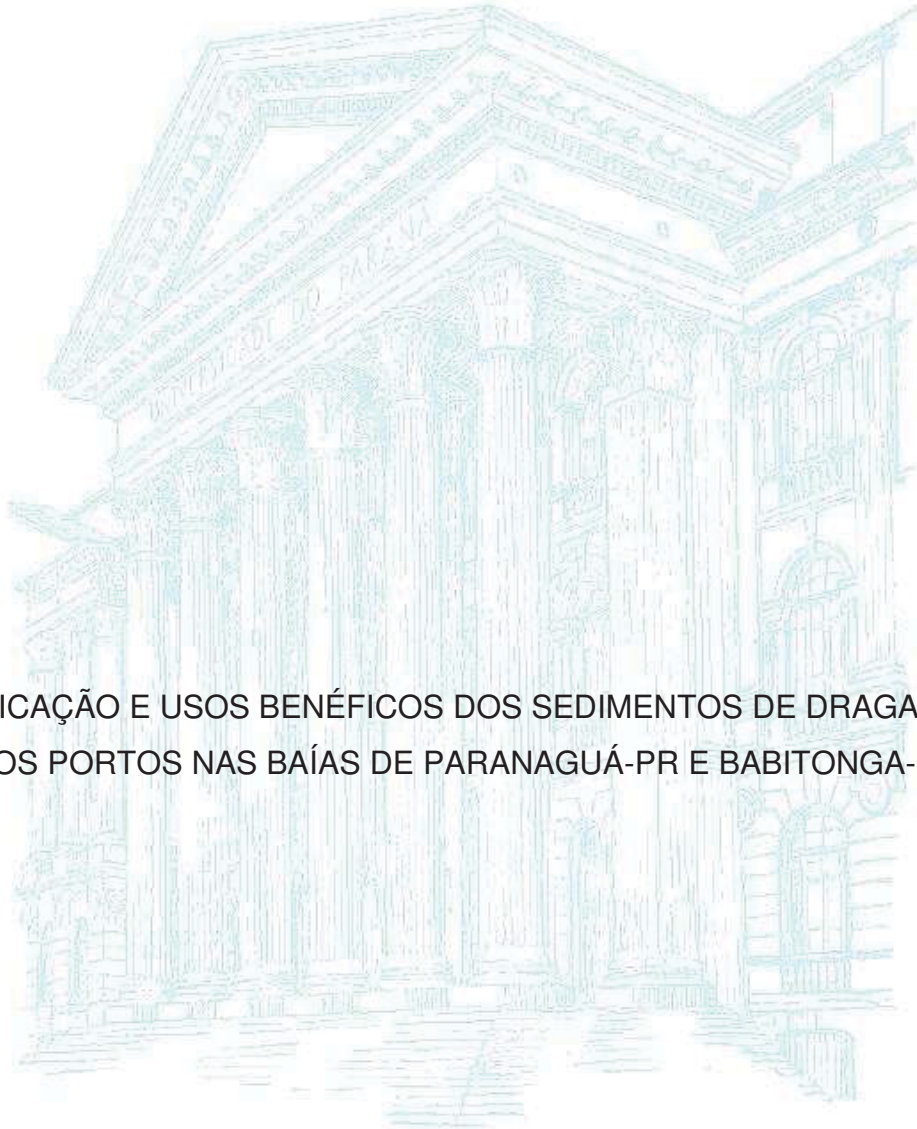


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
JOSÉ AUGUSTO SIMÕES NETO



APLICAÇÃO E USOS BENÉFICOS DOS SEDIMENTOS DE DRAGAGEM  
DOS PORTOS NAS BAÍAS DE PARANAGUÁ-PR E BABITONGA-SC

CURITIBA  
2021

JOSÉ AUGUSTO SIMÕES NETO

APLICAÇÃO E USOS BENÉFICOS DOS SEDIMENTOS DE DRAGAGEM  
DOS PORTOS NAS BAÍAS DE PARANAGUÁ-PR E BABITONGA-SC

Tese apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Doutor, no Programa de Pós-Graduação em Geologia, Área de concentração Geologia Ambiental, Departamento de Geologia, Setor de Ciências da Terra, da Universidade Federal do Paraná.

Orientadora: Prof. Dra. Maria Cristina de Souza  
Coorientador: Prof. Dr. Rodolfo José Angulo

CURITIBA  
2021

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR  
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

S593a

Simões Neto, José Augusto

Aplicação e usos benéficos dos sedimentos de dragagem dos portos nas baías de Paranaguá-PR e Babitonga-SC [recurso eletrônico] / José Augusto Simões Neto. – Curitiba, 2021.

Tese - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geologia, 2021.

Orientador: Maria Cristina de Souza – Coorientador: Rodolfo José Angulo.

1. Sedimentos (Geologia) – Paranaguá, Baía (PR). 2. Sedimentos (Geologia) – Babitonga, Baía (SC). 3. Geoquímica. 4. Sedimentologia. 5. Gerenciamento costeiro. I. Universidade Federal do Paraná. II. Souza, Maria Cristina de. III. Angulo, Rodolfo José. IV. Título.

CDD: 551.304

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação GEOLOGIA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **JOSÉ AUGUSTO SIMÕES NETO** intitulada: **APLICAÇÃO E USOS BENÉFICOS DOS SEDIMENTOS DE DRAGAGEM DOS PORTOS NAS BAÍAS DE PARANAGUÁ-PR E BABITONGA-SC**, sob orientação do Prof. Dr. MARIA CRISTINA DE SOUZA, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 04 de Agosto de 2021.

Assinatura Eletrônica

05/08/2021 10:48:42.0

MARIA CRISTINA DE SOUZA  
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

12/08/2021 18:14:19.0

MARCELO SPERLE DIAS

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE  
JANEIRO)

Assinatura Eletrônica

09/08/2021 10:54:18.0

LAURO JULIO CALLIARI

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE)

Assinatura Eletrônica

28/10/2021 13:55:24.0

MARCUS POLETTE

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE DO VALE DO ITAJAÍ)

Assinatura Eletrônica

09/08/2021 10:44:58.0

ALZIR FELIPPE BUFFARA ANTUNES

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

*„Courage ist gut, aber Ausdauer ist besser.  
Ausdauer, das ist die Hauptsache.“*

*“Coragem é bom, mas perseverança é melhor.  
Perseverança, é a Coisa que importa.”*

*Theodor Fontane (1819 – 1898)*

## AGRADECIMENTOS

O que difere um pesquisador ateu de um cientista agnóstico não é a fé ou descrença que por ventura um dos dois possua, a verdade é que o âmago do ser pensante surge não só da curiosidade e vontade de aprender, mas também da capacidade de imaginar e fantasiar. O ateu triunfante renega o imaginário, enquanto o agnóstico por definição abandona o desejo de respostas do além, se entrega ao conhecimento e se, somente se, a inventividade humana convém, aceitar-se-á afiguração. Por este motivo, agradeço a Ganesha, representação hinduísta do significativo conhecimento e sabedoria, simbolicamente correspondente no cristianismo a Jesus, filho do Criador supremo do universo, Shiva ou Deus.

Existindo ou sendo, inventado ou ficção, foram nos momentos de bloqueio criativo que os mantras e rezas me ajudaram fazendo com que as letras e palavras nesta tese fossem escritas, como se ali naquele ritual ocorresse a própria invocação do conhecimento dos meus mentores e antepassados, e são essas pessoas que merecem verdadeiramente meus agradecimentos.

A primeira delas é a querida e parceira Professora Doutora Maria Cristina de Souza, minha mestra e orientadora, são ao apoio e auxílio irrestrito dela a quem devo todos os créditos desta pesquisa e evolução da sabedoria, foi o brilhantismo da Cris que trouxe até vocês leitoras e leitores os produtos desta obra. Sem que ela perceba, através dela ainda absorvo conhecimentos dos sucessivos mentores e doutores Rodolfo José Angulo, João José Bigarella e Reinhard Maack, pesquisadores que admiro com a profundidade e extensão dos oceanos, mares e praias objetos de nossos estudos.

Ao estimado Professor Angulo agradeço também pela paciência e ciência, foi ele o idealizador deste estudo e a ele sou grato por incontáveis conselhos, revisões e principalmente o ensino, ele mais do que ninguém jamais conhecido por mim, possui tamanha capacidade compreensiva do ensino como uma forma sistêmica de transmissão de conhecimento e sabedoria.

Devo o meu despertar para ciências naturais a três queridas professoras do ensino fundamental, são elas Dercília Giacomini, Cássia Pinto e Catarina Mikiewski, minha gratidão repleta de nostalgia e saudade vai para elas.

A Universidade Federal do Paraná é onde, entre os corredores, laboratórios e salas de aula já vivi mais tempo do que qualquer outra casa onde eu já tenha morado. É tão triste pensar no desmantelamento desta instituição, no descaso com os recursos humanos, e principalmente, a displicência com a Coisa pública e o bem intelectual. Ainda assim é para UFPR que agradeço e por ela que eu torço e estimo.

Nestes mesmos corredores, salas de aula e laboratórios fui aprendendo, lapidando e finalmente formando, no sentido amplo de dar forma ao que sou hoje. Mas no caminho tive a ajuda de muitos colegas, a quem devo parte significativa do meu molde, ao Prof. Dr. Francisco Ferreira, meu mentor na iniciação científica, aos estimados Professores Luiz Alberto Fernandes, Elvo Fassbinder, Fernando Vesely, Barbara Trzaskos, João Carlos Biondi e Eduardo Salamuni.

Aos colegas de laboratório Prof. Dr. Carlos Guedes, o extrovertidíssimo amigo Daniel Paredes, aos *brothers* LECOSTianos Fernanda Avelar, Luiz Sielski, Felix Reize, Lucas Iwakura e Luis Mota, muito obrigado. Para todos os demais colegas de pós-graduação também, digo que sou grato e peço para que perseverem.

Na Agência Nacional de Mineração agradeço aos colegas Dr. Renata Moro, Carlos Dieter, Ronaldo Baeta, Fernando Martins, Edinelson Mendes, Andrea Hauch e Mariane Dornas. No nosso dia a dia dedicamos nosso trabalho ao conhecimento e desenvolvimento sustentável da mineração e geologia no Paraná.

Minhas amigas e parceiras Prof. Dra. Ariadne Borgo, Salla Eeva e Mariele Groxko, também aos meus amigos Pedro Vogt e Ana Carolina Moreira, obrigado pela ajuda e por estarem sempre comigo.

Ao meu pai Arildo Brito Simões, quando jovem se desgarrou da cultura de comerciantes da família para se tornar médico, quando velho me apoiou na decisão de ser geólogo e desgarrar do sonho dele de ter um filho médico.

Às minhas irmãs Natalia e Renata, ambas médicas, obrigado por me deixar de fora dessa festa de dissecação anatômica e permitir conversar apenas com as

rochas e sedimentos. Juntas de minha outra irmã Joice, para vocês toda a gratidão pelo incentivo e amor.

Para minha mãe deixo meu agradecimento por embutir em mim garras de uma guerreira Kaingang, me ensinou com todo o afeto incondicional do mundo que para conquistar há de perseverar, insistir e defender.

Por fim, ao meu parceiro e companheiro Dr. Marcell L. L. Besser, dedico-lhes esta tese com o amor que eu nunca pensei encontrar em mim, obrigado por ser, existir, imaginar, fantasiar e estar ao meu lado.

*“O homem no centro da disputa, chamando para nós mesmos a responsabilidade pela construção do futuro. E a essa responsabilidade não podemos fugir, por mais que muitos têm os olhos voltados apenas para o progresso acelerado, sem dar importância às devastações deixadas pelo caminho. Se o progresso como um todo, na cidade ou no campo, não corresponde às aspirações humanas globais, não será o caso de reduzir o ritmo? É uma questão para reflexão...*

*...Em toda minha vida, pessoal e profissional, sempre preguei que é preciso aceitar a simplicidade. Fazer da simplicidade a base para o futuro.*

*Infelizmente, esta atitude às vezes encontra barreiras porque há muitas pessoas que preferem buscar os caminhos mais difíceis. Ou porque isso lhes traz benefícios materiais, ou porque têm a ilusão de que é mais glamouroso fazer coisas grandiosas, caras, imponentes.*

*Nada é tão complexo quanto querem os vendedores de complexidade. E o mundo está cheio de vendedores de complexidade. E não sabem que é criando a partir de elementos simples, fácil de ser implantados, que teremos o começo de um sistema mais avançado no futuro...*

**Jaime Lerner** – Apresentação de “Manual do Arquiteto Descalço” de Johan van Lengen.

## RESUMO

A estabilidade e calmaria do interior de baías sempre atraíram os navegantes, a baixa influência das ondas e correntes marinhas confere às embarcações um porto seguro nos estuários. Em adição, as forças das marés mais atuantes, principalmente nas desembocaduras das baías, criam sulcos e canais naturais que facilitaram a passagem dos navios por séculos. Porém, obras de dragagens mais constantes e profundas são e se farão cada vez mais necessárias, com o avanço da construção naval, embarcações/calados maiores, somados a dinâmica e tendência natural de assoreamento do estuário, muitas vezes intensificado pelo uso e ocupação das bacias hidrográficas costeiras. O objetivo desta pesquisa é a caracterização destes sedimentos oriundos de dragagem, com avaliação das possibilidades de aproveitamentos destes materiais em áreas adjacentes às baías de Paranaguá e da Babitonga, nos estados do Paraná e Santa Catarina, respectivamente. Multimétodos de caracterização sedimentológica auxiliam o desenvolvimento da pesquisa, dos quais destacam-se análises físicas de microscopias ótica e eletrônica de varredura (MEV), granulometria por peneiramento e pipetagem, e análises químicas de espectroscopia de energia dispersiva (EDS) e espectrometria de massa (ICP-MS). Foram também levantados dados de volumes dragados, sedimentologia e dinâmica costeira, obtidos junto às administrações de portos que operam nas áreas de estudo. Os resultados das análises indicam níveis baixos de poluentes nos materiais dragados próximos às desembocaduras dos estuários, ou seja, nos deltas de marés onde a maior parte das areias são dragadas. Além disso, esses sedimentos dragados apresentam parâmetros, tais como tamanho e forma de grãos, grau de seleção, e composição geoquímica inorgânica e orgânica, semelhantes e compatíveis quando comparados aos sedimentos presentes em praias circundantes aos estuários. Adicionalmente, nota-se que os volumes de materiais movimentados são compatíveis com aqueles necessários às reposições de déficits nas praias, com forte potencial para uso em obras de recomposição ambiental, alimentação de praias, restauração de dunas e demais usos benéficos nas áreas litorâneas adjacentes. Por fim, concluiu-se na tese que o equilíbrio, cumprimento da lei e sustentabilidade da dragagem dependerá também, no futuro, de ações que visem a devolução de areias dragadas em deltas de maré para o sistema deposicional costeiro.

Palavras-chave: Usos benéficos; engorda de praia; geoquímica; sedimentologia; balanço sedimentar; gerenciamento costeiro.

## ABSTRACT

The stability and tranquility of the interior of bays have always attracted sailors. The low influence of waves and sea currents gives vessels a safe haven in the estuaries. In addition, the most active tidal force, especially at the inlets of the bays, creates grooves and natural channels that facilitated the passage of ships for centuries. However, with the advancement of shipbuilding, introducing larger vessels or drafts, added to the dynamics and natural tendency of silting up the estuary, more constant and deeper dredging works are and will be increasingly required. The objective of this research is to characterize these sediments from dredging, with an evaluation of the possibilities of using these materials in areas adjacent to the Paranaguá and Babitonga bays, in the states of Paraná and Santa Catarina, respectively. Multiple methods for sedimentological characterization were employed during the research, most important of which were the physical analyses of optical and scanning electron microscopies, granulometry by sieving and pipetting, and the chemical analyses through dispersive X-ray spectroscopy (EDS) and Inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). Data on dredged volumes, sedimentology and coastal dynamics were collected and provided by administrations of ports operating in the study areas. The results of the analysis indicate the absence of pollutants in the dredged materials close to the estuaries' inlets, especially in the tidal deltas where most of the sands are dredged. In addition, these dredged sediments present parameters, such as grain size, textural and mineralogical maturity, inorganic and organic geochemical composition, similar and compatible with the sediments present on beaches surrounding the estuaries. Nevertheless, it is notable that the volumes of materials dislocated are compatible based on the replacement of deficits on the beaches, with strong potential for use in environmental enhancement works, such as beach and dunes nourishment restorations. The thesis conclusion is that sustainable, legal and balanced dredging will depend, in the future, on actions aimed at returning dredged sand in tidal deltas to the coastal depositional system.

Keywords: Beneficial uses; geochemistry; sedimentology; sedimentary balance; coastal management.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Estrutura organizacional da tese.....  | 20 |
| Figura 2 - Localização dos portos, áreas de estudo, principais topônimos e geologia simplificada (Adaptado de Angulo et al 2009).....   | 23 |
| Figura 3 – Relação geologia/tipologia de costas no CEP e situação de equilíbrio das praias adjacentes, modificado de Angulo et al 2016a. ....   | 27 |
| Figura 4 - Guias de qualidade de sedimentos - Sediment Quality Guidelines (SQG). Destacados dentro do retângulo de linha vermelho para SQGs avaliados em Burton Jr. 2002. Unidade mg/kg. .... | 29 |
| Figura 5 - Distribuição espacial dos fatores de enriquecimento (EFs) ao longo do Complexo Estuarino de Paranaguá – CEP (Angeli et al 2020). ....  | 31 |
| Figura 6 - Fotografias de campo, praias com problemas de erosão. A. Itapoá-SC, B. Matinhos-PR, C. Ponta do Poço e D. Ilha do Mel - PR. ....   | 32 |
| Figura 7- Fotografias de campo, amostragem nas praias. ....   | 34 |
| Figura 8 - Fotografias de campo, amostragens nos canais.....  | 35 |
| Figura 9 - Fotografias de laboratório, preparação de amostras e análises. ....  | 37 |
| Figura 10 – Distribuição granulométrica nas praias paranaenses.....   | 39 |
| Figura 11 – Distribuição granulométrica nas praias de Itapoá-SC. ....   | 40 |
| Figura 12 - Gráfico ternário “Areia - Argila – Silte” para as amostras de canais nas baías de Babitonga e Paranaguá, Gradistat (BLOTT, 2001).....   | 41 |
| Figura 13 – Matéria orgânica - MO (g/dm <sup>3</sup> ) e potencial hidrogeniônico – pH nas baías. ....  | 42 |
| Figura 14 – Distribuição do arsênio nos sedimentos superficiais nas baías. ....   | 42 |
| Figura 15 – Distribuição do cromo nos sedimentos superficiais nas baías. ....   | 43 |
| Figura 16 – Distribuição do cobre nos sedimentos superficiais nas baías. ....   | 43 |
| Figura 17 – Distribuição do chumbo nos sedimentos superficiais nas baías. ....  | 43 |
| Figura 18 – Distribuição do cádmio nos sedimentos superficiais nas baías. ....  | 44 |
| Figura 19 – Distribuição do níquel nos sedimentos superficiais nas baías. ....  | 45 |
| Figura 20 – Distribuição do zinco nos sedimentos superficiais nas baías.....  | 45 |
| Figura 21 – Distribuição do mercúrio nos sedimentos superficiais nas baías.....   | 45 |
| Figura 22 - Localização do canal de acesso ao Porto de Paranaguá e suas subdivisões. Fonte: adaptado de APPA, 2015. ....  | 49 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 23 - Marés astronômicas nos períodos de amostragem. Executada por trechos no sentido NW para SE aleatórios. Fonte: APPA, 2015. ....  | 51 |
| Figura 24 - Localização das amostras no trecho Alfa do Canal da Galheta; taxas de erosão costeira segundo Angulo et al. (2017) e alvos sugeridos de alimentação de praia. Fonte: Adaptado de Angulo et al 2017. ....  | 53 |
| Figura 25 - Local da área de despejo. ....  | 54 |
| Figura 26 - Classificação de Shepard (1954); 32 amostras do trecho Alfa. Fonte: APPA, 2015. ....  | 55 |
| Figure 27 – Subtropical estuaries of Paranaguá and Babitonga, with port areas and current offshore disposal areas of the dredged sediments identified. Sources: Digital Terrane Model (DTM) data from Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) is available on the website of United States Geological Survey/Eros Data Center (USGS/ED). Road and cartographic databases are available on the website of the Department of Highways (DER) of Paraná State and of the Geological Survey of Brazil (SGB), respectively. Limits of the dredged channels are from Port Administration Data of Paranaguá and São Francisco. ....   | 60 |
| Figure 28 - Location of the sampling points in the channels of Paranaguá (JP-01 to JP-06) and Babitonga (JB-01 to JB-06) bays. The sampled beaches are also identified with red points: Forte and Fora beaches in Ilha do Mel/Honey Island and Ponta do Poço beach next to the Paranaguá bay channel, and Itapema do Norte and Itapoá beaches next to the Babitonga bay. Sources: Digital Terrane Model (DTM) data from Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) is available on the website of United States Geological Survey/Eros Data Center (USGS/ED). Road and cartographic databases are available on the website of the Department of Highways (DER) of Paraná State and of the Geological Survey of Brazil (SGB), respectively. Limits of the dredged channels are from Port Administration Data of Paranaguá and São Francisco. .... | 63 |
| Figure 29 - Mineralogical composition and morphology of the sediments at the Fora Beach in Ilha do Mel/Honey Island (a and f), Itapoá Beach (c), Matinhos Beach (e) and in the Paranaguá (b) and Babitonga (d) channels. ....   | 66 |
| Figure 30 - Metals content comparison between SQGs and the Babitonga and Paranagua bays average results. ....   | 69 |
| Figure 31 - Study area location with the 4 harbors operating in the bays. ....  | 74 |

|   |    |
|---|----|
| Figure 32 - Shoreline changes in 40 years DAS analyses. In detail Brava, Flamingo and Itapoá beaches. ....  | 77 |
| Figure 33 - GSP Morphological profile differences in Caravelas Beach (Adapted from PARANÀ 2021 and Quadros 2002). ....  | 79 |
| Figure 34 - Beach nourishment SURPAC models. A – Matinhos from Fish Market Beach until Saint Etienne Beach; B – Matinhos/Brava Beach/ C- Itapoá Beach. B and C 3X over raised scale. .... | 81 |
| Figure 35 - Alternative nourishment area based in an ideal balanced beach section (Section 01 adpted from Silva 2018). ....   | 82 |
| Figure 36 - Alternatives Dredging/Dumping Scenarios for Itapoá (Adapted from Silveira et al 2012). ....   | 83 |
| Figure 37 - Flowchart of the dredging and management cycle in Hamburg Harbor. ....  | 86 |

## ÍNDICE DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 - Custos (em milhões de reais) e volumes de sedimentos dragados (em milhões de m <sup>3</sup> ), no CEP, entre 2009 e 2015. ....  | 52 |
| Tabela 2 - Profundidade (m), frações granulométricas (%) e metais pesados (mg/Kg) dos sedimentos dragados no trecho Alfa do CEP. Notas: (nd) não detectado. ....   | 56 |
| Table 3 - General results in the Babitonga and Paranaguá bays. For Babitonga bay, JB-01 to JB-06 are samples collected for this research and B# are samples from the São Francisco and Itapoa harbors' data; For Paranaguá bay, JP-01 to JP-06 are samples collected for this research and P14 is a sample from the Paranaguá Harbor data (ªSimões et al. 2017)..... | 67 |
| Table 4 - Amount of sediment dredge along the channels in the bays.....  | 70 |
| Table 5 - Images used for shoreline analyses. ....   | 74 |
| Table 6 - Costs (in millions of US dollars) and volumes of dredged sediments (in millions of m <sup>3</sup> ), in the CEP, between 2009 and 2015, conversions and monetary corrections referring to the last annual day and adapted by Simões et al 2017. ....   | 84 |

## LISTA DE SIGLAS

|            |   |   |
|------------|---|---|
| APPA       | – | Administração dos Portos de Paranaguá e Antonina  |
| ANM        | – | Agência Nacional de Mineração   |
| APSFS      | – | Autoridade Portuária Porto de São Francisco do Sul  |
| Al         | – | Alumínio  |
| As         | – | Arsênio   |
| Ca         | – | Cálcio  |
| Cd         | – | Cádmio  |
| CEP        | – | Complexo Estuarino de Paranaguá   |
| Cl         | – | Cloro   |
| CONAMA     | – | Conselho Nacional do Meio Ambiente  |
| CPRM - SGB | – | Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (em inglês <i>Geological Survey of Brazil – GSB</i> )                |
| Cr         | – | Cromo   |
| Cu         | – | Cobre   |
| DOI        | – | Identificador de Objeto Digital (do inglês <i>Digital Object Identifier</i> )                                   |
| CONAMA     | – | Conselho Nacional do Meio Ambiente  |
| DER        | – | Departamento de Estradas de Rodagem (em inglês <i>Department of Highways</i> )                                  |
| DTM        | – | Modelo Digital de Terreno (do inglês <i>Digital Terrane Model</i> )   |
| EDS        | – | Espectroscopia por Energia Dispersiva (do inglês <i>Energy Dispersive Spectroscopy</i> )                        |
| EF         | – | Fator de Enriquecimento (do inglês <i>Enrichment Factor</i> )   |
| EL         | – | <i>Echinometra lucunter</i>   |
| Eh         | – | Potencial de oxidação-redução   |
| EPA        | – | Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América (do inglês <i>Environmental Protection Agency</i> ) |
| HPA        | – | Autoridade Portuária de Hamburgo (do inglês <i>Hamburg Port Authority</i> )                                     |
| HPAs       | – | Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (em inglês <i>PAH polycyclic aromatic hydrocarbon</i> )                 |

|         |   |  |
|---------|---|--|
| ICP-MS  | – | Espectrometria de Massa por Plasma Acoplado Indutivamente (do inglês <i>Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry</i> ) |
| ITA     | – | Itapoá   |
| ITAM    | – | Itapema do Norte (Itapoá)  |
| LACAUT  | – | Laboratório de Análises de Combustíveis Automotivos – UFPR   |
| LabSed  | – | Laboratório e Estudos Sedimentológicos e Petrologia Sedimentar – UFPR  |
| LAMIR   | – | Laboratório de Análises de Minerais e Rochas – UFPR  |
| LECOST  | – | Laboratório de Estudos Costeiros – UFPR  |
| LP      | – | <i>Leptocheirus plumulosus</i>   |
| K       | – | Potássio   |
| MAT     | – | Matinhos   |
| MEV     | – | Microscopia Eletrônica de Varredura  |
| Mg      | – | Magnésio   |
| Mn      | – | Manganês   |
| MO      | – | Matéria Orgânica   |
| Ni      | – | Níquel   |
| Na      | – | Sódio  |
| OCP     | – | Pesticidas Organoclorados (do inglês <i>Organochlorine Pesticides</i> )  |
| Pb      | – | Chumbo   |
| PCB     | – | Bifenilos Policlorados (do inglês <i>Polychlorinated Biphenyls</i> )   |
| pH      | – | Potencial Hidrogeniônico   |
| PP      | – | Ponta do Poço (Pontal do Paraná)   |
| SCPar   | – | SC Participações e Parcerias S.A.  |
| SQG     | – | Guias de Qualidade de Sedimentos (do inglês <i>Sediment Quality Guidelines</i> )   |
| SRTM    | – | em inglês <i>Shuttle Radar Topography Mission</i>  |
| TBT     | – | Tributilestanhos   |
| USGS/ED | – | em inglês <i>United States Geological Survey/Eros Data</i>   |
| Zn      | – | Zinco  |

## SUMÁRIO

|   |    |
|---|----|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> .....   | 16 |
| 1.1 JUSTIFICATIVAS .....  | 18 |
| 1.2 HIPÓTESES .....   | 18 |
| 1.3 OBJETIVOS.....  | 19 |
| 1.4 ESTRUTURA DA TESE.....  | 19 |
| <b>2 CONTEXTOS GERAIS</b> .....   | 20 |
| 2.1 ÁREA DE ESTUDO .....  | 20 |
| 2.2 GEOLOGIA E DINÂMICA COSTEIRA DA ÁREA.....                           | 22 |
| 2.3 ESTADO DA ARTE E PROBLEMÁTICA COSTEIRA.....                         | 26 |
| <b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....                                      | 32 |
| 3.1 CAMPO E AMOSTRAGEM.....   | 33 |
| 3.2 ANÁLISES GRANULOMÉTRICAS .....                                      | 35 |
| 3.3 MICROSCOPIA ÓTICA E ELETRÔNICA .....                                | 36 |
| 3.4 ESPECTROSCOPIA DE ENERGIA DISPERSIVA E ESPECTRÔMETRIA DE MASSA..... | 36 |
| 3.5 POTENCIAL HIDROGENIÔNICO – PH E MATÉRIA ORGÂNICA – MO .....         | 38 |
| 3.6 VARIAÇÃO DA LINHA DE COSTA E MORFOLOGIA DAS PRAIAS .....            | 38 |
| <b>4 RESULTADOS</b> .....   | 38 |
| 4.1 ARTIGO POSSIBILIDADE DE APROVEITAMENTO .....                        | 46 |
| 4.2 ARTIGO QUALIDADE E DISPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS.....                    | 58 |
| 4.3 ARTIGO RECUPERAÇÃO AMBIENTAL DE PRAIAS E DUNAS .....                | 72 |
| <b>6 DISCUSSÕES E CONCLUSÕES</b> .....                                  | 88 |
| <b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....                               | 90 |
| <b>ANEXOS</b>   |    |

## 1 INTRODUÇÃO

A navegação e atividades portuárias creditam à sociedade moderna inserção no cenário globalizado, não obstante, mineração, agronegócios, indústria, comércio e serviços são dependentes das vias marinhas e não há possibilidade de desenvolvimento pleno destas atividades nas regiões, desvinculada dos portos. Para tal, os principais portos distribuídos nas regiões costeiras dos cinco continentes, dependem diretamente de obras de dragagem em canais de acesso.

No sul do Brasil, as baías de Paranaguá e da Babitonga tem o histórico de desenvolvimento da atividade portuária que remonta ao período pós-invasão europeia na América do Sul, provavelmente a partir da segunda metade do século XVI, mas teria sido só com a Abertura dos Portos, decretada em 1808 no início do período pós-colonial do Brasil, que o desenvolvimento portuário foi impulsionado em todo o país (MORGENSTERN, 2017).

A dragagem é uma importante atividade para o sistema hidroviário atual, com o principal objetivo de garantir a profundidade ideal dos canais e vias de acesso, tanto para assegurar como para permitir a navegabilidade das embarcações. É importante também quando realizada em casos de obras de recuperação ecossistêmica, para melhorar a qualidade ambiental dos corpos hídricos (MONTEIRO, 2008).

Atualmente, no estado do Paraná a gestão do porto e conseqüentemente o manejo das operações de dragagem estão sob encargo da Administração dos Portos de Paranaguá e Antonina – APPA, autarquia vinculada à Secretaria de Infraestrutura e Logística do Estado do Paraná. O porto se projeta como um dos principais portos em volume de movimentações e tráfego marítimo do país e da América Latina, e os principais produtos movimentados são: soja, farelo, milho, sal, açúcar, fertilizantes, contêineres, congelados, derivados de petróleo, álcool e veículos.

Já a dragagem no caso norte catarinense, fica sob responsabilidade do Porto de São Francisco do Sul – SCPar, empresa pública vinculada ao Governo do Estado de Santa Catarina. O porto de Itapoá é um terminal de uso privado, administrado por dois sócios: a Portinvest Participações S.A. e a Aliança

Administração de Imóveis e Participações Ltda. O SCPar concentra movimentações majoritárias de granéis sólidos, principalmente vegetais como cevada, farelo de soja e soja, trigo, milho e malte, já o terminal do porto de Itapoá movimenta exclusivamente contêineres.

Alheias às obras de dragagem, as movimentações portuárias, intensas e constantes, geram alterações sobre o ambiente e carecem de regras normativas e técnicas para que os impactos ambientais sejam amenizados (MACHADO; RIBEIRO 2012).

As preocupações e debates acerca do processo de dragagem se intensificaram mundialmente a partir da década de 1980. Como exemplo, nos Estados Unidos da América, a Agência de Proteção Ambiental, em cooperação com o Corpo de Engenheiros do Exército Americano, desde então, desenvolve pesquisas sobre o manejo de material dragado e em 1992 foi elaborado um relatório técnico sobre os possíveis destinos deste material, compreendendo alternativas para a disposição em mar aberto, disposição em terra, uso benéfico e remediação (EPA, 1992).

No Brasil, os debates resultaram na elaboração da Resolução Conama nº 454 (BRASIL, 2012), cujo teor já aponta para políticas públicas que devem ser adotadas e a possibilidade de “uso benéfico do material dragado”, que de acordo com esta mesma norma pode ser usado em obras de engenharia, criação e melhoria do terreno, recomposição, engorda artificial de praias, estabilização da linha de costa, uso na construção civil, indústria, agricultura, aquicultura, entre outros.

Um panorama detalhado dos impactos causados pela atividade humana na costa paranaense, principalmente na morfologia e nos processos sedimentares, foi recentemente publicado por Angulo et al 2020 e posiciona a dragagem como um dos elementos de maior impacto ambiental no litoral.

Atualmente, dois canais são dragados nas baías a serem estudadas e estão assim distribuídos, na Babitonga o canal de acesso, dividido em interno e externo, conduz as embarcações aos portos de Itapoá ou São Francisco do Sul. Enquanto que na Baía de Paranaguá a única via dragada é o Canal da Galheta, que se divide nos setores Alfa, Bravo, Charlie e Delta, que além do porto homônimo de Paranaguá, conduz também ao porto de Antonina.

## 1.1 JUSTIFICATIVAS

A ocupação humana das regiões costeiras trouxe consigo problemáticas que contrastam com a necessidade do aprofundamento científico, tanto do ponto de vista da geologia ambiental, costeira, geoquímica e toxicológica, quanto social e econômico. Nesta razão se fundamenta a pesquisa de aprimoramento do possível aproveitamento, da disposição final do sedimento dragado e demais possibilidades de gestão costeira.

A idealização do uso benéfico destes sedimentos deve ser compreendida como a principal e primordial justificativa do presente estudo, projeta-se como mais do que imposição normativa (BRASIL, 2012), mas também como possibilidade de desoneração dos recursos despendidos na dragagem.

O ensejo de estudar a aplicação destes materiais surge também da oportunidade de que estão disponíveis para o desenvolvimento deste projeto grande parte dos dados produzidos pelas entidades envolvidas nas obras de dragagem, dados estes produzidos em atendimento às normas legais e ambientais. Isso reduz consideravelmente o tempo e os custos do estudo, da mesma forma permitem avanços significativos em relação à compreensão geológica.

## 1.2 HIPÓTESES

Perdura como fundamento hipotético desta tese a seguinte premissa: os sedimentos dragados nas baías de Paranaguá e Babitonga, principalmente em bancos de areia próximos às desembocaduras, e que atualmente são despejados fora do sistema costeiro (*offshore*), são sim, em sua grande maioria, compostos por areias apropriadas para obras de recomposição ambiental, incluindo alimentação (engorda) artificial de praias e dunas, entre outras possibilidades de usos benéficos.

Subordinadamente, estes mesmos depósitos de areia dragados correspondem a uma reserva costeira/mineral importante de sedimentos que poderiam ser utilizados em obras de recuperação ambiental, retornando ao sistema costeiro e auxiliando no equilíbrio de perfis de praias adjacentes, especialmente aquelas que apresentam problemas de erosão.

### 1.3 OBJETIVOS

A tese de doutorado tem como objetivo geral, a comprovação da compatibilidade sedimentológica entre a areia necessária para obras de recuperação ambiental e a areia encontrada em bancos de deltas de maré. A areia destes bancos, que atualmente é dragada, deve ser livre ou ter baixa concentração de substâncias tóxicas nas áreas de estudo. Os objetivos específicos da tese são:

- Estabelecer zonas de concentração de agentes contaminantes, quando presentes, e citar os fatores que controlaram a distribuição e contaminação dos sedimentos;
- Citar as diversas possibilidades de aproveitamento de sedimentos oriundos de obras de dragagem, apontar os usos praticados em diversos portos, avaliar as legislações e normas de disposição de material dragado e ponderar a iniciativa e disposição de entidades envolvidas no tema para possíveis mudanças;
- Avaliar e indicar praias e áreas com evolução da linha de costa afetadas direta ou indiretamente pela dragagem e atividade portuária, onde obras de recomposição da faixa dinâmica da praia poderia ser realizada com sedimentos dragados.

### 1.4 ESTRUTURA DA TESE

Tendo em vista as recentes modificações na forma de apresentação de dissertações e teses, optou-se por uma estrutura documental (Figura 1) com resultados apresentados nos artigos desenvolvidos na pesquisa.

Os artigos já publicados não estão formatados nas normas ou modelos (*Templates/Layouts*) dos periódicos, mas suas versões definitivas e códigos DOI podem ser encontrados nas referências bibliográfica como Simões et al 2017 e Simões et al 2021.

As referências bibliográficas e índices de figuras e tabelas são apresentados de forma integrada. Apenas o sumário e numeração dos capítulos são individuais, tese e artigos com numerações próprias.

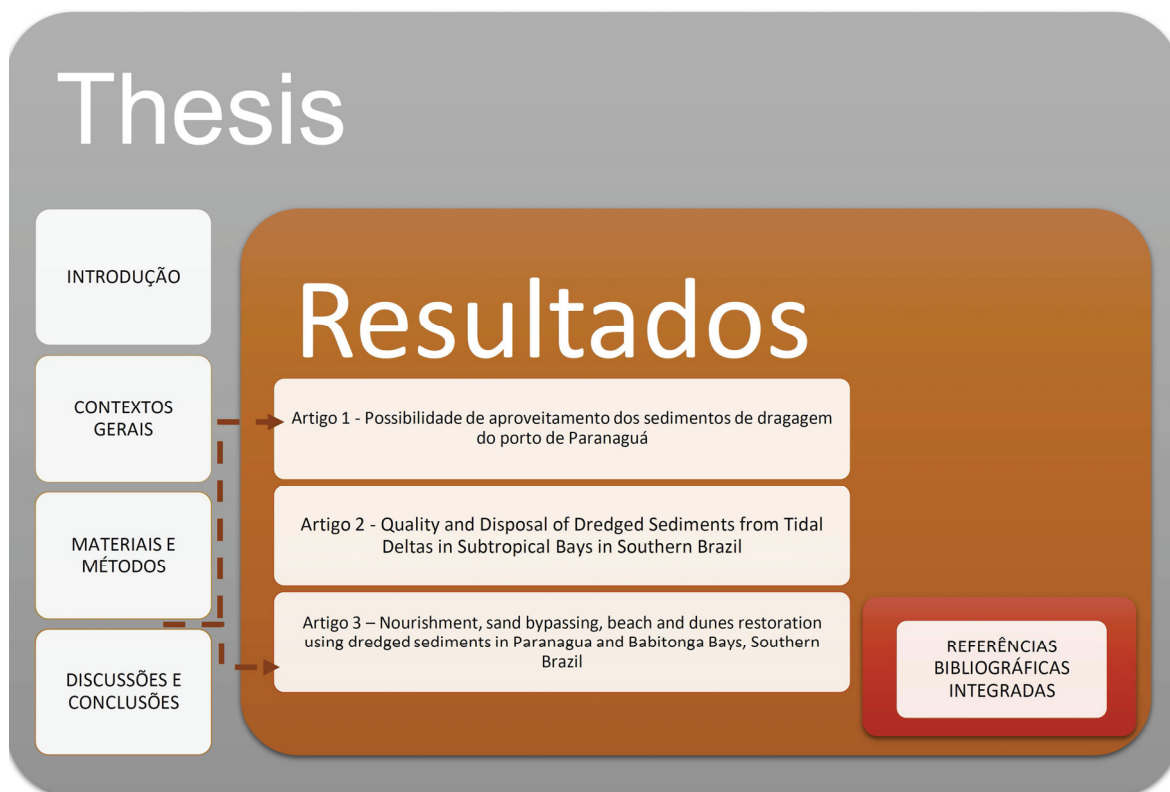


Figura 1 - Estrutura organizacional da tese.

A tese baseia-se em três artigos, um produzido no idioma português e dois produzidos no idioma inglês. Os artigos de número 1 e 2 foram publicados, o artigo de número 3 ainda não.

## 2 CONTEXTOS GERAIS

### 2.1 ÁREA DE ESTUDO

A pesquisa desenvolvida engloba duas principais mesorregiões nos litorais do Paraná e Santa Catarina, no sul do Brasil. Na mesorregião norte, insere-se o porto de Paranaguá, cidade que se destaca como o principal e mais antigo polo urbano da costa no estado paranaense. Além das vias hidroviárias, Paranaguá pode ser acessada via terrestre, principalmente pela estrada BR-277 e pela ferrovia “FERROESTE” operada pelo Governo do Estado.

O porto situado no Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP) teve primórdios no ciclo do ouro, seguido pelos ciclos da erva mate e depois do café. O antigo ancoradouro Paranaguá tornou-se um porto comercial em 1925 quando foram autorizadas obras para adequação do porto à expansão da frota comercial. Estas obras contemplavam a abertura de dois canais de acesso com profundidade entre 8 e 10 m - Canal Barra Norte e Canal Sudeste (Canal da Galheta), a construção de 550 m de cais acostável e de 2.486 m de cais de saneamento, além de armazéns e depósitos (MACHADO; RIBEIRO 2012). No entanto, tais benfeitorias só foram finalizadas em 1935, quando o Porto de Paranaguá foi oficialmente inaugurado. Atualmente, Paranaguá figura como o terceiro porto em movimentação de carga no Brasil. Destaca-se, principalmente, pela movimentação de contêineres e granel sólido, sendo o principal polo de exportação do sul do país.

Na mesorregião sul da área de estudo, estão os portos de São Francisco do Sul e de Itapoá, inseridos na Baía da Babitonga, localizada na porção extremo norte da costa do estado de Santa Catarina, abrangendo toda a costa do município de Itapoá desde a desembocadura do Rio Saí-Guaçu, no norte, até a desembocadura da baía da Babitonga, no sul. O acesso à região é iniciado pela rodovia BR-101 em direção ao município de Garuva-SC. A partir desta cidade, é necessário acessar a rodovia estadual SC-412 em direção à Guaratuba-PR. Há uma bifurcação para outra rodovia estadual, SC-416, com direção ao Porto de Itapoá.

Já o porto de Francisco do Sul, tem acesso também pela BR-101, seguido da rodovia estadual SC-280 até a cidade homônima. É um dos principais portos de navios porta-contêineres do Brasil e está em operação desde 1955. Naturalmente profundo o suficiente no início, o crescente calado dos navios levou esse porto a iniciar atividades de dragagem em 1980, a fim de garantir a profundidade de 10 m dentro do canal de navegação. Após 20 anos ocorreu a primeira dragagem de aprofundamento e em 2000 o canal foi aprofundado para 11 m. Desde então, foi gradualmente aprofundado para acomodar navios pós-Panamax. Foi dragado para 13 m de profundidade em 2003 e para 14 m em 2008.

## 2.2 GEOLOGIA E DINÂMICA COSTEIRA DA ÁREA

As regiões costeiras do Estado do Paraná e do norte do Estado de Santa Catarina estão inseridas num amplo arco estrutural definido pelas elevações de Cabo Frio (23°S) e Florianópolis (28°S), entre o qual, a Bacia de Santos foi estabelecida. Neste contexto tectônico, depósitos sedimentares costeiros cenozoicos são encontrados desde o Canal do Linguado na Baía da Babitonga, ao sul da área objeto deste estudo, até a desembocadura do Mar da Ararapira ao norte da mesma.

A planície costeira paranaense estende-se desde o sopé da Serra do Mar até o oceano Atlântico, tem um comprimento de aproximadamente 90 km, largura máxima em torno de 55 km na região de Paranaguá e altitudes inferiores a 20 m. Limita-se ao norte pela desembocadura do Mar da Ararapira (25°18'12"S) e ao sul pela desembocadura do Rio Saí-Guaçú (25°58'35"S). É composta majoritariamente por sedimentos quaternários depositados em ambientes continentais e marinhos (ANGULO, 1992).

O litoral paranaense é caracterizado pela formação de extensas planícies costeiras com cordões arenosos ao longo de toda sua costa. Essas planícies formaram-se como consequência das oscilações no nível relativo do mar durante o Pleistoceno Superior (120 mil anos atrás), quando o nível do mar estaria 8 metros ( $\pm 2$  m) acima do atual e durante o Holoceno (5.100 anos atrás), 2,5 metros ( $\pm 0,5$  m) acima do atual. De acordo com Angulo 2004, estes cordões arenosos são feições relacionadas a antigas linhas de praia. Mapa geológico simplificado conforme Figura 2.

Outra característica do litoral paranaense é a presença de dois sistemas estuarinos, a Baía de Guaratuba e o Complexo Estuarino da Baía de Paranaguá e Laranjeiras, que recortam profundamente as planícies costeiras. Segundo Angulo et al 2009, o desenvolvimento das barreiras holocênicas e a evolução paleogeográfica das planícies costeiras da área de estudos estão intimamente relacionados com a morfodinâmica dos sistemas estuarinos existentes.

Recentemente, Guedes et al 2020 aprofundaram estudos nos sistemas deposicionais de barreiras na planície paranaense, trazendo à luz novas datações

com técnicas de luminescência opticamente estimulada, com a qual seria possível presumir 3 distintas idades para estas barreiras. A confirmação destas idades depende dos resultados de estudos em desenvolvimento no Laboratório de Estudos Costeiros – LECOST UFPR.

No extremo sul da área pesquisada, a costa caracteriza-se pela sua forma retilínea, orientação aproximadamente N-S e presença de praias arenosas. As praias são formadas predominantemente por areia fina, com grau de seleção moderado, assimetria negativa e com tendência de engrossamento para a direção norte (SOUZA et al 2003).

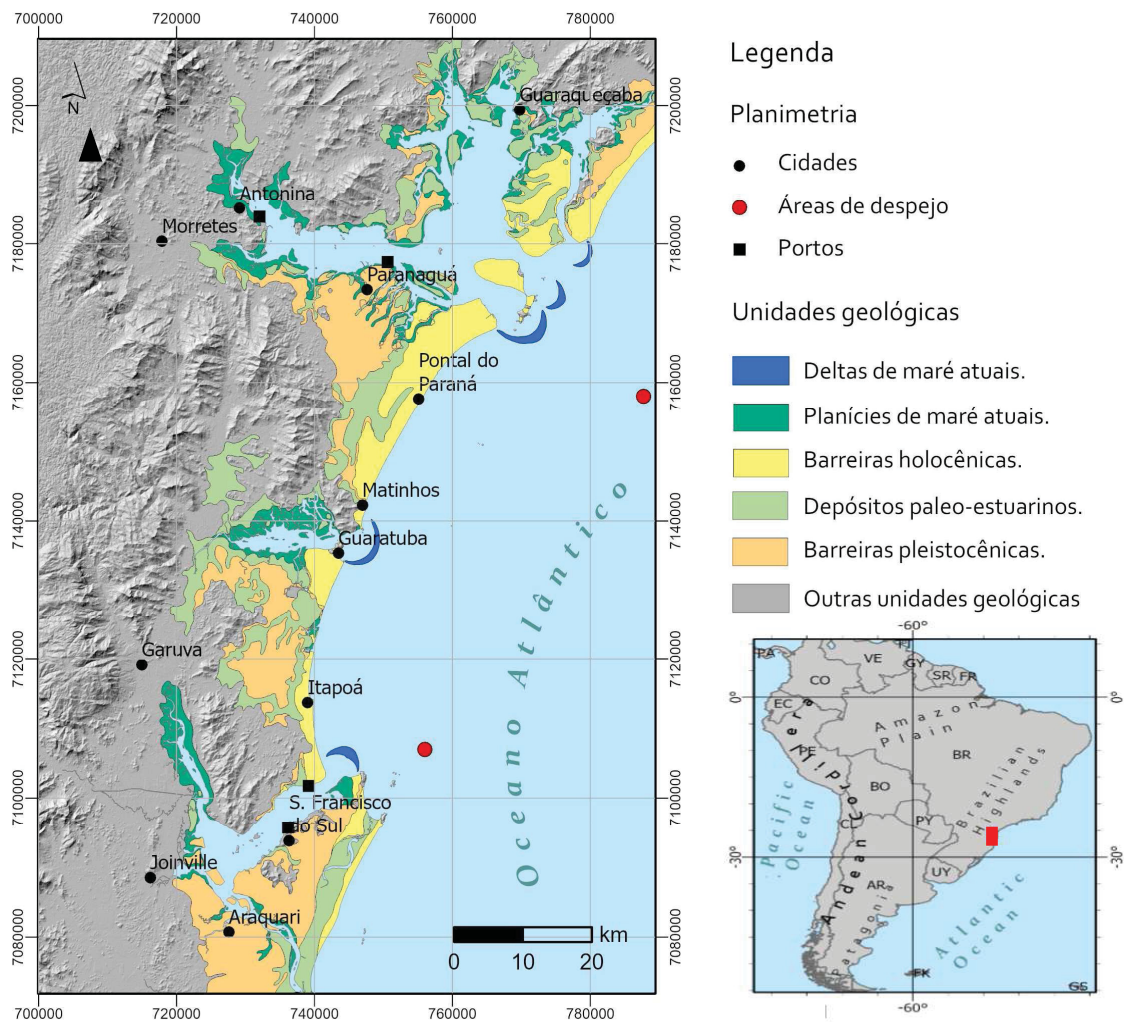


Figura 2 - Localização dos portos, áreas de estudo, principais topônimos e geologia simplificada (Adaptado de Angulo et al 2009).

Klein et al 2016 destacam a presença de praias com predominância também de areia média no setor extremo norte do litoral catarinense. Mais recentemente, variações sazonais de granulometria foram observadas em praias de Itapoá-SC, com significativo aumento da proporção de areia média nos meses de inverno (FREITAS, 2019).

Quanto à morfologia, apresentam declividade de face praial variando de 2º a 4º e barras longitudinais paralelas a linha de costa (SOUZA, 1999). Já a Baía da Babitonga é a mais importante formação de águas marinhas interiores do litoral norte de Santa Catarina (RODRIGUES et al 1998).

O complexo sistema deposicional costeiro nas regiões apresentam registros esporádicos continentais e vastos depósitos de barreiras e depósitos estuarinos pleistocênicos e holocênicos, eólicos, marinhos plataformais, praias e de deltas de marés. Juntos formam uma importante reserva de sedimentos que foram retrabalhados no período quaternário por ação de correntes, ondas e marés.

As unidades geológicas nas áreas objeto de estudos correspondem ao domínio de depósitos sedimentares cenozoicos, representado principalmente por planícies com cordões litorâneos, planícies paleoestuarinas quaternárias e depósitos atuais de praia, eólicos e plataformais (SOUZA 1999; ANGULO et al 2016a). O entendimento da dinâmica sedimentar é importante na caracterização dos impactos gerados pelas dragagens e, este conhecimento torna-se decisivo no apontamento de possíveis aproveitamentos dos sedimentos dragados.

Na costa paranaense e catarinense, seguindo o padrão do sistema de geração de ondas no Atlântico Sul, a propagação das mesmas está vinculada aos centros de geração em áreas oceânicas distantes (ANGULO et al 2018), independentes das direções dos ventos locais. No litoral sul brasileiro os eventos de ondas de alta energia são formados principalmente a partir de ciclones subtropicais (BIGARELLA et al 1978). Estes eventos também estão relacionados à intensificação de forçantes como os ventos de sul-sudeste, estes com capacidade de transformação da costa, a ocorrência simultânea destes fatores potencializa os processos de erosão (NEMES, 2011).

Resultantes da ação das ondas, com predomínio de direção de sul e sudeste, a deriva litorânea longitudinal líquida é para norte, o que é confirmado pela

orientação das fozes dos rios e córregos nas praias, além da morfologia dos deltas-de-maré vazante (ANGULO, 1992).

Na costa estudada, as marés são semidiurnas com interações de cooscilações não lineares (MANTOVANELLI, 1999). A amplitude da maré de sizígia é de 1,5 m na costa oceânica e de 2,2 m no interior do estuário. Também as marés meteorológicas podem atingir 80 cm acima do nível das marés astronômicas (MARONE; JAMIYANAA, 1997). As marés geram correntes de enchente e vazante e ainda podem criar vórtices de maré (CAMARGO; HARARI, 2003).

No CEP a influência da maré é o agente de maior impacto na dinâmica sedimentar, pois se trata de um estuário hipersíncrono, com efeito de convergência excedendo o atrito, o que resulta no aumento da amplitude das marés na cabeceira (MANTOVANELLI, 1999).

A capacidade das correntes de maré vazante e enchente em transportar sedimentos de fundo estão mais relacionadas à ocorrência de eventos de alta energia que ao movimento das marés astronômicas (NOERNBERG et al 2007).

Na parte externa do Canal da Galheta, o transporte de sedimentos ocorre ao longo do canal, influenciado pelas correntes de maré de sizígia, que têm capacidade de transportar sedimentos de fundo e durante eventos de alta energia o transporte de sedimentos também ocorre paralelamente à costa, devido à intensificação das correntes de deriva litorânea (NOERNBERG et al 2007).

Resultam da dinâmica no CEP os principais sistemas deposicionais correlatos a depósitos estuarinos, plataformais e deltas de maré, sendo estes dois últimos os que ocorrem na área de estudo.

Na plataforma interna predominam sedimentos siliciclásticos com diâmetro médio entre 0,016 e 1,032 mm, ou seja, das classes silte fino até areia muito grossa, e possuem teores de carbonatos e matéria orgânica geralmente inferior a 5% (OLIVEIRA, 2015).

Finalmente, destaca-se que na desembocadura da Baía de Paranaguá ocorrem bancos arenosos submersos e semisubmersos que configuram deltas de maré, sendo os de maré vazante mais desenvolvidos que os de maré enchente (ANGULO 1992, 1999).

## 2.3 ESTADO DA ARTE E PROBLEMÁTICA COSTEIRA

As ondas, aquelas que vemos diariamente nos oceanos, são responsáveis pela erosão da costa e são geradas por ventos que sopram sobre a superfície das águas, assim Komar 1983 descreve a ação do agente costeiro responsável pela retração da linha de costa em direção ao continente. Por vezes, em eventos extremos de tempestades, não só sedimentos naturais depositados nas praias e dunas, mas vegetação e também infraestruturas urbanas, tais como casas, estradas, calçadas, ciclovias, entre outros, podem ser levadas ao mar por este agente costeiro.

Entre os agentes locais que também influenciam na morfodinâmica costeira, se destaca a influência da ação antrópica, que segundo Souza 1999, controla, por exemplo, o favorecimento de processos deposicionais ou erosionais em certa localidade, ponto de fundamental importância para compreender a dinâmica costeira das planícies em estudo.

Qualquer tipo de remediação dos processos erosivos demanda o estudo detalhado do histórico das taxas erosivas da região, premissa que demonstra a relevância da presente pesquisa.

O método de engorda de praia, por exemplo, de acordo com Dean 1981, geralmente se aplica em regiões com históricos erosivos persistentes, e se utiliza de dados das medições realizadas ao longo dos anos para a confecção do seu *design*.

Como exemplo, a variação da estabilidade de costa nos arredores da Baía de Paranaguá é apresentada na Figura 3. A proposta da pesquisa se baseia também nestes princípios da alteração da morfologia costeira na região, e conseqüentemente sobre os condicionantes de tais variações.

De acordo com Komar 1998, a morfologia costeira é um reflexo de diversos fatores, sendo o arranjo tectônico o fator primordial, seguido da combinação de agentes e processos locais. Dentro deste contexto, a morfologia da praia seria o reflexo da “composição dos sedimentos e dos processos físicos de ondas, correntes e transporte sedimentar” (KOMAR, 1998, tradução livre, pg.45).

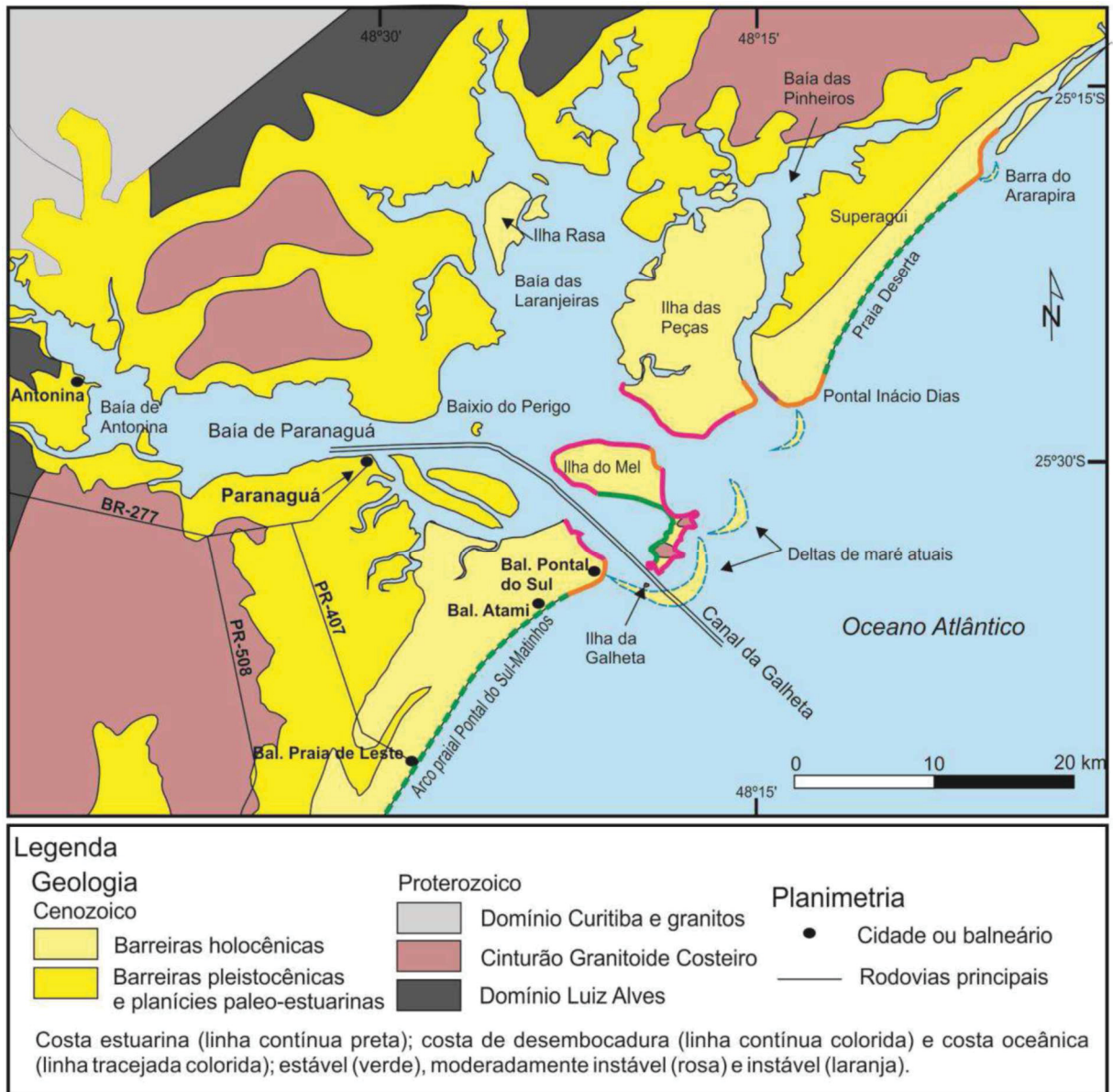


Figura 3 – Relação geologia/tipologia de costas no CEP e situação de equilíbrio das praias adjacentes, modificado de Angulo et al 2016a.

Outro ponto de interesse da pesquisa diretamente relacionado a aplicação do método de engorda é a caracterização granulométrica dos sedimentos de praia. Segundo Dean 1981, a aplicação de tal método demanda que exista compatibilidade sedimentológica, que seria a semelhança granulométrica, entre os sedimentos do perfil de praia original e da área fonte.

Existem vários tipos de projetos nos quais o material dragado pode ser utilizado para a proteção costeira. Alguns dos mais utilizados são: recuperação de praias erodidas ou engorda de praias existentes, criação de ilhas artificiais,

transpasses/transposição de areia, formação de bermas offshore para modificação das condições de ondulação, entre outros (GOES FILHO 2004).

Segundo Goes Filho 2004 o projeto mais comum de proteção costeira em que se utiliza o material dragado é a recuperação e engorda de praias. Os sedimentos utilizados para formação do novo perfil das praias devem corresponder à composição do sedimento original da praia, a qual está sendo erodida, além de apresentar baixos teores de sedimentos finos, matéria orgânica e poluentes, sendo, geralmente, areia e cascalho.

No aprofundamento da caracterização dos sedimentos, a geoquímica ambiental, inorgânica e orgânica, apresenta-se como a ferramenta de detalhe que indicará a real qualidade dos materiais.

Burton Jr. 2002 avaliou a aplicabilidade de diversos limites de tolerância de metais nos sedimentos, ou guias de qualidade de sedimentos - *sediment quality guidelines* (SQG), utilizados por instituições ao redor de todo o mundo e ilustradas no gráfico da Figura 4. Nesta pesquisa, os guias de Burton foram comparados com os aplicados no Brasil e no porto de Hamburgo, na Alemanha.

Os SQG de geoquímica inorgânica aplicados no Brasil são representados por valores de oito metais, arsênio, cádmio, cromo, cobre, chumbo, mercúrio, níquel e zinco, que em quantidades excessivas impactariam de forma negativa a biota presente em seus respectivos ambientes, e, portanto, inviabilizam a utilização destes materiais em projetos de alimentação de praias.

Muito se debate a aplicabilidade destes guias de qualidade, e as conclusões de Burton Jr. 2002 são de que há de se considerar sempre a regionalidade dos estudos que colaboraram na determinação destes valores, estes limites podem variar muito de ambiente para ambiente, podendo ser completamente diferentes em sedimentos de um rio de uma região de clima temperado e em um estuário tropical, por exemplo.

Não existem parâmetros regionais bem estabelecidos para as baías da Babitonga e Paranaguá, poucos são os estudos que determinam com precisão níveis de base (*backgrounds*) inorgânicos ou orgânicos nestes estuários.

### Geoquímica inorgânica

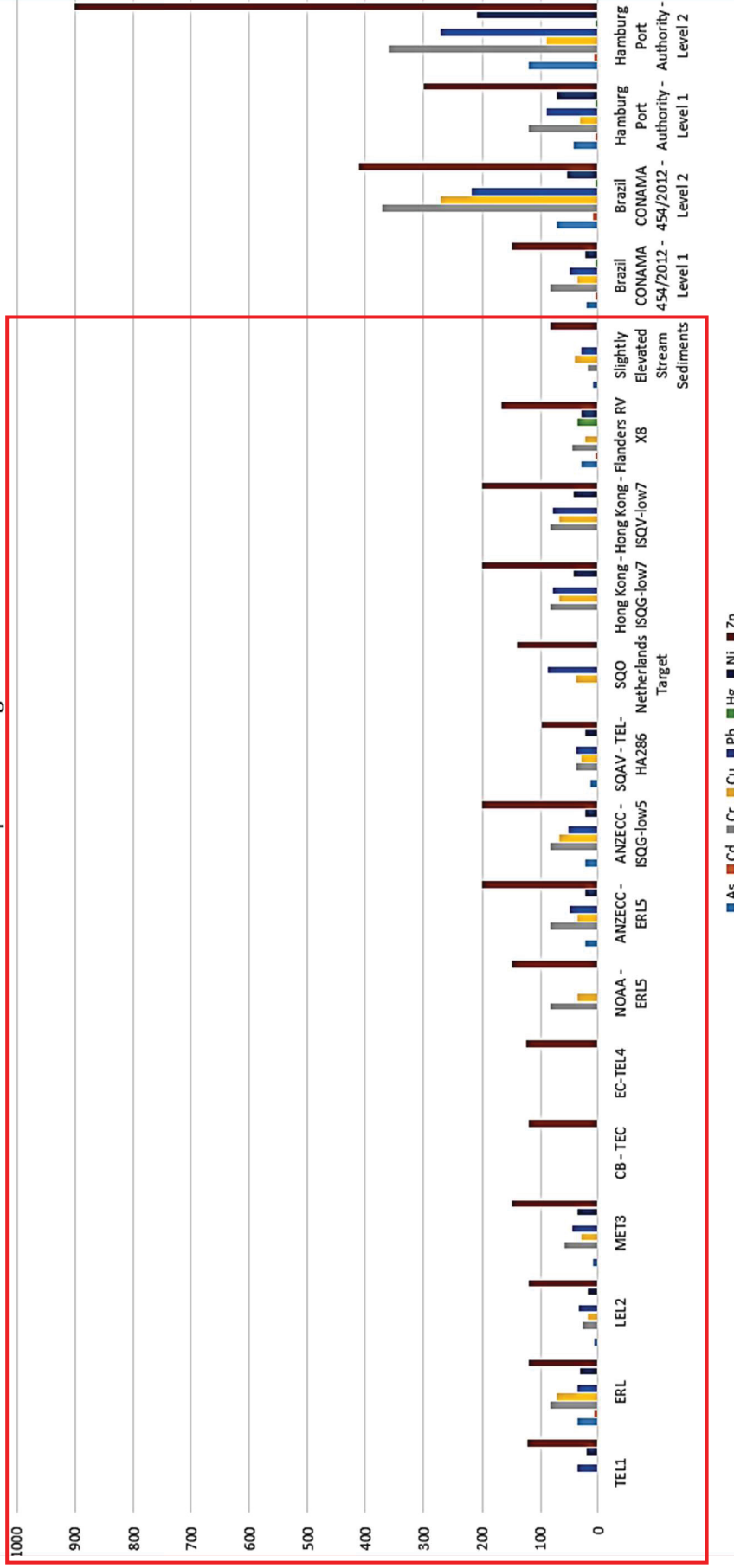


Figura 4 - Guias de qualidade de sedimentos - Sediment Quality Guidelines (SQG). Destacados dentro do retângulo de linha vermelho para SQGs avaliados em Burton Jr. 2002. Unidade mg/kg.

Um recente estudo de SQGs para o Complexo Estuarino de Paranaguá foi estabelecido por Angeli et al 2020, onde os autores avaliaram o comportamento de seis metais As, Cr, Cu, Ni, Pb, e Zn nas baías. Debates sobre a origem provável de regiões com fatores de enriquecimento (EF) anômalos para estes metais começam a ser trazidas à luz da ciência no CEP.

Na Figura 5, os resultados de Angeli et al 2020 são apresentados. Quando  $EF < 1,5$ , é tomado como uma indicação de que o metal vestigial é totalmente fornecido a partir da contribuição natural da crosta, quando  $EF > 1,5$ , é considerado indicativo que uma proporção importante de metais vestigiais é entregue de materiais não crustais.

Na outra ponta da balança, quando a qualidade dos sedimentos é avaliada, a origem da matéria orgânica (MO), quando presente, remete diretamente ao tipo de cadeia de hidrocarbonetos que a compõe e, conseqüentemente, a uma possível toxicidade destas substâncias. Na avaliação dos contaminantes orgânicos em sedimentos dragados, são de relevância a determinação da presença de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs), pesticidas como bifenilas policloradas (PCBs), pesticidas organoclorados e tributilestanho. Substâncias advindas principalmente da indústria petrolífera e de fertilizantes, indicativos de atividades antrópicas intensas.

É neste contexto e viés que se desenvolveu a presente pesquisa, de um lado duas baías e respectivos deltas de maré sendo dragados, de outro lado, praias com problemas de erosão sendo relatados, documentados e ambos, aparentemente com depósitos sedimentares de mesma composição, proveniência e origem. Na Figura 6 são apresentadas algumas destas praias que se enquadram nestes casos.

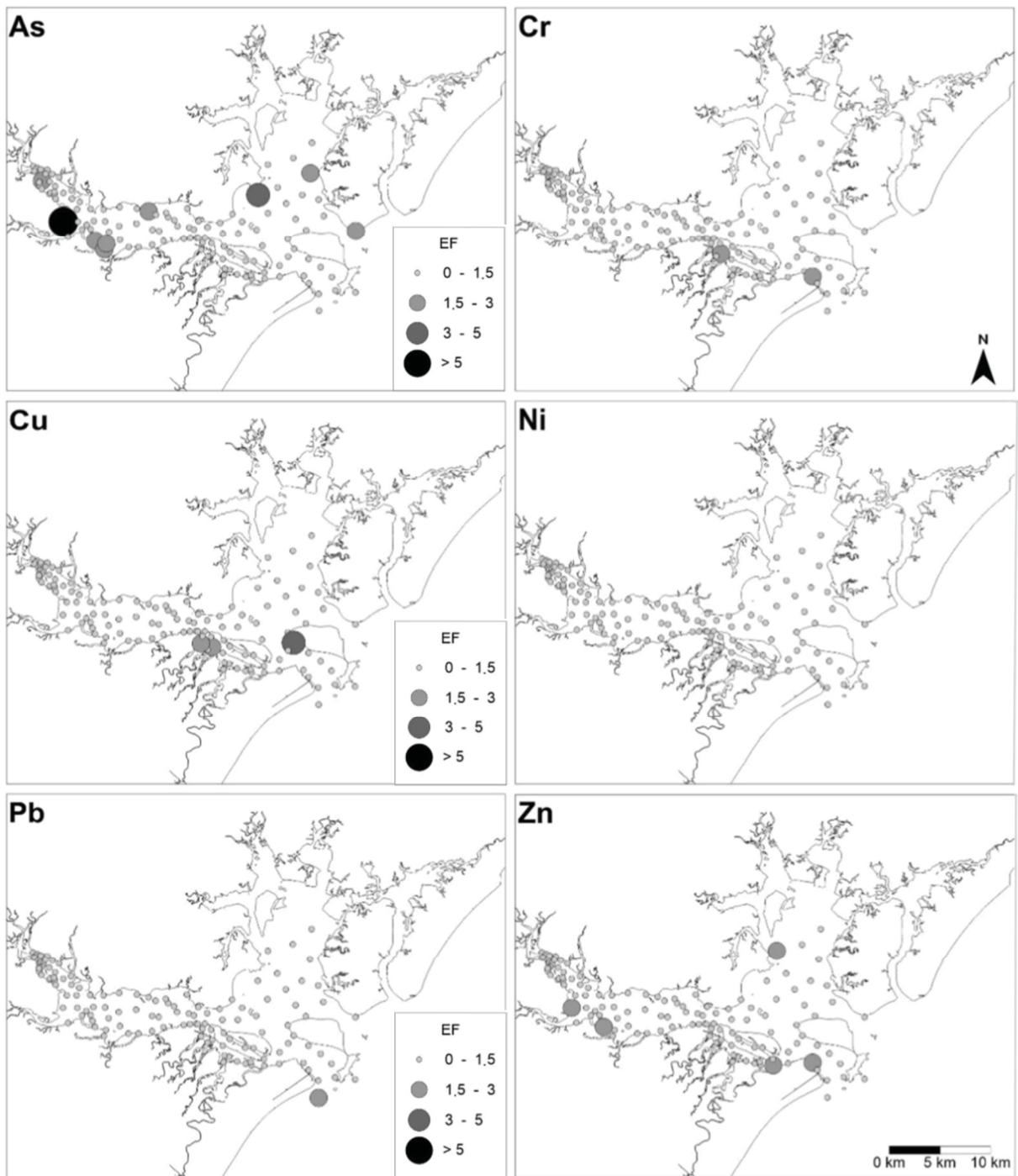


Figura 5 - Distribuição espacial dos fatores de enriquecimento (EFs) ao longo do Complexo Estuarino de Paranaguá – CEP (Angeli et al 2020).

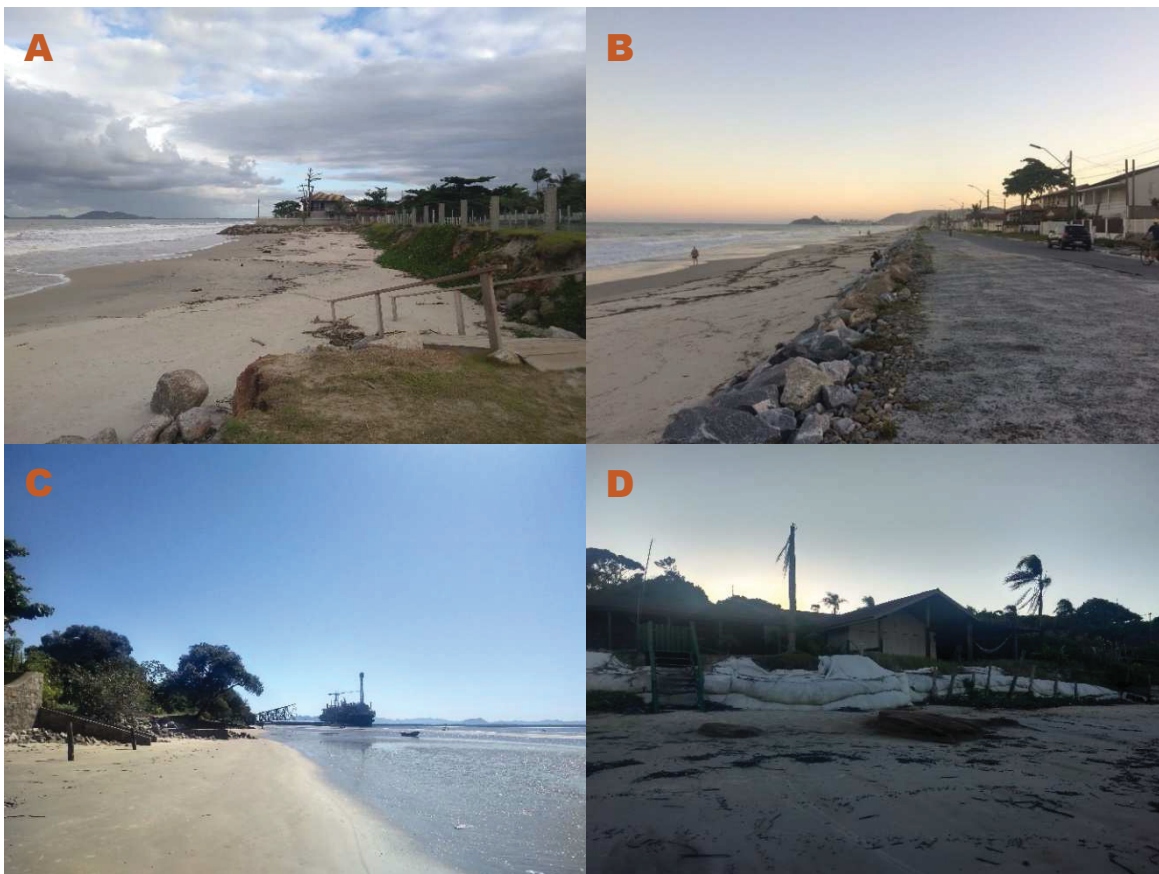


Figura 6 - Fotografias de campo, praias com problemas de erosão. A. Itapoá-SC, B. Matinhos-PR, C. Ponta do Poço e D. Ilha do Mel - PR.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados obtidos, métodos e as ferramentas analíticas utilizadas nesta pesquisa são divididos entre indiretos e diretos, correspondentes àqueles apresentados pelas administrações dos portos e àqueles adquiridos por meios próprios, respectivamente. Com o intuito de observar a fidedignidade dos resultados, procurou-se sempre que possível utilizar os mesmos métodos utilizados pelas entidades e empresas que os realizaram anteriormente, para assim, validar e chancelar os dados disponíveis.

Na aquisição de dados indiretos, para acessar os relatórios com resultados de estudos ambientais das Administração dos Portos de Paranaguá e Antonina – APPA e Administração do Porto de São Francisco do Sul – APSFS, e conseqüentemente, ter autorizada a utilização e publicação dos dados, foram

formalizados dois processos administrativos de números APPA – nº 14.491.178-8/2017 e APSFS – nº 00045.2018.00000252.

Os métodos, rotinas, instrumentos analíticos aqui descritos se referem exclusivamente àqueles diretos, os demais métodos e procedimentos utilizados pelas administrações de portos estão descritos e referenciados nos artigos.

Como método primordial e clássico de revisão bibliográfica, foram consultados livros, artigos, resumos, monografias, teses e dissertações, ou seja, quaisquer publicações relativas principalmente à dinâmica sedimentar das baías de Paranaguá e Babitonga, além de praias circundantes, aspectos físicos e químicos dos sedimentos, impactos ambientais da dragagem, aplicações e usos benéficos de resíduos de dragagem em portos, toxicologia e geoquímica ambiental e sedimentar, evolução, dinâmica e geologia costeira.

Sintetizando os métodos de pesquisa aplicados na tese teríamos o fluxograma:

AQUISIÇÃO DADOS PORTOS ► REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ► CAMPO E AMOSTRAGEM ► ANÁLISES LABORATORIAIS ► ANÁLISE LINHA DE COSTA E MORFOLOGIA DAS PRAIAS

### 3.1 CAMPO E AMOSTRAGEM

Para coletar amostras de sedimentos de praias e canais foram realizadas quatro etapas de campo, duas etapas de amostragens nas praias entre março a abril de 2018 e mais duas fases de coletas nos canais de dragagem em ambas as baías em janeiro de 2019.

Nas praias de Itapoá-SC, Itapema do Norte (Itapoá-SC), Balneário Flamingo (Matinhos-PR), Ponta do Poço (Pontal do Paraná-PR), Mar de Fora e Forte na Ilha do Mel (Paranaguá – PR) foram coletadas, quando possível, ao menos 3 amostras por praia (Figura 7), uma posicionada sobre a duna frontal, uma amostra sobre a berma (*backshore*) e finalmente uma amostra na face praiial (*beachface*). Em média, foram coletados 0,5kg amostra, totalizando 16 pontos e amostras de

praia. Algumas exceções de praias sem duna frontal tiveram apenas duas amostras coletadas, o que justifica o menor número de amostras, em relação ao projetado.

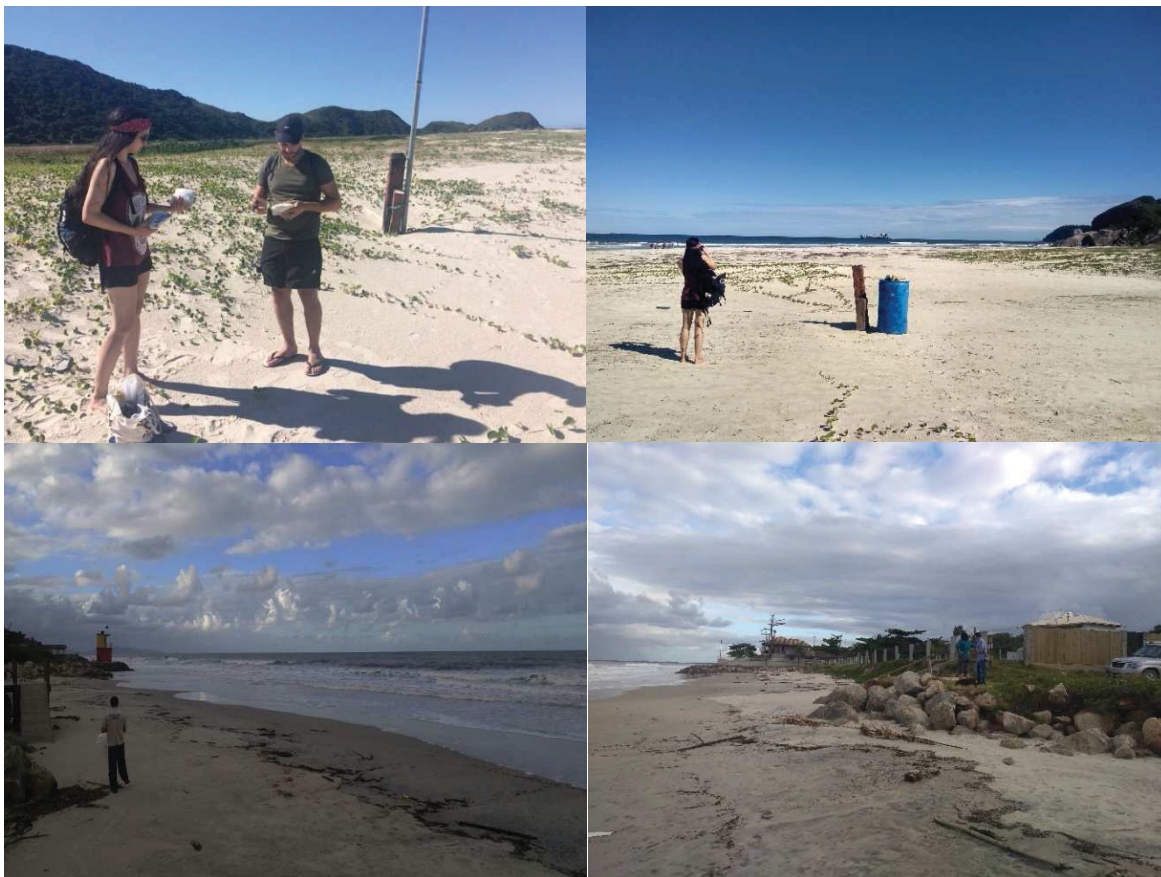


Figura 7- Fotografias de campo, amostragem nas praias.

Para as coletas nos canais da Galheta e São Francisco do Sul, conforme Figura 8, foram utilizadas embarcações de pequeno porte e amostrador do tipo Van Veen. Em cada canal foram coletadas 6 amostras, totalizando 12 amostras de sedimentos superficiais (até 5cm), com o peso médio de 1kg. Estas amostras foram colhidas com espátula de plástico e acondicionadas em sacos de mesmo material, dentro de caixa térmica com gelo e foram arremetidas ao laboratório para congelamento a  $-18^{\circ}\text{C}$  com no máximo 6 horas após as coletas nas baías.

Por fim, em uma etapa única de campo foi realizada uma visita à Administração do Porto de Hamburgo (*Hamburg Port Authority – HPA*), em janeiro de 2018, com a finalidade de obtenção de dados de dragagem e de usos benéficos de sedimentos dragados.



Figura 8 - Fotografias de campo, amostragens nos canais.

### 3.2 ANÁLISES GRANULOMÉTRICAS

As análises granulométricas foram realizadas no Laboratório de Estudos Sedimentológicos e Petrologia Sedimentar da Universidade Federal do Paraná (LabESed/UFPR, Figura 9). As amostras de sedimentos praias foram quarteadas, depois foram separadas duplicatas de 100g para armazenamento. Então 16 amostras de 100 g foram lavadas para retirada do excesso de NaCl (cloreto de sódio) e peneiradas com classificações de granulometria propostas por Folk e Ward 1957 para as frações areia e grânulos ( $>0,063$  mm). Não foi realizada pipetagem ou retirada de matéria orgânica, já que sedimentos finos não estavam presentes.

Nas amostras coletadas nos canais, os mesmos procedimentos foram realizados, no entanto, as amostras não foram lavadas, tiveram tratamento de remoção de matéria orgânica com peróxido de hidrogênio e, então, foram realizados os testes de pipetagem para as frações finas ( $<0,063$  mm), conforme

método de Carver 1971. Outras 9 duplicatas de amostras de canais foram reanalisadas pelo Laboratório Alpes de Pesquisas e Ensaio Físicos de Solo, tendo em vista a reforma da sala do LabSed – UFPR. O Laboratório Alpes utilizou os mesmos métodos de peneiramento e sedimentação/pipetagem.

Os softwares utilizados para tratamento destes dados foram o *Microsoft Excell*, *Gradstat* (BLOTT, 2001), *Sysgran 3.0* (CAMARGO, 2006). As classes granulométricas foram nomeadas de acordo com Shepard (1954) e Folk e Ward (1957).

### 3.3 MICROSCOPIA ÓTICA E ELETRÔNICA

Nos Laboratório de Pesquisa de Microscopia - LAPEM e Laboratório de Análise de Minerais e Rochas – LAMIR, da Universidade Federal do Paraná – UFPR, a partir de 6 amostras de sedimentos de praias foram confeccionadas lâminas de grãos, utilizando-se para fixação dos grãos óleo mineral, para análise e descrição da morfologia dos sedimentos no microscópio petrográfico. Ainda, 7 amostras de praias e 6 amostras de canais foram analisadas em microscópio eletrônico de varredura – MEV.

### 3.4 ESPECTROSCOPIA DE ENERGIA DISPERSIVA E ESPECTRÔMETRIA DE MASSA

Também no Laboratório de Análise de Minerais e Rochas – LAMIR/UFPR, acoplado ao microscópio eletrônico de varredura (MEV), um espectrômetro por energia dispersiva (EDS) foi utilizado para análise qualitativa química em grãos de 7 amostras de praias e 6 amostras de canais, totalizando 17 pontos de análises químicas por EDS.

As análises de 8 elementos traços, arsênio (As), cádmio (Cd), chumbo (Pb), cobre (Cu), cromo (Cr), mercúrio (Hg), níquel (Ni) e zinco (Zn) foram analisados por espectrometria de massa ICP-MS, no Laboratório de Análises de Combustíveis

Automotivos – LACAUT, também da Universidade Federal do Paraná – UFPR, para tal, considerando a composição majoritária quartzosa da areia conhecida pelos outros métodos, apenas a fração fina dos sedimentos foi utilizada, o que permitiu as análises apenas na quantidade total de 9 amostras de canais analisadas e nenhuma em sedimentos de praias. Os métodos/rotinas utilizados seguiram diretrizes de EPA, 1996 e EPA, 1998: “EPA – Environmental Protection Agency Test Solid Waste. Revision 02. december 1996. Method 3050B” e “EPA Hg – Mercúrio – Method 7471B”.



Figura 9 - Fotografias de laboratório, preparação de amostras e análises.

A correção dos valores dos metais seguiu um padrão de proporcionalidade, conforme a quantidade de sedimentos finos (silte e argila) presentes na amostra, seguindo a seguinte equação:

$$\delta = \alpha/100 \times \beta$$

Onde,  $\delta$  = Concentração metal na amostra

$\alpha$  = proporção de sedimentos finos

$\beta$  = concentração de metal nos sedimentos finos

### 3.5 POTENCIAL HIDROGENIÔNICO – PH E MATÉRIA ORGÂNICA – MO

As 12 amostras de sedimentos dos canais dragados foram também analisadas quanto ao potencial hidrogeniônico – pH, macro nutrientes magnésio (Mg), cálcio (Ca), potássio (K), alumínio (Al) e matéria orgânica total (MO) no laboratório AgroTec Solos Análises Agronômicas e Consultoria. O método utilizado foi o de abertura química com extrator cloreto de potássio 1N para os metais e método de Walkley Black, 1934 para determinação de matéria orgânica.

### 3.6 VARIAÇÃO DA LINHA DE COSTA E MORFOLOGIA DAS PRAIAS

Para análise da variação dos últimos 20 anos da linha de costa nas praias estudadas, além dos dados já publicados pelo laboratório LECOST-UFPR, foi realizada um levantamento com o software *ESRI - ArcGIS* a extensão *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS) do Serviço Geológico dos Estados Unidos (THIELER et al 2009).

De mesmo modo, perfilagens realizadas em praias nos litorais norte de Santa Catarina e paranaense, também já publicados por pesquisadores do laboratório LECOST-UFPR, foram utilizados para cálculos volumétricos com o auxílio dos softwares *ESRI – ArcGIS* com a extensão *3D Analyst* e *Gemcom Surpac*.

## 4 RESULTADOS

Os resultados da pesquisa serão apresentados em forma de artigos, no entanto, algumas informações detalhadas dos principais resultados de granulometria das praias arenosas e canais, além da geoquímica dos estuários, serão apresentadas adiante, antes dos artigos.

Sedimentos de quatro praias foram amostrados no Estado do Paraná, a primeira delas no Balneário Flamingo em Matinhos, com duas amostras MAT-01 (*backshore*) e MAT-02 (*beachface*). Neste local não há duna frontal, houvera a obliteração da mesma, e uma obra de enrocamento foi realizada na tentativa de conter o avanço da erosão marinha (Figura 6-B). Esta foi a única praia amostrada que apresentou areia grossa e muito grossa, conforme Figura 10. Na amostra da face praial, MAT-02, há uma predominância entre areia média, grossa a muito grossa, enquanto na outra amostra, MAT-01, há uma predominância de areia fina.

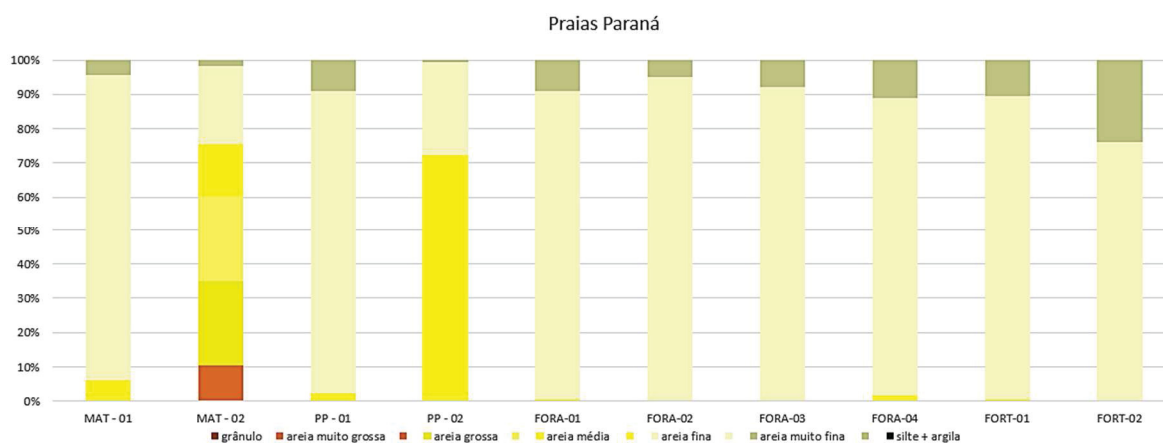


Figura 10 – Distribuição granulométrica nas praias paranaenses.

As demais praias paranaenses amostradas foram a Ponta do Poço (PP - 01 e PP – 02) em Pontal do Paraná, nas quais as areias amostradas são predominantemente médias na face praial e muito fina a fina na berma.

As praias da Ilha do Mel (Paranaguá-PR) avaliadas foram a Praia do Mar de Fora e Praia da Fortaleza (do Forte), em Encantadas e Brasília, respectivamente. Ambas apresentaram grande homogeneidade granulométrica com predominância de areia fina em todas as porções das praias, ou seja, nas dunas, bermas e faces.

Duas praias foram amostradas em Itapoá-SC, a primeira nas proximidades do Balneário Uirapuru e a outra em Itapema do Norte, próximo ao centro da cidade, antes da “Primeira Pedra”. As amostras ITA-01 e ITA-02 demonstram que esta praia tem forte predominância de areia fina, enquanto na praia de Itapema do Norte

também exista uma maioria da classe modal de areia fina, a presença de areia média é maior quando comparada a Uirapuru, chegando a 35% de areia média na amostra da face praiial (Figura 11).

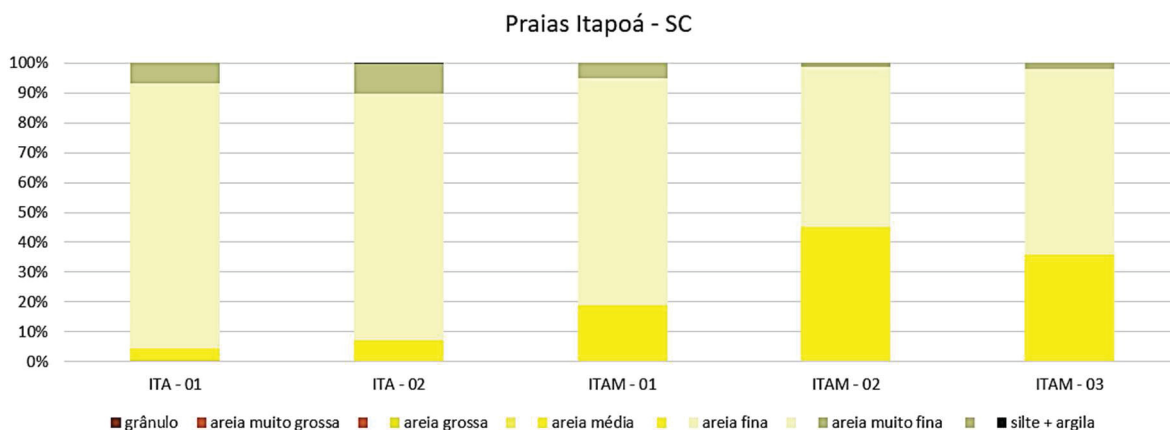


Figura 11 – Distribuição granulométrica nas praias de Itapoá-SC.

Também há predominância de areia, especialmente areia fina, nos canais dragados da Galheta e da Babitonga, principalmente nos setores externos, o que na baía de Paranaguá corresponde aos setores de dragagem Alfa e Bravo do canal, e em São Francisco do Sul, onde é simplesmente chamado de canal externo. Conforme pode ser observado na Figura 12, são poucas as exceções com mais lama (silte e argila) em ambas as baías, exceções estas geralmente associadas às amostras coletadas nos interiores dos estuários.

O mesmo padrão de distribuição granulométrica obedece também a presença de matéria orgânica nestes sedimentos, ou seja, é no interior dos estuários que pode prevalecer processos de decantação de sedimentos finos e vinculados a eles, maiores teores de matéria orgânica (MO) e possíveis enriquecimentos em alguns metais. Na Figura 13 pode-se comparar esse comportamento de MO e pH nas baías.

Poucas amostras apresentam proporções significativas de matéria orgânica, casos escassos como as amostras JB - 04, JB - 05, JP - 06 contêm mais do que 10 g/dm<sup>3</sup> de MO na composição, ou seja, estes valores dificilmente representam mais do que 2% nas amostras totais de sedimentos.

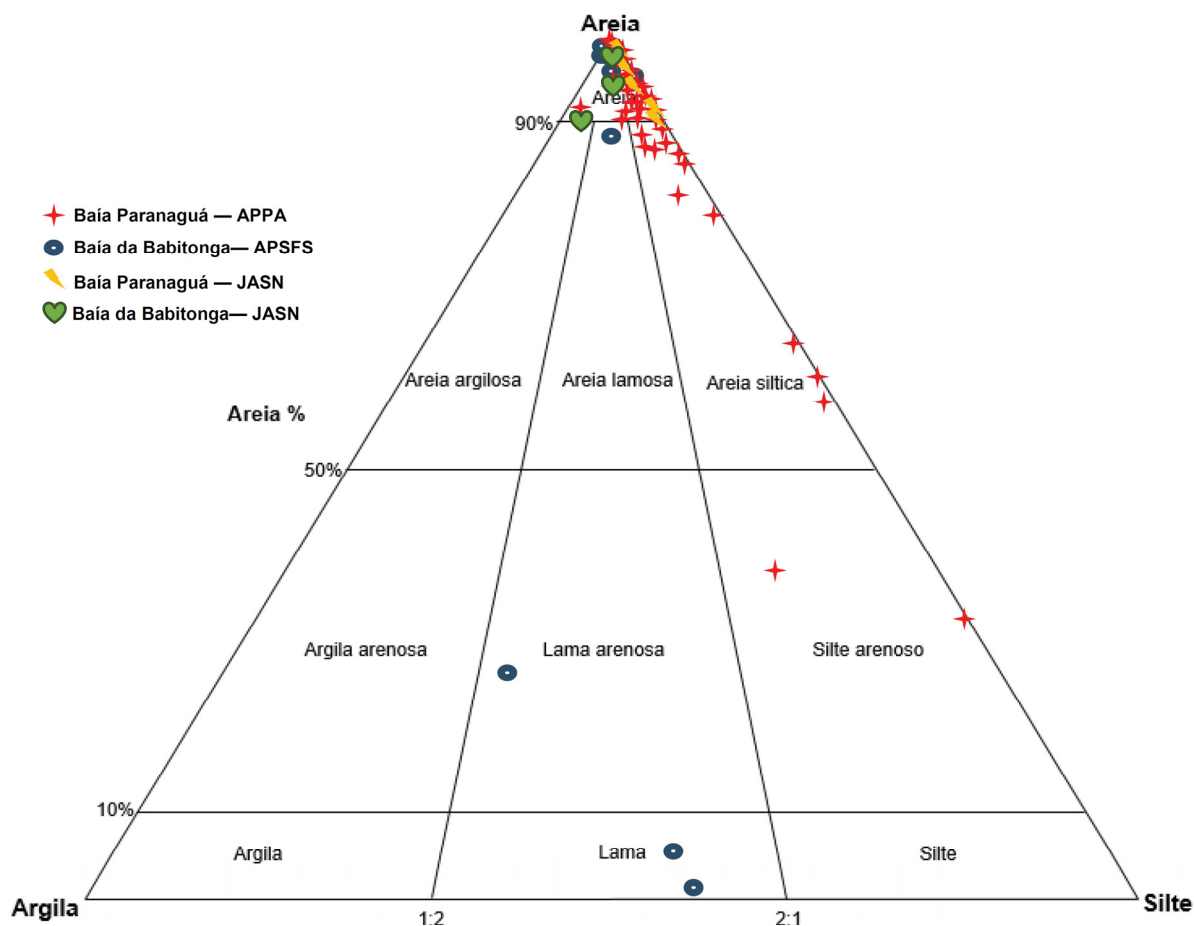


Figura 12 - Gráfico ternário “Areia - Argila – Silte” para as amostras de canais nas baías de Babitonga e Paranaguá, Gradistat (BLOTT, 2001).

A rara presença de MO nos sedimentos majoritariamente arenosos impediu o avanço das análises próprias de importantes compostos da geoquímica orgânica. No entanto, de todas as amostras analisadas pelas autoridades portuárias, não foram detectados hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs), pesticidas como bifenilas policloradas (PCBs), pesticidas organoclorados ou ainda, tributilestano, que caracterizariam significativas contaminações orgânicas.

Quando avaliado o comportamento dos metais analisados, verifica-se que o arsênio (Figura 14) é o semimetal que apresentou pouca variabilidade nas duas baías, com todos os resultados muito próximos ou abaixo do background de Angeli et al 2020. Na Baía da Babitonga a quantidade de arsênio variou entre 0,18 a 7,35 mg/kg, com média de 1,33 mg/kg. Enquanto na Baía de Paranaguá este elemento foi detectado em apenas 6 das 48 amostras consideradas, portanto, com valor

mínimo de 0 e máximo de 4,82 mg/kg no ponto JP-06. A média da concentração de arsênio nesta baía é de 0,17 mg/kg.

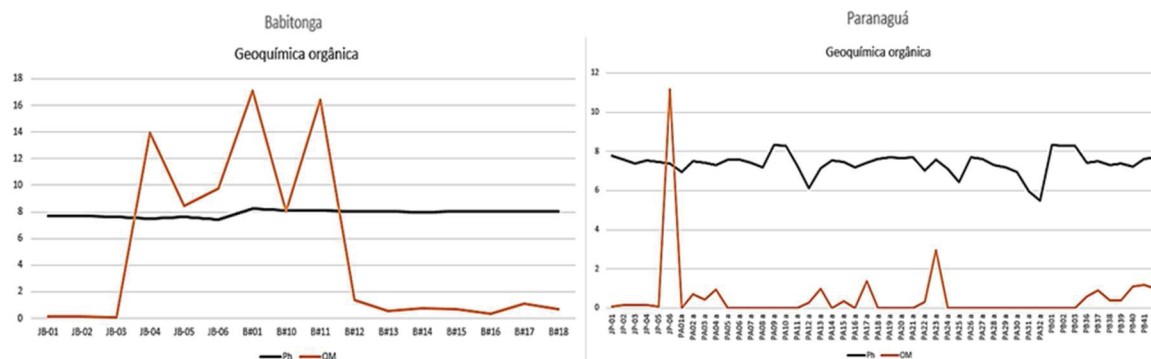


Figura 13 – Matéria orgânica - MO (g/dm<sup>3</sup>) e potencial hidrogeniônico – pH nas baías.

Também como os demais metais, com distribuição similar e com valores muito próximos ou abaixo do *background* de Angeli et al 2020, os metais de cobre (Figura 16) e cromo (Figura 15) medidos na Baía da Babitonga variaram de 0 a 28,51 mg/kg (Cu - Cr) com médias de 1,09 e 4,59 mg/kg, respectivamente. Já na Baía de Paranaguá, a variação foi de 0 a 13,9 / 23,6 mg/kg (Cu - Cr), com médias de 5,17 e 4,75 mg/kg, respectivamente.

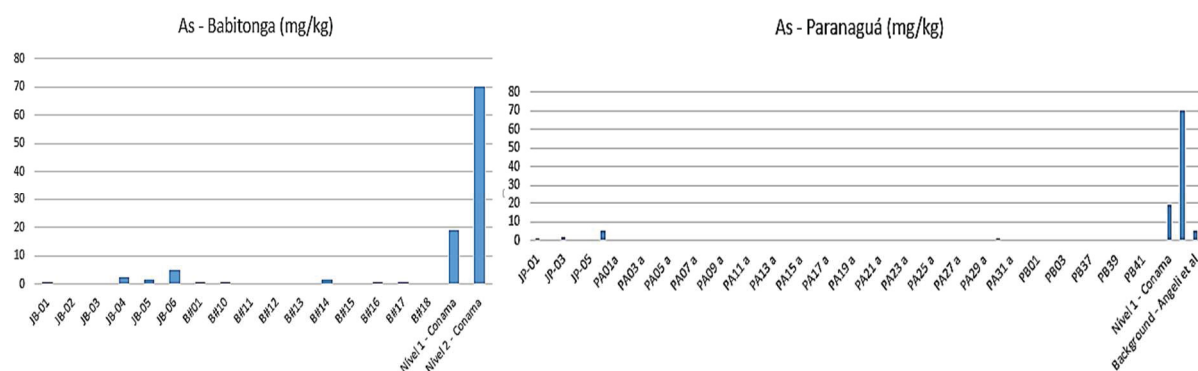


Figura 14 – Distribuição do arsênio nos sedimentos superficiais nas baías.

O metal que apresentou resultados com padrão mais aleatórios foi o chumbo (Figura 17), principalmente na Baía de Paranaguá, este fator será bastante debatido já no primeiro artigo apresentado.

O chumbo está presente em quase todas as amostras das baías, com valores nulos em apenas 2 dos 16 pontos de amostragem da Baía da Babitonga, apresenta valor máximo de 15,78 mg/kg no ponto JB-02 e média geral de 2,39 mg/kg.

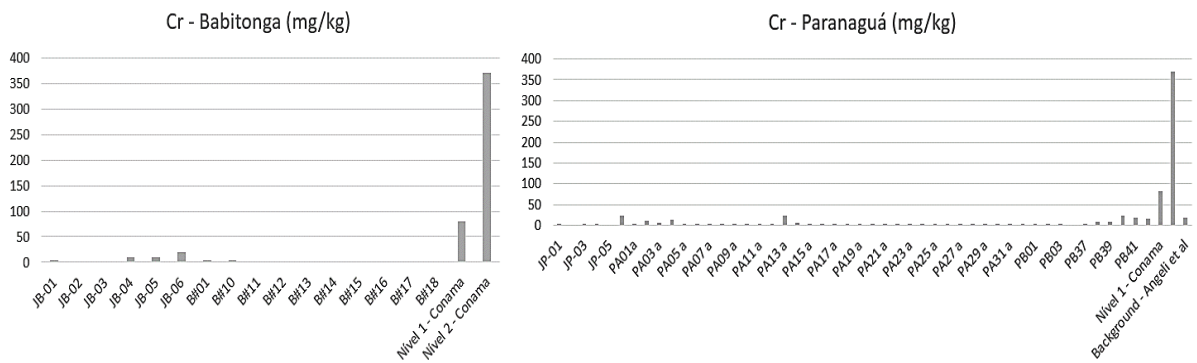


Figura 15 – Distribuição do cromo nos sedimentos superficiais nas baías.

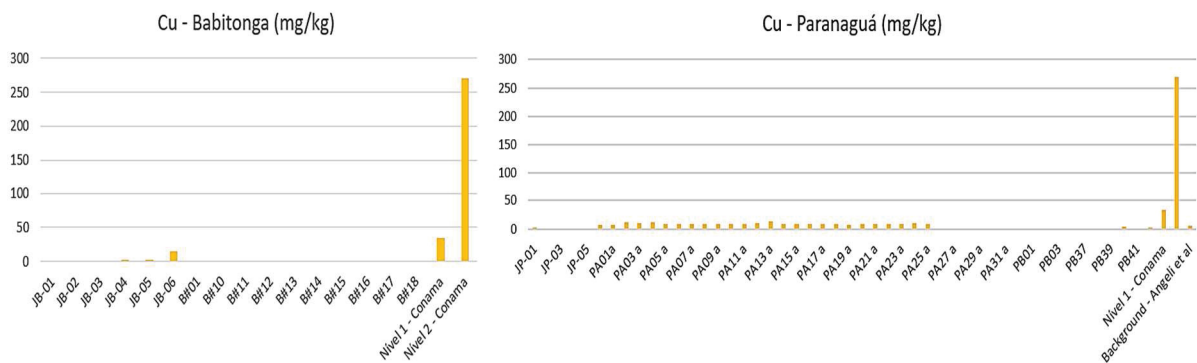


Figura 16 – Distribuição do cobre nos sedimentos superficiais nas baías.

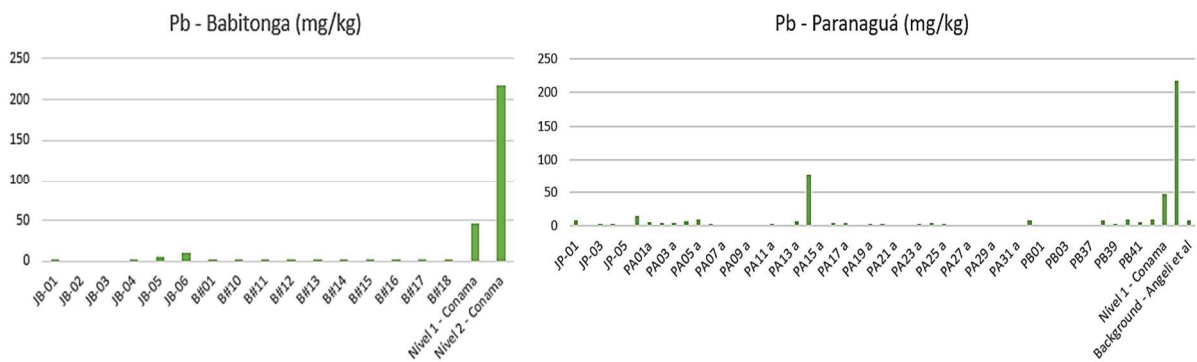


Figura 17 – Distribuição do chumbo nos sedimentos superficiais nas baías.

Já na Baía de Paranaguá, em vários pontos amostrados os valores foram superiores ao estabelecido no *background* de Angeli et al 2020. O valor máximo observado foi de 78,3 mg/kg no PA - 14 e média para o estuário de 4,65 mg/kg.

Justamente em oposição ao padrão de distribuição do chumbo, o cádmio foi o elemento (Figura 18), entre os metais, menos detectado em toda a pesquisa, presente apenas nos pontos JB-05, JB-06 e B#10 com 0,13, 0,17 e 0,04 mg/kg na Baía da Babitonga e nos pontos JP-01, JP-03, JP-05, JP-06, PA-32, PA-40 e PA-42 com valores de 0,01, 0,02, 0,01, 0,13, 0,01, 0,01 e 1,6 mg/kg, respectivamente, na Baía de Paranaguá.

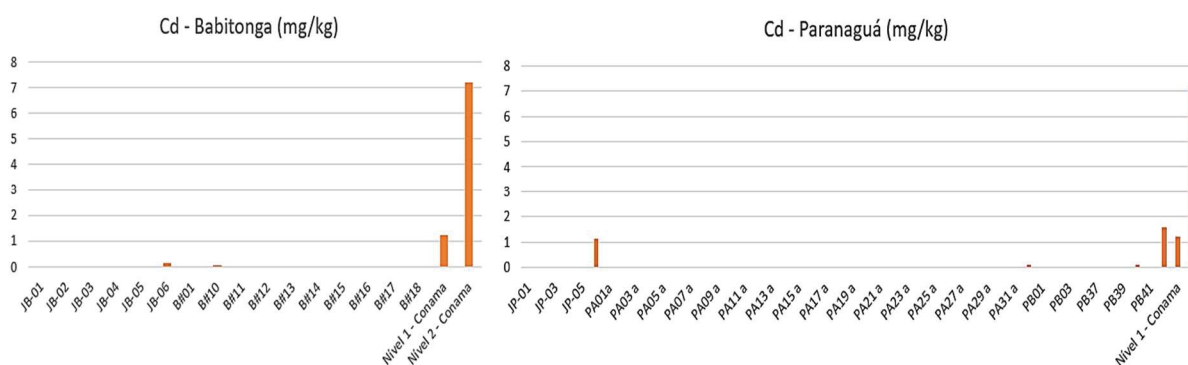


Figura 18 – Distribuição do cádmio nos sedimentos superficiais nas baías.

Níquel (Figura 19) e zinco (Figura 20) também estão presentes em quantidades semelhantes em praticamente todos os pontos estudados, na Baía da Babitonga os menores valores são 0,36 (Ni) e 0,89 (Zn), enquanto os maiores valores estão entre 10,81 mg/kg (Ni) e 57,49 mg/kg (Zn), com médias de 1,95 e 8,79 mg/kg. Na Baía de Paranaguá, os mínimos são 0,17 e 0,5 mg/kg e máximos 9,7 e 50,3 mg/kg (Ni/Zn), com médias de 1,77 e 14,66 mg/kg de níquel e zinco.

Mercúrio praticamente não foi detectado nos sedimentos de nenhuma baía, conforme Figura 21, e apresentou resultados muito próximos do limite de detecção dos métodos utilizados, as exceções foram JB-06, JB-05 e JP-06, variando de 0,01 a 0,0 mg/kg, além do ponto B#10 da Baía da Babitonga, que apresentou um resultado de 0,01 mg/kg.

De modo geral, os metais apresentam um comportamento similar de distribuição, com aumento proporcional das concentrações em sedimentos mais finos, conforme os pontos amostrados situam-se mais no interior dos estuários. Este padrão será debatido em detalhe nos artigos e nas discussões.

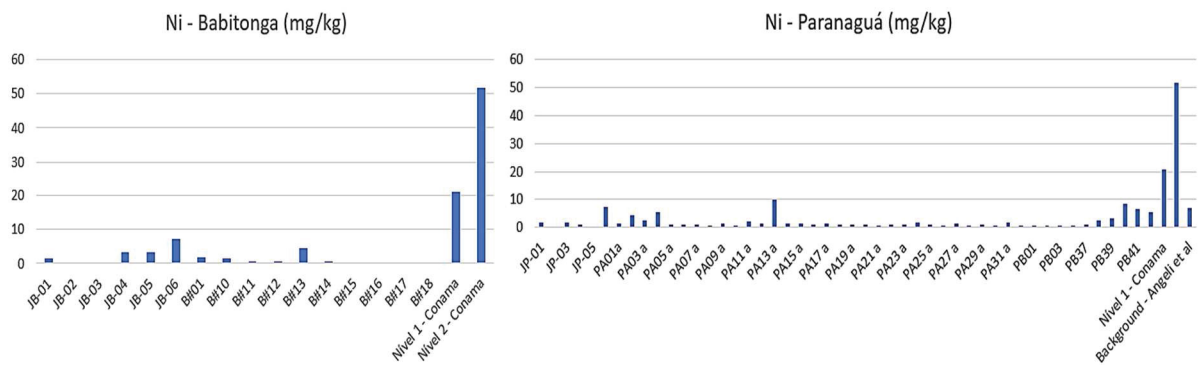


Figura 19 – Distribuição do níquel nos sedimentos superficiais nas baías.

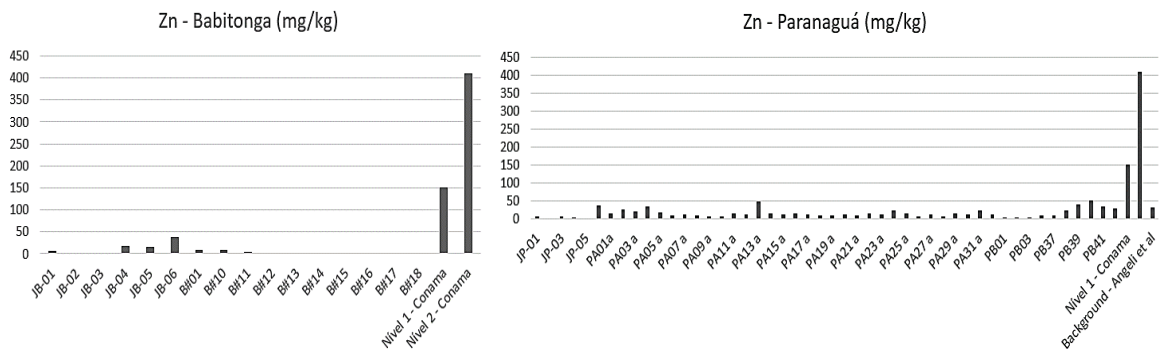


Figura 20 – Distribuição do zinco nos sedimentos superficiais nas baías

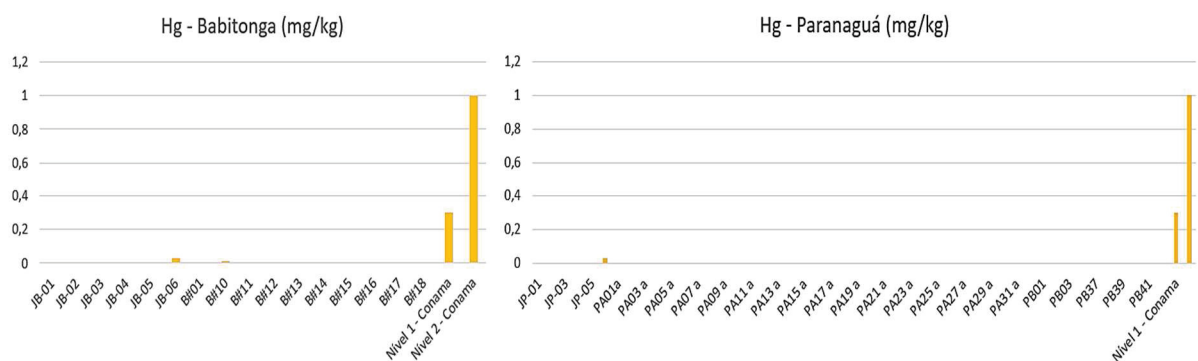


Figura 21 – Distribuição do mercúrio nos sedimentos superficiais nas baías.

## 4.1 ARTIGO POSSIBILIDADE DE APROVEITAMENTO

Como primeiro resultado da pesquisa alcançado, será apresentado o artigo publicado em 2017 na revista *Quaternary and Environmental Geosciences*, com número DOI:10.5380/abequa.v8i2.54333.

### Possibilidade de aproveitamento dos sedimentos de dragagem do porto de Paranaguá

#### *Possibility of dredged sediment utilization from Paranaguá harbor*

José Augusto Simões Neto<sup>ae</sup>, Maria Cristina de Souza<sup>bf</sup>, Barbara Trzaskos<sup>cg</sup>, Rodolfo José Angulo<sup>bh</sup>, Marcell Leonard Besser<sup>di</sup>

<sup>a</sup>Programa de Pós-Graduação, Departamento de Geologia, UFPR, Agência Nacional de Mineração – ANM, <sup>b</sup>Laboratório de Estudos Costeiros, Departamento de Geologia, UFPR, <sup>c</sup>Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná – UFPR, <sup>d</sup>Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM

## RESUMO

As obras de dragagem do canal de acesso aos portos de Paranaguá e Antonina, no estado do Paraná, sul do Brasil, mobilizaram  $23,5 \times 10^6$  m<sup>3</sup> de sedimentos entre 2009 e 2015, totalizando investimentos em 365,8 milhões de reais. A partir da análise dos dados sedimentológicos fornecidos pela Administração dos Portos de Paranaguá e Antonina (APPA) e da revisão dos métodos de aproveitamento, avaliou-se as possibilidades de usos destes materiais dragados. Conclui-se que estes sedimentos apresentam características próprias para recuperação e alimentação de praias com problemas de erosão. O trecho de dragagem mais externo, localizado sobre o delta de maré vazante, denominado trecho Alfa, apresenta as melhores características quantitativas e qualitativas para este aproveitamento, com predomínio de areia grossa a fina e baixos ou ausentes teores de contaminantes. Foram identificados três setores da costa paranaense com problemas erosivos localizados próximos ao canal, que poderiam receber reposições artificiais de areia, correspondentes ao istmo da Ilha do Mel, a região da Fortaleza da mesma ilha e o trecho entre Pontal do Sul e a Ponta do Poço. Finalmente, observou-se que, embora atualmente os sedimentos dragados no Complexo Estuarino de Paranaguá sejam descartados seguindo padrões e imposições ambientais, não há indicações de usos benéficos para eles.

**Palavras-chave:** Canal da Galheta; erosão costeira; alimentação de praia.

## ABSTRACT

The dredging works in the access channel to the Paranaguá and Antonina harbors in the State of Paraná, Southern Brazil, were responsible for the mobilization of  $23.5 \times 10^6 \text{ m}^3$  of sediments between 2009 and 2015, also had a total of 365.8 million Brazilian Reais in investments. The present research was developed based on sedimentological data analysis provided by the Paranaguá and Antonina Harbors Administration, aiming to review the methods of exploitation with the objective of indicating the various possibilities of use of these materials. It was concluded that all the dredged sediment present characteristics suitable for beach filling. The most external dredging section, located on the ebb tidal delta, called the Alpha stretch, presents the best quantitative and qualitative sediment characteristics for this use, with a predominance of coarse to fine sand, and low or absent levels of contaminants. Three sectors of the Paraná coast with erosive problems were selected in the study, corresponding to the isthmus of Ilha do Mel, the region of the fortress of the same island and the stretch between Pontal do Sul and Ponta do Poço, those areas could receive artificial sand filling in eroded beaches. Finally, it was observed in the research that although the sediments dredged in the Paranaguá Estuarine Complex are discarded following environmental standards and impositions, there are no indications of beneficial uses for them.

**Keywords:** Galheta Channel; coastal erosion; beach nourishment.

## 1. Introdução

As atividades portuárias, intensas e constantes, geram alterações sobre o ambiente e carecem de regras normativas e técnicas para que os impactos ambientais sejam amenizados (MACHADO; RIBEIRO 2012).

As preocupações e debates acerca do processo de dragagem se intensificaram a partir da década de 1980. Nos Estados Unidos da América, a Agência de Proteção Ambiental, em cooperação com o Corpo de Engenheiros do Exército Americano, desde a década de 1980 desenvolvem pesquisas sobre o manejo de material dragado e em 1992 elaboraram relatório técnico sobre os

possíveis destinos deste material, compreendendo alternativas para a disposição em mar aberto, ou em terra, uso benéfico e remediação (EPA 1992).

No Brasil, os debates resultaram na elaboração da Resolução Conama nº 454 (BRASIL 2012), cujo teor já aponta para políticas públicas que devem ser adotadas e a possibilidade de “uso benéfico do material dragado”, que de acordo com esta mesma norma pode ser para: obras de engenharia, criação e melhoria do terreno, recomposição, engorda artificial de praias, estabilização da linha de costa, uso na construção civil, indústria, agricultura, aquicultura, entre outros.

No Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP) o início da atividade portuária remonta ao período pós-invasão europeia na América do Sul, provavelmente a partir da segunda metade do século XVI, mas teria sido com a Abertura dos Portos, decretada em 1808 no início do período pós-colonial do Brasil, que o desenvolvimento portuário foi impulsionado em todo o país (MORGENSTERN 2017).

No CEP, localizado no litoral paranaense, se encontram os portos de Paranaguá e Antonina. O Porto de Paranaguá, além das vias marinhas, pode ser acessado via terrestre pela estrada BR-277 e pela ferrovia Ferroeste.

Atualmente, a única via dragada no CEP é o Canal da Galheta, que se divide nos setores Alfa, Bravo, Charlie e Delta (Figura 22). A gestão do porto e consequentemente o manejo das operações de dragagem estão sob encargo da Administração dos Portos de Paranaguá e Antonina (APPA), empresa pública vinculada à Secretaria de Infraestrutura e Logística do Estado do Paraná.

### **Dinâmica e evolução costeira no CEP**

O entendimento da dinâmica sedimentar é importante na caracterização dos impactos gerados pelas dragagens e, este conhecimento torna-se decisivo no apontamento de possíveis aproveitamentos dos sedimentos dragados.

Na costa paranaense, seguindo o padrão do sistema de geração de ondas no Atlântico Sul, a propagação das mesmas está vinculada aos centros de geração em áreas oceânicas distantes (ANGULO et al 2016), independentes das direções

dos ventos locais, no litoral sul brasileiro os eventos de ondas de alta energia são formados principalmente a partir de ciclones subtropicais (BIGARELLA et al 1978).

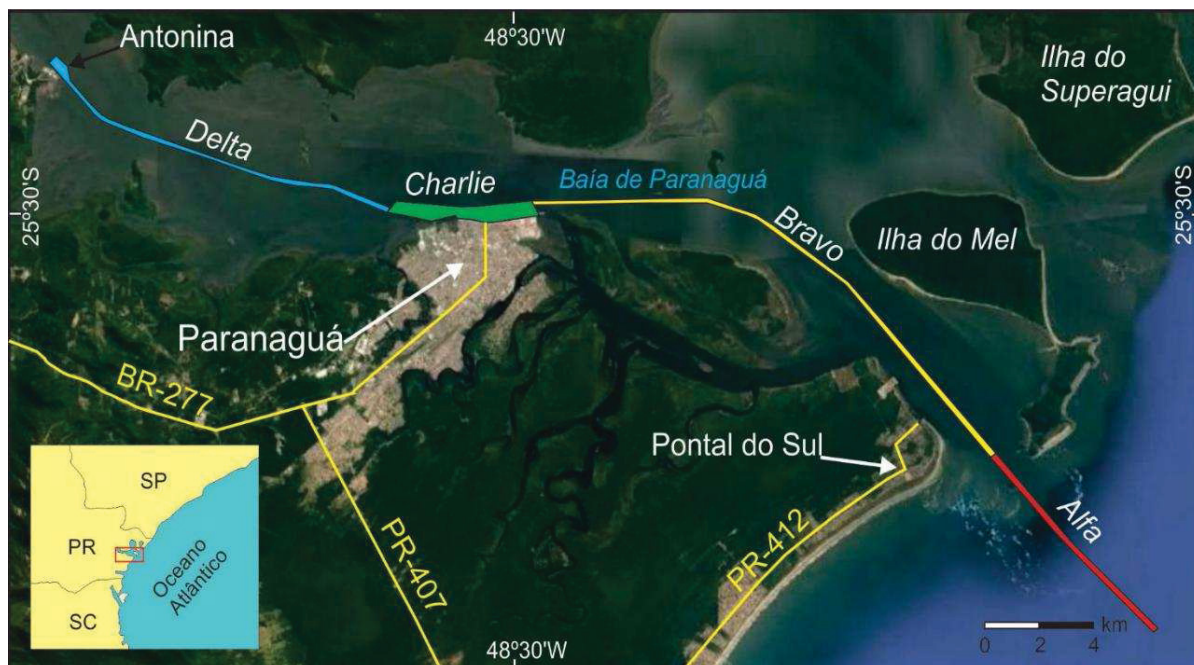


Figura 22 - Localização do canal de acesso ao Porto de Paranaguá e suas subdivisões. Fonte: adaptado de APPA, 2015.

Estes eventos também estão relacionados à intensificação de forçantes como os ventos de sul-sudeste, estes com capacidade de transformação da costa, a ocorrência simultânea destes fatores potencializa os processos de erosão (NEMES 2011).

Resultantes da ação das ondas, com predomínio de direção de sul e sudeste, a deriva litorânea longitudinal líquida é para norte, o que é confirmado pela orientação das fozes dos rios e córregos nas praias, além da morfologia dos deltas-de-maré vazante (ANGULO 1992).

Na costa paranaense, as marés são semidiurnas com interações de oscilações não lineares (MANTOVANELLI 1999). A amplitude da maré de sizígia é de 1,5 m, na costa oceânica e 2,2 m, no interior do estuário. Também as marés meteorológicas podem atingir 80 cm acima do nível das marés astronômicas

(MARONE; JAMIYANAA 1997). As marés geram correntes de enchente e vazante e, ainda podem criar vórtices de maré (CAMARGO et al. 2003).

No CEP a influência da maré é o agente de maior impacto na dinâmica sedimentar, pois se trata de um estuário hipersíncrono, com efeito de convergência excedendo o atrito, o que resulta no aumento da amplitude das marés na cabeceira (MANTOVANELLI 1999).

A capacidade das correntes de maré vazante e enchente em transportar sedimentos de fundo estão mais relacionadas à ocorrência de eventos de alta energia que ao movimento das marés astronômicas (NOERNBERG et al. 2007).

Na parte externa do Canal da Galheta, o transporte de sedimentos ocorre ao longo do canal, influenciado pelas correntes de maré de sizígia, que têm capacidade de transportar sedimentos de fundo e durante eventos de alta energia o transporte de sedimentos também ocorre paralelamente à costa, devido à intensificação das correntes de deriva litorânea (NOERNBERG et al. 2007).

Resultam da dinâmica no CEP os principais sistemas deposicionais correlatos a depósitos estuarinos, plataformais e deltas de maré, sendo estes dois últimos os que ocorrem na área de estudo. Na plataforma interna predominam sedimentos siliciclásticos com diâmetro médio entre 0,016 e 1,032 mm, ou seja, das classes silte fino até areia muito grossa, e possuem teores de carbonatos e matéria orgânica geralmente inferiores a 5% (OLIVEIRA 2015).

Na desembocadura da Baía de Paranaguá ocorrem bancos arenosos submersos e semisubmersos que configuram deltas de maré, sendo que os de maré vazante são mais desenvolvidos que os de enchente (ANGULO 1992, 1999).

## **2. Materiais e Métodos**

A amostragem e coletas foram realizadas na décima quinta campanha na pré-dragagem, ou seja, antes das operações de dragagens do trecho Alfa realizadas no ano de 2015. As coletas foram realizadas nos momentos de maré conforme indicação na Figura 23.

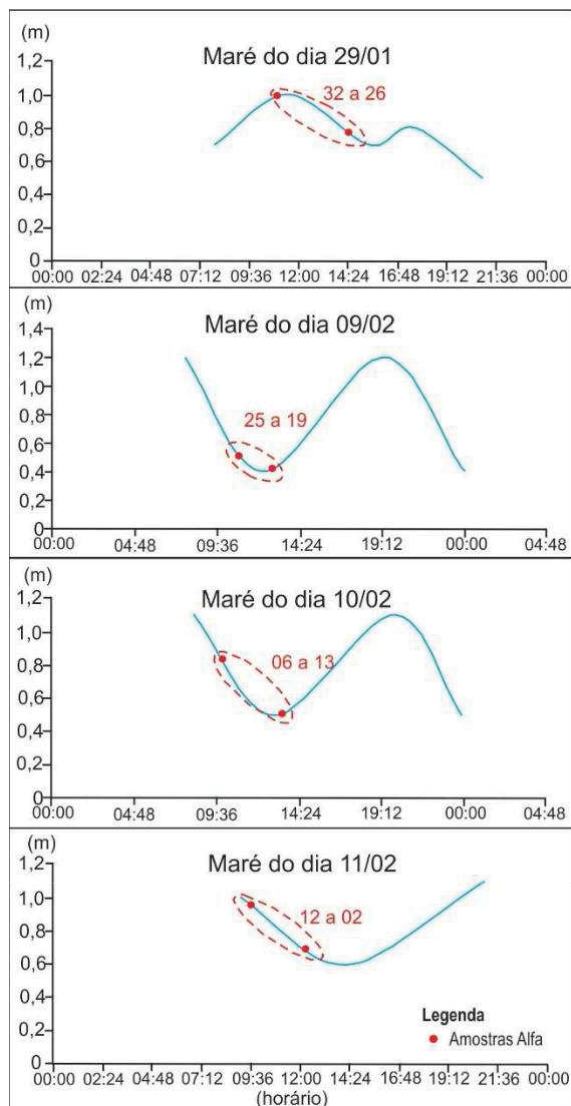


Figura 23 - Marés astronômicas nos períodos de amostragem. Executada por trechos no sentido NW para SE aleatórios. Fonte: APPA, 2015.

Na área Alfa foram obtidas 32 amostras ao longo do canal, conforme indicado na figura 10, com amostrador de fundo tipo Van Veen, nos dias 29 de janeiro e 09, 10, 11 e 19 de fevereiro de 2015. As amostras foram obtidas pela empresa DTA Engenharia.

As análises físico-químicas foram realizadas pelo laboratório Ecolabor Comercial Consultoria e Análise. A análise toxicológica foi executada pelo Laboratório de Ecotoxicologia Marinha e Microfitobentos do Instituto Oceanográfico-USP – LECOTO.

Os resultados das análises foram fornecidos pela Administração dos Portos de Paranaguá e Antonina (APPA), e se referem ao programa de monitoramento ambiental da dragagem de manutenção do canal de acesso, bacia de evolução e berços do cais comercial do Porto de Paranaguá.

Os métodos analíticos considerados para a pesquisa e utilizados nas análises dos sedimentos foram: granulométrica N.T. CETESB L6.160 e metais pesados EPA SW 846, 3051A, 6010C, SMEWW 3114B, 3030F, 2120B, 3030B, 3112B e 3120B. Também foi considerado na pesquisa o estudo ecotoxicológico no ponto Alfa-14, que utilizou o método padronizado ABNT/NBR 15638:2015 com *Leptocheirus plumulosus*.

Por fim, foram realizadas análises de agregados-orgânicos e não metálicos, como bifelinas policloradas, hidrocarbonetos aromáticos polinucleares, óleos e graxas, os métodos analíticos foram: oxidação com dicromato de potássio – IAC; EPA 3550C, 8082<sup>a</sup> e 8270D; e SMEWW 4500, 5220C e B.

### 3. Resultados e discussões

#### 3.1 O processo de dragagem

Entre 2009 e 2015, as intervenções de dragagem no CEP foram responsáveis pela movimentação de 23,5 milhões de metros cúbicos de sedimentos a custo de 365,8 milhões de reais (Tabela 1). Estes materiais são descartados numa área despejo (Figura 25), de acordo com as normas ambientais, mas sem usos benéficos definidos.

Tabela 1 - Custos (em milhões de reais) e volumes de sedimentos dragados (em milhões de m<sup>3</sup>), no CEP, entre 2009 e 2015.

| Ano    | 2009  | 2011  | 2012  | 2013  | 2015  |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Custo  | 32,8  | 2,5   | 39,9  | 137,8 | 152,8 |
| Volume | 4,007 | 0,108 | 3,633 | 9,102 | 6,625 |

Fonte: APPA, 2015.

### 3.2 Qualidade do sedimento

A área do presente estudo foi limitada ao trecho de dragagem Alfa (Figura 24), porque esta área sozinha foi responsável pelo fornecimento de  $9,4 \times 10^6 \text{m}^3$  de sedimento entre 2009 e 2015, que corresponde a 40% do total do sedimento dragado no Canal da Galheta no período.

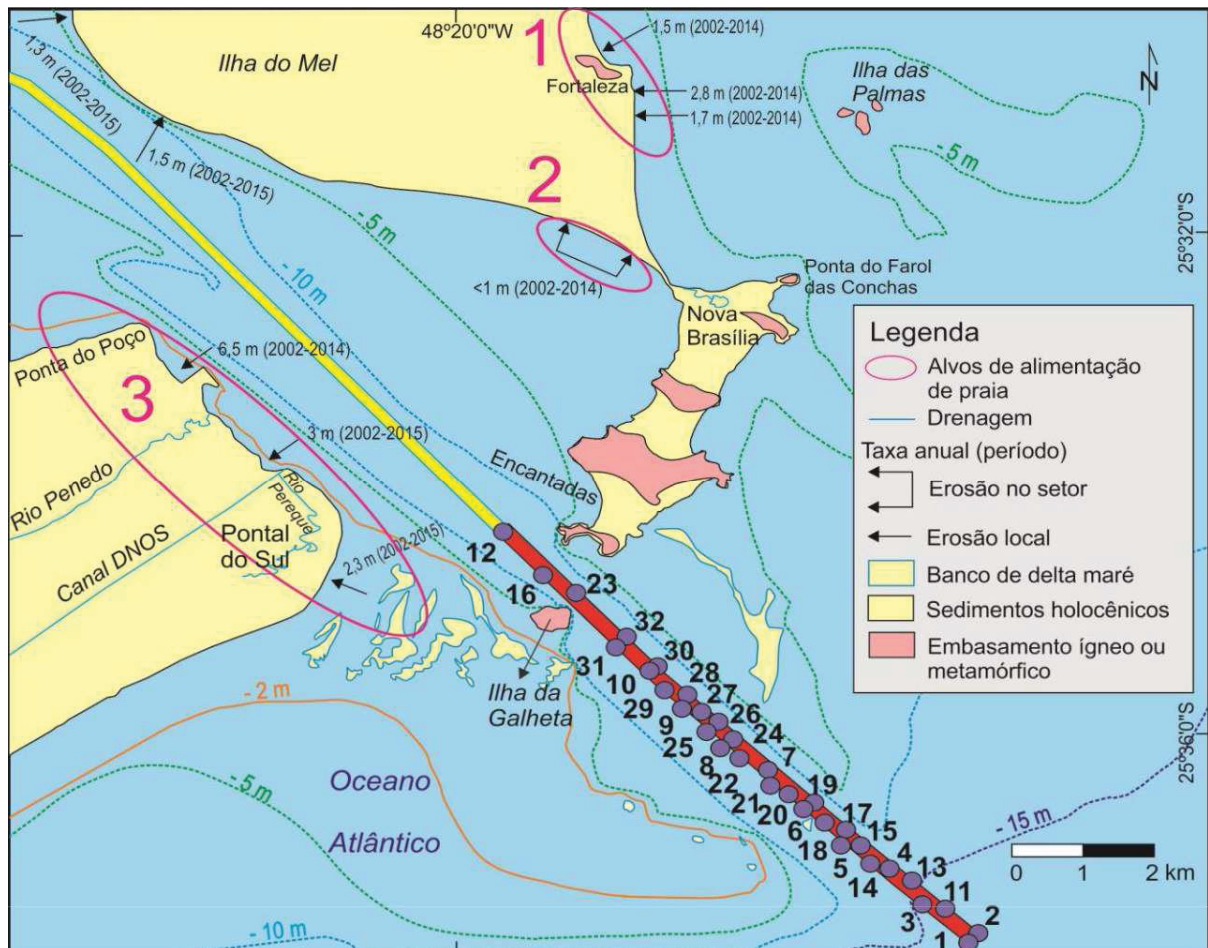


Figura 24 - Localização das amostras no trecho Alfa do Canal da Galheta; taxas de erosão costeira segundo Angulo et al. (2017) e alvos sugeridos de alimentação de praia. Fonte: Adaptado de Angulo et al 2017.

Ademais, porque os problemas de erosão existentes no litoral paranaense estão mais próximos a esta área (ANGULO et al. 2016).

O trecho Alfa do canal se estende desde o início do Canal da Galheta, na plataforma interna e atravessa os bancos do delta de maré vazante.

Os sedimentos dragados são principalmente areia grossa até fina e secundariamente silte e excepcionalmente, no máximo, 15% de argila (Figura 26; Tabela 2).

Nos metais pesados analisados os parâmetros se mantiveram dentro dos limites definidos pela Resolução Conama 454/12 (BRASIL 2012), exceto o chumbo, cuja concentração ficou acima do nível 1 (46,7 mg/Kg) no ponto 14 (78,3 mg/Kg).



Figura 25 - Local da área de despejo.

Neste ponto o ensaio ecotoxicológico mostrou percentual de sobrevivência de 92,50% para *Leptocheirus plumulosus*, ou seja, a amostra não apresentou toxicidade para esta espécie quando comparada à amostra padrão.

### 3.3 Possibilidades de aproveitamento

As características dos sedimentos amostrados no CEP não apresentam restrições, do ponto de vista dos contaminantes, que os inviabilize para o uso, principalmente das areias, em alternativas mais benéficas, mesmo que parcialmente, em substituição ao simples despejo.

As areias encontradas no trecho Alfa apresentam condições de uso direto, sem a necessidade de processos de tratamento e ou descontaminação. Mesmo a amostra 14 que apresentou valor elevado de chumbo não inviabiliza o uso, pois o

valor não atinge o nível 2 de alerta, que indicaria “um limiar acima do qual há maior probabilidade de efeitos adversos à biota” de acordo com Resolução Conama 454/12 (BRASIL 2012) e tampouco apresentou resultado impeditivo no estudo ecotoxicológico.

Tendo em vista a ausência de restrições físico-químicas nas areias amostradas, e o volume de sedimento dragado, de 9,4 milhões de metros cúbicos, no período de 2009 a 2015, no trecho Alfa, considera-se que esta área seria adequada em qualidade e quantidade para emprego em usos benéficos.

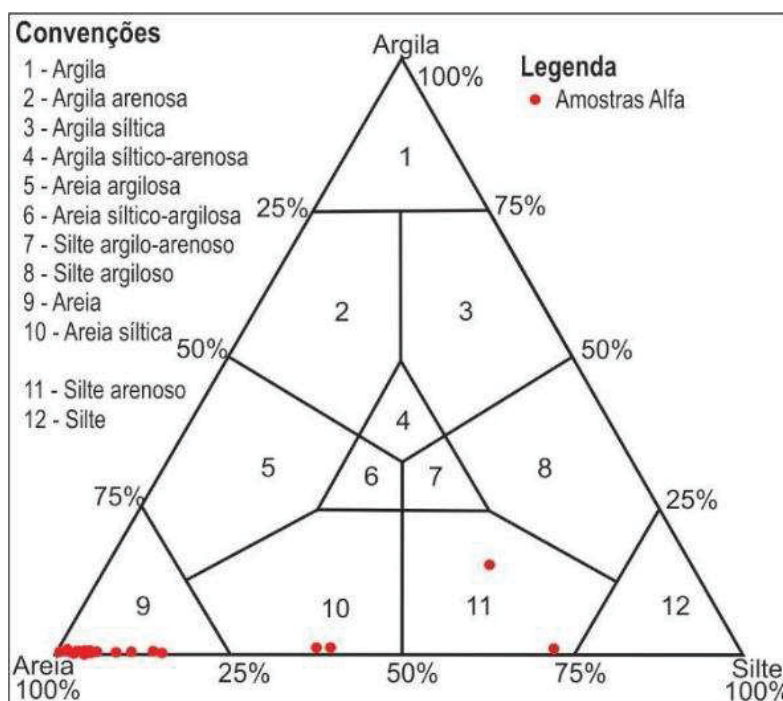


Figura 26 - Classificação de Shepard (1954); 32 amostras do trecho Alfa. Fonte: APPA, 2015.

Há de ser considerada no trato de possíveis aproveitamentos a necessidade de controle, manejo e planejamento a título de políticas públicas de longo prazo para enfrentar os problemas de erosão no litoral paranaense.

Algumas áreas foram apontadas por Angulo et al 2016a como submetidas a processos erosivos intensos, hora associados a eventos de alta energia, ou ainda, intensificados por obras ou intervenções antrópicas. Com base nos estudos destes autores, são apontados na Figura 24, três possíveis alvos indicados para alimentação artificial de praia, assim especificados:

O setor da Fortaleza, na Ilha do Mel, que atualmente apresenta fase erosiva com taxa de até 2,8 metros entre 2002 e 2014, conforme estudos de Angulo et al 2016.

O istmo, também na Ilha do Mel, que por se encontrar entre duas desembocaduras apresenta intensos processos de erosão e deposição, em 1950 tinha 150 metros de larguras e já apresentava erosão (Figueiredo 1954) e, portanto, merece atenção e monitoramento para possíveis reposições artificiais com areia dragada.

Tabela 2 - Profundidade (m), frações granulométricas (%) e metais pesados (mg/Kg) dos sedimentos dragados no trecho Alfa do CEP. Notas: (nd) não detectado.

| Amostra      | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26  | 27 | 28 | 29 | 30  | 31 | 32  |    |    |
|--------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|----|----|----|-----|----|-----|----|----|
| Profundidade | 17 | 17 | 16 | 16 | 14 | 16 | 15 | 14 | 16 | 17 | 16 | 19 | 16 | 15 | 16 | 30 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 23 | 15 | 15 | 15  | 15 | 16 | 16 | 16  | 24 | 23  |    |    |
| Grânulos     | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0   | 0  | 0  | 0  | 0   | 0  | 0   |    |    |
| Areia        | 61 | 97 | 81 | 29 | 82 | 97 | 96 | 94 | 91 | 83 | 88 | 94 | 27 | 96 | 94 | 90 | 95 | 94 | 94 | 95 | 91 | 93 | 95 | 59 | 89 | 100 | 99 | 99 | 96 | 100 | 94 | 100 |    |    |
| Silte        | 37 | 2  | 15 | 54 | 14 | 1  | 2  | 4  | 8  | 13 | 10 | 4  | 71 | 3  | 5  | 5  | 2  | 5  | 3  | 3  | 4  | 3  | 3  | 39 | 8  | 0   | 0  | 0  | 1  | 0   | 0  | 0   |    |    |
| Argila       | 1  | 1  | 0  | 15 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 1  | 0  | 1  | 0  | 0  | 1  | 2  | 0  | 0  | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  | 0  | 0   | 1  | 0  | 0  | 0   | 2  | 0   |    |    |
| Arsênio      | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd  | nd | nd | nd | nd  | nd | 1   | nd | nd |
| Cádmio       | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd  | nd | nd | nd | nd  | nd | nd  | nd | 0  |
| Chumbo       | 5  | 4  | 4  | 6  | 9  | 2  | 2  | 1  | 1  | 1  | 2  | 1  | 7  | 78 | 2  | 4  | 4  | 1  | 3  | 2  | 2  | 2  | 3  | 4  | 2  | 1   | 1  | 1  | 1  | nd  | 1  | 1   | 8  |    |
| Cobre        | 8  | 11 | 10 | 12 | 8  | 9  | 8  | 9  | 9  | 8  | 9  | 10 | 14 | 8  | 8  | 9  | 8  | 8  | 8  | 9  | 8  | 10 | 9  | 10 | 9  | nd  | 1  | nd | nd | nd  | 1  | nd  |    |    |
| Cromo        | 3  | 10 | 6  | 14 | 3  | 2  | 2  | 1  | 1  | 1  | 5  | 3  | 24 | 7  | 3  | 1  | 3  | 2  | 2  | 3  | 1  | 2  | 2  | 3  | 1  | 2   | 3  | 2  | 2  | 2   | 4  | 2   |    |    |
| Mercurio     | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd  | nd | nd | nd | nd  | nd | nd  | nd |    |
| Níquel       | 1  | 4  | 2  | 5  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 2  | 1  | 10 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1   | 1  | 1  | 1  | 1   | 1  | 2   | 1  |    |
| Zinco        | 14 | 25 | 20 | 34 | 18 | 10 | 12 | 9  | 8  | 7  | 15 | 12 | 48 | 16 | 12 | 13 | 11 | 10 | 10 | 11 | 9  | 14 | 12 | 22 | 14 | 5   | 12 | 7  | 15 | 11  | 22 | 10  |    |    |

Fonte: APPA, 2015.

Por fim, o setor entre a Ponta do Poço e Pontal do Sul, em Pontal do Paraná, que teve toda sua dinâmica natural alterada pela construção de um canal de drenagem entre 1954 e 1959 (ANGULO 1993).

#### 4. Conclusões

A partir dos dados analisados pode-se concluir que: As operações de dragagem são necessárias e a disposição usual em área de despejo pode ser substituída, mesmo que parcialmente, por usos benéficos; O sedimento dragado

no trecho Alfa do Canal da Galheta apresenta características apropriadas para possibilidades de utilizações diversas; O litoral do estado do Paraná apresenta problemas de erosão costeira que poderiam ser minimizados com a alimentação de praias a partir de areias dragadas no Canal da Galheta;

O trecho de dragagem Alfa, além apresentar areias próprias para alimentação de praias e outros usos benéficos, é o trecho mais próximo a áreas com problemas de erosão.

Ademais, sugere-se que seja estudada posteriormente a viabilidade de utilização da areia dragada na alimentação artificial das praias do município de Matinhos, principalmente no Balneário Flamingo.

Também, considera-se necessário o desenvolvimento de pesquisas para no CEP com amostragens próprias, para indicações de usos benéficos também para os sedimentos dragados no interior da baía de Paranaguá e Antonina.

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem à Administração dos Portos de Paranaguá e Antonina (APPA), pela prontidão e empenho na disponibilização dos dados requeridos por meio do processo sob n° 14.21.496-5, agradecem ainda aos Diretores Luiz Henrique Tessutti Dividino e Bruno da Silveira Guimarães. São gratos também à gestora ambiental Janelize Nascimento Felisbino da APPA e ao colega Marcelo Eduardo José Müller, pelo auxílio e destreza. Finalmente, agradecem também à Fundação Araucária e ao CNPq pelas bolsas e incentivo à pesquisa e ciência.

## 4.2 ARTIGO QUALIDADE E DISPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS

Também como importante resultado da pesquisa, nesse subitem consta o artigo submetido em 2020 e publicado em 10 de março de 2021 no periódico *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* com número DOI: doi.org/10.1007/s00128-021-03206-7.

### Quality and Disposal of Dredged Sediments from Tidal Deltas in Subtropical Bays in Southern Brazil

José A. Simões Neto,<sup>a,b</sup> Maria C. de Souza,<sup>a</sup> Rodolfo J. Ângulo, Luiz H. S. de Oliveira,<sup>a</sup> Felix J. Reize,<sup>a</sup> Marcell L. Besser,<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Coastal Studies Laboratory (LECost), Paraná Federal University, Curitiba, Brazil

<sup>b</sup> Brazilian National Mining Agency – ANM, Curitiba, Brazil

<sup>c</sup> Geological Survey of Brazil– CPRM, Curitiba, Brazil

#### ABSTRACT

In order to measure the contamination of dredged and beach sediments and the applicability of sediment quality guidelines in a wet subtropical region of southern Brazil, the areas surrounding both the Paranaguá and Babitonga estuaries were studied, including their harbour zones and adjacent beaches. Investigation of the sampled sediments comprised optical and electron microscopy, energy-dispersive X-ray spectroscopy, inductively coupled plasma mass spectrometry, and physicochemical and toxicological analyses. Additionally, data provided by the harbours administrations on dredged volumes, sedimentology, and coastal dynamics were compared. It was determined that the studied sediments, especially the ones from both tidal deltas, have similar characteristics, including physical and chemical parameters. It was also confirmed that tidal deltas are depositional areas with low potential to accumulate pollutants. Therefore, the current disposal of this scarce sandy material during dredging might not be beneficial, considering the significant sand removal amount from the coastal depositional system.

**KEYWORDS:** Estuarine Sediments; Dredged Channels; Tidal Deltas; Sediment Quality Guidelines, Beach Nourishment.

## 1. INTRODUCTION

For classification and toxicity definition, sediment quality guidelines (SQGs) consider numerous aspects, such as environmental geochemistry, physical and biological factors. However, norms are usually established without consideration to geological and sedimentary environments. Chapman (1989) discusses the need to base sediment quality criteria on clear cause-effect relationships between contaminants and biological effects in order to protect public health and the environment without being overly vigilant. By comparing and evaluating SQGs that are in use around the world, considering where they have been developed and for what purpose, Burton (2002) argues for the use of integrated approaches to assess aquatic ecosystems rather than relying solely on guidelines.

In Brazil, international SQGs (e.g. EC 2002; Long et al. 1995; FDEP 1994; ECMD 2007; HPA 2011) for dredged sediments assessment in salt waters were used in the development of the national resolution N0 454/2012 (CONAMA, 2012), which uses alert levels 1 and 2 for metals, as well as for organic compounds tributyltin (TBT), organochlorine pesticides (OCPs), polychlorinated biphenyl (PCB) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH). Notably, none of the parameters are applicable to tidal deltas. They are, instead, limited to the interiors of bays.

This study aims to evaluate the quality measures used in the Brazilian norm for higher energy sedimentation environments, such as the deltas at the inlets of two bays, Paranaguá and Babitonga, situated in the subtropical region of Brazil (Figure 1). The studied areas have a very particular dynamic due to the interaction of several agents, such as waves, tides and coastal currents (Souza 1999). It all composes a natural system that involves constant processes of transformation of the coastal morphology. Changes in the coastline may be associated with changes in relative sea level, global or regional climatic changes or even anthropic occupation (Angulo 1993; Tomazelli et al. 1996).

Harbor activity in these areas dates back to the 16th century and the post-invasion period in South America, but it was only in 1808 that the development of the Paranaguá Harbor advanced (Morgenstern 2017). The Paranaguá bay in conjunction with Laranjeiras bay and a series of smaller estuarine systems forms the Paranaguá Estuarine Complex, with a relatively well-preserved environment that

contrasts urban areas in its southern margin and protected areas in its northern one. Two harbors are active today in the Paranaguá bay, although local authorities and companies/businesses are planning to build a third in front of the Ilha do Mel/Honey Island. To the south, Babitonga bay accommodates two harbors that operate in opposite margins of the estuary (Figure 27).

The high energy sedimentation environments at the inlets result in sandy, submerged and semi-submerged depositional features, interpreted as tidal deltas. In both bays, the main tidal channels were artificially created through dredging to allow the access of vessels to the harbors (Angulo 1992, 1999; Souza 1999).

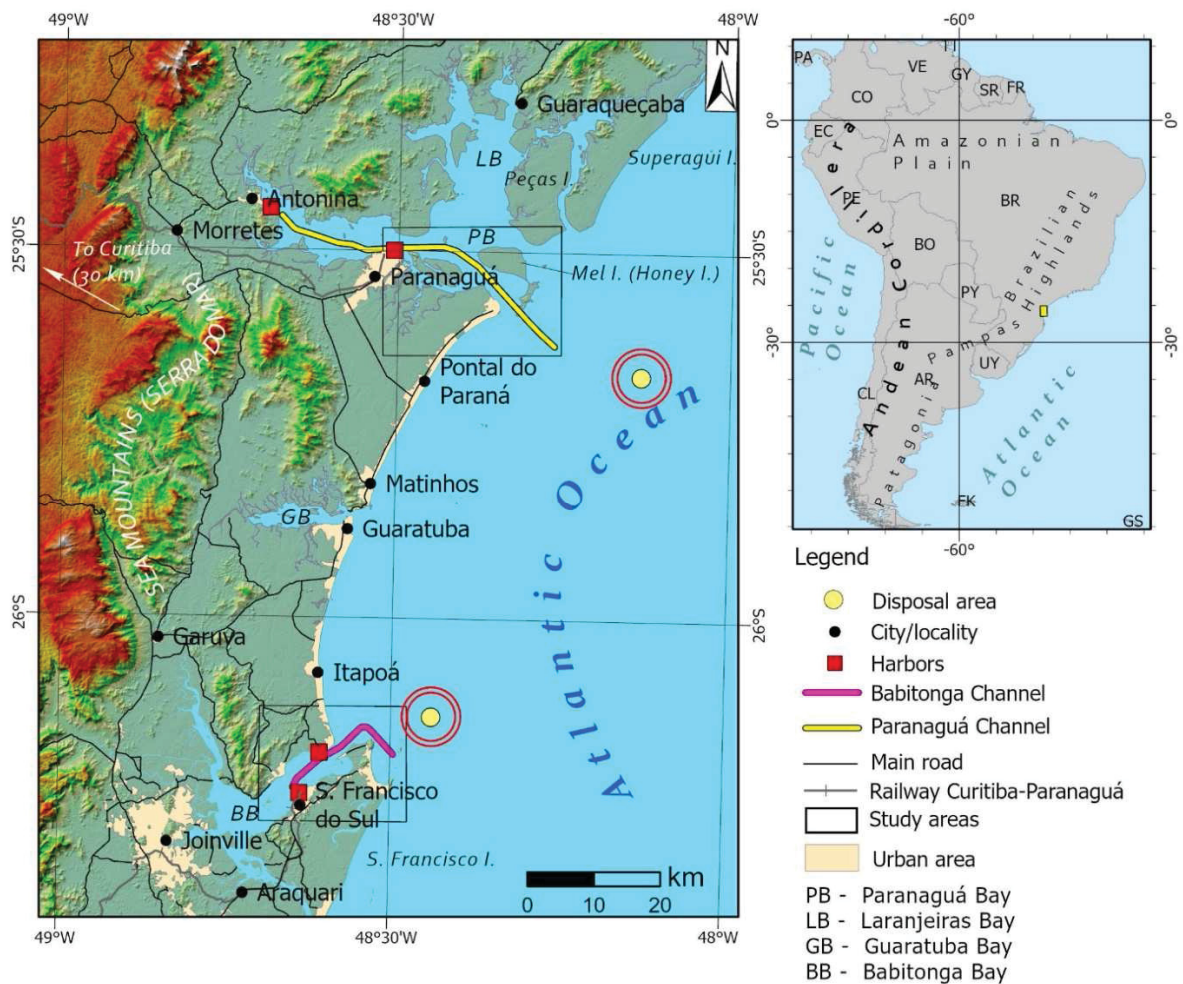


Figure 27 – Subtropical estuaries of Paranaguá and Babitonga, with port areas and current offshore disposal areas of the dredged sediments identified. Sources: Digital Terrain Model (DTM) data from Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) is available on the website of United States Geological Survey/Eros Data Center (USGS/ED). Road and cartographic databases are available on the website of the Department of Highways (DER) of Paraná State and of the Geological Survey of Brazil (SGB), respectively. Limits of the dredged channels are from Port Administration Data of Paranaguá and São Francisco.

Luijendijk (2018) estimates that global sand distribution on beaches has been reduced with the increase of erosive trends. Sediment rates are diminished not only by the construction of dams and mining operations in rivers and deltas, which interrupts sedimentation, but also by the creation of coastal structures that intercept the longitudinal drift. Sediments dredged from navigation channels and discarded away from the coastal system could be used to mitigate losses on beach sedimentary budget (e.g. Silveira et al., 2012; Simões et al., 2017). According to Kvasnicka et al. (2020), minimizing transportation distances of dredged sediments or avoiding long-distance transportation altogether should be a priority.

Grain size influences the adsorption of contaminants; sandy sediments tend to be less contaminated while silt and clay tends to retain more pollutants. As such, the higher fine grained percentage consisting of silt and clay in sediments, the greater the contaminant retention potential, and the higher the sand percentage, the greater the solubilization of pollutants in the water column (Burton Jr. 2002). That being said, sandy dredged sediments from estuaries cannot be automatically regarded as polluted or useless.

In the present research, sediments from two tidal deltas of subtropical bays were analyzed and samples were taken in navigation channel which are frequently dredged to support harbor activity. The aim is to evaluate the application of SQGs, established by the technical standards that regulates the disposal of dredged sediments, in high energy sedimentary environments such as tidal deltas. Considerations are made for technical standards to regard the nature of geological sedimentary environments in order to promote the beneficial use of uncontaminated dredged sediments in beach nourishment.

## **2 - MATERIALS AND METHODS**

Three field surveys were conducted between 2018 and 2019 in the Paranaguá and Babitonga bays (respectively, JP and JB in Figure 28) in which sediments were collected with a Van Veen grab sampler. In addition to that, reports from the harbors administrations were gathered. Altogether, forty-two samples from Paranaguá bay and nine samples from Babitonga bay were frozen just after field surveys, and then acid preserved and analyzed in laboratory.

The analytical methods used were petrographic/optical and electron microscopy, energy dispersive x-ray spectroscopy, inductively coupled plasma mass spectrometry, granulometric grain/particle size analysis. Samples preparation were done following US EPA procedures (USEPA 1994). For the determination of total recoverable elements sediment samples were dried at 60° C to prevent loss of Hg and other volatile metals. Samples were then homogenized by sieving using a 5-mesh polypropylene sieve. Nitric and hydrochloric acid were used for total extraction of elements which were analyzed by inductively coupled plasma mass spectrometry. To evaluate the accuracy of the proposed method, addition and recovery tests were performed with known concentrations of the analyte. The recoveries of the analyte varied between 90-110%, these values being considered adequate, confirming the good accuracy of the method. Limits of quantification were 0.1 mg/kg (As, Cd, Pb, Cu), 0.5 mg/kg (Ni), 0.02 mg/kg (Hg, Cr) and 1.0 mg/kg (Zn). All data were evaluated statistically using t-Test where the significance level ( $\alpha$ ) considered was 0.05. Grain-size statistical parameters were calculated in Gradistat (Blott and Pye, 2001),

Toxicological tests with *Leptocheirus plumulosus* – LP (ABNT, 2015) were conducted in Paranagua bay samples and with *Echinometra lucunter* – EL (ABNT, 2012) in Babitonga bay samples, respectively executed at ECOTEC laboratories in Santa Catarina State and at LECOTOX laboratory of São Paulo State University. In both cases short-term toxicity tests were carried out. Control sediments aliquots were used to evaluate the acceptability of the tests. Control tests considered an endpoint of LD50 within 36(EL) and 96(LP) hours and a 20% of death tolerance for tested organisms, temperature, aeration, and photoperiod were controlled during tests. Also, salinity, pH, ammonia, and dissolved oxygen were measured for all replicates and control.

The correction of the metal values revealed a proportionality pattern according to the amount of fine sediments (silt and clay) present in the sample, as determined by the equation:

$$\delta = \alpha / 100 \times \beta$$

Where  $\delta$  = metal concentration in the sample,  $\alpha$  = proportion of fine sediments and  $\beta$  = metal concentration in fine sediments.

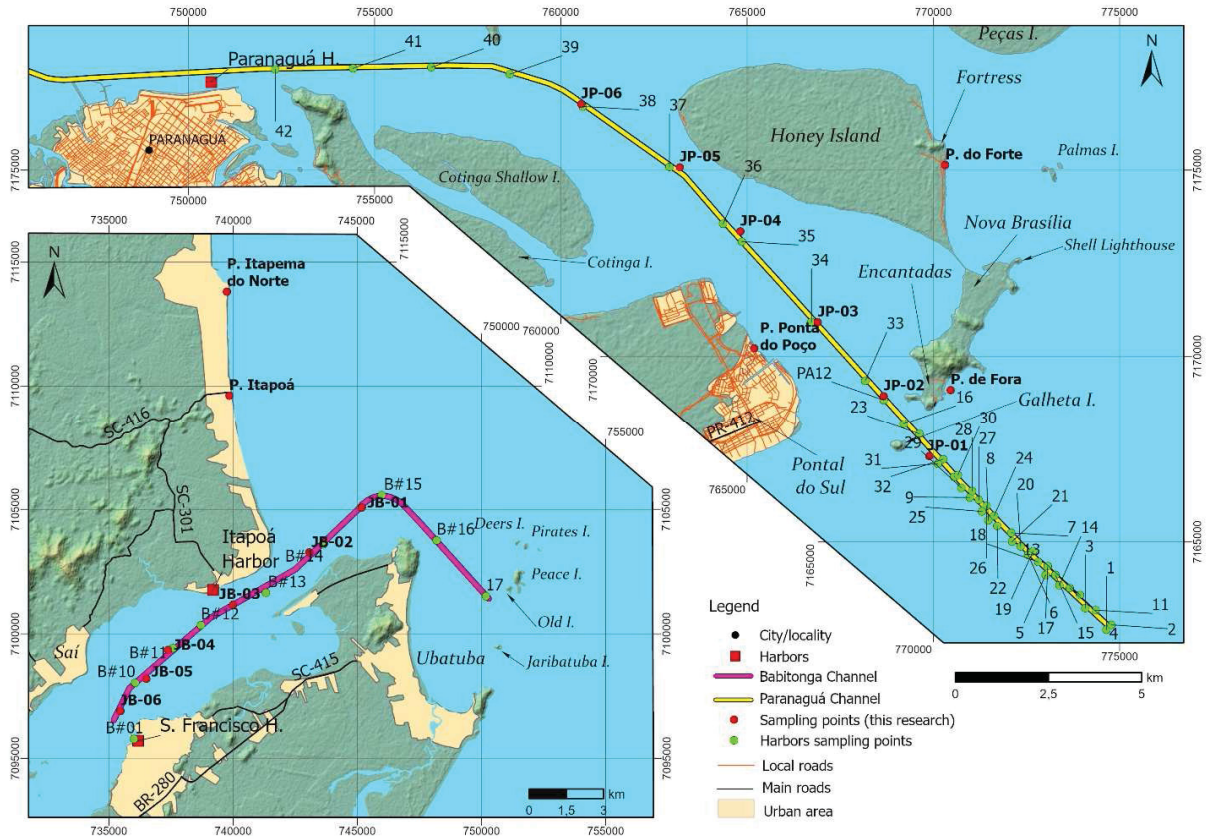


Figure 28 - Location of the sampling points in the channels of Paranaguá (JP-01 to JP-06) and Babitonga (JB-01 to JB-06) bays. The sampled beaches are also identified with red points: Forte and Fora beaches in Ilha do Mel/Honey Island and Ponta do Poço beach next to the Paranaguá bay channel, and Itapema do Norte and Itapoá beaches next to the Babitonga bay. Sources: Digital Terrane Model (DTM) data from Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) is available on the website of United States Geological Survey/Eros Data Center (USGS/ED). Road and cartographic databases are available on the website of the Department of Highways (DER) of Paraná State and of the Geological Survey of Brazil (SGB), respectively. Limits of the dredged channels are from Port Administration Data of Paranaguá and São Francisco.

Finally, analyses of organic and non-metallic aggregates were performed, namely, tributyltin (TBT), organochlorine pesticides (OCPs), polychlorinated biphenyl (PCB) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH). The analytical methods used were potassium dichromate oxidation (IAC), USEPA 3550C, 8082A and 8270D, and SMEWW 4500, 5220C and B.

## RESULTS AND DISCUSSION

Sand grain morphology and composition were both defined under optical and electron microscope. The predominant grain size is fine sand, with particles up

to a maximum of 2 mm in diameter and an average of 0.19 mm in diameter, for the most part highly spherical and sub-angular to sub-rounded, which indicates well-sorted sand. The modal mineralogical composition found in the dredged channels and beaches is predominantly quartz. Under the microscope, quartz grains correspond to 95% – 100% of particles. Fragments of carbonate shells, ilmenite, zircon, feldspar and tourmaline are subordinate, always in trace proportions, except the carbonates which were abundant (Figure 29).

Practically no gravel was observed, except at sampling point B#15 in Babitonga bay, which probably corresponds to a high number of fragmented shells that were not discarded for the granulometric analysis. Of the analyzed samples, 96.4% are sandy in the channels and 100% in the beaches except for points B#01 and B#11 in Babitonga. These points, however, are located inside the estuary, not at the tidal delta, near São Francisco port. The two main classes of sand present in the samples are fine and very fine sand, ranging from 0.062 to 0.25 millimeters.

The analyzed elements and compounds in the sediments are described individually below and compared to the current quality measures used worldwide and compiled in the Brazilian norm for dredged sediments disposal, treatment and beneficial uses (CONAMA, 2012). Geochemical results are shown in Table 3, and although all data provided by the harbors were used in statistical analyses, not all are included within the table, except for the samples in which toxicological tests were performed.

The Potential of Hydrogen (pH) in Babitonga bay ranged from a minimum of 7.4 and a maximum of 8.26 with an average of 7.88, while in Paranaguá bay it has the lowest value of 5.47 and the highest of 8.33 with an average of 7.39. It is important to point out that there is no clear definition of pH criteria for sediment quality.

On the other hand, the amount of organic matter present in the sediments varies on a large scale. In Babitonga bay the minimum value found is 0.01% in sample JB-03 and the maximum is 17.12% in point B#01, with an average of 3.14%. Organic matter is not even detectable (< 0.3 %) in many samples of Paranaguá bay and the average there is 0.31%.

Eight potentially toxic chemical elements comprise the studies of inorganic geochemistry in dredged sediments. Brazilian standards are based on assorted governmental and foreign literature quality measures, according to two levels of alertness and toxicity, both for freshwater and brackish water. The elements considered are arsenic, cadmium, lead, copper, chromium, mercury, nickel and zinc.

Both bays contain little variability for arsenic, with concentrations ranging from 0.18 to 7.35 mg/kg in Babitonga bay, with an average of 1.33 mg/kg, and 0 to 4.82 mg/kg at JP-06, in Paranaguá bay, with an average of 0.17 mg/kg. In the latter, arsenic was detected in only 6 of the 48 samples considered.

Cadmium was the least detected element ( $< 0.1$  mg/kg) in the entire survey, present only at points JB-05 and JB-06 with 0.13 and 0.17 mg/kg, respectively, in Babitonga bay, and at points JP-06 and PA-42 with values of 0.13 and 1.6 mg/kg, respectively, in Paranaguá bay.

In contrast, lead is present in almost all bay samples, with values under the detection limit of 0,1 mg/kg in 2 of the 16 sampling points, a maximum value of 15.78 mg/kg at JB-02 and an average of 2.39 mg/kg in Babitonga bay. In Paranaguá bay, the maximum value observed is 78.3 mg/kg at P-14 and the local average is 4.65 mg/kg.

Similarly, but less frequently, copper and chromium concentrations measured at Babitonga bay ranged from  $< 0.1$  mg/kg to 8.07/28.51 mg/kg (Cu/Cr) with averages of 1.09 and 4.59 mg/kg, respectively. In Paranaguá bay, the variation is from  $< 0.1$  mg/kg to 13.9/23.6 mg/kg (Cu/Cr), with averages of 5.17 and 4.74 mg/kg, respectively.

Mercury is virtually undetected in both bays, and even at the points where it does occur, JP-06, JB-05 and JB-06, concentrations are slightly above the detection limit of 0.02 mg/kg, showing results between 0.03 and 0.04 mg/kg.

Nickel and zinc are also present in similar quantities. In Babitonga bay the lowest respective values are 0.36 mg/kg and 0.89 mg/kg, while the peak values range between 10.81 mg/kg and 57.49 mg/kg, with averages of 1.95 and 8.79 mg/kg. In Paranaguá bay, the minimums are 0.17 mg/kg of Ni and 0.5 mg/kg of Zn

and the maximums are 9.7 mg/kg of Ni and 50.3 mg/kg of Zn, with respective averages of 1.77 mg/kg and 14.66 mg/kg.

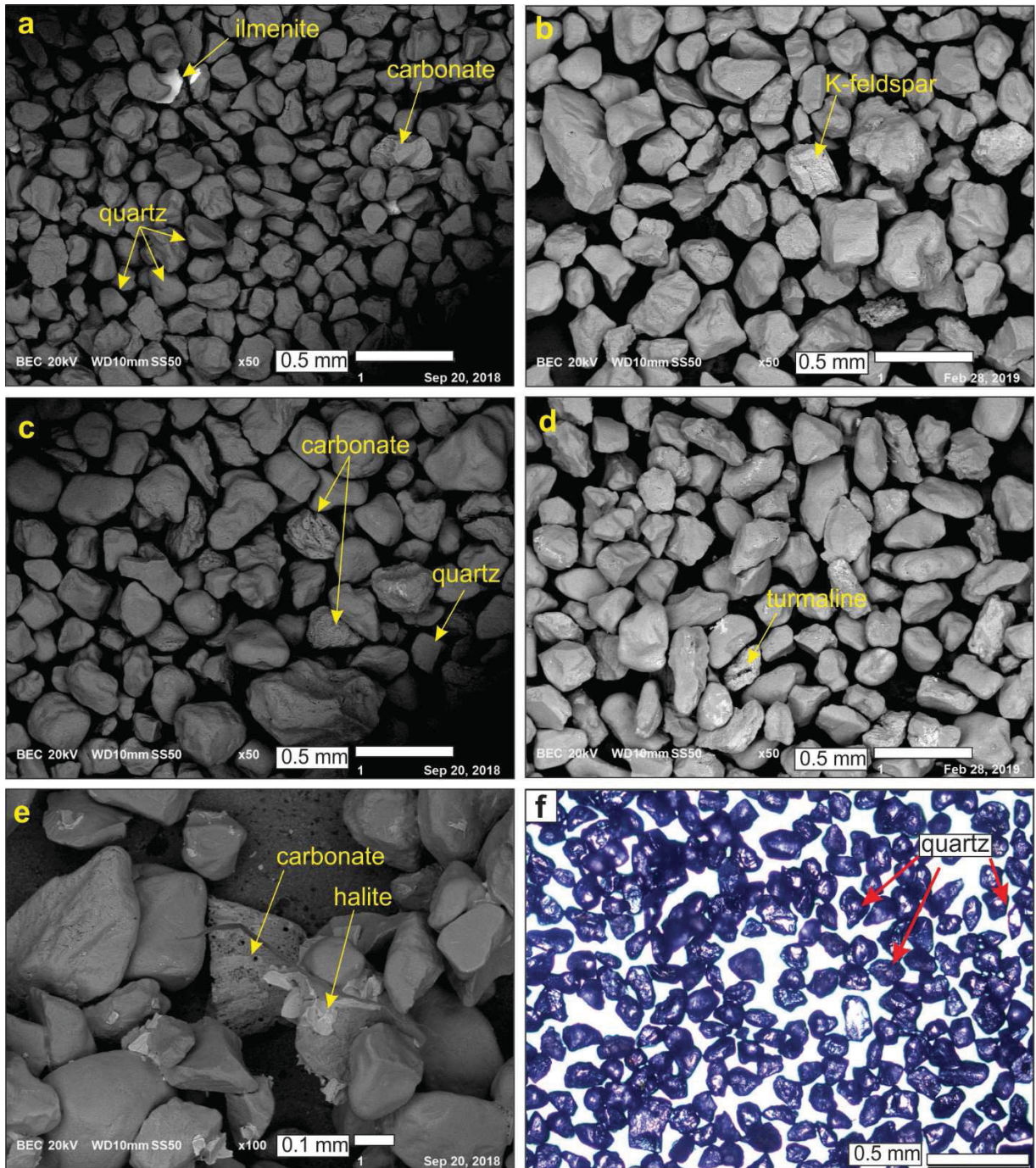


Figure 29 - Mineralogical composition and morphology of the sediments at the For a Beach in Ilha do Mel/Honey Island (a and f), Itapoá Beach (c), Matinhos Beach (e) and in the Paranaguá (b) and Babitonga (d) channels.

Table 3 - General results in the Babitonga and Paranaguá bays. For Babitonga bay, JB-01 to JB-06 are samples collected for this research and B# are samples from the São Francisco and Itapoa harbors' data; For Paranaguá bay, JP-01 to JP-06 are samples collected for this research and P14 is a sample from the Paranaguá Harbor data (Simões et al. 2017).

| Sample           | pH   | OM - % | Granulometry - % |       |       |       |      |      | Metals - mg/kg |      |       |       |       |       | Organic matter - mg/kg (dry wt) |      |      |      |             |  | TOXICOLOGY |
|------------------|------|--------|------------------|-------|-------|-------|------|------|----------------|------|-------|-------|-------|-------|---------------------------------|------|------|------|-------------|--|------------|
|                  |      |        | Gravel           | Sand  | Silt  | Clay  | As   | Cd   | Pb             | Cu   | Cr    | Hg    | Ni    | Zn    | TBT                             | OCP  | PCB  | PAH  |             |  |            |
| JB-01            | 7.7  | <0.3   | 0.4              | 96.33 | 3.27  | 0     | 0.31 | <0.1 | 0.71           | 0.32 | 1.26  | <0.02 | 0.44  | 2.06  | n/a                             | n/a  | n/a  | n/a  |             |  |            |
| JB-02            | 7.7  | <0.3   | 1.71             | 96.22 | 2.06  | 0     | n/a  | n/a  | n/a            | n/a  | n/a   | n/a   | n/a   | n/a   | n/a                             | n/a  | n/a  | n/a  |             |  |            |
| JB-03            | 7.6  | <0.3   | 0.24             | 96.13 | 3.55  | 0     | n/a  | n/a  | n/a            | n/a  | n/a   | n/a   | n/a   | n/a   | n/a                             | n/a  | n/a  | n/a  |             |  |            |
| JB-04            | 7.5  | 1.39   | 0                | 48.56 | 33.28 | 18.17 | 0.18 | <0.1 | 0.51           | 0.25 | 1.12  | <0.02 | 0.36  | 1.79  | n/a                             | n/a  | n/a  | n/a  |             |  |            |
| JB-05            | 7.6  | 0.84   | 0                | 40.53 | 38.82 | 20.63 | 6.36 | 0.13 | 12.76          | 6.60 | 25.99 | 0.03  | 8.49  | 43.63 | n/a                             | n/a  | n/a  | n/a  |             |  |            |
| JB-06            | 7.4  | 0.98   | 0                | 16.1  | 45.18 | 38.73 | 7.35 | 0.17 | 15.78          | 8.07 | 28.51 | 0.04  | 10.81 | 57.49 | n/a                             | n/a  | n/a  | n/a  |             |  |            |
| B#01             | 8.26 | 17.12  | 0                | 1.38  | 62.76 | 35.73 | 0.87 | <0.1 | 1.95           | 1.28 | 4.18  | <0.02 | 1.71  | 9.68  | <0.1                            | <0.2 | <1.8 | <0.5 | toxic*      |  |            |
| B#10             | 8.09 | 8.02   | 0                | 57.44 | 23.45 | 19.08 | 0.94 | <0.1 | 1.87           | 0.96 | 3.79  | <0.02 | 1.63  | 8.5   | <0.1                            | <0.2 | <1.8 | <0.5 | non toxic*  |  |            |
| B#11             | 8.1  | 16.41  | 0                | 5.5   | 56.85 | 37.84 | 0.33 | <0.1 | 0.87           | <0.1 | 1.65  | <0.02 | 0.71  | 5.13  | <0.1                            | <0.2 | <1.8 | <0.5 | non toxic*  |  |            |
| B#12             | 8.01 | 1.39   | 0.35             | 88.54 | 5.45  | 5.66  | 0.58 | <0.1 | 0.62           | <0.1 | 1.29  | <0.02 | 0.5   | 2.86  | <0.1                            | <0.2 | <1.8 | <0.5 | non toxic*  |  |            |
| B#13             | 8.01 | 0.56   | 0                | 99.3  | 0.68  | 0     | 0.46 | <0.1 | 0.36           | <0.1 | 0.7   | <0.02 | 4.5   | 1.09  | <0.1                            | <0.2 | <1.8 | <0.5 | non toxic*  |  |            |
| B#14             | 8    | 0.77   | 1.4              | 98.58 | 0     | 0     | 1.48 | <0.1 | 0.83           | <0.1 | 1.05  | <0.02 | 0.55  | 2.39  | <0.1                            | <0.2 | <1.8 | <0.5 | non toxic*  |  |            |
| B#15             | 8.03 | 0.66   | 28.47            | 71.51 | 0     | 0     | 0.39 | <0.1 | 0.23           | <0.1 | 0.45  | <0.02 | 0.19  | 0.89  | <0.1                            | <0.2 | <1.8 | <0.5 | non toxic*  |  |            |
| B#16             | 8.03 | 0.34   | 0                | 95.44 | 3.79  | 0     | 0.81 | <0.1 | 0.49           | <0.1 | 1.04  | <0.02 | 0.41  | 1.49  | <0.1                            | <0.2 | <1.8 | <0.5 | non toxic*  |  |            |
| B#17             | 8.01 | 1.09   | 0.77             | 95.44 | 3.79  | 0     | 0.71 | <0.1 | 0.85           | <0.1 | 1.38  | <0.02 | 0.43  | 1.96  | <0.1                            | <0.2 | <1.8 | <0.5 | non toxic*  |  |            |
| B#18             | 8.01 | 0.69   | 0.03             | 99.56 | 0.38  | 0     | 0.5  | <0.1 | 0.48           | <0.1 | 1.05  | <0.02 | 0.4   | 1.72  | <0.1                            | <0.2 | <1.8 | <0.5 | non toxic*  |  |            |
| JP-01            | 7.78 | <0.3   | 0                | 97.42 | 2.3   | 0.2   | 0.29 | <0.1 | 2.06           | 0.55 | 0.55  | <0.02 | 0.36  | 1.46  | n/a                             | n/a  | n/a  | n/a  | n/a         |  |            |
| JP-02            | 7.58 | <0.3   | 0                | 91.04 | 8.56  | 0.3   | n/a  | n/a  | n/a            | n/a  | n/a   | n/a   | n/a   | n/a   | n/a                             | n/a  | n/a  | n/a  | n/a         |  |            |
| JP-03            | 7.36 | <0.3   | 0                | 92.5  | 6.1   | 1     | 1.29 | <0.1 | 1.81           | 0.56 | 2.06  | <0.02 | 0.9   | 4.95  | n/a                             | n/a  | n/a  | n/a  | n/a         |  |            |
| JP-04            | 7.55 | <0.3   | 0                | 98.3  | 1.6   | 0.1   | 0.12 | <0.1 | 0.4            | 0.12 | 0.47  | <0.02 | 0.17  | 0.58  | n/a                             | n/a  | n/a  | n/a  | n/a         |  |            |
| JP-05            | 7.46 | <0.3   | 0                | 95.3  | 4.1   | 0.6   | 0.6  | <0.1 | 1.15           | 0.45 | 1.69  | <0.02 | 0.62  | 2.22  | n/a                             | n/a  | n/a  | n/a  | n/a         |  |            |
| JP-06            | 7.38 | 1.12   | 0                | 49.9  | 31.5  | 17.3  | 4.82 | 0.13 | 13.62          | 6.85 | 22.16 | 0.03  | 7.43  | 34.02 | n/a                             | n/a  | n/a  | n/a  | n/a         |  |            |
| P14 <sup>a</sup> | 8.3  | <0.3   | 0                | 96.19 | 2.68  | 0.08  | <0.1 | <0.1 | 78.3           | 8.4  | 6.9   | <0.02 | 1.1   | 15.7  | <0.1                            | <0.2 | <1.8 | <0.5 | non toxic** |  |            |

H: Potential of Hydrogen; OM: Organic Matter; As: Arsenic; Cd: Cadmium; Pb: Lead; Cu: Copper; Cr: Chromium; Hg: Mercury; Ni: Nickel; Zn: Zinc; TBT: Tributyltin; OCP: Organochlorine Pesticides; PCB: Polychlorinated Biphenyl; PAH: Polycyclic Aromatic Hydrocarbons; dry wt: Dry Weight;

n/a – not analyzed (Highly quartz and mudless samples detected in other studied methods)

\* Toxicological test performed with *Echinometra lucunter* (Toxic when survival rates are lower than 80%)

\*\* Toxicological test performed with *Leptocheirus plumulosus*

The aforementioned concentrations indicate that none of the organic compounds for which the samples were analyzed (namely, TBT, OCPs, PCB, and PAH) were detected above the accuracy of the method employed.

Of the eleven toxicological assays performed, only sample point B#01 in Babitonga bay tested toxic for the organism *Echinometra lucunter*. This analysis revealed 100% abnormality or delayed embryo-larval development, which labeled the sample as toxic sediment since the tolerable limit for the test is 20%. Although no chemical reason can be given to justify this result, as the sample point is in the immediate area around the harbor, conjectures surrounding sediment remobilization could be considered. Runoff, storms, and even dredging favor the interaction of different species and can promote synergisms that could accentuate toxicities in these remobilization events.

When comparing research data with assessment guidelines from CONAMA (2012) and those compiled by Burton (2002), the geochemical results indicate anomalous values only for lead (Pb) at point PA14. The nearby area was sampled once again in JP-01, and the average results, including the resampled point, were below all levels within the most relevant SQGs (Figure 30).

The absence of fine sediments, clays, and silts, in tidal deltas, may be explained by high current energies; fine sediments are preferably carried to the continental shelf or are retained within the estuaries, as observed at points B#01, B#10, and B#11 in Babitonga bay, and PA24 in Paranaguá bay. This characteristic of the tidal deltas does not allow for accumulation and absorption of pollutants, as proved by the toxicity found in sample B#01, since it is located inside the bay, just in front of the São Francisco harbor.

For over five decades the main channels of Babitonga and Paranaguá bays have been dredged for the sake of navigation. According to Souza and Angulo (2003) and Angulo et al. (2006), the works that began in 1974 at Paranaguá and in 1979/1980 at Babitonga introduced the imbalance of sedimentary dynamics in the adjacent beaches, since their evolution is related to the tidal deltas. The southern inlet of Babitonga estuary has been closed and grounded to facilitate land traffic to the port in the city of São Francisco do Sul. Meanwhile, the Paranaguá channel has been dredged to allow access to the

ports of Paranaguá and Antonina. For that to happen, the volume of sediment removed has been seven times greater than that of Babitonga bay, amounting to 74.36 million cubic meters of sediment, in contrast with Babitonga's 10.56 million since the 1970s (Table 4).

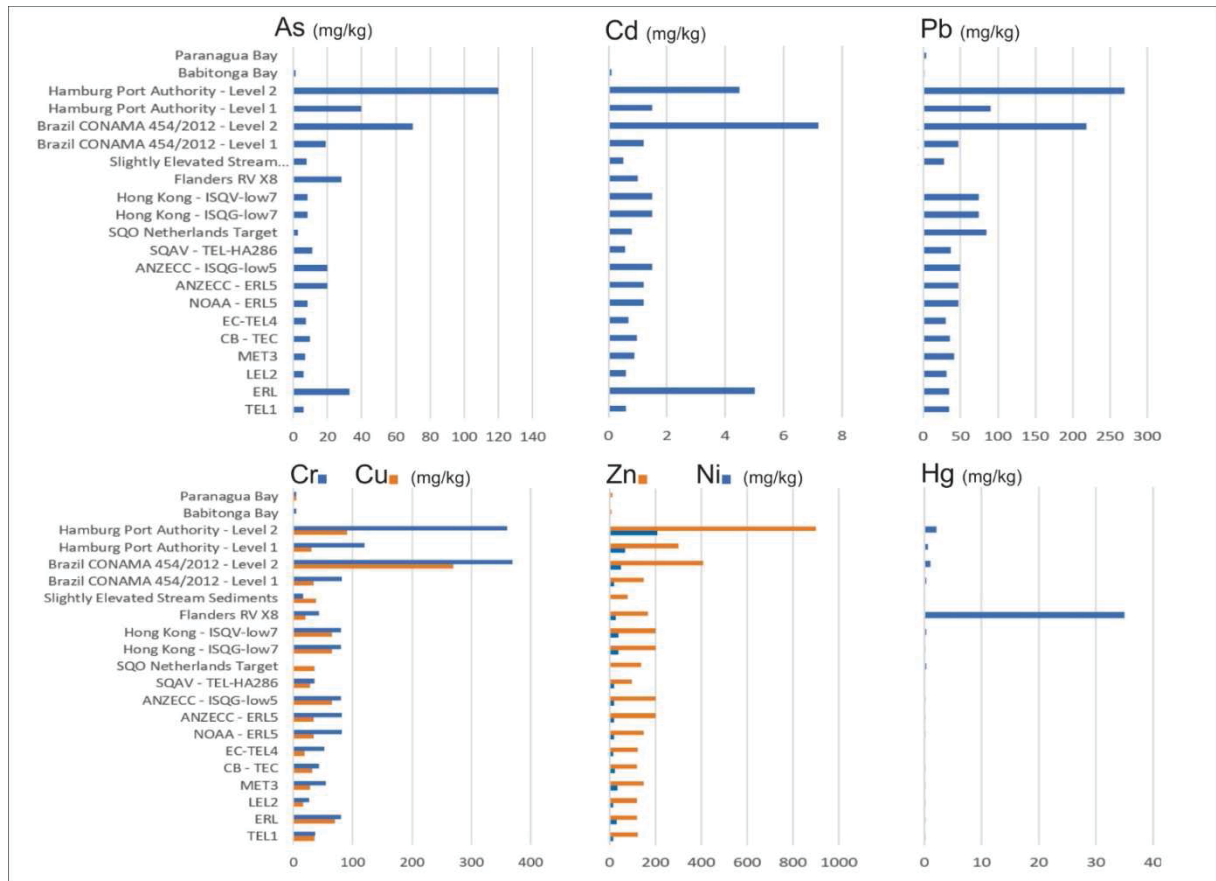


Figure 30 - Metals content comparison between SQGs and the Babitonga and Paranagua bays average results.

In the interest of maintaining or deepening the channels, the tidal deltas of these estuaries (and their ecosystems) are impacted the most, since 65 – 80% of the dredged material are withdrawn from there, due to the highly dynamic nature of this environment.

To determine material input and output quantities in these sedimentary systems, siltation rates from the bathymetric data were observed. In Babitonga bay, the average siltation calculated between 2013 and 2015 was 345,570 m<sup>3</sup>/year in channel areas that intersect the ebb-tidal delta. In Paranaguá bay the

values obtained for two measurement periods exceeded 1 million cubic meters per year, corresponding to 1,189,326 m<sup>3</sup>/year in the 2005/2006 period and 1,877,103 m<sup>3</sup>/year in 2012/2013. These values refer only to the channel section that directly intercepts the ebb-tidal delta.

*Table 4 - Amount of sediment dredge along the channels in the bays.*

| Decade | Babitonga Bay                             | Paranaguá Bay |
|--------|---|---------------|
|        | Volume (x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ) |               |
| 1970   | 0   | 18.68         |
| 1980   | 2.69                                      | 14.11         |
| 1990   | 1.66                                      | 9.92          |
| 2000   | 2.96                                      | 12.18         |
| 2010   | 3.25                                      | 19.47         |
| total  | 10.56                                     | 74.36         |

## CONCLUSIONS

Not all dredged sediments in port channels are potentially polluted or toxic. Tidal deltas are coastal environments with high energy currents, which makes them unfavorable to accumulate pollutants. Therefore, the sediments analyzed in this study are considered unpolluted in consonance with most SQGs applied worldwide.

The quality measures used to determine alert levels in Brazil originate mainly from studies in temperate climate rivers and estuaries with high levels of fine sediments. Hence, they are not valid for tidal deltas and tropical/subtropical estuary inlets. It is highly recommended that the Brazilian standard employed background approaches identified in local studies that also consider the geology of the sedimentary deposit in question.

The beaches of Babitonga and Paranaguá bay have been the subject of studies that analyzed the coastal dynamics of the areas and their interaction with dredging, and the use of dredged sediments to control erosion is invariably suggested (e.g. Silveira et al., 2012; Simões et al., 2017). The annual quantities of dredged sands in the bays are in order of hundreds of thousands of cubic meters in Babitonga and just over one million cubic meters in Paranaguá. This material is in perfect qualitative condition and it can certainly be used to mitigate

sediment budget imbalance on the beaches and return this significant volume of sand to the coastal system. The recommended review of assessments guidelines could be of assistance in the utilization of tidal deltas dredged sediments for such beneficial uses.

## **ACKNOWLEDGMENTS**

The authors would like to thank the Administration of Ports of Paranaguá and Antonina (APPA) and the Administration of São Francisco do Sul Harbor (APSFS) for the readiness and commitment in providing the required data through processes n°. 14.21.496-5 and n°525/2018, respectively. They are also grateful to the Araucaria Foundation and the Brazilian National Council for Scientific and Technological Development (CNPq) for sponsoring and supporting research and science.

### 4.3 ARTIGO RECUPERAÇÃO AMBIENTAL DE PRAIAS E DUNAS

Por fim, como último resultado da pesquisa, elaborou-se o artigo que sintetiza a tese do doutoramento, nele são abordados diretamente a temática da dragagem e soluções possíveis para problemáticas ambientais das planícies costeiras paranaense e norte catarinense. O artigo será submetido no idioma inglês ao periódico *Journal of Coastal Research*.

#### Assessment of Nourishment, Bypassing, Beach and Dunes Restoration Using Dredged Sands in Paranagua and Babitonga Bays (S Brazil)

José A. Simões Neto,<sup>a,b</sup> Maria C. de Souza,<sup>a</sup> Rodolfo J. Angulo, Lucas A. Iwakura, Luiz H. S. de Oliveira,<sup>a</sup> Marcell L. Besser,<sup>c</sup> Pedro H. V. Silveira<sup>d,e</sup>

<sup>a</sup> Coastal Studies Laboratory (LECost), Paraná Federal University, Curitiba, Brazil

<sup>b</sup> Brazilian National Mining Agency – ANM, Curitiba, Brazil

<sup>c</sup> Geological Survey of Brazil – CPRM, Curitiba, Brazil

<sup>d</sup> Sanitation Company of Paraná (Sanepar), Curitiba, Brazil

<sup>e</sup> São Paulo University (USP)

#### ABSTRACT

In the vicinity of debates on sustainability and ecology, while decades of environmental research are ignored in Brazil, a study proposing beneficial uses of dredged sediment in two bays in the southern part of the country is presented. Proving the availability in sufficient quantity and quality of dredged sand in the bays of Paranagua and Babitonga, Parana and Santa Catarina states, respectively. The present study aims to evaluate beaches adjacent to the dredged channels whose sedimentary imbalance can be reestablished with the use of these materials, mainly from tidal deltas, for nourishment, bypassing and general environmental restoration of beaches and dunes. To this purpose, the methods used in the research were mainly assessment and comparison of dredging and coastal work costs, analysis of dredging and environmental legislation, study of variations of the coastline with the Digital Shoreline Analysis System (DSAS) tool and project modeling using the Gemcom Surpac software. Thus, it was concluded with the study that the possibilities of using these sediments are perfectly viable, that it is a fallacy to argue that there is a long distance cost to be covered in the transport of sediments to beaches with erosion problems. And finally that, the Environmental damage from the removal of these clean sandy sediments from the coastal depositional system, protected by the Brazilian federal constitution, can be as damaging as the reasons why hypothetically the isolation of contaminated sediments was in the first place necessary.

**Keywords:** unpolluted sediments; sedimentary balance; beach erosion.

## 1. INTRODUCTION

In Brazilian coastal regions, when it comes to environmental management, there is no single management plan to be applied to its entire length of 7.367 kilometers, or more than 9 thousand kilometers, if also considering the length of the coast inside bays and estuaries interiors. The Marine Geology and Geophysics Program - PGGM in association with the Brazilian Environmental Ministry in 2018, published a massive group of studies where it is possible to assess the huge diversity of classifications, typologies and coastal erosion problems faced in Brazilian states (MUEHE, 2018).

This study aim an integrated solution proposition for beaches inserted in a mega beach arch, between the bays of Babitonga and Paranaguá, on the coastal plains, as shown in Figure 31, beaches face erosion and, while at the edges of this coastal system, estuaries are been dredged.

At least 4 ports operate in these bays, whose dredging works are controlled by the Administration of the Ports of Paranaguá (APPA) and SC Participações e Parcerias S.A (SCPar) - SCPar Port of São Francisco do Sul.

On the coast of Paraná, there are some well-documented cases of episodes of high-energy waves and tides, locally called “ressacas”, in which beach erosion events and urban infrastructure damage have recently been reported. Among the principle ones, there are some beaches in Guaratuba, the famous cases of Brava and Flamingo beaches in Matinhos sector, and also some other beaches in Ilha do Mel, municipality of Paranaguá.

While in the extreme north sector of the Santa Catarina coast, the city of Itapoá, located downstream from Babitonga Bay, since the preferred coastal drift direction is north, in the studied region, also presents beaches with several episodes of erosion. Once the dredge works are just adjacent in south in the Babitonga inlet, rates of variation of coastline have also been well documented by Angulo et al 2006.

## 2 – METHODS

To analyze the variation of the last 40 years of the coastline on the studied beaches, in addition to the data already published by the LECOST-UFPR

laboratory. A satellite images survey provided by Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE (Brazilian Spatial Research Institute), as displayed at Table 5.

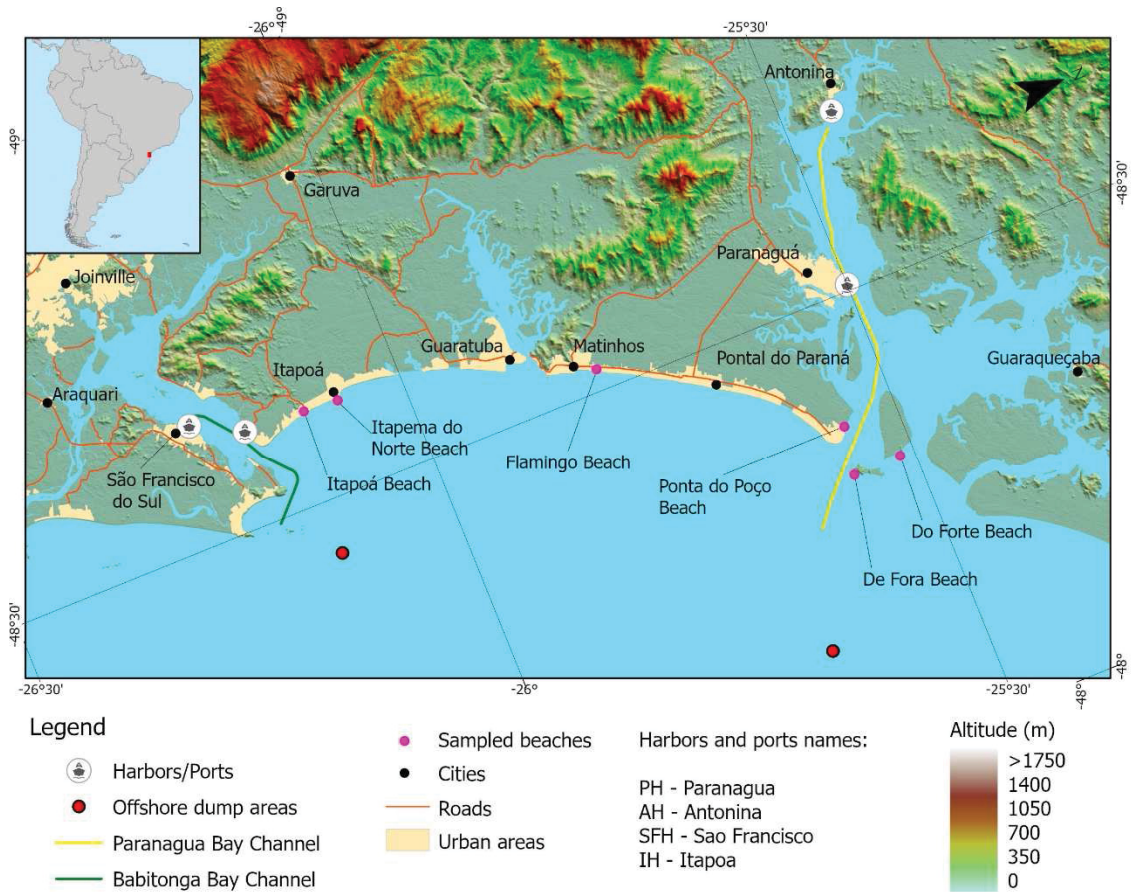


Figure 31 - Study area location with the 4 harbors operating in the bays.

For more detailed information, it was also used Google Earth Pro images for each year in the time series (1990, 2000, 2010 and 2020), as a way of tracing the shoreline indicators closer to reality. Finally, ESRI - ArcGIS software, especially the Digital Shoreline Analysis System (DSAS) extension of the Geological Survey of the United States (THIELER et al 2009).

Table 5 - Images used for shoreline analyses.

| YEAR | DATE       | SATELLITE     | RESOLUTION | SENSOR |
|------|------------|---------------|------------|--------|
| 2020 | 07/28/2020 | CBERS-4       | 10 m       | PAN10  |
| 2010 | 08/19/2010 | RESOURCESAT-2 | 23,5 m     | LISS3  |
| 2000 | 02/01/2000 | LANDSAT-7     | 30 m       | ETM+   |
| 1990 | 05/20/1990 | LANDSAT-5     | 30 m       | TM     |

All the images were georeferenced with 10 control points and residual error always  $< 0,5$  “Residual pixels”. The coastline indicator was defined as the vegetation limit or, when it was not present, it was used the rigid structures line.

Likewise, sections profiles performed on beaches on the northern coast of Santa Catarina and Paraná, also published by researchers from the LECOST-UFPR laboratory in Quadros 2002 and Silva 2018, were used for volumetric calculations with the help of the ESRI - ArcGIS software with the 3D Analyst and Gemcom Surpac extension.

Finally, to access the various reports and documents from the ports of São Francisco do Sul, Paranagua and Hamburg, technical visits and requisitions were made. In addition to those freely available in the holdings of the institutions responsible for dredging.

### 3 – RESULTS

Beaches are unconsolidated deposits of sand and gravel on the coast, which correspond to approximately 40% of the coastline in the world, equivalent to 200.000 km of land coastlines (BIRD 1996). These natural deposits can undergo changes caused by anthropic activity, from the suppression of the supply of sediments in their source areas on the continents, to the sudden and sudden change of a coastal engineering work.

On the other hand, techniques for the restoration and environmental recovery of beaches, dunes and even tidal flats, such as mangroves and marshes, have been known since the beginning of the 20th century. The artificial feeding of beaches (beach nourishment) popularly granted as a fattening beach, it can supply the loss of sediments from these deposits and are generally conducted to protect the coast (NORDSTROM 2008).

In contrast, at the inlets of bays and estuaries, tidal deltas constitute extensive sedimentary deposits, associated with micro and mid-tide environments or lagoons of the barrier islands system (HAYES 1975). It is in these deltas that a large part of the dredging operations take place and end up supplying sediment, most of the time free of pollutants, that could be used in eventual beach restoration works.

Recently, Fernández-Fernández et al 2018 studied an excellent analogue in Figueira da Foz - Portugal, the author's points out to the importance

and direct relationship of the choice of area of dredging/dumping with multiples scenarios for the region, and demonstrated the different responses of coastal hydrodynamics and respective sedimentation in adjacent areas.

In the studied areas, Simões et al 2017 and Simões et al 2021 has demonstrated the similarities of mineralogical and textural compositions between the sands, and as one, beaches and tidal deltas in the bays presents mainly fine to very fine quartz sands.

### ***Shoreline Evolution***

To assess possible drastic shoreline changes in the cases studied, 100 meters distant transects in the beaches were delimited, according to Figure 32, so that erosion and accretion rates could be identified. So, to understand the shoreline evolution for this study, it was considerably mainly the index Net Shoreline Movement – NSM, that basically reports the distance between the oldest and the youngest shorelines.

The main NSM shows that in the 141 transects created, the average NSM in Itapoá beaches is -25.74 meters, with the highest value of 26.75 meters o accretion in transect 12 and 139.61 meters of erosion in transect 56.

In Matinhos beaches in on the other hand, the average NSM is 8.79 meters, with the highest value of 113,96 meters o accretion in transect 6 and 39.64 meters of erosion in transect 39.

### ***Nourishment in Brava, Flamingo and other Paraná beaches***

Recently the Parana State Government - PSG (PARANA, 2021) has announced a work of beach nourishment in Matinhos city, including Brava, Flamingo and some other Paraná beaches, this project would cost 378 million Brazilian reais, including other hard and semi hard structures such as headlands, jetties and groins (Figure 33 A).

According to the PSG project, this engineering work would take the usage of 3 million cubic meters of sand from deposits on the internal shelf, even though there is no licensed area at the Brazilian National Mining Agency – ANM so far.

The PSG proposal project also promises the beach strip between 80 meters and 100 meters of sand. Currently, the area is in between 20 meters to

40 meters, it also does not consider any recover of dunes or proper environmental balance restoration.

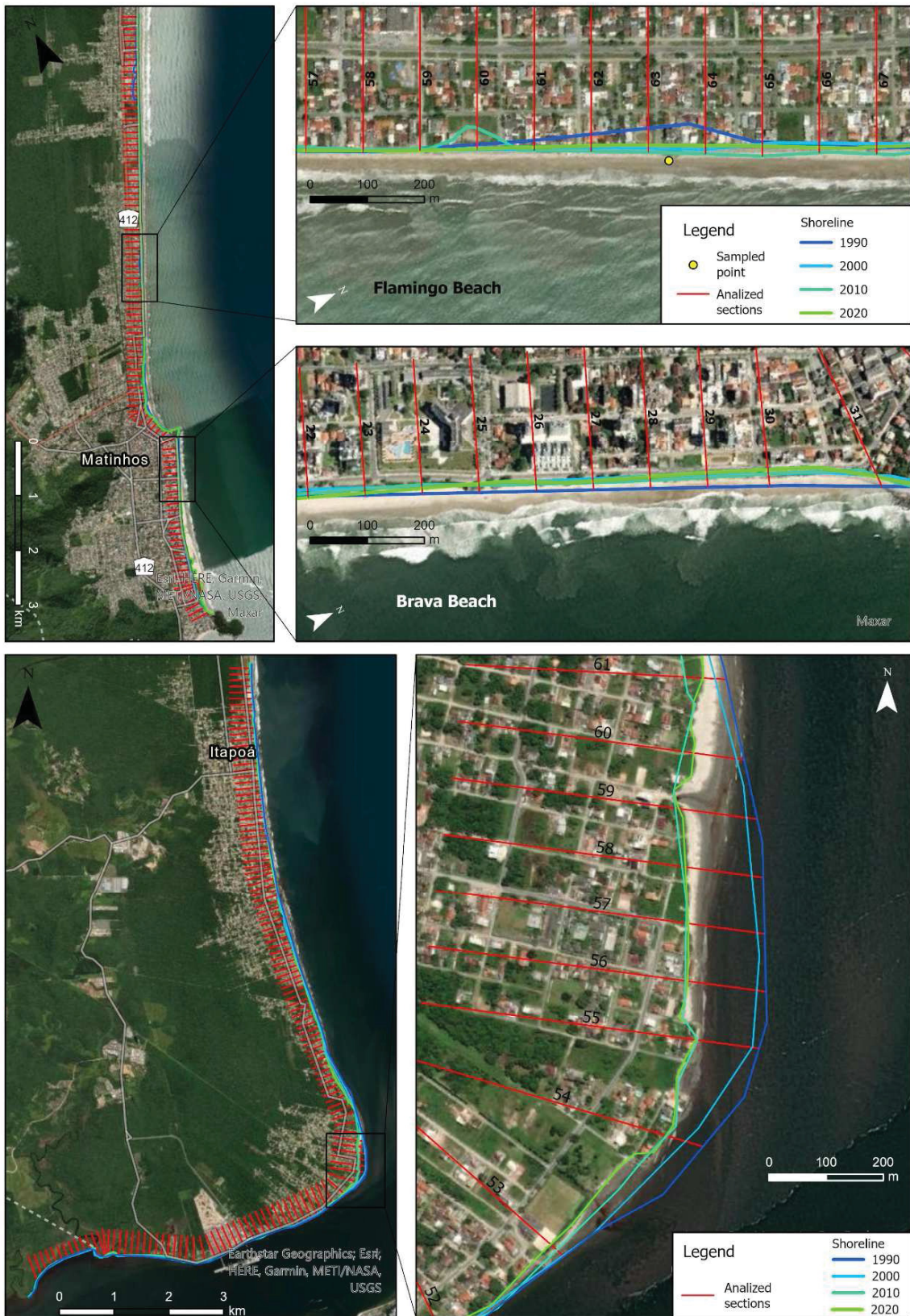


Figure 32 - Shoreline changes in 40 years DAS analyses. In detail Brava, Flamingo and Itapoá beaches.

In this study, appropriate modeling of the complete recovery and restoration of beaches and dunes, from Brava Beach until the Riviera Beach, demonstrated it would be need to consider at least  $7.55 \times 10^6$  m<sup>3</sup> of sand. That includes  $3 \times 10^6$  m<sup>3</sup> in the Brava sector plus  $4.55 \times 10^6$  m<sup>3</sup> from the Fish Markt/Riviera sector, it means that only this amount would be truly enough to nourish eroded beaches and restore dunes and the dynamic range.

This quantity of needed sand is just the exact dimension of dredge sediments in Galheta Channel, per decade, the average dredged in this channel is 14.87 million cubic meters of materials. Just in 2012 more than 9 million cubic meters of sediments have been dredged in Paranagua Bay (Table 6).

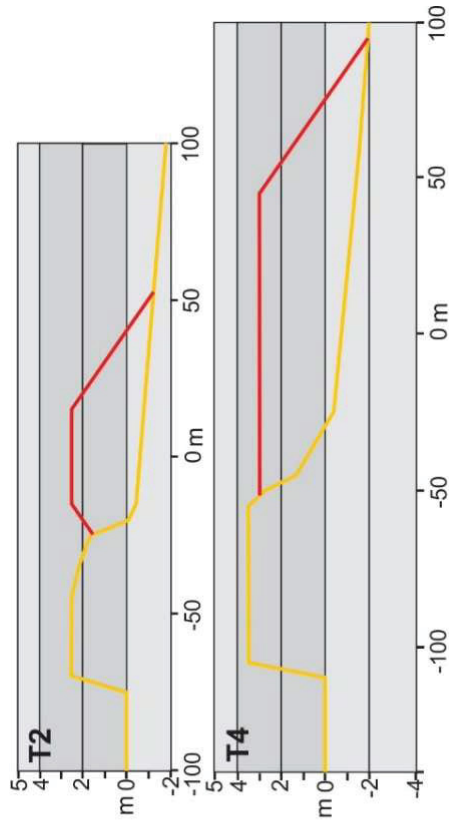
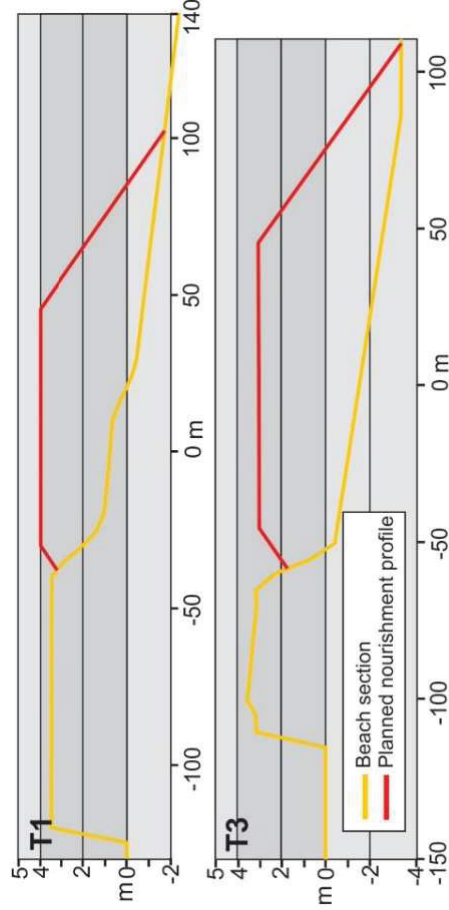
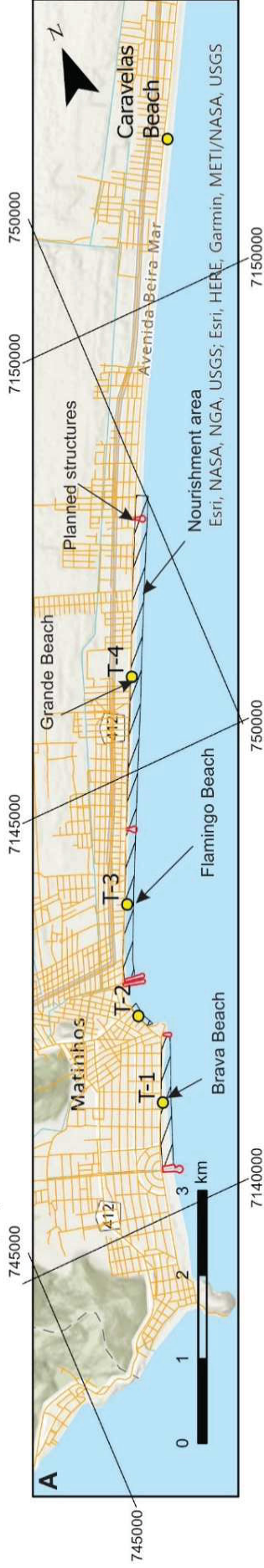
Differences found in the GSP project and the modeled in the present research is in Figure 3, that contains 4 sections obtainable in GSP project, their locations in T1-Brava, T2-Fish Market, T3-Flamingo and T4-Grande Beaches.

For last, in the same Figure 33 it is the ideal and balanced beach section studied by Quadros 2002 in Caravelas Beach and the it is epitome section used in the study for this prototypical nourishment model. This author investigated the morphological changes in a supposedly well balanced profile at Caravelas beach, about 9 km north of our case study in the same beach arch, these beach profiles were naturally altered by the passage of frontal storms. This beach studied by Quadros 2002 was taken as an analogue example of an ideal beach profile, due to the low anthropic influence of human occupation.

### ***Bypassing Itapoá and Itapema do Norte beaches***

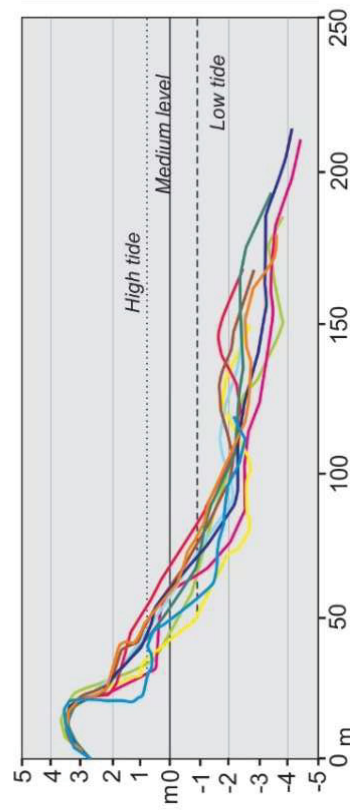
Angulo et al 2006 corresponds to the most significant work that evidences the direct relationship between dredging and the sediment balance flow on the coastal plain beaches under study. In conclusion, these authors, when comparing nautical charts from 1979 and 1994, estimated a reduction of  $7.7 \times 10^6$  m<sup>2</sup> in the volume of the northern part of the terminal lobe of the tidal delta of the Babitonga Bay. In addition, a sedimentary deficit of  $5.7 \times 10^6$  m<sup>2</sup> of sand on the beach of Itapoá has been calculated, this deficit has caused an average erosion rate of 2.3 meters per year, causing serious problems of coastal erosion in this sector of the northern Santa Catarina Coast.

PSG beach nourishment project



Morphological section differences in Caravelas Beach

(Source: Quadros 2002)



Morphological SURPAC modeled section of Brava Beach

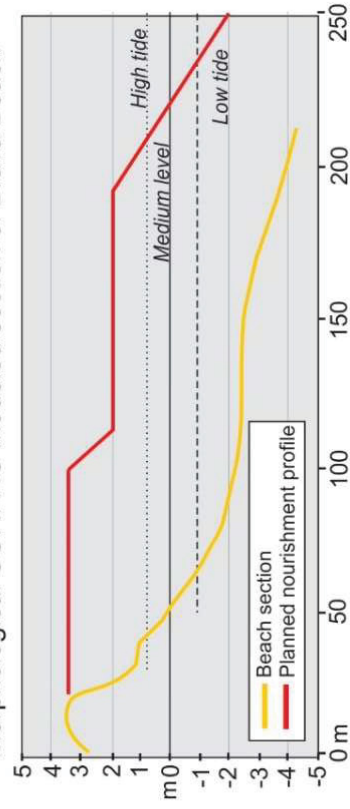


Figure 33 - GSP Morphological profile differences in Caravelas Beach (Adapted from PARANÀ 2021 and Quadros 2002).

There are no public nourishment projects in Itapoá to compare the proposal of straight pipeline bypassing of the dredge sand in the tidal deltas of Babitonga Bay. But this research assumes that a project like the one proposed in Figure 34 and Figure 35, would take at least  $1.7 \times 10^6$  m<sup>3</sup> to nourish the Itapoá Beach in 40 meters in advance, comparing to the actual shoreline. This calculate amount is compatible whit the  $2 \times 10^6$  project announced in the last dredging project (SCPAR 2020), and perfectly well-suited with the decadal amounts of sand dredge in this bay as showed for Simões et al 2021.

Also, Silveira et al 2012 evaluating the relationship between dredging in the navigation channel and the erosion of adjacent beaches, even proposes an alternative for transposing sediments bypassing the area or a new ebb-shoal dump area (Figure 36). Those authors even point out that the use of an outside dumping area offshore has removed more than 10 million m<sup>3</sup> of sediment from the coastal system since the 1980s.

Once the compatibility of materials between the dredged sediments and those present on the beaches of Itapoá and Itapema do Norte has been verified, the sedimentary bypassing alternatives, initially proposed by Silveira et al 2012, as shown in figure 6, will be defended in this article. Which has two alternatives possible ways, beach nourishment along Itapoá beaches, dumping the dredged sediment directly onto the beach, or disposal of dredged sand onto the northern lobe of the ebb-shoal between the isobaths of 7 m and 9 m.

### ***The high cost incertities***

In the study areas, decisions made by the dredging institutions still in accordance with a pattern of denial about the need for beneficial use of these dredged sandy sediments. Since the 90s and intensified in 2017, when the first studies on the topic were published in Simões et al 2017. The main claim is that the costs of the procedure of using these mineral resources in environmental recovery works would be very high, that there would be a financial infeasibility there. The purpose of this research chapter is to prove that this is not reliable, based on the already existing costs of these procedures compared to international practices.

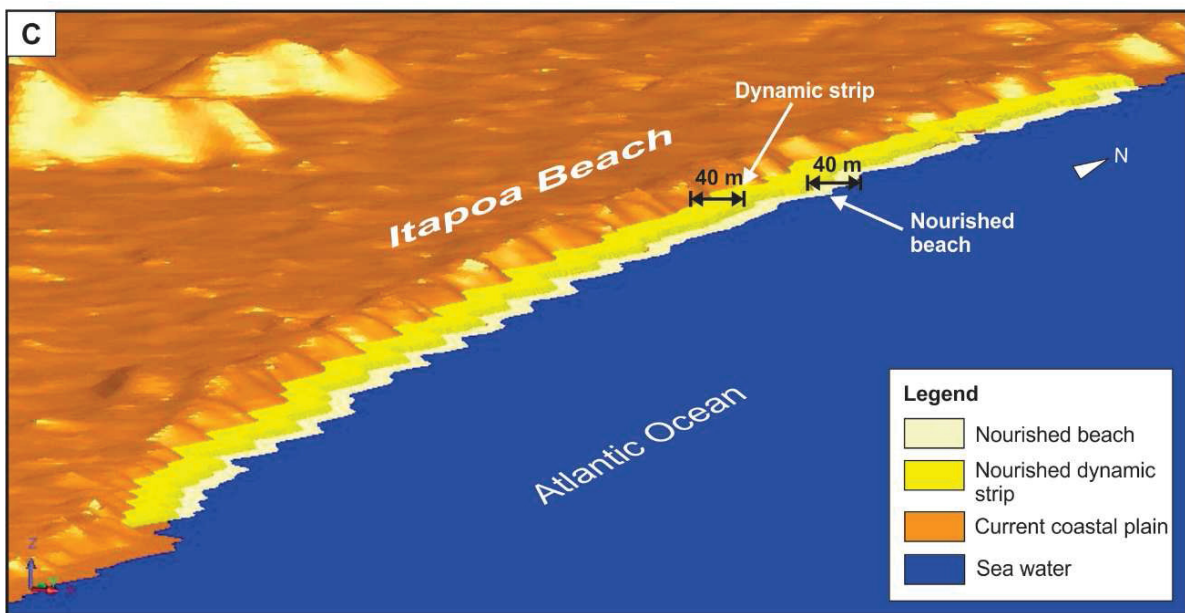
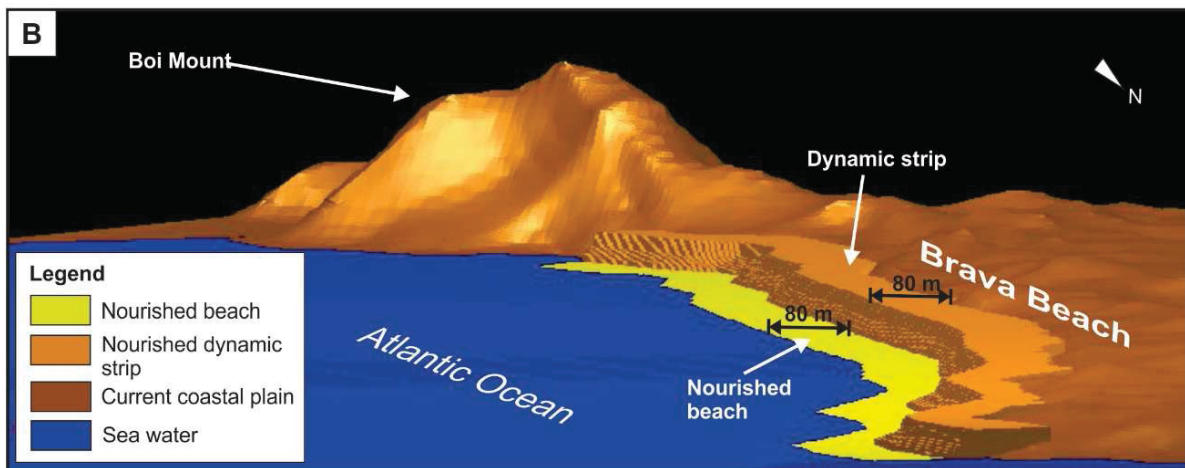
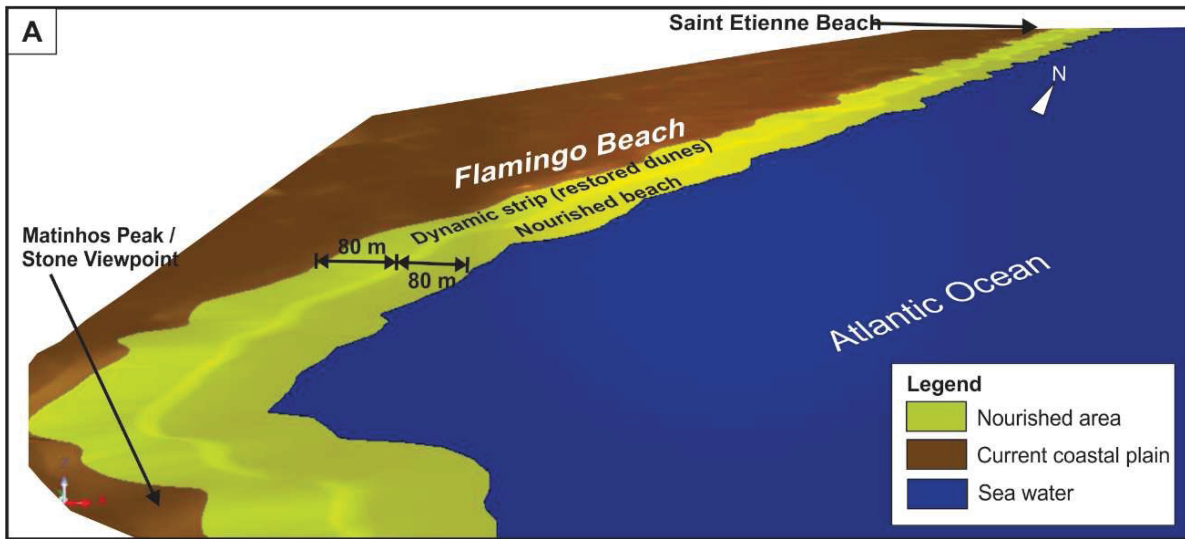


Figure 34 - Beach nourishment SURPAC models. A – Matinhos from Fish Market Beach until Saint Etienne Beach; B – Matinhos/Brava Beach/ C- Itapoá Beach. B and C 3X over raised scale.

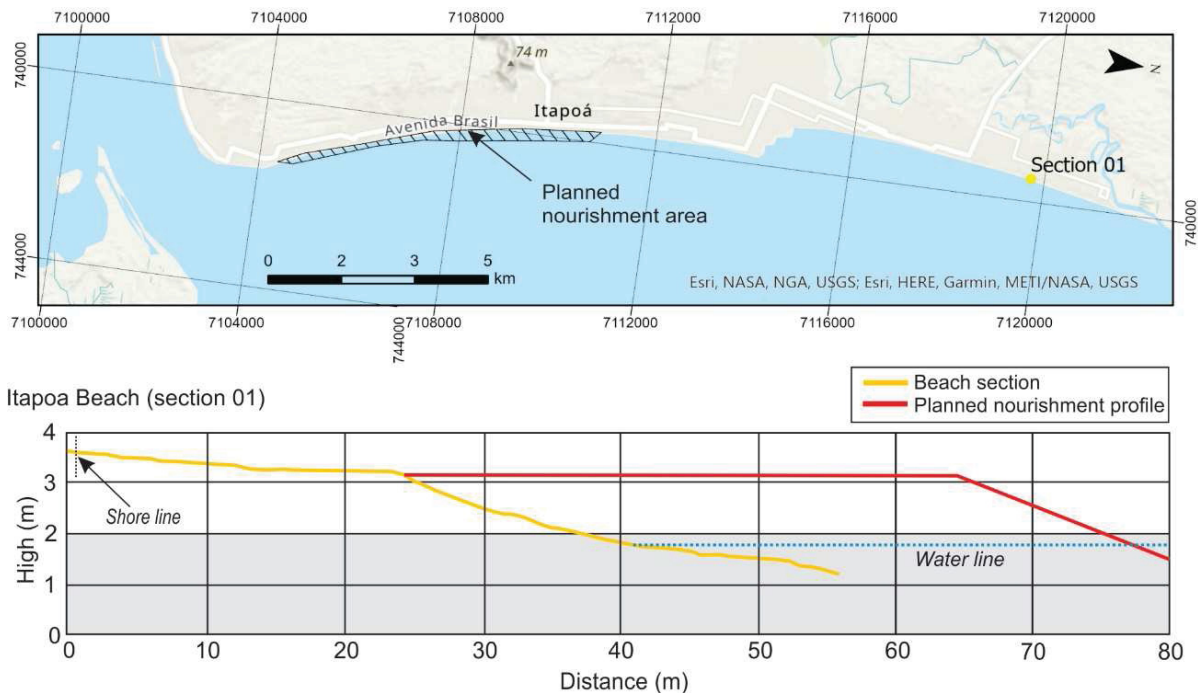


Figure 35 - Alternative nourishment area based in an ideal balanced beach section (Section 01 adpted from Silva 2018).

This irrational behavior of denying science to the detriment of what has already been spent on dredging investments was named “sunk cost effect” and studied in similar situations by Arkes and Blumer, 1985, it is described by these authors as a manifestation of a greater cognitive tendency. To continue a commitment, since a previous investment in money, effort or time would have been made. It would be this previous investment, which is motivating the present decision to continue, and it does so repeatedly, despite this fact objectively should not influence the decision. The psychological justification for this counterproductive behavior is based on the desire to make it appear that your initial effort has not been wasted.

Before delving into the issues presented on the coast of Parana and Santa Catarina, it is important to know the costs applied worldwide in dredging and sediment treatment in harbors. In the United States of America, for example, Frittelli 2019 listed a historic unit prices per cubic yard in US dollars from 1963 to 2018. Discounting inflationary variations and found that these amounts spent on dredging vary from an average level of 2 to 3 dollars in 60s and 70s, up to an average current level of almost 6 dollars in the past decade, from 2010 to 2018, this in yards, which corresponds to an average of almost 8 dollars per cubic meter.

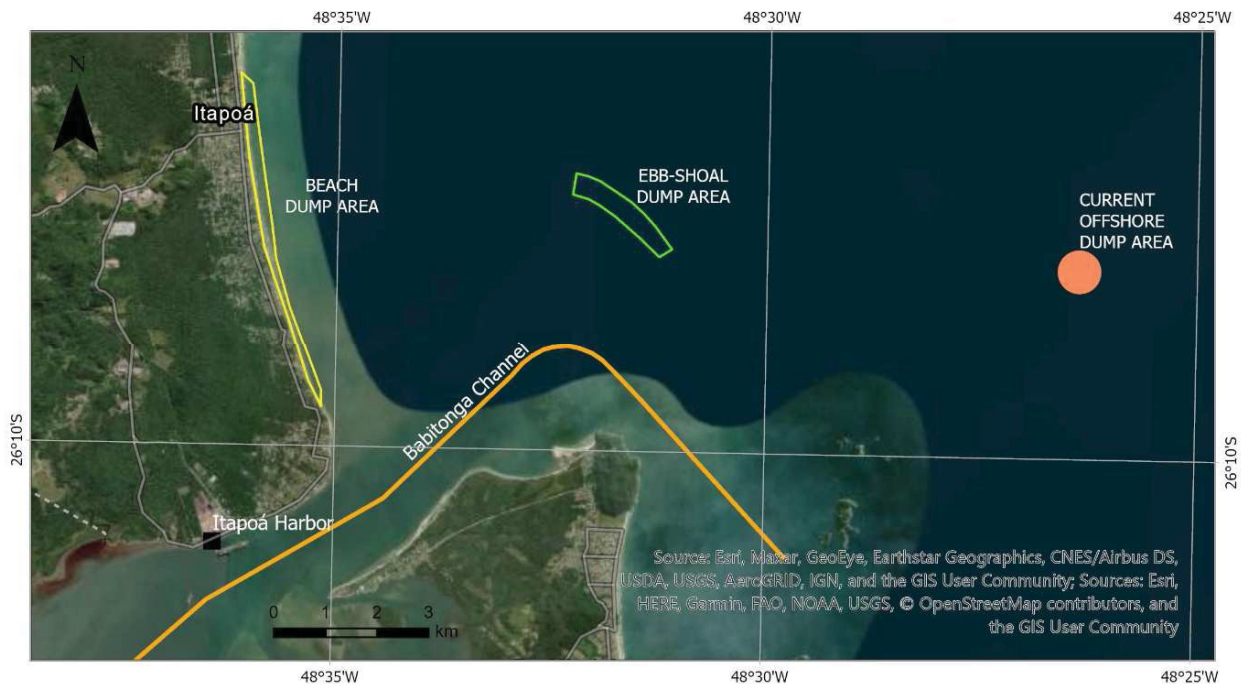


Figure 36 - Alternatives Dredging/Dumping Scenarios for Itapoá (Adapted from Silveira et al 2012).

Still in the USA, in a study for economic assessment of dredging operations in Mobile Bay, Islam and Park 2014 concluded that dredge works, with different kinds of equipment, in the studied case operations with both hopper dredger and pipeline, presented similar unit costs and no significant amount of investments.

In the Hamburg harbor, where part of the present studies was developed, one of the most respected sediment treatment programs in Europe and worldwide is found. Providing not only for dredging, but also for the treatment of contaminated sediments and the beneficial use of part of the volume of these materials, Figure 37 indicates the flowchart of the dredging and management cycle, presented by Hamburg Port Authority, 2018. In this situation, in Elbe River estuary, between 3 and 5 million cubic meters of sediment are dredged annually. At least 900.000 m<sup>3</sup> are sent to the treatment plant, called METHA, which for more than 20 years was the largest unit of sediment treatment in the world until 2011, when similar units opened in Antwerp and Fox River, Wisconsin.

In the METHA treatment plant, around 70 million euros were invested in construction in 1993, while between 11.3 and 17 million euros are still spent on operating costs, which diluted to an average of 4 million cubic meters dredged. This

management facility itself, alone, would correspond to a unit cost between 3.45 to 5.19 US dollars per cubic meter dredge material, with the quotation of 18 of May of 2021.

A good example of land-based disposal of treated sediments are the Francop and Feldhofe sites, which will become public parks on the outskirts of Hamburg. Apart from that, between 3 and 10% of treated sediments are sent for other purposes of use beneficial, as in the use of sands for the construction of dikes and clays for the manufacture of ceramic products.

In Simões et al 2017, the dredging costs were presented for the harbor of Paranagua in the years 2009, 2011, 2012, 2013 and 2015 and the conclusion reached is that the unit average is a value of R\$ 16.01 Brazilian reais per cubic meter dredged, which would correspond to \$ 7.89 US dollars on 12/30/2012. Full results in Table 6.

*Table 6 - Costs (in millions of US dollars) and volumes of dredged sediments (in millions of m3), in the CEP, between 2009 and 2015, conversions and monetary corrections referring to the last annual day and adapted by Simões et al 2017.*

| <b>Year</b>      | <b>2009</b> | <b>2011</b> | <b>2012</b> | <b>2013</b> | <b>2015</b> |
|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>Cost</b>      | 18,85       | 1,34        | 19,56       | 58,89       | 39,17       |
| <b>Volume</b>    | 4,007       | 0,108       | 3,633       | 9,102       | 6,625       |
| <b>Unit cost</b> | 4,7         | 12,4        | 5,4         | 6,47        | 5,91        |

Recently in 2020, the company “Van Oord Serviços de Marítima Ltda” won a public competition contract for dredging the order of 2 million cubic meters of sediments in the São Francisco do Sul channel, in Babitonga Bay, a total value of 32 millions of Brazilian reais agreement. That would corresponds to an average unit price of R\$ 16.00 or \$ 3.05 US dollars, with the quotation of May 18, 2021 (SCPAR 2020).

Although neither APPA nor SCPAr have ever carried out / contracted any technical study on the assessments of nourishment adjacent beaches using dredged sand, both institutions claim that a supposed increase in the operational cost of these actions would make it impossible to complete this feat. It is worth mentioning that the Brazilian Constitution (BRASIL 1988), in its § 4 of Art. 225, imposes clear obligations of sustainability and equilibrium in the use of its natural resources as transcribed:

*Federal Constitution*

*"Art. 225. Everyone has the right to an ecologically balanced environment, good for the common use of the people and essential to a healthy quality of life, imposing on the Public Power and the community the duty to defend and preserve it for present and future generations. ...*

*... § 4º The Brazilian Amazon Forest, the Atlantic Forest, the Serra do Mar, the Pantanal Mato-Grossense and **the Coastal Zone are national legacy**, and their use will be, according to the law, under conditions that ensure the preservation of the environment, including the use of natural resources. ”*

The Brazilian dredging technical legislation is even more specific and imposing, CONAMA Resolution N ° 454, of November 1<sup>th</sup>, 2012 (BRASIL 2012), deals with crucial difference unpolluted sediments of potentially contaminated materials, including typifying and strongly advising the beneficial use when possible, not to mention any cost constraints, with the following highlights:

*“CONSIDERING that a large part of the dredged material does not present significant pollution and that adequate measures are necessary to protect the environment, in proportion to the risks arising from dredging; ...*

*Art. 2 ...*

*... XVI - beneficial use of dredged material: use of dredged material, in whole or in part, as a material resource in production processes that result in environmental, economic or social benefits, therefore without generating environmental degradation, as an alternative to its mere disposal on the ground or in a body of water; ...*

*... Art. 15. The entrepreneur must consider, prior to the decision on the disposal, the possibility of beneficial use of the dredged material, according to its characterization and classification, as well as the environmental assessment and the analysis of the economic and operational viability of the disposal options, served the specific and pertinent regulations ... ”*

So the entrepreneur is clearly obliged in Brazil to prioritize the use of these sediments in works of environmental recovery and stabilization of the coastline, not the opposite, that is, APPA and SCPAr must, before discarding any sand of good quality, know effectively if none adjacent beach is in a negative balance and, consequently, in needs of these sediments.

To endorse the impossibility of disconnect dredging and beach nourishment, in the studied case of Paranagua Bay, dealing specifically with the relationship between dredging and impacts on the coast, Angulo et al 2020 demonstrated the anthropic impacts in this region. And Soares 2016 presented an interesting study of the influence of the geometry of the navigation channel on the silting rate of the Galheta Channel in the Paranagua Bay.

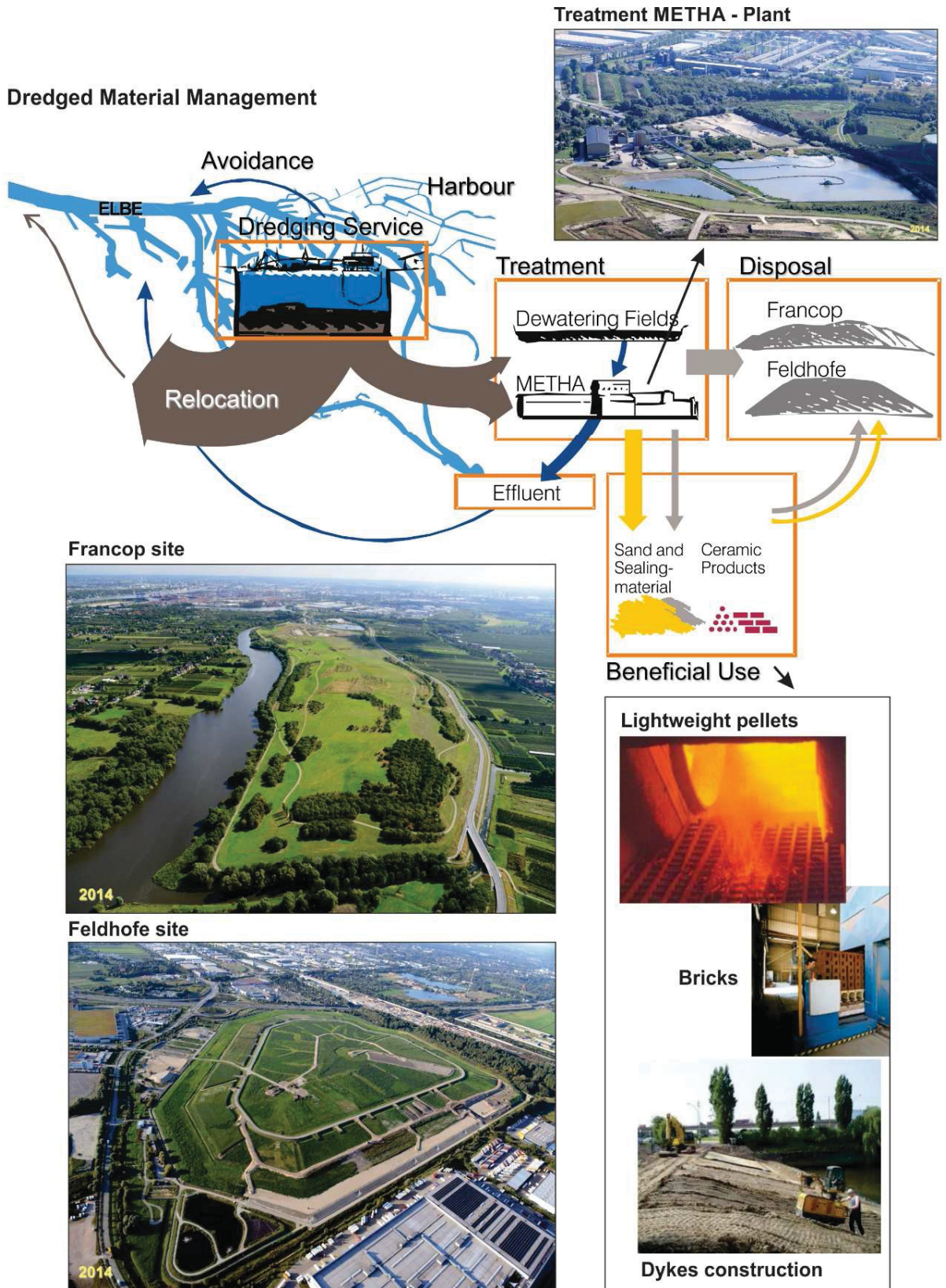


Figure 37 - Flowchart of the dredging and management cycle in Hamburg Harbor.

## 4 – DISCUSSION AND CONCLUSIONS

The first conclusion reached when analyzing the nourishment work proposals presented for the studied beaches, is that apparently the greatest concern of public entities is merely aesthetic, tourist and commercial. Many of the beaches or stretches of beaches where several interventions are being proposed have been stable for more than 20 years.

Then, in cases where the need for more sand is imminent, even when in areas adjacent to those dredged, with sediments available in compatible quantity and quality, the legal arrangement and mandatory need for using these sediments is ignored in Parana and Santa Catarina States.

Another factor pointed out as a justification for not using the uncontaminated sandy sediments, the cost increase, is completely untrue, there is no technical financial study that points in this sense. The amounts spent on dredging are compatible with international practices, and many harbors whose the need for sediment treatment is necessary, it would certainly increase costs, but it is not the situation for any of the studied cases.

Finally, it is concluded that it is mandatory for the responsible companies to promote the beneficial use of these sediments, and nothing justifies not using them in nourishment and recovery projects for beaches and dunes. Otherwise, it is literally the irrational need to pay the costs twice, once for dredging, and once again for the nourishing the beach with mineral resources from deposits on the platform.

## 5 – ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank the Administration of the Ports of Paranaguá and Antonina (APPA) and SC Participações e Parcerias S.A (SCPar) - SCPar Port of São Francisco do Sul, for their promptness and commitment in making the required data available, through processes n°. 14.21.496-5 and n°525/2018, respectively. Finally, they also thank the Araucária Foundation and Brazilian National Council for Scientific and Technological Development (CNPq) for their scholarships and incentives for research and science.

## 6 DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

Observando os resultados alcançados até aqui, nota-se que a pesquisa conduziu a alguns importantes tópicos de debate, como os de que as operações de dragagem são indispensáveis e que a disposição usual em área de despejo na plataforma pode ser substituída, mesmo que parcialmente, por usos benéficos. Isto se confirma ao analisar a diversidade de formas de aproveitamento existentes, com variadas indicações, contempladas, inclusive, na norma ambiental brasileira.

Os deltas de maré apresentam-se como unidades geológicas de alta energia de correntes e por este motivo tendem a concentrar menos sedimentos finos, e conseqüentemente com baixa capacidade de absorção de contaminantes. Portanto, os deltas podem ser compreendidos como guias nos levantamentos ambientais que visem o manejo de rejeitos de dragagem.

Neste sentido, é importante aprofundar pesquisas sobre os critérios atualmente utilizados na determinação de parâmetros e limites geoquímicos, na resolução de abordagens atualizadas em critérios quantitativos de poluentes e/ou contaminantes. Em razão de que na maior parte das abordagens, o ambiente geológico, mais especificamente o sistema deposicional, não é tomado como base nestes guias.

Os resultados alcançados na pesquisa reforçam a constatação de que a granulometria é o fator mais importante nos trabalhos científicos de toxicologia. A biodisponibilidade de contaminantes nos sedimentos é influenciada por uma grande variedade de fatores, como área de contato da superfície das partículas, tamanho, dureza, tipo de matéria orgânica, pH, Eh, entre outros. Contudo, é principalmente o tamanho do grão que influenciará a capacidade de adsorção dos poluentes. Dessa forma os sedimentos do fundo arenoso favorecem a disponibilidade dos poluentes na coluna d'água, em oposição aos sedimentos com granulação de silte e argila.

Ainda, o silte e a argila, devido sua menor granulometria e, com isso, grande área superficial em relação ao volume, têm maior capacidade de retenção dos poluentes. Isto significa que quanto maior a porcentagem de silte e argila no sedimento, maior o potencial de retenção de poluentes e quanto maior a porcentagem de areia maior será a solubilização de poluentes para a coluna de água. Com estes princípios, espera-se que no interior dos estuários e baías, com o predomínio da

decantação de sedimentos finos, a probabilidade de presença de poluentes nos sedimentos seja intensificada. Justamente estes são os resultados observados neste trabalho.

No viés geoquímico, tanto orgânico quanto inorgânico, conforme apresentado nos artigos, pontua-se que foram detectados metais pesados, nutrientes e contaminantes orgânicos, porém, de maneira geral os níveis de concentração estão abaixo do estabelecido pela Resolução CONAMA 454/12, que determina níveis onde se prevê baixa probabilidade de efeitos adversos à biota. Todos os testes toxicológicos realizados em amostras nos entornos dos deltas de maré apontaram resultados negativos, com sedimentos não tóxicos a algumas espécies animais.

O litoral dos estados de Santa Catarina e do Paraná apresenta problemas de ocupação de solos que confrontam a dinâmica natural costeira, incluindo áreas de erosão costeira, que devem ser amenizados com a alimentação artificial de praias a partir de areias dragadas nos canais.

Os resultados de granulometria, geoquímica inorgânica e orgânica e dos testes toxicológicos indicam características apropriadas para possibilidades de utilizações diversas dos materiais dragados. As finalidades de controle erosivo costeiro ou recomposição ambiental de praias e dunas, seja por meio de engorda (*nourishment*) ou transposição (*bypassing*), devem ser priorizadas.

Por fim, conclui-se pela mandatoriedade do uso benéfico das areias dragadas em deltas de marés nas baías de Paranaguá e Babitonga, seja como forma de reparo ambiental e socioeconômico, ou, seja em resposta ao manejo racional exigido no uso dos recursos costeiros/minerais da Zona Costeira preconizado constitucionalmente no Brasil.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANGELI J.L.F., KIM B.S.M., PALADINO I.M., NAGAI R.H., MARTINS C.C., MAHIQUES M.M., FIGUEIRA R.C.L. 2020. Statistical assessment of background levels for metal contamination from a subtropical estuarine system in the SW Atlantic (Paranaguá Estuarine System, Brazil). *Journal of Sedimentary Environments* 5:137–150. <https://doi.org/10.1007/s43217-020-00008-5>

ANGULO R.J. 1992. Geologia da planície costeira do Estado do Paraná. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 334 p.

ANGULO R.J., 1993. Variações na configuração da linha de costa no Paraná nas últimas quatro décadas. *Boletim Paranaense de Geociências*, Curitiba, PR, Brazil 41:52-72.

ANGULO, R. J. 1999. Morphological characterization of the tidal deltas on the coast of the State of Paraná. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*. 71(4-II):935-959.

ANGULO R.J. 2004. Mapa do Cenozóico do litoral do Estado do Paraná. *Boletim Paranaense de Geociências*, 55:25-42.

ANGULO R.J., SOUZA M.C., LAMOUR M.R. 2006. Coastal erosion problems induced by dredging activities in the navigation channel of Paranaguá and São Francisco do Sul harbor, southern Brazil. *Journal of Coastal Research*. (Proceedings of the 8th International Coastal Symposium). v. 39. 1801 - 1803.

ANGULO R.J., LESSA G.C., SOUZA M.C. 2009. The Holocene barrier systems of Paranaguá and northern Santa Catarina coasts, Southern Brazil. In: DILLENBURG, S.R.; HESP, P.A. (orgs.). *Geology and Geomorphology of Holocene Coastal Barriers of Brazil*, Springer-Verlag, Berlin, p. 135-176.

ANGULO R.J., BORZONE C.A., NOERNBERG M.A., QUADROS,C.J.L., SOUZA M.C., ROSA L.C. 2016. The State of Paraná Beaches. In: ANDREW, D.S., KLEIN, A.H.F. (Ed. 1). *Brazilian beach Systems*. Switzerland. Springer International Publishing AG, p. 419-464.

ANGULO R.J., SOUZA M.C., MÜLLER M.E.J., NOERNBERG M.A., SOARES C.R., BORZONE C.A., MARONE E., QUADROS C.J.L. 2018. Erosão e acreção no litoral paranaense. In: Muehe D. (org.). *Erosão e progradação do litoral brasileiro*. 2ª edição revisada e atualizada. Editora MMA, Brasília, 01-66.

ANGULO R.J., SOUZA M.C., NOERNBERG M.A., 2020. Anthropic impacts on the morphological and sedimentary processes in the coast of State of Paraná, in Southern Brazil: past and future perspectives. *Journal of Integrated Coastal Zone Management / Revista de Gestão Costeira Integrada* 20(1):5-25 (2020). DOI:10.5894/rgci-n197

APPA Administração dos Portos de Paranaguá e Antonina. 2015. Manutenção do Canal de Acesso, Bacia de Evolução e Berços do Cais Comercial do Porto de

Paranaguá (Área Alfa, Bravo e Charlie) e Canal de Acesso ao Porto de Antonina (Áreas Delta). Relatório Técnico Final. Volume I. Paranaguá-PR.

APSFS Administração do Porto de São Francisco do Sul. 2017. PLANO BÁSICO AMBIENTAL - PBA. Relatório Consolidado 2017/1. Processo IBAMA Nº 02001.005796/2004-44. São Francisco do Sul-SC

ARKES H. R., BLUMER C. 1985. The Psychology of Sunk Cost. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*. DOI: 10.1016/0749-5978(85)90049-4

BIGARELLA J.J., BECKER R.D., DE MATOS D.J., WERNER A. (Eds.) 1978. A Serra do Mar e a porção oriental do Estado do Paraná: um problema de segurança ambiental e nacional. Governo do Paraná, SEPL/ADEA, Curitiba, 249 pp.

BIRD E.C.F. 1996. Beach management. Chichester, Reino Unido. John Wiley & Sons.

BLOTT S.J., PYE K. 2001. GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms* 26, 1237-1248.

BRASIL. 1988. Constituição da República Federativa do Brasil: promulgada em 5 de outubro de 1988. Acessada em 22 de maio de 2021 em [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/constituicao/constituicao.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm).

BRASIL. RESOLUÇÃO CONAMA Nº 454, de 01 de novembro de 2012. "Estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento do material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional." *Diário Oficial da União, Brasília, DF*, n. 216, 08 nov. 2012. Seção 1, p. 66.

BURTON G.A.Jr. 2002. Sediment quality criteria in use around the world. *Limnology*. DOI:10.1007/s102010200008

CAMARGO R., HARARI J. 2003. Modeling the Paranagua Estuarine Complex, Brazil: tidal circulation and cotidal charts. *Revista Brasileira de Oceanografia*. v. 51(único). 23-31.

CAMARGO M.G. 2006. SysGran: um sistema de código aberto para análises granulométricas do sedimento. *Revista Brasileira de Geociências*, 36(2): 371-378.

CARVER R.E. 1971. Settling analysis. In: *Procedures in sedimentary petrology*. Wiley-Interscience. New York. p. 427-452.

EC. 2002. Environmental Canada. Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life. *Canadian Environmental Quality Guidelines - Summary Tables*. 2018 October 1th. [https://www.ccme.ca/en/resources/canadian\\_environmental\\_quality\\_guidelines/](https://www.ccme.ca/en/resources/canadian_environmental_quality_guidelines/) Acessado em 01 de setembro em.

EPA. 1992. Environmental Protection Agency. Guidelines for exposure assessment. Washington DC. EPA/600/Z-92/00. Disponível em: [https://oaspub.epa.gov/eims/eimscomm.getfile?p\\_download\\_id=429103](https://oaspub.epa.gov/eims/eimscomm.getfile?p_download_id=429103). Acessado em 15 de maio do 2017

EPA. 1996. Environmental Protection Agency. Test Solid Waste. Revision 02. december 1996. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-06/documents/epa-3050b.pdf>. Acessado em 01 de setembro em.

EPA. 1998. Environmental Protection Agency. Test Solid Waste. Revision 02. January 1998. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-07/documents/epa-7471b.pdf>. Acessado em 01 de setembro em.

FDEP. 1994. Approach to the Assessment of Sediment Quality in Florida Coastal Waters. Vol. I. Development and Evaluation of Sediment Quality Assessment Guidelines. Prepared for Florida Department of Environmental Protection - FDEP, Office of Water Policy, Tallahassee, FL, by MacDonald Environmental Sciences Ltd., Ladysmith, British Columbia, USA.

FERNÁNDEZ-FERNÁNDEZ S., SILVA P.A., FERREIRA C., RIBEIRO A.S., ABREU T., ROMÃO S., BAPTISTA P., FONTÁN-BOUZAS A., DIAS J.M, COELHO C., BERNARDES C. 2018. Assessment of Dredging/Dumping Scenarios for Figueira da Foz Coastal Region (W Portugal). Journal of Coastal Research. DOI: <https://doi.org/10.2112/SI85-254.1>

FIGUEIREDO J.C. 1954. Contribuição à geografia da Ilha do Mel (Litoral do Estado do Paraná). Tese de Cátedra em Geografia do Brasil, Faculdade de Filosofia da Universidade do Paraná, Curitiba, 61 p.

FOLK R.L., WARD, W.C. 1957. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. Journal of Sedimentary Petrology, 27, 3-26.

FREITAS T. G. 2019. Sedimentologia das praias arenosas no litoral norte de Santa Catarina e sul do Paraná. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Paraná. 81p.

FRITTELLI J. 2019. Harbor Dredging: Issues and Historical Funding. Congressional Research Service. IN11133. Accessed in May 22, 2021 [www.crs.gov](http://www.crs.gov)

GOES FILHO H. A. 2004. Dragagem e gestão dos sedimentos. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 174p

GUEDES C.C.F, NASCIMENTO M.G., ANGULO R.J., SOUZA M.C., 2020. Geological evidences as a guide to OSL dating interpretation and northern occurrence of MIS 7e barrier at Southern Brazil. Journal of South American Earth Sciences. 98, 102478. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102478>

HAYES, M.O. 1975. Morphology of sand accumulations in estuaries. In: CRONIN, L.E. Estuarine research, geology and engineering. New York : Acad. Press, v. 2, p. 3-22.

HPA. 2011. Assessment Criteria for Dredged Material with special focus on the North Sea Region. – Hamburg Port Authority. Hamburg. Germany.

ISLAM S., PARKS J. 2013. Economic assessment of dredging operations in Mobile Bay, USA and some additional notes on sustainable management of dredged material. Journal of Coastal Conservation. DOI 10.1007/s11852-013-0301-0

KLEIN A.H.F., SHORT A.D., BONETTI J. 2016. Santa Catarina Beaches Systems. In: ANDREW, D.S., KLEIN, A.H.F. (Ed. 1). Brazilian beach Systems. Switzerland. Springer International Publishing AG, p. 465-506.

KOMAR, P. D., 1998. Beach processes and sedimentation. Second edition. Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 544 p.

KVASNICKA J., BURTON G.A. Jr., SEMRAU J., JOLLIET O. 2020. Dredging contaminated sediments: is it worth the risks? Environmental Toxicology and Chemistry. DOI <https://doi.org/10.1002/etc.4679>

LONG E.R., MACDONALD D.D., SMITH S.L., CALDER F.D. 1995. Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments. Environmental Management. DOI10.1007/BF02472006

LUIJENDIJK A., HAGENAARS G., RANASINGHE R., BAART F., DONCHYTS G., AARNINKHOF S. 2018. The state of the World's beaches. Sci. Rep. DOI:10.1038/s41598-018-24630-6

MACHADO S.C., RIBEIRO, J.A. 2012. Dragagem e conflitos ambientais em portos clássicos e modernos: uma revisão. Sociedade e Natureza. n. 3, 519- 534.

MANTOVANELLI A. 1999. A Caracterização da dinâmica hídrica e do material particulado em suspensão na Baía de Paranaguá e em sua bacia de drenagem. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Curitiba, 152p

MARONE E., JAMIYANAA D. 1997. Tidal characteristics and a variable boundary numerical model for the M2 tide for the estuarine complex of the Bay of Paranaguá, PR, Brazil. Nerítica, 11(1-2):95-107.

MONTEIRO M. T. 2008. Fitorremediação de rejeito contaminado proveniente do Canal do Fundão, na Baía de Guanabara-RJ. Tese de Doutorado. COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 317p.

MORGENSTERN A. 2017. Porto de Paranaguá. Contribuição à História: Período de 1948-1935. Coração do Brasil Editora. Volume I. Curitiba, Paraná. 3.442Kb. ePub.

MUEHE D. 2018. Erosão e progradação do litoral brasileiro. 2ª edição revisada e atualizada. Editora MMA, Brasília.

NEMES D.D. 2011. Caracterização das ondas de superfície na plataforma interna do estado do Paraná. Dissertação de Mestrado, Centro de Estudos do Mar, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 134 p.

NOERNBERG M.A., MARONE E., ANGULO R.J. 2007. Coastal currents and sediment transport in Paranaguá estuary complex navigation channel. Boletim Paranaense de Geociências, 60–61:45–54.

NORDSTROM, K.F., 2008. Beach and Dune Restoration. Cambridge, England: Cambridge University Press, 187 p.

OLIVEIRA L.H.S. 2015. Morfologia e sedimentologia da plataforma continental interna paranaense. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-graduação em Geologia, Curitiba, 86p.

PARANA. 2021. Minutas edital e projeto executivo Recuperação da Orla de Matinhos. Disponível em 22/05/2021: <http://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Recuperacao-da-Orla-de-Matinhos>

QUADROS C. J. L. 2002. Variações morfológicas e volumétricas associadas à incidência de sistemas frontais em duas parias arenosas do litoral paranaense. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 57 f.

RODRIGUES A. M. T., ZIMMERMANN C. E., BRANCO E. J., RIBEIRO G. C., BRANCO J. O., KUROSHIMA K. N., CLEZAR L., BRUTTO L. F., PEREIRA M. T., CREMER M. J., SOUZA FILHO M. A. C., SILVA M. H., TOGNELLA M. M. P., ALVES S., BELLOTO V. R., 1998. Proteção e controle de ecossistemas costeiros: manguezal da Baía de Babitonga. Brasília, Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis.

SCPar - SC Participações e Parcerias S.A. 2020. EDITAL DE PREGÃO PRESENCIAL Nº 0028/2020. Accessed in May 22, 2021 [https://portosaofrancisco.com.br/licitacoes/show\\_file/MTAxLnBkZg](https://portosaofrancisco.com.br/licitacoes/show_file/MTAxLnBkZg).

SHEPARD F. P. 1954. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios. Journal of Sedimentary Petrology, 24(3): 151-158.

SILVA G.G. 2018. Análise da morfodinâmica costeira e do transporte sedimentar no município de Itapoá-SC. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Geologia. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 52 p.

SIMÕES J.A.N., SOUZA M.C., TRZASKOS B., ANGULO R.J., BESSER M.L. 2017. Possibilidade de aproveitamento dos sedimentos de dragagem do porto de Paranaguá. Quaternary and Environmental Geosciences. DOI:10.5380/abequa.v8i2.54333

SIMÕES J.A.N., SOUZA M.C., ANGULO R.J., OLIVEIRA L. H. S., REIZE, F. J., BESSER M.L. 2021. Quality and Disposal of Dredged Sediments from Tidal Deltas in Subtropical Bays in Southern Brazil. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. DOI: doi.org/10.1007/s00128-021-03206-7.

SILVEIRA L., BENEDET L., SIGNORIN M., BONANATA R. 2012. Evaluation of the relationships between navigation channel dredging and erosion of adjacent beaches in southern Brazil. *Coastal Engineering Proceedings*. DOI: 10.9753/icce.v33.sediment.106

SOARES P. H. 2016. Influência da geometria do canal de navegação sobre a taxa de assoreamento do Canal da Galheta - Porto de Paranaguá (PR). Dissertação de Mestrado. Programa de Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 98 p.

SOUZA M.C. 1999. Mapeamento da planície costeira e morfologia e dinâmica das praias do Município de Itapoá, Estado de Santa Catarina: subsídios à ocupação. 169 f. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Geologia Ambiental, Departamento de Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 204p.

SOUZA M.C., ANGULO R.J., ASSINE M.L. DISARÓ S.T., PESSENDA L.C.R, ARAÚJO A.D., ODRESKI L.L.R, VEIGA F.A., SOUSA S.H.M. 2003. Evolução da barreira holocênica no litoral do Estado do Paraná, Sul do Brasil. In: IX Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário/II Congresso do Quaternário de Países de Línguas Ibéricas/II Congresso sobre Planejamento e Gestão da Zona Costeira dos Países de Expressão Portuguesa. Recife, 2003. Publicação em CD Rom. São Paulo, Associação Brasileira de Estudos do Quaternário.

THIELER E.R., HIMMELSTOSS E.A., ZICHICHI, J.L., ERGUL, A. 2009. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0 : An ArcGIS extension for calculating shoreline change. U.S.Geological Survey Open file Report 2008 1278, 79p.

TOMAZELLI L.J., VILLWOCK J.A., DILLENBURG S.R., BACHI F.A., DEHNHARDT B.A. 1996. A erosão costeira no Rio Grande do Sul. *Brazilian Geology Congress*. Salvador, Bahia, Brazil, pp 435-438.

WALKLEY, A. & BLACK, I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.*, 37:29-38, 1934.

## ANEXOS

### RESULTADOS GERIAS GRANULOMETRIA E GEOQUÍMICA INORGÂNICA

| AMOST | GR-% | AR-%  | ST-%  | AG-% | As*  | Cd* | Pb*  | Cu*       | Cr*  | Hg* | Ni*  | Zn*  |
|-------|------|-------|-------|------|------|-----|------|-----------|------|-----|------|------|
| JP-01 | 0    | 97,42 | 2,3   | 0,2  | 0    | 0   | 0    | 0         | 0    | 0   | 0    | 0    |
| JP-02 | 0    | 91,04 | 8,56  | 0,3  | 0,96 | 0   | 6,6  | 1,78      | 2,84 | 0   | 1,15 | 4,66 |
| JP-03 | 0    | 92,5  | 6,1   | 1    | 1,3  | 0   | 1,8  | 0,55      | 2,06 | 0   | 0,89 | 4,95 |
| JP-04 | 0    | 98,3  | 1,6   | 0,1  | 0,13 | 0   | 0,47 | 0,12<br>7 | 0,56 | 0   | 0,2  | 0,68 |
| JP-05 | 0    | 95,3  | 4,1   | 0,6  | 0,64 | 0   | 1,22 | 0,48      | 1,8  | 0   | 0,66 | 2,36 |
| JB-03 | 0    | 99,7  | 0,2   | 0,1  | 0    | 0   | 0    | 0         | 0    | 0   | 0    | 0    |
| JB-04 | 1    | 90,88 | 7     | 2    | 0    | 0   | 0    | 0         | 0    | 0   | 0    | 0    |
| PA1   | 0    | 61,31 | 36,98 | 1,05 | 0    | 0   | 5,3  | 7,8       | 2,9  | 0   | 1,1  | 14,4 |
| PA2   | 0    | 96,56 | 2,25  | 0,76 | 0    | 0   | 4,2  | 11,4      | 10,2 | 0   | 4,1  | 25,1 |
| PA3   | 0    | 81,32 | 14,68 | 0,33 | 0    | 0   | 4    | 10,3      | 6,4  | 0   | 2,4  | 19,5 |
| PA4   | 0    | 28,61 | 53,78 | 14,5 | 0    | 0   | 6,2  | 12,3      | 13,7 | 0   | 5,4  | 34   |
| PA5   | 0    | 82,22 | 13,94 | 0,34 | 0    | 0   | 9,4  | 8,2       | 2,7  | 0   | 1    | 17,5 |
| PA6   | 0    | 96,95 | 1,26  | 0,49 | 0    | 0   | 2,2  | 8,7       | 1,7  | 0   | 0,8  | 10,3 |
| PA7   | 0    | 96,46 | 2,21  | 0,2  | 0    | 0   | 1,7  | 8,4       | 2,3  | 0   | 1    | 11,9 |
| PA8   | 0    | 94,08 | 4,09  | 0,11 | 0    | 0   | 1,1  | 9,3       | 1,2  | 0   | 0,6  | 9    |
| PA9   | 0    | 91,26 | 8,03  | 0,44 | 0    | 0   | 0,8  | 9,3       | 1    | 0   | 1,3  | 7,5  |
| PA10  | 0    | 82,68 | 13,04 | 0,85 | 0    | 0   | 1,2  | 8,2       | 1    | 0   | 0,6  | 6,9  |
| PA11  | 0    | 88,19 | 10,18 | 0,76 | 0    | 0   | 2,3  | 9,1       | 4,6  | 0   | 1,8  | 15,2 |
| PA12  | 0    | 94,09 | 3,91  | 0,15 | 0    | 0   | 1,2  | 9,9       | 2,5  | 0   | 1,2  | 12,1 |
| PA13  | 0    | 26,79 | 70,75 | 0,97 | 0    | 0   | 6,7  | 13,9      | 23,6 | 0   | 9,7  | 47,9 |
| PA14  | 0    | 96,19 | 2,68  | 0,08 | 0    | 0   | 78,3 | 8,4       | 6,9  | 0   | 1,1  | 15,7 |
| PA15  | 0    | 94,15 | 4,68  | 0,31 | 0    | 0   | 1,7  | 8,1       | 3,4  | 0   | 1,3  | 11,9 |
| PA16  | 0    | 90,02 | 4,99  | 0,63 | 0    | 0   | 3,8  | 9,1       | 1,1  | 0   | 0,7  | 13,4 |
| PA17  | 0    | 94,84 | 1,83  | 1,55 | 0    | 0   | 3,7  | 8,2       | 2,8  | 0   | 1,1  | 11,2 |
| PA18  | 0    | 93,75 | 4,98  | 0,37 | 0    | 0   | 1,3  | 8         | 2,4  | 0   | 0,8  | 9,9  |
| PA19  | 0    | 94,27 | 3,37  | 0,04 | 0    | 0   | 3,1  | 7,8       | 2    | 0   | 0,8  | 9,7  |
| PA20  | 0    | 94,88 | 2,93  | 0,86 | 0    | 0   | 2,3  | 8,7       | 2,6  | 0   | 1    | 11,2 |
| PA21  | 0    | 90,68 | 4,35  | 0,77 | 0    | 0   | 1,5  | 8         | 1,4  | 0   | 0,6  | 8,5  |
| PA22  | 0    | 93,05 | 3,31  | 0,56 | 0    | 0   | 1,5  | 9,5       | 1,9  | 0   | 0,8  | 13,9 |

|      |       |            |       |       |           |           |           |           |           |           |           |           |
|------|-------|------------|-------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| PA23 | 0     | 94,95      | 3,39  | 0     | 0         | 0         | 3,3       | 9,4       | 1,5       | 0         | 0,9       | 11,8      |
| PA24 | 0     | 59,39      | 38,9  | 1,37  | 0         | 0         | 4,1       | 10,2      | 3,1       | 0         | 1,4       | 21,5      |
| PA25 | 0,03  | 88,99      | 8,39  | 0,09  | 0         | 0         | 2,4       | 8,5       | 1,3       | 0         | 0,7       | 13,5      |
| PA26 | 0     | 99,64      | 0,39  | 0,48  | 0         | 0         | 1,1       | 0         | 1,5       | 0         | 0,5       | 4,9       |
| PA27 | 0     | 99,18      | 0,14  | 0,59  | 0         | 0         | 1,3       | 0,5       | 3,4       | 0         | 1,1       | 11,5      |
| PA28 | 0     | 99,16      | 0,38  | 0,37  | 0         | 0         | 0,9       | 0         | 1,9       | 0         | 0,6       | 6,9       |
| PA29 | 0     | 95,69      | 0,66  | 0,29  | 0         | 0         | 0         | 0         | 2,1       | 0         | 0,7       | 15,4      |
| PA30 | 0     | 99,91      | 0,07  | 0,47  | 1,2       | 0         | 1         | 0         | 1,7       | 0         | 0,5       | 10,8      |
| PA31 | 0     | 93,64      | 0,48  | 1,68  | 0         | 0         | 1,2       | 0,8       | 4,3       | 0         | 1,5       | 21,5      |
| PA32 | 0     | 100,1<br>1 | 0,35  | 0,19  | 0         | 0,1       | 7,6       | 0         | 1,6       | 0         | 0,5       | 10,4      |
| PB01 | 0,26  | 89,13      | 7,22  | 2,88  | 0         | 0         | 0         | 0         | 1,5       | 0         | 0,4       | 1,5       |
| PB02 | 0,1   | 97,69      | 1,12  | 0,37  | 0         | 0         | 0         | 0         | 1,8       | 0         | 0,5       | 0,5       |
| PB03 | 0,02  | 81,32      | 2,79  | 0,35  | 0         | 0         | 0         | 0         | 2,3       | 0         | 0,5       | 0,5       |
| PB36 | 0     | 97,91      | 1,59  | 2,76  | 0         | 0         | 1,9       | 0         | 0         | 0         | 0,3       | 9,7       |
| PB37 | 0     | 91,19      | 1,96  | 5,34  | 0         | 0         | 1,5       | 0         | 2,6       | 0         | 1         | 8,7       |
| PB38 | 0     | 90,66      | 6,82  | 2,3   | 0         | 0         | 7,5       | 0         | 7,2       | 0         | 2,4       | 21,5      |
| PB39 | 0     | 93,44      | 5,82  | 1,68  | 0         | 0         | 2,4       | 0         | 7,9       | 0         | 2,9       | 40,9      |
| PB40 | 0     | 87,73      | 11,93 | 1,16  | 0         | 0,1       | 9,6       | 3,9       | 23,3      | 0         | 8,2       | 50,3      |
| PB41 | 0     | 60         | 11,28 | 0,64  | 0         | 0         | 5,5       | 1,5       | 18,5      | 0         | 6,4       | 33,7      |
| PB44 | 0     | 86,88      | 8,13  | 3,29  | 0         | 1,6       | 9,9       | 2,6       | 15        | 0         | 5,2       | 28,2      |
| B#01 | 0     | 1,38       | 62,76 | 35,73 | 0,86<br>8 | 0         | 1,95<br>2 | 1,28<br>2 | 4,18      | 0         | 1,71      | 9,68<br>2 |
| B#10 | 0     | 57,44      | 23,45 | 19,08 | 0,94<br>3 | 0,03<br>9 | 1,86<br>6 | 0,96<br>2 | 3,79      | 0,00<br>7 | 1,63      | 8,50<br>3 |
| B#11 | 0     | 5,5        | 56,85 | 37,84 | 0,33<br>4 | 0         | 0,86<br>5 | 0         | 1,65<br>2 | 0         | 0,70<br>8 | 5,13<br>4 |
| B#12 | 0,35  | 88,54      | 5,45  | 5,66  | 0,57<br>5 | 0         | 0,61<br>5 | 0         | 1,29      | 0         | 0,49<br>6 | 2,85<br>7 |
| B#13 | 0     | 99,3       | 0,68  | 0     | 0,45<br>7 | 0         | 0,35<br>8 | 0         | 0,69<br>6 | 0         | 0,23<br>9 | 1,09<br>4 |
| B#14 | 1,4   | 98,58      | 0     | 0     | 1,47<br>9 | 0         | 0,82<br>8 | 0         | 1,04<br>5 | 0         | 0,55<br>2 | 2,38<br>6 |
| B#15 | 28,47 | 71,51      | 0     | 0     | 0,38<br>8 | 0         | 0,23<br>3 | 0         | 0,44<br>6 | 0         | 0,19<br>4 | 0,89<br>2 |
| B#16 | 0     | 99,95      | 0,19  | 0     | 0,80<br>6 | 0         | 0,49<br>2 | 0         | 1,04<br>2 | 0         | 0,41<br>3 | 1,49<br>4 |
| B#17 | 0,77  | 95,44      | 3,79  | 0     | 0,71<br>8 | 0         | 0,85<br>3 | 0         | 1,37<br>7 | 0         | 0,42<br>7 | 1,95<br>9 |
| B#18 | 0,03  | 99,56      | 0,38  | 0     | 0,49<br>5 | 0         | 0,47<br>5 | 0         | 1,05      | 0         | 0,39<br>6 | 1,72<br>3 |

\*mg/kg; AMOST - Amostras; GR - Grânulos; AR - Areia; ST - Silte; AG - Argila; As - Arsênio; Cd - Cádmio; Pb - Chumbo; Cu - Cobre; Cr - Cromo; Hg - Mercúrio; Ni - Níquel; Zn - Zinco