



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

FACULDADE DE CIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICA E INFORMÁTICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS DE INFORMAÇÃO
GEOGRÁFICA PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ANÁLISE DO IMPACTO DO ASSOREAMENTO NO CANAL DE
ACESSO AO PORTO DE MAPUTO**

PAULO JORGE MARTINHO

Maputo
2024

UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

FACULDADE DE CIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICA E INFORMÁTICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS DE INFORMAÇÃO
GEOGRÁFICA PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ANÁLISE DO IMPACTO DO ASSOREAMENTO NO CANAL DE
ACESSO AO PORTO DE MAPUTO**

PAULO JORGE MARTINHO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Informação Geográfica para o Desenvolvimento Sustentável da Universidade Eduardo Mondlane, como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Sistemas de Informação Geográfica para o Desenvolvimento Sustentável.

Orientador: Prof. Doutor Alberto Chicafo Mulenga
Co-Orientador: Eng. Nuno Miguel Martins Gomes

Maputo
2024

UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

FACULDADE DE CIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICA E INFORMÁTICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS DE INFORMAÇÃO
GEOGRÁFICA PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ANÁLISE DO IMPACTO DO ASSOREAMENTO NO CANAL DE ACESSO AO PORTO DE MAPUTO

PAULO JORGE MARTINHO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Informação Geográfica para o Desenvolvimento Sustentável da Universidade Eduardo Mondlane, como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Sistemas de Informação Geográfica para o Desenvolvimento Sustentável.

Aprovado em ____ de _____ de 2024, por:

Doutor João José Lobo, Eng.
(Arguente – INAHINA/InOM)

Doutor Adelino Martins
(Presidente – DMI-UEM)

Prof. Doutor Alberto Chicafo Mulenga
(Orientador – DMI-UEM)

Eng. Nuno Miguel Martins Gomes
(Co-Orientador - GEOSURVEY)

Maputo
Maio/2024

Dedicatória

Dedico este estudo a minha esposa Mirela Rangel, meu filho Kayler Paulo Martinho, a Geosurvey e a todos os técnicos e admiradores desta fascinante área, dos Sistemas de Informação Geográfica.

Declaração de Honra

Declaro por minha honra, que este relatório é resultado do meu estágio e que o processo foi concebido para ser submetido apenas para a obtenção do grau de Mestre em Sistemas de Informação Geográfica para o Desenvolvimento Sustentável, na Faculdade de Ciências da Universidade Eduardo Mondlane.

Maputo, Maio de 2024

(Paulo Jorge Martinho)

Agradecimentos

A elaboração do presente estudo resulta do esforço, dedicação e empenho empregues durante a realização do estágio. Contudo, quero expressar o meu profundo agradecimento a todos que partilharam seu tempo e conhecimento para a concepção do estudo.

Epígrafe

Uma das tarefas fundamentais na manutenção das operações portuárias são as dragagens periódicas. Estas operações de dragagem facilitam a eliminação dos sedimentos que a dinâmica costeira introduz. As operações de dragagem são cada vez mais restritivas e dispendiosas devido às exigências ambientais. É essencial compreender o estado do fundo do mar antes e depois da dragagem (Mateo-Pérez, 2021).

Resumo

O Porto de Maputo diariamente recebe várias embarcações que garantem a importação e exportação de equipamentos, combustíveis e diversos bens. A segurança na navegabilidade marítima, é influenciada pelo nível de sedimentos concentrados no canal, dificultando a navegabilidade das embarcações. Este problema ocorre em quase todos os portos no mundo e o Porto de Maputo não é excepção. Um dos procedimentos utilizados para ultrapassar esta situação, é realizar dragagens programadas, suportada em dados espaciais obtidos através de levantamentos batimétricos. O objectivo deste estudo é analisar o impacto do assoreamento no canal de acesso ao Porto de Maputo, e para tal, foram usados 5 levantamentos batimétricos realizados nos anos de 2019 (1), 2020 (1), 2022 (1) e 2023 (2). Para a análise, foi aplicado o método de intersecção de modelos de superfície para calcular o volume dragado, a taxa de assoreamento e a variação altimétrica do sedimento. De acordo com os resultados obtidos, houve uma redução de volume dragado em cerca de 50% de 2019 para 2022 e de 25% de 2022 para 2023. Em relação à taxa de assoreamento, de 2022 a 2023 houve uma redução de cerca de 48%. Foram produzidos dois mapas temáticos, um com as áreas assoreadas em 2022 e 2023 e o outro com os factores naturais que influenciam no aumento do assoreamento. Os levantamentos batimétricos, mostraram que o padrão de deposição dos sedimentos é quase idêntico para os anos de 2019, 2020, 2022 e 2023 nos canais da Matola, Katembe, Xefina e Norte, excepto o da Polana que apresentou maior volume de assoreamento. Para um controlo contínuo do canal de acesso ao Porto de Maputo, recomenda-se fazer a monitorização contínua do canal e realização de dragagens de manutenção periódicas.

Palavras-chave: Assoreamento, Dragagem, Levantamento batimétrico, Porto de Maputo.

Abstract

Maputo Port receives daily several vessels that guarantee the import and export of equipment, fuel, and other goods. Safety in maritime navigability is influenced by the level of sediment concentrated in the channel, this makes navigating increasingly difficult. This problem occurs in almost all ports in the world and Maputo Port is no exception. One of the procedures used to overcome this situation is to carry out scheduled dredging, supported by spatial data obtained through bathymetric surveys. Therefore, this study aims to analyse the impact of siltation in the Maputo Port access channel, through five bathymetric surveys conducted in 2019 (1), 2020 (1), 2022 (1) and 2023 (2). For the analysis, an intersection surface model method was used to calculate the dredged volume, siltation rate and altimetric variation of the sediment. It was found that a reduction in dredged volume of around 50% had occurred between 2019 and 2022, as well as a reduction of 25% between 2022 and 2023. Additionally, a reduction of 48% in the siltation rate was found between 2022 and 2023. Two thematic maps were produced, one displaying areas silted in 2022 and 2023, and one showcasing natural factor influencing the increased siltation. Bathymetric surveys showed that the pattern of sediment deposition is almost identical for the years 2019, 2020, 2022 and 2023 in Matola, Katembe, Xefina and North channel, except for Polana, which showed a greater siltation volume. For continuous control of the Maputo Port access channel, it is recommended to continuously monitor the channel and carry out periodic maintenance dredging.

Keywords: Silting, Dredging, Bathymetric Survey, Maputo Port.

Abreviaturas

3D	Tridimensional
AGO	Agosto
CQ	Controlo de Qualidade
DGNSS	<i>Differential Global Navigation Satellite System</i>
DWT	<i>Deadweight Tonnage</i> / Toneladas de Peso Morto
EGM 2008	<i>Earth Gravitational Model</i> ou Modelo Gravitacional da Terra
GIS	<i>Geographic Information System</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Position System</i> ou Sistema de Posição Global
GS	<i>Global Positioning</i>
IHP	Instituto Hidrográfico de Portugal
InOM	Instituto Oceanográfico de Moçambique
JAN	Janeiro
Lev	Levantamento
NMM	Nível Médio do Mar
NOV	Novembro
MAI	Maio
MDE	Modelo Digital de Elevação
MPDC	<i>Maputo Port Development Company</i>
ODS	Objectivos do Desenvolvimento Sustentável
PK	Ponto Quilométrico
RTK	<i>Real-time Kinematic</i> ou (Tempo Real Cinemático)
SIS	<i>Seafloor Information System</i>
SVP	<i>Sound Velocity Profiler</i>
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
UTM	Universal Transversa de Mercator
WGS	<i>World Global System</i>
ZH	Zero Hidrográfico

Índice

Dedicatória.....	i
Declaração de Honra	ii
Agradecimentos	iii
<i>Epígrafe</i>	iv
Resumo	v
Abstract.....	vi
Abreviaturas.....	vii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Localização da área de estudo	1
1.2. Contextualização	2
1.3. Definição do problema	3
1.4. Objectivo	4
1.4.1. Objectivo geral	4
1.4.2. Objectivos específicos	4
1.5. Justificação	4
2. REVISÃO DE LITERATURA	5
2.1. Conceitos de ciclo hidrológico, assoreamento, batimetria e dragagem.....	5
2.1.1. Ciclo hidrológico e assoreamento	5
2.1.2. Métodos batimétricos	8
2.1.3. Impacto do assoreamento em portos	14
2.1.4. Desenvolvimento sustentável	15
2.2. Estudos relacionados com assoreamento e dragagem	16
3. METODOLOGIA	19
3.1. Empresas mencionadas no estudo	19
3.1.1. Geosurvey	19
3.1.2. Porto de Maputo	19
3.2. Material.....	20
3.3. Métodos	22
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
4.1. Resultado da calibração dos dados do multifeixe.....	32
4.2. Mapa batimétrico de 2019	33
4.3. Mapa batimétrico de 2020	33

4.4.	Mapa batimétrico de 2022	34
4.5.	Mapa batimétrico de 2023 (1)	35
4.6.	Mapa batimétrico de 2023 (2)	35
4.7.	Resultado do volume de assoreamento calculado	36
4.8.	Varição altimétrica do sedimento	38
4.9.	Taxa de assoreamento.....	39
4.10.	Áreas de assoreamento nos canais de acesso ao porto de Maputo	40
4.10.1.	Canal da Matola.....	40
4.10.2.	Canal da Katembe.....	43
4.10.3.	Canal da Polana	46
4.10.4.	Canal da Xefina	49
4.10.5.	Canal Norte.....	52
4.11.	Mapa temático das áreas assoreadas.....	55
4.12.	Mapa temático dos factores que influenciam no aumento do sedimento	56
4.13.	Áreas de despejo.....	57
4.14.	Discussão.....	60
5.	CONCLUSÕES, RECOMENDAÇÕES E LIMITAÇÕES	61
5.1.	Conclusões.....	61
5.2.	Recomendações	62
5.3.	Limitações do trabalho	62
6.	REFERÊNCIAS	63

Lista de figuras

Figura 1: Mapa de Localização do canal de Maputo.....	1
Figura 2: Principais fases do ciclo hidrológico.	5
Figura 3: Exemplo de assoreamento de um canal.	6
Figura 4: Esquema dos planos de referências verticais.	8
Figura 5: Levantamento batimétrico (Feixe simples e Multifeixe).	9
Figura 6: Exemplo de modelo digital de elevação em Canadá.	11
Figura 7: Exemplo de operação de dragagem.	12
Figura 8: Alcance de sinal de rádio	24
Figura 9: Disposição dos equipamentos numa embarcação de sondagem.	25
Figura 10: Regras de calibração	26
Figura 11: Parâmetros de calibração.	26
Figura 12: Perfil da velocidade do som na água.	27
Figura 13: Controlo de qualidade – comparação de superfícies.	28
Figura 14: Processamento dos dados batimétricos (Multifeixe).	29
Figura 15: Processamento dos dados batimétricos (Feixe Simples).	29
Figura 16: Cálculo de volume 1	30
Figura 17: Cálculo de volume 2	31
Figura 18: Medição da variação altimétrica	31
Figura 19: Calibração dos dados do multifeixe.....	32
Figura 20: Mapa batimétrico de 2019	33
Figura 21: Mapa batimétrico de 2020	34
Figura 22: Mapa batimétrico de 2022	34
Figura 23: Mapa batimétrico de 2023 (1).....	35
Figura 24: Mapa batimétrico de 2023 (2).....	36
Figura 25: Resultado do volume de assoreamento calculado com base no desenho do canal	36
Figura 26: Resultado do volume de assoreamento com base nos levantamentos realizados	37
Figura 27: Variação altimétrica de 2022 a 2023.	38
Figura 28: Taxa de assoreamento no período de 2020 à 2022 e 2022 à 2023.....	39
Figura 29: Secção transversal no canal da Matola	40
Figura 30: Área de assoreamento no canal da Matola.....	41
Figura 31: Levantamento batimétrico de 2020 no canal da Matola	42
Figura 32: Levantamento batimétrico de 2022 no canal da Matola	42

Figura 33: Secção transversal no canal da Katembe	43
Figura 34: Área de assoreamento no canal da Katembe.....	44
Figura 35: Levantamento batimétrico de 2020 no canal da Katembe	45
Figura 36: Levantamento batimétrico de 2022 no canal da Katembe	45
Figura 37: Secção transversal no canal da Polana	46
Figura 38: Área de assoreamento no canal da Polana.	47
Figura 39: Levantamento batimétrico de 2022 no canal da Polana	48
Figura 40: Levantamento batimétrico de 2023 no canal da Polana	48
Figura 41: Secção transversal no Canal da Xefina	49
Figura 42: Área de assoreamento no canal Xefina	50
Figura 43: Levantamento batimétrico de 2022 no canal da Xefina.....	51
Figura 44: Levantamento batimétrico de 2023 no canal da Xefina.....	51
Figura 45: Secção transversal no canal Norte	52
Figura 46: Área de assoreamento no canal Norte.....	53
Figura 47: Levantamento batimétrico de 2022 no canal Norte	54
Figura 48: Levantamento batimétrico de 2023 no canal Norte	54
Figura 49: Mapa temático das áreas assoreadas.	55
Figura 50: Mapa temático dos factores que influenciam no aumento do sedimento.	56
Figura 51: Áreas de despejo usadas no estudo.	57
Figura 52: Área de despejo 3.....	58
Figura 53: Área de despejo 8.....	59
Figura A1: Estação de referência.....	66
Figura A2: Marcas de nivelamento.	67
Figura A3: Sistema de posicionamento diferencial – GS15.....	67
Figura A4: Confirmação do posicionamento das antenas do Seapath.....	67
Figura A5: SVP, SIS e Seapath, Transdutor e Suporte e Repetidora.	67
Figura A6: Configuração típica do sistema.....	70
Figura A7: Sonda Kongsberg EA440	70
Figura A8: Sonda Kongsberg EM3002	70
Figura A9: Propriedades das sondas.....	71
Figura A10: Cálculo de volume na área de despejo 3.	71
Figura A11: Cálculo de volume na área de despejo 8.	71

Lista de tabelas

Tabela 1: Divisão do Canal de Maputo	1
Tabela 2: Padrões do levantamento batimétrico.....	10
Tabela 3: Dados usados	21
Tabela 4: Informação sobre o estado dos dados	21
Tabela 5: Programas usados	21
Tabela 6: Especificações técnicas da sonda Kongsberg EM3002.....	22
Tabela 7: Especificações técnicas da sonda Kongsberg EA440	23
Tabela 8: Especificações do GNSS GS15	23
Tabela 9: Sistema de referência.....	23
Tabela 10: Coordenadas da estação de referência	24
Tabela 11: Apoio topográfico.....	25
Tabela 12: Resultados da calibração feita em 2023	33
Tabela 13: Dados gerais do canal da Matola.....	40
Tabela 14: Dados gerais do canal da Katembe.....	43
Tabela 15: Dados gerais do canal da Polana	46
Tabela 16: Dados gerais do canal da Xefina	49
Tabela 17: Dados gerais do canal Norte.....	52
Tabela 18: Dados gerais da área de despejo 3	58
Tabela 19: Dados gerais da área de despejo 8	59
Tabela A1: Cronograma do estudo.....	66
Tabela A2: Orçamento do trabalho	66
Tabela A3: Calibração feita a 30/03/2023 – Canal da XEFINA.....	68
Tabela A4: Calibração feita a 23/04/2023 – Canal da POLANA.....	68
Tabela A5: Calibração feita a 20/04/2023 – Canal NORTE.....	68
Tabela A6: Calibração feita a 02/05/2023 – Local de despejo 3.....	69
Tabela A7: Calibração feita a 16/05/2023 – Local de despejo 8.....	69

1. INTRODUÇÃO

1.1. Localização da área de estudo

O canal de acesso ao Porto de Maputo está localizado a sul de Moçambique, na província de Maputo e se estende por aproximadamente 75 km. Situa-se entre os paralelos de latitudes 25°38'S e 25°59'S e meridianos de longitudes 32°29'E e 32°54'E, abrangendo desde Matola, Katembe, Polana, Xefina, e a parte norte perto de Macaneta. O mapa da figura 1, ilustra a localização geográfica do canal.



Figura 1: Mapa de localização do Canal de Maputo.

Fonte: Adaptado de Maputo Port Development Company (2015) e Instituto Oceanográfico de Moçambique (2023).

A tabela 1, indica como está dividido o canal de acesso ao Porto de Maputo, seus respectivos nomes, quilometragem e extensão.

Tabela 1: Divisão do Canal de Maputo

Nr.	Nome do canal	Quilometragem (Início e Fim)		Extensão (km)
1	Matola	0 + 000	5 + 000	4
2	Katembe	5 + 000	12 + 000	8
3	Polana	12 + 000	28 + 000	16
4	Xefina	28 + 000	40 + 000	12
5	Norte	40 + 000	75 + 200	35.2

Fonte: Adaptado de Maputo Port Development Company (2015) e Instituto Oceanográfico de Moçambique (2023).

1.2.Contextualização

Ao longo da história, os portos funcionaram como um refúgio seguro para as embarcações, protegendo-as das forças da natureza, como ondas, tempestades e correntes fluviais. Para garantir a segurança das embarcações e das tripulações, são construídas estruturas defensivas que minimizam a velocidade das correntes e o movimento das ondas (Bosa et al., 2021). No entanto, essa acção preventiva também resulta numa acumulação gradual de sedimentos, transportados pelas correntes, desencadeando o processo de assoreamento nos portos (Colangeli et al., 2023).

Segundo Romdani et al., (2022), o assoreamento em canais de navegação é um problema comum na gestão portuária e a quantidade de assoreamento está directamente associada às condições ambientais, configurações morfológicas, e comportamento humano. O assoreamento é geralmente causado pela acção de ondas, marés e gradientes de maior densidade e tende a obstruir canais portuários (Bianchini et al., 2019). Esse fenómeno, por sua vez, culmina no preenchimento progressivo do porto, criando obstáculos que condicionam a navegação portuária (Bosa et al., 2021).

A dragagem periódica, de acordo com Mateo-Pérez et al., (2021), é uma tarefa importante na manutenção das operações portuárias, pois, auxilia na remoção de sedimentos advindos da dinâmica costeira, essa actividade é comumente utilizada para manter a profundidade projectada dos canais ou bacias de navegação e para remover sedimentos depositados que incluem não só os processos de remoção de sedimentos do fundo, mas também o seu posterior transporte para outro local melhorando as condições de acesso e saída de navios de carga e de passageiros, daí que é necessário um método mais sustentável para reduzir o transporte de sedimentos nos portos e tornar a manutenção dos canais mais eficiente.

Actualmente alguns autores defendem que a chave para o sucesso na gestão portuária é a implementação de um Sistema de Informação Geográfica (SIG), pois, permite a integração dos sistemas electrónicos disponíveis num sistema único de informação e a sua visualização de forma gráfica (Canelas, 2012).

O presente relatório é resultado das actividades exercidas durante o período de estágio na Geosurvey Geoengenharia Lda., uma empresa de direito moçambicano, constituída por capital privado, e que actua na área de Geoprocessamento e consultoria em diversas especialidades tais como Topografia, Sistemas de Informação Geográfica, Geodesia, Batimetria e Detecção Remota.

1.3. Definição do problema

O canal de acesso ao Porto de Maputo tem um impacto significativo nas actividades económicas desenvolvidas no meio marítimo, como o caso do turismo, pesca, transporte e logística pois garante o normal funcionamento dessas operações. Entretanto, a crescente intensificação do assoreamento no canal do Porto de Maputo diminui a sua profundidade, tornando difícil a navegação dos navios o que influencia negativamente na economia local e no país como um todo.

O assoreamento do canal pode representar um risco significativo para a segurança das embarcações que usam este meio. Em alguns casos, o assoreamento gera atrasos que acarretam custos e criam perdas financeiras. Desta forma, alguns navios são forçados a permanecer por um longo período ancorados, necessitando de mais tempo para aceder ao Cais. O assoreamento causa danificação do casco das embarcações em consequência do embate com o fundo do canal assoreado e possivelmente o derramamento de óleo e inviabilização das operações portuárias reduzindo o potencial de crescimento económico.

A redução do efeito do assoreamento no canal de acesso ao Porto de Maputo requer um estudo e Levantamento Batimétrico para obter dados de profundidade e identificar os locais de concentração de sedimentos acumulados ao longo do tempo para uma posterior tomada de decisão. Este estudo não deve ser feito de forma isolada, sendo necessário fazer o acompanhamento do transporte sedimentar causado pelos rios que desaguam no canal para minimizar o efeito do assoreamento causado por estes.

Portanto, é de carácter periódico a realização de um levantamento batimétrico para avaliar o nível do assoreamento e conseqüentemente a realização de dragagens de forma a garantir a segurança na navegabilidade marítima. Desta forma, será possível compreender a dinâmica, os processos de deposição e o padrão dos sedimentos concentrados no canal para uma melhor gestão portuária na busca de estratégias para minimizar a influência do assoreamento e traçar medidas para uma gestão sustentável por parte do Porto de Maputo.

Uma possível solução, a ser materializada para assegurar a segurança na navegação ao longo do canal de acesso ao Porto de Maputo, é a realização frequente de dragagens para diminuir a quantidade de sedimentos acumulados no fundo do canal e tornar o porto mais dinâmico.

1.4.Objectivo

1.4.1. Objectivo geral

Analisar o impacto do assoreamento no canal de acesso ao Porto de Maputo.

1.4.2. Objectivos específicos

- Identificar os padrões de mudança na profundidade do canal de acesso ao Porto de Maputo;
- Classificar os dados batimétricos recolhidos em diferentes períodos segundo as áreas e sua concentração de sedimentos;
- Calcular o volume de sedimentos com base na intersecção de modelos de superfície entre os levantamentos batimétricos realizados e a superfície teórica do canal;
- Avaliar a taxa de assoreamento no canal e produzir mapas temáticos.

1.5.Justificação

A garantia de acessibilidade ao Porto do Maputo permite o escoamento e entrada de diversos bens, desde produtos alimentares, meios de transporte para além da segurança dos navios, que impulsionam a economia local e do país rumo ao desenvolvimento sustentável. Existem vários problemas que afectam a eficiência das operações portuárias como o assoreamento que acumula sedimentos no fundo do canal causando obstrução, a erosão costeira, por consequência da instabilidade nos taludes, condições climáticas extremas trazendo consigo resíduos e congestionamento no canal por consequência do elevado tráfego marítimo.

O uso de sistemas sonares para a monitorização contínua, estudo dos tipos de sedimento e conhecimento do estado do canal pode ajudar a identificar potenciais problemas de assoreamento ou segurança marítima e melhorar as operações portuárias.

Com este estudo, será conhecido, o troço do canal com maior volume de sedimentos acumulados, a localização das áreas mais assoreadas no canal e a variação altimétrica dos sedimentos, portanto, estas informações ajudarão no planeamento das actividades de manutenção de forma direccionada e eficaz minimizando os custos das operações, na compreensão dos padrões de assoreamento, na criação de medidas de mitigação do impacto do assoreamento, o que melhora a navegabilidade do canal de acesso ao Porto de Maputo, trazendo benefícios económicos, ambientais e sociais.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Conceitos de ciclo hidrológico, assoreamento, batimetria e dragagem

2.1.1. Ciclo hidrológico e assoreamento

Segundo Lopes (2017), um ciclo hidrológico é um movimento contínuo da água, sobre e acima da superfície terrestre, considerando as extensões líquidas de água, lagos, zonas húmidas, baías e oceanos, incluindo a neve e gelo como água em estado líquido. De acordo com Serra (2022), no ciclo hidrológico, o movimento permanente da água é assegurado pela energia solar e pela energia gravitacional resultando na sua transição em diferentes estados físicos, através de vários processos. A descarga episódica dos rios desencadeada por grandes chuvas pode contribuir para sedimentos significativos no oceano (Romdani et al., 2022). Na figura 2, encontram-se esquematizados as principais fases que compõem o ciclo hidrológico.

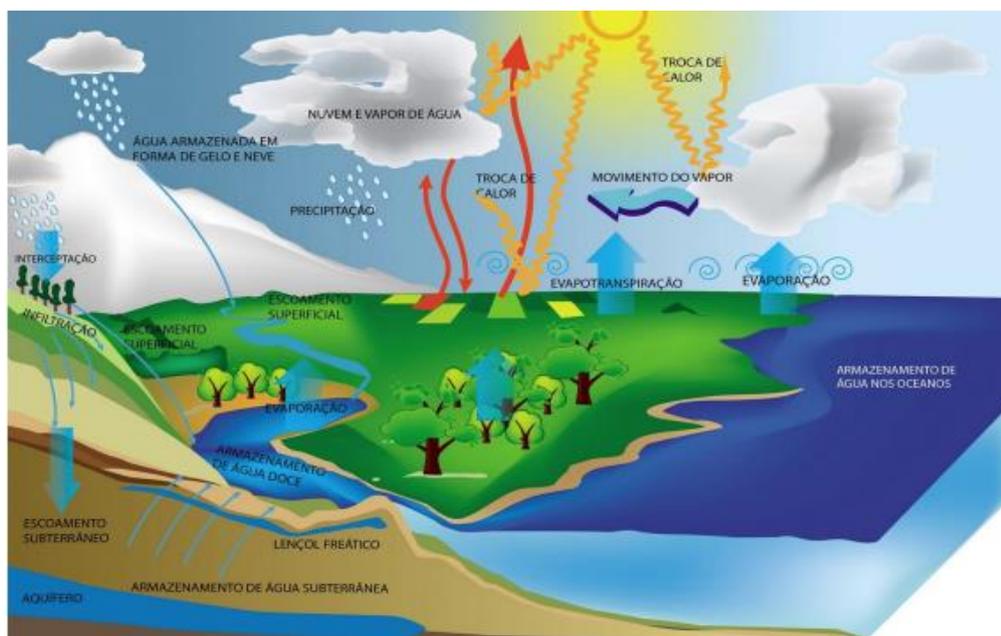


Figura 2: Principais fases do ciclo hidrológico.

Fonte: Lopes (2017).

De acordo com Silva e Brito (2019), um assoreamento é um elemento que dificulta a viabilidade de uma operação portuária, particularmente quando grandes quantidades de sedimento que se depositam, devem ser retiradas por processos de dragagem. De acordo com Bianchini et al., (2019), o assoreamento é geralmente causado pela acção de ondas, marés e gradientes de densidade e tende a obstruir canais portuários daí que a gestão dos portos e canais deve incluir a gestão de sedimentos

como um dos elementos relevantes. Na figura 3, é mostrado um exemplo de assoreamento de um canal.



Figura 3: Exemplo de assoreamento de um canal.
Fonte: Baltimore (2016).

Muitas metodologias, conforme Mateo-Pérez et al., (2021), têm sido usadas para compreender o comportamento do sedimento, entre eles pode-se destacar:

- Métodos de projecto probabilísticos - direccionam simulações numéricas directas que fornecem uma estimativa aproximada para a compreensão do comportamento dos sedimentos. Entretanto, esta metodologia é cara, pois, requer o levantamento de toda a área para compreender a sua geometria 3D.
- Análise das batimetrias obtidas na área de estudo, pois, se a evolução do fundo do mar é conhecida, é possível saber onde são produzidos os depósitos de sedimentos e sua taxa de sedimentação. Esta técnica também ajuda a determinar a necessidade de realizar dragagem, bem como sua periodicidade. A principal limitação ao analisar o comportamento do fundo do mar é a disponibilidade de batimetrias.

Segundo Gagg (2016), a batimetria trata do conjunto dos princípios, métodos e convenções usados para determinar a medida do contorno, da dimensão relativa da superfície submersa dos mares, rios, lagos, represas e canais. A metodologia para a medição da profundidade pode ser:

- Metodologia directa - emprega o esticamento de fio de prumo, uso de embarcações, medição da profundidade com uso de vara, anotação manual de dados em cadernetas de campo, etc.

- Metodologia indirecta - onde a aquisição da informação batimétrica é uma investigação indirecta do fundo marinho, com a propagação de sinais acústicos.

De acordo com Mateo-Pérez et al., (2021), as batimetrias são normalmente realizadas antes e após a dragagem, mas não com frequência suficiente para compreender a evolução do fundo do mar, devido ao seu alto custo e à dificuldade de realizá-los. Os dados de batimetria consistem de posição e profundidade.

Segundo Carvalho (2016), o cálculo da profundidade através de um transdutor é feito com base na fórmula 1:

$$p = V_{\text{som na água}} * \frac{\Delta t}{2} \text{ [m]} \quad (1)$$

Onde:

p: profundidade,

V som na água: Velocidade do som na água,

Δt : Variação do tempo,

V = 1450 m/s

De acordo com Carvalho (2016), o valor do assoreamento é definido a partir da diferença entre as batimetrias que obtiverem uma alteração de seu volume em um determinado período dividido pelos meses referentes ao intervalo de cada batimetria obtendo-se a Taxa de Assoreamento expressa em m³/mês, segundo ilustra a fórmula 2.

$$T_{\text{assoreamento}} = \frac{V_{\text{assoreado}}}{T_d - T_b} \text{ [} \frac{\text{m}^3}{\text{mês}} \text{]} \quad (2)$$

Onde:

T_{assoreamento}: Taxa de assoreamento,

V_{assoreado}: volume assoreado

T_d: tempo da realização da batimetria anterior

T_b: tempo da realização da batimetria posterior

Segundo Van Rijn (2016), a taxa de assoreamento observada em ambientes como portos de água fresca é menor do que em ambientes de água salgada e salobre.

2.1.2. Métodos batimétricos

De conformidade com Canelas (2012), em hidrografia, o Zero Hidrográfico (ZH) é um indicador de referência em termos de profundidades, isto é, um plano de referência convencionado, situado abaixo do nível da maré astronómica mais baixa, ao qual estão referidas as sondas e as linhas Iso-batimétricas representadas nas cartas náuticas, bem como as previsões de altura de maré (Instituto Hidrográfico de Portugal, 2018). A figura 4, mostra o esquema de referência vertical.

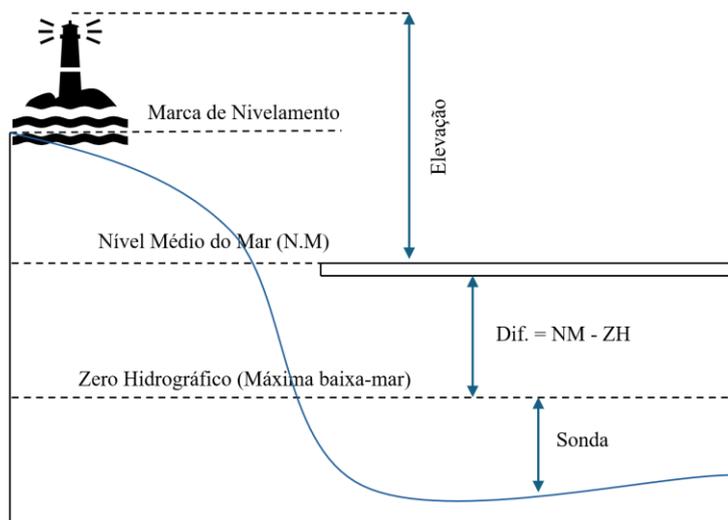


Figura 4: Esquema dos planos de referências verticais.
Fonte: Adaptado de Canelas (2012).

Segundo o Instituto Oceanográfico de Moçambique (2023), o porto de Maputo tem o Zero Hidrográfico situado a 2 m do Nível Médio do Mar (NMM).

De acordo com Castro e Almeida (2012), os trabalhos hidrográficos podem ser definidos como sendo os levantamentos topográficos efectuados para a obtenção da posição de pontos em leitos da água tais como rios, lagos, lagoas e ambientes oceânicos, além da determinação da variação do nível em um reservatório ou em um curso de água. O objectivo do levantamento batimétrico é o conhecimento da morfologia de fundo destes ambientes para a construção de cartas náuticas bem como para a planificação e controle de projectos de engenharia como pontes, túneis, barragens, portos e outros trabalhos relacionados à engenharia.

Conforme o Instituto Hidrográfico de Portugal (2018), os levantamentos hidrográficos são efectuados com sondadores acústicos de feixe simples ou multifeixe para a medição de profundidades utilizando sistemas de satélite (GNSS) com correcções para posicionamento de elevada precisão.

De acordo com o Instituto Hidrográfico de Portugal (2018), existem dois métodos de medição de profundidades, Feixe simples (*Singlebeam*) e Multifeixe (*Multibeam*), ambos métodos adquirem dados de profundidade ao longo de uma faixa transversal à plataforma, sendo que a largura dessa faixa de sondagem depende da profundidade, permitindo assegurar uma cobertura completa do fundo e, assim, garantir a detecção das profundidades mínimas relevantes para a segurança da navegação, bem como de qualquer estrutura, que possa constituir perigo para a navegação.

Conforme Cunha (2019), a principal diferença do feixe simples em relação ao multifeixe, está no custo, tempo de levantamento e processamento, visto que o primeiro gera custos menores e exige menos tempo na hora do processamento. Muitas dessas características, são baseadas no tipo de trabalho a ser desenvolvido, onde a utilização do multifeixe é mais usual em projectos que exigem um maior nível de detalhe da superfície do fundo e resultados com alta resolução e precisão. A figura 5, ilustra os dois métodos.

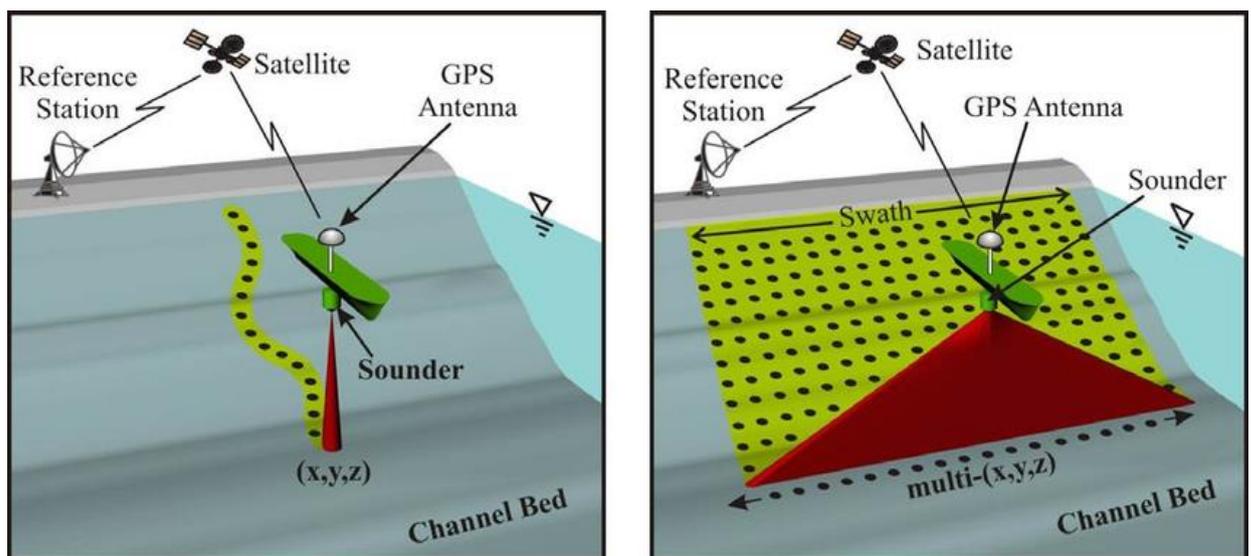


Figura 5: Levantamento batimétrico (Feixe simples e Multifeixe).

Fonte: Neary et al., (2011).

Segundo a Organização Internacional de Hidrografia (2020), os padrões destinam-se a ser específicos para uma finalidade, mas independentes da tecnologia em termos de desenho. A ordem alcançada para os dados batimétricos pode ser avaliada independentemente da ordem alcançada para outros dados de posicionamento, de modo a não degradar desnecessariamente a representação da qualidade da batimetria nas cartas e produtos náuticos.

Tabela 2: Padrões do levantamento batimétrico.

Critério	Ordem 2	Ordem 1b	Ordem 1a	Ordem Especial	Ordem Exclusiva
Descrição de áreas (Geralmente)	Áreas onde uma descrição geral do fundo do mar é considerada adequada.	Áreas onde a folga inferior da quilha não é considerada um problema para o tipo de transporte de superfície que deverá transitar na área.	Áreas onde a folga inferior da quilha não é considerada crítica, mas podem existir características que preocupam o transporte de superfície.	Áreas onde a folga inferior da quilha é crítica	Áreas onde há critérios mínimos estritos de folga sob a quilha e manobrabilidade
Profundidade IHT [m] +	20 m +	5 m +	5 m +	2 m	1 m
[% da profundidade]	10% da profundidade	5% da profundidade	5% da profundidade		
Profundidade IVT (a) [m] (b)	a = 1.0 m b = 0.023	a = 0.5 m b = 0.013	a = 0.5 m b = 0.014	a = 0.25 m b = 0.0075	a = 0.15 m b = 0.0075
Deteccção de feições [m] ou [% da profundidade]	Não especificado	Não especificado	Formas cúbicas > 2 m, em profundidades até 40 m; 10% de	Formas cúbicas > 1 m	Formas cúbicas > 0.5 m
Pesquisa de Feições [%]	Recomendado, mas não obrigatório	Recomendado, mas não obrigatório	100%	100%	200%
Cobertura Batimétrica [%]	5%	5%	≤ 100%	100%	200%

Fonte: Organização Internacional de Hidrografia (2020).

De acordo com Canelas (2012), a incerteza de posicionamento pode ser dividida em:

- Incerteza Total Propagada (ITP) - Está é a incerteza tridimensional com todas as incertezas de medição contribuintes incluídas.
- Incerteza Horizontal Total (IHT) - É um componente da incerteza total propagada calculada na dimensão horizontal. É uma quantidade bidimensional com todas as incertezas de medição horizontais incluídas.
- Incerteza Vertical Total (IVT) - É um componente da incerteza total propagada calculada na dimensão vertical. É uma quantidade unidimensional com todas as incertezas de medição verticais incluídas.

De acordo com Canelas (2012), a Incerteza Vertical Total (IVT) é calculada pela seguinte expressão:

$$IVT = \sqrt{a^2 + (b * d)^2} \quad (3)$$

Onde:

- a: representa a porção da incerteza que não varia com a profundidade;
- b: é um coeficiente que representa a porção da incerteza que varia com a profundidade;
- d: é a profundidade.

Segundo Carvalho (2016), os Modelos Digitais de Elevação (MDE) são fundamentais para estudos topográficos de um determinado fenómeno, sem observar directamente a região escolhida, devido a dificuldades financeiras, deslocamento ou por restrição da região. A simulação é fundamental para a tomada de decisão no contexto de projectos de engenharia, modelação e SIG além de poderem ser qualitativas ou quantitativas. Na figura 6, é mostrado um exemplo de um MDE.

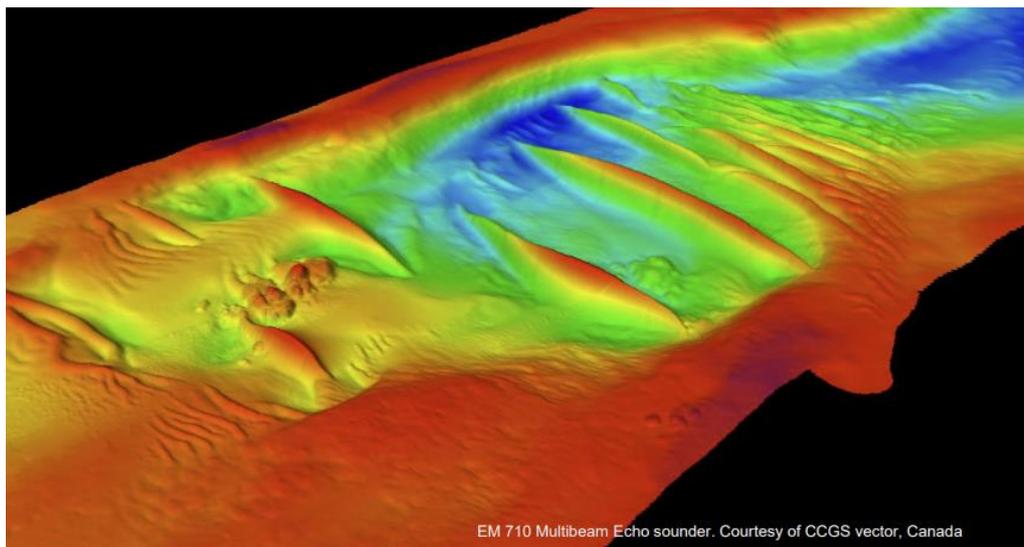


Figura 6: Exemplo de Modelo Digital de Elevação em Canadá.
Fonte: Kongsberg (2018)

De acordo com Canelas (2012), a dragagem é uma operação que já data de milhares de anos. Historicamente existem referências à abertura de canais para navegação há aproximadamente 5000 anos. A dragagem é realizada para a limpeza, remoção, escavação de material do fundo de rios, lagos, mares, baías e canais, removendo rochas e sedimentos, para o lançamento em local de despejo, é uma necessidade não somente para implantação, aumento da profundidade ou manutenção, mas também para limpar e recuperar áreas com sedimentos contaminados.

Segundo Alves (2010), as dragagens podem ser:

- De primeiro estabelecimento - quando consiste na ampliação ou aumento da profundidade dos canais ou bacias portuárias.
- De manutenção - quando é realizada para manter determinadas profundidades pré-estabelecidas de modo que esteja assegurada a segurança da navegação nos canais.
- De saneamento - quando têm como objectivo combater a poluição.
- De empréstimo - quando é realizada em zonas específicas, com o objectivo de obter sedimentos possíveis de serem utilizados na alimentação artificial de praias.

Conforme Canelas (2012), as principais razões para se proceder a operação de dragagem são:

- Navegação (manutenção das cotas de serviço dos canais de acesso e Cais de atracação dos portos);
- Obtenção de materiais para construção;
- Expansão de infraestruturas portuárias;
- Exploração de minérios em fundos marinhos;
- Abertura de valas para instalação de tubagens e cabos submarinos;
- Construção de ilhas artificiais;
- Melhoria do meio ambiente, implicando a recuperação de praias e eliminação de materiais contaminados depositados nos fundos.

A figura 7, mostra um exemplo de operação de dragagem no canal.



Figura 7: Exemplo de operação de dragagem.
Fonte: Baltimore (2016).

De acordo com Canelas, (2012) e Bianchini et al., (2019), as dragas podem ser divididas em várias categorias e entre elas podem-se destacar:

- **Dragas Mecânicas – Dragas de Colher e Retroescavadoras**

As dragas mecânicas removem os sedimentos dos fundos através da aplicação directa de uma força mecânica para escavar o material, independentemente da sua densidade. Estas dragas geralmente são estacionárias e o material dragado é descarregado no depósito de batelões para posteriormente ser transportado e depositado nas zonas de despejo.

- **Dragas Hidráulicas – Dragas de Sucção em Marcha**

As dragas hidráulicas são constituídas por bombas hidráulicas que sugam os sedimentos após serem fragmentados mecanicamente ou desagregados. Estes equipamentos estão dotados dos meios próprios de propulsão e são capazes de carregar nos seus porões o material dragado. Os sedimentos são aspirados por um tubo dotado, no seu extremo, de um cabeçote de sucção cuja primeira finalidade é a de separar os materiais do fundo marinho.

- **Dragas Mistas – Draga de Sucção e Cortadoras**

As dragas mistas são caracterizadas pela acção conjunta e simultânea de processos mecânicos e hidráulicos. Estas dragas são estacionárias e equipadas com um desagregador mecânico que actua por rotação desagregando o material. Dentro dessa draga existe um tubo de sucção que aspira o material desagregado. Estas dragas são estacionárias e são ideais para remoção de material consolidado.

- **Dragas Pneumáticas**

As dragas pneumáticas promovem a aspiração do material do fundo por ar comprimido. As dragas pneumáticas não provocam a dispersão de sedimentos na água durante a sua operação, uma vez que não existem cortes no solo por meios mecânicos. Desta forma, as dragas pneumáticas são vistas como as que menos poluem o meio ambiente. São utilizadas em actividades de recuperação ambiental e na recuperação de pequenos objectos submarinos em arqueologia náutica.

- **Dragas Hidrodinâmicas – Draga por injeção de água**

As dragas hidrodinâmicas dependem dos recursos hidrodinâmicos induzidos na coluna de água de forma natural ou artificial a fim de deslocar, para outro sítio, os sedimentos do fundo, os

quais são suspensos do leito aquático por acção mecânica ou hidráulica. Esta draga injecta água, em baixa pressão, no sedimento em consolidação no fundo, provocando a sua suspensão. Os sedimentos em suspensão apresentam uma densidade superior à do fluído envolvente, o que favorece o aparecimento do efeito de corrente cujo propósito é direccionar esses sedimentos.

De acordo com Castro e Almeida (2012), o material dragado é aquele que é retirado ou deslocado do leito do curso de água pela actividade de dragagem, desde que não constitua bem mineral. Resíduos e rejeitos de dragagem são compostos orgânicos halogenados, plásticos, mercúrio, cádmio, petróleo, óleos, substâncias radioactivas e outras substâncias produzidas para a guerra química e biológica. Na dragagem, deve-se dar atenção também aos resíduos com quantidades consideráveis de arsênio, zinco, cobre, fluoretos e pesticidas.

2.1.3. Impacto do assoreamento em portos

Segundo Alves (2010), o impacto do assoreamento a nível ambiental pode ser negativo, por interferir com ecossistemas associados a operações de remoção ou deposição dos materiais dragados, principalmente, quando contaminados, quando o assoreamento tem como objectivo a constituição de praias ou dunas, a realização de aterros, a utilização de sedimentos como inertes na construção civil e em aterros portuários e a constituição ou aumentar a profundidade de canais de navegação.

De acordo com Castro e Almeida (2012), a acção das dragas e a sucção do material geram impactos negativos de efeito directo sobre organismos e habitats. O efeito indirecto ocorre com a movimentação de contaminantes e nutrientes durante a suspensão do sedimento, podendo haver alteração da qualidade da água e a química global do estuário. Um importante aspecto ambiental relacionado ao assoreamento portuário, de acordo com Van Rijn (2016), é o grau de contaminação do material depositado, o que determina em grande parte os custos de dragagem e limpeza envolvidos e, portanto, os lucros económicos.

De conformidade com Mateo-Perez et al., (2021), a sedimentação excessiva dos canais pode prejudicar o funcionamento normal do porto e levando a diminuição das suas actividades económicas. Por isso, os canais necessitam de dragagens de manutenção para garantir a passagem segura dos navios.

Segundo Colangeli et al., (2023), a manutenção das instalações portuárias é largamente influenciada pelos processos de sedimentação, para os quais o conhecimento detalhado é essencial. Em particular, a erosão ou deposição de sedimentos pode influenciar a profundidade dos canais de navegação e das entradas do porto. Para diminuir o efeito deste fenómeno, são construídos diques e outras obras de protecção costeira para diminuir a intensidade das forças hidrodinâmicas e no movimento de sedimentos no mar.

De acordo com Souza et al., (2021), o assoreamento tem um impacto positivo pois, quando um porto passa pelo processo de modernização através da dragagem o mercado internacional entende que o porto está preparado para oferecer melhores condições de acesso e eficiência em suas operações, aumentando a competitividade e reduzindo os custos. Para aumentar sua confiabilidade os portos costumam divulgar relatórios de batimetria (medição da profundidade de oceanos, lagos e rios), com isso oferece um grande atractivo competitivo para novos clientes.

2.1.4. Desenvolvimento sustentável

De conformidade com Nhemachena et al., (2018), a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável foi adoptada pelos Chefes de Estado e de Governo das Nações Unidas, orientando o mundo para um caminho de desenvolvimento sustentável. Os 17 Objectivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 proporcionam um compromisso global para a transformação do mundo num caminho sustentável, enquanto abordam os múltiplos e complexos problemas do século XXI que o mundo enfrenta actualmente.

Os Objectivos de Desenvolvimento Sustentável relacionados com o assoreamento são abaixo mencionados:

- ODS 6 - Garantir a disponibilidade e a gestão sustentável da água e do saneamento para todos. A dragagem para remoção de sedimentos influencia na qualidade da água e na vida marinha daí que este objectivo recomenda a realização do acompanhamento e monitora durante essa operação.
- ODS 9 - Construir infra-estruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar a inovação. O Assoreamento no canal de acesso ao Porto de Maputo, dificulta a navegação segura das embarcações.

- ODS 11 - Tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis. A manutenção adequada dos canais de navegação melhora a ligação entre áreas urbanas e rurais, facilitando o comércio promovendo o desenvolvimento económico sustentável.
- ODS 14 - Conservar e utilizar de forma sustentável os oceanos, mares e recursos marinhos para o desenvolvimento sustentável. A remoção do assoreamento, por meio de dragagem, no canal de acesso ao Porto de Maputo, contribui para a preservação da vida marinha e dos ecossistemas aquáticos.

Segundo Lopes (2017), o desenvolvimento sustentável é fundamental, pois, atende às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem as mesmas necessidades. No contexto da crise energética global e da degradação ambiental, o desenvolvimento sustentável tornou-se a principal direcção estratégica para a indústria portuária. O desenvolvimento sustentável tem impacto na produção, construção e gestão de operações portuárias a partir de três aspectos: prosperidade económica, qualidade ambiental e bem-estar social (Zhao et al., 2021).

De acordo com Argyriou e Tsoutsos (2023), o planeamento da sustentabilidade dos portos é essencial para manter a sobrevivência a longo prazo e promover o desenvolvimento sustentável. Ao adoptar uma postura proactiva de sustentabilidade, os portos podem melhorar as suas operações. O objectivo final do planeamento da sustentabilidade portuária é garantir que os portos continuem a satisfazer as exigências dos seus clientes, preservando ao mesmo tempo o ambiente para as gerações futuras.

2.2. Estudos relacionados com assoreamento e dragagem

Castro e Almeida (2012), estudaram a dragagem e o conflito ambiental em portos clássicos e modernos. O estudo tinha como objectivo fazer uma revisão dos principais impactos, tratamentos e usos benéficos dos sedimentos oriundos da obra ou serviço de dragagem portuária, como também os critérios de selecção dos locais para disposição do material dragado, os quais estão no centro de conflitos, pela possibilidade de atingirem ou mesmo eliminarem irreversivelmente ecossistemas aquáticos costeiros. Os autores concluíram que havia necessidade de uma agenda ambiental portuária que considerasse essas questões juntamente com grupos relevantes da sociedade no planeamento estratégico de acções para este sector.

Carvalho (2016), estudou a estimativa da taxa de assoreamento no canal de navegação do Porto de Santos usando batimetrias de 2010, 2011, 2012 e 2013, onde se dragou 15 m do seu canal de acesso, a fim de melhorar seu acesso aos terminais público-privado. O trabalho tinha como objectivo determinar quais são as áreas mais instáveis do canal de acesso e seu volume transportado por mês. Para tal, foi feita uma análise batimétrica dos 4 trechos do canal, através dos dados disponibilizados pela Secretaria Especial dos Portos utilizando o software ArcGIS. Carvalho concluiu que o trecho que mais assoreava no canal de navegação era o trecho 1, sendo que 19 % do total de assoreamento era referente a curvatura do trecho 1.

Bianchini et al., (2019), estudaram a gestão de sedimentos em infra-estruturas costeiras, Técnico-económica e avaliação de impacto ambiental de tecnologias alternativas à dragagem. O estudo tinha como objectivo fornecer uma visão estruturada original de tecnologias alternativas à dragagem que têm testado nos últimos 50 anos. Em particular, em infra-estruturas com anti-sedimentação e em soluções vegetais inovadoras caracterizadas por baixos custos de manutenção e por um impacto ambiental muito limitado. Os autores concluíram que a dragagem tinha custos e impacto ambiental elevados, enquanto as usinas fixas de desvio de areia eram caracterizadas pelo menor impacto ambiental e custos de operação que sejam competitivos com a dragagem.

Silva et al., (2019), analisaram o processo de assoreamento no trecho I do canal de acesso ao porto do Rio Grande entre os anos de 2010 e 2018. Este trabalho tinha como objectivo quantificar o processo de assoreamento e definir as regiões críticas onde a deposição de sedimentos era mais significativa. Foram utilizados quatro levantamentos batimétricos realizados em 2011, 2014, 2015 e 2018. Foram calculados os volumes acima e abaixo da cota de projecto para cada levantamento e gerados mapas. Os autores concluíram que a porção noroeste apresentava a maior tendência ao assoreamento e reduziu gradualmente suas profundidades entre Julho de 2010 e Fevereiro de 2018.

Bosa et al., (2021), investigaram a situação do porto de Marano Lagunare (Itália) por meio de um modelo bidimensional morfológico-hidrodinâmico e acoplado espectral. O objectivo do trabalho era de reduzir a entrada de sedimentos no porto, que geralmente é sugerido o fechamento de uma entrada de porto secundário. Os autores concluíram que uma dragagem completa da entrada secundária permitia um aumento na circulação de água ou renovação da eficiência, o que garantia melhor oxigenação no fundo dos canais.

Romdani et al., (2022), estudaram os mecanismos e efeitos do transporte de sedimentos na foz do Rio Zhuoshui para o canal de navegação do porto de Mailiao, o objectivo era fazer simulações numéricas que fornecessem conhecimento sobre os padrões de circulações residuais para uma variedade de forças de maré e condições de onda. A corrente litorânea induzida por ondas durante a estação de inverno contribui com 30% a 60% da intensidade do fluxo. Os autores concluíram que os resultados do modelo sugeriam que a extensão do *North Jetty* poderia ser uma das soluções de engenharia para modificar o sistema de circulação entre o porto e a foz do rio para diminuir o problema de assoreamento.

Colangeli et al., (2023), abordaram sobre a hidrodinâmica e o transporte de sedimentos no porto de micromarés de La Spezia Arsenale (Liguria, Itália) através de uma abordagem numérica, com o objectivo de fornecer informações para: (1) a compreensão da hidromorfodinâmica das configurações do porto de micromarés e (2) a gestão e planeamento da operação do Arsenale, o porto pivô para a Marinha italiana. Os autores avaliaram a influência dos cursos de água doce que fluem próximo do Arsenale, representativo de portos micromarés semifechados localizados nas proximidades de rios. Os autores concluíram que a contribuição dos rios para a hidromorfodinâmica do Arsenale não podia ser negligenciada, pois, na verdade, representava uma das principais forças da dinâmica portuária e, portanto, devia ser considerada no processo de gestão.

Silva et al., (2023), analisaram o assoreamento no canal de navegação do estuário da lagoa dos Patos no Brasil. O objectivo era avaliar as características morfológicas e padrões de assoreamento após as modificações feitas na geometria dos Cais e na configuração do canal no final de 2000. Os autores concluíram que havia uma variabilidade significativa nas taxas de sedimentação. O volume de sedimento depositado no fundo do canal em 1 ano foi 2.5 vezes maior do que depositado em 2 anos e 3 meses, sendo possível identificar padrões de assoreamento e obter resultados sem precedentes.

3. METODOLOGIA

3.1. Empresas mencionadas no estudo

3.1.1. Geosurvey

O presente estudo foi realizado na Geosurvey-Geoengenharia Lda., uma empresa de direito moçambicano fundada em Julho de 2012 na cidade de Maputo com carácter multidisciplinar e especializada na prestação de serviços em diversas áreas do sector da construção civil e obras públicas, designadamente Engenharia Topográfica e Geográfica, mas também a Batimetria, Cartografia, Projecto, Fiscalização, SIG e Detecção Remota, este último nas áreas de *Laser Scan* e Mapeamento Aéreo.

Um dos objectivos da empresa é participar na construção de um Moçambique mais moderno, participar no processo de crescimento, desenvolvimento da sociedade moçambicana, ajudar a ligar pessoas e bens através de novas estradas e pontes, portos e túneis, fazer parte de projectos de tal grandiosidade e complexidade que nos encham a todos de orgulho (Geosurvey, 2023).

Com uma estratégia de mercado bem delineada a Geosurvey considera determinante para um crescimento sólido e sustentado, alguns sectores que identificam o alvo prioritário à sua actividade são a Indústria Mineira, Exploração de Gás e Petróleo, Sector Energético, Construção Civil e estradas, Fiscalização, Sector Público, Meio Ambiente, Agricultura, Protecção Civil (Geosurvey, 2023).

3.1.2. Porto de Maputo

De acordo com os Caminhos de Ferro de Moçambique (2023), o Porto de Maputo está localizado a sudoeste de Moçambique e a sul do canal de Moçambique situado na margem esquerda do Rio Matola e é composto por duas importantes áreas, nomeadamente, o Porto Comercial de Maputo e o Complexo Industrial da Matola. O Porto de Maputo está sob gestão da empresa *Maputo Port Development Company* (MPDC) uma empresa privada, nacional, que resulta da parceria entre os Caminhos de Ferro de Moçambique e a *Portus Indico*, constituída pela *Grindrod*, *DP World* e a empresa Moçambicana Mozambique Gestores.

Desde 2017, o Porto de Maputo está aberto a navios de até 80 000 toneladas DWT, graças à experiência do Grupo Jan De Nul, que executou as obras de dragagem para aumentar a profundidade do canal de acesso e as bacias portuárias até profundidades que variam entre os 12.8 e os 14.4

metros. O principal objectivo do Porto de Maputo era permitir o acesso a navios de maior porte, tornando o porto mais competitivo nos mercados marítimos regionais e internacionais, fortalecendo as ligações entre Moçambique e os vizinhos África do Sul, Eswatini e Zimbabwe (*Maputo Port Development Company, 2023*).

O grupo Jan De Nul mobilizou a sua draga de sucção De Lapérouse e uma das maiores dragas de corte e sucção do mundo. O projecto envolveu a dragagem do canal de acesso com 70 km de extensão, onde um total de 14 milhões de metros cúbicos de material foi dragado e descartado. Para garantir que estas profundidades seriam mantidas, em Agosto de 2019, o Grupo Jan De Nul assinou um novo contrato com a Sociedade de Desenvolvimento do Porto de Maputo para operações de dragagem de manutenção no porto. O grupo mobilizou a draga de arrasto de sucção Francesco di Giorgio e a draga de injeção de água Henri Pitot, que iniciaram os trabalhos de dragagem em Outubro de 2019, removendo 1.5 milhões de metros cúbicos de lodo, lama e areia acumulados num período de quatro meses (*Maputo Port Development Company, 2023*).

3.2.Material

Para a realização do estudo foram utilizados dados de 5 levantamentos batimétricos feitos em 4 anos, nomeadamente 1 em 2019, 1 em 2020, 1 em 2022 e 2 em 2023, a partir dos quais foram gerados Modelos Digitais de Elevação para cada levantamento com resolução de 1 metro.

Para a realização do cálculo do volume, cálculo da taxa de assoreamento e variação altimétrica foi utilizado o Método de Intersecção de Modelos de Superfície usando como superfície de comparação a superfície teórica do Canal de Maputo. No processamento de dados foram usados os softwares *BeamworX 2023.2*, *SierraSoft 15* e o *Cyclone 3DR*. Estes dois últimos com o objectivo de fazer o controlo de qualidade dos resultados.

No presente estudo foram considerados dados provenientes da Geosurvey, do Instituto Oceanográfico de Moçambique (InOM) e do repositório de dados espaciais DIVA-GIS apresentados na tabela 3, com a excepção do:

- Levantamento *Out_Survey* de 2022,
- Dos troços da Matola e Katembe em 2023, onde não foi feita a batimetria.

Tabela 3: Dados usados

Ano	Tipo	Nome	Formato	Fonte
2019	<i>In Survey</i>	2019_Lev1_NOV_IN_Survey	*.xyz	Geosurvey
2020	<i>Out survey</i>	2020_Lev2_JAN_OUT_Survey	*.xyz	Geosurvey
2022	<i>In Survey</i>	2022_Lev1_AGO_IN_Survey	*.xyz	Geosurvey
2023	<i>In Survey</i>	2023_Lev1_JAN_IN_Survey	*.xyz	Geosurvey
2023	<i>Out survey</i>	2023_Lev2_MAI_OUT_Survey	*.xyz	Geosurvey
2022	Desenho do Canal	<i>Maputo Channel 2022</i>	*.dxf	Geosurvey
2022	Superfície teórica do Canal	<i>Maputo Channel 2022</i>	*.xml	Geosurvey
	Carta Náutica	Carta Náutica do Porto de Maputo	Físico	InOM
	Tabela de Marés	Tabelas de Marés – 2023	Físico	InOM
	Dados vectorias	Divisão Administrativa e Rede Hidrográfica de Moçambique	*.shp	DIVA-GIS

Fonte: Geosurvey (2023) e Instituto Oceanográfico de Moçambique (2023).

Tabela 4: Informação sobre o estado dos dados

Nome do ficheiro	Descrição
2019_Lev1_NOV_IN_Survey	Levantamento completo
2020_Lev2_JAN_OUT_Survey	Levantamento incompleto – Falta o troço do PK 62 - 76
2022_Lev1_AGO_IN_Survey	Levantamento completo
2023_Lev1_JAN_IN_Survey	Levantamento sem o canal da Matola e Katembe
2023_Lev2_MAI_OUT_Survey	Levantamento sem o canal da Matola e Katembe
<i>Maputo Channel 2022</i>	Actualizado a 12/12/2022 – Revisão 4

Fonte: Geosurvey (2023).

Para o processamento dos dados batimétricos foram usados os programas apresentados na tabela 5:

Tabela 5: Programas usados

Nome	Descrição
<i>BeamworX</i>	Controle de Qualidade, Geração do MDE
<i>Seapath e Valeport</i>	Controle da posição e velocidade do som na água
<i>Cyclone 3D, SierraSoft, BeamworX</i>	Cálculo de Volume assoreado
<i>Global Mapper, QGIS</i>	Gestão de dados e Criação de Mapas Temáticos
<i>AutoCAD, SierraSoft</i>	Desenho gráfico
<i>HydroMagic</i>	Aquisição de dados Feixe simples
<i>Seafloor Information System</i>	Aquisição de dados Multifeixe

3.3.Métodos

Para a realização de uma campanha de dragagem são realizados 3 levantamentos, obedecendo 7 fases. Estes levantamentos são designados de *In Survey* quando os levantamentos são realizados antes da operação da dragagem, *Intermediate Survey* quando o levantamento é realizado ao longo da dragagem e *Out Survey* quando o levantamento é realizado depois de concluída a dragagem e validação dos volumes assoreados encontrados no canal em comparação com os volumes depositados nas áreas de despejo. Todas as campanhas realizadas para obtenção de batimetria, cumprem uma sequência de requisitos para a produção de resultados faseados com a seguinte ordem:

Fase 1: Planeamento do trabalho - para se alcançar melhor resultado foi necessário planejar todas as actividades e métodos de trabalho. Os aspectos fundamentais para garantir a qualidade na aquisição dos dados são:

- Avaliação das características da área de sondagem;
- Planeamento das fiadas principais e as de verificação da sondagem;
- Avaliação do estado da embarcação e do equipamento;
- Verificação da previsão da maré;
- Verificação dos suportes na embarcação e calibração das sondas.

Fase 2: Equipamento usado - para o levantamento batimétrico, foi usada a sonda Multifeixe *Kongsberg EM3002* e para o feixe simples *Kongsberg EA440*. Esta é uma sonda de alta precisão com óptimo desempenho e múltiplas aplicações de observação da profundidade. Para o levantamento topográfico, foi usado um sistema *GNSS GS15 RTK*, usando correcções diferenciais de posicionamento em tempo real.

Tabela 6: Especificações técnicas da sonda *Kongsberg EM3002*

Propriedade	Descrição
Frequência	293, 300 e 307 kHz
Número e sondas por <i>ping</i>	Máximo 254 (<i>single head</i>)
Comprimento do pulso	150 μ s
Ângulo máximo de cobertura	130 graus (<i>single head</i>)
Largura do feixe	1.5 x 1.5 graus
Taxa de <i>ping</i>	No máximo 40 Hz por segundo
Detecção de profundidade	0.5 – 200 metros na frequência 300 khz
Resolução da profundidade	1 cm

Tabela 7: Especificações técnicas da sonda *Kongsberg EA440*

Propriedade	Descrição
Frequência	38 e 200 kHz
Comprimento do pulso	150 µs
Resolução da profundidade	1 cm
Largura do Feixe	1.5 x 1.5 graus
Taxa de ping	No máximo 40 Hz por segundo

Tabela 8: Especificações do GNSS GS15

Propriedade	Descrição
Frequência	L1, L2
Constelações	GPS, GALILEO, GLONASS e BEIDOU
Precisão (1 base)	Hz 8 mm + 1 ppm / V 15 mm + 1 ppm
Medição	Instantânea
Máscara	15 graus
Programa da caderneta	<i>Leica Captivate</i>

Fase 3: Aquisição de dados – esta fase é composta por 6 divisões abaixo apresentadas:

- I. Sistemas de coordenadas - para garantir o posicionamento correcto dos dados do levantamento batimétrico, foram usados os sistemas de referência apresentados na tabela 9.

Tabela 9: Sistema de referência

Referência Horizontal	
Elipsoide	<i>World Global System 1984 (WGS84)</i>
Sistema de Projecção	Universal Transversa de Mercator (UTM)
Fuso e factor de escala	36 Sul e 0.9996
Falso Norte e Falso Este	10 000 000 m e 500 000 m
Referência Vertical	
Zero Hidrográfico ¹	2.00 m de altitude abaixo do Nível Médio do Mar; 6.02 m de altitude abaixo da marca de nivelamento MN1 (1941), cravada na soleira da porta da casa do Marégrafo; 5.66 m de altitude abaixo da marca de nivelamento MN2 (1941), cravada no Molhe junto a doca seca, no lado Oeste; 6.21 de altitude abaixo da marca de nivelamento SH-MN4 (1941), cravada junto a um armazém.
Modelo do Geoide	<i>Earth Gravitational Model 2008 1'</i>

¹ Extraído de Instituto Oceanográfico de Moçambique (2023)

II. Estação de Referência - a Base Permanente ou Estação de Referência *Differential Global Navigation Satellite System (DGNSS)* foi usada para garantir o posicionamento plani-altimétrico. O efeito da maré foi corrigido com base no *Real-Time Kinematic (RTK)* durante a aquisição dos dados, dispensado a tabela de marés visto que o RTK é mais preciso. A Estação de Referência usada já estava referenciada ao zero hidrográfico e as suas coordenadas são apresentadas na tabela 10. O Mapa que contém a sua localização está ilustrado na figura A1.

Tabela 10: Coordenadas da estação de referência

WGS84 - Moçambique UTM Zona 36 Sul			
Ponto	X [m]	Y [m]	ZH [m]
INH1	456 810.00	7 127 299.28	52.27

Para garantir o alcance de sinal de rádio RTK na embarcação, foi colocada uma repetidora na Rádio Naval localizada próximo ao Jardim dos Namorados, na intersecção da Rua do Chuindi, com a Av. Marginal em Maputo, com um alcance de aproximadamente 70 km segundo ilustra o mapa da figura 8. Este procedimento permitiu o correcto posicionamento da embarcação através do programa *Seapath* usado para controlar a qualidade do sinal de rádio emitido pela estação de referência.

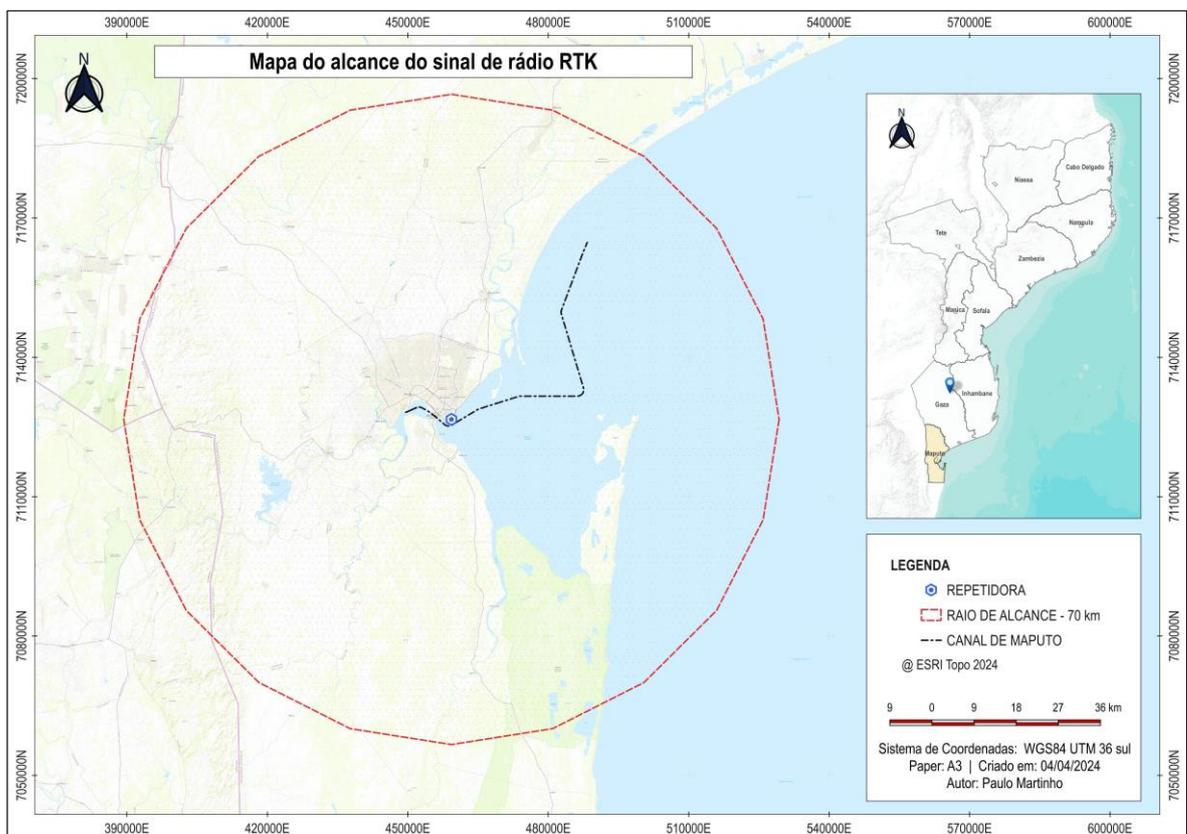


Figura 8: Alcance de sinal de rádio
Fonte: Elaborado pelo autor.

III. Ponto de apoio - para garantir que as sondagens fossem levantadas de forma correcta, utilizou-se o ponto de controlo MN8 2001, com recurso ao receptor GNSS GS15 RTK de dupla frequência para confirmar o posicionamento altimétrico. As suas coordenadas estão descritas na tabela 11.

Tabela 11: Apoio topográfico.

WGS84 - Moçambique UTM Zona 36 Sul			
Nome	X [m]	Y [m]	ZH [m]
MN8 2001	456 901.23	7 126 829.44	5.03

IV. Levantamento batimétrico no canal - o levantamento batimétrico consiste no uso de uma embarcação preparada para o efeito, que deve ter os seguintes equipamentos montados e ilustrados na figura 9:

- O transdutor que ligado a sonda permite fazer a medição de profundidade,
- O *Seapath* – fornece o posicionamento das medições realizadas através das correcções em tempo real emitidas pela estação de referência. O sistema possui receptores de sinal de rádio,
- *Inercial Motion Unit* (IMU) – que serve para compensar os movimentos da embarcação,
- *Universal system Mouting* (USM) ou suporte do transdutor, antenas e IMU,
- Os computadores para a aquisição de dados, efectuados através do programa *Seafloor Information System* (SIS), *Valeport* para importação dos dados do *SVP*, *SVP Editor* para edição do perfil do som na água, e *Helsman* para a navegação.

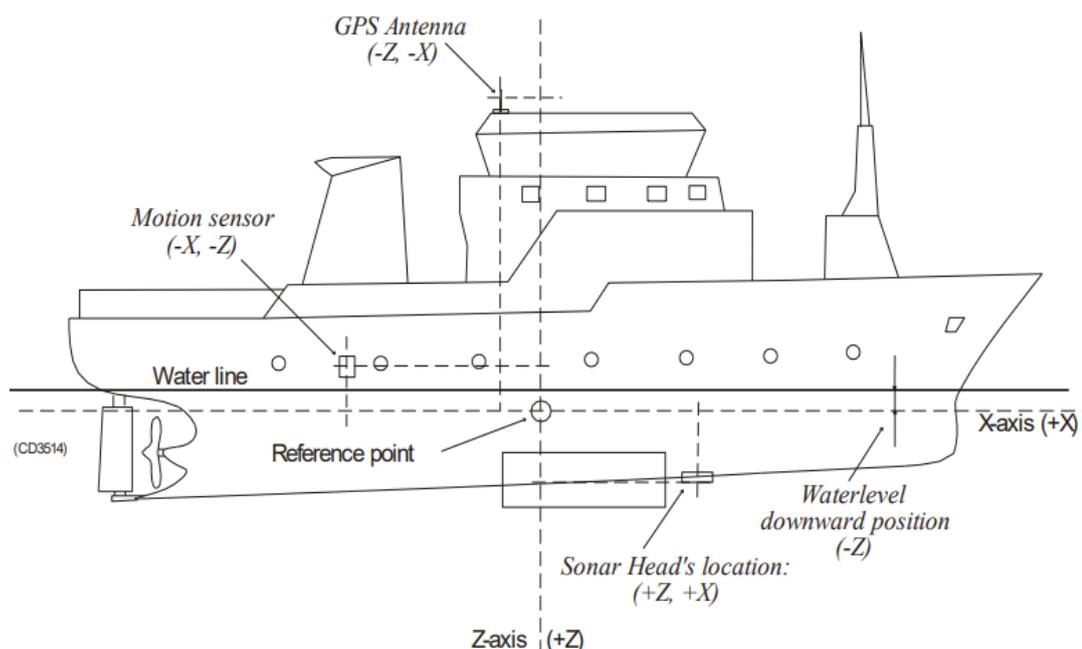


Figura 9: Disposição dos equipamentos numa embarcação de sondagem.
Fonte: Kongsberg (2018).

V. *Patch Test* (Calibração) – é um teste realizado no sistema para quantificar a precisão e alinhamento do sistema multifeixe. Os testes devem incluir a determinação de tendências residuais no erro de rotação, rumo e tempo de navegação. Esses valores serão utilizados para corrigir o alinhamento inicial e calibrar o sistema multifeixe. Para o efeito, foram planeadas fiadas paralelas com a disposição e procedimentos indicados na figura 10.

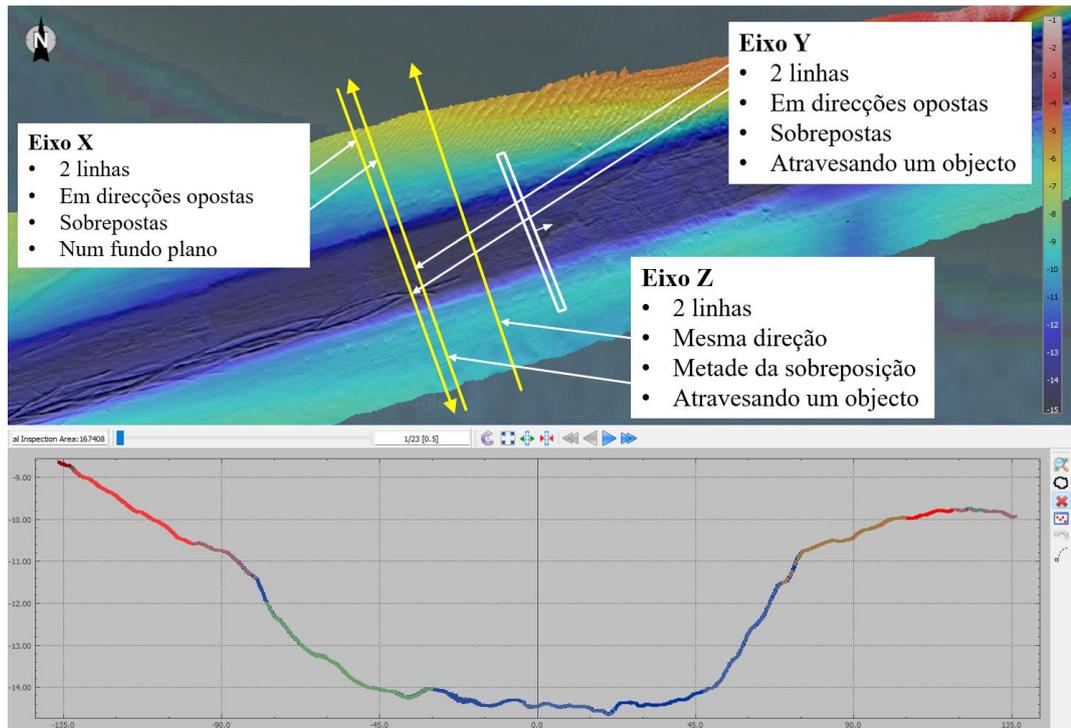


Figura 10: Regras de calibração
Fonte: Kongsberg 2018

A embarcação teve de realizar as fiadas de calibração antes da aquisição dos dados de batimetria para obtenção dos valores de *Roll*, *Pitch* e *Heading* (*Heave*) conforme apresentado na figura 11.

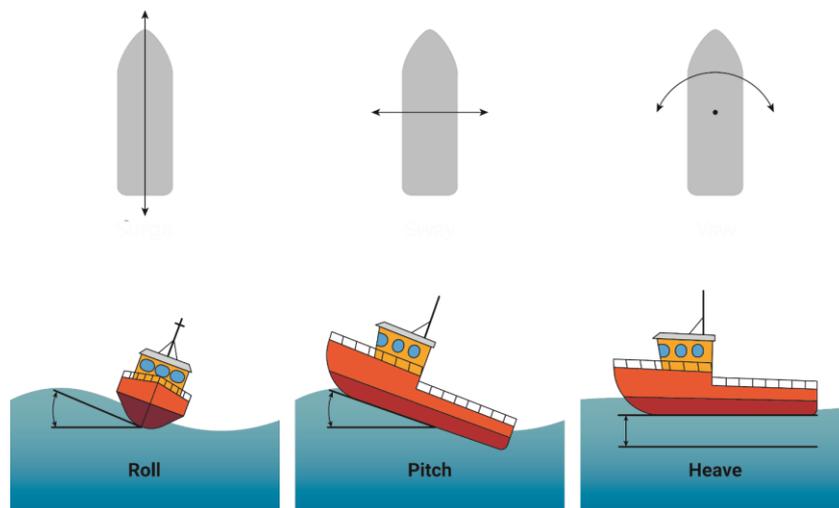


Figura 11: Parâmetros de calibração.
Fonte: Gagg (2012) e Estumar (2024).

VI. Perfil da velocidade do som na água – para garantir que os critérios gerais de precisão da medição de profundidade sejam atendidos, as observações da velocidade do som devem ser obtidas com frequência, densidade e precisão suficientes. A precisão com a qual a velocidade da correcção do som pode ser determinada mesmo sabendo que ela é uma função complexa da precisão com a qual a salinidade, a temperatura e a profundidade, ou alternativamente, a velocidade e a profundidade do som, podem ser medidas. Na figura 12, é apresentado um exemplo de um perfil de velocidade de propagação do som na água em função da profundidade medido pelo perfil da velocidade do som.

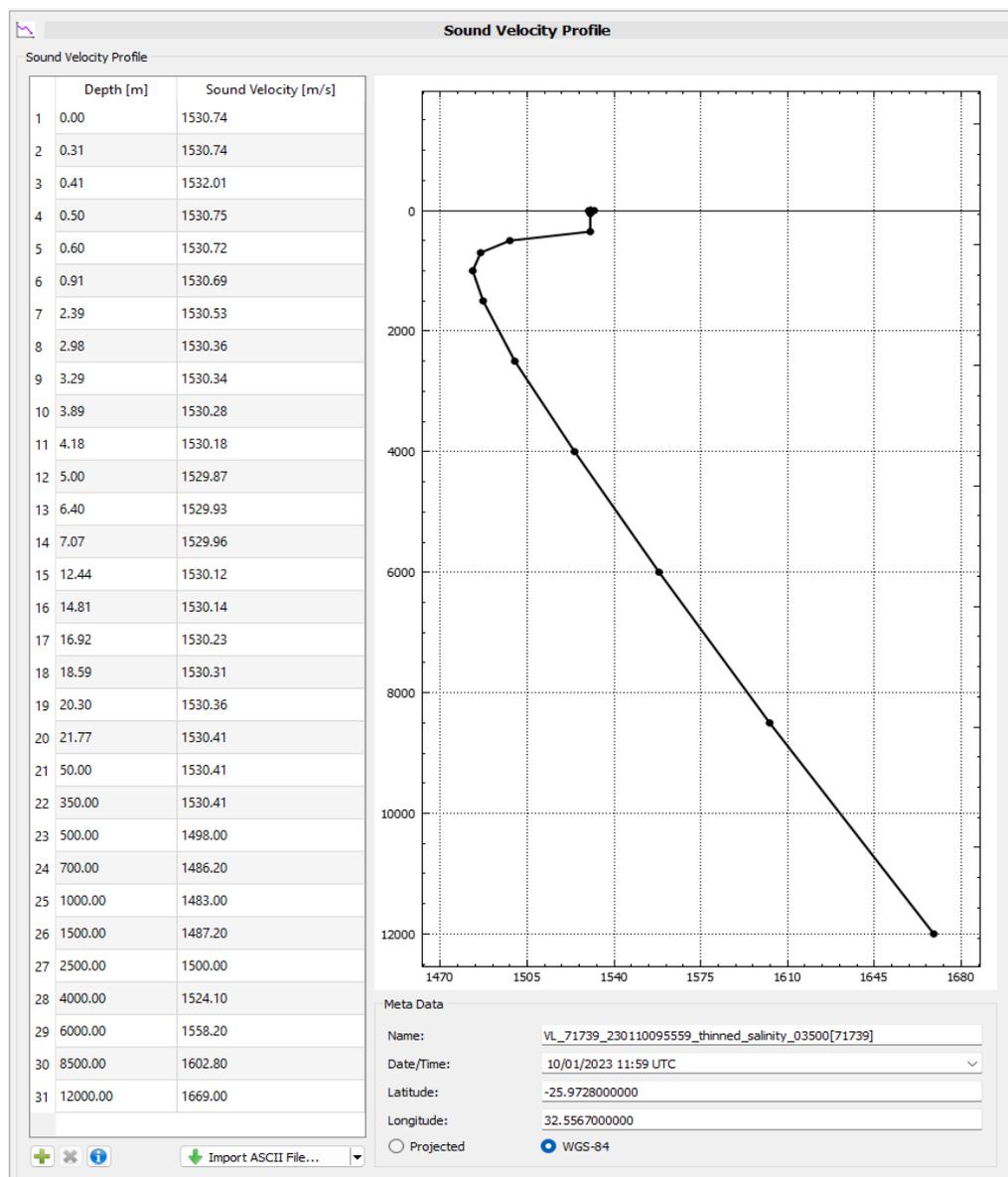


Figura 12: Perfil da velocidade do som na água.
 Fonte: Extraído do programa de processamento *Beamworkx*.

A aquisição e processamento de dados, também é ilustrada entre as figuras A1 a A11, e as tabelas A1 a A7 patentes no anexo do presente trabalho.

Fase 4: Controlo de qualidade - o procedimento utilizado para a avaliação da qualidade visa auferir as diferenças do posicionamento plani-altimétrico, este procedimento foi realizado para todos dados brutos e processados. E de igual forma foi realizada a calibração dos ângulos para ajustar os dados brutos. Um dos procedimentos de controlo de qualidade é usar levantamentos batimétricos anteriores e fazer comparação com o actual nos locais onde as variações ao longo do canal são menores, localizadas maioritariamente no topo do talude do canal. Onde a comparação apresenta maiores alterações são considerados locais assoreados ou pode ter sido realizado um mau processamento dos dados naquela zona específica.

Na figura 13, estão representados os seguintes levantamentos:

- 2022 *In_Survey* (multifeixe) – linha amarela
- 2023 *Out_Survey* (multifeixe) – linha contendo várias cores
- Superfície teórica do canal – linha azul

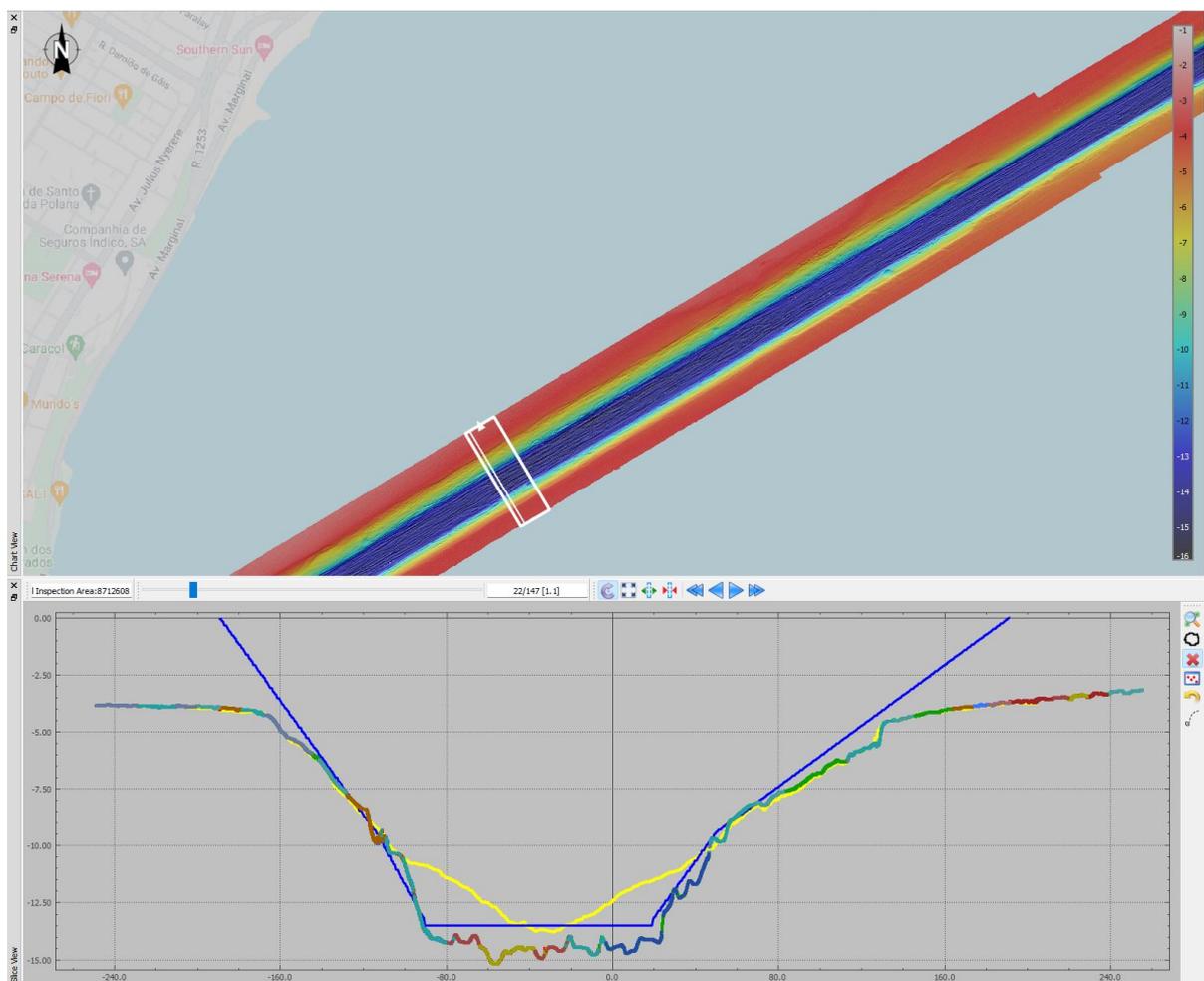


Figura 13: Controlo de qualidade – comparação de superfícies.
Fonte: Extraído do programa de processamento *Beamworkx*.

Fase 5: Processamento de dados - para o processamento de dados foram usados os softwares *BeamworX 2023.2*, *SierraSoft 15* e o *Cyclone 3DR*. Estes dois últimos com o objectivo de fazer o controle de qualidade dos resultados.

A calibração, a inserção dos *offsets*, e a aquisição do perfil da velocidade da propagação do som na água, entre outros garantem a credibilidade do processamento, diminuindo a quantidade de ruído a ser eliminado. A filtragem dos dados incluiu a detenção, análise e eliminação de todas as profundidades incorrectas. Depois desta actividade de limpeza, os dados foram exportados em dois ficheiros distintos, um ficheiro com a superfície geral, contendo todos os pontos e outro ficheiro com as sondas médias, de resolução 1x1 m. Todas as superfícies foram exportadas no formato xyz. A figura 14, mostra o resultado do processamento dos dados multifeixe e a figura 15, ilustra o resultado do feixe simples ambas extraídas do *Beamworx*.

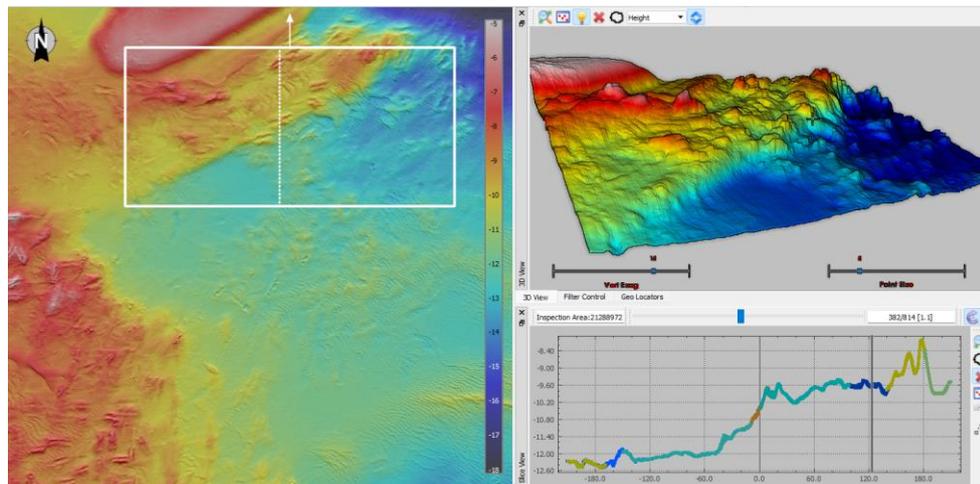


Figura 14: Processamento dos dados batimétricos (Multifeixe).
Fonte: Extraído do programa de processamento *Beamworkx*.

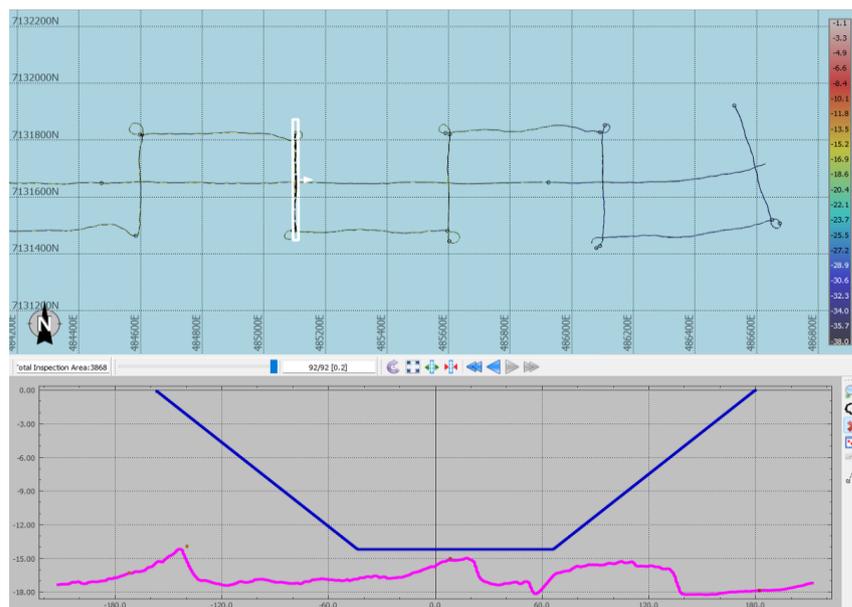


Figura 15: Processamento dos dados batimétricos (Feixe Simples).
Fonte: Extraído do programa de processamento *Beamworkx*.

Condicionantes do levantamento hidrográfico - durante a execução destes levantamentos, e de forma geral, destacaram-se algumas condicionantes que têm sido frequentes ao longo do trabalho:

- Existência de embarcações atracadas na zona dos Cais o que não permitiu a realização do levantamento na parte mais encostada aos mesmos;
- Más condições meteorológicas que alteraram o cronograma inicial;
- Alteração da embarcação usada no levantamento;
- Avaria de motores da draga e dos equipamentos de sondagem.

Fase 6: Cálculos efectuados

Para se efectuar o cálculo de volume e taxa de assoreamento pelo método de intersecção de modelos de superfície, recorreu-se as seguintes fórmulas:

- a) Cálculo de volume 1 - a figura 16, ilustra a representação esquemática do cálculo de volume assoreado e erodido tendo a cota de projecto ($Z = -18.00$ m) como referência. Adaptado de Silva e Brito (2019).

$$\text{Volume 1} = \text{Superfície Modelada} - \text{Plano de Referência} [\text{m}^3] \quad (4)$$

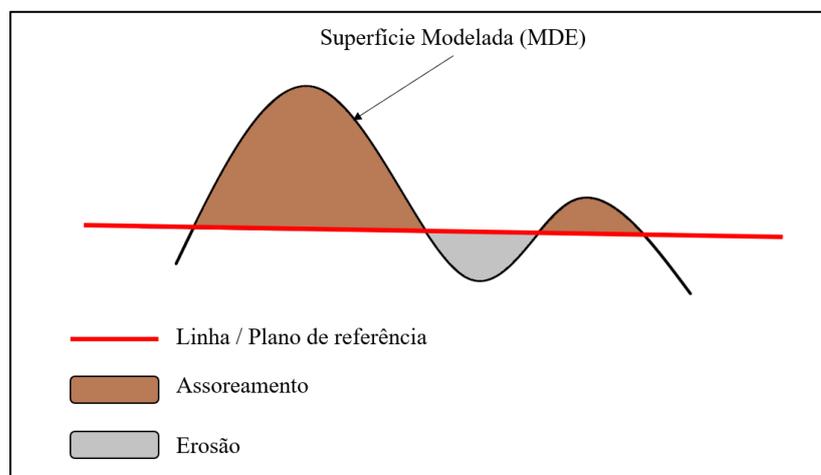


Figura 16: Cálculo de volume 1
Fonte: Adaptado de Silva e Brito (2019).

- b) Cálculo de volume 2 - a figura 17, ilustra a representação esquemática do cálculo de volume assoreado e erodido entre Modelos Digitais de Elevação correspondentes a batimetrias consecutivas. Adaptado de Silva e Brito (2019).

$$\text{Volume 2} = \text{Batimetria Precedente} - \text{Batimetria Posterior} [\text{m}^3] \quad (5)$$

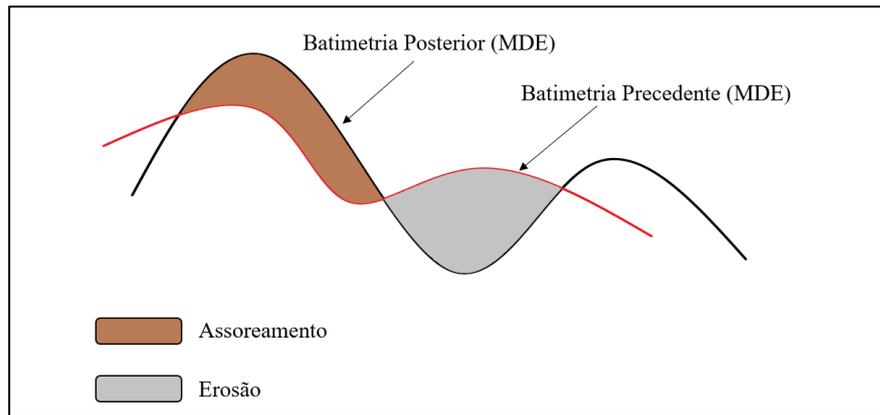


Figura 17: Cálculo de volume 2
 Fonte: Adaptado de Silva e Brito (2019).

- c) Cálculo da taxa de assoreamento - a taxa de assoreamento foi calculada com base na fórmula número 2.
- d) Cálculo da variação altimétrica - a medição entre o fundo da superfície teórica do canal e o topo do sedimento acumulado é calculada a partir das diferenças de cotas segundo ilustrado na figura 18.

$$\text{Variação altimétrica} = \text{Cota do topo do sedimento} - \text{Cota do fundo do desenho do canal [m]} \quad (6)$$

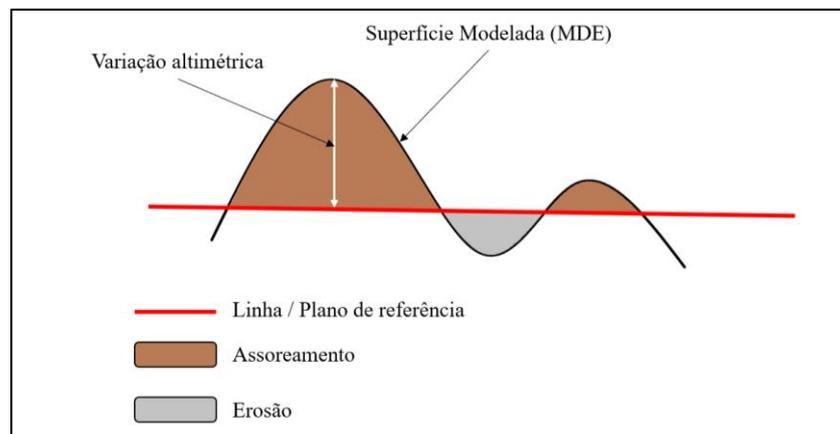


Figura 18: Medição da variação altimétrica
 Fonte: Adaptado de Silva e Brito (2019).

Fase 7: Geração de mapa batimétrico - o mapa batimétrico possui informações pontuais do levantamento batimétrico realizado. Ele possui coordenadas e sua profundidade em planta está referenciada ao zero hidrográfico. Adaptado de Carvalho (2016).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resultado do processamento do levantamento batimétrico com recurso ao multifeixe foi o modelo digital de elevação com 1 metro de resolução, em que cada ponto possui um valor de incerteza vertical associado à estimação da profundidade. O resultado apresentado, está relacionado com os dados adquiridos em campo com equipamentos calibrados e todo o procedimento de controlo de qualidade observado. O produto final é um modelo tridimensional do fundo do canal referenciado ao zero hidrográfico.

Em relação ao feixe simples, o resultado foi um perfil de pontos ao longo do trajecto descrito pela embarcação, em que cada ponto possui um valor de incerteza vertical associado à estimação da profundidade, e que permitiu fazer a verificação da consistência dos dados através da comparação entre os dados do feixe simples e o multifeixe.

4.1. Resultado da calibração dos dados do multifeixe

Após o processo de calibração, obteve-se as médias dos ângulos de rotação *Roll*, *Pitch* e *Heading*, recomendados para serem aplicados no processamento dos dados da batimetria, conforme representa a figura 19.

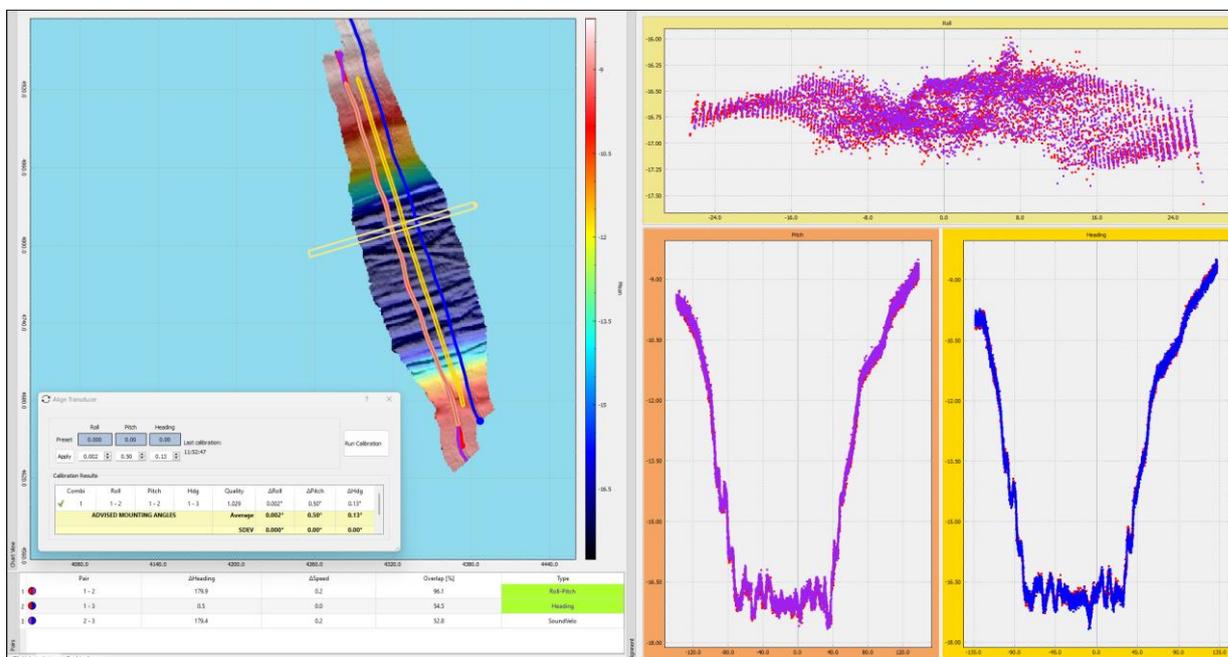


Figura 19: Calibração dos dados do multifeixe.

Na tabela 12, são ilustrados alguns resultados das várias calibrações feitas em períodos e locais diferentes ao longo do canal de acesso e nas áreas de despejo dos sedimentos.

Tabela 12: Resultados da calibração feita em 2023

Local/Canal	Data	Eixo X (<i>Roll</i>) [°]	Eixo Y (<i>Pitch</i>) [°]	Eixo Z (<i>Heading</i>) [°]
Polana	23/04/2023	-0.005	0.47	0.24
Xefina	30/03/2023	0.161	0.22	-0.62
Norte	20/04/2023	0.191	-0.07	-2.39
Despejo 3	02/05/2023	0.023	0.40	0.17
Despejo 8	16/05/2023	0.116	0.42	1.06

4.2. Mapa batimétrico de 2019

O levantamento batimétrico representado na figura 20, é o resultado do levantamento realizado em 2019 em toda extensão do canal de acesso ao Porto de Maputo. Este levantamento serviu para a execução do planeamento das fiadas e como base de controlo de qualidade para o levantamento realizado em 2020.

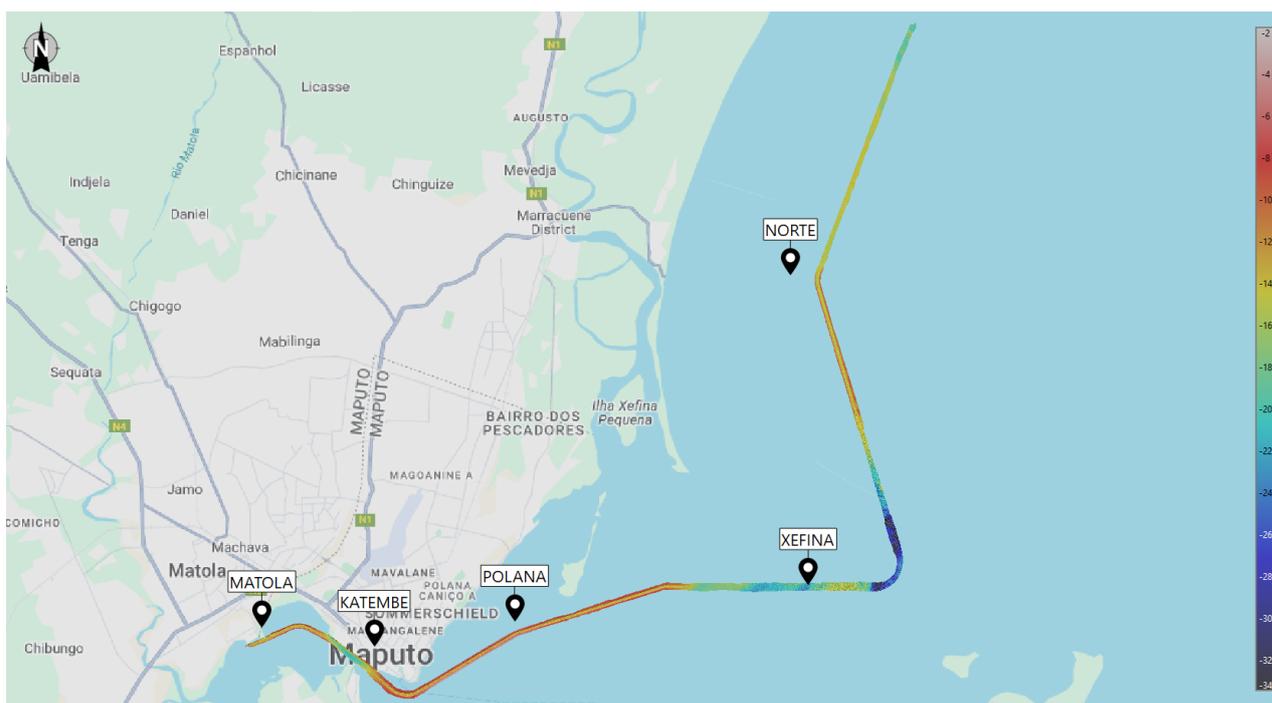


Figura 20: Mapa batimétrico de 2019

4.3. Mapa batimétrico de 2020

O levantamento batimétrico representado na figura 21, é o resultado da sondagem realizada no ano de 2020, em toda extensão do canal de acesso ao Porto de Maputo. Este levantamento serviu para a execução do planeamento das fiadas e como base de controlo de qualidade para o levantamento realizado em 2022.

4.5. Mapa batimétrico de 2023 (1)

O levantamento batimétrico representado na figura 23, é o resultado do levantamento batimétrico realizado no ano de 2023, no canal de acesso ao Porto de Maputo com a excepção de Matola e Katembe. Este levantamento serviu para a execução do planeamento das fiadas e como base de controlo de qualidade para o levantamento realizado em 2023 (2).

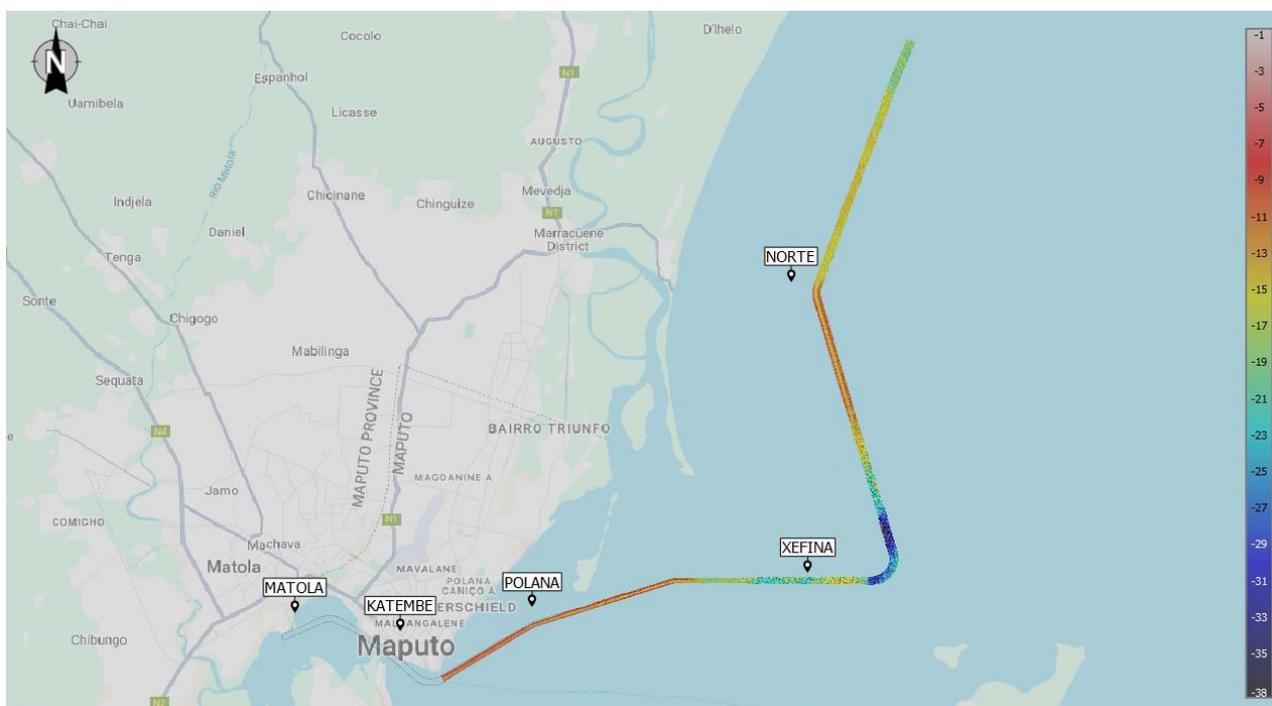


Figura 23: Mapa batimétrico de 2023 (1)

4.6. Mapa batimétrico de 2023 (2)

A batimetria ilustrada na figura 24, é resultado do processamento feito durante a execução do presente estudo. Após o cálculo de volume de assoreamento no canal, constatou-se que a dragagem não foi efectiva remanescendo cerca de 44 415 m³ de sedimento no fundo do canal necessitando por ser dragado.

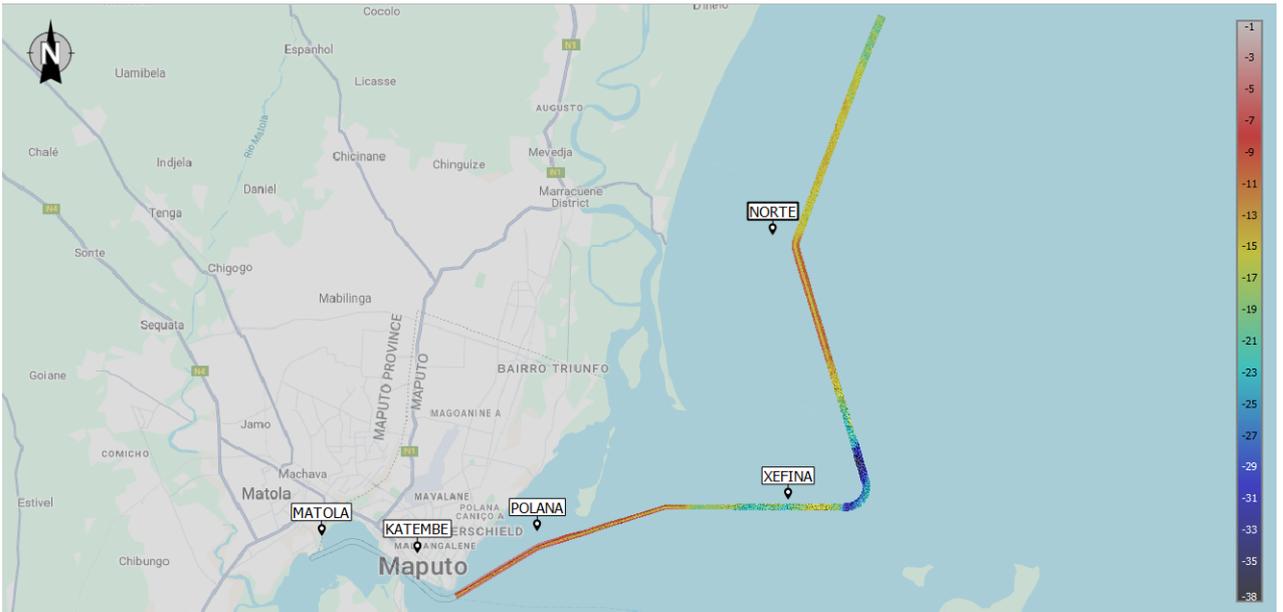


Figura 24: Mapa batimétrico de 2023 (2)

4.7. Resultado do volume de assoreamento calculado

O Cálculo do volume do assoreamento foi feito no *Software BeamworX* pelo método de intersecção de modelos de superfície onde a superfície teórica do canal foi tomado como referência tendo como base a fórmula 4. A figura 25, apresenta os resultados encontrados.

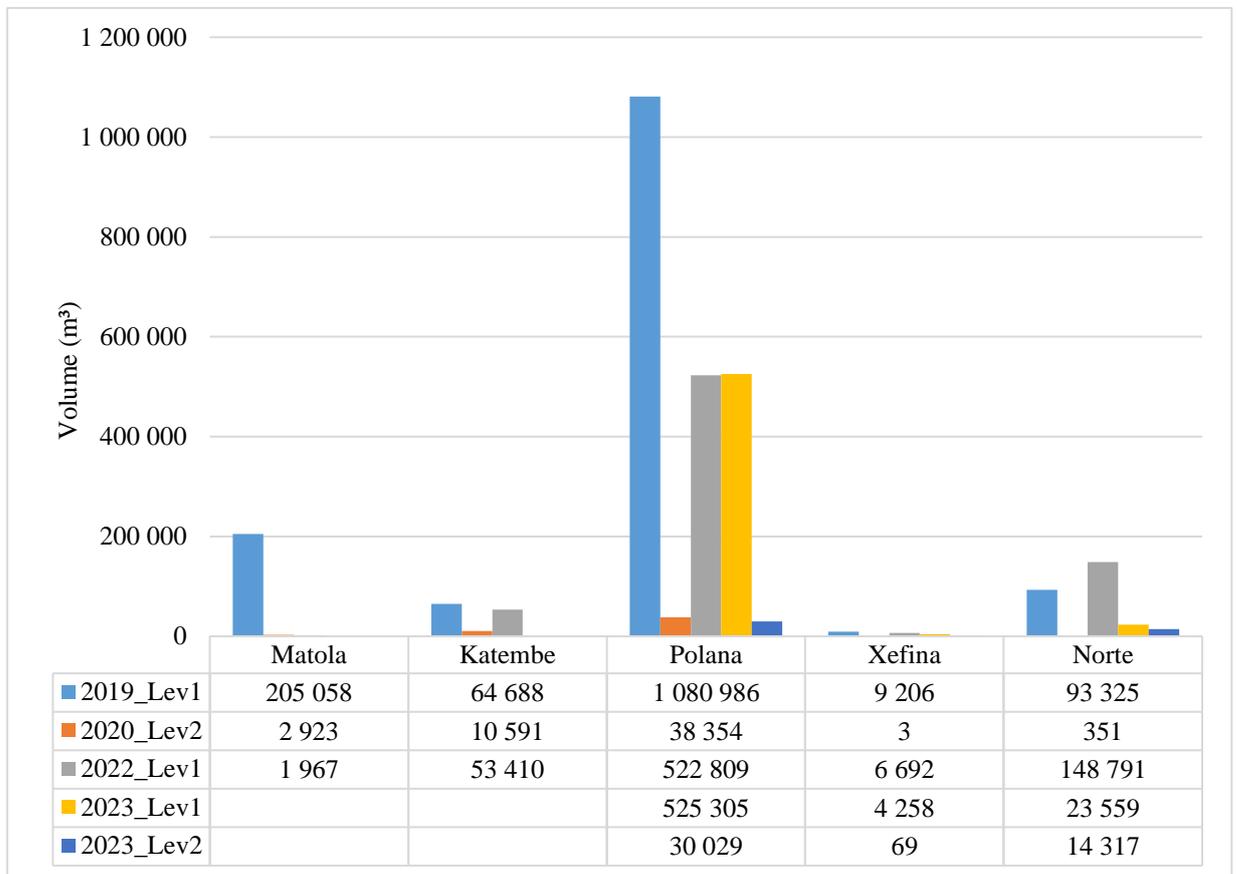


Figura 25: Resultado do volume de assoreamento calculado com base no desenho do canal

Em 2020 o canal da Xefina teve um valor reduzido de assoreamento este resultado foi devido a dragagem bem realizada no ano de 2019, diferente do que se passou em 2022, onde após 2 anos sem sondagens, todos os troços apresentaram volumes de assoreamento significantes com maior enfoque para o canal da Polana e menor para Matola.

O Cálculo de volume foi realizado no *software BeamworX* pelo método de intersecção de modelos de superfície onde o levantamento anterior foi tomado como referência obedecendo o princípio da fórmula 5. A figura 26, apresenta os resultados dos volumes calculados.

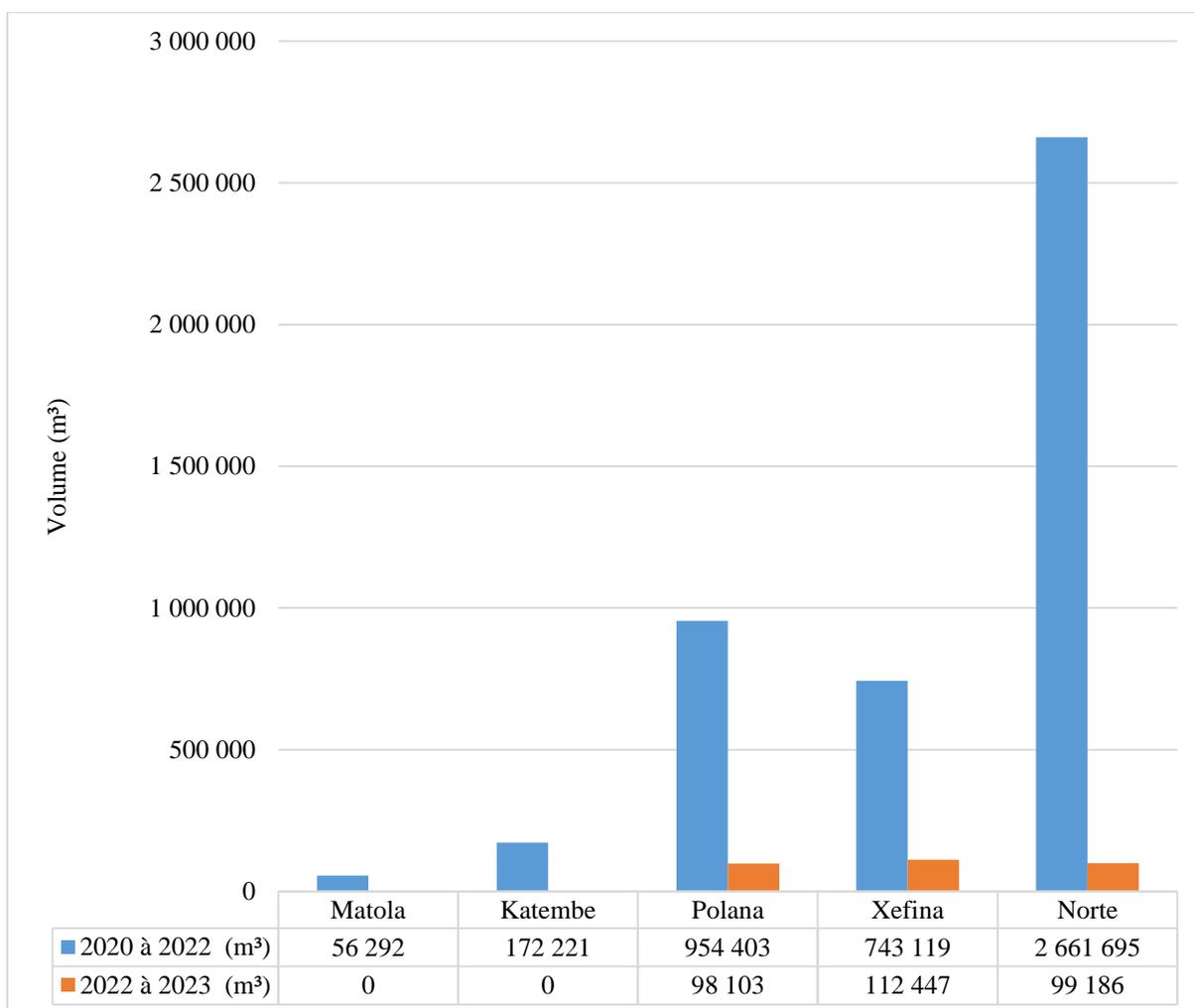


Figura 26: Resultado do volume de assoreamento com base nos levantamentos realizados

A variação de volume entre as batimetrias no período de 2020 a 2022 indicam um aumento considerável de volume de sedimentos no canal da Norte, Polana e Xefina, que posteriormente foram removidos por meio de dragagem. No período de 2022 a 2023 verificou-se uma redução significativa na ordem dos 90% para Polana, 85% para Xefina e 96% para o canal Norte.

4.8. Variação altimétrica do sedimento

Com base nos levantamentos 2022 *In Survey* e 2023 *In Survey* extraiu-se as diferenças altimétricas em cada troço do canal, tendo como base de medição a superfície teórica do canal. Neste processo, foi considerado o sedimento assoreado, ou seja, acima da superfície teórica canal nos locais com maior amplitude. A figura 27, mostra os resultados encontrados.

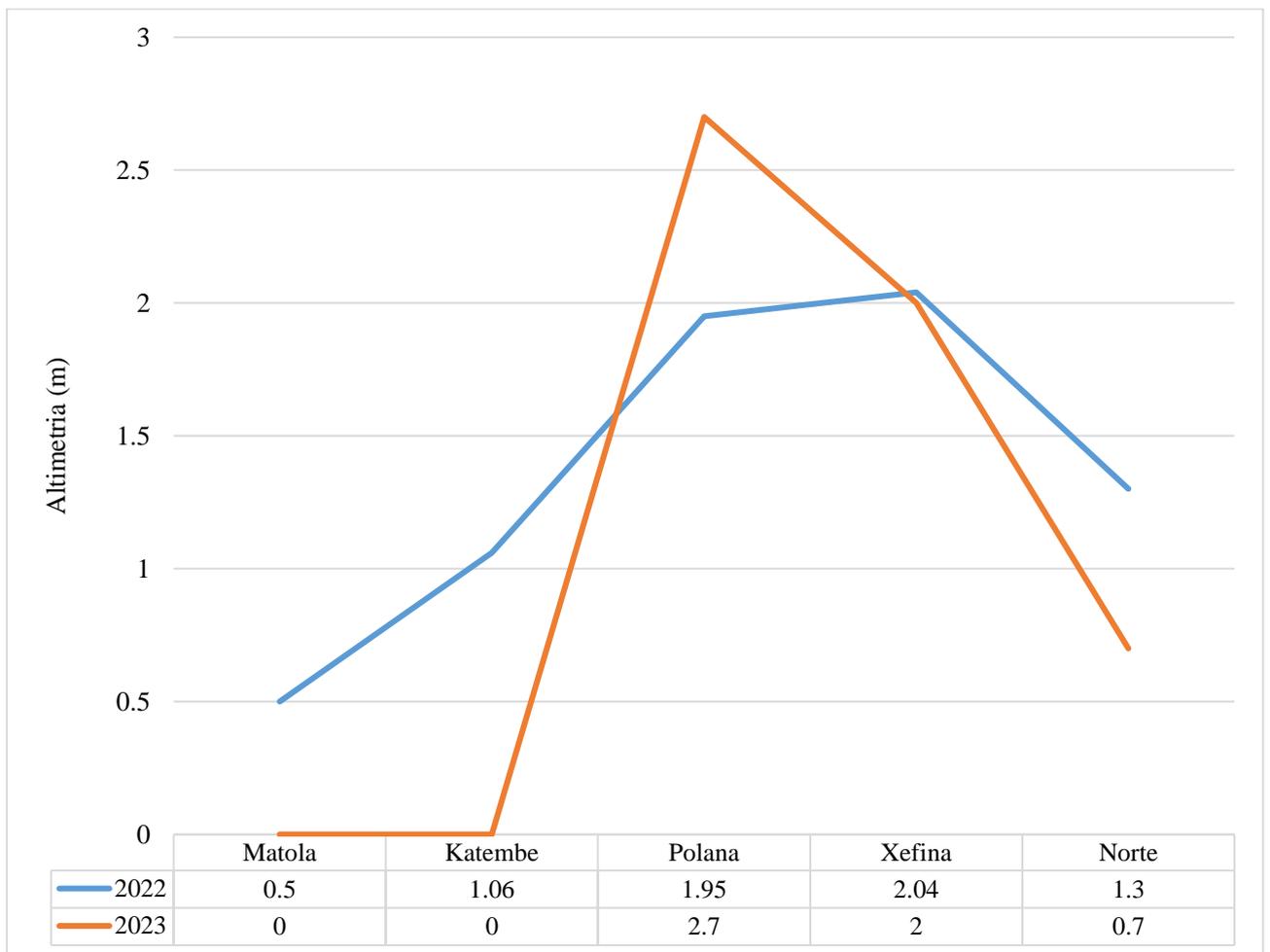


Figura 27: Variação altimétrica de 2022 a 2023.

O nível altimétrico dos sedimentos no canal está relacionado ao seu volume e a taxa de assoreamento pelo que, pode-se ver que o canal da Polana apresenta para o período em estudo valores altos de concentração de sedimentos o que torna este troço inseguro para a navegação. Este cenário pode ser observado nas figuras 27 e 38.

4.9.Taxa de assoreamento

Em relação a Taxa de assoreamento tem-se o seguinte, de 2020 a 2022 a diferença temporal foi de 19 e de 2022 a 2023, apenas 5 meses. A figura 28, apresenta os valores calculados para a taxa de assoreamento.

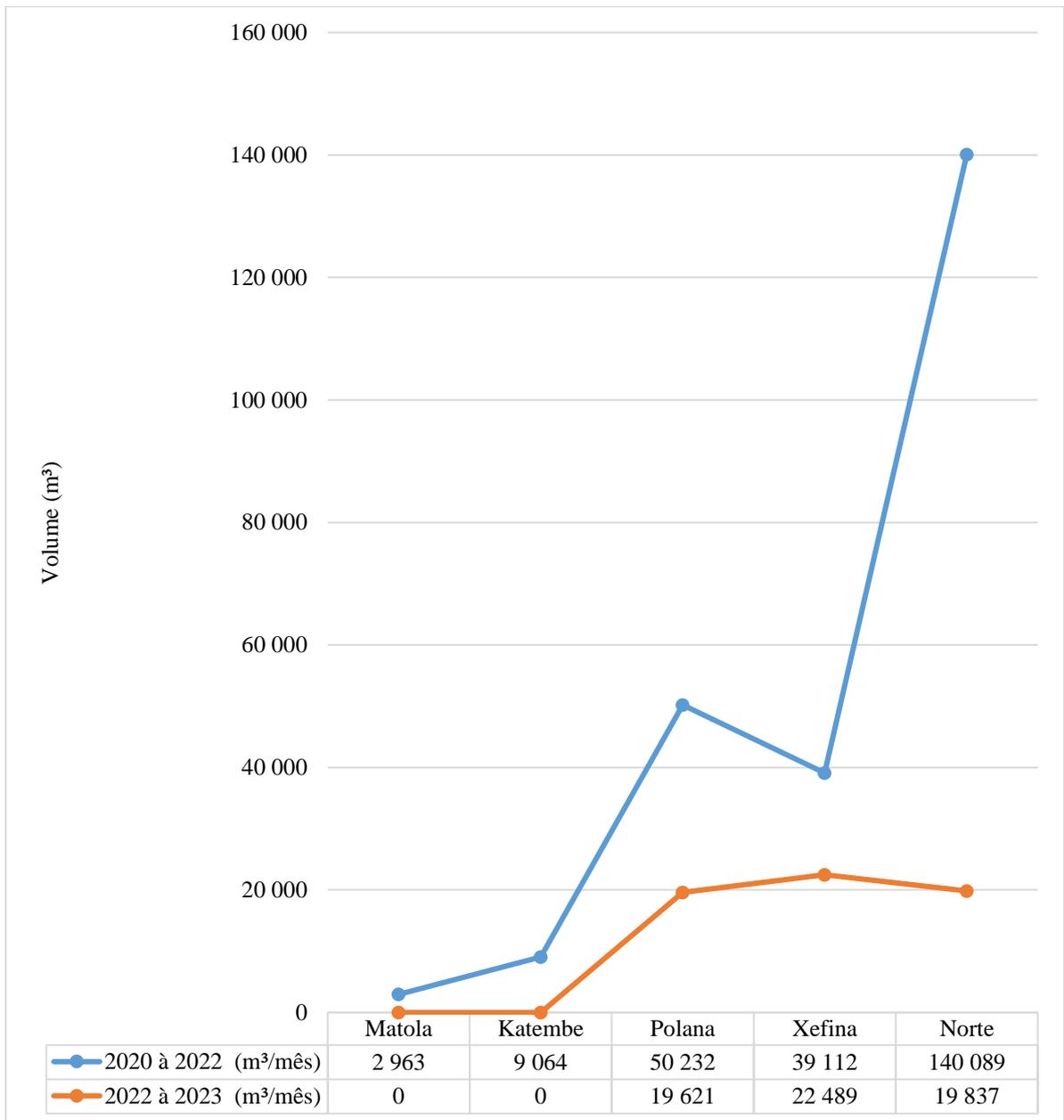


Figura 28: Taxa de assoreamento no período de 2020 à 2022 e 2022 à 2023

Para o período em estudo, os canais Norte e da Polana são os troços mais críticos apresentando taxas de assoreamento bastante altas requerendo maior atenção nas próximas campanhas.

4.10. Áreas de assoreamento nos canais de acesso ao porto de Maputo

4.10.1. Canal da Matola

Na tabela 13, são indicados os resultados do canal da Matola, que é o trecho mais extremo do canal de acesso ao porto de Maputo.

Tabela 13: Dados gerais do canal da Matola

Propriedade	Descrição
Nome	Canal da Matola
Coordenadas de Início	25°57'51.63"S 32°29'46.10"E (UTM36S)
Coordenadas do fim	25°57'24.82"S 32°31'59.72"E (UTM 36S)
Extensão	4 km
Largura do fundo do canal	110 m
Área	1 490 000 m ²
Profundidade média	13.5 m (ZH)

Na figura 29, está o esquema de uma secção transversal da superfície teórica do canal ao longo do troço de Matola.

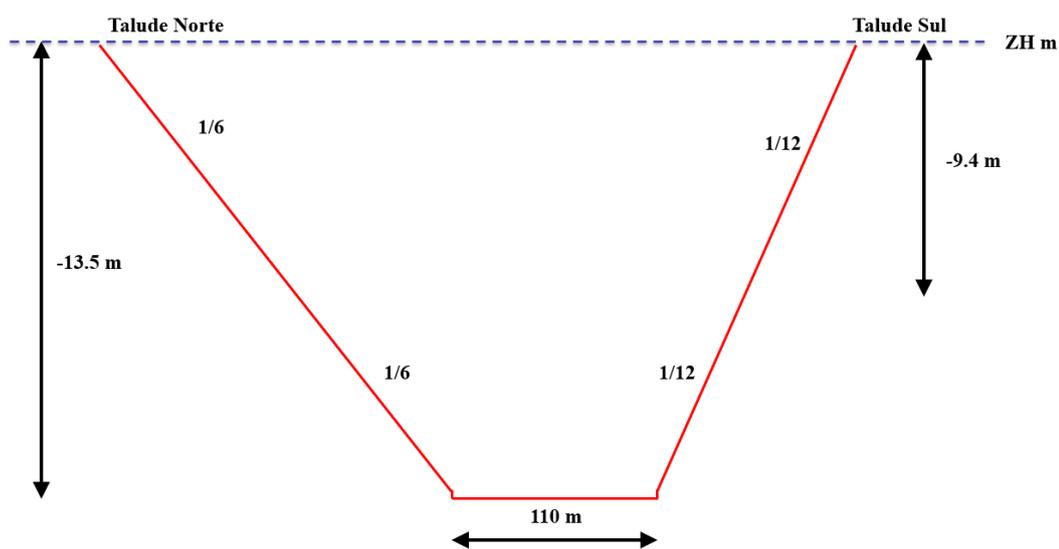


Figura 29: Secção transversal no canal da Matola

O esboço da figura 29, ilustra o corte transversal do canal da Matola de forma a se observar a sua configuração teórica, onde a profundidade média é de 13.5 m, os taludes de 1/6 e 1/8 e a largura do canal 110 m, por onde se armazena maior quantidade de sedimentos.

Em seguida, a figura 30, ilustra uma zona, com sedimentos no fundo do canal de acesso no troço da Matola, próximo ao terminal de combustíveis. Com base na descrição feita na legenda é possível ver que nesta secção específica, houve acumulação de sedimento no pé do talude.

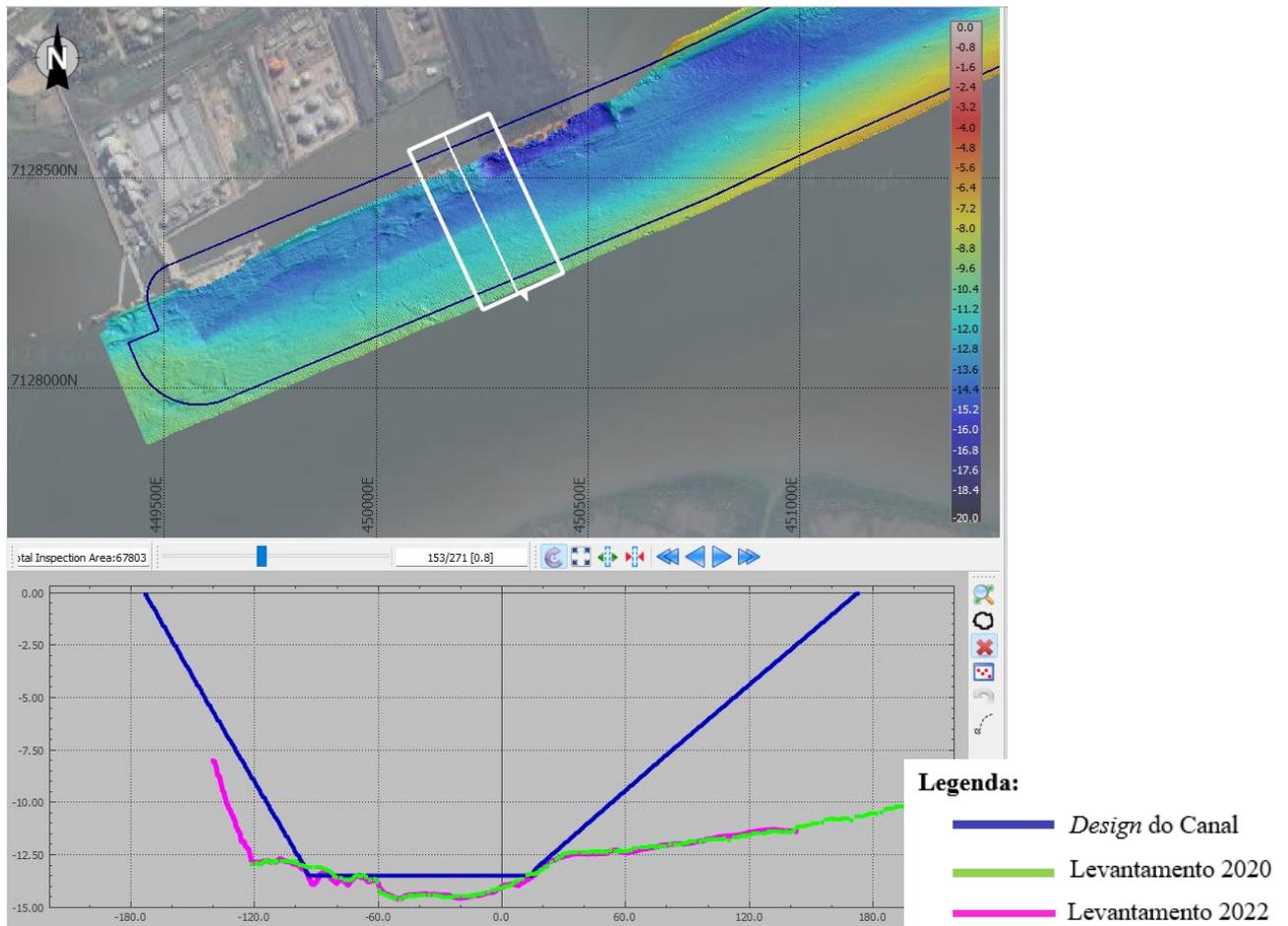


Figura 30: Área de assoreamento no canal da Matola

O padrão dos sedimentos e a configuração das superfícies no perfil transversal apresentado na figura 30, é quase idêntico para os anos de 2020 e 2022. Isso mostra que quanto mais levantamentos batimétricos forem realizados melhor será a percepção sobre a dinâmica sedimentar no canal da Matola.

A figura 31, ilustra o levantamento batimétrico realizado em 2020 no canal da Matola.

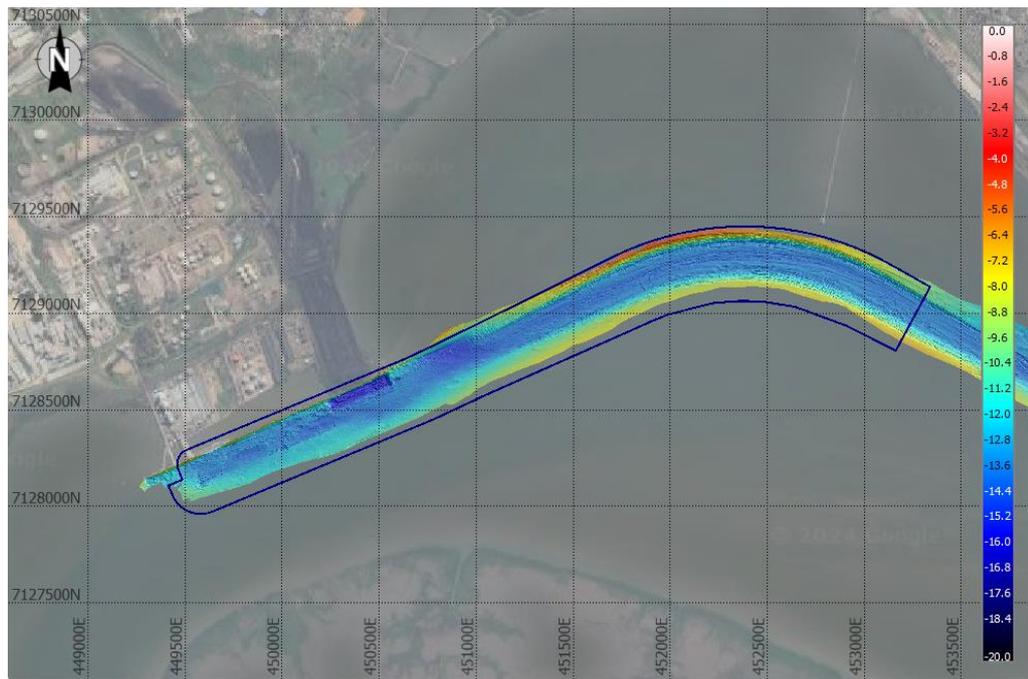


Figura 31: Levantamento batimétrico de 2020 no canal da Matola

A figura 32, ilustra o levantamento batimétrico realizado no ano de 2022 no canal da Matola. Algumas diferenças são notáveis no início dos dois levantamentos.

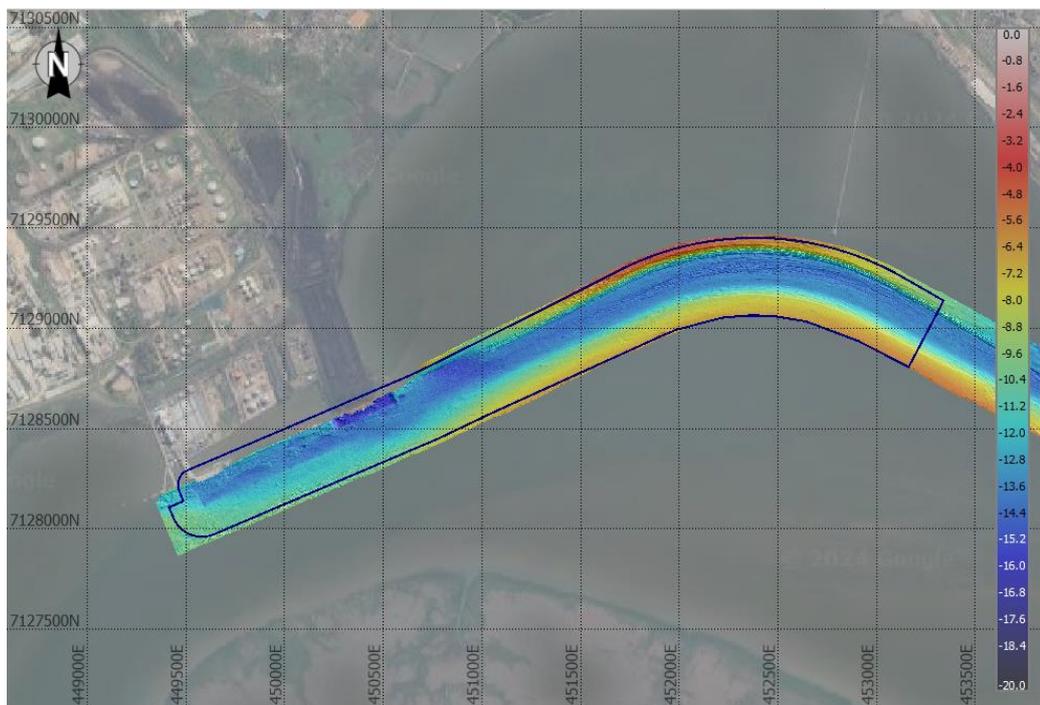


Figura 32: Levantamento batimétrico de 2022 no canal da Matola

4.10.2. Canal da Katembe

Na tabela 14, são indicados os resultados do canal da Katembe, que é o canal de acesso ao porto de Maputo localizado junto ao Cais.

Tabela 14: Dados gerais do canal da Katembe

Propriedade	Descrição
Nome	Canal da Katembe
Coordenadas de Início	25°57'24.82"S 32°31'59.72"E (UTM 36S)
Coordenadas do fim	25°59'12.29"S 32°35'57.27"E (UTM36S)
Extensão	8 km
Largura do fundo do canal	110 m
Área	3 020 000 m ²
Profundidade média	13.5 m (ZH)

Na figura 33, está representado o esquema de uma secção transversal superfície teórica do canal ao longo do troço de Katembe.

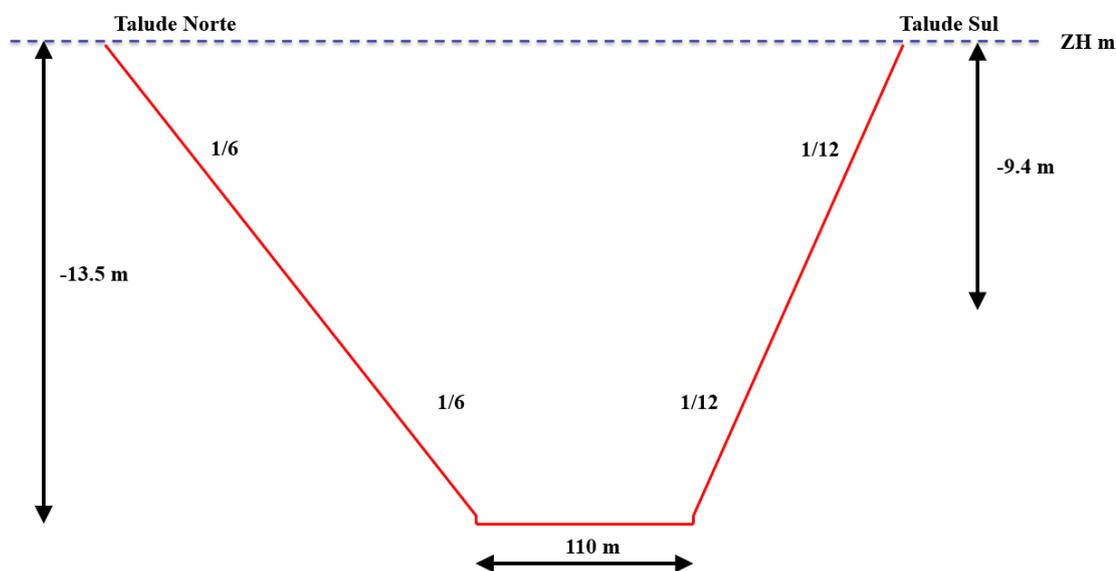


Figura 33: Secção transversal no canal da Katembe

O esboço da figura 33, ilustra o corte transversal de forma a se observar a configuração teórica do desenho do canal ao longo do canal da Katembe, onde a profundidade média é de 13,5 m, os taludes de 1/6 e 1/12 e a largura do canal 110 m.

Na figura 34, pode-se notar que os sedimentos têm sempre a tendência de iniciar junto ao pé de talude e migrar para o centro do canal. Este fenômeno torna-se perigoso a medida que a variação altimétrica aumenta.

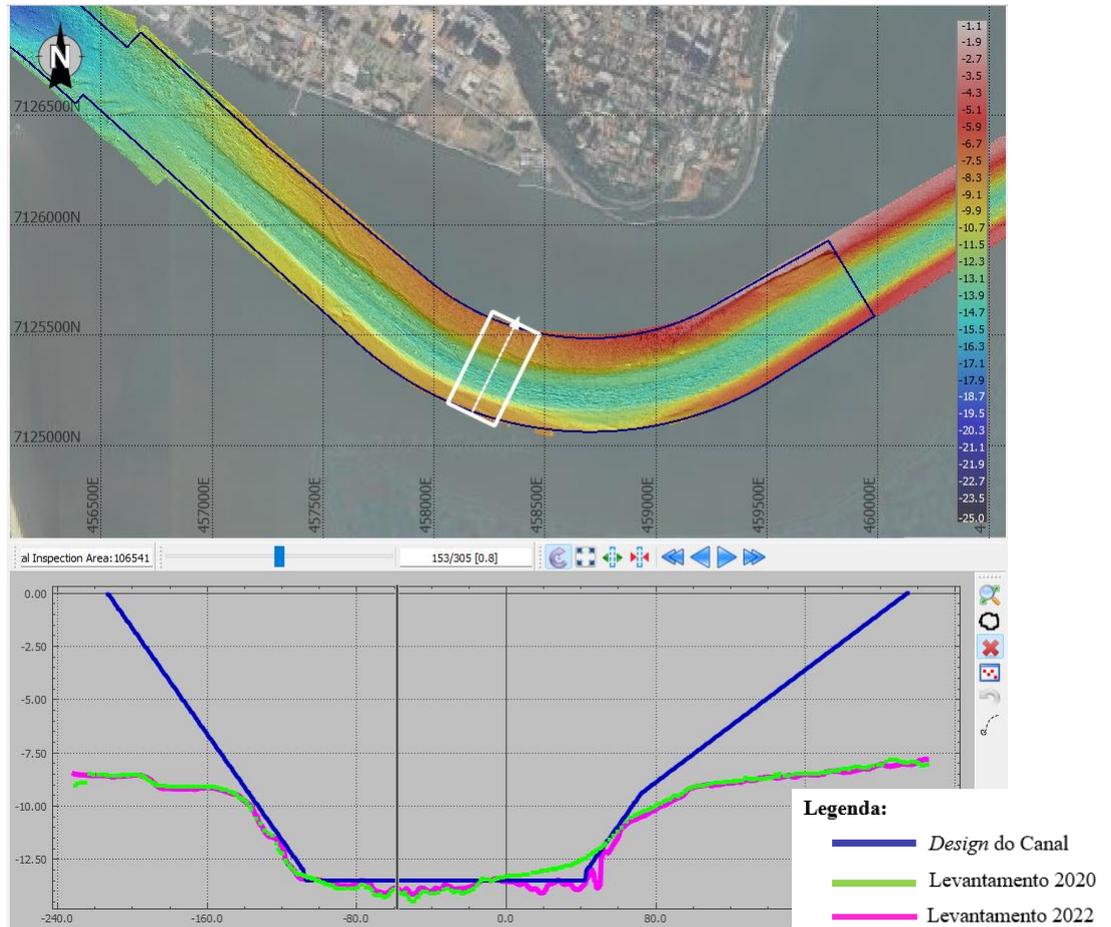


Figura 34: Área de assoreamento no canal da Katembe

O padrão dos sedimentos e a configuração das superfícies no perfil transversal apresentado na figura 34, é quase idêntico para os anos de 2020 e 2022. Isso mostra que quanto mais levantamentos batimétricos forem realizados melhor será a percepção sobre a dinâmica sedimentar no canal da Katembe.

A figura 35, ilustra o levantamento batimétrico realizado em 2020 no canal da Katembe. Nota-se que na zona do Cais a profundidade é em média 19 metros o que garante uma segurança para as embarcações.

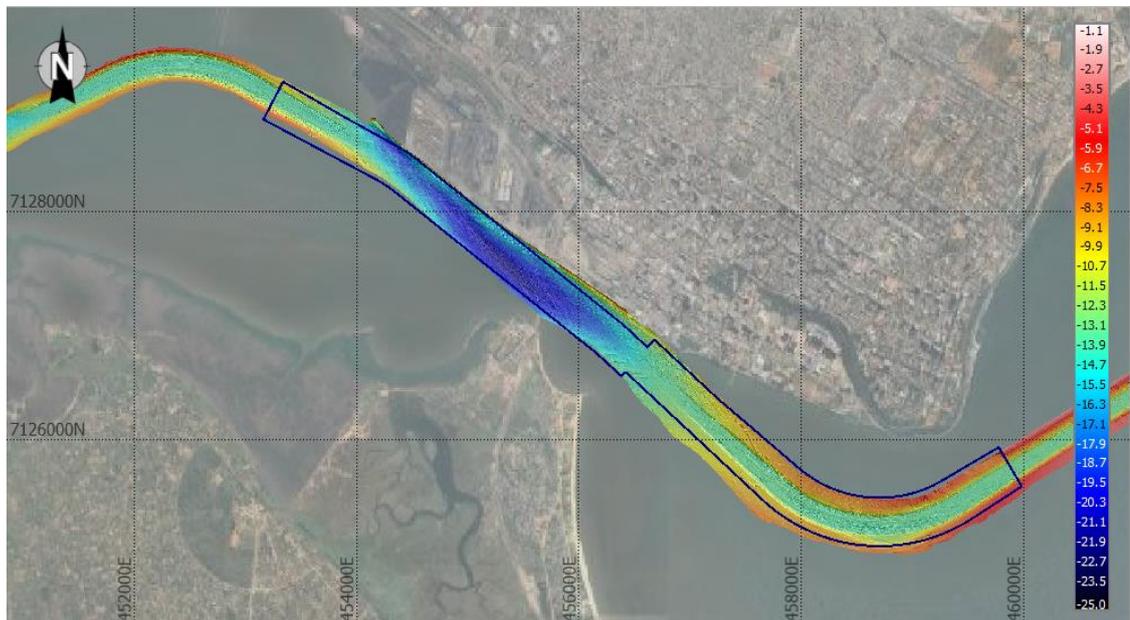


Figura 35: Levantamento batimétrico de 2020 no canal da Katembe

No levantamento de 2022, ilustrado pela figura 36, nota-se um levantamento menos largo que o realizado em 2020. As profundidades do local quase que não apresentam diferenças.

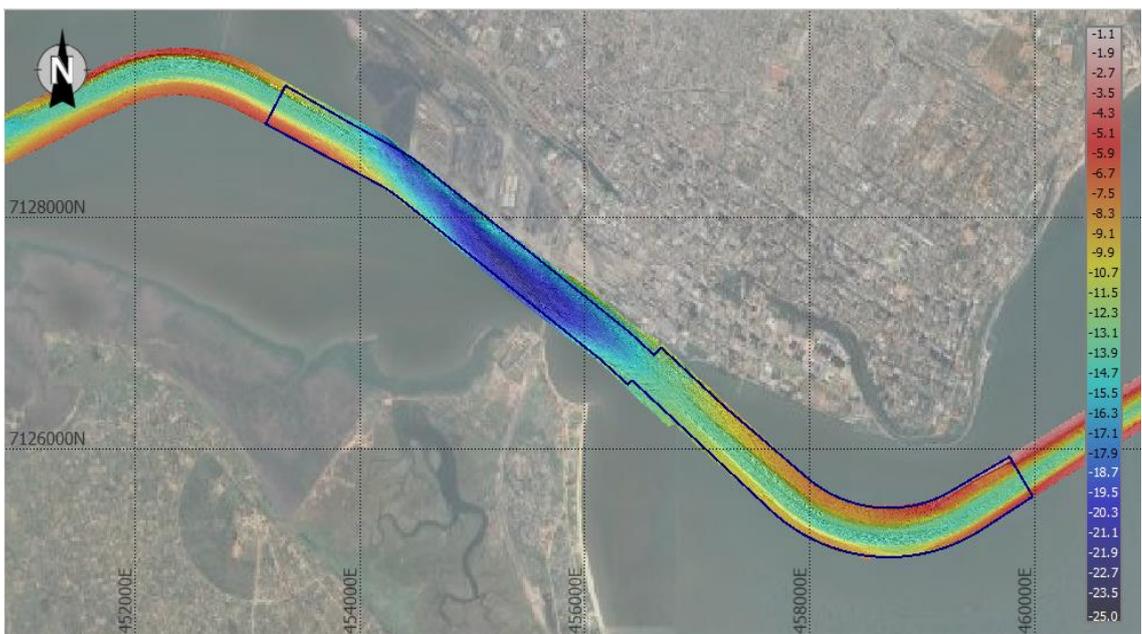


Figura 36: Levantamento batimétrico de 2022 no canal da Katembe

4.10.3. Canal da Polana

Na tabela 14, são indicados os resultados do canal da Polana, que é o canal de acesso ao porto de Maputo localizado próximo a ilha das Xefinas.

Tabela 15: Dados gerais do canal da Polana

Propriedade	Descrição
Nome	Canal da Polana
Coordenadas de Início	25°59'12.29"S 32°35'57.27"E (UTM36S)
Coordenadas do fim	25°56'0.75"S 32°44'46.13"E (UTM36S)
Extensão	16 km
Largura do fundo do canal	110 m
Área	5 120 000 m ²
Profundidade média	13.57 m (ZH)

A figura 37, representa o esquema de uma secção transversal da superfície teórica do canal ao longo do troço de Polana.

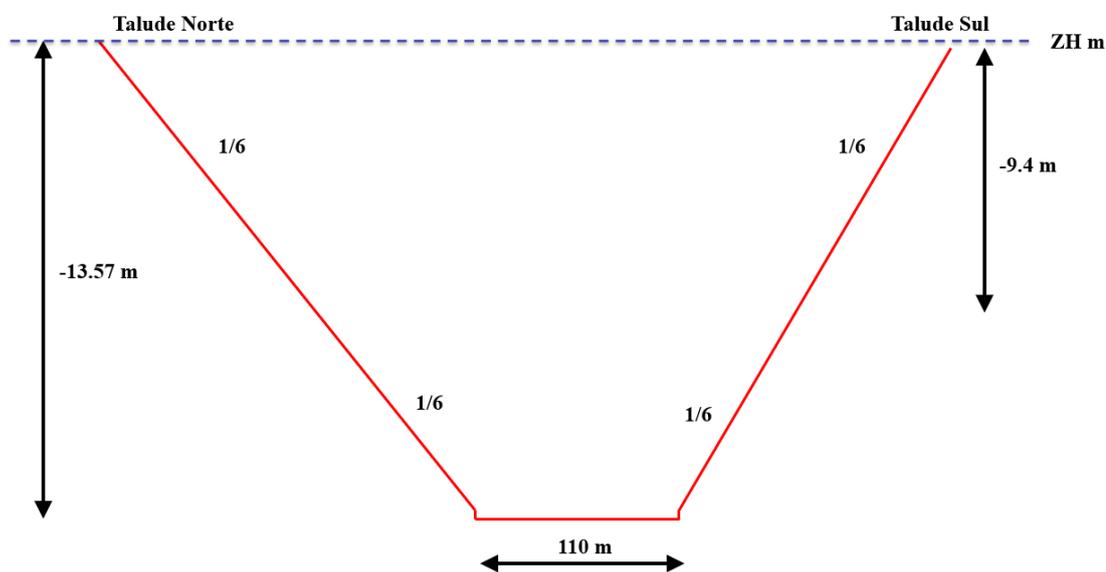


Figura 37: Secção transversal no canal da Polana

O esboço na figura 37, ilustra o corte transversal de forma a se observar a configuração teórica do desenho do canal ao longo do canal da Polana, onde tem-se a profundidade média de 13.57 m, os taludes de 1/6 e 1/16 e a largura do canal 110 m.

Em seguida, apresenta-se a figura 38, com a ilustração de uma zona localizada junto a ilha das Xefinas, com altos sedimentos localizados no fundo e no talude do canal.

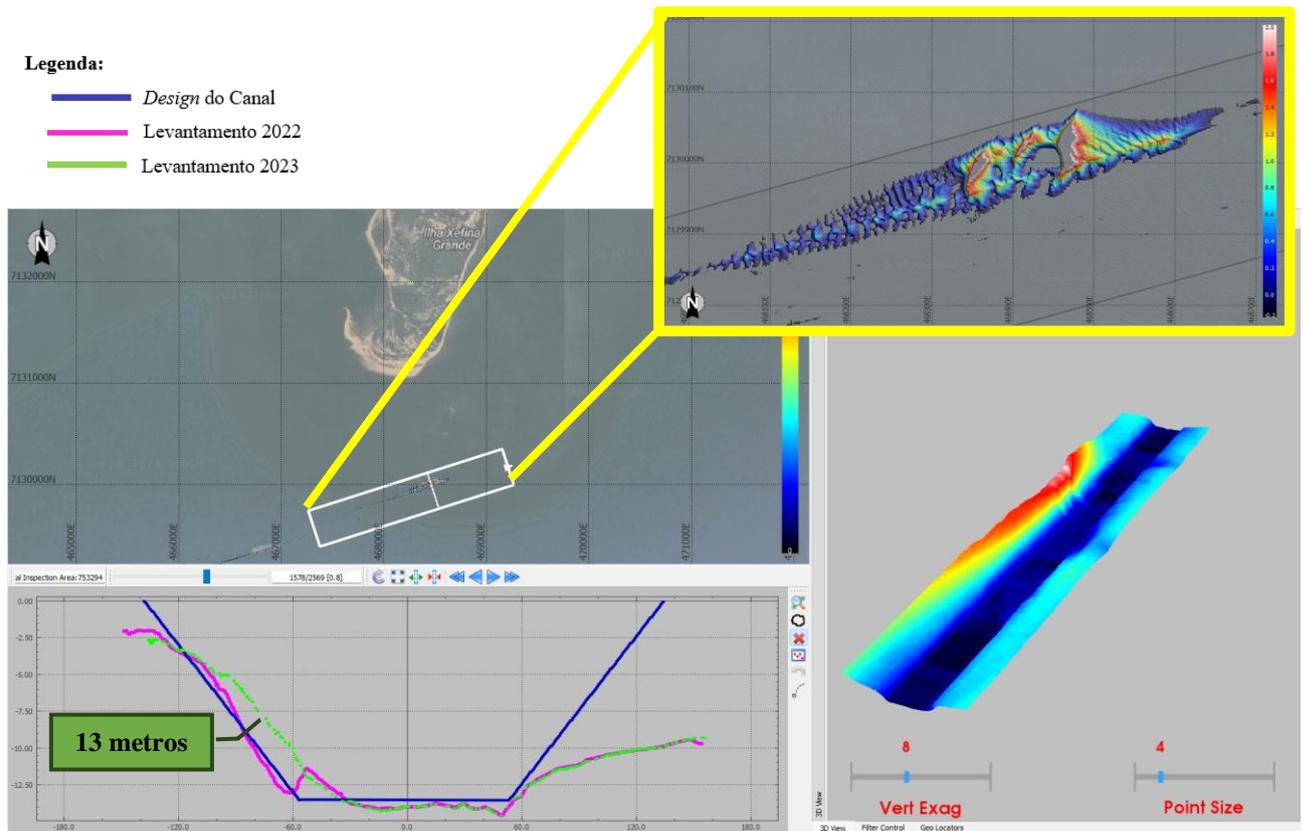


Figura 38: Área de assoreamento no canal da Polana.

Ações devem ser tomadas para remoção do sedimento neste trecho do canal. O padrão dos sedimentos e a configuração das superfícies no perfil transversal apresentado na figura 38, é quase idêntico para os anos de 2022 e 2023. Isso mostra que quanto mais levantamentos batimétricos forem realizados melhor será a percepção sobre a dinâmica sedimentar no canal da Polana.

O Canal da Polana está localizado numa parte bastante crítica, pois, a ilha das Xefinas vem sofrendo erosão e causa aumento dos sedimentos nesta zona específica do canal de acesso ao porto. A figura 39, ilustra este cenário.

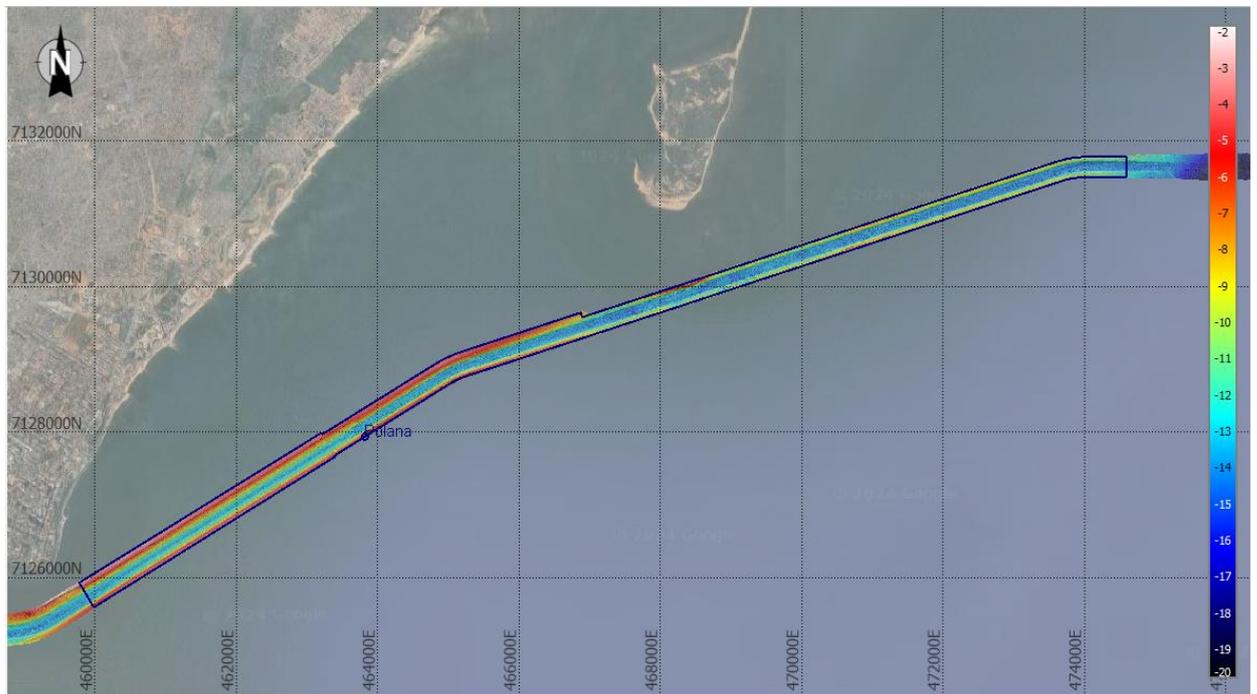


Figura 39: Levantamento batimétrico de 2022 no canal da Polana

Na figura 40, a tendência da erosão da ilha das Xefinas, continua cada vez mais eminente.

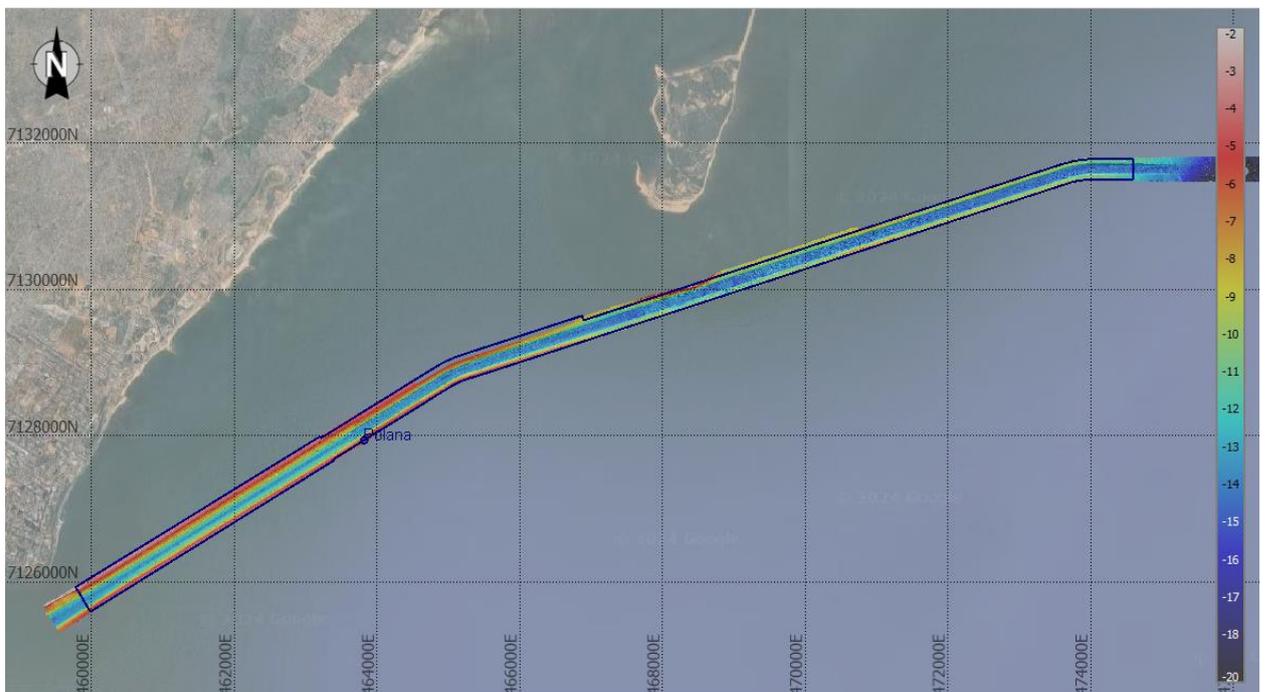


Figura 40: Levantamento batimétrico de 2023 no canal da Polana

4.10.4. Canal da Xefina

A tabela 16, ilustra os resultados do canal da Xefina, que é o canal de acesso ao porto de Maputo localizado próximo ao ancoradouro.

Tabela 16: Dados gerais do canal da Xefina

Propriedade	Descrição
Nome	Canal da Xefina
Coordenadas de Início	25°56'0.75"S 32°44'46.13"E (UTM36S)
Coordenadas do fim	25°55'43.43"S 32°52'24.20"E (UTM36S)
Extensão	12 km
Largura do fundo do canal	110 m
Área	3 850 000 m ²
Profundidade média	14.06 m (ZH)

Na figura 41, é ilustrado o esquema de uma secção transversal da superfície teórica do canal ao longo do troço de Xefina.

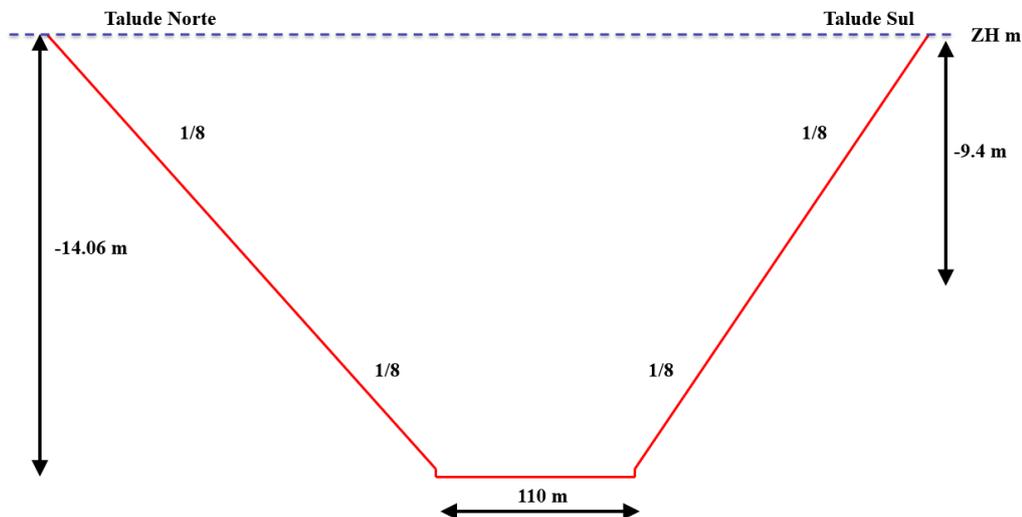


Figura 41: Secção transversal no Canal da Xefina

O esboço da figura 38, ilustra o corte transversal de forma a se observar a configuração teórica do desenho do canal ao longo do canal da Polana, onde temos a profundidade média é de 14.06 m, os taludes de 1/8 e 1/18 e a largura do canal 110 m.

A figura 42, faz a ilustração de uma zona com sedimentos no eixo do canal de acesso. Como se pode notar de 2022 a 2023 não houve muita variação do padrão dos sedimentos nesta zona específica do canal da Xefina.

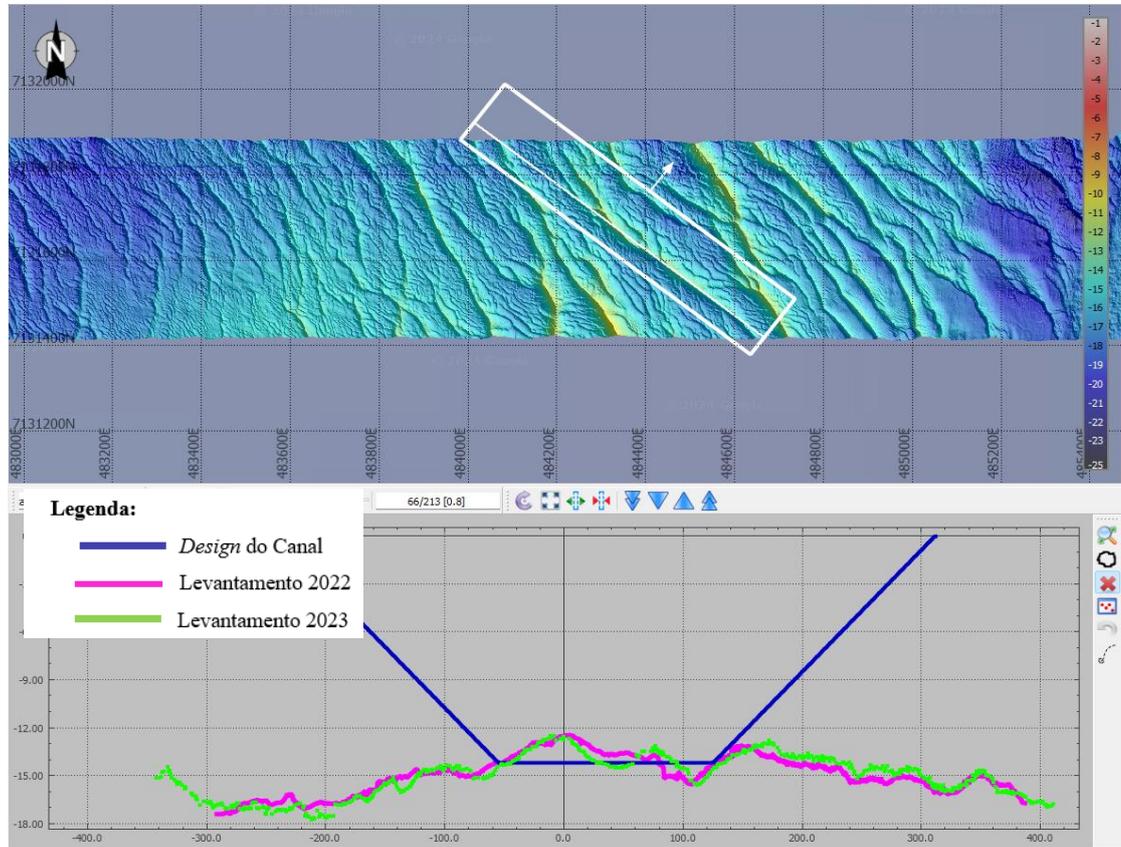


Figura 42: Área de assoreamento no canal Xefina

Acções devem ser tomadas para remoção do sedimento neste troço do canal. O padrão dos sedimentos e a configuração das superfícies no perfil transversal apresentado na figura 42, é quase idêntico para os anos de 2022 e 2023. Isso mostra que quanto mais levantamentos batimétricos forem realizados melhor será a percepção sobre a dinâmica sedimentar no canal da Xefina.

Na figura 43, é ilustrado o levantamento batimétrico realizado em 2022 no canal da Xefina. Com profundidades que variam dos 13 m aos 20 m. Este canal não tem se mostrado crítico tendo em conta os valores de volume calculados e apresentado na figura 25.

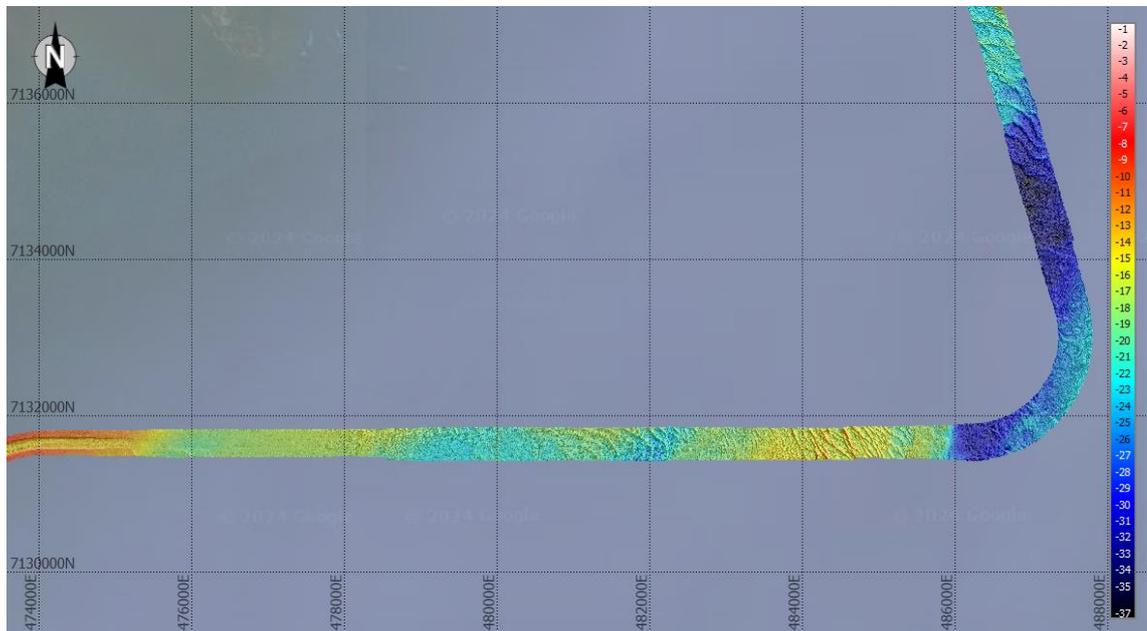


Figura 43: Levantamento batimétrico de 2022 no canal da Xefina

O levantamento batimétrico de 2023 acaba confirmando a afirmação de que o padrão dos sedimentos neste troço é quase o mesmo para o período em estudo segundo mostra a figura 44.

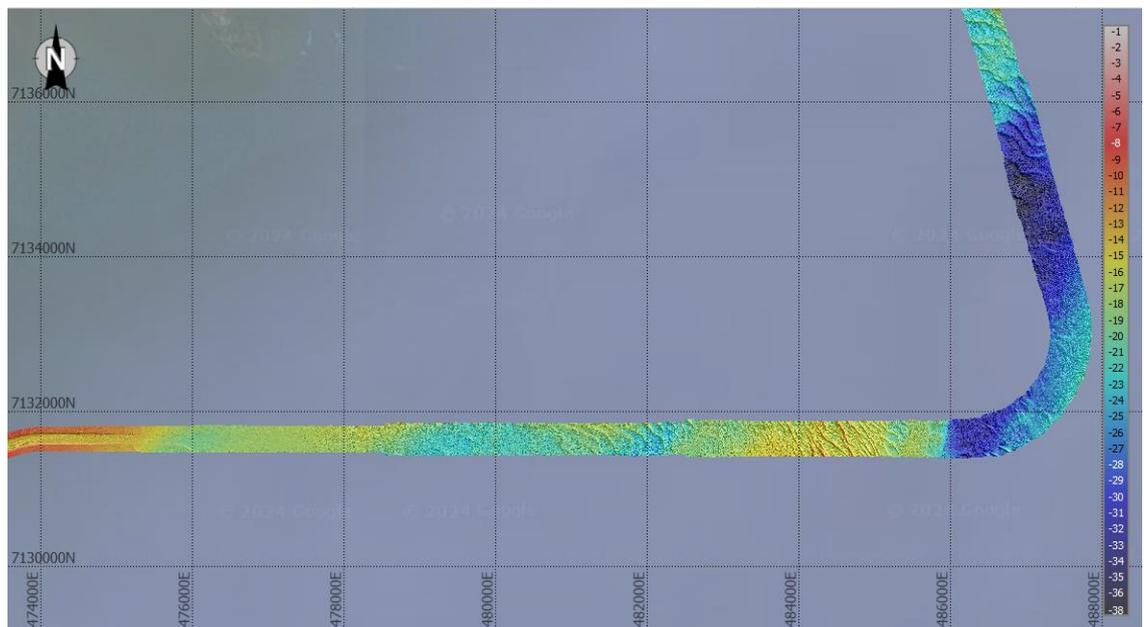


Figura 44: Levantamento batimétrico de 2023 no canal da Xefina

4.10.5. Canal Norte

Na tabela 17, são indicados os resultados do canal Norte, que é o canal de acesso ao porto de Maputo localizado próximo ao ancoradouro.

Tabela 17: Dados gerais do canal Norte

Propriedade	Descrição
Nome	Canal Norte
Coordenadas de início	25°55'43.43"S 32°52'24.20"E (UTM36S)
Coordenadas do fim	25°38'6.14"S 32°53'1.23"E (UTM36S)
Extensão	36 km
Largura do fundo do canal	110 m
Área	13 370 000 m ²
Profundidade média	13.82 m (ZH)

A figura 45, ilustra o esquema de uma secção transversal da superfície teórica do canal ao longo do troço Norte.

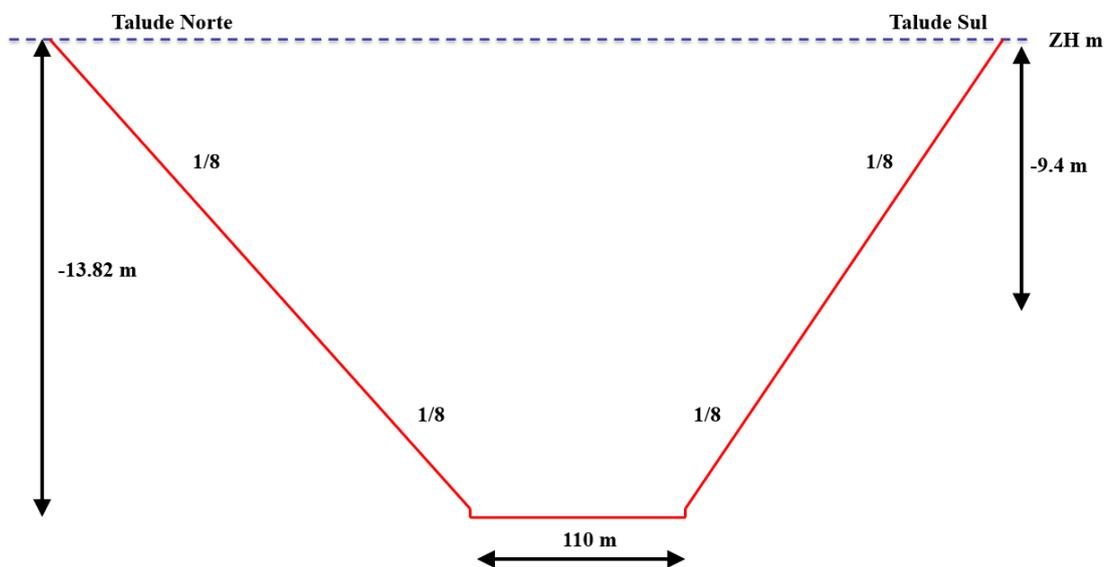


Figura 45: Secção transversal no canal Norte

O esboço na figura 45, ilustra o corte transversal de forma a se observar a configuração teórica do desenho do canal ao longo do canal da Polana, onde a profundidade média é de 13.82 m, os taludes de 1/8 e 1/18 e a largura do canal 110 m.

Com base no levantamento feito em 2023, este troço do canal ainda apresenta sedimentos consideráveis, segundo ilustra a figura 46.

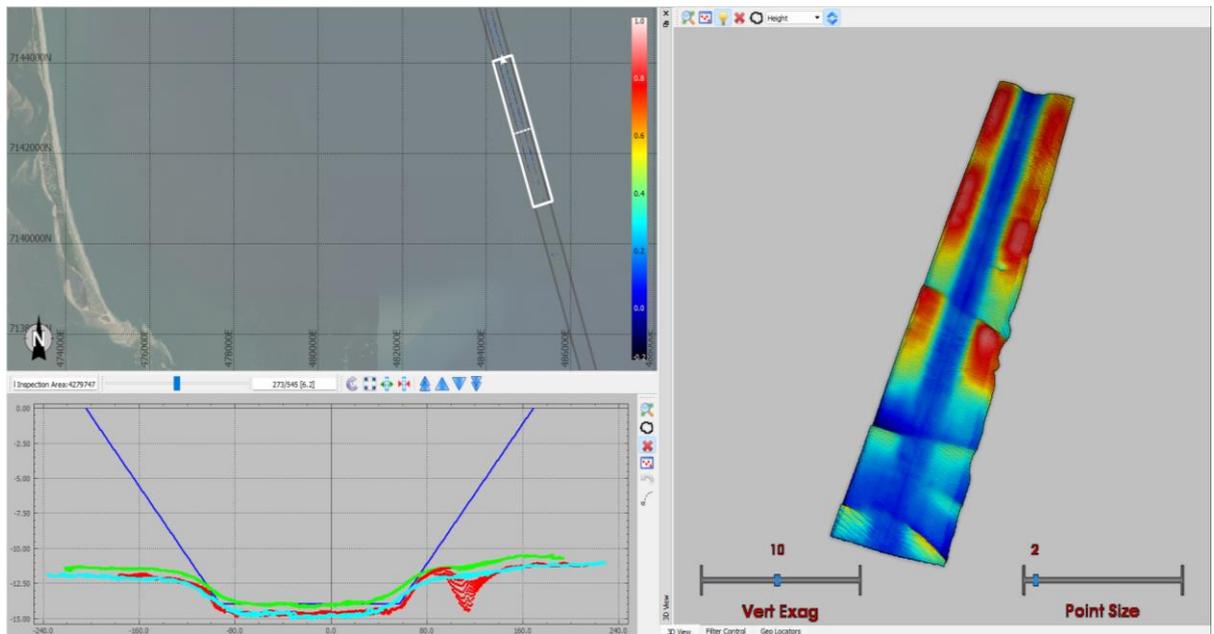


Figura 46: Área de assoreamento no canal Norte.

Legenda:

- *Design do Canal*
- Levantamento 2019
- Levantamento 2022
- Levantamento 2023

Acções devem ser tomadas para remoção do sedimento neste troço do canal. O padrão dos sedimentos, e a configuração das superfícies no perfil transversal apresentado na figura 46, é quase idêntico para os anos de 2019, 2022 e 2023. Isso mostra que quanto mais levantamentos batimétricos forem realizados melhor será a percepção sobre a dinâmica sedimentar no canal Norte.

A figura 47, mostra a disposição do levantamento realizado no canal norte em 2022.

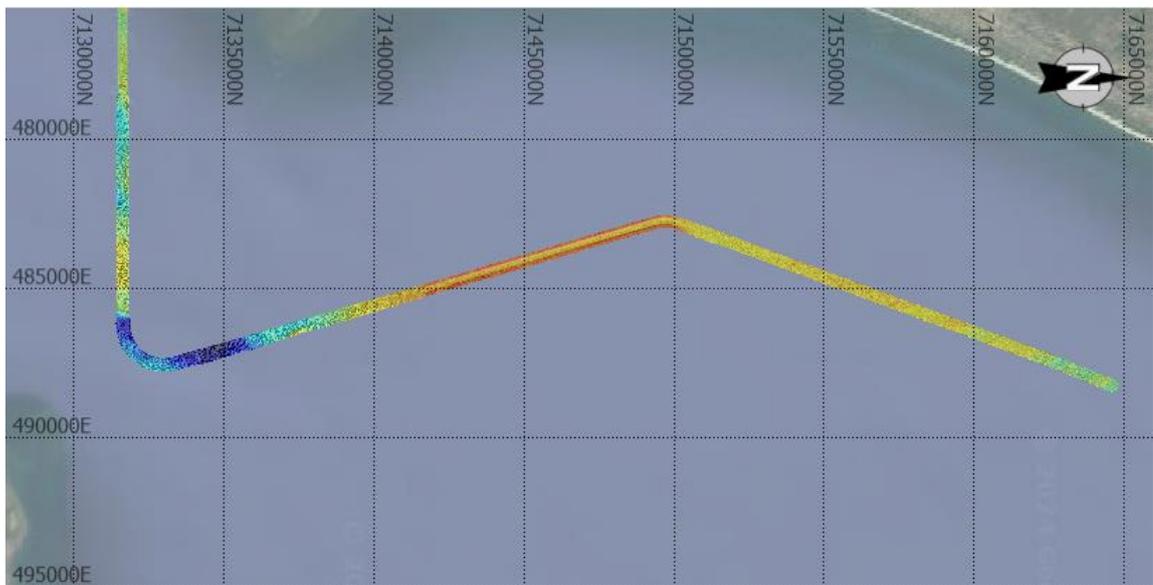


Figura 47: Levantamento batimétrico de 2022 no canal Norte

A figura 48, mostra a disposição do levantamento realizado no canal Norte em 2023.

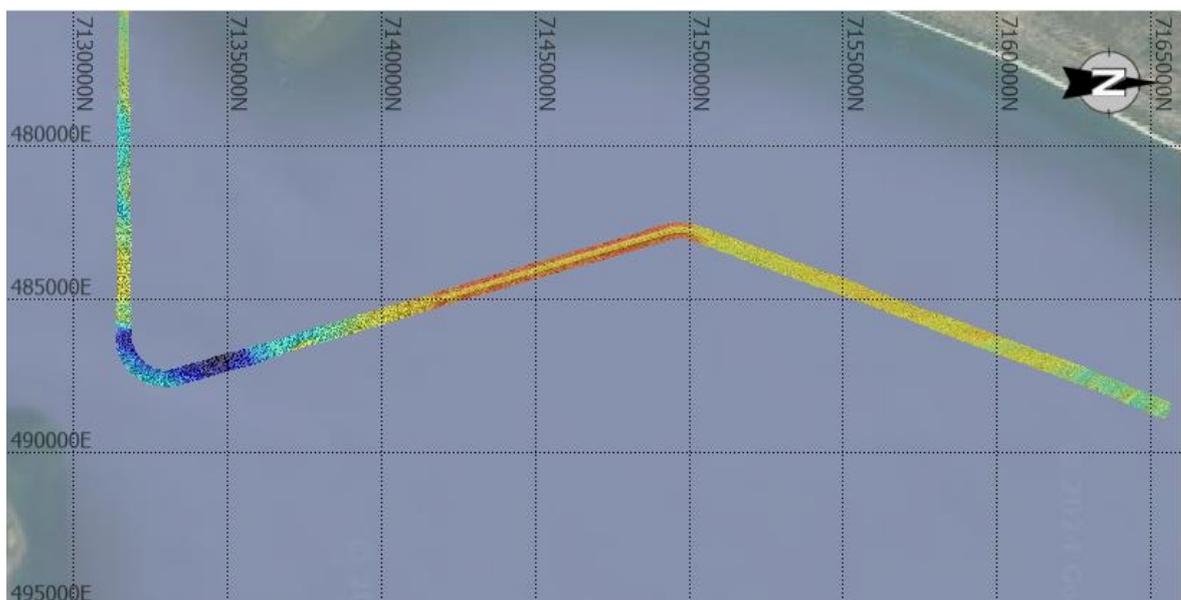


Figura 48: Levantamento batimétrico de 2023 no canal Norte

4.11. Mapa temático das áreas assoreadas

O primeiro exercício para a determinação dos locais mais assoreados foi a localização das áreas acima da superfície teórica do canal com volume e áreas significativas. Este procedimento foi feito para o ano de 2022 e 2023, assim sendo, foram criadas duas camadas no *QGIS*, uma com as áreas mais assoreadas para 2022 e outra para 2023. De seguida, foi feita a sobreposição desses locais e o resultado foi definido pela intersecção das áreas sobrepostas. Com bases nas duas camadas e no resultado encontrado, foi criado um mapa temático com as localizações das áreas assoreadas.

Na figura 49, estão ilustradas as áreas assoreadas identificadas pelas setas que indicam onde exactamente tem-se as áreas com maior assoreamento no canal.

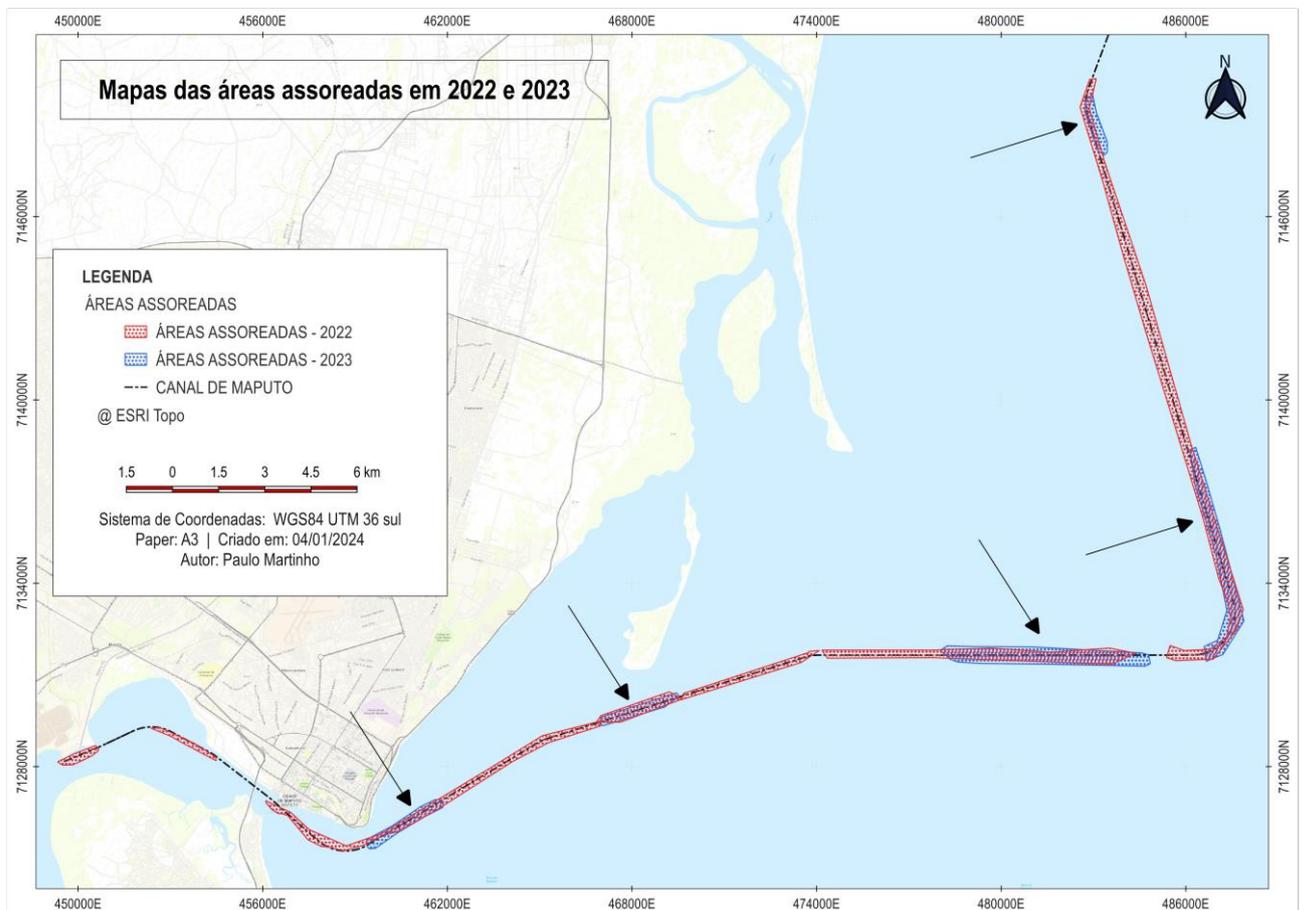


Figura 49: Mapa temático das áreas assoreadas.

As áreas sobrepostas indicam uma certa tendência ao assoreamento o que implica que há necessidade de se fazer uma monitoria contínua e devem ser tomadas medidas para minimizar o assoreamento nesses locais. Essas áreas identificadas no mapa variam de 830 000 a 3 500 000 m² de extensão. Segundo as áreas vectorizadas, houve maior assoreamento em 2022.

4.12. Mapa temático dos factores que influenciam no aumento do sedimento

A disposição dos rios que desaguam no canal de Maputo têm uma grande influência no aumento dos sedimentos por causa do ciclo hidrológico, em adição a erosão acentuada da ilha das Xefinas, tem levado consigo altas quantidades de material para o canal da Polana. O mapa temático da figura 50, foi criado como parte dos resultados do estudo, de forma a ilustrar os factores naturais que influenciam no aumento do assoreamento no canal de acesso ao Porto de Maputo.

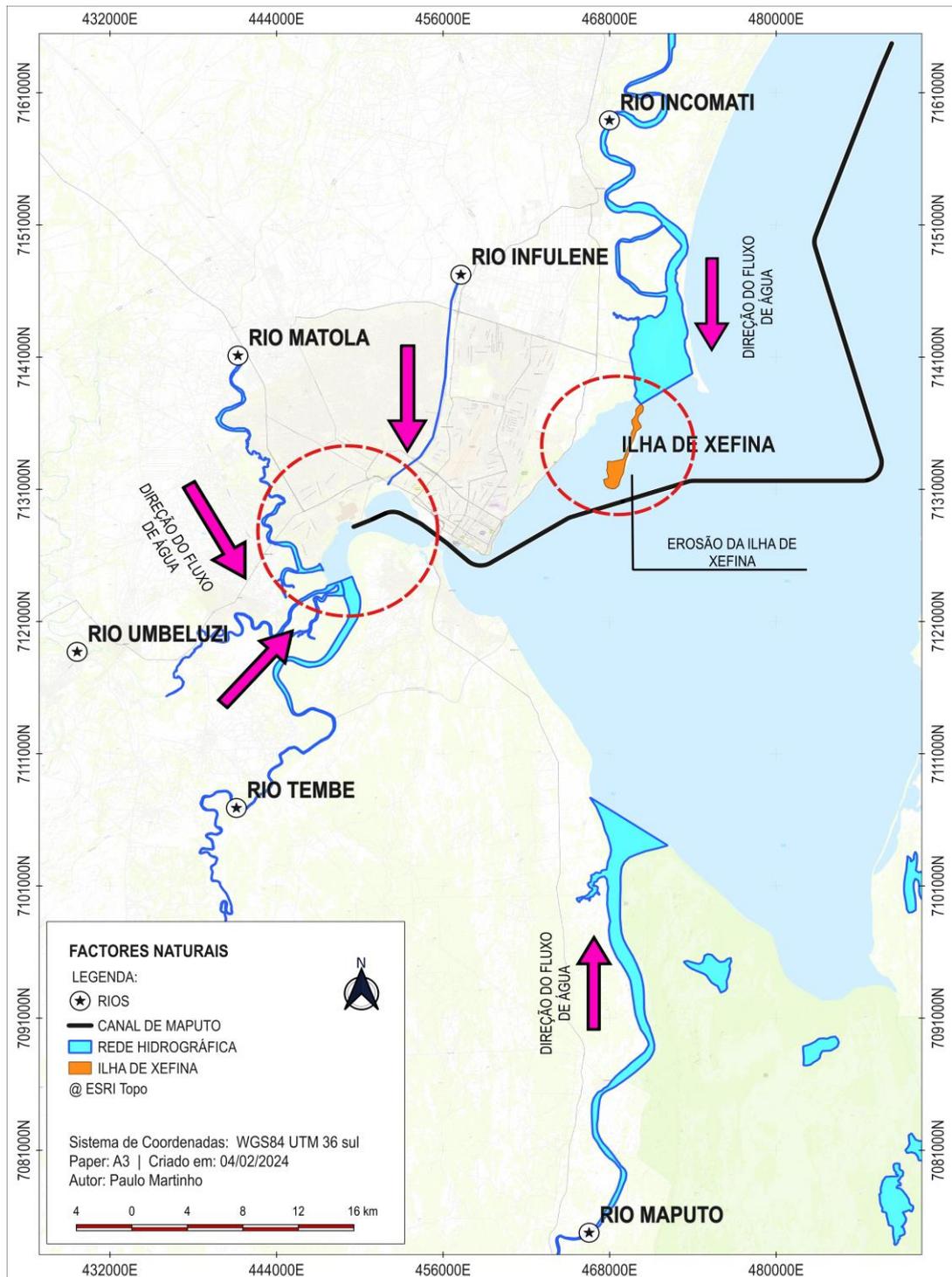


Figura 50: Mapa temático dos factores que influenciam no aumento do sedimento.

4.13. Áreas de despejo

As áreas de despejo são locais no mar, usados para a deposição de sedimentos e serve também de confirmação de volume dragado no canal, isto porque é realizado um levantamento batimétrico antes e no fim de toda a operação para comparar o volume dragado no canal e o depositado nas áreas de despejo. As localizações das áreas de despejo usadas no estudo são apresentadas no mapa temático da figura 51.

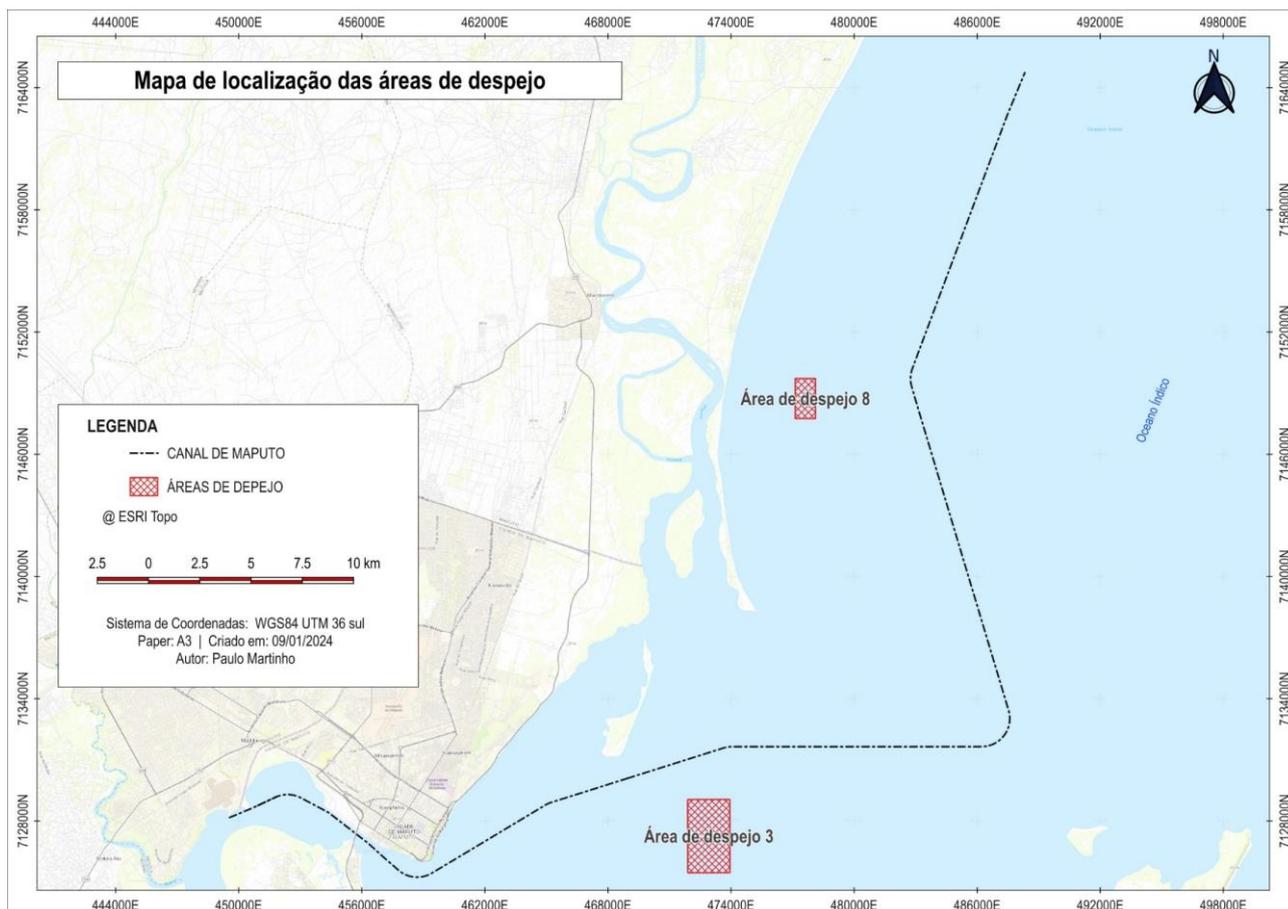


Figura 51: Áreas de despejo usadas no estudo.

É importante fazer o acompanhamento da evolução destes locais devido ao impacto ambiental causado pela dragagem que afectam a vida marinha e a configuração do fundo do mar nestes locais. Esta gestão deve ser feita de forma que se saiba até quando estes locais devem ser usados e quais serão os possíveis locais a serem escalados para este efeito obedecendo todos os critérios para a sua aprovação.

Nas figuras 52 e 53, são ilustrados os mapas das áreas de despejo antes e depois da deposição dos sedimentos dragados no canal de acesso ao Porto de Maputo. De forma a ver esta diferença entre as duas superfícies, foi criado um perfil transversal e sua respectiva legenda. Os dados gerais da área de despejo 3 são apresentados na tabela 18, e da área de despejo 8 na tabela 19.

Tabela 18: Dados gerais da área de despejo 3

Propriedade	Descrição
Nome	Área de despejo 3 (<i>Dumpsite 3</i>)
Área	7 590 000 m ²
Coordenada do centro	25°58'23.98"S 32°43'48.98"E (UTM 36S)
Volume calculado após a dragagem	335 135 m ³

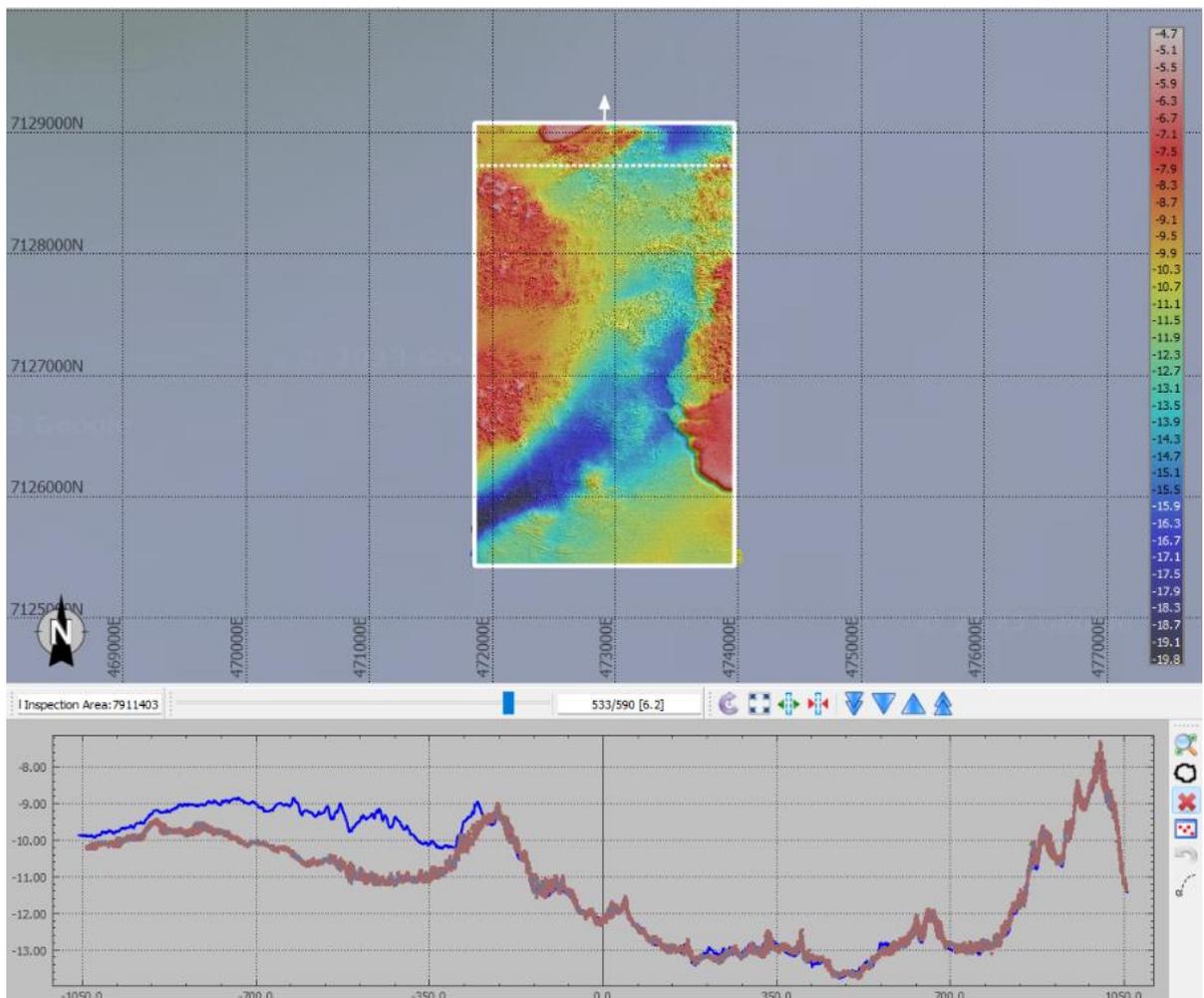


Figura 52: Área de despejo 3.

Legenda:

- Antes da deposição dos sedimentos dragados
- Após a deposição dos sedimentos dragados

Tabela 19: Dados gerais da área de despejo 8

Propriedade	Descrição
Nome	Área de despejo 8 (<i>Dumpsite 8</i>)
Área	2 380 000 m ²
Coordenada do centro	25°46'45.92"S 32°46'36.70"E (UTM 36S)
Volume calculado após a dragagem	124 380 m ³

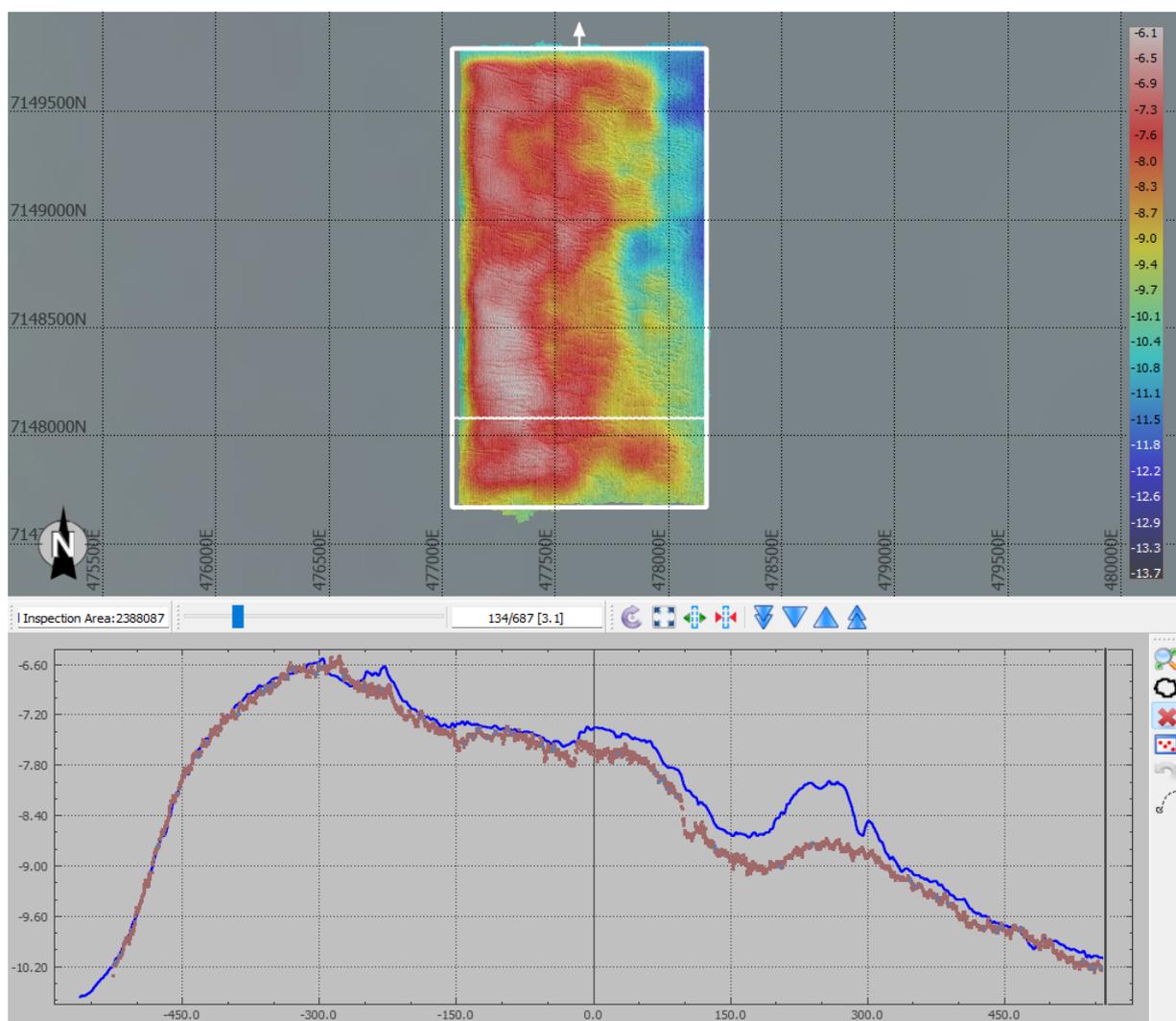


Figura 53: Área de despejo 8.

Legenda:

- Antes da deposição dos sedimentos dragados
- Após a deposição dos sedimentos dragados

4.14. Discussão

Neste estudo, ao analisar os canais de acesso ao porto de Maputo, o canal da Polana apresentou o volume e uma taxa de assoreamento bastante elevados. Estes níveis elevados podem ser influenciados pela existência de uma ilha em constante erosão que aumenta gradualmente os sedimentos no canal bem como a curvatura nesse troço. Resultado similar em que troços que apresentam curvatura são mais assoreados foi encontrado no estudo de Carvalho (2016), quando analisava quais são as áreas mais instáveis e seu volume, no estudo do canal de acesso ao porto de Santos no Brasil.

Com base no cálculo de volume feito pelo método de intersecção de modelos de superfície, para o presente estudo, em 2019 obteve-se um volume de cerca de 1 453 263 m³ referenciado no plano director do Porto de Maputo 2023-2024 (MPDC, 2023). Em 2022 o volume assoreado reduziu para 733 669 m³ e a taxa de assoreamento foi de 48 292 m³/mês. No ano de 2023 o volume reduziu para 553 122 m³ e a taxa de assoreamento para 20 649 m³/mês. A redução dos volumes deveu-se as operações de dragagem realizadas em 2019 e 2023. O efeito da dragagem na redução do volume de sedimentos e taxa de assoreamento, também foi observado por Carvalho (2016) e Silva et al., (2019).

Os perfis transversais, das figuras 30, 34, 38, 42 e 46, gerados têm como objectivo analisar o padrão do sedimento em cada troço do canal, permitindo o entendimento do comportamento dos sedimentos desde 2019 a 2023. Do estudo, observou-se que há uma tendência de o padrão ser quase idêntico em quase todos os troços do canal, com excepção a Polana. Essa abordagem, é similar ao estudo do assoreamento no canal de navegação do estuário da lagoa dos Patos no Brasil realizado por Silva et al., (2023), que diferentemente do que se observou no canal de acesso ao porto de Maputo, notou que havia uma variabilidade significativa no padrão de sedimentação.

5. CONCLUSÕES, RECOMENDAÇÕES E LIMITAÇÕES

5.1. Conclusões

Os resultados deste estudo indicam que há necessidade de realizar levantamentos batimétricos regulares para expandir a capacidade de análise do canal de navegação. Com base nesses resultados pode-se compreender melhor os padrões de mudança na profundidade do canal, deposição e dinâmica sedimentar para uma gestão ambiental e económica sustentável de sedimentos no canal de acesso ao Porto de Maputo.

Os resultados mostram uma variação de profundidade de 1 m no canal da Polana e 38 m no canal Norte, ao longo de toda extensão do canal de acesso ao porto de Maputo. O padrão de acumulação dos sedimentos e a configuração das superfícies digitais de elevação, ilustrados nos perfis transversais gerados em cada troço do canal, nas figuras 30, 34, 38, 42 e 46, mostram-se quase idênticos para os anos de 2019, 2020, 2022 e 2023 de acordo com o período da execução do levantamento batimétrico em cada troço do canal.

Entre os 5 troços que compõem o canal de acesso ao porto de Maputo, o canal da Polana, apresentou elevado volume e taxa de assoreamento, resultado da erosão da ilha de Xefinas e ao facto de apresentar duas curvas no seu traçado.

O cálculo de volume e a geração de mapas temáticos permitiu a representação em planta dos locais mais assoreados no canal. Com base nessa informação será possível tomar as devidas precauções nas próximas campanhas de dragagem.

O volume de sedimentos e a taxa de assoreamento tiveram uma tendência decrescente de 2022 a 2023 face a dragagem de manutenção realizado no canal. Aliando a localização dos sedimentos e a variação altimétrica dos mesmos será possível isolar esses locais e dar uma atenção mais detalhada como forma de minimizar o impacto negativo do seu aumento.

5.2.Recomendações

Para garantir o desenvolvimento sustentável do canal de acesso ao Porto de Maputo, são necessárias acções imediatas e a longo prazo como:

- Dragagem regular do canal para remover os sedimentos acumulados e manter a profundidade adequada que permite uma navegação segura,
- Estabelecer um programa de monitorização contínua do canal para identificar a tendência de assoreamento e agir proactivamente de forma a diminuir o efeito do assoreamento no canal de navegação,
- Realizar mais estudos para entender melhor a hidrodinâmica e transporte de sedimentos, através da selecção de pontos estratégicos para medição da corrente de água.

5.3.Limitações do trabalho

O presente estudo apresenta alguns aspectos relacionados com as limitações que podem restringir a aplicabilidade dos resultados obtidos:

- Disponibilidade de recursos: para realizar um estudo detalhado sobre o impacto do assoreamento no canal de acesso ao Porto de Maputo exige recursos financeiros, tecnológicos e humanos consideráveis, que nem sempre disponíveis estão disponíveis.
- Limitações técnicas: dependendo da escala e do escopo do estudo a ser desenvolvido, pode haver limitações técnicas em termos de equipamentos e métodos disponíveis para a realização de levantamentos hidrográficos e análise de dados.
- Variações temporais e espaciais: o assoreamento pode variar significativamente ao longo do tempo e em diferentes partes do canal. Isso requer uma análise detalhada e possivelmente dados de longo prazo para avaliar melhor as variações do volume de sedimentos no canal.
- Impactos multifacetados: os impactos do assoreamento não se limitam apenas à navegação das embarcações no canal, eles também afectam o ecossistema local, economia e até segurança marítima, o que requer uma análise holística, onde poderá se entender como as partes interagem entre si dentro do contexto do trabalho.
- Interpretação dos resultados: a correlação entre o nível de assoreamento e seus impactos pode não ser directa. Interpretar os resultados exige considerar outras variáveis e possíveis efeitos indirectos.

6. REFERÊNCIAS

1. Alves, J. A. (2010). *Contributos para Gestão de sedimentos associáveis a infra-estruturas e actividades portuárias*. Porto: Faculdade de engenharia da Universidade do Porto.
2. Argyriou, I., & Tsoutsos, T. (2023). Sustainable Solutions for Small/Medium Ports a Guide to. *Journal of Marine Science and Engineering*. <https://doi.org/10.3390/jmse11091763>.
3. Baltimore, H. D. (2016). *Why is dredging important to the Port of Baltimore?* [Filme] <https://youtu.be/IRwarQxkUYQ>.
4. Bianchini, A., Cento, F., Guzzini, A., & Pellegrini, M. (2019). Sediment management in coastal infrastructures: Techno-economic and environmental impact assessment of alternative technologies to dredging. *Journal of Environmental Management*. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109332>.
5. Bosa, S., Petti, M., & Pascolo, S. (2021). Improvement in the Sediment Management of a Lagoon Harbor: The Case of Marano Lagunare, Italy. *Journal Water*. <https://doi.org/10.3390/w13213074>
6. Caminhos de Ferro de Moçambique. (2023). *Infraestruturas- CFM*. <https://www.cfm.co.mz/index.php/pt/infraestruturas/porto-de-maputo>
7. Canelas, L. M. (2012). *Sistemas de Informação Geográfica no apoio às dragagens Portuárias*. Lisboa: Universidade de Lisboa.
8. Carvalho, V. d. (2016). *Estimativa da Taxa de Assoreamento do Canal de Navegação do Porto de Santos*. Rio de Janeiro, Brasil: UFRJ/Escola Politécnica.
9. Castro, S. M., & Almeida, J. R. (2012). Dragagem e conflitos Ambientais em Portos Clássicos e modernos: Uma Revisão. *Soc & Nat*. 3, 519-534.
10. Colangeli, C., Baldoni, A., Melito, L., Corvaro, S., & Brocchini, M. (2023). Harbour Hydro-Morphodynamics and Freshwater Discharges: The La Spezia Arsenale Case. Liguria, Italy: *Journal Water*. <http://doi.org/10.3390/w13213074>
11. Cunha, S. R. (2019). *Estudo batimétrico da represa do dmae e utilização de geotecnologias para análise da ocupação do entorno*. Monte Carmelo: Universidade Federal de Uberlândia.
12. Estumar. (2024). *DP Vessel*. <https://estumar.com/blog/dp-vessel/>
13. Gagg, G. (2016). *Apostila de Levantamentos Hidrográfico - Noções Gerais*. Rio Grande do Sul, Brasil: UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
14. Geosurvey, (2023). *Geosurvey Geoengenharia Lda*. <http://www.geosurvey-mz.com/>
15. Instituto Oceanográfico de Moçambique. (2023). *Tabela de Marés - 2023*. Maputo.

16. Instituto Hidrográfico de Portugal. (2018). *Instituto Hidrográfico de Portugal*. <https://www.hidrografico.pt/op/19>
17. Kongsberg. (2018). *EM 3002 Training course*. Horten: Kongsberg. www.kongsberg.com
18. Lopes, J. P. (2017). *Modelação hidrológica das bacias hidrográficas de Monte Novo e Vigia em cenários de alterações climáticas*. Lisboa: Universidade Nova de Lisboa.
19. Maputo Port Development Company. (2015). *Slideshare*. <https://www.slideshare.net/aplop/projecto-de-expanso-do-porto-de-maputo>
20. Maputo Port Development Company. (2023). *Porto de Maputo - Manual e Directório*. Maputo. www.meridian-ebooks.com/Port-of-Maputo/#p=Cover
21. Mateo-Pérez, V., Corral-Bobadilla, M., Ortega-Fernández, F., & Rodríguez-Montequín, V. (2021). Analysis of the Spatio-Temporal Evolution of Dredging from Satellite Images: A Case Study in the Principality of Asturias (Spain). *Journal of Marine Science and Engineering*. <http://doi.org/10.3390/jmse9030267>
22. Neary, V. S., Gunawan, B., Richmond, M. C., Durgesh, V., Polagye, B., Thomson, J., . . . Fontaine, A. (2011). *Field Measurements at River and Tidal Current Sites for Hydrokinetic Energy Development: Best Practices Manual*. Oak Ridge, Tennessee: Oak Ridge National Laboratory.
23. Nhemachena, C., Matchaya, G., Nhemachena, C. R., Karuaihe, S., Muchara, B., & Nhlengethwa, S. (2018). *Measuring Baseline Agriculture-Related Sustainable Development Goals Index for Southern Africa*. Pretoria: MDPI.
24. Organização Internacional de Hidrografia. (2020). *Standards for Hydrographic Surveys (S-44 Edition 6.1.0 ed.)*. Principauté de Monaco: International Hydrographic Organization.
25. Romdani, A., Chen, J.-L., Chien, H., Lin, J.-H., Hung, C.-K., & Huang, Y.-Q. (2022). Downdrift Port Siltation Adjacent to a River Mouth: Mechanisms and Effects of Littoral Sediment Transport to the Navigation Channel. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 142(2), 13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000700](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000700)
26. Serra, A. C. (2022). *Aprendo os recursos hídricos a jogar - O jogo didático como estratégia de ensino-aprendizagem na Geografia do 10º ano*. Universidade de Lisboa.
27. Silva, M. J., Calliari, L. J., Fontoura, J. A., Serpa, C. G., & Lemke, N. (2019). Análise do processo de assoreamento no trecho i do canal de acesso ao porto do rio grande entre os anos de 2010 e 2018. *Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão*.
28. Silva, M. V., & Brito, É. G. (2019). *Cartografia*. Fortaleza - Ceará: UAB/UECE.

29. Silva, M. J., Fontoura, J. A., Correa, I. C., & Serpa, C. G. (2023). Siltation in the Navigation Channel of Patos Lagoon Estuary, Brazil, Considering the Current Configuration of the Jetties and the Channel. *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3019663/v1>
30. Souza, A. B., Santos, S. B., Silva, M. D., & Moreira, N. R. (2021). *A importância do Processo de Dragagem Impactos ambientais no Porto de Santos*. Mogi das cruzeiras/SP – Brasil.
31. Van Rijn, L. (2016). *Harbour siltation and control measures*. <http://www.leovanrijn-sediment.com/papers/Harboursiltation2012.pdf>
32. Zhao, C., Wang, Y., Gong, Y., & Brown, S. (2021). The evolution of the port network along the Maritime Silk Road: From a sustainable development perspective. *Elsevier* <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2021.104426>

Apêndices

Na Tabela A1, é ilustrado o sumário das actividades desempenhadas ao longo da campanha 2023.

Tabela A1: Cronograma do estudo

Fases	Actividades - 2023	05-jan				01-fev					30-abr					26-mai	
Fase 1 (In-Survey)	Mobilização / Desmobilização																
	Verificação do Apoio																
	Levantamento Batimétrico																
	Processamento																
	Relatório																
Fase 2 (Intermediate-Survey)	Levantamento Batimétrico																
	Processamento																
	Cálculo de Volumes																
Fase 3 (Out-Survey)	Levantamento Batimétrico																
	Processamento																
	Cálculo de Volumes																
	Relatório (Out-Survey)																

Para a campanha 2023, foi calculado de forma superficial o orçamento geral do trabalho.

Tabela A2: Orçamento do trabalho

Itens	Valor Total (MZN)
Equipamento	600 000
Embarcação	1 365 000
Combustível	540 000
Levantamento Batimétrico / Campo	1 540 000
Gabinete / Processamento de dados	760 000
Relatório / Produtos Finais	245 000
Total	5 050 000



Figura A1: Estação de referência.

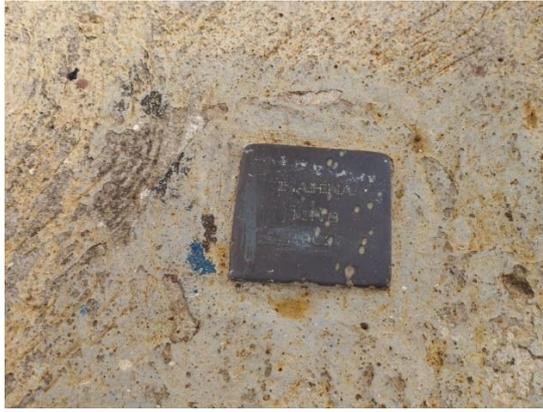


Figura A2: Marcas de nivelamento.

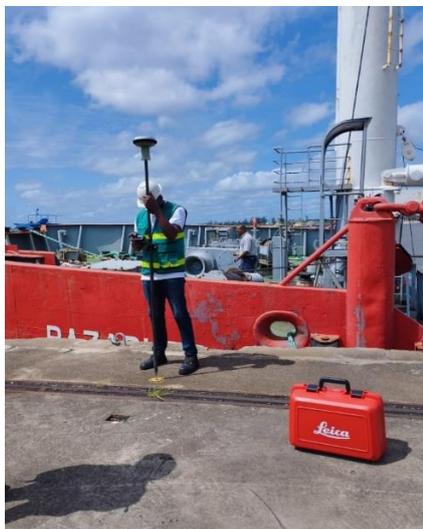


Figura A3: Sistema de posicionamento diferencial – GS15.

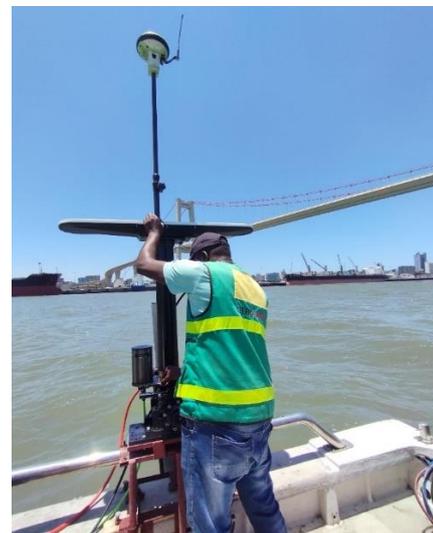


Figura A4: Confirmação do posicionamento das antenas do Seapath.



Figura A5: SVP, SIS e Seapath, Transdutor e Suporte e Repetidora.

CALIBRATION OFFSET RESULTS					
Roll-Heading	Pitch	Roll	Pitch	Heading	
2 - 3	1 - 2	0.233°	0.14°	-0.92°	
2 - 3	1 - 4	0.143°	-0.08°	-1.39°	
2 - 3	3 - 4	0.106°	0.58°	0.45°	
	PRESET	0.000°	0.00°	0.00°	
	AVERAGE	0.161°	0.22°	-0.62°	ADVISED MOUNTING ANGLES
	SDEV	0.065°	0.34°	0.96°	

MOUNTING ANGLE SIGN CONVENTION	
Roll	Positive when Transducer center beam points towards port
Pitch	Positive when Transducer center beam points towards bow
Heading	Positive when Transducer is rotated clockwise around vertical axis of vessel
Note: All angles are absolute w.r.t. the vessel reference frame	

ACCURACY	
Average Error	6.436 cm/m2

Tabela A3: Calibração feita a 30/03/2023 – Canal da XEFINA

CALIBRATION OFFSET RESULTS					
Roll-Pitch	Hdg	Roll	Pitch	Heading	
1 - 2	1 - 3	0.004°	0.50°	0.13°	
1 - 2	2 - 4	-0.020°	0.52°	0.32°	
3 - 4	1 - 3	0.013°	0.40°	0.05°	
3 - 4	2 - 4	-0.019°	0.44°	0.43°	
	PRESET	0.000°	0.00°	0.00°	
	AVERAGE	-0.005°	0.47°	0.24°	ADVISED MOUNTING ANGLES
	SDEV	0.016°	0.05°	0.17°	

MOUNTING ANGLE SIGN CONVENTION	
Roll	Positive when Transducer center beam points towards port
Pitch	Positive when Transducer center beam points towards bow
Heading	Positive when Transducer is rotated clockwise around vertical axis of vessel
Note: All angles are absolute w.r.t. the vessel reference frame	

ACCURACY	
Average Error	4.654 cm/m2

Tabela A4: Calibração feita a 23/04/2023 – Canal da POLANA.

CALIBRATION OFFSET RESULTS					
Roll-Pitch	Hdg	Roll	Pitch	Heading	
1 - 2	2 - 4	0.238°	2.47°	-2.83°	
3 - 4	2 - 4	0.144°	-2.60°	-1.95°	
	PRESET	0.000°	0.00°	0.00°	
	AVERAGE	0.191°	-0.07°	-2.39°	ADVISED MOUNTING ANGLES
	SDEV	0.066°	3.59°	0.62°	

MOUNTING ANGLE SIGN CONVENTION	
Roll	Positive when Transducer center beam points towards port
Pitch	Positive when Transducer center beam points towards bow
Heading	Positive when Transducer is rotated clockwise around vertical axis of vessel
Note: All angles are absolute w.r.t. the vessel reference frame	

ACCURACY	
Average Error	5.447 cm/m2

Tabela A5: Calibração feita a 20/04/2023 – Canal NORTE.

CALIBRATION OFFSET RESULTS					
Roll-Pitch	Hdg	Roll	Pitch	Heading	
1 - 2	1 - 3	0.049°	0.29°	0.00°	
3 - 4	1 - 3	-0.002°	0.50°	0.33°	
	PRESET	0.000°	0.00°	0.00°	
	AVERAGE	0.023°	0.40°	0.17°	ADVISED MOUNTING ANGLES
	SDEV	0.036°	0.15°	0.23°	

MOUNTING ANGLE SIGN CONVENTION	
Roll	Positive when Transducer center beam points towards port
Pitch	Positive when Transducer center beam points towards bow
Heading	Positive when Transducer is rotated clockwise around vertical axis of vessel
Note: All angles are absolute w.r.t. the vessel reference frame	

ACCURACY	
Average Error	4.044 cm/m2

Tabela A6: Calibração feita a 02/05/2023 – Local de despejo 3.

CALIBRATION OFFSET RESULTS					
Roll-Pitch	Hdg	Roll	Pitch	Heading	
1 - 2	1 - 3	-0.084°	-0.32°	5.89°	
1 - 2	2 - 4	0.313°	0.50°	-3.93°	
3 - 4	1 - 3	-0.248°	0.91°	7.95°	
3 - 4	2 - 4	0.484°	0.59°	-5.68°	
	PRESET	0.000°	0.00°	0.00°	
	AVERAGE	0.116°	0.42°	1.06°	ADVISED MOUNTING ANGLES
	SDEV	0.340°	0.52°	6.86°	

MOUNTING ANGLE SIGN CONVENTION	
Roll	Positive when Transducer center beam points towards port
Pitch	Positive when Transducer center beam points towards bow
Heading	Positive when Transducer is rotated clockwise around vertical axis of vessel
Note: All angles are absolute w.r.t. the vessel reference frame	

ACCURACY	
Average Error	3.765 cm/m2

Tabela A7: Calibração feita a 16/05/2023 – Local de despejo 8.

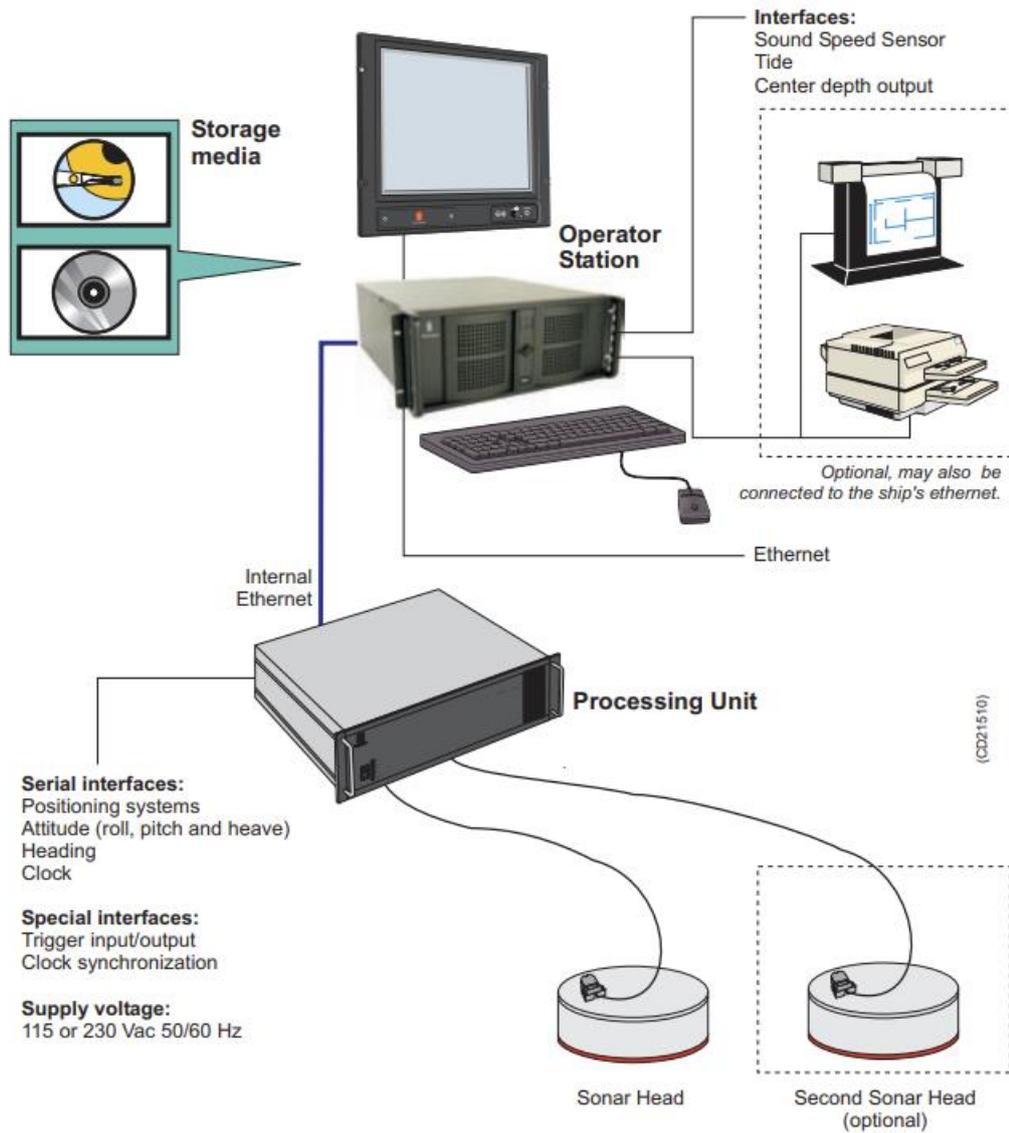


Figura A6: configuração típica do sistema.

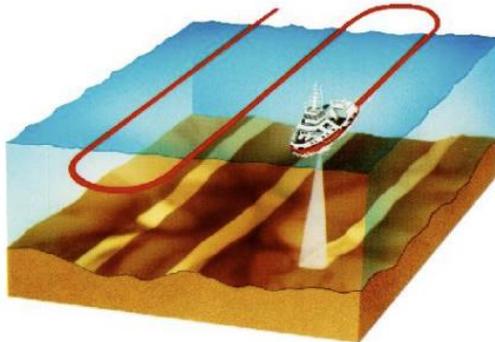


Figura A7: Sonda Kongsberg EA440

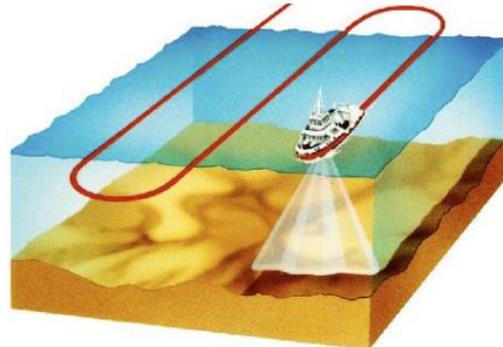


Figura A8: Sonda Kongsberg EM3002

Model	Freq. (kHz)	Depth	Swath	Beams
EM 2040	200 300 400	0.5 - 600 m	140°	400/800
EM 2040C	200 - 400	0.5 - 500 m	130 - 200°	400/800
EM 3002*	300	0.5 - 200 m	130 - 200°	160/254
EM 710	70-100	3 - 2000 m	140°	200/400
EM 302	30	10 - 7000 m	140°	288/432
EM 122	12	50 - 11000m	143°	288/432



Single beam survey:
Large unmapped gaps between lines



Multibeam survey:
100% coverage of seabed

A multibeam echo sounder has narrower beams than a singlebeam echo sounder:
EA singlebeam - 10° or 15°. Single beam = only one beam.
EM 2040 Single TX and RX - 0.4° x 0.7° or 0.7° x 0.7° - 400 formed beams
EM 2040C - 1° x 1° - 400 formed beams
EM 710 - 400 formed beams (Max 0.5° x 1°)
EM 302 - 432 formed beams (Max 0.5° x 1°)
EM 122 - 432 formed beams (Max 0.5° x 1°)

Figura A9: Propriedades das sondas.

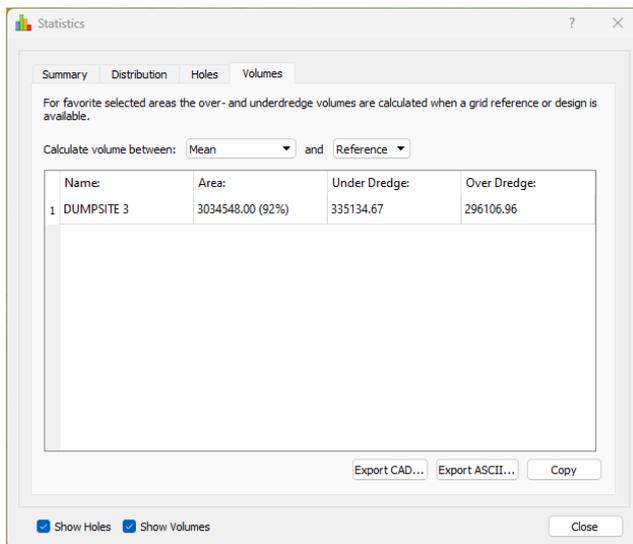


Figura A10: Cálculo de volume na área de despejo 3.

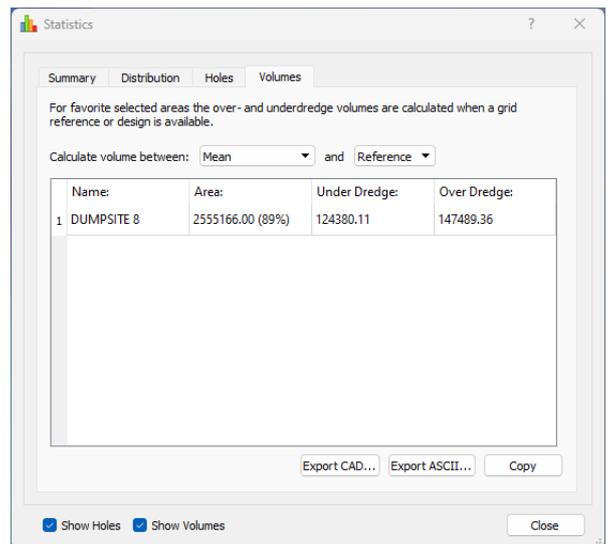


Figura A11: Cálculo de volume na área de despejo 8.