosão do retângulo 3F (Trecho 3).	146
Tabela A.16: Taxas de sedimentação e erosão do retângulo 3G (Trecho 3).	147
Tabela A.17: Taxas de sedimentação e erosão do retângulo 3H (Trecho 3).	148
Tabela A.18: Taxas de sedimentação e erosão do retângulo 4A (Trecho 4).....	150
Tabela A.19: Taxas de sedimentação e erosão do retângulo 4B (Trecho 4).....	151
Tabela A.20: Taxas de sedimentação e erosão do retângulo 4C (Trecho 4).....	152
Tabela A.21: Taxas de sedimentação e erosão do retângulo 4D (Trecho 4).	153
Tabela A.22: Taxas de sedimentação e erosão do retângulo 4E (Trecho 4).....	154
Tabela A.23: Taxas de sedimentação e erosão do retângulo 4F (Trecho 4).	155
Tabela A.24: Taxas de sedimentação e erosão do retângulo 4G (Trecho 4).	156
Tabela A.25: Taxas de sedimentação e erosão do retângulo 4H (Trecho 4).	157
Tabela A.26: Taxas de sedimentação e erosão do retângulo 4I (Trecho 4).....	158
Tabela B.1: Taxas de sedimentação e erosão do retângulo do Trecho I.....	161
Tabela B.2: Taxas de sedimentação e erosão do retângulo do IIA (Trecho II).	163
Tabela B.3: Taxas de sedimentação e erosão do retângulo do IIB (Trecho II).	163
Tabela B.4: Taxas de sedimentação e erosão do retângulo do IIC (Trecho II).	164
Tabela B.5: Taxas de sedimentação e erosão do retângulo do IIIA (Trecho III).....	166
Tabela B.6: Taxas de sedimentação e erosão do retângulo do IIIB (Trecho III).....	166
Tabela B.7: Taxas de sedimentação e erosão do retângulo do IIIC (Trecho III).....	167
Tabela B.8: Taxas de sedimentação e erosão do retângulo do IVA (Trecho IV).	169
Tabela B.9: Taxas de sedimentação e erosão do retângulo do IVB (Trecho IV).	169
Tabela B.10: Taxas de sedimentação e erosão do retângulo do IVC (Trecho IV).	170
Tabela B.11: Taxas de sedimentação e erosão do retângulo do IVD (Trecho IV).	170
Tabela B.12: Taxas de sedimentação e erosão do retângulo do IVE (Trecho IV).	171
Tabela B.13: Taxas de sedimentação e erosão do retângulo do IVF (Trecho IV).....	171

Tabela B.14: Taxas de sedimentação e erosão do retângulo do VA (Trecho V).....	173
Tabela B.15: Taxas de sedimentação e erosão do retângulo do VB (Trecho V).	173
Tabela B.16: Taxas de sedimentação e erosão do retângulo do VC (Trecho V).	174
Tabela B.17: Taxas de sedimentação e erosão do retângulo do VD (Trecho V).	174
Tabela B.18: Taxas de sedimentação e erosão do retângulo do VE (Trecho V).	175
Tabela B.19: Taxas de sedimentação e erosão do retângulo do VF (Trecho V).....	175
Tabela B.20: Taxas de sedimentação e erosão do retângulo do VG (Trecho V).	176

1. INTRODUÇÃO

O assoreamento de bacias e canais de navegação é um processo natural e que ocorre na maioria dos portos do mundo. Os ambientes de navegação e acostagem que compõem instalações portuárias necessitam de frequentes dragagens de manutenção a fim de garantir a segurança da navegação, manter o calado homologado pela Autoridade Marítima, assegurar a capacidade operacional e garantir a competitividade dos portos no mercado internacional.

Os altos custos de operações de dragagens são reconhecidos há muito tempo e diversos estudos têm sido desenvolvidos a fim de identificar as principais condicionantes locais dos processos de assoreamento e de determinar as respectivas taxas de sedimentação (Winterwerp, 2005). O conhecimento do comportamento dos processos de deposição de sedimentos fornece subsídio para o planejamento de futuras dragagens, assim como para otimização do *design* portuário existente e dimensionamento de novos complexos.

O Porto de Rio Grande, localizado no sul do Brasil, trata-se de um dos mais importantes portos no cenário nacional, fato evidenciado pela movimentação total de mais de 37,5 mil toneladas em 2017 (Superintendência do Porto do Rio Grande, 2018). Situado na região estuarina da Lagoa dos Patos e com canal de acesso que se estende até a região costeira adjacente, este porto experimenta um processo de assoreamento acentuado. O Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias (2014) estimou em 5.868.450 metros cúbicos o volume de assoreamento anual deste porto. Ainda conforme dados fornecidos pela Superintendência do Porto do Rio Grande (SUPRG), foram removidos mais de 33 milhões de metros cúbicos dos canais de navegação interno e externo, bacias e berços de atracação entre os anos de 1998 e 2012.

O entendimento do complexo processo de sedimentação contribui tanto em termos de engenharia e economia, quanto em termos de ciência, dada a importância ambiental de estuários e a relevância socioeconômica dos portos no cenário internacional. Embora detenham grande importância para o planejamento e otimização de operações de dragagem, ainda são escassos os estudos acerca dos processos de sedimentação no Porto do Rio Grande.

Nesse sentido, o presente trabalho tem por objetivo investigar os padrões de assoreamento neste porto através da análise de levantamentos batimétricos e dados sedimentológicos. Este estudo trata-se de uma continuação do trabalho desenvolvido por Bastos da Silva (2016), no qual foram determinadas as taxas de sedimentação em relação à cota de projeto e definidas as áreas críticas (com elevadas taxas de sedimentação) para a Bacia do Porto Novo e para o Canal de Acesso ao Porto Novo do Rio Grande.

2. ÁREA DE ESTUDO: O PORTO DO RIO GRANDE

O Porto do Rio Grande é o único porto marítimo do Rio Grande do Sul e está localizado no estuário da Lagoa dos Patos.

A Superintendência do Porto do Rio Grande (SUPRG) é a autarquia estadual responsável pela administração do Porto do Rio Grande e ocupa o papel de autoridade portuária executiva. Conforme o Plano de Zoneamento de Áreas do Porto Organizado de Rio Grande (Superintendência do Porto do Rio Grande, 2017), o complexo portuário é dividido em quatro zonas: Porto Velho, Porto Novo, Superporto e São José do Norte. Os ambientes navegáveis deste porto, por sua vez, são divididos em quatro segmentos: Canal Externo, Canal Interno, Canal de Acesso ao Porto Novo e Bacia do Porto Novo, sendo o primeiro situado na região costeira adjacente e o último na porção estuarina.

É importante destacar que o Porto do Rio Grande sofreu alterações no seu traçado entre os anos de 2009 e 2010, em virtude da dragagem de aprofundamento do Canal Interno e do Canal Externo (realizada entre junho de 2009 e julho de 2010) e do prolongamento dos Molhes da Barra do Rio Grande. Sendo assim, dois cenários serão avaliados neste trabalho: um antes e um após as modificações sucedidas nos anos de 2009 e 2010.

A configuração anterior à dragagem de aprofundamento e ao prolongamento dos Molhes da Barra está apresentada no mapa da Figura 2.1. Por sua vez, a configuração atual, após 2010, está apresentada na Figura 2.2. Ressalta-se que a configuração atual faz referência ao traçado geométrico adotado na dragagem iniciada em outubro de 2018, uma vez que a configuração do canal sofreu algumas modificações em relação ao projeto original do aprofundamento.

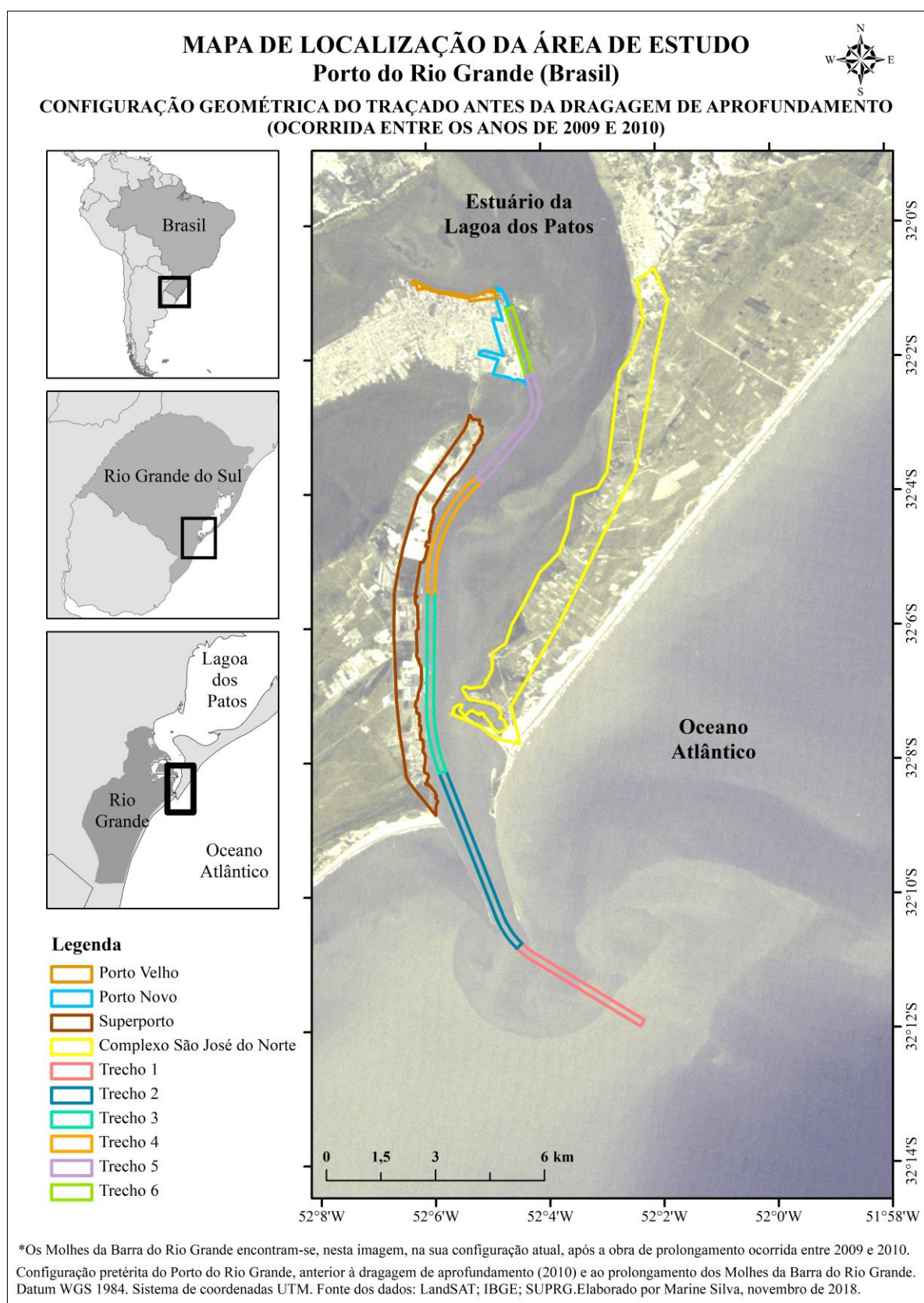


Figura 2.1: Mapa de localização da área de estudo com traçado geométrico do Canal do Porto do Rio Grande anterior à dragagem de aprofundamento. Os Molhes da Barra do Rio Grande estão apresentados conforme a configuração atual.

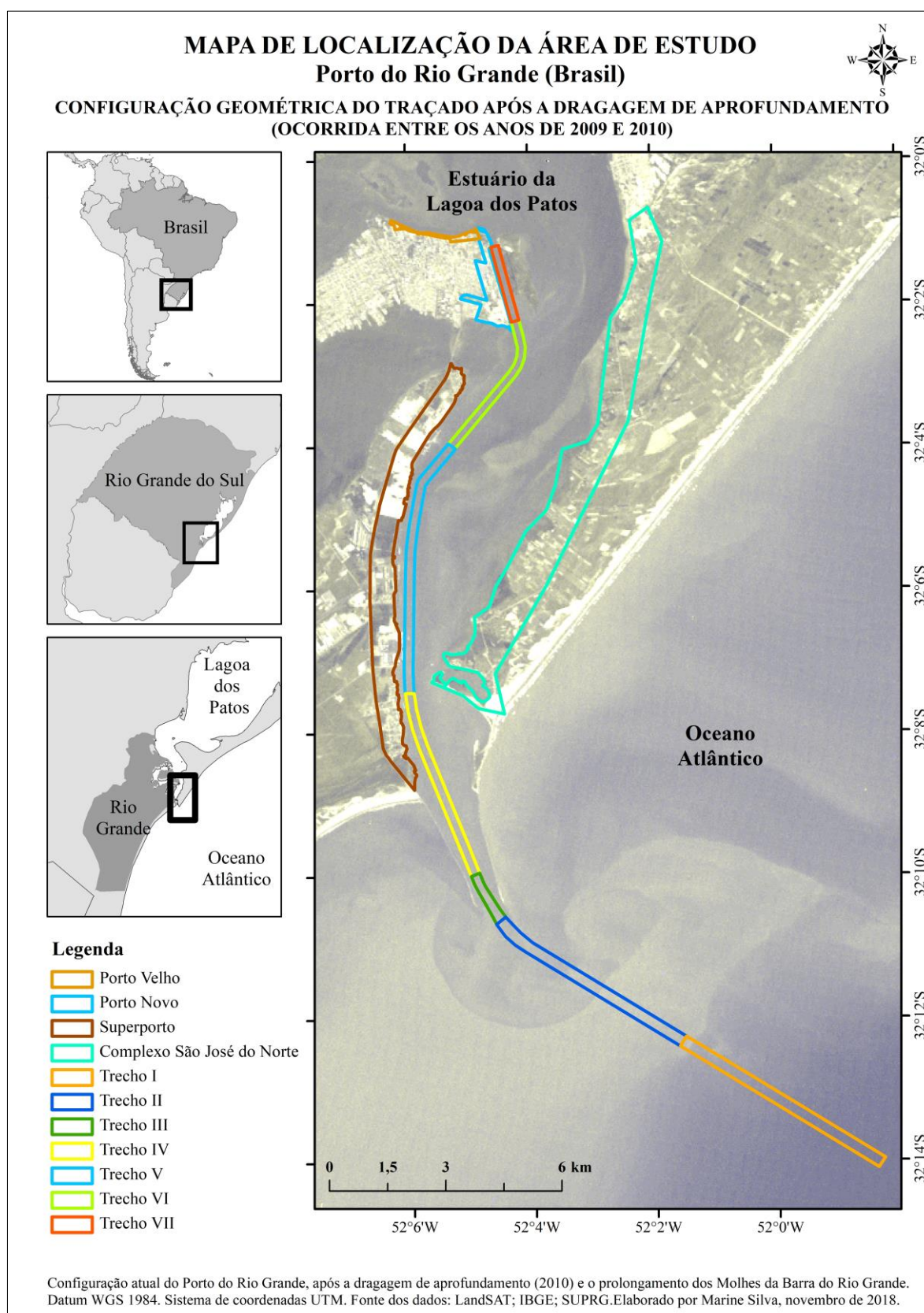


Figura 2.2: Mapa de localização da área de estudo com traçado geométrico do Canal do Porto do Rio Grande posterior à dragagem de aprofundamento (configuração atual).

As informações a respeito do traçado anterior à dragagem de aprofundamento e do traçado posterior ao aprofundamento estão apresentadas na Tabela 2.1 e na Tabela 2.2, respectivamente. Ressalta-se que a Superintendência do Porto do Rio Grande delimita os trechos por seções espaçadas a cada 50 metros, aproximadamente, em ambas configurações geométricas. A disposição das seções e sua nomenclatura também foram alteradas com a modificação do traçado geométrico pela dragagem de aprofundamento.

Tabela 2.1: Configuração geométrica dos trechos antes da dragagem de aprofundamento do Canal Interno e do Canal Externo e do prolongamento dos Molhes da Barra do Rio Grande. Cotas de projeto em relação ao nível de redução (NR) da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN).

Local	Trechos	Delimitação por seções conforme nomenclatura antiga da SUPRG	Largura média (m)	Cota de projeto atual em relação ao NR/DHN (m)
Canal Externo	1	0 a 80	200	-14,00
Canal Interno	2	80 a 185	200	-14,00
	3	185 a 285		
	4	285 a 355		
Canal de Acesso ao Porto Novo	5	355 a 423	200	-10,50
Bacia do Porto Novo	6	00 a 96	200	-10,50

Tabela 2.2: Configuração geométrica dos trechos após a dragagem de aprofundamento do Canal Interno e do Canal Externo e o prolongamento dos Molhes da Barra do Rio Grande. Cotas de projeto em relação ao nível de redução (NR) da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN).

Local	Trechos	Delimitação por seções conforme nomenclatura atual da SUPRG	Largura média (m)	Cota de projeto atual em relação ao NR/DHN (m)
Canal Externo	I	00,00 + 00 a 60,00 + 00	300	-18,00
	II	60,00 + 00 a 117,00 + 00		
	III	117,00 + 00 a 130,00 + 00		
Canal Interno	IV	130,00 + 00 a 132,00 + 00	230	Rampa entre -18,00 e -16,00
		132,00 + 00 a 135,00 + 00		
	V	135,00 + 00 a 180,00 + 00		-16,00
		180,00 + 00 a 247,00 + 20		
Canal de Acesso ao Porto Novo	VI	247,00 + 20 a 285,00 + 50	200	-10,50
Bacia do Porto Novo	VII	00,00 + 00 a 20,00 + 20	210	-10,50

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo Geral

Estimar as taxas de sedimentação e erosão de cada trecho do Canal Externo e do Canal Interno de Acesso ao Porto do Rio Grande em relação à cota de projeto e analisar o comportamento do fundo nesses locais, avaliando, separadamente, os cenários anterior e posterior à dragagem de aprofundamento do canal de acesso ao porto e ao prolongamento dos Molhes da Barra do Rio Grande.

3.2. Objetivos Específicos

- Estimar as taxas de sedimentação e erosão médias para cada trecho do Canal Externo (Trecho 1) e do Canal Interno (Trecho 2, 3 e 4) em relação à cota de projeto, para a configuração anterior à dragagem de aprofundamento desses canais;
- Estimar as taxas de sedimentação e erosão médias para cada trecho do Canal Externo (Trechos I, II e III) e do Canal Interno (Trechos IV, V) em relação à cota de projeto e à cota atingida após dragagem emergencial, para a configuração posterior à dragagem de aprofundamento desses canais;
- Mapear a evolução do fundo para a configuração geométrica atual do Canal Interno e do Canal Externo de Acesso ao Porto do Rio Grande, utilizando dados de 2010 a 2018, em relação à cota de projeto e à cota atingida após dragagem emergencial;
- Determinar zonas críticas (locais de taxas de sedimentação mais elevadas) em relação à cota de projeto para a configuração atual;
- Determinar as características sedimentares superficiais e subsuperficiais dos sedimentos depositados ao longo do canal no sentido de verificar processos de assoreamento.

4. REFERENCIAL TEÓRICO

4.1. Lagoa dos Patos

A Lagoa dos Patos (Figura 4.1), que na verdade é uma laguna por possuir conexão com o mar, é a maior da América do Sul (Alvarez et al., 1981) e a maior do tipo estrangulada do mundo (Kjerfve, 1986). Esse extenso corpo de água se estende na direção NE-SW entre as latitudes $30^{\circ} 30' S$ e $32^{\circ} 12' S$ (Asmus, 1998) e possui um comprimento de 250 km, largura média de 40 km e profundidade média de 5 m, sendo classificada como uma lagoa rasa (Möller et al., 1996).

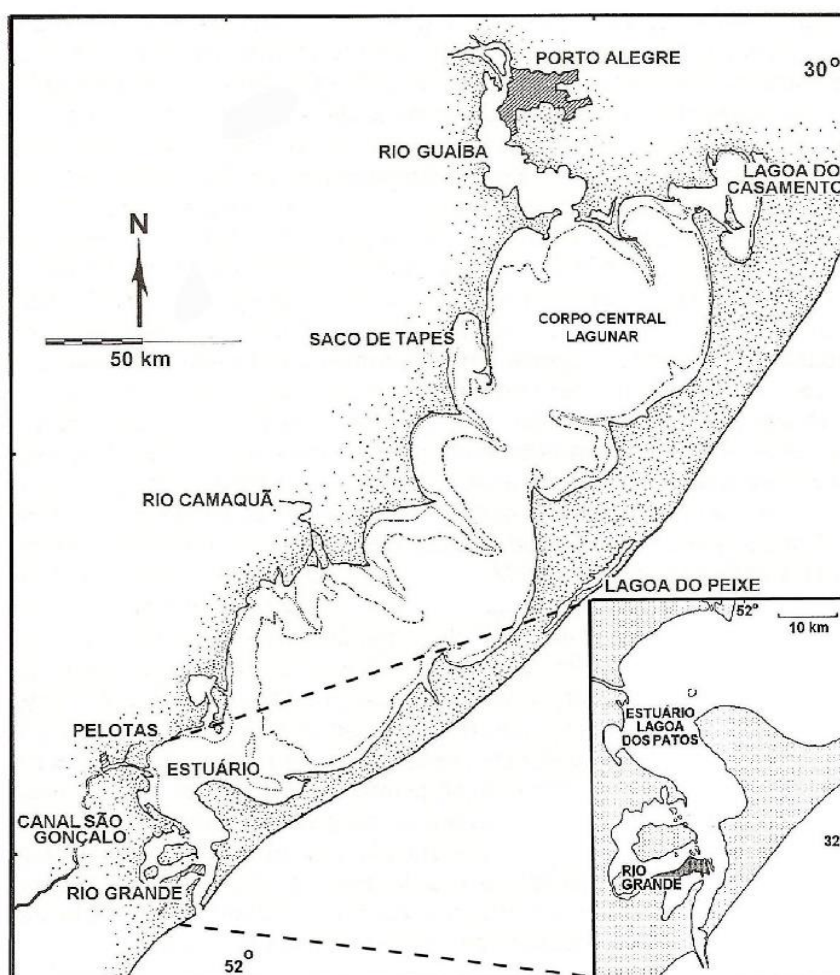


Figura 4.1: Lagoa dos Patos e principais localidades. Fonte: Schwochow e Zanboni (2007).

A Lagoa dos Patos e a Lagoa Mirim compõem a Bacia de Drenagem do Sudeste, que juntamente com a Bacia do Uruguai, constitui o sistema hidrológico do Rio Grande do Sul (Hartmann e Schettini, 1991). O complexo da Lagoa dos Patos é formado pelos rios Jacuí, Taquari, Caí, Sinos,

Gravataí, Camaquã, Vacacaí, Guaíba e arroios tributários, enquanto que o complexo Mirim é constituído pelos rios Jaguarão, Taquari, Cebolati, Piratini, Pelotas e arroios, arroio Sarandi Grande, arroios de Santa Vitória do Palmar e Rio Grande, arroio Grande e outros, além do canal São Gonçalo (Vieira e Rangel, 1988). As Lagoas dos Patos e Mirim conectam-se por meio do Canal São Gonçalo que, segundo Garcia (1998), tem o fluxo de água controlado por uma eclusa, aberta apenas em períodos de grande elevação do nível na Lagoa Mirim. O sistema Patos-Mirim comunica-se com o Oceano Atlântico pela Barra do Rio Grande (Alvarez et al., 1981).

A Lagoa dos Patos pode ser dividida em três partes distintas, conforme Delaney (1965). A parte inferior compreende a região entre a Barra do Rio Grande e a Ponta da Feitoria e corresponde ao estuário desta laguna; a parte média estende-se da Ponta da Feitoria até Itapoã, e; a parte superior subdivide-se em outras duas regiões, uma mais ao norte chamada Lagoa do Casamento e outra formada por uma passagem de Itapoã para o Guaíba.

4.1.1. Estuário da Lagoa dos Patos

O estuário da Lagoa dos Patos (Figura 4.2) localiza-se na parte inferior da laguna e se estende da Barra do Rio Grande até a linha imaginária que liga a Ponta dos Lençóis à Ponta da Feitoria (Calliari, 1980). O limite do estuário pode ser deslocado para norte, em eventos de estiagem ou com atuação do vento sul, e para sul, em ocasiões de grande descarga fluvial ou ventos do quadrante norte (Calliari et al., 2009).

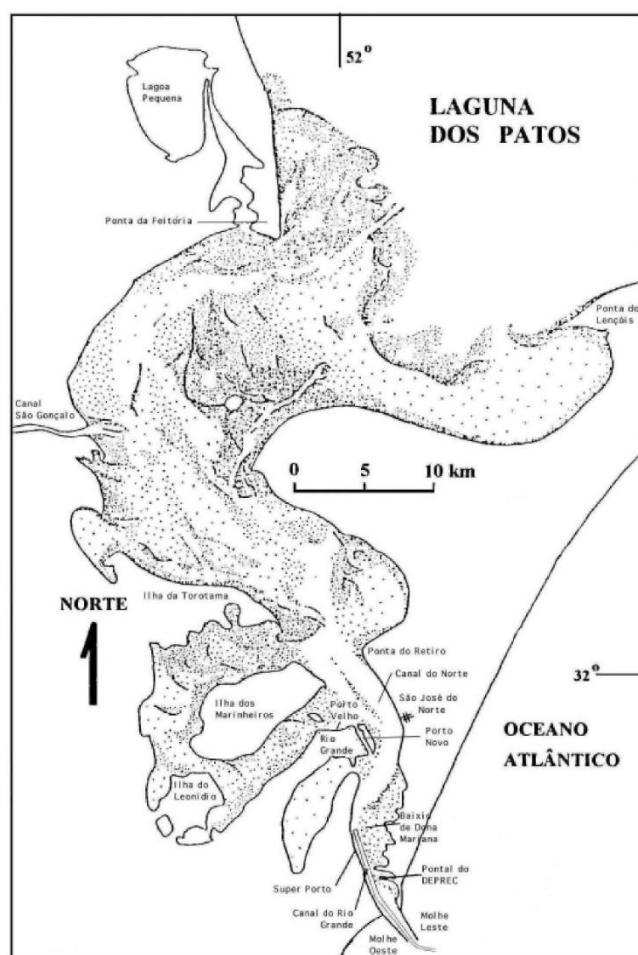


Figura 4.2: Estuário da Lagoa dos Patos. Fonte: Hartmann (1996) apud Torres (2000), adaptado.

Geologia

Conforme Alvarez et al. (1981), a região onde se situa a lagoa é uma planície arenosa baixa que tem como limite leste o Oceano Atlântico e como limite oeste a faixa arqueada de terras altas do escudo cristalino. A planície costeira adjacente à lagoa consiste em depósitos arenosos interrompidos por pequenos cursos d'água (Toldo et al., 2005). Os quatro sistemas deposicionais do tipo laguna-barreira, que confinam quase todo o corpo d'água, desenvolveram-se devido a quatro eventos transgressivos do nível do mar: os sistemas I, II e III desenvolveram-se no Pleistoceno, enquanto que o sistema IV, mais jovem, formou-se no Holoceno (Tomazelli e Villwock, 2000), conforme apresentado na Figura 4.3.

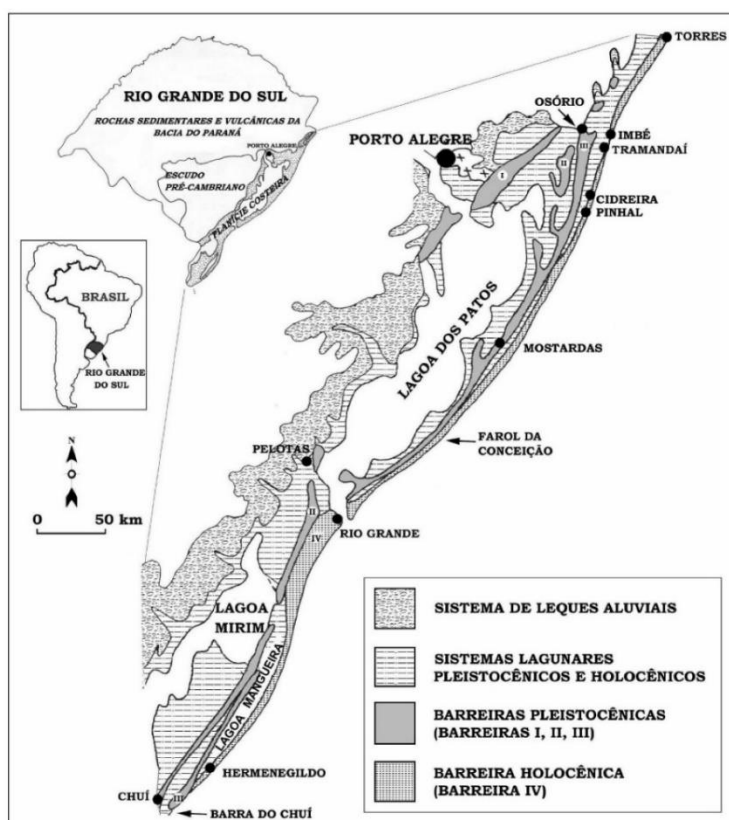


Figura 4.3: Mapa geológico simplificado da Planície Costeira do Rio Grande do Sul. Fonte: Tomazelli e Villwock (2000), modificado de Tomazelli e Villwock (1996).

Clima

O clima da região é do tipo subtropical úmido, controlado, principalmente, pela massa tropical marítima (Alvarez et al., 1981) e a temperatura média anual é de 17,5° C (Delaney, 1965). Segundo o Atlas Eólico do Rio Grande do Sul (2014), o Rio Grande do Sul apresenta as maiores amplitudes térmicas do Brasil.

A migração latitudinal do centro de alta pressão do anticiclone do Atlântico Sul e a passagem de sistemas frontais polares modificam o ciclo sazonal do clima (Hartmann et al., 1986; Stech, 1990 apud Klein, 1998). Devido à influência desse anticiclone, há maior ocorrência de ventos de nordeste (NE) ao longo do ano com velocidade média de 5 m s⁻¹, seguida de ventos de sudoeste (SO) com velocidade média de 8 m s⁻¹, associados com a passagem de frentes frias (Klein, 1998).

Conforme o Atlas Eólico do Rio Grande do Sul (2014), o sul e o oeste do Rio Grande do Sul têm sua época mais seca durante as estações do verão e outono e chuvas mais abundantes durante o inverno, sendo que a região de Rio Grande se situa numa zona com precipitação média anual de

aproximadamente 1300 mm.

Os fenômenos intertropicais El Niño e La Niña se caracterizam pelo aquecimento e esfriamento, respectivamente, das águas superficiais do oceano Pacífico Tropical Central e do Leste (Marengo, 2007). De acordo com Rossato (2011), a fase quente, representada pelo fenômeno El Niño, apresenta, geralmente, intervalos de dois a sete anos, sendo que a evolução típica do fenômeno inicia no começo do ano, atinge máxima intensidade durante os meses de dezembro do mesmo ano e janeiro do ano seguinte, enfraquecendo-se na metade deste segundo ano. Já a fase fria, representada pelo fenômeno La Niña, possui menor frequência (Rossato, 2011). Na região sul do Brasil, eventos de El Niño ocasionam um excesso de chuva e enchentes, enquanto que as ocasiões de La Niña provocam estiagem (Marengo, 2007). Além disso, em anos de El Niño os ventos mais recorrentes são de nordeste, enquanto que em anos de La Niña a predominância é de ventos de sudoeste (Barros et al., 2002; Piola et al., 2005, apud Möller e Fernandes, 2010).

Os anos de ocorrência de El Niño e La Niña com as respectivas intensidades, conforme o Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Anos de ocorrência e intensidade dos fenômenos El Niño e La Niña. Fonte: Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE).

El Niño		La Niña	
Ano	Intensidade	Ano	Intensidade
1895-1896	Fraca	1892-1893	Forte
1896-1897	Forte	1893-1894	Fraca
1899-1900	Forte	1903-1904	Moderada
1902-1903	Forte	1906-1907	Fraca
1904-1905	Moderada	1908-1909	Moderada
1905-1906	Moderada	1909-1910	Forte
1911-1912	Moderada	1910-1911	Fraca
1913-1914	Fraca	1916-1917	Forte
1914-1915	Moderada	1917-1918	Moderada
1918-1919	Forte	1924-1925	Moderada
1919-1920	Moderada	1933-1934	Moderada
1925-1926	Moderada	1937-1938	Fraca
1930-1931	Forte	1938-1939	Fraca

El Niño		La Niña	
Ano	Intensidade	Ano	Intensidade
1939-1940	Moderada	1942-1943	Forte
1940-1941	Forte	1949-1950	Forte
1941-1942	Fraca	1954-1955	Fraca
1951-1952	Moderada	1955-1956	Moderada
1952-1953	Fraca	1967-1968	Fraca
1957-1958	Forte	1970-1971	Fraca
1963-1964	Moderada	1973-1974	Moderada
1965-1966	Forte	1975-1976	Moderada
1968-1969	Fraca	1988-1989	Moderada
1969-1970	Moderada	1998-1999	Fraca
1972-1973	Forte	1999-2000	Moderada
1976-1977	Moderada	2007-2008	Moderada
1979-1980	Moderada	2010-2011	Moderada
1982-1983	Forte	2017-2018	Moderada
1986-1987	Moderada		
1987-1988	Forte		
1991-1992	Forte		
1992-1993	Fraca		
1997-1998	Forte		
2002-2003	Moderada		
2006-2007	Moderada		
2009-2010	Moderada		
2015-2016	Forte		

Hidrodinâmica

O estuário da Lagoa dos Patos está situado em uma zona de maré mista e é caracterizado por um regime de micro maré de 0,47 m (Hartmann et al., 1986).

O estuário trata-se de uma zona lagunar sob os efeitos da penetração de água oceânica (Vieira e Rangel, 1988). Ao penetrar no estuário, a onda de maré fica sujeita à morfologia do fundo, sofrendo desvios de corrente em torno dos baixios (Vieira e Rangel, 1988). Conforme Garcia (1998), o canal

de acesso à Lagoa dos Patos atua como um filtro amortecedor que delimita grande parte dos efeitos da maré e atenua a amplitude da onda de maré em direção ao estuário e à lagoa.

O comportamento hidrodinâmico da Lagoa dos Patos é influenciado, sobretudo, pela ação do vento e pelas descargas fluviais (Hartmann e Schettini, 1991; Lemke, 2015). Segundo Möller et al. (2001), a ação do vento na região produz dois efeitos distintos: local e não local, sendo o primeiro resultante do estresse do vento sobre a lagoa e o último correspondente à elevação ou ao rebaixamento do nível do mar na costa devido ao transporte de Ekman. Desta forma, agindo ventos de nordeste (NE), há um rebaixamento do nível d'água na parte norte da Lagoa e uma elevação na parte sul, e, na costa, há o rebaixamento do nível devido ao transporte de Ekman, facilitando a saída de água para o oceano (Machado, 2013). Com a ocorrência de ventos de sudoeste (SO), o nível de água da lagoa sofre um rebaixamento na parte sul e uma elevação na parte norte, o que, aliado com o efeito não local do vento devido ao transporte de Ekman (que provoca a elevação do nível na costa), favorece a entrada de água marinha no estuário, em condições de descarga fluvial fraca ou moderada (Machado, 2013).

De acordo com Möller et al. (2001, apud Calliari et al., 2009), a Lagoa dos Patos pode ser dividida em três áreas: (1) a zona de entrada, da boca até São José do Norte, onde a circulação é predominantemente governada pelo efeito não local do vento; (2) região central, entre São José do Norte e a Feitoria, onde o vento domina o comportamento da circulação, mas ainda há influência da ação não local; (3) lagoa central e norte, onde a hidrodinâmica é regida exclusivamente pelas oscilações de nível provocadas pela ação local do vento. A Figura 4.4 apresenta a representação esquemática desses efeitos, estando a laguna sob a ação de ventos de nordeste (NE) e sudoeste (SO).

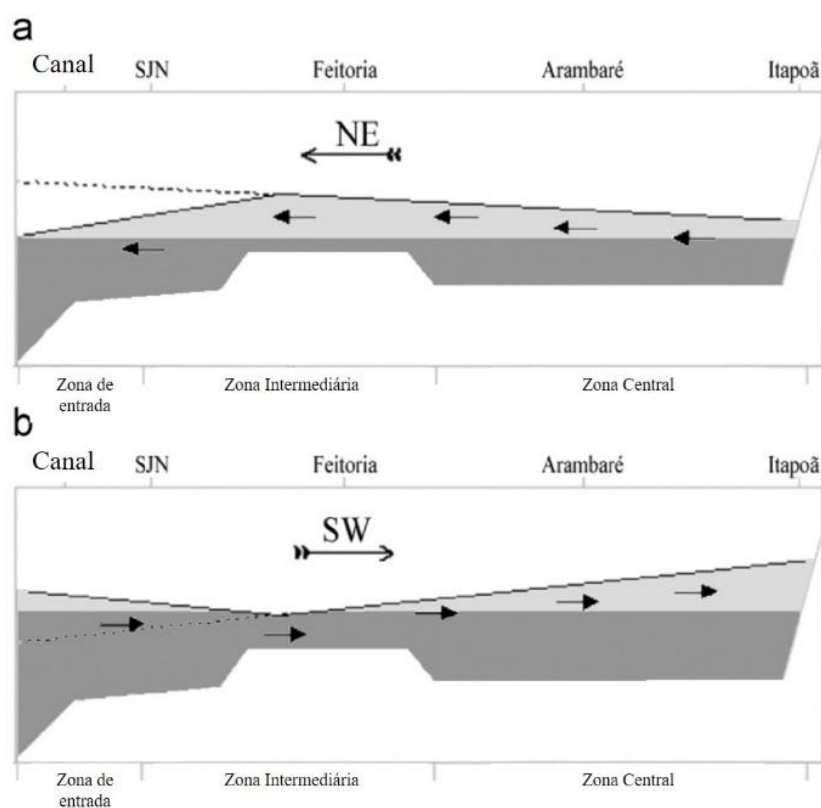


Figura 4.4: Representação esquemática das oscilações do nível induzidas pelo vento NE (a) e vento SO (b). Fonte: Möller et al. (2001, apud Calliari et al., 2009), adaptado.

Conforme Fernandes et al. (2002), o efeito local do vento é responsável pela maioria das variações do nível nas partes central e norte da lagoa, entretanto, é o efeito não local do vento que, gerando efeitos de grande escala de *set up* e *set down* no oceano, governa as trocas de água entre a área estuarina e a plataforma continental adjacente.

Além do vento, a descarga fluvial também exerce papel importante durante períodos de alta descarga, maiores que $4.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Calliari et al., 2009). Segundo Möller e Fernandes (2010), descargas superiores a $3.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ bloqueiam a propagação da água marinha para o interior do estuário.

No que diz respeito às contribuições fluviais, o Guaíba é o principal contribuinte no norte da Lagoa dos Patos, sendo responsável por 85% da média total de água continental descarregada na laguna, com média anual de $2.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Calliari et al., 2009). Já na porção média da laguna, o Rio Camaquã apresenta vazões entre $6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e $5.300 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ no verão e inverno, respectivamente (Hertz, 1977, apud Hartmann e Schettini, 1991). O Canal São Gonçalo, que conecta a laguna dos Patos e a Lagoa Mirim, destaca-se como contribuinte na parte sul da Lagoa dos Patos (norte do estuário), sendo a descarga média de $700 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Möller e Castaing, 1999, apud Calliari et al., 2009).

Eventos de El Niño e de La Niña, por sua vez, refletem em grandes variações interanuais da descarga de água doce continental (Ciotti et al., 1955, apud Klein, 1998). Em eventos de El Niño, registram-se altas descargas dos rios, comportamento que tende a se repetir no ano seguinte (Fernandes et al., 2002; Möller et al., 2009, apud Möller e Fernandes, 2010). Durante o período de alta descarga, a zona de mistura do estuário é transferida para a zona costeira, uma vez que a laguna é capaz de permanecer com fluxo de vazante durante meses. O fenômeno La Niña, por sua vez, acarreta em períodos de baixas descargas fluviais (Garcia et al., 2001; Vaz et al., 2006; Möller et al., 2009, apud Möller e Fernandes, 2010).

Quanto ao comportamento da circulação hidrodinâmica, Hartmann (1996) destaca que, para o Hemisfério Sul, o fluxo de vazante predomina pela margem direita do canal (margem oeste do Canal de Rio Grande) e o fluxo de enchente predomina na margem esquerda do canal (margem leste), conforme demonstrado na Figura 4.5.



Figura 4.5: Comportamento do fluxo de enchente e de vazante no Canal do Rio Grande (Hemisfério Sul). Fonte: Hartmann (1996), adaptado.

O Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias (2014), por sua vez, estabeleceu dois cenários para modelagem e análise do comportamento hidrodinâmico da região. A batimetria empregada na modelagem está apresentada na Figura 4.6. O cenário 1 representa a situação de vazante, com vazão de $8.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e vento de noroeste com 15 m s^{-1} (Figura 4.7). Já para o cenário 2, foi considerada a situação de enchente do estuário, com descarga de $-2.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e vento de sudoeste com intensidade de 15 m s^{-1} (Figura 4.8).

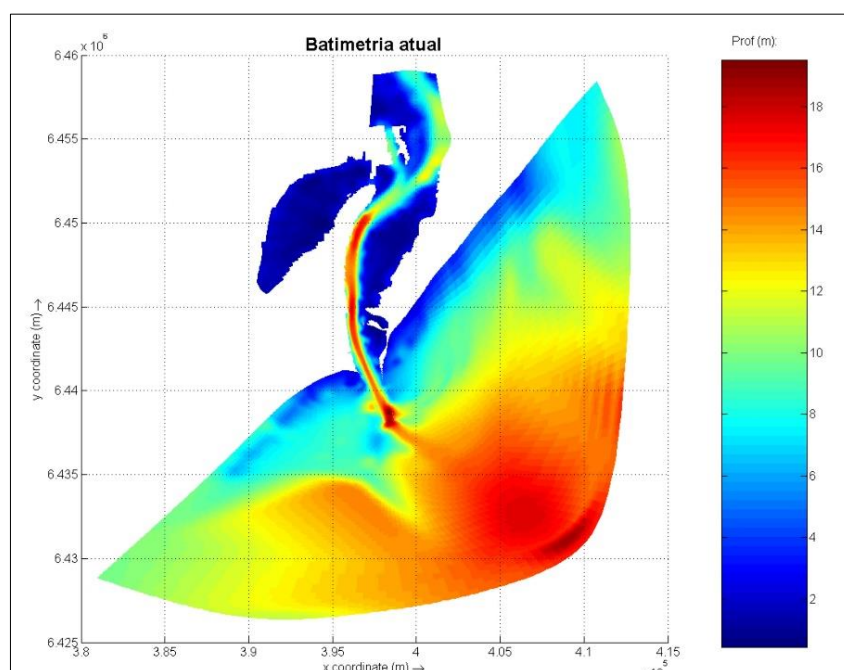


Figura 4.6: Batimetria utilizada para modelagem hidrodinâmica pelo Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias. Fonte: Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias (2014).

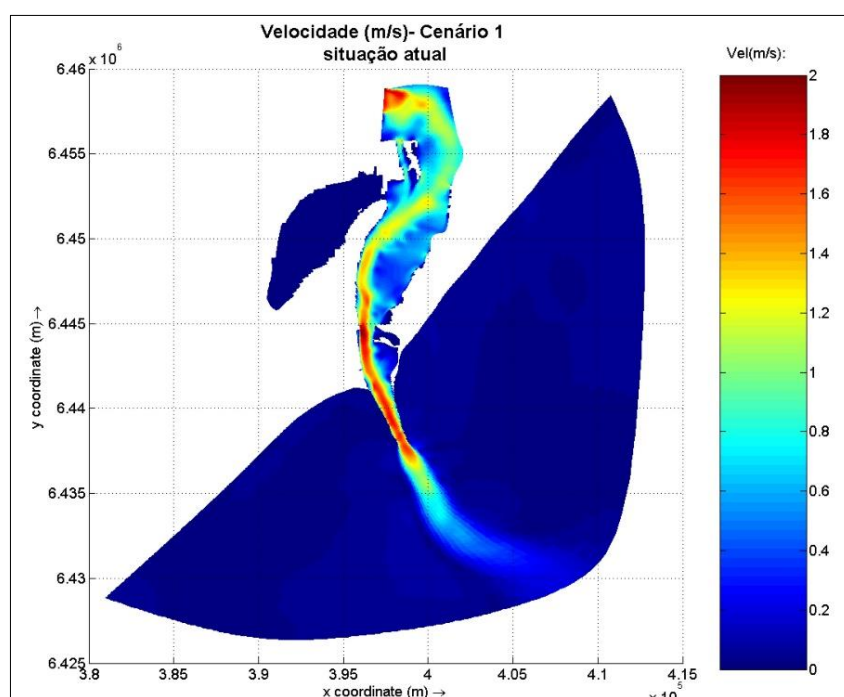


Figura 4.7: Modelagem hidrodinâmica para situação de vazante ($8.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) e vento de noroeste (15 m s^{-1}). Fonte: Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias (2014).

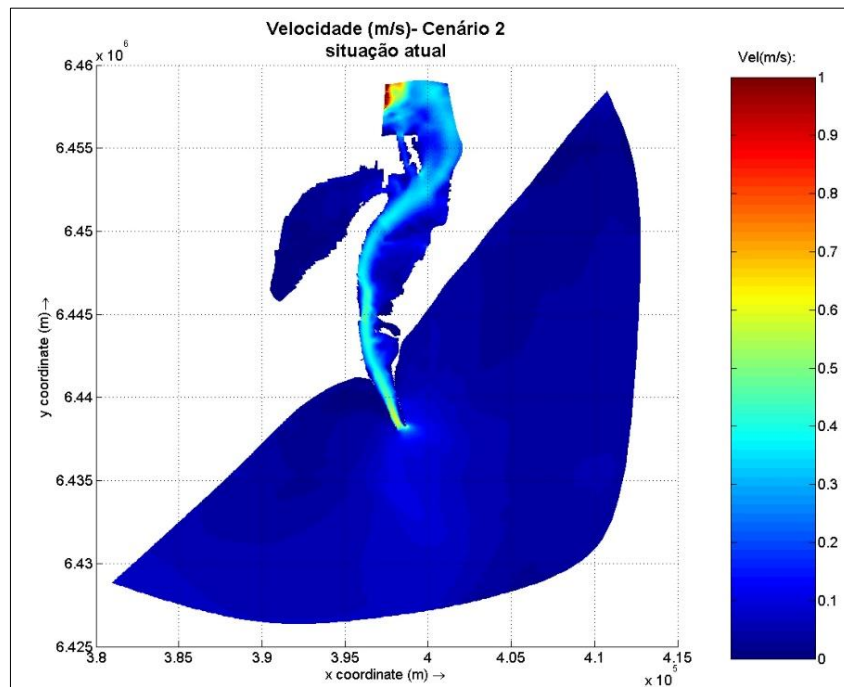


Figura 4.8: Modelagem hidrodinâmica para situação de enchente ($-2.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) e vento de sudoeste (15 m s^{-1}). Fonte: Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias (2014).

Tipos de estuário e salinidade

A maré salina se propaga por toda área do estuário e provoca uma acentuada estratificação das águas estuarinas, por diferenças térmicas e de densidade (Vieira e Rangel, 1988). As águas superficiais tendem a ser menos salgadas do que as águas profundas e, além disso, diferentes percentuais de salinidade são atingidos ao longo do estuário, devido à morfologia do ambiente (Vieira e Rangel, 1988).

No estuário da Lagoa dos Patos, os níveis de salinidade são controlados pelo regime hidrodinâmico e, conforme Hartmann e Schettini (1991), podem ser identificados quatro tipos de estuários:

<i>Primavera</i>	Sem estuário
	Estuário de cunha salina
	Estuário parcialmente estratificado
<i>Verão</i>	Estuário verticalmente misturado
<i>Outono</i>	Estuário verticalmente misturado
	Estuário parcialmente estratificado

Inverno Estuário altamente estratificado
Sem estuário

A descaracterização do ambiente estuarino, denominado “sem estuário”, ocorre devido à ação de ventos NE associados ao alto fluxo de água doce.

Batimetria

As maiores profundidades do estuário estão confinadas aos canais de navegação tanto naturais quanto artificiais (Kerstner, 2003), atingindo profundidade máxima de 18 metros no Canal do Norte, que comunica a Lagoa dos Patos com o Oceano Atlântico (Calliari, 1980). As profundidades médias do estuário da Lagoa dos Patos podem ser observadas no mapa da Figura 4.9.

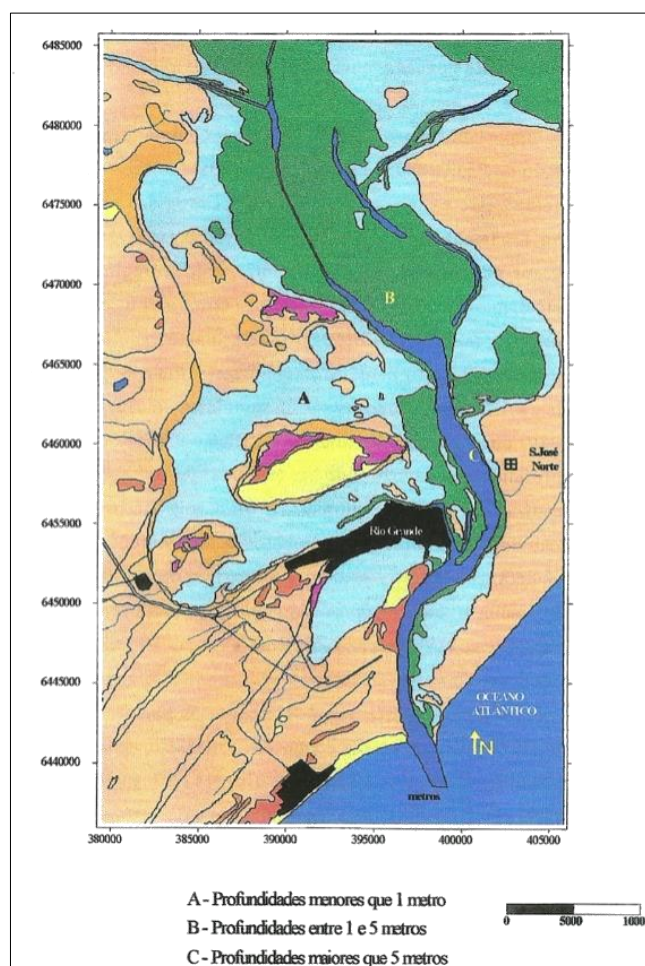


Figura 4.9: Profundidades médias no estuário da Lagoa dos Patos. Fonte: Tagliani (1997, apud Kerstner, 2003).

Sedimentologia

Os sedimentos de fundo da região estuarina podem ser classificados em seis grupos, conforme a análise textural: arenosa, areno-siltico, areno-argilosa, mista, siltico-argilosa e argilo-siltica (Calliari, 1980). Segundo Calliari (1980), a classe arenosa ocupa regiões mais rasas e de maior dinâmica, enquanto que a classe argilo-siltica está delimitada em zonas mais profundas e protegidas, ocorrendo, portanto, um aumento gradual da fração grossa de sedimentos com a redução da profundidade (Figura 4.10).

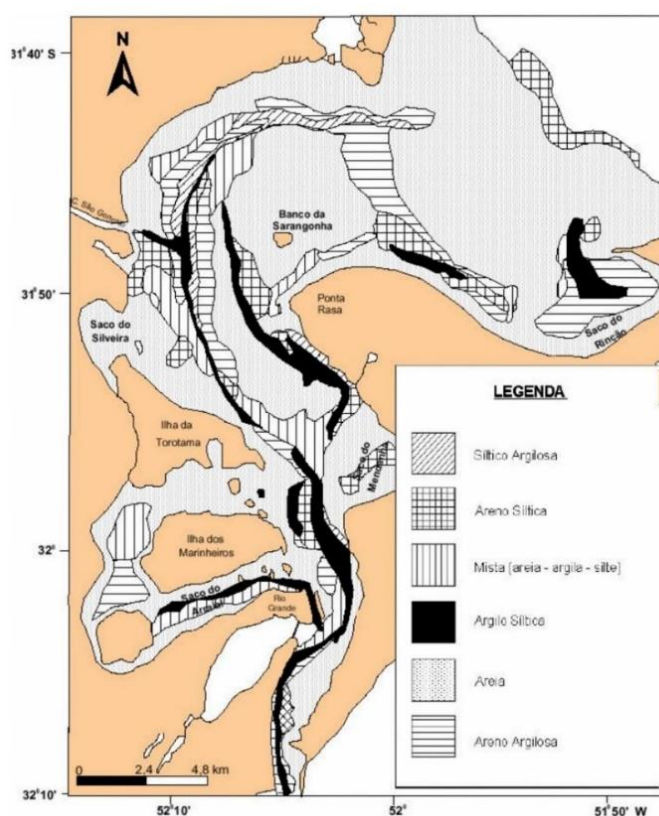


Figura 4.10: Distribuição espacial dos sedimentos no estuário da Lagoa dos Patos, elaborado por Calliari (1980). Fonte: Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias (2014).

A partir de 179 amostras, Antikeira e Calliari (2005) caracterizaram o fundo na desembocadura da Lagoa dos Patos e seu zoneamento hidrodinâmico. Os autores observaram os seguintes aspectos: aumento de energia da parte mais externa do canal em direção a parte mais interna, regiões marginais caracterizadas por níveis de energia mais elevados e região mais protegida atrás do pontal com moderado nível de energia, conforme demonstrado na Figura 4.11. As fácies sedimentares identificadas por Antikeira e Calliari (2005) na região estão apresentadas na Figura 4.12.

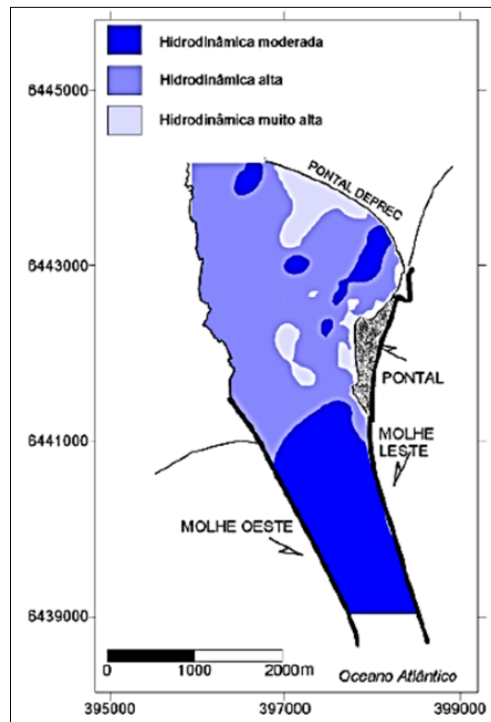


Figura 4.11: Zoneamento hidrodinâmico no canal de acesso à Barra do Rio Grande. Fonte: Antiqueira e Calliari (2005).

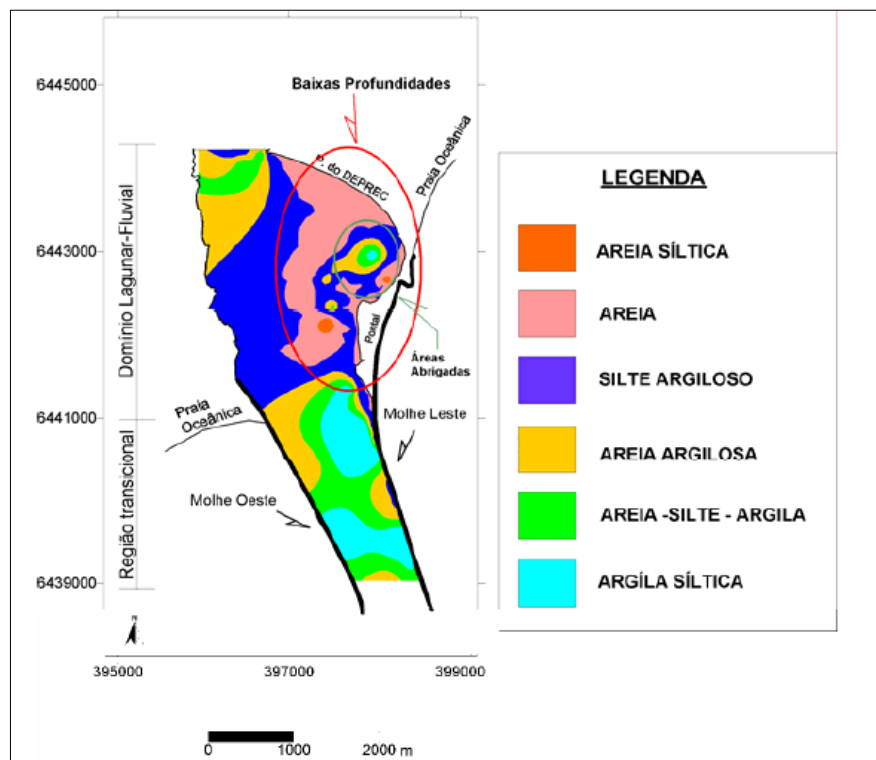


Figura 4.12: Zoneamento hidrodinâmico e identificação das faces sedimentares na região da desembocadura da Lagoa dos Patos. Fonte: Antiqueira e Calliari (2005).

O Relatório de Sondagem Geológica, Geoquímica e Geotécnica (2000) apresenta a análise de testemunhos coletados ao longo do Canal de Acesso ao Porto do Rio Grande. Na Figura 4.13 são apresentados os testemunhos coletados ao longo do Canal Interno, situado na margem do Superporto. Antikeira e Calliari (2005) destacam os resultados obtidos no Relatório de Sondagem Geológica, Geoquímica e Geotécnica (2000) e apresentam testemunhos coletados entre a base dos molhes e a região externa, conforme exposto na Figura 4.14. Podem ser observadas intercalações de diferentes fácies sedimentares, em virtude do regime hidrodinâmico da região (regimes de vazante e enchente).

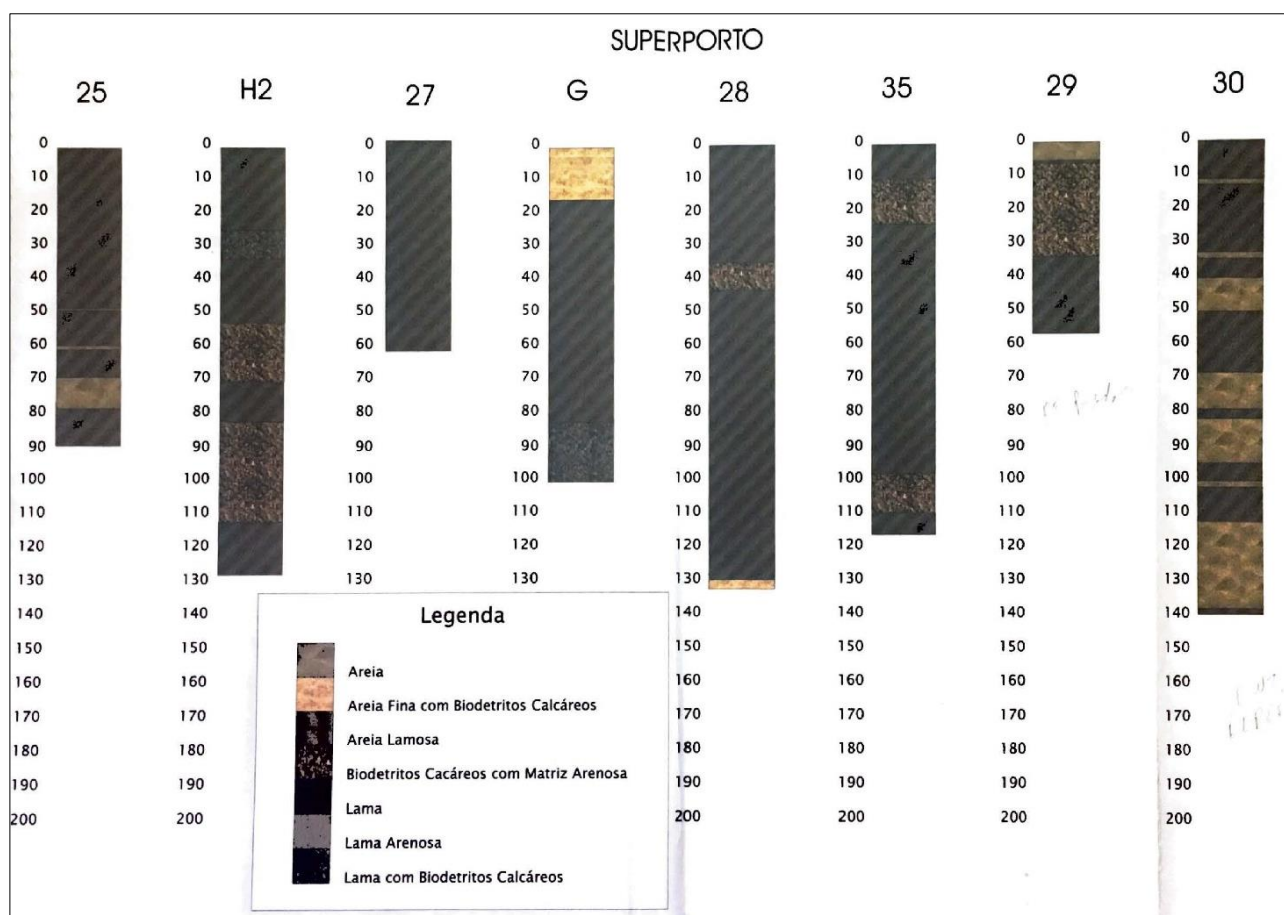


Figura 4.13: Testemunhos coletados ao longo do Canal Interno do Porto do Rio Grande. Fonte: Relatório de Sondagem Geológica, Geoquímica e Geotécnica (2000).

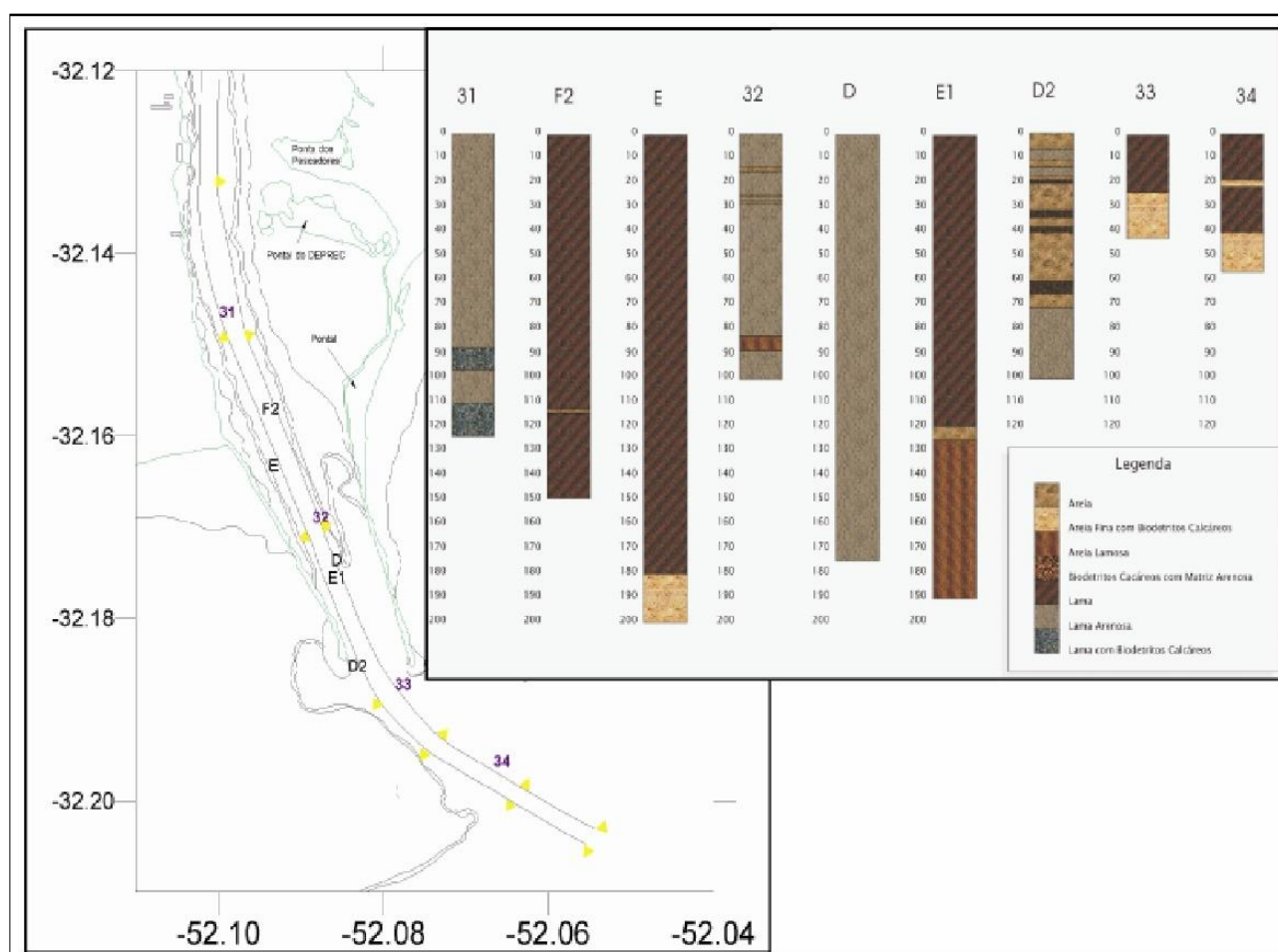


Figura 4.14: Testemunhos coletados ao longo do canal do Porto do Rio Grande e as respectivas localizações. Fonte: Relatório de Sondagem Geológica, Geoquímica e Geotécnica (2000, apud Antqueira e Calliari, 2005).

A localização dos testemunhos apresentados acima pode ser conferida na Tabela 4.2 e no mapa da Figura 4.15.

Tabela 4.2: Coordenadas dos pontos de coleta dos testemunhos apresentados no Relatório de Sondagem Geológica, Geoquímica e Geotécnica (2000) e em Antiqueira e Calliari (2005).

Identificação	Coordenadas UTM (m)	
	X	Y
31	396376,98	6442608,50
F2	396894,02	6441848,80
E	396910,66	6441139,43
32	397458,46	6440125,02
D	397638,95	6439993,80
E1	397650,61	6439772,19
D2	397991,31	6438711,31
33	398261,40	6438104,26
34	399562,10	6437185,97
25	396365,42	6447442,11
H2	396045,97	6447305,81
27	396201,24	6446886,11
G	396090,29	6446663,24
28	396124,03	6446131,44
35	396205,16	6445577,94
29	396192,52	6444968,05
30	396315,00	6444060,21

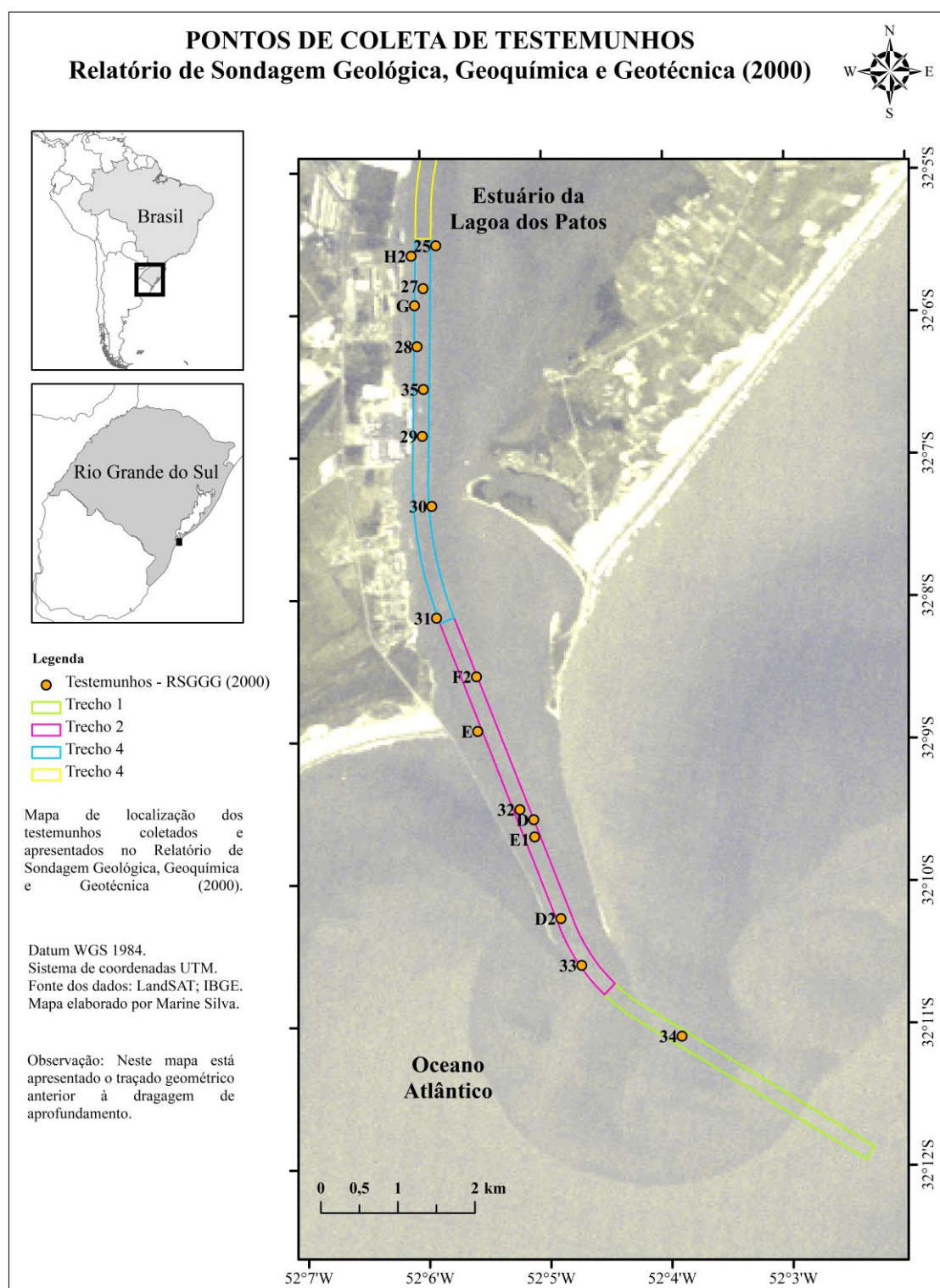


Figura 4.15: Mapa de localização dos testemunhos apresentados no Relatório de Sondagem Geológica, Geoquímica e Geotécnica (2000) e em Antiqueira e Calliari (2005).

Quanto à origem dos sedimentos, Calliari (1998) destaca que estes são de fonte fluvial ou de processos erosivos atuando sobre as formações eólicas Holocênicas e Pleistocênicas nas margens, nos

terraços lagunares e nos pântanos. Torres (2000, apud Marroig, 2015) observa que a principal contribuição de sedimentos para a laguna se dá por material sólido em suspensão, sendo 82% do volume total (da ordem de 5,3 milhões de toneladas por ano) originados do complexo Guaíba.

Com relação ao tamanho de grão, Hartmann (1996) ainda destaca que predomina material fino (silte e argila) na margem oeste, associado ao fluxo de água doce. Na margem leste, predomina o maior tamanho de grão (areia muito fina), devido à ressuspensão do fundo raso, ao transporte pelo fluxo de enchente ao longo da margem e ao material trazido pelo vento das dunas próximas da região emersa.

4.2. Breve histórico do Porto do Rio Grande e dos estudos sobre sedimentação

O Canal do Norte, assim intitulado o canal de acesso ao Porto do Rio Grande na sua parte interna, é o emissário que descarrega no mar as águas provenientes do complexo Patos-Mirim (Calliari, 1980).

Originalmente, conforme o Atlas da Comissão de Melhoramentos da Barra do Rio Grande de 1883 analisado por Calliari (1980), o Canal do Norte situava-se junto à margem oeste e a margem leste apresentava comportamento deposicional, o que era observado pela presença de baixios arenosos que atingiam até 1.000 metros de largura. As maiores profundidades dessa região estavam situadas próximo à Vila do Norte e a sudoeste do Pontal da Mangueira.

Análises em registros cartográficos de 1881 feitas por Calliari (1980) mostram que as profundidades mais expressivas estavam situadas no eixo do canal e atingiam 20 metros em frente ao Cocuruto. A noroeste do Cocuruto, o canal do Norte sofria um estrangulamento pelo baixio do Ladino, situado onde hoje está localizada a Bacia do Porto Novo. Circundando este baixio situava-se o chamado Canal da Boia e sua continuação, à noroeste do seu eixo, definia o Canal da Barca, limitado pelos depósitos arenosos das ilhas da Pólvora, Cavalos e Pombas e pela península do Rio Grande (Figura 4.16). Inicialmente, a ligação entre o Canal do Norte e a cidade do Rio Grande era realizada através do canal da Barca.

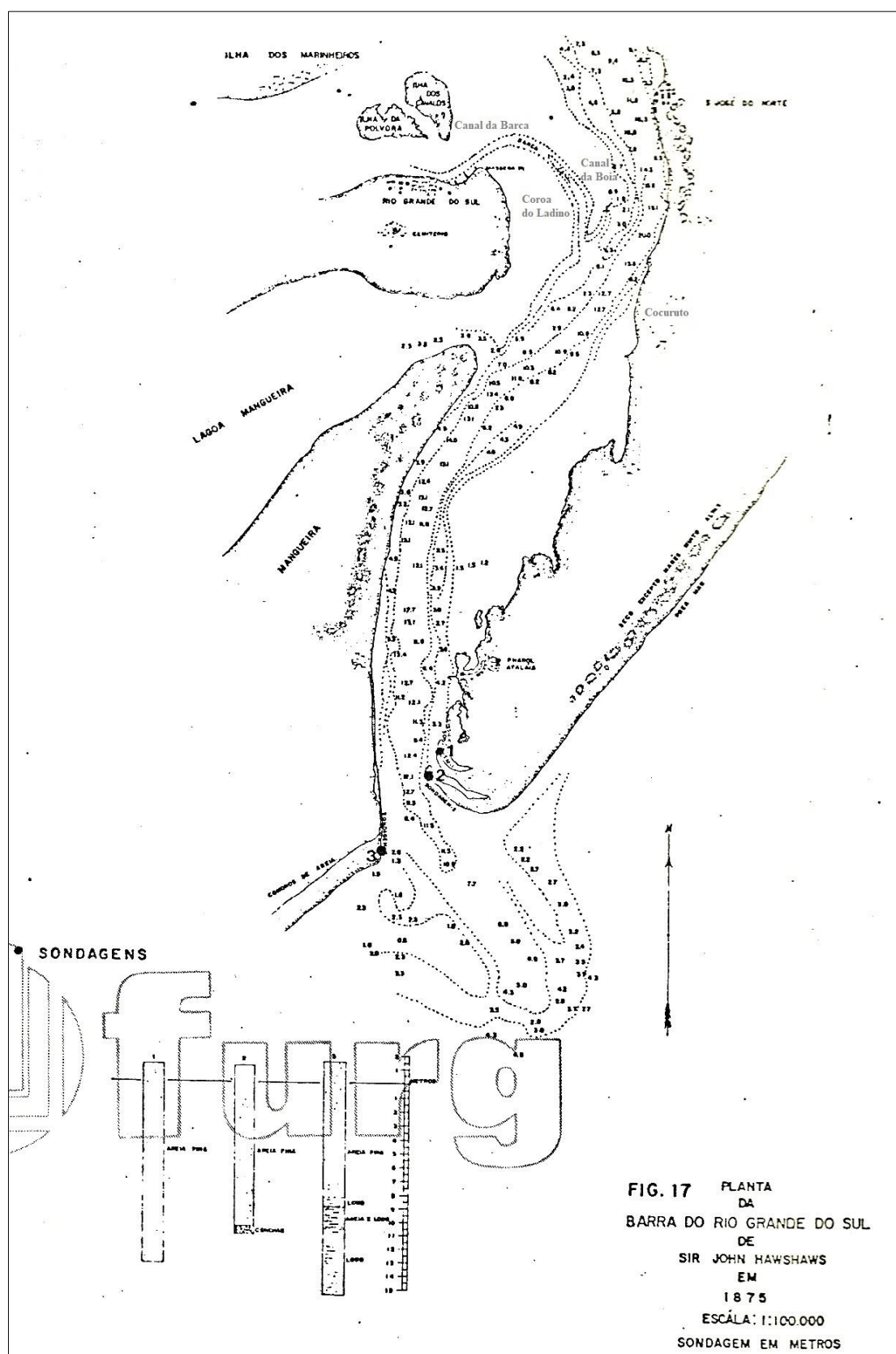


Figura 4.16: Localização do Canal da Barca e Canal da Boia, que contornam a Coroa do Ladino.
Fonte: Calliari (1980), adaptado.

A Barra do Rio Grande, que também pode ser observada na Figura 4.16, era formada por um banco com convexidade voltada para o mar, sobre o qual abriam-se passagens variáveis pela ação das ondas ou das águas provenientes do canal (Calliari, 1980). Conforme Fonseca Rodrigues (1909, apud Calliari, 1980), a parte marinha do Canal do Norte rotacionava de forma lenta e gradual, começando na direção sudeste terminando quase em rumo nordeste, junto à costa. Essa rotação, segundo o autor, era devida ao predomínio marinho das ondulações e vagas sobre o fluxo de escoamento da laguna e vice-versa. A direção em que o canal sobre a barra se conservava por mais tempo com maior profundidade era a de rumo Sul-Sudoeste, justificada pela sua associação com os máximos escoamentos combinados com a ação do vento nordeste. As ondas providas de sul e vagas não apresentavam grande efeito nessas condições, considerando que agiam sobre grandes profundidades e, desta maneira, a potência hidráulica do canal nesta direção capaz de mantê-lo (Calliari, 1980).

A Bacia do Porto Novo, por sua vez, foi estabelecida sobre a Coroa do Ladino (identificada na Figura 4.16) e surgiu da intenção de fixar esta bacia nas vizinhanças da cidade do Rio Grande. Calliari (1980) relata que os engenheiros do Governo da União, à época, salientaram a inconveniência da fixação do Porto Novo nesta região, onde estaria sujeito a altas taxas de assoreamento. Mesmo assim, esta bacia foi aberta sobre a Coroa do Ladino, com área de 500.000 m² e sujeita a assoreamento da ordem de 30.000 metros cúbicos mensais (Calliari, 1980). A dragagem de abertura da Bacia do Porto Novo teve início em 1909, foi interrompida em 1914 e retomada em 1916 (Calliari, 1980).

Ainda conforme Calliari (1980), antes da construção do Porto Novo, as águas chegavam à Bacia do Porto Velho através do Canal da Barca e do Canal da Boia, que contornavam a Coroa do Ladino. As profundidades do Porto Velho e do Canal da Barca eram reduzidas. Em julho de 1916, foi estabelecida a conexão entre o Porto Velho e Porto Novo quase que totalmente por dragagem, formando o chamado Canal de Ligação (Figura 4.17). Com a abertura do Canal de Ligação, os escoamentos ao Canal do Norte fizeram-se pelo canal artificial, praticamente abandonando o Canal da Barca e da Boia. O aumento da descarga, facilitado pelo aprofundamento do Canal de Ligação, promoveu o aprofundamento do Porto Velho, a partir de 1919. O Porto Velho passou a não apresentar, portanto, sérios problemas de assoreamento.

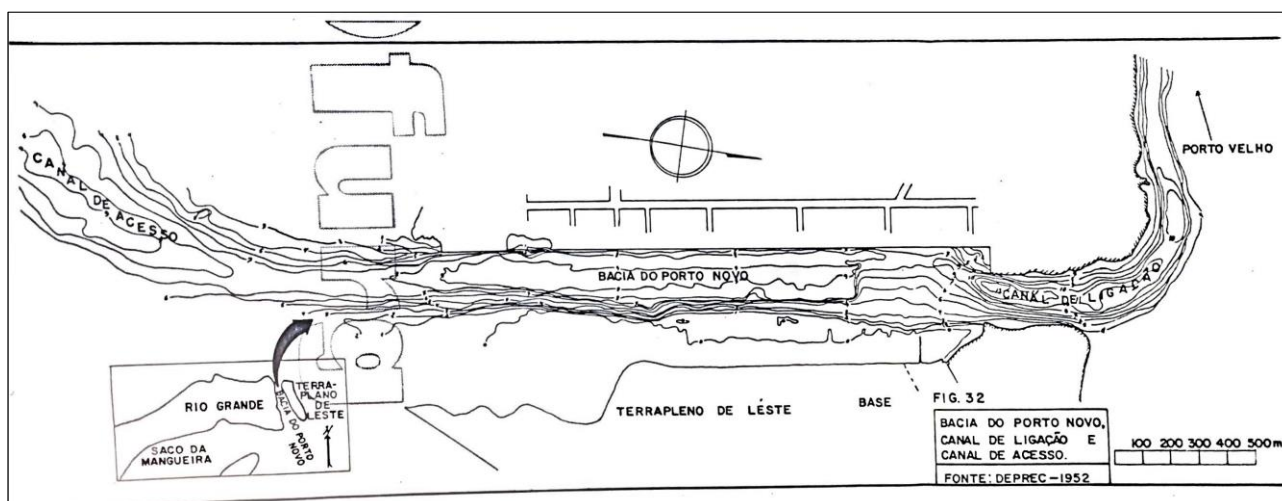


Figura 4.17: Bacia do Porto Novo, Canal de Ligação e Canal de Acesso. Fonte: Calliari (1980).

A questão da proveniência dos sedimentos que constantemente produziam o assoreamento na Bacia do Porto Novo é extremamente difícil, tendo em vista a complexidade de comportamento hidráulico da região (fluxo bidirecional entre a laguna e o mar) (Calliari, 1980). O material dragado na construção da Bacia do Porto Novo, utilizado como aterro para construção dos terraços leste e oeste, era areia quase pura até fins de 1912, quando começou a surgir lama que parecia provir de depósitos novos (Calliari, 1980). Segundo Calliari (1980), a análise de relatórios do Departamento Estadual de Portos, Rios e Canais (DEPREC) mostra que antes da abertura do Canal de Ligação já se verificava o assoreamento na Bacia do Porto Novo, significando que o assoreamento se dava pelo Canal de Acesso. Após a abertura do Canal de Ligação entre o Porto Novo e Porto Velho, a taxa de assoreamento aumentou.

Segundo Duprat (1944, apud Calliari, 1980), apenas a areia fina depositada na parte norte da Bacia do Porto Novo é que seria proveniente do norte, através do Canal de Ligação, podendo ser originada da erosão do Canal de Ligação ou do fundo da Bacia do Porto Velho. O material fino seria originado da precipitação de colóides em suspensão na água doce em contato com a água mixohalina.

Já conforme Pradel (1944, apud Calliari, 1980), a água proveniente dos baixios a oeste do Canal do Norte teria uma alta capacidade de ressuspender e transportar sedimentos e, nas proximidades do Canal de Ligação, teriam sua velocidade aumentada devido à menor declividade e largura deste canal. Na Bacia do Porto Novo, as velocidades das correntes seriam drasticamente reduzidas em virtude da sua maior largura, ocasionando a deposição de parte da carga sedimentar. Esse fenômeno também aconteceria no Canal de Acesso com águas em situação de enchente.

Segundo Villwock et al. (1972, apud Calliari, 1980), o material em suspensão, após sofrer

floculação devido ao aumento da salinidade, concentrava-se junto ao fundo e constituía uma camada de lama bastante fluída que era transportada para montante durante a enchente e para jusante durante a vazante. No que diz respeito à salinidade, Vassão (1951, apud Calliari, 1980) ainda detectou que a simples presença da água do mar era suficiente para sedimentar as suspensões em condições de repouso das águas. Já pesquisadores do Departamento Nacional de Portos, Rios e Canais (DNPRC), por sua vez, verificaram que a temperatura era um fator que influenciava significativamente a floculação e determinaram os valores médios de assoreamento mensal entre os anos de 1923 a 1944 para a Bacia do Porto Novo, apresentados na Tabela 4.3 (Calliari, 1980).

Tabela 4.3: Valores médios de assoreamento mensal na Bacia do Porto Novo, conforme dados de 1923 a 1944, estimados por pesquisadores do DNPRC. Fonte: Calliari (1980)

Período	Taxa de assoreamento média mensal (m³/mês)
Janeiro a março	39.000
Abril a junho	13.000
Julho a setembro	14.000
Outubro a dezembro	28.000

Para o período de 1923 a 1944, pesquisadores do DNPRC compararam dados do ciclo de assoreamento da Bacia do Porto Novo com as temperaturas médias mensais das águas entre abril de 1953 e março de 1960, assumindo que a escala de variação da temperatura não tivesse sofrido mudanças em 20 anos, e verificaram a possível relação entre as variáveis (Calliari, 1980). Os diagramas podem ser observados na Figura 4.18.

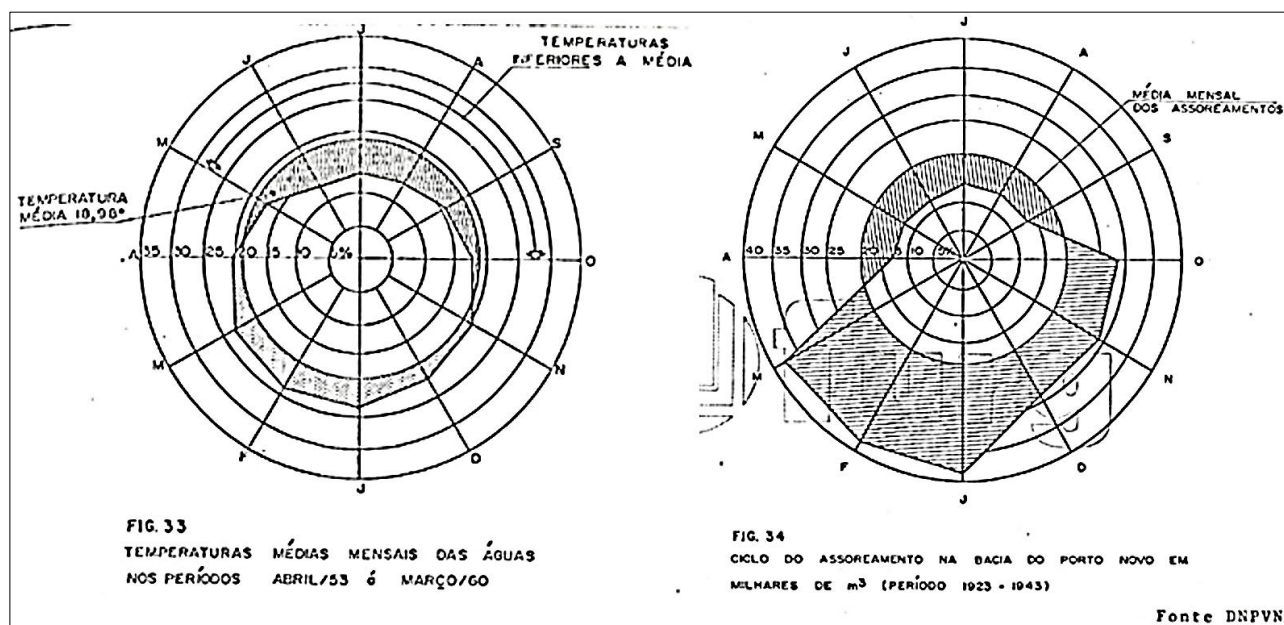


Figura 4.18: Comparação entre o ciclo do assoreamento na Bacia do Porto Novo e as temperaturas médias mensais. Fonte: Calliari (1980), adaptado.

Calliari (1980), por sua vez, analisando dados de assoreamento entre os anos de 1923 e 1943, concluiu que em anos de fortes chuvas nas bacias alimentadoras correspondem baixas taxas de assoreamento, atingindo, até mesmo, como no caso excepcional da enchente de 1941, valores negativos. Conforme Torres (2000), a chamada Grande Enchente de 1941 foi ocasionada pelo excesso de chuvas, provocado pela atuação do fenômeno El Niño neste ano.

Segundo Calliari (1980), se as grandes precipitações pluviais correspondem aos menores assoreamentos anuais, o contrário não se verifica rigorosamente, pois os anos de 1933 e 1942 (que tiveram as menores precipitações na bacia) apresentaram taxas de sedimentação bem inferiores à média geral do período. Calliari (1980) ainda destaca que os períodos de estiagem criam situações especiais sobre as quais a influência da temperatura e salinidade tem efeitos distintos. Em julho, quando se tem maiores taxas de precipitação, são mais fortes as correntes de vazante. Essas águas não sofrem ação da salinidade ou temperatura, que são mínimas, e, por este meio, não são susceptíveis de depósito. As correntes de vazantes predominam até final de outubro. Vassão (1951, apud Calliari, 1980), por sua vez, atribui a diminuição sensível do assoreamento a partir de julho à velocidade e temperatura das águas. Desta maneira, as taxas de sedimentação são menores em temperaturas mais baixas e maiores em temperaturas mais elevadas.

Hartmann (1996) relata que a construção dos molhes foi a principal responsável por modificações nos processos de erosão e deposição na região. A abertura do canal de acesso, em 1970,

contribuiu para intensificar a circulação na desembocadura, seja no sentido de enchente ou vazante, influenciando o transporte de material. O autor concluiu que o material lamoso presente no canal de acesso resulta da deposição do material em suspensão proveniente da Lagoa dos Patos influenciada por processos de floculação/agregação, causados pelo encontro da água doce e salgada e pelas diferentes situações de circulação estuarina. Na área externa aos molhes, a dinâmica faz com que esse processo seja diminuído com o aumento das partículas (areia). O material mais fino é depositado na barra distal e na cava dos bancos arenosos. Segundo o autor, o assoreamento do fundo do Canal de Acesso é da ordem de 2 metros.

O Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias (2008), por sua vez, estimou as taxas de assoreamento do Porto do Rio Grande, para o período entre 1915 e 1979, cujos valores estão apresentados na Tabela 4.4. Destaca-se que o Canal da Barra é o Canal do Norte.

Tabela 4.4: Assoreamento no Porto do Rio Grande entre os anos de 1975 e 1979. Fonte: Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias (2008).

Trecho	Localização	Dimensões em planta (mxm)	Período de observação	Taxas de assoreamento (m³/ano)
Bacia de evolução do Porto Novo	-	1.920 x 150	1915-1975	284.060
Canal de acesso ao Porto Novo	-	1.580 x 120	1915-1975	74.457
Canal da Barra (Trecho A)	Externo aos Molhes	5.000 x 200	1973-1979	297.543
Canal da Barra (Trecho B)	Cabeço dos Molhes até 4ª Seção da Barra	4.100 x 200	1973-1979	579.313
Canal da Barra (Trecho C)	4ª Seção da Barra até o terminal Cotrijuí	4.900 x 200	1973-1979	159.482

O Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias (2014) estimou, ainda, as taxas de assoreamento para o Porto do Rio Grande com base em dados de 2009 a 2014. Entretanto, destaca-se que o documento não cita a realização das dragagens ocorridas entre 2011 e 2012, bem como 2013 e 2014, não sendo possível afirmar, portanto, se foram consideradas. O zoneamento considerado pode ser observado na Figura 4.19 e os valores estimados estão apresentados na Tabela 4.5.

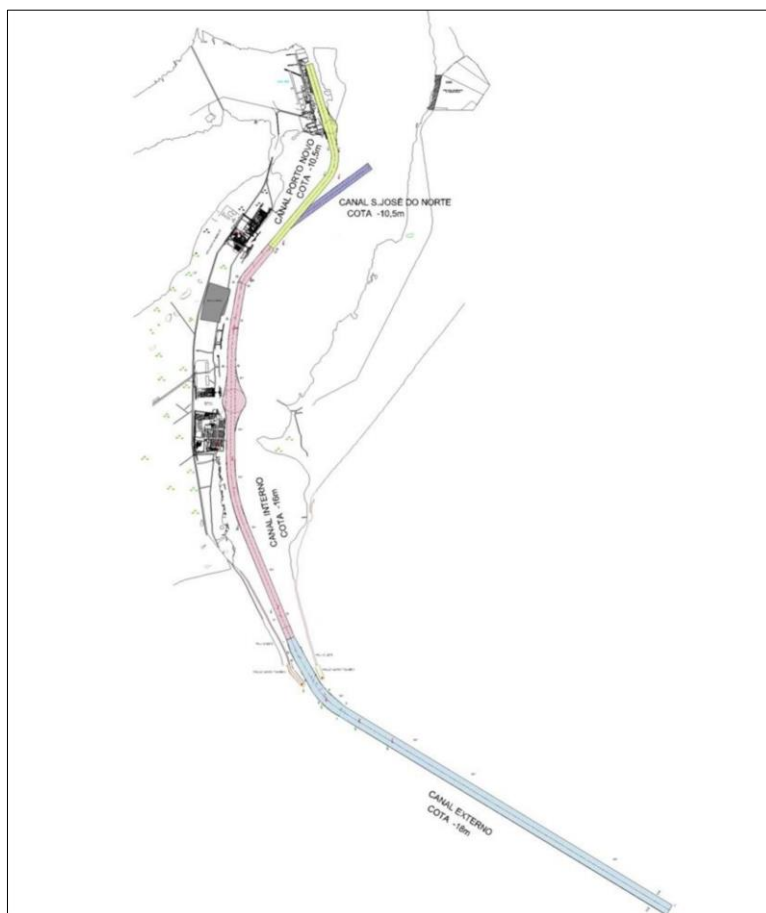


Figura 4.19: Zoneamento do Porto do Rio Grande para cálculo das taxas de assoreamento entre 2009 e 2014, pelo Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias. Fonte: Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias (2014).

Tabela 4.5: Assoreamento no Porto do Rio Grande entre os anos de 2009 e 2014. Fonte: Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias (2014).

Local	Período de observação	Taxas de assoreamento (m ³ /ano)
Canal Externo	Julho/2010 a Fevereiro/2014	2.792.000
Canal Interno	Dezembro/2009 a Junho/2011	2.541.500
Canal do Porto Novo	2013/2014	215.000

Por sua vez, o trabalho desenvolvido por Bastos da Silva (2016) teve por objetivo estimar as taxas médias de sedimentação para a Bacia do Porto Novo e para o Canal de Acesso do Porto Novo do Rio Grande, utilizando dados de levantamentos batimétricos do período compreendido entre 2000 e 2015. As taxas foram calculadas em relação à cota de projeto, de -10,5 metros (NR/DHN), para ambos setores. A área da Bacia do Porto Novo considerada no estudo está apresentada na Figura 4.20. Por apresentar geometria curvilínea, o Canal de Acesso ao Porto Novo foi dividido em cinco

retângulos (Figura 4.21), que abrangeram 91,3% da sua área total (Bastos da Silva, 2016).

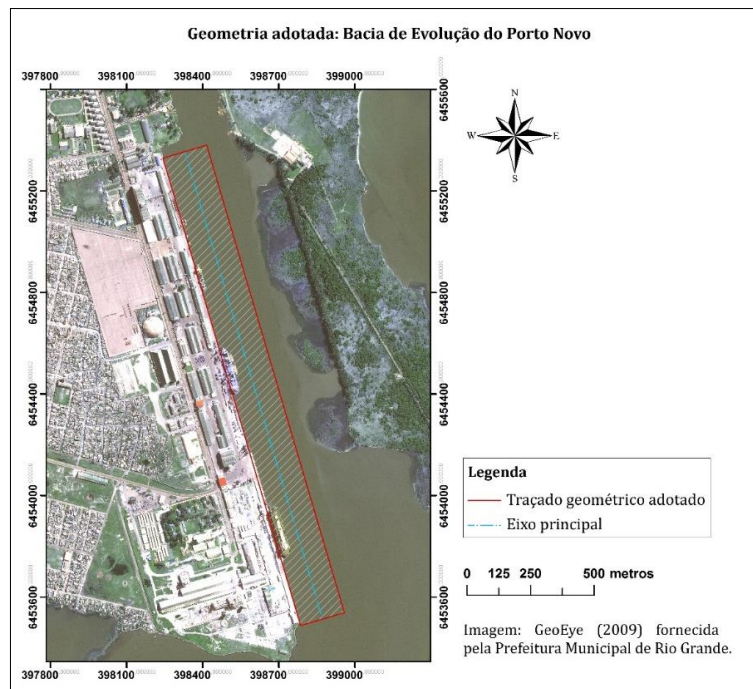


Figura 4.20: Setor da bacia do Porto Novo de Rio Grande. Fonte: Bastos da Silva (2016).

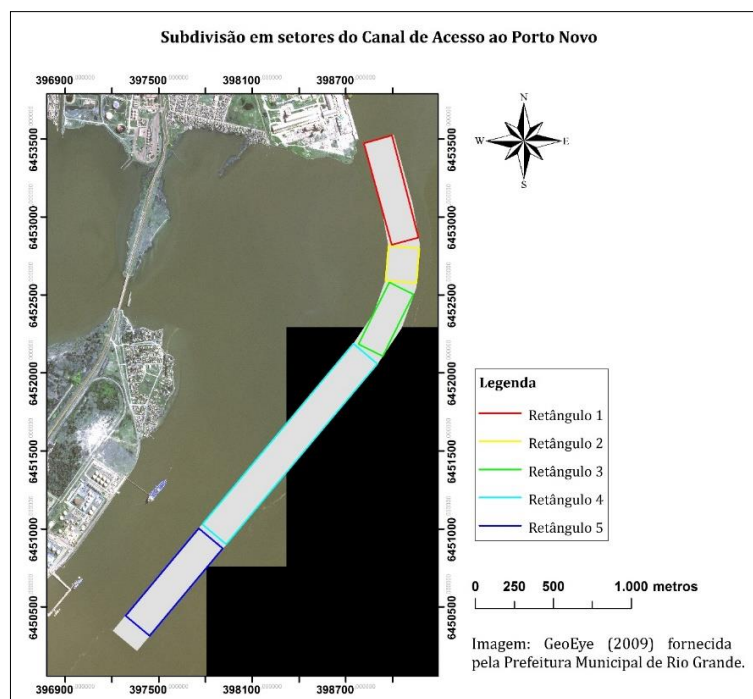


Figura 4.21: Subdivisão em retângulos do Canal de Acesso ao Porto Novo do Rio Grande, devido à geometria curvilínea. Fonte: Bastos da Silva (2016).

As taxas médias de sedimentação encontradas por Bastos da Silva (2016) estão apresentadas na Tabela 4.6. Devido a incertezas no gabarito adotado para os retângulos 4 e 5, a autora relata a escolha por não estimar as taxas médias de sedimentação destes setores, embora todos os demais dados tenham sido calculados e estejam devidamente apresentados no trabalho.

Tabela 4.6: Taxas de assoreamento médias da Bacia do Porto Novo e do Canal de Acesso ao Porto Novo, conforme Bastos da Silva (2016).

Setor		Volume médio de sedimentação mensal (m ³ /mês)	Taxa de sedimentação média mensal (cm/mês)
Bacia do Porto Novo		11.687,44	3,38
Canal de Acesso ao Porto Novo	Retângulo 1	5.560,02	4,68
	Retângulo 2	906,81	2,06
	Retângulo 3	476,70	0,64
	Retângulo 4	Não determinado.	
	Retângulo 5	Não determinado.	

Bastos da Silva (2016) analisou ainda o comportamento das taxas de assoreamento ao longo do tempo nos períodos entre dragagens para os retângulos 1, 2 e 3 do Canal de Acesso ao Porto Novo e para o retângulo referente à Bacia do Porto Novo do Rio Grande. Concluiu que a sedimentação não se trata de um processo linear e, sim, está sujeita a altas taxas iniciais de sedimentação que decrescem ao longo do tempo, tendendo a uma estabilização, conforme pode ser analisado no gráfico da Figura 4.22 da Bacia do Porto Novo do Rio Grande. Segundo a autora, este comportamento pode ser justificado pelo fato de que, considerando que não haja alterações nas condições meteorológicas e hidrográficas, as maiores profundidades atingidas logo após a dragagem acarretam em perfis de velocidade da água com menores velocidades junto ao fundo. Essas velocidades não são capazes de manter o sedimento em suspensão e este precipita sobre o fundo. A alteração da morfologia de fundo ao longo do tempo com a redução da profundidade, devido ao processo de sedimentação, imprime mudanças na condição hidrodinâmica, fazendo com que o perfil de velocidades alcance, agora, maiores valores junto ao fundo, mantendo assim a maior parte da carga sedimentar em suspensão e provocando uma estabilização das taxas. Este fenômeno é conhecido como profundidade ou regime de equilíbrio.

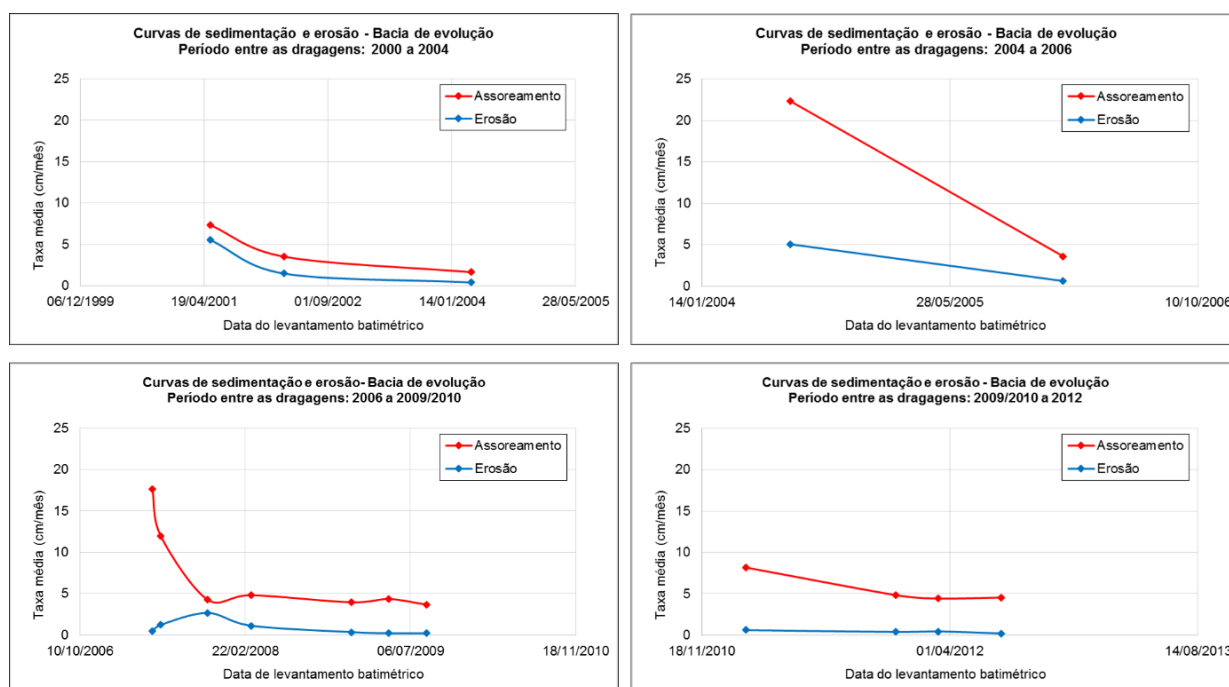


Figura 4.22: Curvas de sedimentação nos períodos entre dragagens na Bacia do Porto Novo do Rio Grande. Fonte: Bastos da Silva (2016).

Bastos da Silva (2016) utilizou os dados modelados para mapeamento das zonas críticas de assoreamento na região de estudo em relação à cota de projeto, adotando uma escala de tons azulados para locais de erosão e de tons avermelhados para locais de acresção. As variações de $\pm 0,25$ metro em torno da profundidade de projeto foram consideradas estáveis e representadas na cor branca. Os mapas da Bacia do Porto Novo e dos retângulos do Canal de Acesso ao Porto Novo estão apresentados na Figura 4.23, Figura 4.24, Figura 4.25, Figura 4.26, Figura 4.27 e Figura 4.28.

Os mapas gerados para observação da evolução do fundo em relação à cota de projeto mostraram um assoreamento constante e intenso no berço em frente à Companhia Estadual de Silos e Armazéns – CESA (local junto ao cais na porção noroeste da bacia), configurando uma área crítica (Bastos da Silva, 2016). Além disso, a autora destaca que na margem leste da bacia do Porto Novo, nas proximidades do Canal de Ligação com o Porto Velho, foi observado comportamento erosivo nos dados analisados. No Canal de Acesso ao Porto Novo, o estudo identificou um assoreamento intenso na margem oeste dos retângulos 1, 2 e 3, enquanto que para os retângulos 4 e 5 observa-se um assoreamento mais significativo na margem leste do setor. Por fim, Bastos da Silva (2016) ressalta ainda que os mapas de maio de 2007, outubro de 2007 e novembro de 2015 apresentam uma grande área com profundidades superiores à profundidade de projeto, indicando comportamento erosivo. Conforme a autora, os anos de 2007 e 2015 foram marcados por intensas descargas no estuário da Lagoa dos Patos, devido ao fenômeno El Niño, o que pode ter gerado o comportamento observado.

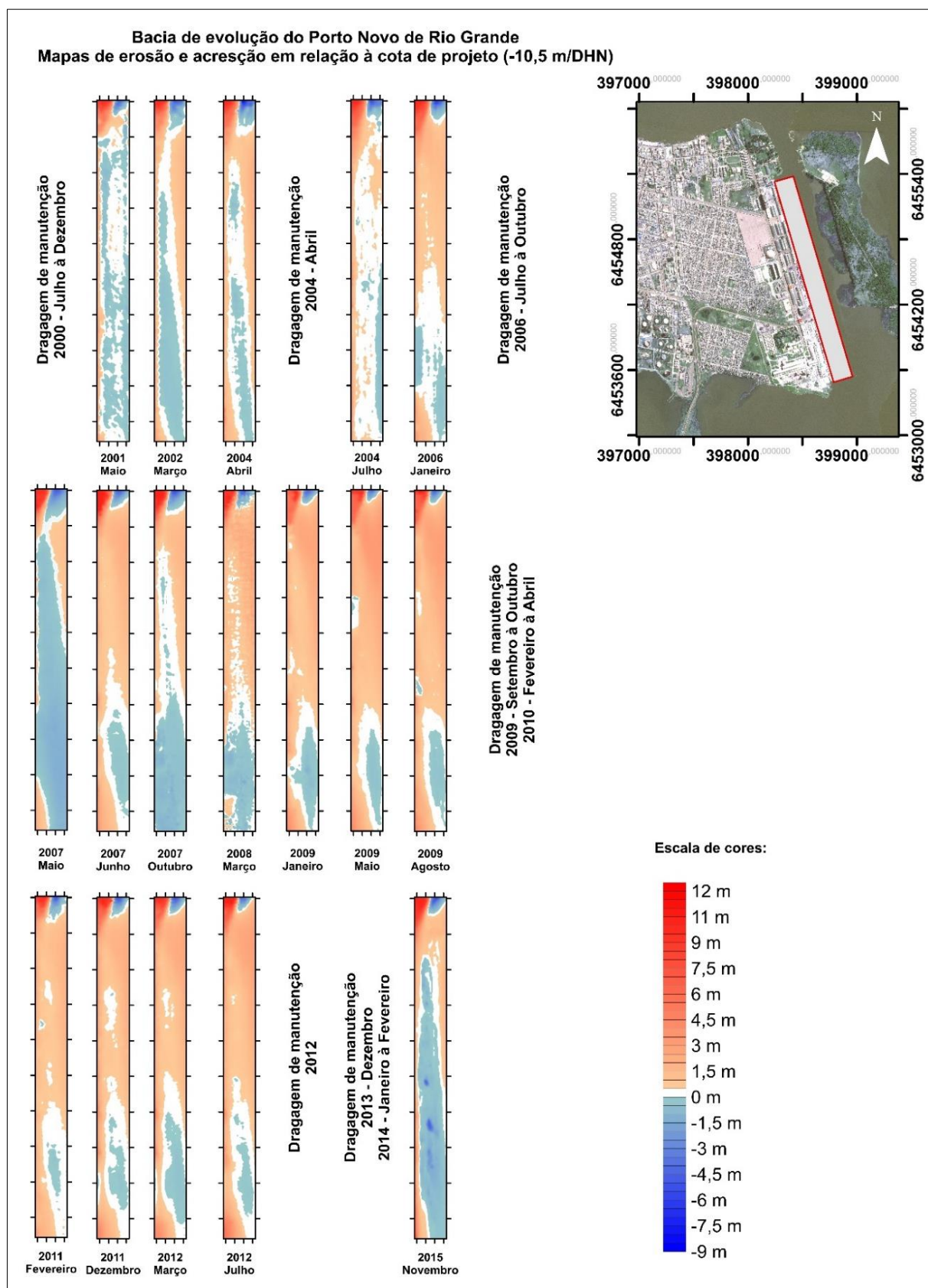


Figura 4.23: Mapas de erosão e acreção em relação à cota de projeto - Bacia de Evolução do Porto Novo. Tons avermelhados representam áreas de assoreamento e tons azulados representam áreas de erosão de sedimentos. Fonte: Bastos da Silva (2016).

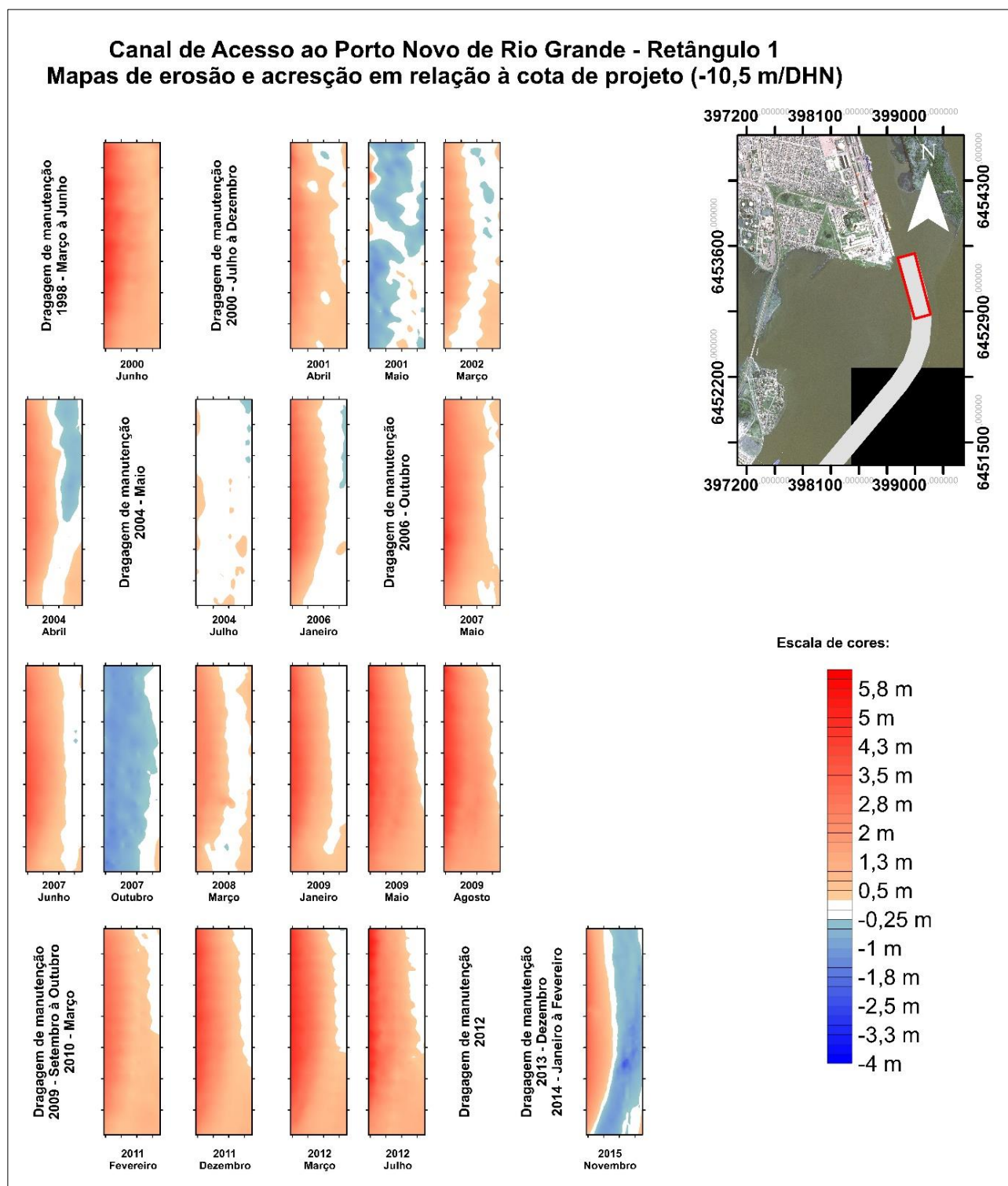


Figura 4.24: Mapas de erosão e acreção em relação à cota de projeto – Retângulo 1: Canal de Acesso ao Porto Novo. Tons avermelhados indicam acreção e tons azulados indicam erosão. Fonte: Bastos da Silva (2016).

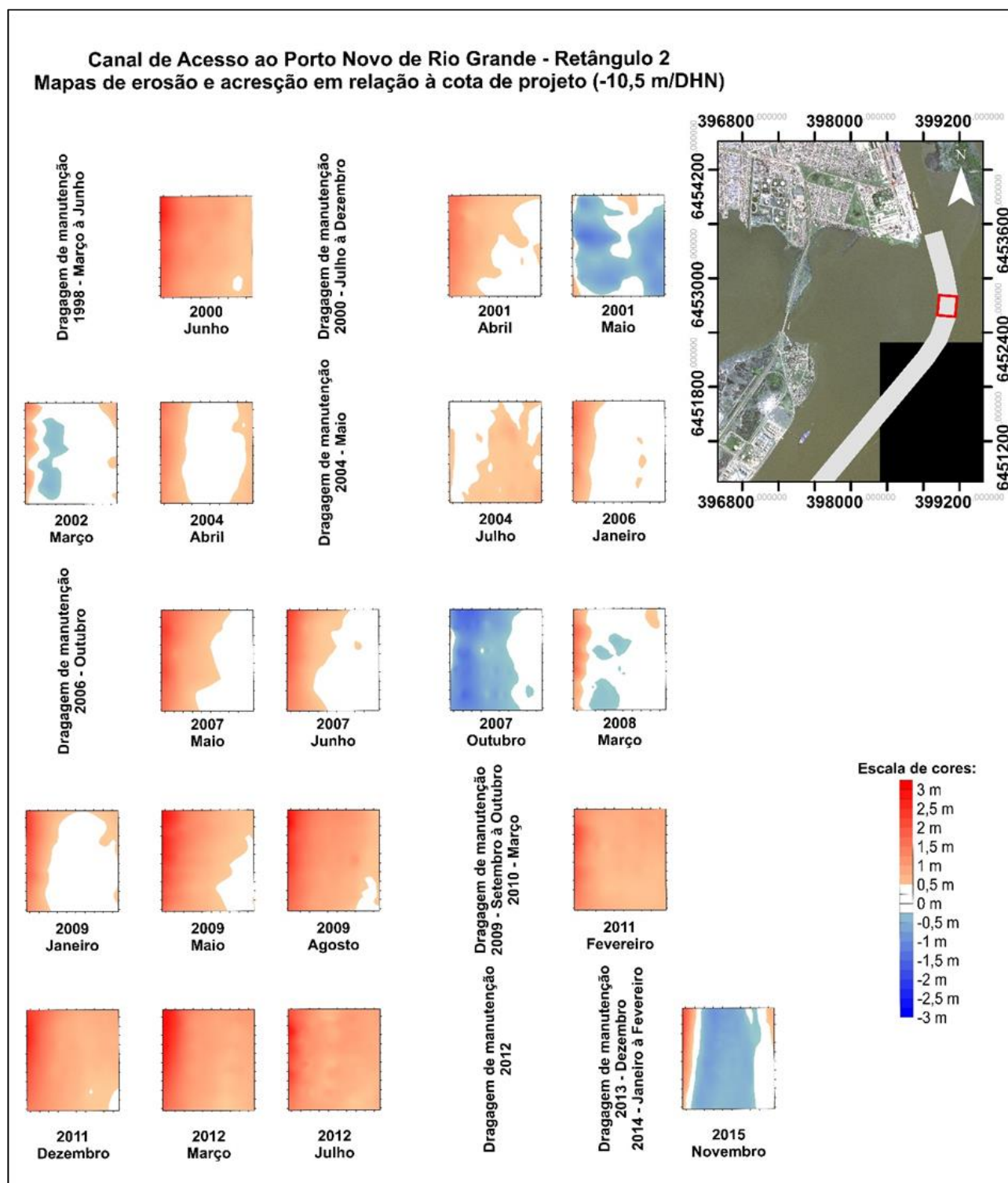


Figura 4.25: Mapas de erosão e acreção em relação à cota de projeto – Retângulo 2: Canal de Acesso ao Porto Novo. Tons avermelhados indicam acreção e tons azulados indicam erosão. Fonte: Bastos da Silva (2016).

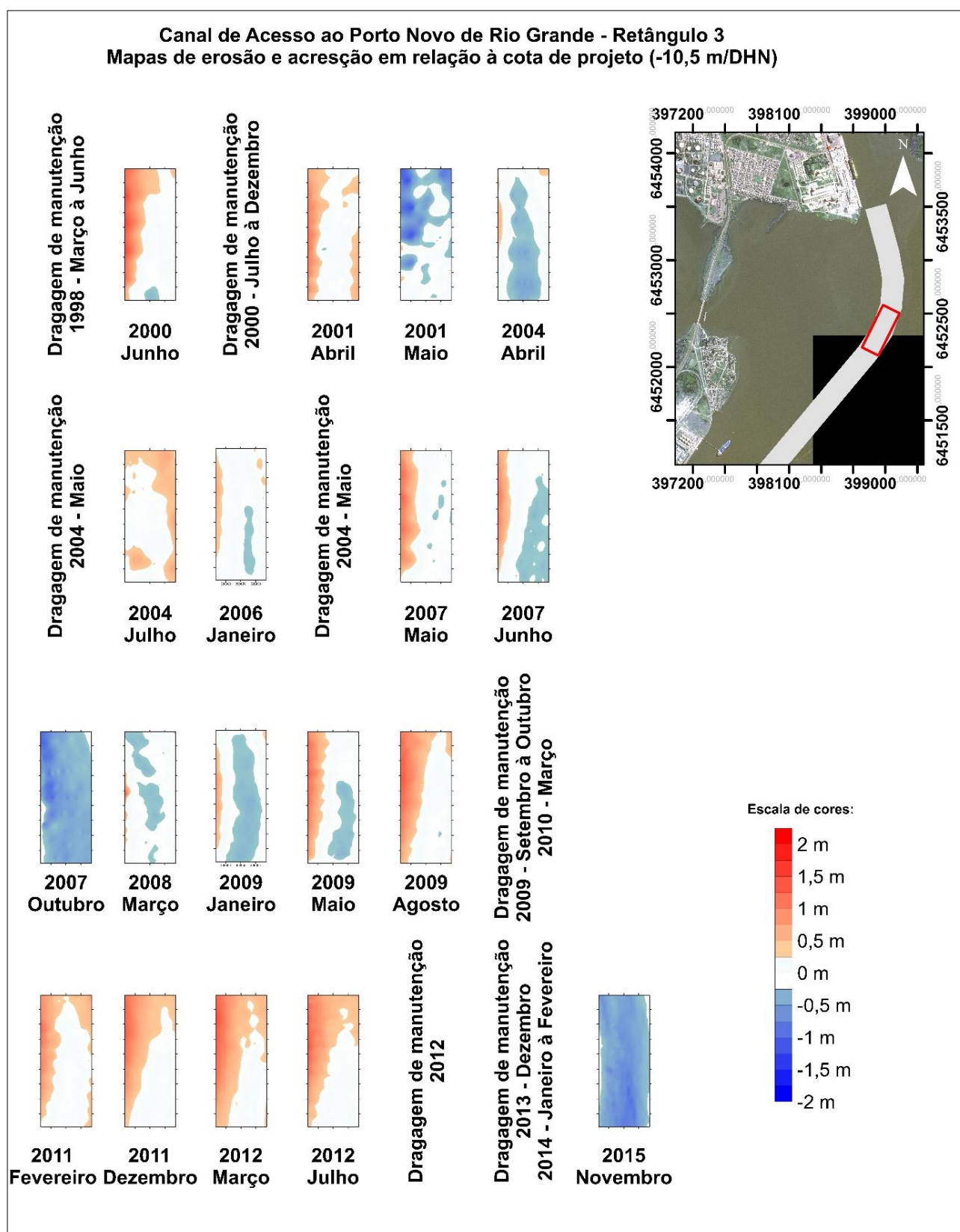


Figura 4.26: Mapas de erosão e acresção em relação à cota de projeto – Retângulo 3: Canal de Acesso ao Porto Novo. Tons avermelhados indicam acresção e tons azulados indicam erosão. Fonte: Bastos da Silva (2016).

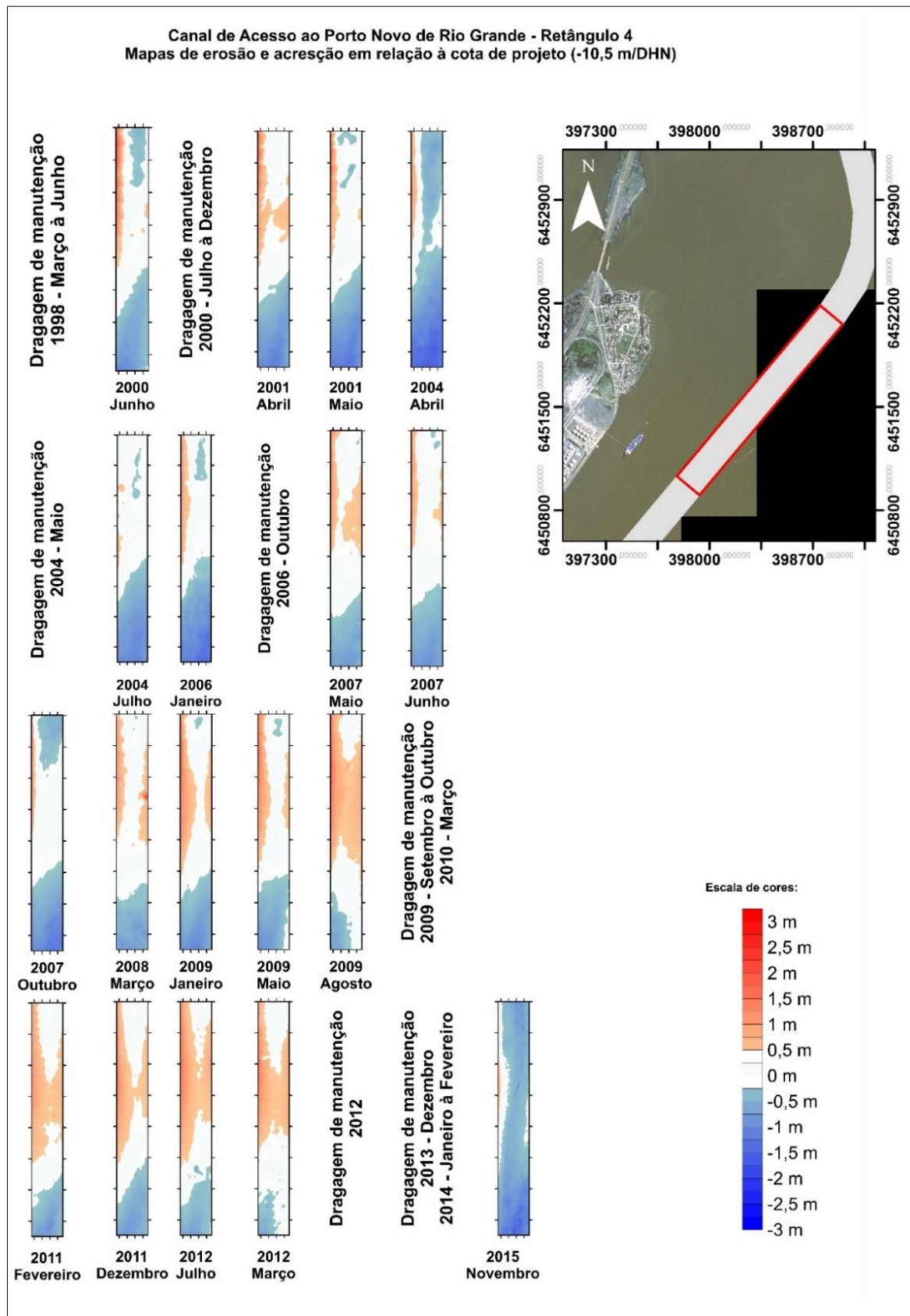


Figura 4.27: Mapas de erosão e acreção em relação à cota de projeto – Retângulo 4: Canal de Acesso ao Porto Novo. Tons avermelhados indicam acreção e tons azulados indicam erosão. Fonte: Bastos da Silva (2016).

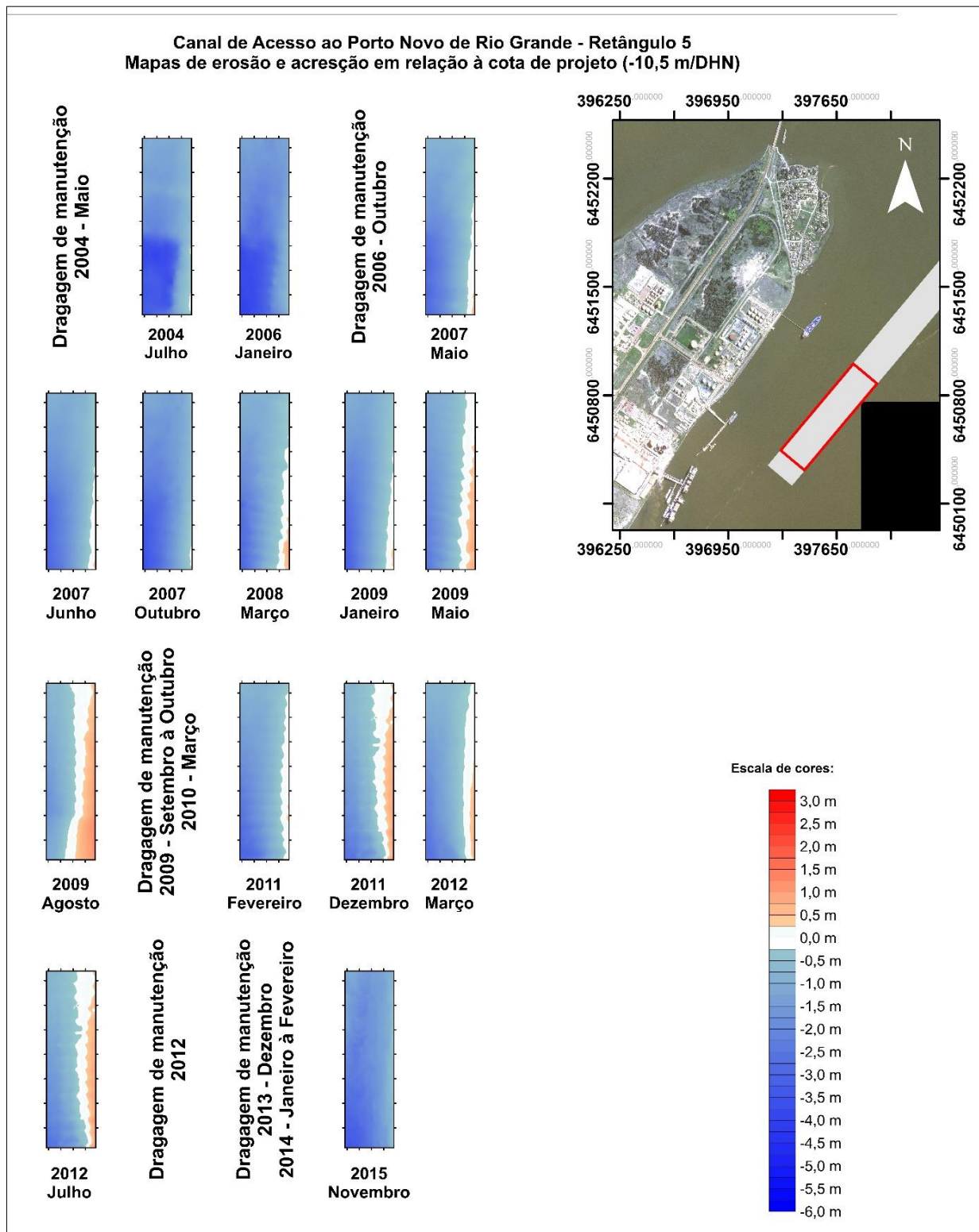


Figura 4.28: Mapas de erosão e acreção em relação à cota de projeto – Retângulo 5: Canal de Acesso ao Porto Novo. Tons avermelhados indicam acreção e tons azulados indicam erosão. Fonte: Bastos da Silva (2016).

5. METODOLOGIA

A metodologia para estimativa das taxas médias de sedimentação e de erosão nos trechos dos Canais Interno e Externo de Acesso ao Porto do Rio Grande deste estudo seguiu os procedimentos desenvolvidos e propostos por Bastos da Silva (2016), que determinou estas taxas para a Bacia e para o Canal de Acesso do Porto Novo do Rio Grande. Desta maneira, este estudo trata-se de uma expansão do estudo de Bastos da Silva (2016) para os demais trechos do Porto do Rio Grande. Além disso, como subsídio para análise dos dados e da evolução do fundo do canal, foram coletados testemunhos em pontos localizados na região de interesse.

5.1. Descrição do método desenvolvido por Bastos da Silva (2016)

A metodologia desenvolvida por Bastos da Silva (2016), para estimativa de taxas médias de sedimentação e de erosão, baseou-se na utilização do *software* SURFER® para geração de modelos digitais de elevação, a partir de dados de levantamentos batimétricos e utilizando interpolador Krigagem. Este interpolador foi escolhido pois apresentou o maior coeficiente de correlação (99,46%) dentre os interpoladores que não geraram *blanks* no *software* SURFER® (Bastos da Silva, 2016). Destaca-se que *blanks* são nós do modelo digital de elevação aos quais o *software* atribui valores elevados (da ordem de 10^{38}) por não ser possível, a partir da malha de pontos disponível, interpolar o valor para o nó. A presença destes *blanks* acarreta em modelagens com diferentes limites de interpolação para uma mesma região, o que é prejudicial uma comparação ponto a ponto (Bastos da Silva et al., 2018).

Conforme esta metodologia, inicialmente, a região de interesse deve ser delimitada por um retângulo. Para casos em que a geometria dessa região é curvilínea, deve-se subdividir em diversos retângulos a fim de cobrir a área de interesse. Em seguida, os pontos de todos os levantamentos batimétricos disponíveis são inseridos em ambiente CAD juntamente com os traçados dos retângulos que delimitam os setores. Os pontos que excedem os limites dos retângulos são excluídos manualmente (Figura 5.1)

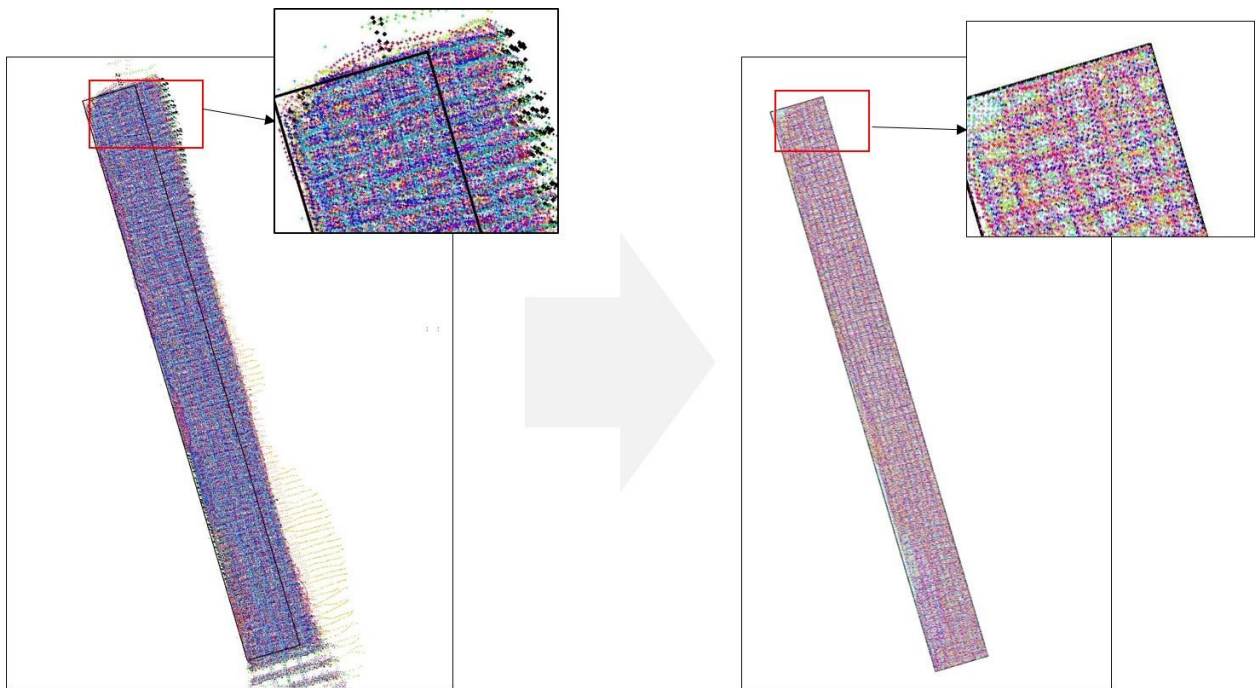


Figura 5.1: Delimitação dos pontos ao limite do retângulo. Fonte: Bastos da Silva et al. (2018).

Posteriormente, os retângulos são rotacionados em torno de um ponto fixo de forma que permaneçam com o eixo principal orientado na direção vertical, procedimento realizado para a aplicação adequada do interpolador Krigagem (Figura 5.2).

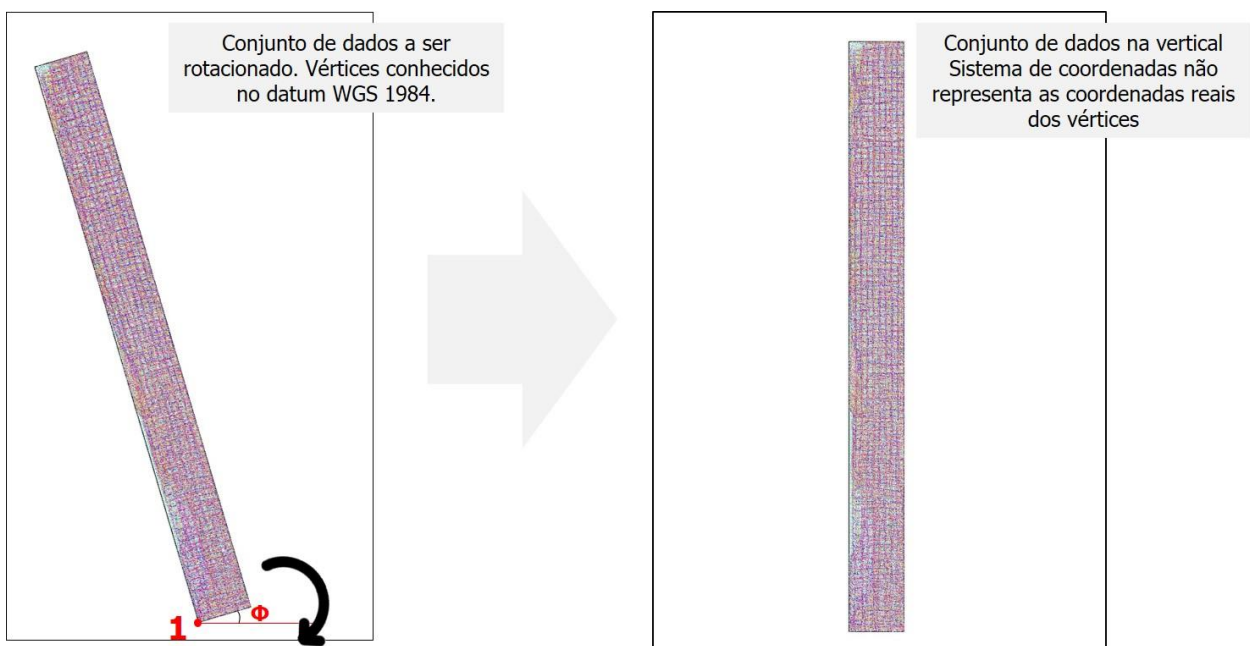


Figura 5.2: Rotação do conjunto de dados em torno de um ponto conhecido de forma que o eixo principal do retângulo fique alinhado na vertical. Fonte: Bastos da Silva et al. (2018).

Os dados de cada batimetria, devidamente rotacionados, são exportados para o *software* SURFER®, onde são gerados modelos digitais de elevação por meio do interpolador Krigagem. A partir de cada modelo digital de elevação, é calculado o volume assoreado (acima da cota de projeto) e erodido (abaixo da cota de projeto) em relação à cota de projeto. As taxas de sedimentação são determinadas pela relação entre o volume (m^3) e a área (m^2) multiplicada pelo tempo decorrido entre a respectiva batimetria e a última obra de dragagem (mês).

5.2. Aquisição, padronização e organização de levantamentos batimétricos

Os levantamentos batimétricos foram fornecidos pela Superintendência do Porto do Rio Grande em formato .dwg, nativo dos dados do *software* AutoCAD. O período de abrangência dos dados é de 2000 a 2018. No entanto, não há periodicidade determinada na realização de levantamentos e a área da sondagem também é variável.

Inicialmente, os levantamentos batimétricos foram organizados em ordem cronológica. O período de sondagem, a área de abrangência, o sistema de referência (*datum*) e o referencial vertical de todos os levantamentos foram analisados e registrados.

Todos levantamentos batimétricos estavam referenciados ao sistema de coordenadas Universal Transverse de Mercator (UTM), Zona 22 Sul, com coordenadas em metros. Em relação ao referencial vertical, todas as sondagens apresentam a informação de que as profundidades têm como referência o nível de redução (NR) da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) para o local. Além disso, conforme informação constante nos arquivos, destaca-se que os levantamentos foram realizados utilizando sinal sonoro de alta frequência (200 kHz ou 210 kHz), de acordo com o exigido para garantir a segurança da navegação. Quanto à tecnologia empregada, todos os dados foram medidos utilizando sistema monofeixe, com exceção da batimetria de 2015, na qual o sistema multifeixe foi empregado.

Os levantamentos batimétricos, de forma geral, estavam referenciados a três sistemas de referência distintos: *datum* Arbitrário, Córrego Alegre e World Geodetic System 1984 (WGS 1984), sendo os dois primeiros predominantes em sondagens mais antigas e o último em sondagens mais recentes. Destaca-se que *datum* Arbitrário foi criado especificamente para levantamentos da região do Porto do Rio Grande.

A fim de uniformizar todos dados batimétricos e juntá-los em um único arquivo, os dados foram transformados e referenciados ao mesmo *datum*. O *datum* adotado como padrão neste estudo foi o WGS 1984, considerando que os levantamentos batimétricos mais recentes se encontram

referenciados a esse sistema. Destaca-se que, atualmente, o SIRGAS 2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas) é o referencial geodésico para as Américas, entretanto, o WGS 1984 pode ser considerado, para fins práticos, coincidente com o SIRGAS 2000.

A transformação do *datum* Arbitrário para o *datum* Córrego Alegre se dá através da soma de +112,47 metros nas coordenadas leste (x) e de +115,47 metros nas coordenadas norte (y), conforme informação apresentada nos arquivos. Em seguida, todos dados referenciados em relação ao *datum* Córrego Alegre foram, então, transformados para WGS 1984 por meio de procedimento no *software* SURFER 11®. A Figura 5.3 apresenta o processo acima descrito.

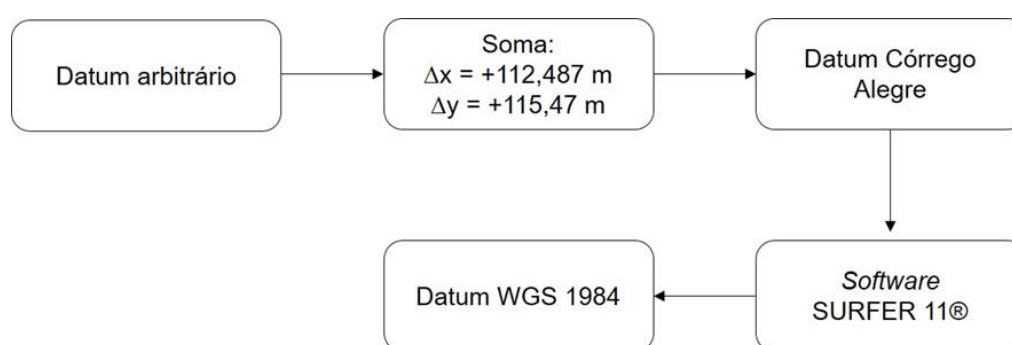


Figura 5.3: Esquema do processo de transformação de datum para a padronização do sistema de referência. Fonte: Bastos da Silva (2016).

5.3. Levantamento do histórico de dragagens

O levantamento do histórico de dragagens foi realizado a partir de dados disponibilizados pela Superintendência do Porto do Rio Grande. Além disso, dados do histórico de dragagens até 2006 estavam contidos no anteprojeto realizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias (2014). Observa-se que, como o estudo tem o período de abrangência a partir do ano 2000, apenas as operações de dragagem posteriores a 1998 foram consideradas.

O histórico de dragagens está apresentado na Tabela 5.1, assim como as profundidades atingidas em cada dragagem nos respectivos trechos. Ressalta-se que houve uma mudança na nomenclatura dos trechos após a dragagem de aprofundamento realizada entre junho de 2009 e julho de 2010, diferenciados, neste trabalho, pelo emprego de numerais cardinais para o traçado antigo e numerais romanos para o traçado atual. Todas as profundidades da tabela estão referenciadas ao nível de redução (NR) da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) para o local. A localização dos trechos foi apresentada nos mapas da Figura 2.1 e Figura 2.2.

Tabela 5.1: Histórico de dragagens entre 1998 e 2014.

Ano	Período	Trecho	Profundidade atingida em relação ao NR/ DHN (m)
1998	Março-Junho	1	-14,00
	Maio-Junho	2	
	Abril-Junho	3	
2000	Agosto, Novembro, Dezembro	1	
	Julho-Agosto	2	
	Novembro-Dezembro	3	
2001	Janeiro, Março, Abril, Maio	1	
	Janeiro, Fevereiro, Abril, Maio	3	
2003	Julho-Agosto	1	
	Agosto-Setembro	2	
2004	Julho	3	
	Junho	4	
2006	Novembro-Dezembro	2	
	Novembro	4	
2007	Março-Maio	1	
	Janeiro-Maio	2	
2009/2010	Junho/2009 a Julho/2010	I, II	-18,00
		III, IV, V	-16,00
2011/2012	Dezembro/2011 a Março/2012	III, IV, V	-16,00
2013/2014	Dezembro/2013 a Fevereiro/2014	II, III, IV, V	-14,50

Todas as dragagens realizadas no Porto do Rio Grande no período foram de manutenção, com exceção da obra realizada entre junho de 2009 e julho de 2010, que promoveu o aprofundamento dos Canais Interno e Externo. A profundidade de projeto do Canal Interno e do Canal Externo era de -14,00 m (NR/DHN) em ambos e passou a ser de -16,00 m (NR/DHN) e -18,00 m (NR/DHN), respectivamente.

É importante destacar ainda que, embora a dragagem de aprofundamento realizada entre junho de 2009 e julho de 2010 tenha definido novas cotas de projeto para os trechos I, II, III, IV e V, na dragagem entre dezembro de 2013 e fevereiro de 2014, esses trechos foram dragados para a cota de -14,5 metros (NR/DHN), não atingindo, portanto, a cota de projeto. Tal fato é justificado por questões financeiras e ambientais, o que tornou necessário a realização de dragagem emergencial que atingiu

profundidades menores que a cota de projeto. Ressalta-se ainda que o Trecho I (configuração atual) sofreu apenas uma operação de dragagem, momento no qual foi incorporado ao Canal de Acesso ao Porto do Rio Grande.

5.4. Subdivisão em retângulos e organização cronológica dos dados (levantamentos batimétricos e histórico de dragagens) de cada trecho

Para o estudo das taxas de sedimentação e erosão, dois cenários serão considerados: um anterior e outro posterior à dragagem de aprofundamento dos Canais Interno e Externo de Acesso ao Porto do Rio Grande, uma vez que esta obra provocou mudanças expressivas na geometria destes canais.

Conforme a metodologia proposta por Bastos da Silva (2016), a área de interesse deve ser delimitada por retângulos, para os quais são calculadas as taxas de sedimentação e de erosão. Como o objetivo neste estudo é determinar as taxas para cada trecho do canal (considerando a divisão adotada pela Superintendência do Porto do Rio Grande), os retângulos foram nomeados conforme o trecho a que pertencem. Desta forma, um retângulo não ultrapassa os limites entre trechos, ficando confinado a apenas um trecho.

Os retângulos foram dispostos de tal forma que melhor se adequassem à geometria do canal na região onde se situam e que suas dimensões fossem múltiplas de 10 (o espaçamento pré-determinado dos nós dos modelos digitais de elevação é de 10 metros). Além disso, foram arranjados de maneira que não haja sobreposição de áreas e que não ultrapassassem os limites da largura do canal. Ressalta-se ainda que os ângulos internos dos retângulos foram ajustados com precisão de 8 casas decimais, a fim de atingir exatos 90°.

5.4.1. Configuração geométrica anterior à dragagem de aprofundamento do Canal de Acesso ao Porto do Rio Grande

Subdivisão em setores

Com o objetivo de estimar as taxas médias de assoreamento para a configuração do canal anterior à dragagem de aprofundamento dos Canais Interno e Externo, cada trecho do traçado (podem ser observados na Figura 2.1) foi subdividido em retângulos. Desta forma, pode-se aplicar a metodologia de Bastos da Silva (2016) e, principalmente, avaliar o comportamento de cada trecho e

compará-lo com os demais. Os retângulos de cada trecho foram nomeados conforme ordem alfabética, no sentido de Sul para Norte.

Os trechos foram divididos da seguinte forma: Trecho 1 – 3 retângulos (Figura 5.4), Trecho 2 – 6 retângulos (Figura 5.5); Trecho 3 – 8 retângulos (Figura 5.6); Trecho 4 – 9 retângulos (Figura 5.7).

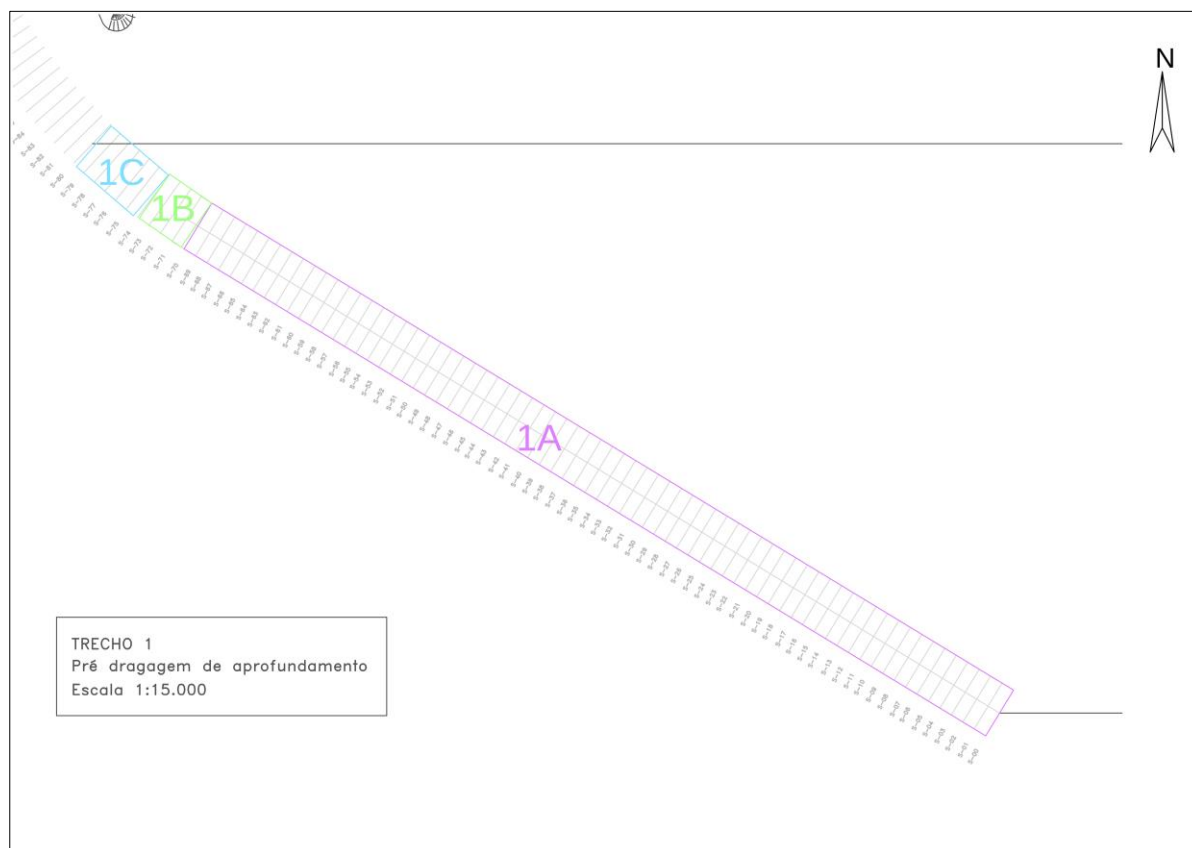


Figura 5.4: Subdivisão em retângulos do Trecho 1 – Configuração anterior à dragagem de aprofundamento ocorrida nos anos de 2009 e 2010.

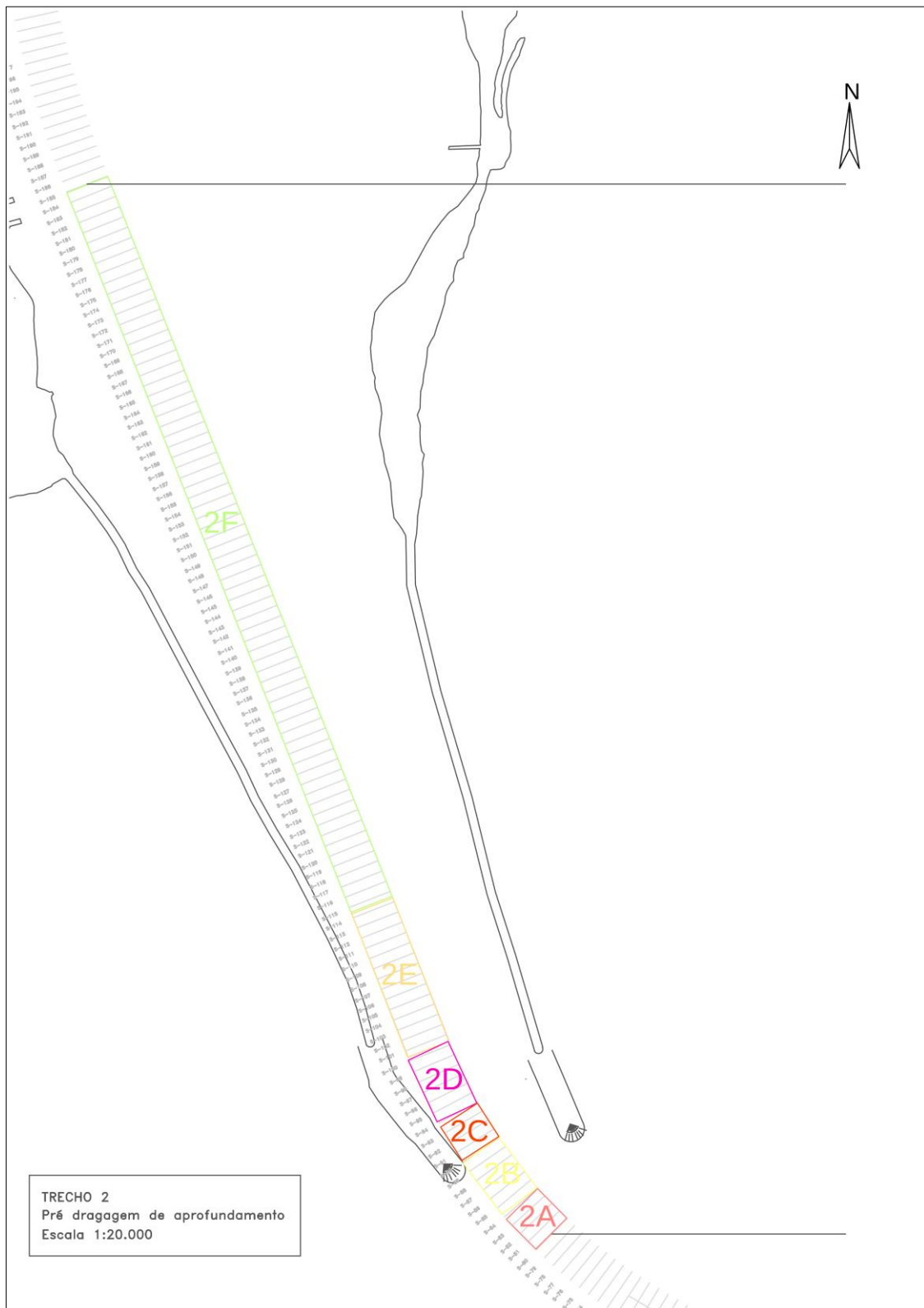


Figura 5.5: Subdivisão em retângulos do Trecho 2 – Configuração anterior à dragagem de aprofundamento ocorrida nos anos de 2009 e 2010. Na planta está ilustrado os segmentos referentes ao prolongamento dos Molhes da Barra do Rio Grande.

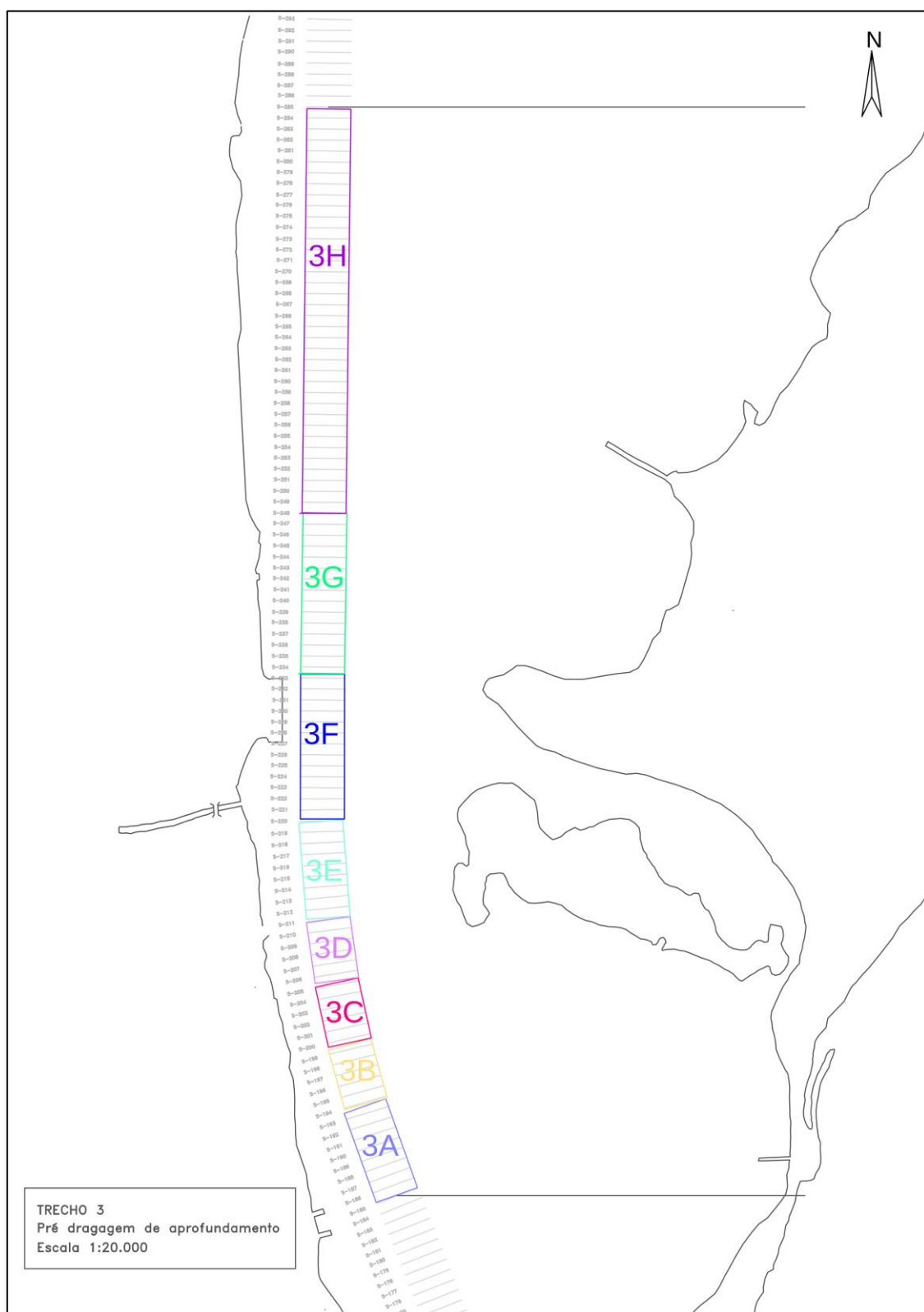


Figura 5.6: Subdivisão em retângulos do Trecho 3 – Configuração anterior à dragagem de aprofundamento ocorrida nos anos de 2009 e 2010. Na planta está ilustrado os segmentos referentes ao prolongamento dos Molhes da Barra do Rio Grande.

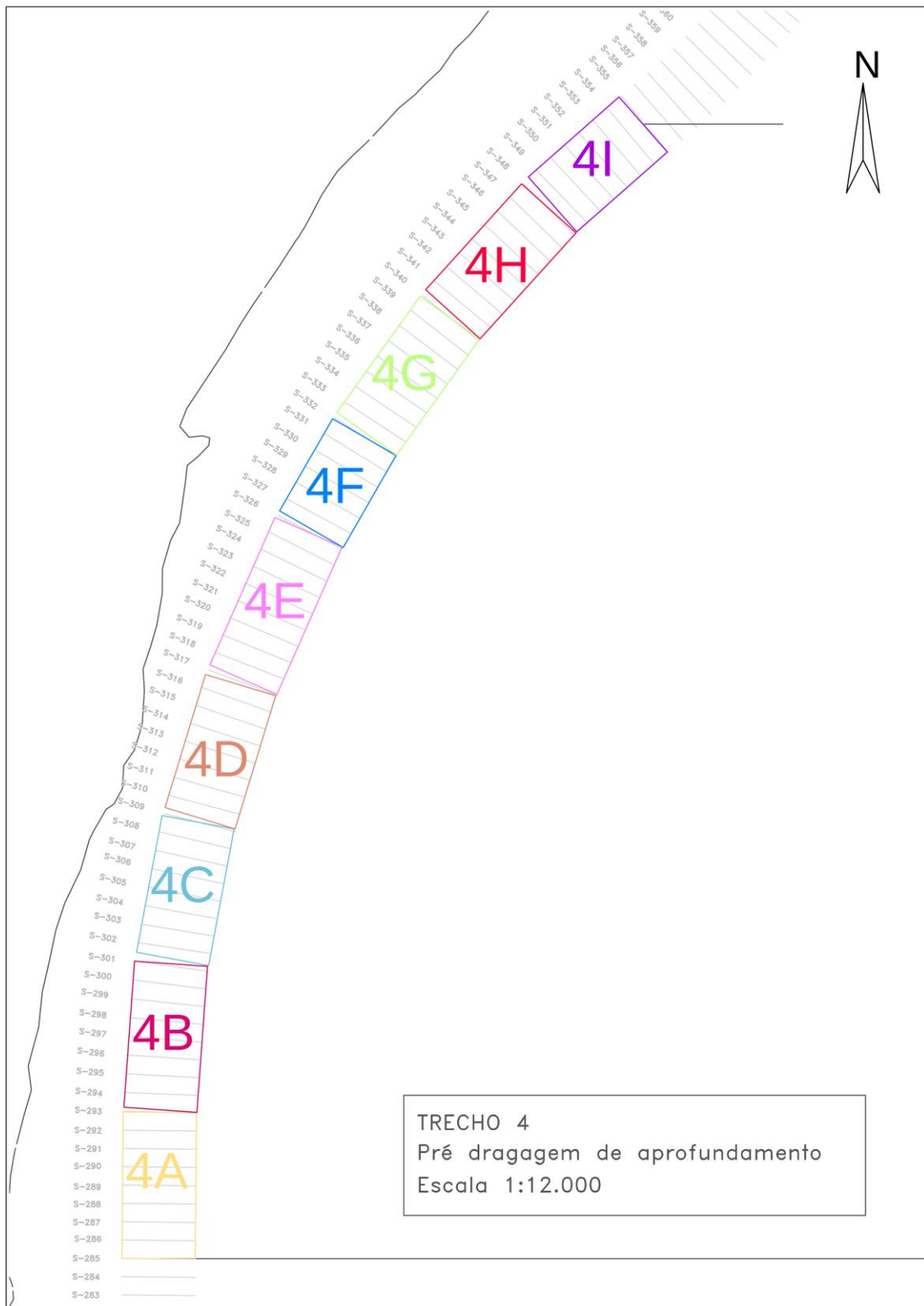


Figura 5.7: Subdivisão em retângulos do Trecho 4 – Configuração anterior à dragagem de aprofundamento ocorrida nos anos de 2009 e 2010. Na planta está ilustrado os segmentos referentes ao prolongamento dos Molhes da Barra do Rio Grande.

Os canais interno e externo ficaram, então, representados por um total de 26 retângulos, cujas coordenadas dos vértices estão apresentadas na Tabela 5.2. Destaca-se que o vértice 1 (X, Y) corresponde sempre ao vértice situado no canto inferior direito de cada retângulo e os demais são definidos a partir deste no sentido horário (vértice 2 no canto inferior esquerdo, vértice 3 no canto superior esquerdo, vértice 4 no canto superior direito).

Tabela 5.2: Coordenadas dos vértices dos retângulos correspondentes a cada trecho do traçado geométrico anterior à dragagem de aprofundamento. O vértice 1 corresponde ao canto inferior direito de todos os retângulos e os demais seguem no sentido horário em relação ao vértice 1.

Trecho	Ret.	Coord. UTM	Vértices			
			1	2	3	4
1	1A	X (m)	402058,8557	401955,0312	398963,5815	399067,4060
		Y (m)	6437761,1699	6435590,2299	643707,1853	6437578,0983
	1B	X (m)	399065,8838	398952,7922	398796,0845	398909,1761
		Y (m)	6437578,6995	6437413,7441	6437521,1811	6437686,1365
	1C	X (m)	398904,6370	398774,3738	398561,9079	398692,1711
		Y (m)	6437682,9725	6437531,2112	6437713,5797	6437865,3410
2	2A	X (m)	398691,8405	398549,7036	398416,0366	398558,1735
		Y (m)	6437871,5378	6437730,8357	6437865,8658	6438006,5680
	2B	X (m)	398555,7467	398396,4049	398221,1396	398380,4814
		Y (m)	6438011,0294	6437890,1567	6438121,2023	6438242,0750
	2C	X (m)	398382,6208	398214,3928	398117,0457	398285,2736
		Y (m)	6438243,6447	6438135,4812	6438286,8864	6438395,0499
	2D	X (m)	398282,7349	398101,6541	397970,0432	398151,1240
		Y (m)	6438395,2323	6438310,3221	6438590,9973	6438675,9075
	2E	X (m)	398154,3147	397967,9589	397713,8407	397900,1965
		Y (m)	6438777,1665	6438604,5613	6439256,8066	6439329,4118
	2F	X (m)	397896,4434	397710,4050	396418,3071	396664,3455
		Y (m)	6439337,3730	6439263,9584	6442538,2343	6442611,6490
3	3A	X (m)	396601,7411	396413,4305	396268,5787	396456,8893
		Y (m)	6442614,2436	6442546,8707	6442951,7385	6443019,114
	3B	X (m)	396463,8395	396271,0355	396196,6028	396389,4067
		Y (m)	6443022,6440	6442969,4777	6443239,4032	6443292,5694

Trecho	Ret.	Coord. UTM	Vértices			
			1	2	3	4
3	3C	X (m)	396391,8899	396196,4983	396136,7376	396332,1292
		Y (m)	6443295,5072	6443252,8210	5443526,3693	6443569,0555
	3D	X (m)	396334,0007	396135,9807	396096,6787	396294,6987
		Y (m)	6443571,5014	6443543,4285	6443820,6565	6443848,7294
	3E	X (m)	396295,4139	396096,0180	396061,8450	396261,2409
		Y (m)	6443850,8562	6443835,3230	6444273,9939	6444289,5271
	3F	X (m)	396268,6818	396068,6820	396069,6918	396269,6916
		Y (m)	6444292,4721	6444292,7791	6444952,7773	6444952,4713
	3G	X (m)	396269,7947	396069,8195	396081,3283	396281,3034
		Y (m)	6444953,7262	6444956,8793	6445686,7886	6445683,6533
	3H	X (m)	396277,0092	396077,0230	396098,6965	396298,6826
		Y (m)	6445684,9249	6445687,2807	6447527,1531	6447524,7973
4	4A	X (m)	396297,0114	396097,0179	396100,2434	396300,2369
		Y (m)	6447533,8588	6447535,4716	6447935,4586	6447933,8458
	4B	X (m)	396301,4731	396102,0002	396131,0221	396330,4950
		Y (m)	6447933,9716	6447948,4825	6448347,4283	6448332,9173
	4C	X (m)	396333,5936	396136,9661	396206,4562	396403,0837
		Y (m)	6448334,8525	6448371,4262	6448745,0184	6448708,4447
	4D	X (m)	396405,6459	396214,3170	396324,9955	396516,3243
		Y (m)	6448708,4450	6448766,6968	6449130,2216	6449071,9698
	4E	X (m)	396220,0381	396937,0124	396514,4034	396697,4282
		Y (m)	6449075,6663	6449156,2986	6449558,9553	6449478,3230
	4F	X (m)	396700,5077	396527,1514	396671,7710	396845,1273
		Y (m)	6449477,2661	6449577,0038	6449828,3704	6449728,6328
	4G	X (m)	396846,1044	396683,4585	3969910,4535	397073,0894
		Y (m)	6449723,5038	6449845,9064	6450163,0464	6450046,6439
	4H	X (m)	397073,9920	396925,6753	397187,3111	397335,6277
		Y (m)	6450046,8267	6450180,9989	6450470,2164	6450336,0442
	4I	X (m)	397937,6402	397205,4359	397453,0571	395785,2614
		Y (m)	6450339,1665	6450489,2400	6450707,3770	6450557,3035

Na Tabela 5.3, estão apresentadas as dimensões e a área de cada retângulo, bem como o percentual total abrangido pelos retângulos de cada trecho. Destaca-se que a largura máxima dos retângulos foi, em todos os casos, de 200 metros, correspondente à largura média do canal nesta configuração (anterior ao aprofundamento), conforme Tabela 2.1.

Tabela 5.3: Dimensões dos retângulos correspondentes ao traçado anterior à dragagem de aprofundamento e percentual de cobertura de cada trecho.

Trecho	Ret.	Dimensões (m)	Área (m ²)	Σ Área dos Retângulos (m ²)	Área do Trecho (m ²)	Percentual de cobertura do Trecho
1	1A	200x3.500	700.000	794.000	799.918,9180	99,26%
	1B	200x190	38.000			
	1C	200x280	56.000			
2	2A	200x190	38.000	1.038.000	1.050.021,7340	98,86%
	2B	200x290	58.000			
	2C	200x180	36.000			
	2D	200x310	62.000			
	2E	200x700	140.000			
	2F	200x3.520	704.000			
3	3A	200x430	86.000	988.000	999.701,1180	98,83%
	3B	200x280	56.000			
	3C	200x280	56.000			
	3D	200x280	56.000			
	3E	200x440	88.000			
	3F	200x660	132.000			
	3G	200x730	146.000			
	3H	200x1.840	368.000			
4	4A	200x400	80.000	680.000	700.879,6585	97,02%
	4B	200x400	80.000			
	4C	200x380	76.000			
	4D	200x380	76.000			
	4E	200x440	88.000			
	4F	200x290	58.000			
	4G	200x390	78.000			
	4H	200x390	78.000			
	4I	200x330	66.000			

Levantamentos batimétricos disponíveis e dragagens realizadas em cada trecho

Nesta etapa, foi realizada uma análise de todas as sondagens batimétricas disponíveis para cada trecho e retângulo, as quais foram organizadas em ordem cronológica. As sondagens que não cobriam o retângulo inteiro ou que foram realizadas durante períodos de dragagem (sondagens intermediárias) foram desconsideradas na estimativa das taxas. Os levantamentos batimétricos e os períodos de dragagens de cada trecho estão apresentados na Tabela 5.4, Tabela 5.5, Tabela 5.6 e Tabela 5.7 para os Trechos 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

Tabela 5.4: Levantamentos batimétricos e dragagens realizadas no Trecho 1, em ordem cronológica.

TRECHO 1		
Mês/ano	Período de sondagem	Observações
Dragagem de manutenção: março/1998 a junho/1998		
Dragagem de manutenção: agosto/2000, novembro/2000 e dezembro/2000		
Fevereiro/2001	09/02/2001 a 17/02/2001	-
Abril/2001	27/03/2001 a 31/03/2001	-
Dragagem de manutenção: janeiro/2001 a maio/2001		
Dragagem de manutenção: julho/2003 a agosto/2003		
Abril/2004	29/03/2004 a 02/04/2004	-
Maio/2004	27/04/2004 a 01/05/2004	Não abrange o retângulo 1A.
Março/2005	10/03/2005 a 13/03/2005	-
Junho/2005	28/06/2005 e 29/06/2005	Não abrange o retângulo 1A.
Janeiro/2006	07/01/2006 a 11/01/2006	-
Agosto/2006	09/08/2006 a 11/08/2006	-
Outubro/2006	11/10/2006 a 18/10/2006	-
Janeiro/2007	14/01/2007 a 15/01/2007	-
Dragagem: março/2007 a maio/2007		
Junho/2007	10/06/2007	
Outubro/2007	20/10/2007 a 23/10/2007	-
Março/2008	08/03/2008 a 11/03/2008	-
Janeiro/2009	07/01/2009 a 08/01/2009	-
Maio/2009	30/04/2009 a 02/05/2009	-
Dragagem de aprofundamento: junho/2009 a julho de 2010		

Tabela 5.5: Levantamentos batimétricos e dragagens realizadas no Trecho 2, em ordem cronológica.

TRECHO 2		
Mês/ano	Período de sondagem	Observações
Dragagem de manutenção: março/1998 a junho/1998		
Dragagem de manutenção: julho/2000 a dezembro/2000		
Dragagem de manutenção: janeiro/2001 a maio/2001		
Dragagem de manutenção: agosto/2003 a setembro/2003		
Abril/2004	29/03/2004 a 02/04/2004	-
Maio/2004	27/04/2004 a 01/05/2004	Não abrange 2E e 2F.
Março/2005	10/03/2005 a 13/03/2005	-
Junho/2005	28/06/2005 e 29/06/2005	-
Janeiro/2006	07/01/2006 a 11/01/2006	-
Agosto/2006	09/08/2006 a 11/08/2006	-
Outubro/2006	11/10/2006 a 18/10/2006	-
Dragagem de manutenção: novembro/2006 a dezembro/2006		
Dragagem de manutenção: janeiro/2007 a maio/2007		
Junho/2007	10/06/2007	Não abrange 2E e 2F.
Outubro/2007	20/10/2007 a 23/10/2007	-
Março/2008	08/03/2008 a 11/03/2008	-
Janeiro/2009	07/01/2009 e 08/01/2009	-
Maio/2009	30/04/2009 a 02/05/2009	-
Dragagem de aprofundamento: junho/2009 a julho de 2010		

Tabela 5.6: Levantamentos batimétricos e dragagens realizadas no Trecho 3, em ordem cronológica.

TRECHO 3		
Mês/ano	Período de sondagem	Observações
Dragagem de manutenção: novembro/2000 a dezembro/2000		
Dragagem de manutenção: janeiro/2001, fevereiro/2001, abril/2001, maio/2001		
Abril/2004	29/03/2004 a 02/04/2004	-
Dragagem de manutenção: junho/2004		
Março/2005	10/03/2005 a 13/03/2005	-
Junho/2005	28/06/2005 e 29/06/2005	Não abrange 3H.
Janeiro/2006	07/01/2006 a 11/01/2006	-
Outubro/2007	20/10/2007 a 23/10/2007	-
Março/2008	08/03/2008 a 11/03/2008	-
Janeiro/2009	07/01/2009 e 08/01/2009	-
Maio/2009	30/04/2009, 01/02/2009 e 02/05/2009	-
Dragagem de aprofundamento: junho/2009 a julho de 2010		

Tabela 5.7: Levantamentos batimétricos e dragagens realizadas no Trecho 4, em ordem cronológica.

TRECHO 4		
Mês/ano	Período de sondagem	Observações
Dragagem de manutenção: janeiro/2001 a maio/2001		
Abril/2004	29/03/2004 a 02/04/2004	-
Dragagem de manutenção: junho/2004		
Julho/2004	08/07/2004 a 10/07/2004	-
Março/2005	10/03/2005 a 13/03/2005	-
Janeiro/2006	07/01/2006 a 11/01/2006	-
Junho/2006	01/06/2006 a 02/06/2006	-
Dragagem de manutenção: novembro/2006		
Maio/2007	17/05/2007	Só abrange 4I.
Junho/2007	11/06/2007 a 12/06/2007	Só abrange 4I.
Outubro/2007	20/10/2007 a 23/10/2007	-
Março/2008	08/03/2008 a 11/03/2008	-
Janeiro/2009	07/01/2009 a 08/01/2009	-
Maio/2009	30/04/2009 a 02/05/2009	-
Dragagem de aprofundamento: junho/2009 a julho de 2010		

5.4.2. Configuração geométrica posterior à dragagem de aprofundamento do Canal de Acesso ao Porto do Rio Grande

A fim de calcular as taxas de sedimentação após a dragagem de aprofundamento do Canal de Acesso ao Porto Novo considerou-se o traçado geométrico mais atual, isto é, o empregado como projeto para a dragagem com início em outubro de 2018. Isto se dá pelo fato de que o traçado sofreu algumas modificações desde a sua implantação, como alargamento ou estreitamento de determinados trechos. Desta maneira, buscou-se gerar dados com maior correlação possível ao traçado mais recente.

Subdivisão em setores

Seguindo a metodologia proposta por Bastos da Silva (2016), o traçado atual dos Canais Interno e Externo de Acesso ao Porto do Rio Grande (Trechos I, II, III, IV e V) (Figura 2.2) foi subdividido em retângulos, tornando possível avaliar o comportamento de cada trecho e compará-lo com os demais. Os retângulos de cada trecho foram nomeados conforme ordem alfabética, no sentido de Sul para Norte.

Os retângulos correspondentes a cada trecho deste traçado, bem como sua nomenclatura estão expostos nas figuras Figura 5.8, Figura 5.9, Figura 5.10, Figura 5.11 e Figura 5.12 para os Trechos I, II, III, IV e V, respectivamente.



Figura 5.8: Subdivisão em retângulos do Trecho I – Configuração posterior à dragagem de aprofundamento ocorrida nos anos de 2009 e 2010..

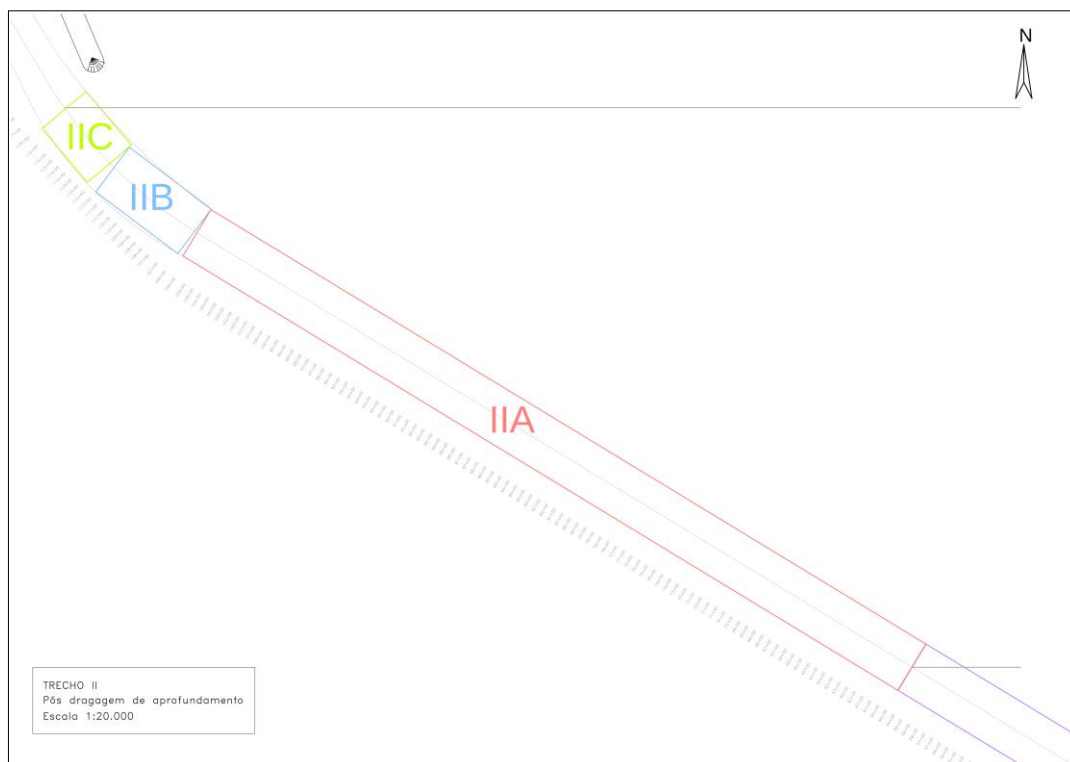


Figura 5.9: Subdivisão em retângulos do Trecho II – Configuração posterior à dragagem de aprofundamento ocorrida nos anos de 2009 e 2010.

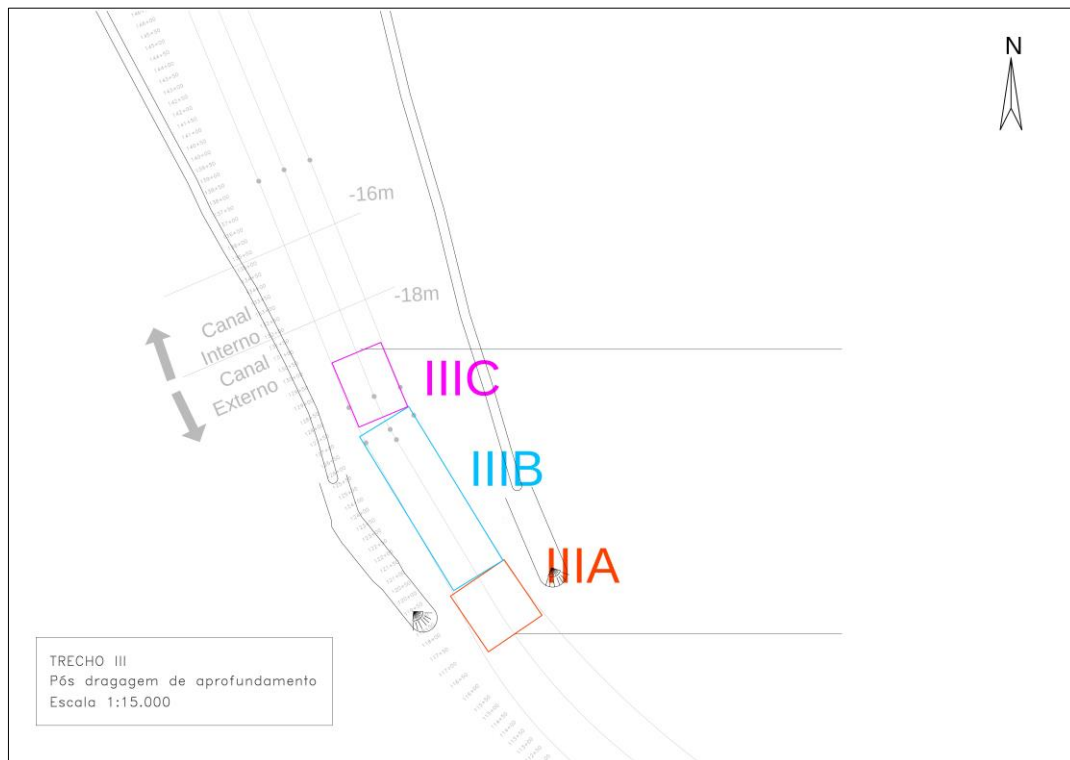


Figura 5.10: Subdivisão em retângulos do Trecho III – Configuração posterior à dragagem de aprofundamento ocorrida nos anos de 2009 e 2010.

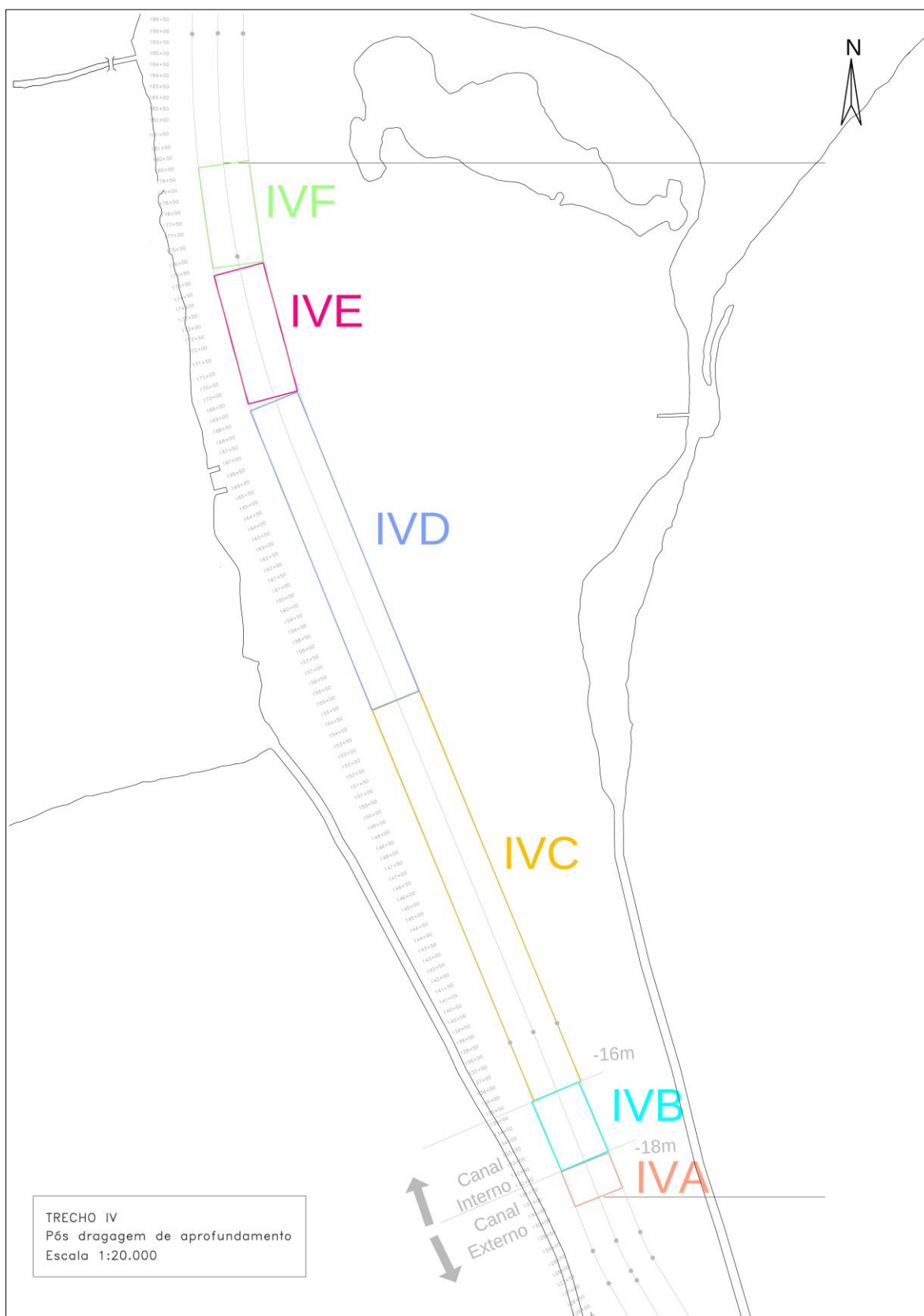


Figura 5.11: Subdivisão em retângulos do Trecho IV – Configuração posterior à dragagem de aprofundamento ocorrida nos anos de 2009 e 2010.

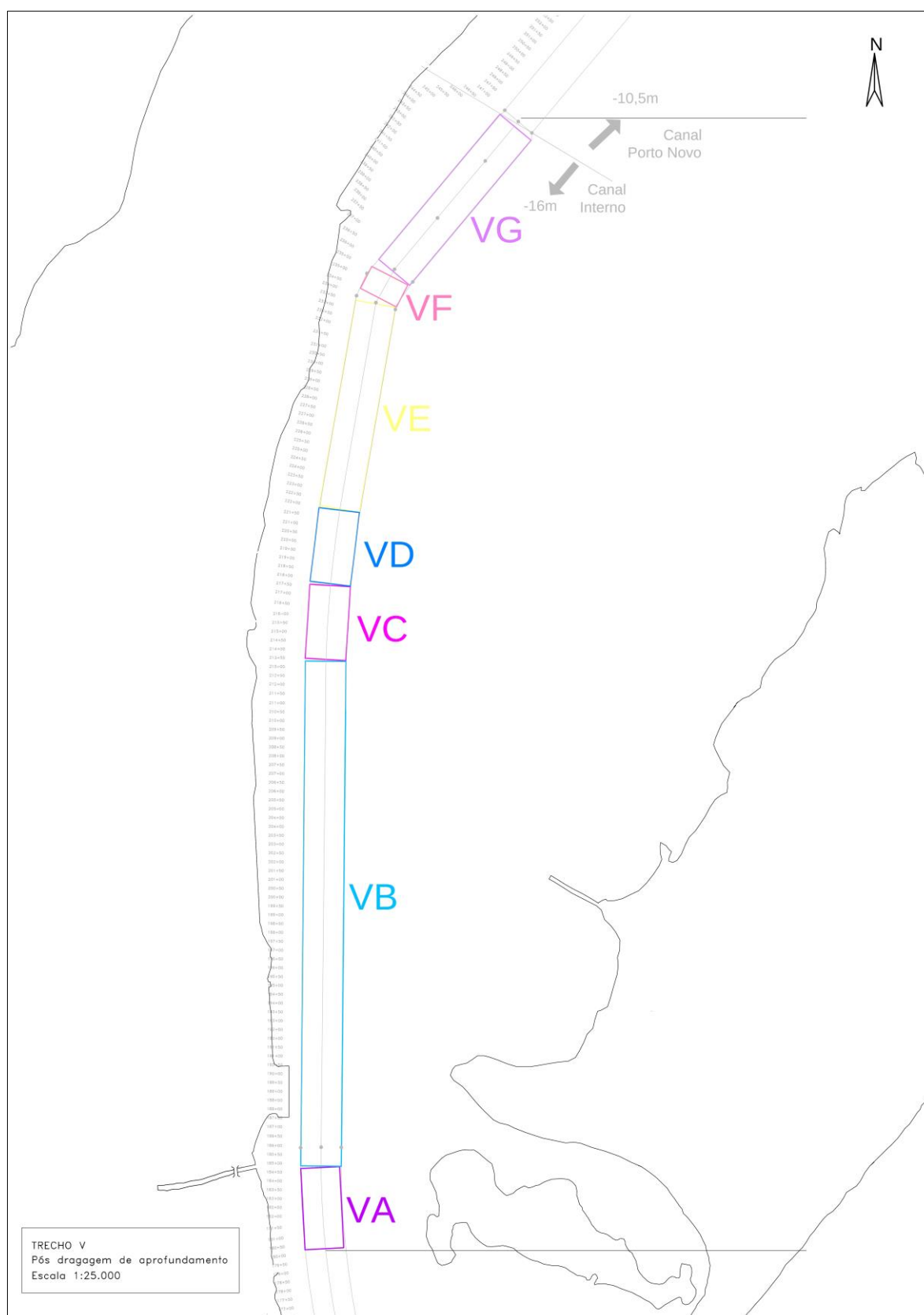


Figura 5.12: Subdivisão em retângulos do Trecho V – Configuração posterior à dragagem de aprofundamento ocorrida nos anos de 2009 e 2010.

Os canais interno e externo desta configuração geométrica ficaram representados por 20 retângulos, cujas coordenadas dos vértices estão apresentadas na Tabela 5.8. Observa-se que no Trecho IV, a rampa entre as seções 132,00+00 e 135,00+00, onde há o aumento gradual da cota de -18,00 metros para -16,00 metros (NR/DHN), ficou contida em um único retângulo (IVB), visto que apresenta configuração geométrica particular.

Destaca-se ainda que, na Tabela 5.8, o vértice 1 (X, Y) corresponde sempre ao vértice situado no canto inferior direito de cada retângulo e os demais são definidos a partir deste no sentido horário (vértice 2 no canto inferior esquerdo, vértice 3 no canto superior esquerdo, vértice 4 no canto superior direito).

Tabela 5.8: Coordenadas dos vértices dos retângulos correspondentes a cada trecho do traçado geométrico posterior à dragagem de aprofundamento. O vértice 1 corresponde ao canto inferior direito de todos os retângulos e os demais seguem no sentido horário em relação ao vértice 1.

Trecho	Ret.	Coord. UTM	Vértices			
			1	2	3	4
I	I	X	408462,6041	408306,8743	403178,5906	403334,3204
		Y	6431933,0240	6431676,6099	6434791,2056	6435047,6197
II	IIA	X	403332,6097	403176,8871	399210,9464	399366,6689
		Y	6435048,5581	6434792,1395	6437200,6482	6437457,0668
	IIB	X	399369,5140	399183,0392	398727,6952	398914,1700
		Y	6437461,1525	6437213,5093	6437556,3823	6437804,0255
	IIC	X	398925,6337	398681,2274	398429,4867	398673,8929
		Y	6437815,6877	6437609,1312	6437907,0013	6438113,5578
III	IIIA	X	398667,5237	398444,3194	398286,7722	398509,9764
		Y	6438102,4854	6437950,5648	6438182,0359	6438333,9565
	IIIB	X	398504,7052	398300,0121	397908,4413	398116,1343
		Y	6438330,7762	6438205,4735	6438845,1392	6438970,4419
	IIIC	X	398108,8308	397905,8444	397794,0199	397997,0063
		Y	6438970,1742	6438885,3419	6439152,9148	6439237,7472
IV	IVA	X	397997,8097	397784,3584	397721,0406	397934,4919
		Y	6439251,6922	6439166,0269	6439323,7953	6439409,4606
	IVB	X	397933,0479	397721,5194	397588,0195	397799,5480
		Y	6439416,8709	6439326,5621	6439639,2565	6439729,5652

Trecho	Ret.	Coord. UTM	Vértices			
			1	2	3	4
IV	IVC	X	397809,5942	397597,1073	396866,0740	397078,5610
		Y	6439733,3247	6439645,2949	6441409,8597	6441497,8899
	IVD	X	397077,5117	396864,4756	396314,1654	396527,2015
		Y	6441498,5475	6441411,8548	6442764,1709	6442850,8636
	IVE	X	396527,8986	396305,6895	396150,8484	396373,0575
		Y	6442855,4183	6442796,0626	6443375,7386	6443435,0943
	IVF	X	396372,7083	396145,0183	396079,9876	396307,6776
		Y	6443441,0108	6443408,4954	6443863,8755	6443896,3909
V	VA	X	396296,2910	396076,5857	396052,7862	396272,4916
		Y	6443903,4921	6443892,1097	6444351,4937	6444362,8760
	VB	X	396282,1568	396052,1670	396079,0779	396309,0677
		Y	6444364,9761	6444367,1403	6447227,0136	6447224,8495
	VC	X	396307,6391	396078,1041	396104,7994	396334,3343
		Y	6447228,3000	6447242,9188	6447662,0696	6447647,4508
	VD	X	396334,1314	396105,8087	396156,4389	396384,7616
		Y	6441650,7440	6447678,4701	6448095,4072	6448067,6812
	VE	X	398385,2952	396158,7955	396363,8764	396590,3761
		Y	648068,4653	6448108,4387	6449270,4808	6449230,5074
	VF	X	396594,1844	396389,9287	396454,2884	396658,5440
		Y	6449232,2441	6449337,9778	6449462,3073	6449356,5736
	VG	X	396669,7989	396493,2933	397179,3234	397355,8290
		Y	6449354,8115	6449502,2759	6450323,4109	6450175,9465

Na Tabela 5.9, estão apresentadas as dimensões e a área de cada retângulo, além do percentual total abrangido pelos retângulos de cada trecho. Destaca-se que a largura máxima dos retângulos respeitou a largura média do canal no respectivo trecho (os valores de largura média estão expostos na Tabela 2.2).

Tabela 5.9: Dimensões dos retângulos correspondentes ao traçado pós dragagem de aprofundamento e percentual de cobertura de cada trecho.

Trecho	Ret.	Dimensões (m)	Área (m ²)	Σ Área dos Retângulos (m ²)	Área do Trecho (m ²)	Percentual de cobertura do Trecho
I	I	300x6.000	1.800.000	1.800.000	1.800.000	100%
II	IIA	300x4.640	1.392.000	1.693.500	1.724.621,4442	98,20%
	IIB	310x570	176.700			
	IIC	320x390	124.800			
III	IIIA	270x280	75.600	319.400	331.447,8708	96,37%
	IIIB	240x750	180.000			
	IIIC	220x290	63.800			
IV	IVA	230x170	39.100	1.136.200	1.151.116,0204	98,70%
	IVB	230x340	78.200			
	IVC	230x1.910	439.300			
	IVD	230x1.460	335.800			
	IVE	230x600	138.000			
	IVF	230x460	105.800			
V	VA	220x460	101.200	1.501.900	1.536.983,9843	97,72%
	VB	230x2.860	657.800			
	VC	230x420	96.600			
	VD	230x420	96.600			
	VE	230x1.180	271.400			
	VF	230x140	32.200			
	VG	230x1.070	246.100			

Levantamentos batimétricos disponíveis e dragagens realizadas em cada trecho

Nesta etapa, foram levantadas as sondagens batimétricas disponíveis para cada retângulo, as quais foram organizadas em ordem cronológica, juntamente com o histórico de dragagens. Novamente, as sondagens que não cobriam o retângulo inteiro ou que foram realizadas durante períodos de dragagem (sondagens intermediárias) foram desconsideradas. Os levantamentos batimétricos e os períodos de dragagens de cada trecho estão apresentados nas Tabela 5.10, Tabela 5.11, Tabela 5.12, Tabela 5.13 e Tabela 5.14 para os Trechos I, II, III, IV e V, respectivamente.

Tabela 5.10: Levantamentos batimétricos e dragagens realizadas no Trecho I, em ordem cronológica.

TRECHO I		
Mês/ano	Período de sondagem	Observações
Dragagem de aprofundamento: junho/2009 a julho/2010		
Fevereiro/2011	01/02/2011 a 15/02/2011	-
Fevereiro/2014	24/02/2014	-
Novembro/2015	28/10/2015 a 04/11/2015	-
Fevereiro/2018	23/01/2018 a 15/02/2018	-

Tabela 5.11: Levantamentos batimétricos e dragagens realizadas no Trecho II, em ordem cronológica.

TRECHO II		
Mês/ano	Período de sondagem	Observações
Dragagem de aprofundamento: junho/2009 a julho/2010		
Fevereiro/2011	01/02/2011 a 15/02/2011	-
Dragagem emergencial: dezembro/2013 a janeiro/2014		
Novembro/2015	28/10/2015 a 04/11/2015	-
Fevereiro/2018	23/01/2018 a 15/02/2018	-

Tabela 5.12: Levantamentos batimétricos e dragagens realizadas no Trecho III, em ordem cronológica.

TRECHO III		
Mês/ano	Período de sondagem	Observações
Dragagem de aprofundamento: junho/2009 a julho/2010		
Fevereiro/2011	01/02/2011 a 15/02/2011	-
Dragagem de manutenção: dezembro/2011 a março/2012		
Dragagem emergencial: dezembro/2013 a fevereiro/2014		
Novembro/2015	28/10/2015 a 04/11/2015	-
Fevereiro/2018	23/01/2018 a 15/02/2018	-

Tabela 5.13: Levantamentos batimétricos e dragagens realizadas no Trecho IV, em ordem cronológica.

TRECHO IV		
Mês/ano	Período de sondagem	Observações
Dragagem de aprofundamento: junho/2009 a julho/2010		
Fevereiro/2011	01/02/2011 a 15/02/2011	-
Dragagem de manutenção: dezembro/2011 a março/2012		
Dragagem emergencial: dezembro/2013 a fevereiro/2014		
Novembro/2015	28/10/2015 a 04/11/2015	-
Fevereiro/2018	23/01/2018 a 15/02/2018	-

Tabela 5.14: Levantamentos batimétricos e dragagens realizadas no Trecho V, em ordem cronológica.

TRECHO V		
Mês/ano	Período de sondagem	Observações
Dragagem de aprofundamento: junho/2009 a julho/2010		
Fevereiro/2011	01/02/2011 a 15/02/2011	-
Dragagem de manutenção: dezembro/2011 a março/2012		
Dragagem emergencial: dezembro/2013 a fevereiro/2014		
Novembro/2015	28/10/2015 a 04/11/2015	-
Fevereiro/2018	23/01/2018 a 15/02/2018	-

É importante destacar que a dragagem de aprofundamento estabeleceu novas cotas de projeto para os trechos do Canal Interno e do Canal Externo, de -16,00 m e -18,00 m (NR/DHN), respectivamente. Na dragagem de manutenção realizada entre dezembro de 2011 e março de 2012, apenas os Trechos III, IV e V foram dragados. Por sua vez, a dragagem sucedida entre dezembro de 2013 e fevereiro de 2014 teve caráter emergencial e todo o canal de acesso foi dragado para a cota de -14,50 metros (NR/DHN).

A partir do exposto, destaca-se, portanto, que apenas o levantamento batimétrico de fevereiro de 2011 será analisado em relação à cota de projeto, a partir do qual serão definidas as taxas de sedimentação e erosão em relação a esta cota. Os levantamentos batimétricos de novembro de 2015 e fevereiro de 2018, por serem posteriores à dragagem de 2013/2014, serão analisados em relação à cota atingida de -14,50 metros. Além disso, ressalta-se que não foram encontrados levantamentos

batimétricos entre março de 2012 e dezembro de 2013, no período entre dragagens.

5.5. Tratamento dos dados batimétricos para elaboração de Modelos Digitais de Elevação (MDEs)

De posse dos levantamentos batimétricos selecionados e referenciados a um mesmo *datum*, os pontos (x, y, z) de todas as sondagens foram inseridos no *software* AutoCAD e delimitados pelos respectivos retângulos. Destaca-se que este procedimento foi realizado de forma separada para a configuração anterior e para a configuração posterior ao aprofundamento dos canais.

Em seguida, todos os pontos que excediam os limites de cada retângulo foram excluídos manualmente (etapa correspondente ao demonstrado na Figura 5.1). Cada conjunto de dados contido em um retângulo foi, então, rotacionado em torno do vértice inferior de menor coordenada y (ponto que estava mais abaixo), no sentido horário ou anti-horário, conforme o caso, com o intuito de que o alinhamento inferior de cada retângulo (entre os vértices 1 e 2) ficasse orientado na horizontal (etapa referente ao demonstrado na Figura 5.2). Destaca-se que este procedimento foi realizado para cada retângulo de maneira individual.

Após este procedimento, cada porção da sondagem delimitada por cada retângulo foi, então, extraída para um arquivo no formato .dxf e devidamente identificada conforme a data e o retângulo a que estava delimitada. Observa-se que, neste contexto, os pontos que delimitam os retângulos possuem coordenadas conhecidas e que, com a rotação dos dados, surge um sistema de referência diferente, cujos pontos não representam a localização real do retângulo. Cabe observar que, no programa AutoCAD, os pontos originais ou os pontos derivados de modelagem podem ser rotacionados novamente para sua posição original.

5.6. Elaboração de modelos digitais de elevação (MDEs)

A modelagem dos dados para confecção dos modelos digitais de elevação (MDEs) foi realizada no *software* SURFER®, utilizando a Krigagem como método de interpolação, conforme os a metodologia de Bastos da Silva (2016). Os arquivos .dxf, contendo os pontos referentes a um determinado levantamento batimétrico e a um determinado retângulo foram inseridos no *software* como dados de entrada. Para a interpolação, foram mantidas as configurações originais do método.

Destaca-se que os retângulos foram determinados, desde o início do processo, de forma que suas dimensões (arestas) fossem múltiplas de 10. Desta maneira, não foram necessários ajustes no limite das grades dos modelos digitais de elevação para fixar o intervalo de 10 metros entre nós. O espaçamento entre os nós seguiu a proposta de Bastos da Silva (2016), uma vez que as sondagens apresentavam espaçamento entre pontos compatíveis com esse valor.

Observa-se ainda que os limites das grades dos modelos digitais de elevação, no *software* SURFER®, são definidos com base em um sistema de referência cujas coordenadas não representam os vértices reais do retângulo.

5.7. Cálculo das taxas de sedimentação e erosão em relação às cotas atingidas após dragagens

As taxas de sedimentação e erosão, neste estudo, foram calculadas em relação às cotas atingidas após as dragagens (cotas de projeto). Desta maneira, o volume acima da cota de projeto será considerado assoreamento e o volume abaixo da cota de projeto será considerado erosão. Destaca-se, portanto, que volumes assoreados abaixo da cota de projeto, por exemplo, não serão contabilizados como assoreamento.

A abordagem proposta neste estudo engloba a necessidade de estimar taxas de sedimentação em relação às cotas de projeto, visto que estes serão os volumes que comprometem as operações portuárias e que serão efetivamente dragados.

Ressalta-se, ainda, que esta metodologia assume que todo o canal tem profundidade igual à cota de projeto na data de término das operações de dragagem. Esse pressuposto foi adotado pelo fato de que, embora durante operações de dragagem sejam realizados levantamentos batimétricos iniciais, intermediários e finais, foi encontrada grande dificuldade para localizar e identificar estas batimetrias com confiabilidade.

Os volumes de sedimentação (assoreamento) e de erosão foram calculados a partir da diferença entre as superfícies modeladas e a cota de projeto de cada trecho em relação ao NR/DHN, conforme demonstra a representação esquemática da Figura 5.13.

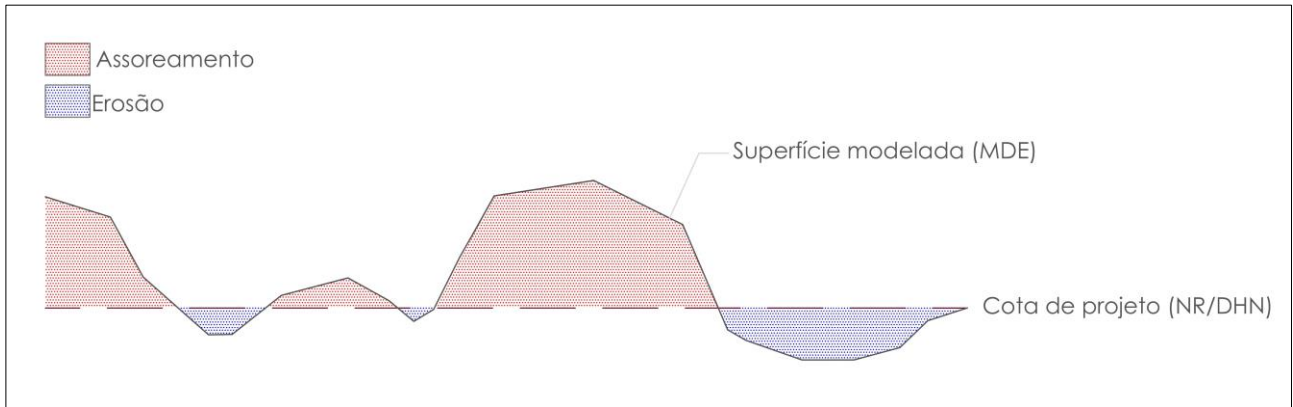


Figura 5.13: Representação esquemática do cálculo de volumes assoreado e erodido em relação à cota de projeto.

A taxa de sedimentação em relação à cota de projeto foi definida através da aplicação da Eq. (5.1) e a taxa de erosão em relação à cota de projeto foi definida através da aplicação da Eq. (5.2), apresentadas a seguir. Destaca-se que as taxas foram calculadas para cada retângulo, utilizando cada modelo digital de elevação gerado através de cada levantamento batimétrico disponível.

$$T_{\text{sedimentação}} = \frac{V_{\text{assoreado}}}{A_t \cdot t_{d-b}} \cdot 100 \left[\frac{\text{cm}}{\text{mês}} \right] \quad (5.1)$$

$$T_{\text{erosão}} = \frac{V_{\text{erodido}}}{A_t \cdot t_{d-b}} \cdot 100 \left[\frac{\text{cm}}{\text{mês}} \right] \quad (5.2)$$

Sendo:

$T_{\text{sedimentação}}$ = taxa de sedimentação em relação à cota de projeto (cm/mês);

$T_{\text{erosão}}$ = taxa de erosão em relação à cota de projeto (cm/mês);

$V_{\text{assoreado}}$ = volume acima da cota de projeto (m^3);

V_{erodido} = volume abaixo da cota de projeto (m^3);

A_t = área total em planta (m^2);

t_{d-b} = tempo decorrido entre a dragagem e o levantamento batimétrico (meses).

Para contagem do número de meses, foi considerado o número de dias entre o último dia da operação de dragagem anterior ao levantamento batimétrico considerado (quando a data oficial não

era conhecida) e o último dia do período de sondagem deste levantamento. Em seguida, o número de meses foi encontrado por meio da divisão entre o número de dias por 30 (considerando que cada mês tem aproximadamente 30 dias).

Além disso, foram calculados o volume assoreado por mês, o volume erodido por mês, conforme a Eq. (5.3) e a Eq. (5.4):

$$V_{\text{sedimentação}} = \frac{V_{\text{assoreado}}}{t_{d-b}} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{mês}} \right] \quad (5.3)$$

$$V_{\text{erosão}} = \frac{V_{\text{erodido}}}{t_{d-b}} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{mês}} \right] \quad (5.4)$$

O cálculo das taxas de sedimentação e de erosão para os retângulos referentes à configuração anterior à dragagem de aprofundamento obedeceu à metodologia proposta, sendo todos calculados em relação à cota de projeto de -14,00 metros (NR/DHN), constante para todos os trechos.

Já para o cálculo destas taxas de sedimentação e erosão para os retângulos referentes à configuração posterior à dragagem de aprofundamento, duas situações foram encontradas:

- (i) para o MDE gerado a partir do levantamento batimétrico de fevereiro de 2011, as taxas foram calculadas tendo como referência as cotas de projeto de cada um dos trechos (conforme Tabela 2.2). Além disso, destaca-se que o retângulo IVB, situado no Trecho IV, é caracterizado por possuir no fundo rampa de transferência entre as cotas de -18,00 metros e -16,00 metros (Figura 5.14). Esta configuração do fundo foi a considerada para o cálculo das taxas neste retângulo.

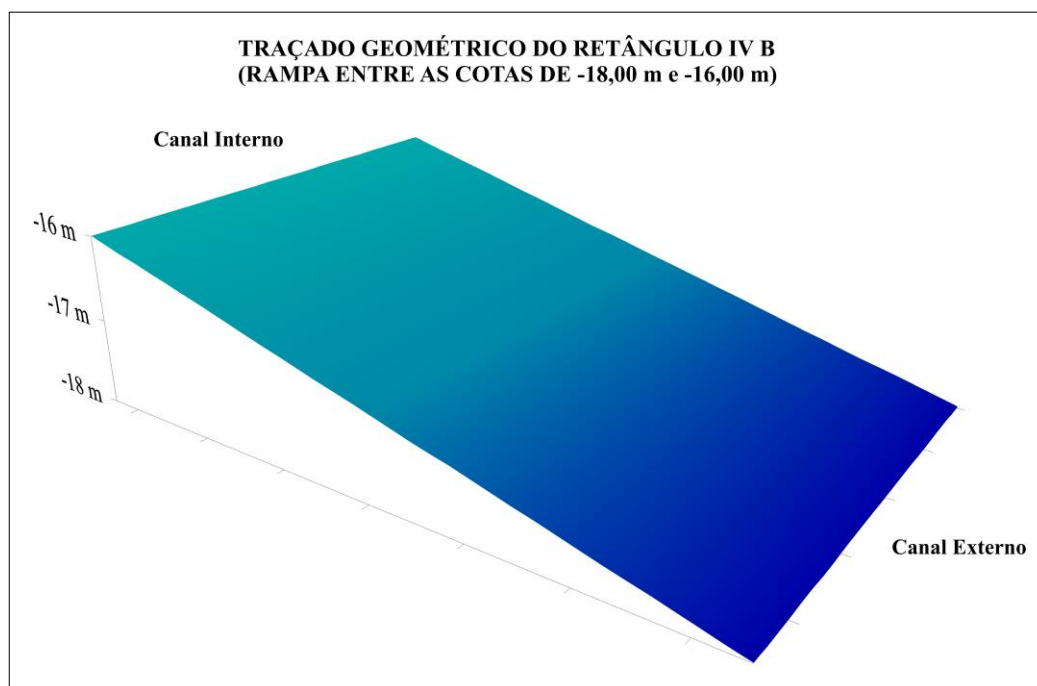


Figura 5.14: Traçado geométrico do retângulo IV B, onde há o aumento gradual da cota de projeto, de -18,00 a -16,00 m (NR/DHN).

- (ii) para os MDEs gerados a partir dos levantamentos batimétricos de novembro de 2015 e fevereiro de 2018, as taxas foram calculadas tendo como referência a cota atingida após a dragagem emergencial terminada em fevereiro de 2014, de -14,50 m (NR/DHN) em todos os trechos.

A taxa média de sedimentação de cada retângulo foi estimada através da média aritmética das taxas de sedimentação obtidas a partir da última batimetria disponível antes de cada dragagem. O mesmo procedimento foi utilizado para estimar a taxa média de erosão de cada retângulo. A escolha por essa opção levou em conta que a última batimetria disponível antes da dragagem englobaria a maior parte dos fenômenos de diferentes escalas espaciais e temporais que podem imprimir diferentes condicionantes de deposição ou erosão de sedimentos nos ambientes em questão. Além disso, por não haver periodicidade regular na realização de levantamentos batimétricos, torna-se impraticável padronizar outra forma para determinação de quais levantamentos batimétricos seriam considerados na estimativa das taxas médias.

Por fim, a taxa média de sedimentação de cada trecho foi obtida pela média aritmética das taxas de sedimentação dos retângulos que o compõem. O mesmo procedimento foi utilizado na determinação da taxa média de erosão de cada trecho.

5.8. Elaboração de mapas de evolução do fundo em relação às cotas de projeto para o traçado geométrico atual do canal do Porto do Rio Grande

A fim de analisar a evolução do fundo, foram elaborados mapas de erosão e deposição em relação à cota de projeto ou à cota atingida após a dragagem, quando esta for diferente da cota de projeto, como no caso da dragagem emergencial de 2013/2014. A partir deste produto, é possível avaliar o comportamento do fundo no período pós-dragagem e torna-se possível identificar zonas com tendência ao aporte de sedimentos (zonas críticas) ou a possuir profundidades superiores à profundidade de projeto.

Os mapas foram gerados com valores de Z iguais ao valor de profundidade modelado menos a cota de projeto ou cota atingida com a dragagem, como descreve a Eq. (5.5):

$$\Delta Z_{(x,y)} = Z_{\text{modelado}_{(x,y)}} - Z_{\text{projeto}_{(x,y)}} \quad (5.5)$$

Sendo:

$\Delta Z_{(x,y)}$ = a subtração das profundidades no ponto (x, y) determinado, parâmetro que é representado no mapa de deposição e erosão em relação ao gabarito;

$Z_{\text{modelado}_{(x,y)}}$ = valor modelado da profundidade através da interpolação no ponto (x, y) determinado;

$Z_{\text{projeto}_{(x,y)}}$ = a cota de projeto no ponto (x, y) determinado ou cota atingida após a dragagem emergencial, conforme o caso.

Observa-se que a cota de projeto ($Z_{\text{projeto}_{(x,y)}}$) varia conforme o trecho e o período analisado.

Os valores para as cotas de projeto estão apresentados na Tabela 2.2 para a configuração do canal posterior à dragagem de aprofundamento. Para o retângulo IVB destaca-se que foi considerada como referência, novamente, a rampa apresentada na Figura 5.14. Além disso, para a elaboração de mapas de erosão e acresção após a dragagem emergencial de 2013/2014 foi considerada a cota atingida após a dragagem, isto é, -14,50 metros (NR/DHN), uma vez que não foi atingida a cota de projeto nessa obra.

Foi adotada uma escala de tons azulados para locais de erosão e de tons avermelhados para a deposição de sedimentos, isto é, assoreamento. Esse procedimento foi realizado com o intuito de definir as zonas críticas, onde o processo de deposição de sedimentos em relação à cota de projeto é

mais significativo. Destaca-se que, conforme procedimento adotado por Bastos da Silva (2016), considerou-se como estável as regiões com variações de $\pm 0,25$ metro em relação à cota de projeto, sendo representadas na cor branca.

5.9. Levantamento e análise de dados sedimentológicos

A fim de analisar o processo de sedimentação em cada trecho juntamente com dados sedimentológicos, foram coletados testemunhos ao longo do Canal de Acesso ao Porto do Rio Grande. O embarque para coleta dos dados foi realizado em 25/10/2018, por meio da lancha de pesquisa Larus da Universidade Federal do Rio Grande. Esta atividade foi custeada através de recursos disponibilizados pelo Programa de Apoio à Pós-Graduação (PROAP) da mesma universidade.

Para coleta dos testemunhos, foi utilizado um amostrador onde foi acoplado um tubo de PVC de 75 milímetros de diâmetro e, inicialmente, 2 metros de comprimento. O equipamento opera em queda livre e após penetrar no fundo, é recuperado através de um cabo conectado a um guincho da embarcação (Figura 5.15). Ao ser içado, o equipamento libera uma trava, situada na sua parte superior, gerando uma pressão de sucção sobre a amostra presente dentro do cano que, junto ao atrito entre o sedimento e as paredes do tubo, aprisionam a amostra no interior do tubo de PVC.

Após a coleta, cada tubo contendo a amostra foi devidamente identificado com a nomenclatura do ponto a que pertencia e com a indicação da posição do topo e da base da amostra.



Figura 5.15: Equipamento utilizado para coleta de testemunhos (amostrador).

Para cada ponto, o comprimento inicial dos testemunhos era de 2 metros. Entretanto, devido à velocidade das correntes, à deriva da embarcação e à natureza do fundo, a extensão do tubo teve de ser reduzida para tornar possível a coleta em alguns casos.

Os pontos de coleta dos testemunhos foram pré-determinados tendo-se como objetivo obter, no mínimo, um testemunho por trecho. Desta forma, foram coletados 5 testemunhos na região de interesse deste estudo (Canal Interno e Canal Externo), nos pontos de coordenadas apresentados na Tabela 5.15 e no mapa exposto na Figura 5.16. Destaca-se que devido às condições climáticas e hidrodinâmicas no dia do embarque, não foi possível a coleta de testemunhos na porção do canal externa aos Molhes da Barra do Rio Grande.

Tabela 5.15: Coordenadas UTM dos pontos de coleta dos testemunhos.

Identificação do testemunho	Trecho/Retângulo a que pertence	Coordenadas UTM	
		X (m)	Y (m)
4	V/VC	396196,80	6447323,98
5	IV/IVD	396934,70	6441555,42
6	III/IIIB	398247,30	6438567,91
10	V/VB	396189,90	6444919,98
12	V/VG (margem leste externa ao retângulo)	397012,32	6450345,93

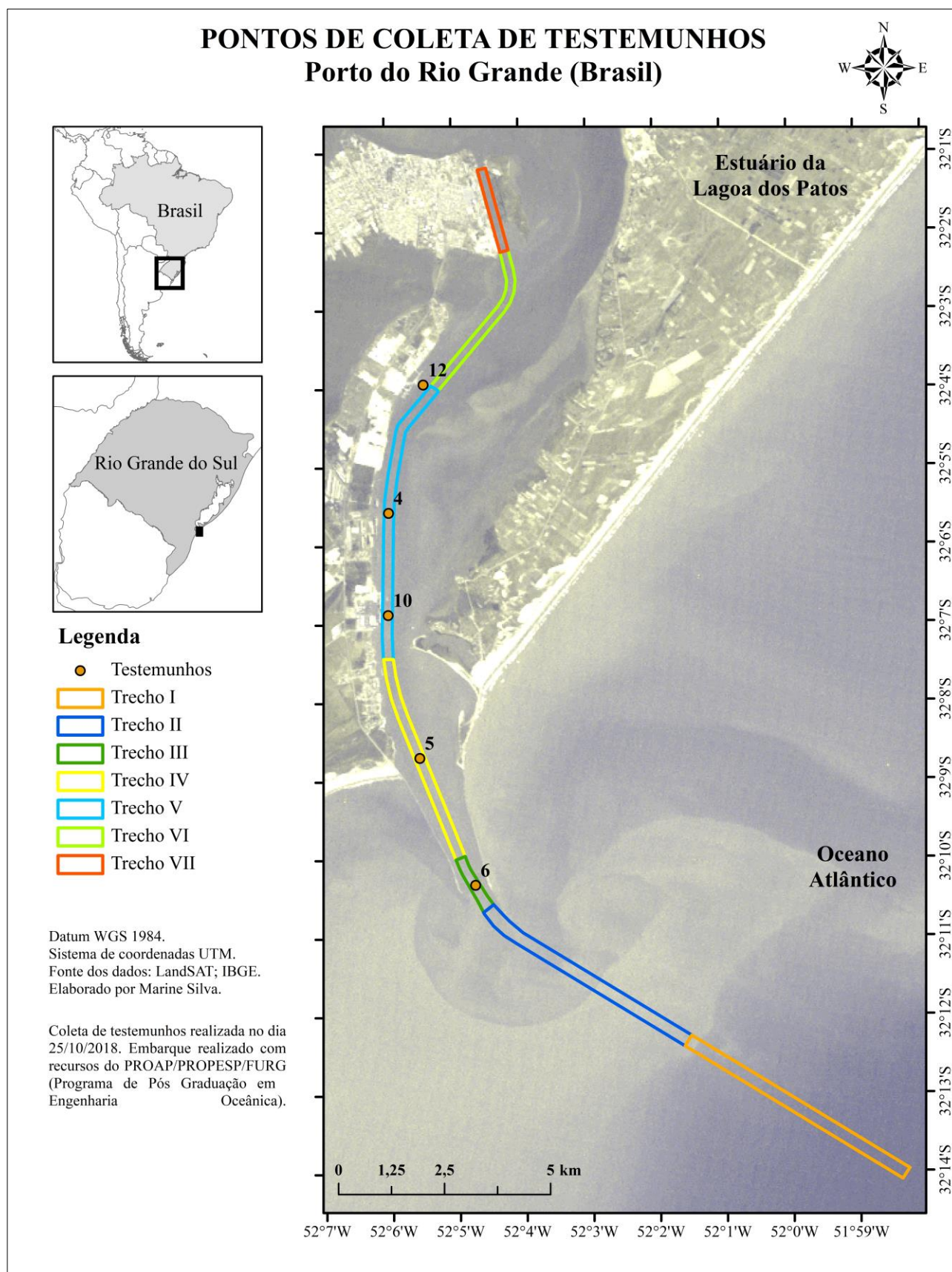


Figura 5.16: Mapa de localização dos testemunhos coletados na área de estudo.

Os testemunhos coletados foram cortados e analisados no Laboratório de Sedimentologia (IO/FURG). O corte foi realizado em uma mesa especial (Figura 5.17) e com o auxílio de uma serra de corte circular. O procedimento foi realizado de forma que a amostra fosse preservada e suas condições fossem mantidas.



Figura 5.17: Corte e abertura dos testemunhos em mesa especial e utilizando serra de corte.

A partir dos testemunhos abertos, analisou-se a textura e as características granulométricas de cada camada (Figura 5.18). Destaca-se que, por não haver tempo hábil, não foram realizadas análises granulométricas pelos métodos tradicionais, procedimento que será realizado futuramente.



Figura 5.18: Análise dos testemunhos.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Configuração do traçado geométrico anterior à dragagem de aprofundamento

A partir da metodologia apresentada, foram calculadas as taxas de sedimentação e de erosão em relação à cota de projeto para os trechos da configuração anterior à dragagem de aprofundamento do Canal Interno e do Canal Externo de Acesso ao Porto do Rio Grande.

Destaca-se que todos os trechos analisados nesse estudo (trechos 1, 2, 3 e 4) têm como cota de projeto -14,00 metros (NR/DHN). Estes trechos foram subdivididos em retângulos, conforme a metodologia proposta por Bastos da Silva (2016), e as taxas de sedimentação e de erosão de cada retângulo estão apresentadas nas tabelas inseridas no APÊNDICE A – Taxas de sedimentação e de erosão de cada retângulo da configuração anterior à dragagem de aprofundamento do Porto do Rio Grande.

As taxas médias de sedimentação e de erosão de cada retângulo, apresentadas na Tabela 6.1, foram definidas a partir da média aritmética das taxas referentes a última batimetria antes de cada dragagem. Essas taxas utilizadas para o cálculo da média aritmética encontram-se destacadas em azul nas respectivas tabelas do Apêndice A.

Tabela 6.1: Taxas médias de sedimentação e de erosão de cada retângulo e de cada trecho em relação à cota de projeto.

Trecho	Ret.	Taxa média de sedimentação (cm/mês)	Taxa média de erosão (cm/mês)	Taxa média de sedimentação (cm/mês)	Taxa média de erosão (cm/mês)
1	1A	1,67	2,05	2,31	1,18
	1B	2,79	0,70		
	1C	2,47	0,80		
2	2A	2,30	0,35	1,97	4,57
	2B	0,88	2,74		
	2C	0,00	11,29		
	2D	0,21	12,83		
	2E	2,97	0,17		
	2F	5,45	0,01		
3	3A	0,29	2,32	0,05	4,61
	3B	0,02	3,16		
	3C	0,00	3,95		
	3D	0,00	4,46		
	3E	0,00	5,00		
	3F	0,00	7,75		
	3G	0,00	7,21		
	3H	0,09	3,04		
4	4A	0,17	2,54	0,50	4,28
	4B	0,02	6,99		
	4C	0,00	11,47		
	4D	0,00	0,15		
	4E	0,00	9,08		
	4F	0,01	4,73		
	4G	0,23	2,59		
	4H	0,93	0,91		
	4I	3,16	0,05		

A partir dos dados apresentados de taxa de sedimentação e erosão de cada retângulo do traçado anterior à dragagem de aprofundamento (Tabela 6.1), observa-se que no Trecho 1, as maiores taxas de sedimentação foram de 2,79 cm/mês no retângulo 1B e de 2,47 cm/mês no retângulo 1C, enquanto

que o retângulo 1A apresentou taxa de sedimentação de 1,67 cm/mês. O testemunho 34, apresentado na Figura 4.14 e localizado neste trecho, indica a presença de camadas de lama intercaladas com areia fina com biodetritos calcários. Destaca-se este trecho localiza-se na zona externa aos Molhes da Barra do Rio Grande, onde há uma redução gradativa das velocidades das correntes em situação de vazante, conforme Figura 4.7. As correntes de enchente, por sua vez, apresentam valores próximos a zero, conforme apresentado na Figura 4.8. Desta maneira, sugere-se que a deposição de lama ocorra devido ao fluxo de vazante, enquanto que a deposição de areia fina se dê por agentes hidrodinâmicos costeiros, como ondas e correntes longitudinais. Para o Trecho 1, a taxa de sedimentação média ficou em 2,31 cm/mês e a taxa de erosão média foi de 1,18 cm/mês, indicando que há regiões com tendência a possuírem profundidades maiores que a profundidade de projeto.

Para o Trecho 2, composto por 6 retângulos, as maiores taxas de sedimentação encontram-se nas regiões delimitadas pelos retângulos 2F, 2E e 2A, sendo de 5,45 cm/mês, 2,97 cm/mês e 2,30 cm/mês, nesta ordem (Tabela 6.1). Por sua vez, o retângulo 2C apresentou taxa nula de sedimentação em todo o período analisado (Tabela 6.1), exibindo profundidades menores que a profundidade de projeto apenas nos dados de maio de 2004, conforme Tabela A.6. Comportamento quase que semelhante foi observado para o retângulo 2D, onde apenas nas sondagens de janeiro de 2009 e maio de 2009 foram observados valores de taxas de sedimentação acima de zero (Tabela A.7), o que gerou uma taxa média de sedimentação média de 0,21 cm/mês. Nestes setores, 2C e 2D, as taxas de erosão médias de 11,29 e 12,83, ambas em cm/mês (Tabela 6.1), demonstram uma tendência de as profundidades permanecerem abaixo da cota de projeto neste trecho. O retângulo 2B, por sua vez, apresentou uma taxa de sedimentação de 0,88 cm/mês e taxa de erosão de 2,74 cm/mês (Tabela 6.1).

Os retângulos 2A, 2B, 2C e 2D localizavam-se na área externa, enquanto que os retângulos 2E e 2F encontravam-se situados na zona abrigada pelos molhes (Figura 5.5). Toda a região do Trecho 2 insere-se em uma zona de hidrodinâmica moderada a muito alta, conforme pode ser observado nas modelagens hidrodinâmicas para situação de vazante (Figura 4.7) e situação de enchente (Figura 4.8) e, também, na análise realizada por Antiqueira e Calliari (2005) (Figura 4.11).

No setor 2F, os testemunhos F2 e E (Figura 4.14), apresentados por Antiqueira e Calliari (2005), indicam a predominância da deposição de lama ao longo da profundidade, sendo observadas pequenas regiões com deposição de areia ou areia fina com biodetritos calcários. Infere-se que, embora sejam moderadas as velocidades de correntes de vazante neste local, a sedimentação na porção norte desde retângulo seja devido ao contato do material fino em suspensão na água doce com a água mixohalina, semelhante ao que Duprat (1944, apud Calliari, 1980) sugeriu para a Bacia do Porto Novo. Já na porção sul do retângulo 2F, situada em região de hidrodinâmica mais alta, os

testemunhos D e 32 (Figura 4.14) indicam maior presença de lama arenosa, com pequenas intercalações de areia lamosa no testemunho 32. O testemunho E1 (Figura 4.14), por sua vez, apresenta uma espessa camada de lama no seu topo, seguido por camadas de areia e areia lamosa. Essas observações acerca de sedimentologia indicam a presença de um fluxo hidrodinâmico bidirecional na região, no qual correntes de enchente, de menores velocidades, carregam sedimentos mais grossos que se depositam no canal, e correntes de vazante, mais intensas, carregam sedimentos mais finos que precipitam sobre o fundo em contato com a água mais salgada.

O setor 2E, situado, na época, na desembocadura dos Molhes da Barra, também apresentou taxa de sedimentação elevada (2,97 cm/mês) e taxa de erosão média 0,17 cm/mês (Tabela 6.1). O testemunho D2 (Figura 4.14), localizado na porção sul deste retângulo, mostra intercalações mais frequentes de camadas de lama, lama arenosa e areia, reforçando a indicação de um fluxo bidirecional nesta região, onde há uma ação marinha mais acentuada.

Destaca-se que a porção sul do setor 2F e o setor 2E situam-se em locais de altas velocidades de correntes de vazante (Figura 4.7) e das maiores velocidades de correntes de enchente (Figura 4.8).

Nos setores 2C e 2D, situados entre a zona abrigada e a zona externa aos molhes, as taxas de sedimentação foram nulas ou baixas, de 0 cm/mês e 0,21 cm/mês, respectivamente. Já as taxas de erosão médias foram expressivas e atingiram 11,29 cm/mês e 12,83 cm/mês, na mesma ordem (Tabela 6.1). Destaca-se, portanto, a tendência destes setores de apresentarem profundidades maiores que a profundidade de projeto. Embora não haja dados de testemunhos disponíveis para estes retângulos, pode-se inferir, com base na Figura 4.7, que há um intenso fluxo de vazante neste local e que as correntes podem, ainda, sofrer uma aceleração em virtude da redução de área gradual entre os molhes em direção ao mar. Esse comportamento não possibilitaria, desta maneira, a precipitação expressiva de sedimentos finos no local.

O setor 2A, por fim, também representativo em termos de assoreamento, apresentou taxa média de sedimentação de 2,30 cm/mês e taxa média de erosão de 0,35 cm/mês (Tabela 6.1). Este retângulo está situado na zona externa aos molhes, onde as correntes de vazante perdem velocidade e há uma inflexão do traçado para sudeste.

De forma geral, observa-se que o Trecho 2, do traçado anterior à dragagem de aprofundamento, apresentou taxa de sedimentação média de 1,97 cm/mês e taxa de erosão média total de 4,57 cm/mês (Tabela 6.1), sendo essa última o reflexo, principalmente, do comportamento observado nos retângulos 2D e 2C. Esse trecho configura uma área crítica na região entre os Molhes da Barra do Rio Grande.

O Trecho 3, localizado na parte abrigada do Canal de Acesso ao Porto do Rio Grande (Figura

5.6), apresentou comportamento peculiar, uma vez que todas as taxas de sedimentação médias observadas foram iguais ou próximas a zero. As taxas de erosão médias observadas, por sua vez, foram maiores, indicando que este trecho possuía uma tendência de apresentar profundidades superiores a -14,00 metros (NR/DHN), cota de projeto naquela época. Este trecho foi o que apresentou a menor taxa de sedimentação média, atingindo apenas 0,05 cm/mês (Tabela 6.1). Por outro lado, a taxa de erosão média foi de 4,61 cm/mês, em relação à cota de projeto (Tabela 6.1). Esse setor situa-se às margens do Terminal de Contêineres (TECON), do Terminal Marítimo Luiz Fogliatto S/A – TERMASA e do Terminal Graneleiro S/A – TERGRASA.

O testemunho 31, apresentado na Figura 4.14 e localizado na porção inferior da margem oeste do retângulo 3A, indica a predominância de lama arenosa, intercalada com lentes menos espessas de lama com biodetritos calcários. O testemunho 30 (Figura 4.13), por sua vez, localiza-se na margem leste do retângulo 3E e apresenta intercalações frequentes de lama e areia. Os testemunhos 29 e 35 (Figura 4.13), localizam-se na porção sul e na porção norte do setor 3G, respectivamente. O testemunho 29 caracteriza-se por intercalações de lama e biodetritos calcários com matriz arenosa, tendo, no seu topo, uma camada de areia. O testemunho 35, por sua vez, apresenta predominância de lama ao longo de sua profundidade, com intercalações de camadas menos espessas de biodetritos calcários com matriz arenosa. O testemunho 27 (Figura 4.13) está localizado na porção central superior do retângulo 3H e apresentou apenas uma camada de lama ao longo dos 60 centímetros coletados. O testemunho 25 situa-se na margem leste do retângulo 3H e apresenta grande quantidade de lama com pequenas lentes de areia, intercaladas. Por último, os testemunhos 28, G e H2 estão situados na margem leste do mesmo setor apresentam camadas de lama, predominantemente, intercaladas com biodetritos calcários com matriz arenosa ou lama com biodetritos calcários. No testemunho G destaca-se a presença de uma camada representativa de areia fina com biodetritos calcários no seu topo.

A análise conjunta de todos os testemunhos pertencentes ao Trecho 3 reforça que a circulação hidrodinâmica é controlada, principalmente, pelo fluxo bidirecional (enchente e vazante) na região. Destaca-se que a porção sul do Trecho 3 apresenta as maiores velocidades de vazante observadas no canal, conforme Figura 4.7, e, além disso, as velocidades de enchente são moderadas (Figura 4.8). Pode-se inferir que, nesta região, as águas têm grande capacidade de ressuspender e transportar os sedimentos, sendo a profundidade de equilíbrio do ambiente inferior à cota de projeto de -14,00 metros (NR/DHN), o que refletiu em taxas médias de sedimentação nulas na maior parte dos dados analisados.

Por fim, as considerações feitas para o Trecho 3 também são extensíveis ao Trecho 4, que

apresentou comportamento semelhante. A taxa de sedimentação média encontrada foi de 0,50 cm/mês e a taxa de erosão média encontrada foi de 4,28 cm/mês (Tabela 6.1). Os retângulos 4I, 4H e 4G foram os que apresentaram maiores taxas de sedimentação de 3,16 cm/mês, 0,93 cm/mês e 0,23 cm/mês (Tabela 6.1), respectivamente. Destaca-se ainda que os retângulos 4C e 4E foram os que se destacaram com as maiores taxas de erosão, sendo elas de 11,47 e 9,08 cm/mês (Tabela 6.1), nesta ordem. Observa-se que no Trecho 4, conforme Figura 4.7, o fluxo de vazante atinge menores velocidades de corrente, quando comparadas aos demais setores do Canal Interno. Destaca-se que as velocidades são decrescentes em direção ao norte, podendo ser a condição que favorece a deposição de sedimentos na porção norte deste trecho.

6.2. Configuração do traçado geométrico posterior à dragagem de aprofundamento

As taxas de sedimentação e erosão para os retângulos referentes a cada trecho estão apresentadas nas tabelas inseridas no APÊNDICE B – Taxas de sedimentação e de erosão de cada retângulo da configuração posterior à dragagem de aprofundamento do Porto do Rio Grande. Ressalta-se que, nas tabelas, estão destacadas em azul os valores adotados para a determinação das taxas de sedimentação e erosão médias em relação à cota de projeto de cada retângulo, enquanto que os valores destacados em verde foram empregados para a determinação das taxas médias de sedimentação e erosão de cada trecho em relação à cota atingida com a dragagem emergencial, de -14,50 m (NR/DHN).

As taxas de sedimentação e de erosão médias calculadas para cada retângulo do traçado posterior à dragagem de aprofundamento, em relação à cota de projeto, estão apresentadas na Tabela 6.2, assim como as taxas médias de cada trecho, obtidas pela média das taxas dos retângulos. Já as taxas médias calculadas em relação à cota atingida com a dragagem emergencial (-14,50 metros em relação ao NR/DHN) estão apresentadas na Tabela 6.3.

Tabela 6.2: Taxas médias de sedimentação e de erosão de cada retângulo e de cada trecho em relação à cota de projeto. Traçado geométrico atual.

Taxas calculadas em relação à cota de projeto de cada setor					
Trecho	Ret.	Taxa média de sedimentação (cm/mês)	Taxa média de erosão (cm/mês)	Taxa média de sedimentação (cm/mês)	Taxa média de erosão (cm/mês)
I	I	0,56	0,23	0,56	0,23
II	IIA	28,65	0,00	18,06	0,72
	IIB	20,08	0,00		
	IIC	5,45	2,16		
III	IIIA	0,03	13,17	24,80	5,29
	IIIB	23,27	2,70		
	IIIC	51,09	0,00		
IV	IVA	51,23	0,00	22,76	0,00
	IVB	36,56	0,00		
	IVC	24,10	0,00		
	IVD	15,51	0,00		
	IVE	5,51	0,00		
	IVF	3,65	0,04		
V	VA	0,44	1,77	6,65	5,22
	VB	3,06	7,10		
	VC	9,30	0,39		
	VD	9,56	0,85		
	VE	4,28	12,31		
	VF	0,32	12,47		
	VG	19,58	1,63		

Tabela 6.3: Taxas médias de sedimentação e de erosão de cada retângulo e de cada trecho em relação à cota de atingida na dragagem emergencial. Traçado geométrico atual.

Taxas calculadas em relação à cota atingida na dragagem emergencial (-14,5 m NR/DHN)					
Trecho	Ret.	Taxa média de sedimentação (cm/mês)	Taxa média de erosão (cm/mês)	Taxa média de sedimentação (cm/mês)	Taxa média de erosão (cm/mês)
I	I	-	-	-	-
II	IIA	0,27	0,88	0,84	1,28
	IIB	2,12	0,00		
	IIC	0,12	2,95		
III	IIIA	0,00	11,85	0,77	5,31
	IIIB	0,71	4,01		
	IIIC	1,59	0,06		
IV	IVA	1,78	0,00	1,17	1,49
	IVB	2,03	0,00		
	IVC	2,60	0,00		
	IVD	0,62	1,05		
	IVE	0,00	3,41		
	IVF	0,00	4,48		
V	VA	0,00	5,27	0,16	3,80
	VB	0,00	4,07		
	VC	0,00	2,24		
	VD	0,00	2,56		
	VE	0,00	4,82		
	VF	0,00	5,81		
	VG	1,09	1,81		

Os mapas de acresção e erosão, elaborados com o intuito de analisar a evolução do fundo ao longo do tempo dos trechos pertencentes ao traçado atual do Canal Interno e do Canal Externo de Acesso ao Porto do Rio Grande, são apresentados a seguir.

A evolução do Trecho I está apresentada no mapa da Figura 6.1. Destaca-se que o Trecho I foi submetido à dragagem de aprofundamento apenas. Dessa forma, apresenta-se a evolução do fundo em relação à cota de projeto de -18,00 metros (NR/DHN), considerada como atingida no término da dragagem (julho de 2010).

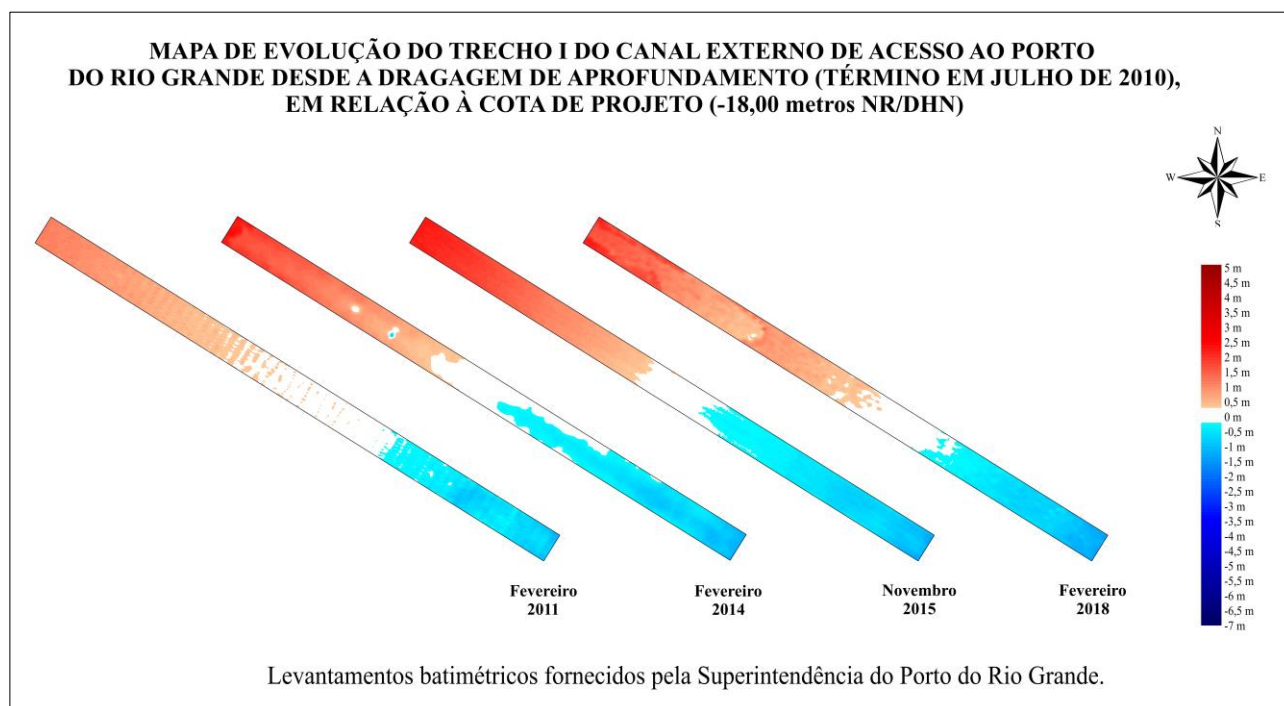


Figura 6.1: Mapa de evolução do fundo do Trecho I do Canal Externo de Acesso ao Porto do Rio Grande entre julho de 2010 (término da dragagem de aprofundamento) e fevereiro de 2018.

O Trecho I, localizado na região costeira adjacente, sofreu apenas uma operação de dragagem, quando foi incorporado ao traçado geométrico do Porto do Rio Grande. A taxa de sedimentação média deste trecho foi de 0,56 cm/mês e a taxa de erosão média foi de 0,23 cm/mês, considerando o período entre julho de 2010 e fevereiro de 2018, em relação à cota de projeto (-18,00 NR/DHN) (Tabela 6.2). Entretanto, conforme a Tabela B.1, essa taxa foi de 4,94 cm/mês no período de 6,7 meses após a dragagem. Neste período, 595.896,54 m³ de sedimentos foram depositados acima da cota de projeto do trecho (Tabela B.1). O mapa de evolução do fundo apresentado na Figura 6.1 permite observar que as maiores taxas de sedimentação encontram-se na porção noroeste, o que configura uma zona crítica, enquanto que na porção sudeste há uma tendência de as profundidades serem superiores à profundidade de projeto. Neste trecho, portanto, as taxas de sedimentação são maiores na porção noroeste e decrescem, gradativamente, em direção sudeste. Destaca-se que, devido a sua localização, a deposição no ambiente é diretamente influenciada por agentes hidrodinâmicos costeiros como ondas e correntes longitudinais.

No mapa apresentado na Figura 6.2, por sua vez, pode-se observar a evolução do fundo dos todos os trechos no período de tempo decorrido entre a dragagem de aprofundamento, terminada em julho de 2010, e fevereiro de 2011, quando foi realizada a sondagem batimétrica analisada. Já os mapas apresentados na Figura 6.3 e na Figura 6.4 demonstram a evolução do fundo entre os meses

de fevereiro de 2014 e novembro de 2015 e entre fevereiro de 2014 e fevereiro de 2018, respectivamente. Observa-se que em fevereiro de 2014 ocorreu o término da dragagem emergencial, onde o Canal Interno e o Canal Externo de Acesso ao Porto do Rio Grande foram dragados para a cota de -14,50 metros (NR/DHN). Sendo assim, estes mapas mostram a evolução do fundo em relação a esta cota atingida na dragagem emergencial e, não, em relação à cota de projeto.

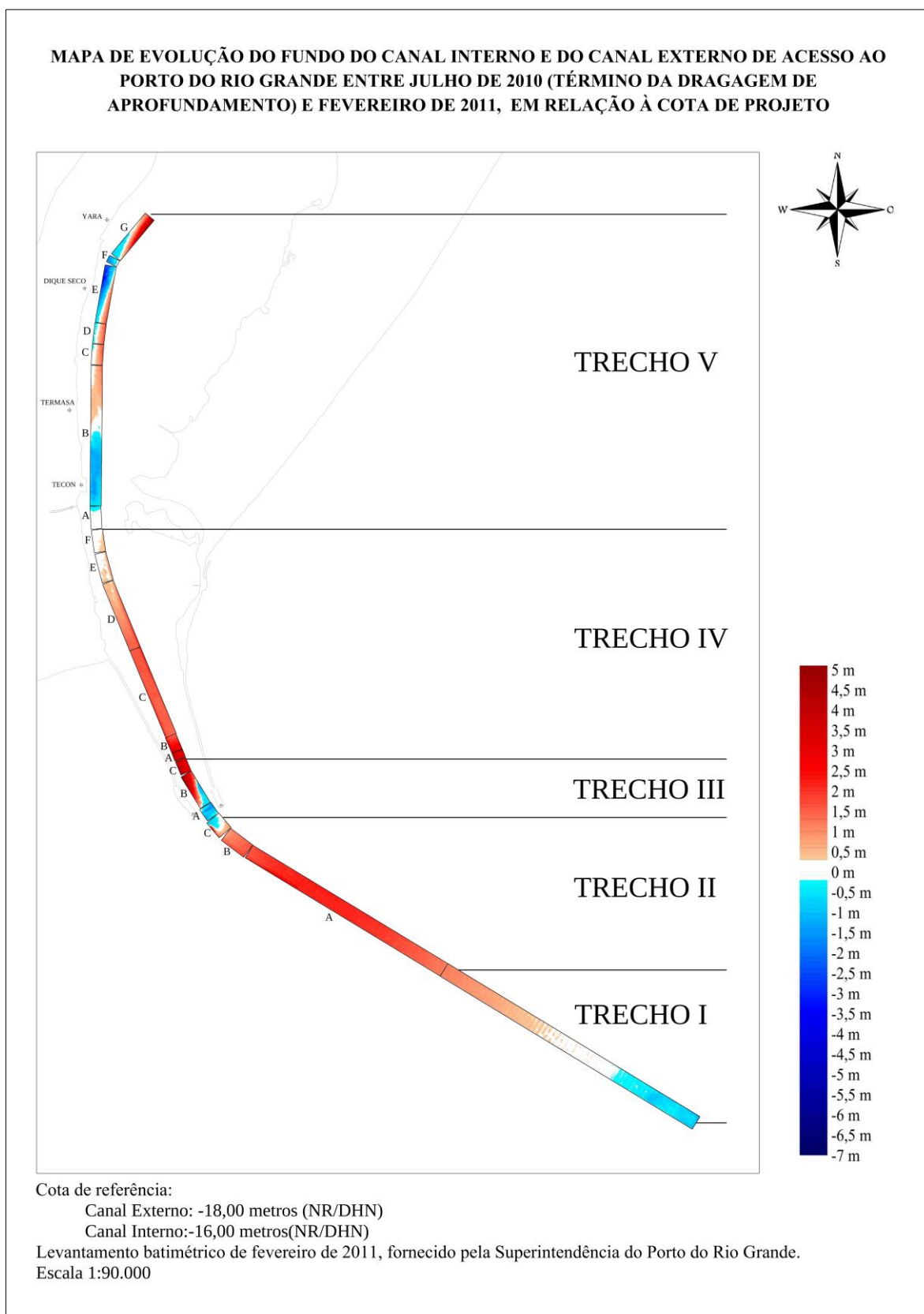


Figura 6.2: Mapa de evolução do fundo do Canal de Acesso ao Porto do Rio Grande entre julho de 2010 (término da dragagem de aprofundamento) e fevereiro de 2011.

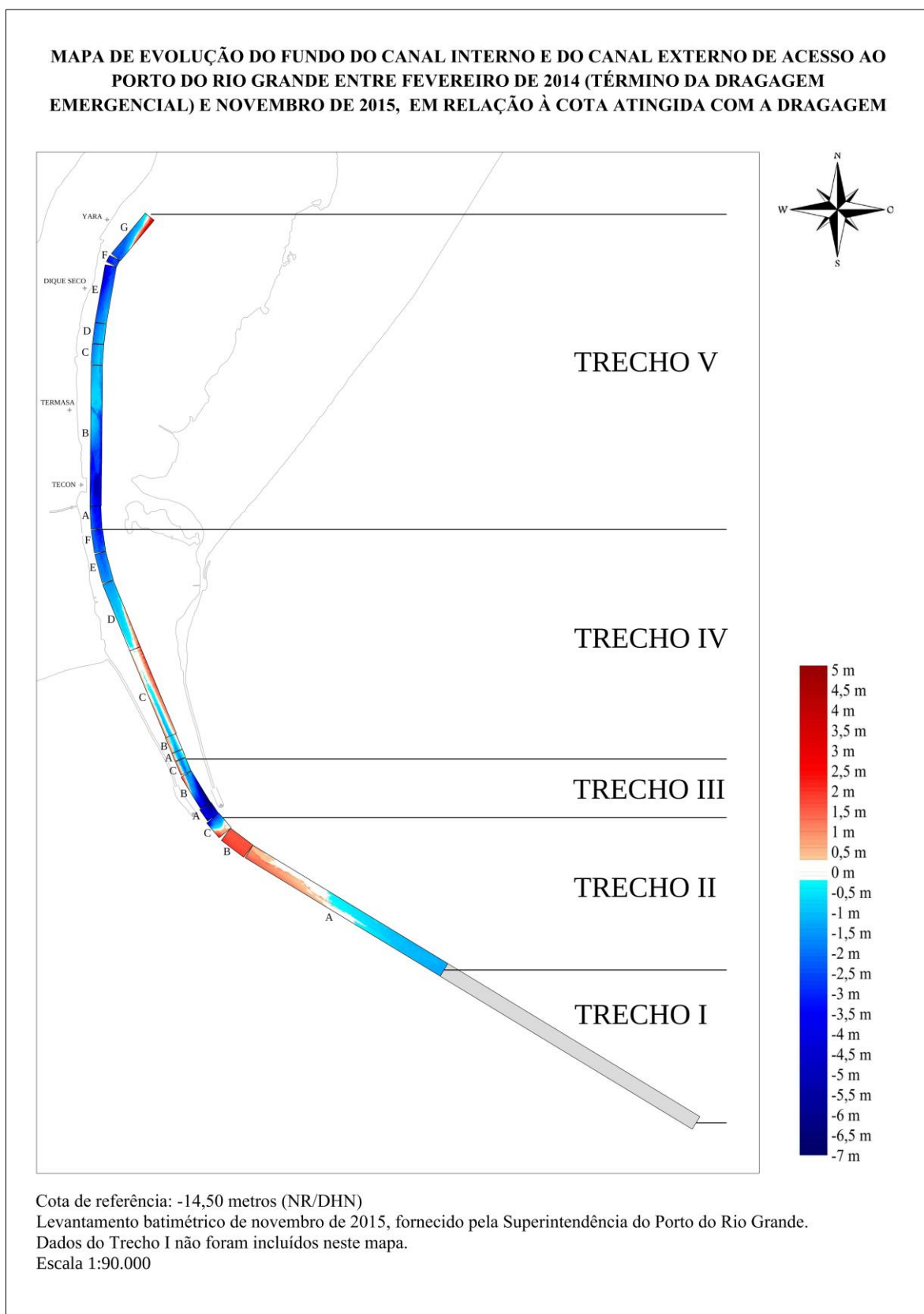


Figura 6.3: Mapa de evolução do fundo do Canal de Acesso ao Porto do Rio Grande entre fevereiro de 2014 (término da dragagem emergencial) e novembro de 2015. O Trecho I não foi analisado neste mapa.

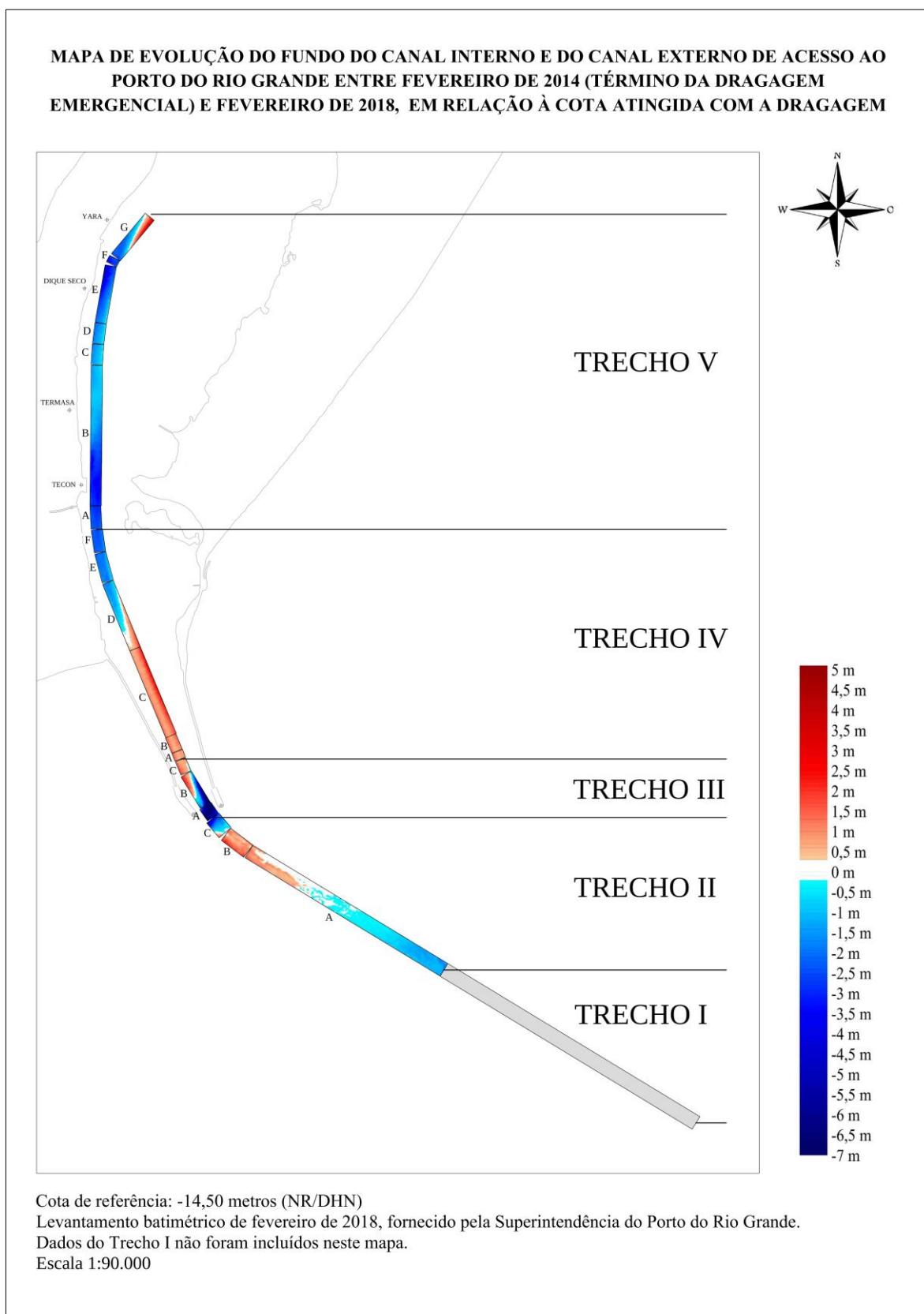


Figura 6.4: Mapa de evolução do fundo do Canal de Acesso ao Porto do Rio Grande entre fevereiro de 2014 (término da dragagem emergencial) e fevereiro de 2018. O Trecho I não foi analisado neste mapa.

O Trecho II, também localizado na área externa (Figura 5.9), apresentou uma taxa de sedimentação média em relação à cota de projeto de 18,06 cm/mês e uma taxa de erosão média de 0,72 cm/mês (Tabela 6.2). As maiores contribuições para a sedimentação foram do retângulo IIA, com 28,65 cm/mês, e do retângulo IIB, com taxa média de 20,08 cm/mês (Tabela 6.2). Ambos retângulos apresentaram taxas de erosão média nulas. O mapa de evolução do fundo entre julho de 2010 e fevereiro de 2011 (Figura 6.2) demonstrou que esses retângulos apresentavam profundidades menores que a profundidade de projeto ao longo de toda a sua área, configurando uma região crítica. Já o retângulo IIC apresentou taxa média de sedimentação de 5,45 cm/mês e taxa média de erosão de 2,16 cm/mês (Tabela 6.2). Quanto à evolução do fundo do trecho (Figura 6.2), observa-se que possui tendência ao assoreamento na parte sul e a possuir profundidades maiores que a profundidade de projeto na sua porção norte, apresentando, ainda, uma zona intermediária de profundidades estáveis em torno da profundidade de projeto, representadas pela cor branca.

No que diz respeito às taxas calculadas em relação à cota de -14,50 metros (NR/DHN), atingidas com a realização da dragagem emergencial terminada em fevereiro de 2014, observou-se que as taxas de sedimentação médias foram de 0,27 cm/mês, 2,12 cm/mês e 0,12 cm/mês para os retângulos IIA, IIB e IIC, nesta ordem (Tabela 6.3). Já as taxas de erosão médias foram de 0,88 cm/mês, 0,00 cm/mês e 2,95 cm/mês, respectivamente (Tabela 6.3). As taxas médias do Trecho II, para essa configuração, ficam estabelecidas como 0,84 cm/mês de sedimentação e 1,28 cm/mês de erosão (Tabela 6.3). Em relação à evolução do fundo, o mapa apresentado na Figura 6.3, que representa o período entre fevereiro de 2014 e novembro de 2015, indica que as maiores taxas de assoreamento do Trecho II estão presentes na região que se estende da porção norte do retângulo IIA até a porção sul do retângulo IIC, sendo que o retângulo IIB apresenta as menores profundidades. A tendência ao assoreamento nesses locais se repete quando se analisa o mapa de evolução de fundo entre fevereiro de 2014 e fevereiro de 2018 (Figura 6.4), entretanto, o assoreamento é menor neste período.

É importante ressaltar que a porção norte do retângulo IIC trata-se de uma região onde, em todas as sondagens analisadas, as profundidades encontradas foram maiores que a profundidade de projeto.

O comportamento observado para o Trecho II pode ser analisado em conjunto com a hidrodinâmica da região. Agindo o fluxo de vazante (Figura 4.7), tem-se uma redução gradual das velocidades de corrente do retângulo IIC para o retângulo IIA, isto é, em direção ao mar. Essa redução, associada a hidrodinâmica costeira, pode ser responsável pelas maiores taxas observadas IIA e IIB, em relação à cota de projeto. Por outro lado, a porção norte do retângulo IIC localiza-se em uma região com velocidades de corrente bem mais elevadas, o que pode ser responsável por profundidades

de equilíbrio superiores à cota de projeto.

O Trecho III, situado entre na zona abrigada pelos Molhes da Barra do Rio Grande (Figura 5.10), nas proximidades da desembocadura, apresentou a maior taxa média de sedimentação, atingindo 24,80 cm/mês, enquanto que a taxa média de erosão foi de 5,29 cm/mês, ambas em relação à cota de projeto (Tabela 6.2). Já com relação à cota de -14,50 metros (NR/DHN), a taxa de sedimentação média calculada foi de 0,77 cm/mês para o trecho, enquanto que a taxa de erosão média atingiu 5,31 cm/mês (Tabela 6.3).

O retângulo IIIA, situado na porção sul deste trecho, apresentou taxa de sedimentação muito próxima a zero em relação à cota de projeto, enquanto que a taxa de erosão atingiu 13,17 cm/mês (Tabela 6.2), representando quase que a totalidade calculada para o trecho. Já em relação à cota atingida na dragagem emergencial, a taxa média de sedimentação foi nula e a taxa média de erosão foi de 11,85 cm/mês (Tabela 6.3). Em todos os mapas gerados para avaliar a evolução do fundo (Figura 6.2, Figura 6.3 e Figura 6.4), observa-se que o retângulo IIIA sempre apresenta profundidades superiores à profundidade de projeto, não tendo, em nenhum caso, zonas favoráveis à sedimentação. Esse comportamento pode estar atrelado ao fato de o setor estar situado na desembocadura dos Molhes da Barra do Rio Grande, onde lá um aumento de velocidade considerável em função da redução da largura entre os molhes. Essa hidrodinâmica alta impede a precipitação dos sedimentos na região e mantém a profundidade de equilíbrio observada.

O setor IIIB, por sua vez, apresentou taxa de sedimentação de 23,27 cm/mês e taxa média de erosão de 2,70 cm/mês, em relação à cota de projeto (Tabela 6.2). O mapa de evolução do fundo em relação à cota de projeto (Figura 6.2) demonstra que há um assoreamento elevado na porção norte da margem oeste desde setor. Na porção sul da margem leste, as profundidades ficaram acima da profundidade de projeto, o que foi refletido pela taxa de erosão média encontrada. Já em relação à profundidade de -14,50 metros (NR/DHN), a taxa de sedimentação média foi de 0,71 cm/mês e a taxa de erosão média foi de 4,01 cm/mês (Tabela 6.3). O mapa de evolução do fundo entre fevereiro de 2014 e novembro de 2015 (Figura 6.3) demonstra que, neste período, o retângulo IIIB encontrava-se quase que totalmente com profundidades maiores que a profundidade de projeto. Em seguida, pode-se observar, no mapa de evolução do fundo entre fevereiro de 2014 e fevereiro de 2018 (Figura 6.4), que o assoreamento é iniciado pela porção superior da margem oeste e, evolui, gradativamente, em direção ao centro.

No testemunho 06 (Figura 6.5, Figura C.2), coletado na região central do retângulo IIIB, observa-se a presença de uma camada de areia com biodetritos seguida de camada de lama arenosa, na sua base. Em virtude da forte corrente nessa região, o testemunho coletado atingiu apenas 9 cm de

profundidade. Esse comportamento sedimentar indica, novamente, a presença de fluxo bidirecional na região. As velocidades de enchente chegam a atingir 0,6 m/s na região do Trecho III (Figura 4.8).

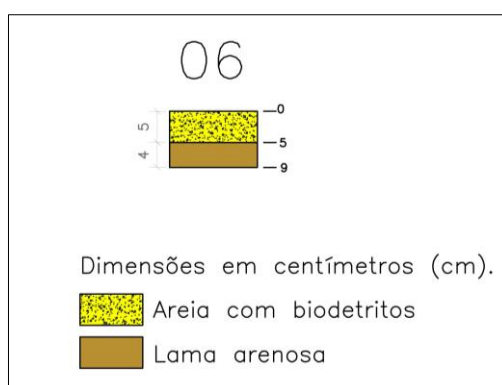


Figura 6.5: Representação gráfica das camadas do testemunho 06 (Trecho III), com base em análise da textura do sedimento.

Por fim, o retângulo IIIC atingiu a maior taxa média de sedimentação do Trecho III em relação à cota de projeto, de 51,09 cm/mês, sendo o setor com maior contribuição para o assoreamento neste trecho (Tabela 6.2). Já a taxa média de erosão foi nula (Tabela 6.2). No mapa da Figura 6.2, observa-se que toda a área do retângulo está assoreada, apresentando uma continuidade da zona de assoreamento iniciada no norte do retângulo IIIB. Tendo como cota de referência -14,50 metros NR/DHN, a taxa de sedimentação média mensal cai para 1,59 cm/mês, enquanto que a taxa de erosão média é de 0,06 cm/mês (Tabela 6.3), indicando um assoreamento menos intenso sob esta condição. No mapa de evolução do fundo entre fevereiro de 2014 e novembro de 2015 (Figura 6.3), o trecho IIIC apresenta profundidades maiores que a profundidade de projeto. Já no mapa da Figura 6.4, que representa o período entre fevereiro de 2014 e fevereiro de 2018, percebe-se que o setor encontra-se assoreado, havendo indícios que o assoreamento avança gradualmente da margem oeste para a margem leste.

O Trecho IV (Figura 5.11), por sua vez, apresentou taxa de sedimentação média de 22,76 cm/mês e taxa média de erosão nula, em relação à cota de projeto (Tabela 6.2). Destaca-se que o maior contribuinte para esse valor é o retângulo IVA (que possui cota de projeto maior), com 51,23 cm/mês; seguido pelos retângulos IVB (rampa), com 36,56 cm/mês; IVC, com 24,10 cm/mês; IVD, com 15,51 cm/mês; IVE, com 5,51 cm/mês e IVF, com 3,65 cm/mês (Tabela 6.2). Todas as taxas de erosão médias dos retângulos foram nulas, com exceção do retângulo IVF, no qual a taxa foi de 0,04 cm/mês (Tabela 6.2).

A análise do Trecho IV em relação à cota de projeto (Figura 6.2) indica uma tendência de

assoreamento ao longo de toda a região, sendo mais intenso nas porções central e sul. Na porção norte do trecho, as profundidades tendem a ficar em torno da profundidade de projeto (-16,00 metros NR/DHN). Destaca-se ainda que, no retângulo IVB, a configuração batimétrica é de uma rampa, onde há a transição da cota de projeto de -18,00 metros para -16,00 metros. Observa-se que a partir desta configuração o assoreamento torna-se menos intenso.

O testemunho 05 (Figura 6.6, Figura C.1), coletado na porção sul do setor IVD, apresenta intercalações entre camadas de areia, areia com biodetritos, lama e lama plástica. O Trecho IV, de forma geral, está inserido na região de maiores velocidades de corrente de vazante observadas no Canal Interno, que alcançam até 2 m/s em alguns pontos (Figura 4.7). As velocidades de enchente também são expressivas na região, de cerca de 0,4 m/s (Figura 4.8). Esse padrão hidrodinâmico observado pode ser responsável pelo perfil de deposição de sedimentos analisado no testemunho, com intercalações frequentes de sedimentos mais finos e sedimentos grosseiros. Uma hipótese é de que as suspensões de sedimentos finos provindos da laguna se depositem ao entrarem em contato com a água mixohalina nestas proximidades da desembocadura, uma vez que os índices de salinidade são maiores no baixo estuário.

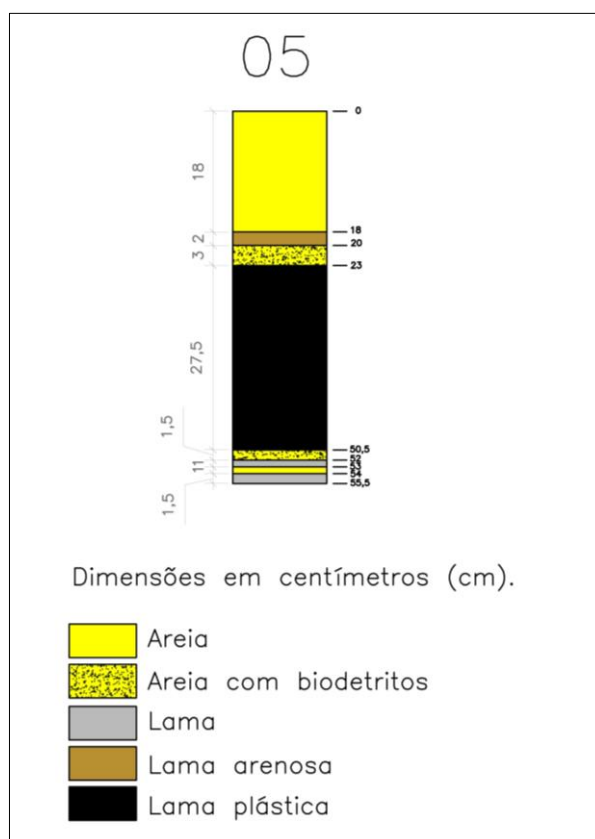


Figura 6.6: Representação gráfica das camadas do testemunho 05 (Trecho IV), com base em análise da textura do sedimento.

Analisando o Trecho IV em relação à cota atingida com a dragagem emergencial, de -14,50 m (NR/DHN), observa-se que há uma redução expressiva das taxas de sedimentação desta região. A taxa média de sedimentação do trecho é de 1,17 cm/mês, enquanto que a taxa de erosão média é de 1,49 cm/mês (Tabela 6.3). Para esta configuração geométrica, as taxas de sedimentação médias por retângulo, em cm/mês, foram as seguintes: IVA, 1,78; IVB, 2,03; IVC, 2,60; IVD, 0,62; IVE, 0,00 e IVF, 0,00 (Tabela 6.3). As taxas de erosão médias por retângulo, em cm/mês, foram as seguintes: IVA, 0,00; IVB, 0,00; IVC, 0,00; IVD, 1,05; IVE, 3,41; IVF, 4,48 (Tabela 6.3).

A análise da evolução do fundo em relação à cota atingida com a dragagem emergencial, através dos mapas apresentados na Figura 6.3 e na Figura 6.4, indica que nesta configuração os retângulos IVD, IVE e IVF tendem a apresentar profundidades maiores que a profundidade de projeto. Destaca-se também que a margem leste dos retângulos IVA, IVB e IVC apresenta taxas de sedimentação mais elevadas. Tal comportamento pode estar associado ao fato de que, conforme Hartmann (1996), o escoamento de vazante no hemisfério sul se dê, predominantemente, pela margem oeste. Destaca-se ainda que a região dos setores IVD, IVE e IVF se situa numa feição côncava, onde as velocidades de vazante tendem a atingir maiores valores. Desta forma, as maiores velocidades junto a esta margem reduziriam a capacidade de deposição dos sedimentos. Além disso, o Hartmann (1996) destaca que a margem leste, historicamente, possui maior tendência a deposição de sedimentos.

Por fim, a taxa média de sedimentação encontrada para o Trecho V foi de 6,65 cm/mês, enquanto que a taxa média de erosão foi de 5,22 cm/mês (Tabela 6.2). Os retângulos VC, VD e VG foram os que apresentaram maior contribuição para os valores de assoreamento estimados, sendo as taxas médias de 9,30 cm/mês, 9,56 cm/mês e 19,58 cm/mês, respectivamente (Tabela 6.2). A análise destes retângulos no mapa da Figura 6.2 demonstra que nos setores VC e VD, as zonas críticas encontram-se na margem leste destes segmentos, tendendo a reduzir em direção à região central, e a atingir profundidades próximas ou superiores à cota de projeto na margem oeste. No retângulo VG, há uma região com assoreamento acentuado na borda leste, atingindo até 11 metros de profundidade na porção mais ao norte.

Os testemunhos coletados no Trecho V estão apresentados na Figura 6.7. O testemunho 04 (Figura 6.7, Figura C.1) pertence a um ponto situado na porção sul do retângulo VC. Neste local, a análise da textura dos sedimentos demonstrou a presença de frequentes intercalações de lama, lama arenosa e areia lamosa, sendo esta última em camadas menos espessas. A análise da modelagem hidrodinâmica realizada pelo Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias (2014) mostra neste setor as correntes de vazante são mais fracas na zona central e nas proximidades da margem leste (Figura

4.7), o que pode favorecer a sedimentação de suspensões finas, facilitadas ainda pelo contato com águas de maior salinidade. Além disso, o enfraquecimento das correntes de enchente nessa região, conforme observado na Figura 4.8, proporcionaria, por sua vez, a deposição de sedimentos de classes mais grossas, como a areia fina.

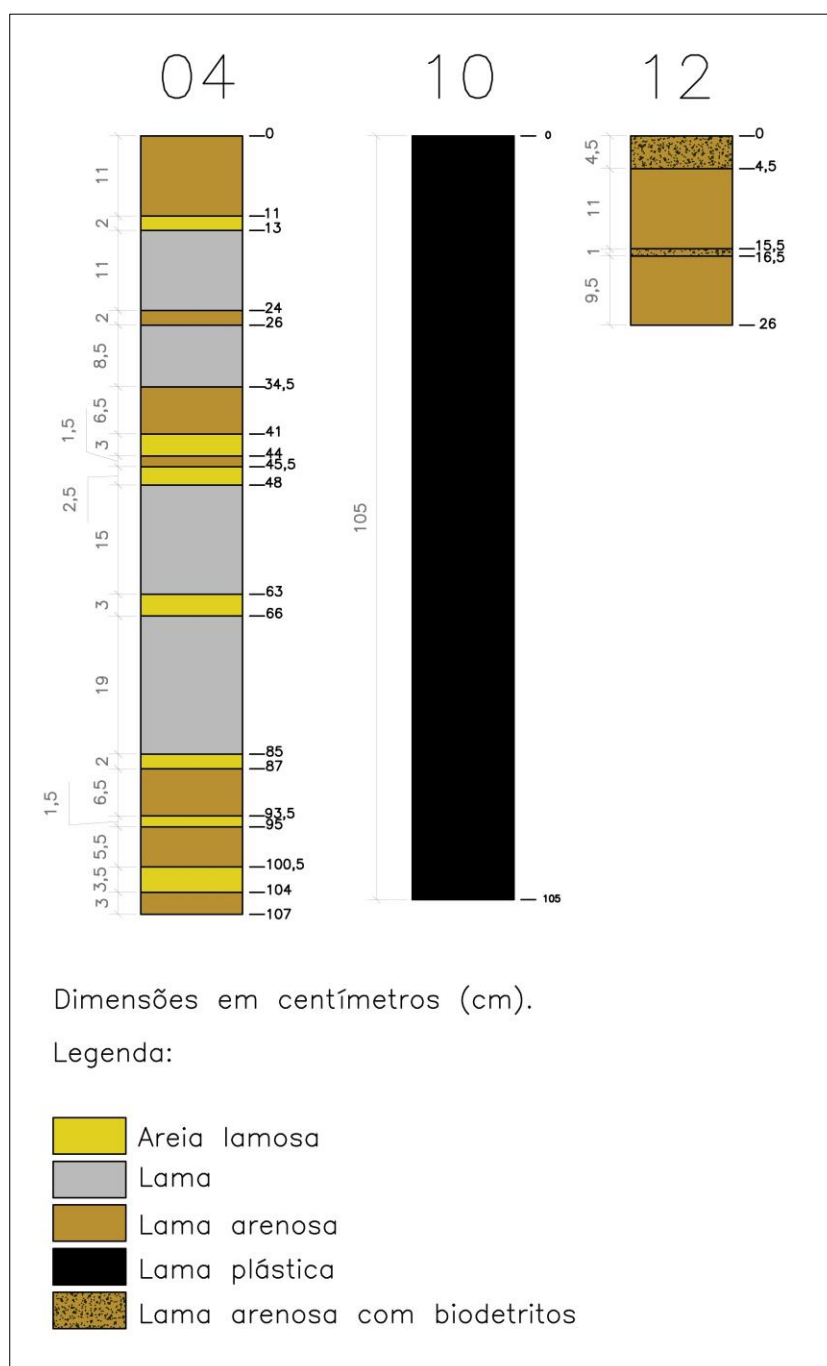


Figura 6.7: Representação gráfica das camadas dos testemunhos 04, 10 e 12 (Trecho V), com base em análise da textura do sedimento.

Os retângulos VE e VF apresentaram taxa média de sedimentação de 4,28 e 0,32 cm/mês, respectivamente (Tabela 6.2). Já as taxas de erosão foram de 12,31 cm/mês e 12,47 cm/mês, na mesma ordem, considerando a configuração atual em relação à cota de projeto (Tabela 6.2). Conforme o mapa da Figura 6.2, é notório que a região compreendida nas margens oeste dos retângulos VC, VD, VE, VF até a região central do VG apresenta comportamento erosivo. Essa tendência pode ser explicada pela aceleração da corrente sofrida na região em virtude do formato meandrante. Há uma tendência de serem desenvolvidas maiores velocidades na porção côncava e menores velocidades na margem leste, onde o formato convexo induz à desaceleração do fluxo. Este comportamento pode ser observado na modelagem hidrodinâmica para o fluxo de vazante exposta na Figura 4.7.

O testemunho 12 (Figura 6.7, Figura C.2) foi coletado em um ponto na porção externa do retângulo VG, nas proximidades da sua margem oeste. A amostra retirada atingiu 26 centímetros abaixo do leito marinho, pois foram encontradas dificuldades para a coleta em virtude do tipo de solo presente no local e das correntes atuantes no dia. A análise demonstrou a presença de camadas de lama arenosa, intercaladas com camadas de lama arenosa e biodetritos. Nesta região, as correntes de enchente perdem velocidade (Figura 4.8), facilitando a deposição. Destaca-se que essas correntes, além de carregarem frações mais grosseiras, podem ser capazes de transportar sedimentos finos removidos da porção mais ao sul do canal, podendo dar origem às matrizes de lama e areia encontradas no testemunho. Já para a situação de vazante (Figura 4.7), é notório a presença de regiões onde há uma aceleração do fluxo, conforme já destacado.

No que diz respeito ao retângulo VB, observa-se um comportamento peculiar, marcado por uma região com tendência ao assoreamento na parte norte, uma pequena zona intermediária na região central com profundidades estáveis em torno de -16,00 metros e uma zona com tendência erosiva na porção sul, considerando a observação do mapa exposto na Figura 6.2. Esse comportamento é refletido nas taxas médias encontradas, sendo de 3,06 cm/mês de sedimentação e 7,10 cm/mês de erosão (Tabela 6.2).

O testemunho 10 (Figura 6.7, Figura C.1), coletado em um ponto da porção sul do retângulo VB, atingiu 105 cm de profundidade abaixo do leito marinho e ao longo de toda a camada foi observado unicamente a presença lama plástica. Por se tratar de um local onde a profundidade de equilíbrio tende a ser menor que a cota de projeto e, além disso, tende a permanecer estável, infere-se que a corrente de vazante no local em condições habituais, embora seja intensa, não é suficiente para ressuspender o sedimento coesivo situado no leito marinho. Os sedimentos finos providos da laguna seriam depositados, portanto, em condições de fluxo fraco ou moderado, precipitando ao entrar em contato com a água salgada.

Já o retângulo VA apresentou uma tendência de possuir profundidades de equilíbrio com valores próximos à profundidade de projeto, de -16 metros (NR/DHN), o que pode ser observado no mapa da Figura 6.2. Além disso, em uma faixa compreendida ao longo da porção norte deste retângulo, as profundidades ficaram abaixo da cota de projeto, comportamento que se estende até a região central do retângulo VB. Desta maneira, a taxa de sedimentação encontrada foi de 0,44 cm/mês (Tabela 6.2), destacando-se que se deu, no máximo, até a profundidade de -15,75 metros (NR/DHN), representadas pela cor branca no mapa. A taxa de erosão ficou em 1,77 cm/mês, refletindo o comportamento observado na porção norte deste setor (Tabela 6.2).

A evolução do fundo em relação à cota de -14,50 metros (NR/DHN) demonstrou que tanto no período entre fevereiro de 2014 e novembro de 2015 (Figura 6.3), quanto no período entre fevereiro de 2014 e fevereiro de 2018 (Figura 6.4) as profundidades permaneceram abaixo da profundidade de projeto no Trecho V, tendo taxas de sedimentação nulas em ambos casos (Tabela 6.3). A exceção observada foi na porção superior da margem leste do retângulo VG, onde configurou-se uma faixa de intenso assoreamento, que evoluiu entre novembro de 2015 e fevereiro de 2018 em direção à região central. Sendo assim, o retângulo VG apresentou taxa de sedimentação média de 1,09 cm/mês nesta configuração (Tabela 6.3).

6.3. Comparação entre a configuração atual e a configuração anterior à dragagem de aprofundamento, em relação à cota de projeto

A partir dos resultados obtidos, observa-se que as taxas de sedimentação do Canal Interno e do Canal Externo, na configuração anterior à dragagem de aprofundamento, quando a cota de projeto era de -14,00 metros (NR/DHN) eram de 2,31 cm/mês no Trecho 1; 1,97 cm/mês no Trecho 2; 0,05 cm/mês no Trecho 3 e 0,50 cm/mês no Trecho 4 (Tabela 6.1). Já as taxas médias de erosão encontradas foram de 1,18 cm/mês no Trecho 1; 4,57 cm/mês no Trecho 2; 4,61 cm/mês no Trecho 3 e 4,28 cm/mês no Trecho 4 (Tabela 6.1).

Considerando o traçado geométrico atual, em relação à cota de projeto, as taxas de sedimentação médias e de erosão médias calculadas foram, respectivamente (Tabela 6.2): 0,56 cm/mês e 0,23 cm/mês para o Trecho I; 18,06 cm/mês e 0,72 cm/mês para o Trecho II; 24,80 cm/mês e 5,29 cm/mês para Trecho III; 22,76 cm/mês e 0,00 cm/mês no Trecho IV; e, 6,65 cm/mês e 5,22 cm/mês no Trecho V.

Destaca-se que, embora tenha ocorrido um aumento da extensão do Canal de Acesso ao Porto

do Rio Grande, representados, nesse trabalho, pelo Trecho I e pela parte sul do retângulo IIA, observa-se que houve um incremento significativo nas taxas de sedimentação dos trechos internos e externos que já faziam parte do canal do porto e que foram aprofundados.

Sendo assim, observa-se que o grande incremento da taxa de sedimentação do Canal Interno e do Canal Externo ocorreu devido ao aprofundamento. Pode-se inferir que a cota de -14,00 metros (NR/DHN) estava mais próxima da profundidade de equilíbrio do ambiente.

É importante destacar ainda que, em ambos os traçados geométricos do Porto do Rio Grande, as maiores taxas de sedimentação médias foram observadas na região entre os Molhes da Barra do Rio Grande. Essa região é representada pelo Trecho 2 no traçado anterior ao aprofundamento e pelos Trechos III e IV no traçado atual.

6.4. Observação acerca das taxas de sedimentação e de erosão estimadas

Os valores encontrados para as taxas de sedimentação e de erosão, tanto em relação ao traçado antigo quanto em relação ao traçado atual, tratam-se de valores médios para cada trecho obtidos através de dados oriundos dos levantamentos batimétricos disponíveis. É importante ressaltar que as taxas de sedimentação e de erosão, entretanto, não são constantes ao longo do tempo e ao longo do espaço. Este comportamento foi observado por Bastos da Silva (2016), que elaborou curvas de sedimentação referentes aos períodos entre dragagens para o Canal de Acesso e para a Bacia do Porto Novo do Rio Grande, conforme Figura 4.22,. Este fator também pode ser observado nos valores calculados para os retângulos referentes ao traçado anterior à dragagem de aprofundamento neste estudo (APÊNDICE A – Taxas de sedimentação e de erosão de cada retângulo da configuração anterior à dragagem de aprofundamento do Porto do Rio Grande).

Em virtude da disponibilidade de somente uma batimetria após a dragagem de aprofundamento (sondagem realizada em fevereiro de 2011) dos Canais Interno e Externo para o cálculo das taxas de sedimentação e erosão em relação à cota de projeto, não foi possível avaliar o comportamento das taxas ao longo do tempo e os valores encontrados para a configuração atual foram estimados com base nesta batimetria, apenas.

6.5. Comportamento do ambiente

O comportamento do fundo no Canal de Acesso ao Porto do Rio Grande pode ser condicionado por diversas variáveis como vento, regime hidrodinâmico da praia e do estuário, ondas, temperatura, salinidade, maré, precipitação, entre outros. Até o presente momento, não é possível destacar quais variáveis atuantes são capazes de favorecer ou inibir a deposição de sedimentos no leito do canal. Entretanto, alguns comportamentos típicos em virtude de eventos de El Niño, que já foram analisados por Bastos da Silva (2016) e Calliari (1980), foram verificados.

O mapa de evolução do fundo entre fevereiro de 2014 e novembro de 2015 (Figura 6.3) evidenciou um comportamento erosivo ao longo de todo o canal, inclusive em áreas onde já foi detectada a tendência erosiva. Esse comportamento erosivo também foi observado por Bastos da Silva (2016). A sondagem de novembro de 2015 apresentou profundidades, em geral, significativamente maiores que as profundidades atingidas após as dragagens precedentes em cada setor. Uma das justificativas para esse comportamento pode estar atrelada ao fato de que o ano de 2015 foi caracterizado pela ocorrência de El Niño de forte intensidade, conforme o Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (Tabela 4.1). Marengo (2007) relata que eventos de El Niño ocasionam um excesso de chuva e enchentes na região sul do Brasil, o que provoca altas descargas dos rios e transfere a zona de mistura do estuário da Lagoa dos Patos para a zona costeira (Fernandes et al., 2002; Möller et al., 2009, apud Möller e Fernandes, 2010). Esse fenômeno gera, portanto, correntes de vazante intensas, capazes de erodir o fundo do Canal de Acesso ao Porto do Rio Grande, como foi observado na sondagem de novembro de 2015.

As exceções, neste evento de 2015, foram observadas nos retângulos IIA e IIB, onde os volumes acima da cota de -14,50 metros (NR/DHN) foram de 293.703,96 m³, 188.032,80 m³, respectivamente, conforme os dados da Tabela B.2 e Tabela B.3. Esses volumes decresceram na análise da sondagem de 2018, onde constatou-se 183.356,61 m³ acima desta cota no retângulo IIA (Tabela B.2) e 181.473,88 m³ (Tabela B.3) acima desta cota no retângulo IIB. O retângulo do Trecho I (Tabela B.1) também apresentou esse comportamento decrescente em 2018, tendo 1.078.381,68 m³ acima da cota de projeto. Esse volume acima da cota de projeto decresceu para 924.773,11 m³ na análise da batimetria de fevereiro de 2018. Em todos os demais retângulos analisados (APÊNDICE B – Taxas de sedimentação e de erosão de cada retângulo da configuração posterior à dragagem de aprofundamento do Porto do Rio Grande), o volume acima da cota de projeto cresceu entre novembro de 2015 e fevereiro de 2018.

Este mesmo padrão foi observado por Bastos da Silva (2016), tanto para o ano de 2007 quanto

para o ano de 2015, e pode ser analisado nos mapas de evolução do fundo gerados pela autora (expostos na Figura 4.23, Figura 4.24, Figura 4.25, Figura 4.26, Figura 4.27 e Figura 4.28). As sondagens de maio de 2007, outubro de 2007 e de novembro de 2015 demonstraram que os setores apresentavam profundidades maiores que a profundidade de projeto, estando sujeitos a um intenso processo de erosão de fundo. Ressalta-se que, segundo o Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (Tabela 4.1), o biênio 2006-2007 foi marcado por El Niño de intensidade moderada.

Para o caso do ano de 2007, os dados demonstram que os volumes acima da cota de projeto dos setores 1A (Tabela A.1), 1B (Tabela A.2) e 1C (Tabela A.3) apresentaram valores baixos em junho de 2007 e cresceram significativamente até outubro de 2007. No retângulo 2A (Tabela A.4), observa-se um pequeno volume acima da cota de projeto em junho de 2007 e um crescimento expressivo até outubro de 2007. A variação do volume acima da cota de projeto entre junho de 2007 e outubro de 2007 para o retângulo 2B é pouco expressiva (Tabela A.5). Os retângulos 2C (Tabela A.6) e 2D (Tabela A.7), situados, na época, na desembocadura dos Molhes da Barra do Rio Grande (antes do prolongamento), apresentaram volumes nulos acima da cota de projeto, comportamento que foi observado em praticamente todos os levantamentos batimétricos analisados, exibindo uma tendência destes segmentos de não serem favoráveis ao processo de deposição de sedimentos. O retângulo 2E (Tabela A.8) apresentou pequeno volume acima da cota de projeto em outubro de 2007. O retângulo 2F (Tabela A.9), situado em uma região com tendência ao assoreamento (entre os Molhes da Barra do Rio Grande), apresentou grande volume de abaixo da cota de projeto, indicando comportamento erosivo nesta ocasião. Os demais setores analisados do Trecho 3 e do Trecho 4 apresentaram volumes nulos ou insignificativos acima da cota de projeto na sondagem batimétrica de outubro de 2007. A exceção é o retângulo 4H (Tabela A.25), onde o volume acima da cota de projeto foi de 7.211,76 m³, embora este valor seja bem inferior aos encontrados nas sondagens seguintes.

De forma geral, observa-se que, em ambos eventos (2007 e 2015), os setores situados na porção externa apresentaram comportamento acrescivo, enquanto que os retângulos localizados no Canal Interno apresentaram comportamento erosivo. A partir deste cenário exposto e da análise dos dados disponíveis, observa-se que a erosão do fundo do Canal Interno devido ao intenso fluxo de vazante pode ser responsável por promover a deposição de sedimentos nos setores localizados na região próxima e externa à desembocadura dos Molhes da Barra do Rio Grande. Este comportamento pode ser constatado pelo incremento do volume acima da cota de projeto nestes setores, tanto em 2007 quanto em 2015.

Neste contexto, no âmbito do Canal Interno, destaca-se que Calliari (1980) já havia concluído que os anos de fortes chuvas nas bacias alimentadoras do estuário da Lagoa dos Patos correspondem

a baixas taxas de assoreamento, podendo atingir, ainda, taxas negativas. O autor cita o caso da Grande Enchente de 1941, ocasionada, segundo Torres (2000), por evento de El Niño. Ainda segundo o Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos, os anos de 1940 e 1941 foram de El Niño de forte intensidade, seguindo por El Niño de intensidade moderada nos anos 1941 e 1942.

Por fim, é importante destacar que a investigação de outras variáveis que possam ser favoráveis aos processos de deposição ou de saída de sedimentos do ambiente exige a obtenção e a análise minuciosa de dados de todo período estudado, o que não foi traçado como objeto deste estudo.

6.6. Determinação de zonas críticas no traçado geométrico atual em relação à cota de projeto

A partir da análise dos mapas de evolução do fundo em relação à cota de projeto (Figura 6.1 e Figura 6.2), foram determinadas as zonas críticas para o traçado geométrico atual do canal do Porto do Rio Grande, em relação à cota de projeto.

A porção noroeste do Trecho I configura uma zona crítica, com taxas de sedimentação elevadas localizadas desde na faixa que se estende da área central do trecho até seu limite superior.

O Trecho II também representa uma zona crítica. As altas taxas de sedimentação foram detectadas ao longo de todo o trecho, sendo mais intensas na sua parte central (representada neste estudo pelo retângulo IIA). Já na região compreendida entre porção final do Trecho II (região central e superior do retângulo IIC) até a região central do Trecho III (retângulo IIIB), observa-se uma tendência de profundidades maiores que a profundidade de projeto.

A partir da região central do Trecho III até a porção mais ao norte do Trecho IV (limite superior do retângulo IVD) há uma zona crítica configurada. As maiores taxas médias de sedimentação são observadas nos retângulos IIIC, IVA e IVB (Tabela 6.2), decaindo à medida que se afastam da desembocadura em direção ao norte. Essa região situa-se na zona entre os Molhes da Barra do Rio Grande e se estende até, aproximadamente, a região central da 4ª Secção da Barra do Rio Grande.

A faixa do canal localizada na porção norte do Trecho IV (retângulos IVE e IVF) até a porção sul do Trecho V (retângulo VA) apresentou estabilidade e profundidades em torno da profundidade de projeto. Já entre o norte do retângulo VA e a região central do retângulo VB, região situada na margem do Terminal de Contêineres (TECON), foi observado uma tendência a apresentar profundidades maiores que a profundidade de projeto.

Por fim, a margem leste da região central do Trecho V, mais precisamente entre o centro do

retângulo VB e o retângulo VE, também constitui uma região crítica. Essa faixa compreende a região adjacente ao segmento entre o Terminal Marítimo Luiz Fogliatto S/A – TERMASA e o Dique Seco. Esse assoreamento é intensificado na margem leste do retângulo VG (em frente ao terminal da Yara Brasil S. A.), atingido as maiores taxas de sedimentação nesse local. Na margem oeste dos retângulos VD, VE, VF e até o centro do retângulo VG (faixa situada nas proximidades do Dique Seco), entretanto, são observadas profundidades maiores que a profundidade de projeto, representando um trecho com tendência erosiva.

7. CONCLUSÕES

Aplicando a metodologia proposta por Bastos da Silva (2016), foram estimadas as taxas médias de sedimentação e de erosão de cada trecho pertencente ao traçado anterior à dragagem de aprofundamento (Tabela 7.1), realizada entre junho de 2009 e julho de 2010 no Canal Interno e no Canal Externo de Acesso ao Porto do Rio Grande. As taxas médias calculadas para os trechos do traçado atual, no qual o Canal Interno possui profundidade de projeto de -16,00 metros (NR/DHN) e o Canal Externo de -18,00 metros (NR/DHN), estão apresentadas na Tabela 7.2. Além disso, foram calculadas as taxas médias de sedimentação e de erosão dos trechos em relação à cota de -14,50 metros (NR/DHN), atingida com a realização da dragagem emergencial entre 2013 e 2014 nos trechos II, III, IV e V (Tabela 7.3).

Tabela 7.1: Taxas médias de sedimentação e taxas médias de erosão, em relação à cota de projeto, de cada trecho do traçado anterior à dragagem de aprofundamento do Porto do Rio Grande.

Trecho	1	2	3	4
Taxa média de sedimentação (cm/mês), em relação à cota de projeto	2,31	1,97	0,05	0,50
Taxa média de erosão (cm/mês), em relação à cota de projeto	1,18	4,57	4,61	4,28

Tabela 7.2: Taxas médias de sedimentação e taxas médias de erosão, em relação à cota de projeto, de cada trecho do traçado posterior à dragagem de aprofundamento do Porto do Rio Grande (atual).

Trecho	I	II	III	IV	V
Taxa média de sedimentação (cm/mês), em relação à cota de projeto	0,56	18,06	24,80	22,76	6,65
Taxa média de erosão (cm/mês), em relação à cota de projeto	0,23	0,72	5,29	0,00	5,22

Tabela 7.3: Taxas médias de sedimentação e taxas médias de erosão, em relação à cota de -14,50 m (NR/DHN), de cada trecho do traçado posterior à dragagem de aprofundamento do Porto do Rio Grande (atual).

Trecho	I	II	III	IV	V
Taxa média de sedimentação (cm/mês), em relação à cota de -14,50 m (NR/DHN)	-	0,84	0,77	1,17	0,16
Taxa média de erosão (cm/mês), em relação à cota de -14,50 m (NR/DHN)	-	1,28	5,31	1,49	3,80

Sobre as taxas de sedimentação e erosão estimadas para ambos os traçados geométricos do Porto do Rio Grande, ressalta-se que os valores encontrados foram obtidos através dos levantamentos batimétricos disponibilizados pela Superintendência do Porto do Rio Grande e não são constantes ao longo do tempo e do espaço, conforme já observado por Bastos da Silva (2016).

É importante destacar ainda que as taxas apresentadas neste estudo foram calculadas em relação à cota de projeto de cada trecho, sendo o volume acima desta cota considerado assoreamento (sedimentação) e o volume abaixo desta cota considerado erosão. Sendo assim, volumes assoreados abaixo da cota de projeto não foram contabilizados como assoreamento, com base nesta metodologia. Além disso, neste estudo, assume-se que todo o canal tem profundidade igual à cota de projeto na data de término das operações de dragagem. A abordagem proposta neste estudo engloba a necessidade de estimar taxas de sedimentação em relação às cotas de projeto, visto que estes serão os volumes que comprometem as operações portuárias e que serão dragados. Além disso, adotou-se esta abordagem também em função da dificuldade de encontrar alguns dados e informações necessários à realização deste estudo.

Com a análise dos mapas de evolução do fundo do traçado atual em relação à cota de projeto, conclui-se que a porção noroeste do Trecho I, a porção central do Trecho II, a região que se estende do centro do Trecho III até a parte norte do Trecho IV, bem como as áreas central e norte da margem leste do Trecho V configuram zonas críticas, onde as taxas de sedimentação são mais expressivas, criando pontos de estrangulamento no Canal de Acesso ao Porto do Rio Grande. Já a região da desembocadura dos Molhes da Barra do Rio Grande mostrou-se, tanto antes quanto depois do prolongamento dos Molhes da Barra do Rio Grande, com tendência erosiva, apresentando profundidades maiores que a profundidade de projeto. Este mesmo comportamento erosivo foi observado na região sul do Trecho V, assim como na margem oeste do canal adjacente ao segmento entre o terminal da Yara Brasil S/A e o Dique Seco.

Os testemunhos coletados demonstraram a predominância das classes de areia fina e lama no Canal. O fluxo bidirecional predominante na região, de vazante e de enchente, imprime nos padrões de sedimentação a presença de intercalações de diferentes fácies sedimentares. Destaca-se o caso do testemunho 10, coletado na região sul do Trecho V (em frente ao Terminal de Contêineres), onde observou-se unicamente a presença de lama plástica ao longo dos 105 centímetros abaixo do leito marinho.

Quanto ao comportamento da região mediante forçantes ambientais, foi possível identificar que fenômenos de El Niño de intensidade moderada ou forte (responsáveis por excesso de chuvas na região das bacias alimentadoras da Lagoa dos Patos) geram fluxos de vazante intensos no baixo

estuário da Lagoa dos Patos, capazes de ressuspender o sedimento junto ao fundo e transportá-lo para a região costeira adjacente e para o Canal Externo. Uma hipótese considerável é que, em um primeiro momento, a carga de sedimentos erodida do Canal Interno seja depositada na região do canal próxima à desembocadura dos Molhes da Barra do Rio Grande.

Por fim, destaca-se que este estudo se ateve a determinar as taxas de sedimentação e as taxas de erosão em relação à cota de projeto de cada setor, devido ao fato de que são estes pacotes de sedimentos que serão alvo de operações de dragagem de manutenção. No que diz respeito ao comportamento do ambiente como um todo, é necessário, ainda, a análise da evolução do fundo ao longo do tempo, investigando os volumes de sedimento que são depositados ou removidos tanto acima quanto abaixo da cota de projeto de cada trecho. Além disso, sabe-se que diversas variáveis meteorológicas, hidrológicas e oceanográficas podem ser responsáveis por criar situações favoráveis à deposição de sedimentos no ambiente ou à remoção dos pacotes sedimentares. A identificação destes agentes, em trabalhos futuros, contribuirá de forma significativa para o entendimento dos processos que governam o transporte de sedimentos no Canal de Acesso ao Porto do Rio Grande.

8. REFERÊNCIAS

- ALVAREZ, J. A.; MARTINS, I. R.; MARTINS, L. R. Estudo da Lagoa dos Patos. **Pesquisas em Geociências**, v. 14, n. 14, p. 41-66, 1981. Disponível em: <<http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/article/view/21733>>. Acesso em: 23 mar. 2018.
- ANTIQUERA, J. A. F.; CALLIARI, L. J. Características sedimentares da desembocadura da Lagoa dos Patos. **Gravel**, n. 3, p. 39 – 46, 2005.
- ASMUS, M. L. A planície costeira e a Lagoa dos Patos. In: SEELIGER, U.; ODEBRECHT, C. CASTELLO, J. P. (Eds.). **Os ecossistemas costeiro e marinho do extremo sul do Brasil**. Rio Grande: Ecoscientia, 1998.
- ATLAS EÓLICO DO RIO GRANDE DO SUL. Elaborado por Camargo Schubert Engenheiros Associados, Eletrosul Centrais Elétricas S. A.; dados do modelo mesoescala fornecidos por AWS TruePower. – Porto Alegre: SPDI: AGDI, 2014.
- BASTOS DA SILVA, M. J., 2016. **Estimativa das taxas médias de sedimentação na bacia de evolução e no canal de acesso ao Porto Novo do Rio Grande (RS)**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil Costeira e Portuária, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande.
- BASTOS DA SILVA, M. J.; FONTOURA, J. A. S.; CALLIARI, L. J.; SERPA, C. G. Análise de método de tratamento de dados batimétricos para estudo do processo de assoreamento em portos. **Anais da 8ª Conferência Sul em Modelagem Computacional e do VIII Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica**, p. 1965 – 1977, 2018.
- CALLIARI, L. J., 1980 **Aspectos sedimentológicos e ambientais na região estuarial da Lagoa dos Patos**. Dissertação de Mestrado em Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- CALLIARI, L. J. Características geológicas. In: SEELIGER, U.; ODEBRECHT, C. CASTELLO, J. P. (Eds.). **Os ecossistemas costeiro e marinho do extremo sul do Brasil**. Rio Grande: Ecoscientia, 1998.
- CALLIARI, L. J.; WINTERWERO, J. C.; FERNANDES, E.; CUCHIARA, D.; VINZON, S. B.; SPERLE, M.; HOLLAND, K. T. Fine grain sediment transport and deposition in the Patos Lagoon – Cassino beach sedimentary system. **Continental Shelf Research**, v. 29, n. 3, p. 515 – 529, 2009.
- CENTRO DE PREVISÃO DO TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS (CPTEC/INPE). Disponível na Internet via WWW. URL: <http://enos.cptec.inpe.br/>. Arquivo capturado em 27 de dezembro de 2018.
- COUTINHO, P. N. Sugestões para gerenciamento de estuários. **Arquivos de Ciências do Mar**, n. 25, p. 77 – 82, 1986.
- DELANEY, P. J. V., 1965. **Fisiografia e Geologia de Superfície da Planície Costeira do Rio Grande do Sul**. Publicação especial nº 6 da Escola de Geologia da Universidade Federal do Rio

Grande do Sul. Porto Alegre: Gráfica da Universidade do Rio Grande do Sul.

- FERNANDES, E. H. L.; DYER, K. R.; MOLLER, O. O.; NIENCHESKI, L. F. H. The Patos Lagoon hydrodynamics during an El Niño event (1998). **Continental Shelf Research**, v. 22, p. 1699–1713, 2002.
- GARCIA, C. A. E. Características hidrográficas. In: SEELIGER, U.; ODEBRECHT, C. CASTELLO, J. P. (Eds.). **Os ecossistemas costeiro e marinho do extremo sul do Brasil**. Rio Grande: Ecoscientia, 1998.
- HARTMANN, C.; SANO, E. E.; PAZ, R.S.; MÖLLER Jr., O. O. Avaliação de um período de cheia (junho de 1984) na região sul da Laguna dos Patos, através de dados de sensoriamento remoto, meteorológicos e oceanográficos. **Anais do IV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. P. 985-694, 1986.
- HARTMANN, C.; SCHETTINI, C. A. F. Aspectos hidrológicos da desembocadura da Laguna dos Patos, RS. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 21, n. 4, p. 371 – 377, 1991.
- HARTMANN, C., 1996. **Dinâmica, distribuição e composição do material em suspensão na região sul da Laguna dos Patos, RS**. Tese de Doutorado em Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS HIDROVIÁRIAS – INPH. **Projeto básico do Canal de Acesso ao Porto de Rio Grande – RS, até a isobatimétrica de -18,00 m**. Rio de Janeiro, 2008.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS HIDROVIÁRIAS – INPH. **Anteprojeto de dragagem por resultado para readequação da geometria do canal de acesso ao complexo portuário de Rio Grande - RS**. Rio de Janeiro, 2014.
- KERSTNER, V. W. T., 2003. **Avaliação do comportamento geotécnico e geoquímico de rejeitos de dragagem do Porto Novo de Rio Grande**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Oceânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande.
- KJERFVE, B. Comparative oceanography of coastal lagoons. In: WOLFE, D. A. (Ed.). **Estuarine variability**. 1 ed. Orlando: Academic Press, INC., 1986.
- KLEIN, A. H. F. Clima regional. In: SEELIGER, U.; ODEBRECHT, C. CASTELLO, J. P. (Eds.). **Os ecossistemas costeiro e marinho do extremo sul do Brasil**. Rio Grande: Ecoscientia, 1998.
- LEMKE, N., 2015. **Morfodinâmica da embocadura do Arroio Carahá: Lagoa Dos Patos, São Lourenço do Sul - RS**. Tese de Doutorado em Oceanografia Física, Química e Geológica, Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica, Universidade Federal do Rio Grande.
- MACHADO, D. M., 2013. **Um estudo sobre o clima de ondas e o transporte de lama ao largo da praia do Cassino, RS**. Tese de Doutorado em Engenharia Oceânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- MARENGO, J. A. **Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade:**

caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI. 2 ed. Brasília: MMA, 2007.

MARROIG, P. C., 2015. **Transporte de lama fluída no complexo estuarino de Rio Grande – RS.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Oceânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

MÖLLER, O. O.; LORENZZENTI, J. A.; STECH, J. L.; MATA, M. M. The Patos Lagoon summertime circulation and dynamics. **Continental Shelf Research**, v. 16, n. 3, p. 335 – 351, 1996.

MÖLLER, O. O.; CASTAING, P.; SALOMON, J. C.; LAZURE, P. The influence of local and non-local forcing effects on the subtidal circulation of Patos Lagoon. **Estuaries**, v. 24, n. 2, p. 297 – 311, 2001.

MÖLLER, O.; FERNANDES, E. Hidrologia e hidrodinâmica. In: SEELIGER, U.; ODEBRECHT, C. (Eds.). **O estuário da Lagoa dos Patos: um século de transformações.** Rio Grande, Ecoscientia, 2010.

RELATÓRIO DE SONDAGEM GEOLÓGICA, GEOQUÍMICA E GEOTÉCNICA. 2000. Laboratório de Oceanografia Geológica/DEGEO – FURG. Termo aditivo ao contrato CPS Nº 007/99 SUPRG/FURG.

ROSSATO, M. S., 2011. **Os climas do Rio Grande do Sul: variabilidade, tendências e tipologia.** Tese de Doutorado em Geografia, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SCHWOCHOW, R. Q.; ZANBONI, A. O estuário da lagoa dos patos: um exemplo para o ensino de ecologia no nível médio. **Cadernos de Ecologia Aquática**, v. 2, n. 2, p. 13 – 27, 2007.

SUPERINTENDÊNCIA DO PORTO DO RIO GRANDE. **Plano de Zoneamento das Áreas do Porto Organizado de Rio Grande.** 3 ed. 2017.

SUPERINTENDÊNCIA DO PORTO DE RIO GRANDE – SUPRG. **Porto do Rio Grande: Movimentação Total Toneladas – 2017.** 2018.

TOLDO JR., E. E.; DILLENBURG, S. R.; CORRÊA, I. C. S.; ALMEIDA, L. E. S. B.; WESCHENFELDER, J. Sedimentação na Lagoa dos Patos e os impactos ambientais. **Anais do Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário**, 2005.

TOMAZELLI, L. J.; VILLWOCK, J. A. O cenozoico costeiro no Rio Grande do Sul. In: HOLZ, M.; DE ROS, L. F. (Eds.). **Geologia do Rio Grande do Sul.** P. 375 – 406, 2000.

TORRES, L. H. Águas de maio: a enchente de 1941 em Rio Grande. *Historae*, v. 3, n. 3, p. 239 – 254, 2012.

VIEIRA, E. F.; RANGEL, S. R. S. Planície costeira do Rio Grande do Sul: geografia física, vegetação e dinâmica sociodemográfica. Porto Alegre: Sagra, 1988.

WINTERWERP, J. C. Reducing Harbor Siltation I: Methodology. **Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering**, p. 258-266, 2005.

**APÊNDICE C – Fotografias dos testemunhos coletados no Canal de
Acesso ao Porto do Rio Grande**



Figura C.1: Fotografias dos testemunhos 04, 05 e 10.

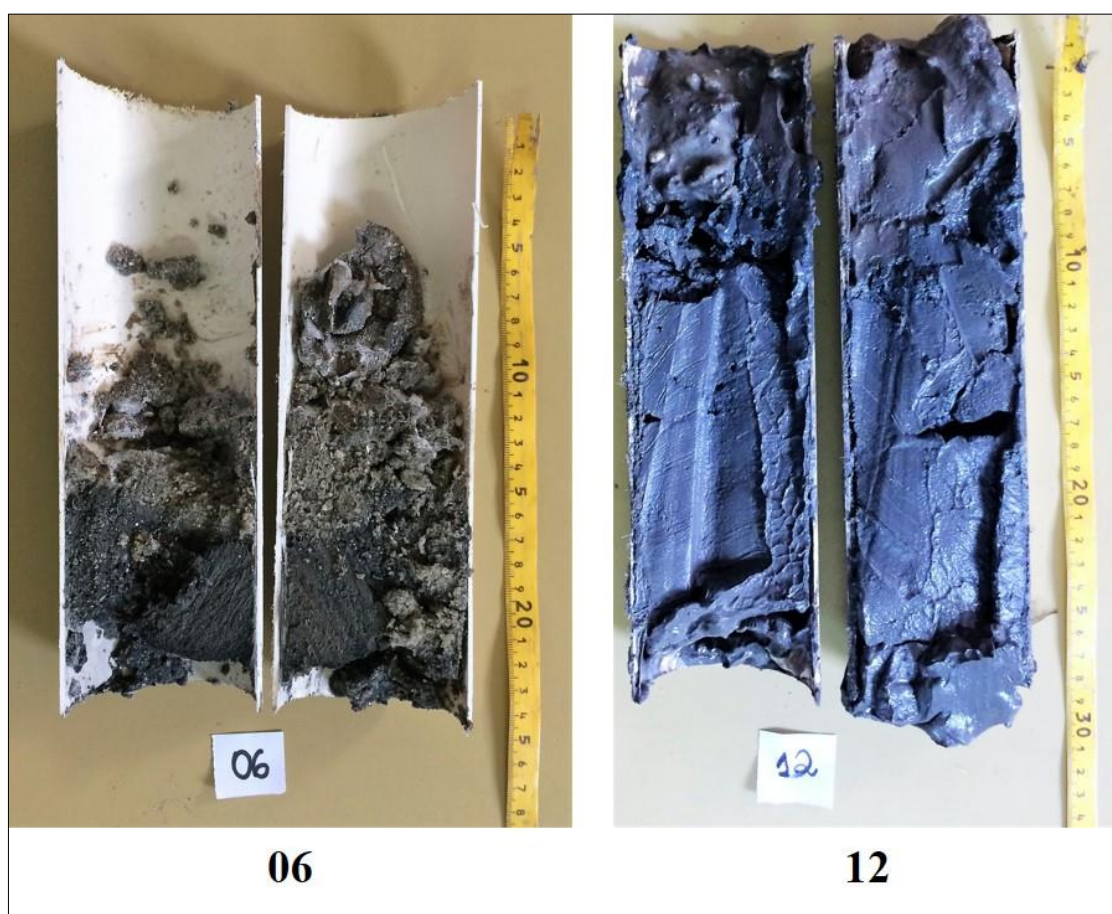


Figura C.2: Fotografias dos testemunhos 06 e 12.