



## **A Importância dos SIG na Gestão Portuária**

Nidia Filipa Correia Catarino

Dissertação

apresentada(o) como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciência e Sistemas de Informação  
Geográfica

**NOVA Information Management School**

**Instituto Superior de Estatística e Gestão de Informação**

Universidade Nova de Lisboa

**NOVA Information Management School**  
**Instituto Superior de Estatística e Gestão de Informação**  
Universidade Nova de Lisboa

**A IMPORTÂNCIA DOS SIG NA GESTÃO PORTUÁRIA**

por

Nidia Filipa Correia Catarino

Dissertação apresentada(o) como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em  
Ciência e Sistemas de Informação Geográfica

**Orientada por:**

Marco Otávio Trindade Painho, PhD, NOVA Information Management School

**Co-Orientada por:**

Vicente De Azevedo Tang, PhD, NOVA Information Management School

# DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

## 1. Assinatura digital

Declaro que o trabalho contido neste documento é da minha autoria e não de outra pessoa. Toda a assistência recebida de outras pessoas está devidamente identificada e é efetuada referência a todas as fontes utilizadas (publicadas ou não).

O trabalho não foi anteriormente submetido ou avaliado na NOVA Information Management School ou em qualquer outra instituição. Declaro ainda que tenho conhecimento das Regras de Conduta e do Código de Honra da NOVA Information Management School.

[ASSINATURA DIGITAL]

## UTILIZAÇÃO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL GENERATIVA

Tarefas	NÃO	SIM	Ferramentas de Inteligência Artificial Generativa
Compreender melhor as questões relacionadas com a investigação		x	Chat GPT
Resumir texto de bibliografia / recursos		x	Chat GPT
Resumo do(s) método(s) utilizado(s)			
Tradução de texto		x	Chat GPT
Verificação gramatical		x	Chat GPT
Parafrasear ou reescrever texto de outras pessoas/recursos			
Codificação em R, Python, etc.			
Obter ajuda sobre um software		x	Chat GPT
Criação e edição de imagens, mapas, vídeos, etc.			
Análise de dados			
Especificar abaixo outras tarefas não mencionadas acima:			

## AGRADECIMENTOS

A conclusão desta dissertação representa não apenas um marco académico individual, mas o resultado de um esforço coletivo que envolveu o apoio e orientação de diversas pessoas e instituições às quais devo os meus sinceros agradecimentos.

Em primeiro lugar, expresso a minha profunda gratidão à Administração dos Portos de Sines e do Algarve (APS), minha entidade patronal, que não apenas possibilitou, mas ativamente promoveu esta formação. Este apoio institucional demonstra o compromisso da APS com o desenvolvimento profissional e académico dos seus colaboradores, contribuindo significativamente para a excelência operacional do porto.

Aos meus chefes diretos, Eng. António Santos e Eng. Eduardo Moutinho, agradeço a compreensão, flexibilidade e constante incentivo ao longo deste percurso académico. O vosso apoio foi fundamental para conciliar as exigências profissionais com as académicas, permitindo-me aproveitar ao máximo esta oportunidade de desenvolvimento.

Ao Professor Doutor Marco Painho, meu orientador, o seu apoio foi essencial para que superasse os desafios deste percurso, além de ter contribuído para melhorar a qualidade desta investigação e dos meus conhecimentos sobre os Sistemas de Informação Geográfica no contexto portuário.

Ao Professor Doutor Vicente Tang, meu co-orientador, expresso a minha gratidão pelo acompanhamento dedicado e pelas valiosas sugestões que enriqueceram significativamente este trabalho. A sua experiência e conhecimento foram fundamentais para enriquecer as análises desenvolvidas.

Este trabalho representa não apenas uma conquista pessoal, mas também reflete o ambiente e apoio ao desenvolvimento profissional que encontrei tanto na APS quanto na NOVA Information Management School.

A todos os que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, o meu sincero agradecimento.

# A IMPORTÂNCIA DOS SIG NA GESTÃO PORTUÁRIA

## RESUMO

Este trabalho desenvolve uma metodologia integrada para análise e gestão portuária fundamentada em Sistemas de Informação Geográfica (SIG), utilizando o Porto de Sines como caso de estudo.

O objetivo principal é estabelecer uma abordagem metodológica que combine diferentes camadas de análise espacial para permitir uma compreensão mais profunda e dinâmica do ambiente portuário, facilitando as tomadas de decisões operacionais e estratégicas.

A metodologia estrutura-se em três análises principais. A primeira consiste na modelação digital do terreno, que visa caracterizar com precisão o ambiente marinho do porto através de técnicas avançadas de interpolação e análise espacial. A segunda foca-se na análise do tráfego marítimo, utilizando dados do Sistema de Identificação Automática (AIS) para identificar e caracterizar padrões de movimentação de navios, áreas de concentração de tráfego e potenciais zonas de conflito operacional. A terceira desenvolve um modelo multicritério de avaliação de riscos que integra os dados batimétricos e de tráfego, permitindo uma análise de riscos operacionais.

O estudo termina com um capítulo sobre Digital Twins na gestão portuária, apresentando esta tecnologia como evolução natural da metodologia proposta.

Os Digital Twins aparecem como uma ferramenta fundamental para a modernização das instalações portuárias, oferecendo um caminho para integrar dados em tempo real com modelos preditivos, permitindo uma gestão mais dinâmica e eficiente do ambiente portuário.

## **PALAVRAS-CHAVE**

Gestão Portuária; Sistemas de Informação Geográfica; Análise Espacial; Digital Twin; Modelação Batimétrica; Segurança da Navegação; Análise de Risco Portuário; Tráfego Marítimo

## **ABSTRACT**

This work develops an integrated methodology for port analysis and management based on Geographic Information Systems (GIS), using the Port of Sines as a case study. The main objective is to establish a methodological approach that combines different layers of spatial analysis to enable a deeper and more dynamic understanding of the port environment, facilitating operational and strategic decision-making. The methodology is structured in three main analyses. The first consists of digital terrain modeling, which aims to accurately characterize the port's underwater environment through advanced interpolation and spatial analysis techniques. The second analysis focuses on maritime traffic analysis, using Automatic Identification System (AIS) data to identify and characterize vessel movement patterns, traffic concentration areas, and potential operational conflict zones. The third analysis develops a multicriteria risk assessment model that integrates bathymetric and traffic data, enabling operational risk analysis. The study concludes with a literature review on Digital Twins and their application in port management, presenting this technology as a natural evolution of the proposed methodology. Digital Twins emerge as a fundamental tool for the modernization of port facilities, offering a path to integrate real-time data with predictive models, enabling more dynamic and efficient management of the port environment.

## **KEYWORDS**

Port Management; Geographic Information Systems; Spatial Analysis; Digital Twin; Bathymetric Modeling; Navigation Safety; Port Risk Analysis; Maritime Traffic

# ÍNDICE

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE .....	III
AGRADECIMENTOS .....	V
RESUMO.....	VI
ABSTRACT .....	VIII
ÍNDICE DE TABELAS .....	XII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIII
ACRÓNIMOS.....	XV
<b>1. INTRODUÇÃO AOS SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA (SIGs) NO CONTEXTO PORTUÁRIO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Importância e Aplicações dos SIGs nos Portos.....</b>	<b>4</b>
<b>1.2. Aplicações dos SIGs nos Portos .....</b>	<b>6</b>
<b>1.3. Vantagens dos SIGs no Contexto Portuário .....</b>	<b>8</b>
<b>1.4. Objetivos e Relevância do Estudo .....</b>	<b>9</b>
<b>1.5. Importância e Integração das Análises.....</b>	<b>12</b>
<b>2. REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>15</b>
<b>2.1. Modelação Digital do Terreno.....</b>	<b>15</b>
<b>2.2. Modelação de Riscos e Análise de Tráfego Marítimo em Ambientes Portuários .....</b>	<b>17</b>
<b>2.3. Digital Twins e Inovação na Gestão Portuária .....</b>	<b>18</b>
<b>3. ANÁLISES IMPORTANTES NOS PORTOS.....</b>	<b>19</b>
<b>3.1. Modelação Digital Do Terreno .....</b>	<b>21</b>
<b>3.1.1. Local de estudo e dados.....</b>	<b>21</b>
<b>3.1.2. Metodologia .....</b>	<b>22</b>
<b>3.1.3. Resultados.....</b>	<b>24</b>
<b>3.1.3.1. Análise Univariada e Exploratória .....</b>	<b>24</b>
<b>3.1.3.2. Análise Espacial.....</b>	<b>31</b>

3.1.3.3.	Interpolação .....	36
3.1.4.	Discussão .....	42
3.1.5.	Conclusão .....	44
3.2.	<b>Análise De Tráfego De Navios .....</b>	<b>46</b>
3.2.1.	Local de estudo e dados.....	46
3.2.2.	Metodologia .....	49
3.2.2.1.	Enquadramento Metodológico .....	49
3.2.2.2.	Processamento e Análise de Dados .....	49
3.2.2.2.1.	Pré-processamento.....	49
3.2.2.2.2.	Abordagem Analítica.....	50
3.2.2.2.3.	Estimativa de Densidade.....	50
3.2.2.3.	Validação e Limitações .....	52
3.2.2.4.	Implementação SIG .....	52
3.2.3.	Resultados.....	54
3.2.3.1.	Análise de Tráfego Marítimo Regional.....	54
3.2.3.2.	Análise do Tráfego no Porto de Sines .....	57
3.2.3.3.	Padrões de Navegação por Tipo de Navio .....	58
3.2.4.	Discussão .....	61
3.2.5.	Conclusão .....	63
3.3.	<b>Modelo De Identificação De Zonas De Risco Para Operações Portuárias .....</b>	<b>64</b>
3.3.1.	Local de estudo e dados.....	64
3.3.2.	Objetivo principal e Critérios de análise.....	66
3.3.3.	Metodologia.....	68
3.3.3.1.	Enquadramento Metodológico .....	68
3.3.3.2.	Critérios de Análise.....	69

3.3.3.2.1.	<b>Análise da Batimetria e Modelo Digital de Terreno .....</b>	<b>69</b>
3.3.3.2.2.	<b>Análise da Densidade de Tráfego Marítimo .....</b>	<b>70</b>
3.3.3.2.3.	<b>Definição das Distâncias de Segurança.....</b>	<b>71</b>
3.3.3.3.	<b>Processo de Quantificação do Risco .....</b>	<b>73</b>
3.3.3.4.	<b>Validação Estatística Espacial.....</b>	<b>75</b>
3.3.3.4.1.	<b>Análise de Autocorrelação Espacial .....</b>	<b>75</b>
3.3.3.5.	<b>Implementação em SIG.....</b>	<b>76</b>
3.3.3.6.	<b>Validação .....</b>	<b>78</b>
3.3.4.	<b>Resultados .....</b>	<b>79</b>
3.3.4.1.	<b>Análise da Batimetria .....</b>	<b>79</b>
3.3.4.2.	<b>Padrões de Densidade de Tráfego.....</b>	<b>82</b>
3.3.4.3.	<b>Perigosidade por Terminal.....</b>	<b>83</b>
3.3.4.4.	<b>Influência dos Obstáculos na Navegação .....</b>	<b>85</b>
3.3.4.5.	<b>Mapa de Risco Integrado .....</b>	<b>87</b>
3.3.4.6.	<b>Validação Estatística.....</b>	<b>90</b>
3.3.5.	<b>Discussão .....</b>	<b>92</b>
3.3.6.	<b>Conclusão .....</b>	<b>94</b>
3.4.	<b>Conclusões.....</b>	<b>96</b>
4.	<b>DIGITAL TWINS E SIG NA GESTÃO PORTUÁRIA .....</b>	<b>98</b>
4.1.	<b>Fundamentação Teórica e Evolução dos Digital Twins .....</b>	<b>99</b>
4.2.	<b>Aplicações na Gestão Portuária .....</b>	<b>100</b>
4.2.1.	<b>Modelação do Terreno e Infraestruturas .....</b>	<b>100</b>
4.2.2.	<b>Análise e Gestão de Tráfego Marítimo.....</b>	<b>102</b>
4.2.3.	<b>Modelação e Gestão de Risco .....</b>	<b>104</b>
5.	<b>Conclusões e Implicações Práticas .....</b>	<b>105</b>
6.	<b>Bibliografia e Referências .....</b>	<b>108</b>

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Estatísticas resumidas das profundidades na zona costeira de Sines .	24
Tabela 2 -Classificações dos modelos de interpolação e estatísticas de validação cruzada .....	39
Tabela 3 -Classificação de densidade de tráfego marítimo.....	51
Tabela 4 - Características dos Terminais. Fonte: APS.....	64
Tabela 5 - Classificação de risco tendo em consideração o terminal .....	69
Tabela 6 - Classificação de zonas de segurança tendo em consideração as boias de navegação .....	72
Tabela 7 - Classificação de zonas de segurança tendo em consideração os farolins .....	72
Tabela 8 - Classificação final de segurança de operações no porto .....	72
Tabela 9 - Critérios de Ponderação .....	74
Tabela 10 - Classificação final de riscos .....	87

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo conceptual da integração de análises para gestão portuária...	12
Figura 2 - Model Builder para análise batimétrica da zona costeira de Sines, ilustrando a integração das diferentes etapas metodológicas e ferramentas utilizadas.....	23
Figura 3 - Superfície utilizado cores graduadas para representar as profundidades .....	26
Figura 4 - Histograma .....	27
Figura 5 - Gráfico Box Plot da variável Z.....	28
Figura 6 - Mapas de indicadores do Z usando quartis como limites .....	30
Figura 7 - Mapa de Voronoi para a variável Z .....	31
Figura 8 - Mapa Local e gráfico Moran's I para a variável Z .....	33
Figura 9 - Autocorrelação Espacial (Global Moran I) relatório .....	34
Figura 10 - Mapa de previsão IDW.....	36
Figura 11 - Validação cruzada .....	37
Figura 12 - Mapa de média local (esquerda) e mapa de desvio padrão local (direita) calculados usando a não sobreposição estatísticas de janela móvel do mapa de previsão IDW do Z .....	38
Figura 13 - Mapa de média local (esquerda) e mapa de desvio padrão local (direita) calculados usando sobreposição estatísticas de janela móvel do mapa de previsão IDW do Z.....	38
Figura 14 - Semivariograma.....	40
Figura 15 - Validação cruzada .....	41
Figura 16 - Model builder utilizado para a construção da densidade de tráfego marítimo.....	53
Figura 17 - Corredores de tráfego mais afastados em cada sentido B destinam-se a navios que transportem carga perigosas para o meio marinho, os corredores de tráfego mais próximos da costa em cada sentido (A) destinam-se aos restantes navios. Adaptado: Instituto Hidrográfico (IH).....	54
Figura 18 - Densidade Total de Tráfego (navio/km <sup>2</sup> ) no Mês de Maio .....	55
Figura 19 - Densidade de Tráfego (navio/km <sup>2</sup> ) no Porto de Sines.....	57

Figura 20 - Densidade de Tráfego (navio/km <sup>2</sup> ) de Navios de Carga .....	58
Figura 21 - Densidade de Tráfego (navio/km <sup>2</sup> ) de Navios-Tanque.....	59
Figura 22 - Model builder da metodologia aplicada .....	77
Figura 23 - Hidrografia do Porto de Sines relativa a 2019 .....	79
Figura 24 - Hidrografia Reclassificada por quatro categorias de perigosidade.....	80
Figura 25 - Hidrografia normalizada e definida para 4 categorias de perigosidade	81
Figura 26 - Densidade de tráfego marítimo (navio/km <sup>2</sup> ) no Porto de Sines em maio de 2023 .....	82
Figura 27 - Mapa de Perigosidade por Terminal.....	84
Figura 28 - Mapa de perigosidade de obstáculos como boias e faróis.....	85
Figura 29 - Mapa de Risco .....	88
Figura 30 - Validação através do Índice Global de Moran.....	90

## ACRÓNIMOS

AIS - Automatic Identification System

APS - Administração dos Portos de Sines e do Algarve

EST - Esquema de Separação de Tráfego

FAHP - Fuzzy Analytic Hierarchy Process

GPS - Global Position System

IDW - Inverse Distance Weighting

IHO - International Hydrographic Organization

IMO - International Maritime Organization

IoT - Internet of Things

MDT - Modelação Digital do Terreno

NPRI - Nautical Port Risk Index

PIANC - Permanent International Association of Navigation Congresses

SIG - Sistemas de Informação Geográfica

TCS - Terminal de Contentores de Sines

TGL - Terminal de Granéis Líquidos

TGN - Terminal de Gás Natural

TMS - Terminal Multipurpose de Sines

TPQ - Terminal Petroquímico

VTS - Vessel Traffic Service

ZH - Zero Hidrográfico

# **1. INTRODUÇÃO AOS SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA (SIGs) NO CONTEXTO PORTUÁRIO**

Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) constituem um conjunto integrado de hardware, software, dados geográficos, recursos humanos e procedimentos, projetados para recolher, armazenar, manipular, analisar e visualizar dados espacialmente referenciados. Esta tecnologia revolucionou a forma como as organizações gerem e analisam informações com componente espacial ou geográfica.

A estrutura fundamental dos SIG assenta em cinco componentes essenciais que trabalham de forma integrada. O hardware fornece a plataforma física para processamento e visualização. O software oferece as ferramentas e funcionalidades para manipulação dos dados.

Os dados geográficos representam o mundo real em formato digital. As pessoas são responsáveis pelo desenvolvimento, implementação e utilização do sistema. Os procedimentos estabelecem as metodologias e práticas para uma operação eficiente.

No ambiente portuário, os SIG demonstram particular relevância devido à natureza intrinsecamente espacial das operações portuárias. Como destacam Bellsolà Olba et al. (2019), os portos modernos são sistemas complexos que exigem a integração de múltiplas camadas de informação espacial para uma gestão eficiente. Desde a localização de navios e infraestruturas até ao planeamento de rotas e análise de riscos, praticamente todos os aspetos das operações portuárias têm uma componente geográfica.

Wang et al. (2014) mostram que esta componente geográfica é fundamental não apenas para operações rotineiras, mas também para a avaliação e gestão de riscos em ambientes portuários.

As principais funcionalidades dos SIG que os tornam importantes para a gestão portuária incluem:

- Capacidade de integrar dados de diferentes fontes numa base geográfica comum

- Ferramentas de análise espacial para identificar padrões e relações
- Recursos de visualização que facilitam a compreensão de informações complexas
- Capacidade de modelar para simular cenários e apoiar decisões

Os SIG modernos são mais do que simples mapas, funcionam como sistemas complexos que integram diversas tecnologias.

No ambiente portuário, isso traduz-se na capacidade de:

1. Monitorizar em tempo real o tráfego de embarcações/navios
2. Analisar padrões espaciais de acidentes e incidentes
3. Avaliar riscos em diferentes áreas do porto
4. Otimizar rotas e operações portuárias
5. Apoiar o planeamento de infraestruturas

A importância dos SIG para os portos tem crescido significativamente com o aumento do tráfego marítimo global. Como observado por Yip (2008), grandes portos podem receber dezenas de milhares de navios anualmente, gerando um volume massivo de dados espaciais que precisam ser adequadamente geridos e analisados.

J. Li & Heap (2014) destacam que os SIG modernos oferecem capacidades de análise espacial avançadas, incluindo métodos de interpolação que permitem criar superfícies contínuas a partir de dados pontuais - uma funcionalidade crucial para compreender as diferentes componentes, como batimetria, condições meteorológicas e padrões de tráfego que afetam as operações portuárias.

No contexto da segurança portuária, Wang et al. (2014) demonstram como os SIG podem integrar múltiplas camadas de informação para avaliar riscos e otimizar rotas marítimas. Esta capacidade de análise multicritério espacial torna os SIG uma ferramenta indispensável para o planeamento e gestão portuária moderna.

A evolução tecnológica tem expandido ainda mais as capacidades dos SIG no ambiente portuário, com a integração de tecnologias como a deteção remota, sistemas de posicionamento global (GPS) e Internet of Things (IoT). Estas integrações permitem análises cada vez mais complexas e em tempo real das operações portuárias.

Esta introdução aos SIG no contexto portuário demonstra como esta tecnologia se tornou fundamental para a gestão moderna de portos, oferecendo as ferramentas necessárias para lidar com os desafios crescentes de eficiência, segurança e sustentabilidade nas operações portuárias.

## 1.1. Importância e Aplicações dos SIGs nos Portos

Os portos desempenham um papel fundamental no comércio global, movimentando grandes volumes de mercadorias, o que torna a sua eficiência operacional uma prioridade. Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) emergem como ferramentas essenciais para apoiar a gestão portuária, oferecendo soluções para o planejamento, monitorização e tomada de decisões baseadas em dados espaciais.

Os SIG, ao integrar diversas fontes de dados geoespaciais, facilitam a gestão dos portos num nível estratégico e operacional, permitindo melhorias nas operações e na segurança.

A integração dos SIG no ambiente portuário representa uma evolução significativa na forma como os portos gerem as operações. Como identificado por Batista et al. (2015), os SIG proporcionam uma plataforma integrada que permite análises multidimensionais essenciais para a gestão portuária moderna. Os autores salientam a capacidade de combinar e analisar diferentes camadas de informação espacial, desde dados batimétricos até padrões de tráfego, criando uma base sólida para a tomada de decisões estratégicas no setor portuário.

A evolução dos SIG tem acompanhado a crescente complexidade das operações portuárias. Y. Zhou et al. (2019) mostram como estas ferramentas podem ser utilizadas para analisar e classificar padrões de comportamento de navios, permitindo uma compreensão mais profunda das operações.

De forma adicional, C. Zhou et al. (2021) expandem esta abordagem ao propor uma metodologia analítica baseada em digital twins que integra dados de múltiplas fontes para melhorar a gestão portuária.

### **Importância dos SIGs na Gestão Portuária**

Os SIGs são indispensáveis para otimizar as operações portuárias por várias razões:

1. **Gestão de Recursos e Infraestrutura:** os portos possuem complexas infraestruturas que exigem monitorização constante. Os SIGs permitem a visualização e atualização contínua da localização de docas, terminais, armazéns, vias de acesso e outras infraestruturas. Dessa forma, a

manutenção e expansão dessas áreas são planeadas com precisão, maximizando a capacidade operacional.

2. **Monitorização Ambiental:** A localização dos portos em áreas costeiras e frequentemente sensíveis do ponto de vista ambiental exige uma monitorização constante para minimizar os impactos ecológicos. Os SIGs são utilizados para monitorizar parâmetros ambientais como qualidade da água, biodiversidade e erosão costeira. Isso permite que os portos mantenham práticas sustentáveis e respeitem as regulamentações ambientais rigorosas.
3. **Segurança e Prevenção de Riscos:** A segurança é uma prioridade nos portos, onde riscos como colisões e derramamentos de carga devem ser mitigados. Os SIGs possibilitam o mapeamento de áreas de risco, a análise de rotas seguras para navios e a vigilância de zonas de carga perigosa. Em situações de emergência, os SIGs permitem uma resposta rápida e coordenada, ajudando na alocação eficiente de recursos.

## 1.2. Aplicações dos SIGs nos Portos

Além de sua importância, os SIGs têm inúmeras aplicações práticas que transformam a gestão portuária:

1. **Análise e Planejamento Logístico:** Uma das maiores vantagens dos SIGs no contexto portuário é a capacidade de suportar o planejamento logístico. Os dados geoespaciais permitem que os gestores analisem padrões de tráfego marítimo, identifiquem gargalos e otimizem as rotas dos navios. Assim, o tempo de espera e os custos operacionais são reduzidos, melhorando a eficiência do porto.
2. **Monitorização de Tráfego em Tempo Real:** Com os SIGs, é possível monitorizar em tempo real a localização de navios, fornecendo uma visão precisa do movimento de navios dentro e fora do porto. Esse acompanhamento facilita a coordenação da atracação e largada, garantindo que as operações portuárias ocorram de forma ágil e organizada.
3. **Planeamento de Expansão e Desenvolvimento:** À medida que aumentam as operações portuárias, é necessário planejar a expansão das instalações portuárias. Os SIGs permitem simulações baseadas em cenários que ajudam a prever os impactos de novas infraestruturas, como terminais e áreas de armazenamento. A análise de variáveis como movimentação de mercadorias, mudanças no tráfego e impacto ambiental é facilitada com os SIGs.
4. **Análise Espacial e Identificação de Padrões:** Os SIGs fornecem ferramentas estruturadas para a análise espacial, permitindo identificar padrões que poderiam passar despercebidos com análises convencionais. Por exemplo, eles podem identificar zonas de atracação com congestionamento recorrente, ajudando os gestores a implementar medidas de redistribuição de cargas ou reorganização de horários para reduzir atrasos.
5. **Interoperabilidade e Integração de Dados Multissetoriais:** Nos portos, é comum que diferentes sistemas e departamentos precisem trocar informações. Os SIGs facilitam essa interoperabilidade, permitindo que dados sobre infraestrutura, tráfego, segurança e meio ambiente sejam

integrados num único sistema. Isso proporciona uma visão abrangente que favorece a coordenação entre departamentos e melhora o processo decisório.

### 1.3. Vantagens dos SIGs no Contexto Portuário

A implementação dos SIGs no contexto portuário oferece várias vantagens competitivas:

- **Tomada de Decisão Informada:** A capacidade de consolidar e analisar dados espaciais proporciona aos gestores uma base sólida para a tomada de decisões informadas, garantindo que as operações estejam alinhadas com os objetivos estratégicos do porto.
- **Redução de Custos:** Ao otimizar rotas, melhorar a logística e antecipar problemas de infraestrutura, os SIGs contribuem para a redução dos custos operacionais e para o aumento da rentabilidade.
- **Sustentabilidade e Conformidade Ambiental:** Ao integrar dados ambientais com operacionais, os SIGs ajudam os portos a manterem práticas sustentáveis, o que é essencial para respeitar os regulamentos e melhorar a imagem institucional.
- **Agilidade e Eficiência Operacional:** A monitorização em tempo real e a capacidade de resposta rápida a eventos contribuem para uma operação mais ágil e eficiente, fundamental para portos que lidam com grande volume de tráfego e cargas.

A utilização de SIGs no setor portuário é essencial para atender às crescentes exigências operacionais, ambientais e de segurança. Com as ferramentas de análise espacial e visualização de dados geoespaciais, os SIGs facilitam uma gestão eficiente e integrada, ajudando os portos a tornarem-se mais competitivos, sustentáveis e resilientes

## 1.4. Objetivos e Relevância do Estudo

A crescente complexidade das operações portuárias modernas, impulsionada pelo aumento constante do comércio marítimo internacional e pela evolução tecnológica dos navios, exige uma abordagem cada vez mais sofisticada e integrada na gestão portuária. Neste contexto, o presente trabalho propõe-se a desenvolver uma metodologia inovadora que combina diferentes camadas de análise espacial através de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), utilizando o Porto de Sines como caso de estudo.

O objetivo principal deste trabalho é estabelecer uma análise metodológica integrada que permita uma compreensão mais profunda e dinâmica do ambiente portuário, facilitando a tomada de decisões operacionais e estratégicas. Este objetivo fundamenta-se na necessidade, identificada por Bellsolà Olba et al. (2019), de desenvolver abordagens mais holísticas para a gestão portuária que considerem simultaneamente aspetos físicos, operacionais e de segurança.

Para alcançar este propósito abrangente, o estudo estrutura-se em três objetivos específicos, cada um contribuindo com elementos essenciais para a compreensão global do sistema portuário:

- O primeiro objetivo consiste no desenvolvimento de um modelo batimétrico estatisticamente validado que caracterize com precisão o ambiente marinho do porto. Este modelo, baseado nas metodologias propostas por J. Li & Heap (2014), visa não apenas mapear as profundidades atuais, mas também estabelecer uma base sólida para a monitorização contínua das condições físicas que afetam a navegação.
- O segundo objetivo foca-se no estabelecimento de uma metodologia sistemática para análise de padrões de tráfego marítimo. Esta análise, fundamentada nos dados do Sistema de Identificação Automática (AIS), procura identificar e caracterizar os padrões de movimentação de navios, áreas de concentração de tráfego e potenciais zonas de conflito operacional. Como demonstrado por (Wang et al., 2014), a compreensão

destes padrões é fundamental para otimizar as operações portuárias e prevenir situações de risco.

- O terceiro objetivo consiste no desenvolvimento de um modelo multicritério de avaliação de riscos que integre os dados batimétricos e de tráfego. Este modelo visa quantificar e mapear zonas críticas para a segurança da navegação, permitindo uma gestão mais proativa dos riscos operacionais. A abordagem multicritério, seguindo as diretrizes estabelecidas pela International Maritime Organization (IMO, 2018), considera tanto aspetos físicos quanto dinâmicos do ambiente portuário.

A relação entre estes três objetivos específicos e a sua integração para alcançar o objetivo geral do trabalho é ilustrada na Figura 1, que apresenta o modelo conceptual da metodologia proposta.

Estes três objetivos foram estruturados de forma a complementarem-se e reforçarem-se mutuamente. O modelo batimétrico fornece a base física fundamental sobre a qual se desenvolvem os padrões de tráfego marítimo. Por sua vez, as análises destes padrões, mostram como, os navios realmente utilizam e respondem às características físicas do porto. A integração destas duas camadas de análise no modelo de identificação de zonas de riscos, permite uma compreensão mais profunda e dinâmica do ambiente portuário, onde as características físicas e os padrões operacionais são considerados simultaneamente.

Esta abordagem, estabelece uma metodologia integrada que permite não apenas compreender as diferentes dimensões do ambiente portuário, mas também como elas interagem e se influenciam mutuamente, como ilustrada na Figura 1.

A relevância deste estudo manifesta-se em múltiplas dimensões. Do ponto de vista operacional, a metodologia desenvolvida oferece ferramentas práticas para otimizar a utilização do espaço portuário e melhorar a segurança das operações. Na perspetiva académica, o trabalho contribui para o avanço das metodologias de análise espacial aplicadas à gestão portuária, demonstrando a importância da utilização dos SIG.

O Porto de Sines, selecionado como caso de estudo para o desenvolvimento e validação desta metodologia, oferece características únicas que o tornam

particularmente adequado para esta investigação. Como principal porto de águas profundas da Península Ibérica, Sines apresenta uma complexidade operacional que combina diferentes tipos de terminais especializados, desde terminais de contentores até terminais de materiais perigosos, criando um ambiente ideal para testar a confiabilidade e adaptabilidade da metodologia proposta.

A diversidade de operações em Sines, que inclui o manuseamento de contentores, graneis líquidos, gás natural e carga geral, permite avaliar como a metodologia se comporta em diferentes contextos operacionais dentro do mesmo ambiente portuário.

As características naturais do porto, com profundidades que variam significativamente ao longo de sua área operacional, oferecem um cenário ideal para testar o modelo batimétrico. Simultaneamente, a presença de diferentes tipos de navios, desde grandes petroleiros até navios de contentores, permite uma análise abrangente dos padrões de tráfego marítimo e as suas interações com as características físicas do porto.

A posição estratégica de Sines nas rotas marítimas internacionais, combinada com sua importância como principal porta de abastecimento energético de Portugal, adiciona uma dimensão crítica à avaliação de riscos, tornando-o um caso de estudo particularmente relevante para o desenvolvimento de metodologias de gestão portuária mais eficientes e seguras.

Através da consecução destes objetivos, o estudo visa não apenas desenvolver ferramentas práticas para a gestão portuária, mas também estabelecer uma base metodológica que possa ser adaptada e aplicada noutros contextos portuários e contribui para uma abordagem mais completa e eficaz que permita enfrentar os desafios da gestão portuária moderna.

## 1.5. Importância e Integração das Análises

A gestão portuária moderna enfrenta desafios sem precedentes devido à evolução constante do transporte marítimo internacional. Este crescimento é acompanhado por mudanças significativas nas características dos navios. Os navios de contentores mais recentes, por exemplo, podem transportar mais de 24.000 TEUs, com comprimentos superiores a 400 metros e calados que ultrapassam os 16 metros, criando novos desafios para a infraestrutura e gestão portuária.

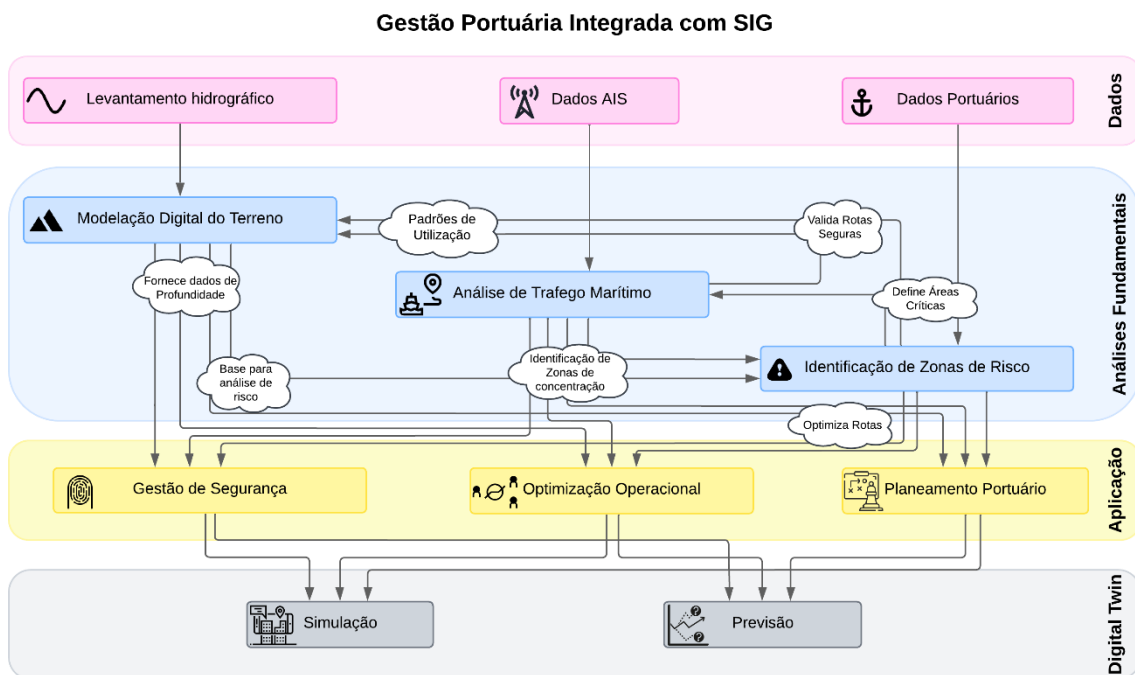


Figura 1 - Modelo conceptual da integração de análises para gestão portuária

Como demonstrado na Figura 1, a metodologia desenvolvida neste trabalho estabelece um sistema integrado onde cada componente fornece informações essenciais para os demais. O modelo batimétrico fornece a base física fundamental, enquanto a análise de tráfego identifica os padrões operacionais, e a avaliação de risco sintetiza estas informações para suporte à decisão.

A Modelação Digital do Terreno emerge neste contexto como elemento fundamental para a compreensão e gestão do ambiente portuário. Esta fundamentação metodológica, baseada nas técnicas de análise espacial propostas por Bivand et al. (2013) e nos métodos de interpolação discutidos por Aurenhammer et al. (2012), estabelece uma base quantitativa forte para a

caracterização do ambiente marinho. Esta abordagem foi posteriormente expandida por Oliver & Webster (2014), que desenvolveram técnicas geoestatísticas específicas para ambientes marinhos, publicadas no *Journal of Marine Science and Engineering*.

A importância da precisão batimétrica é particularmente evidenciada nos estudos de Wilson et al. (2007), publicados no *Marine Geodesy*. A sua análise de acidentes portuários entre 2010 e 2016 identificou que aproximadamente 28% dos incidentes de encalhe estavam relacionados a discrepâncias entre as profundidades esperadas e reais. Esta constatação realça a necessidade de modelos batimétricos não apenas precisos, mas também frequentemente atualizados.

A análise do tráfego marítimo representa a segunda camada fundamental deste estudo. A metodologia de análise de tráfego, fundamentada nas técnicas de densidade desenvolvidas por Silverman (1986) e aprimoradas por Pallotta et al. (2013), permite uma caracterização sistemática dos padrões de movimentação de navios. Bellsolà Olba et al. (2019), na sua pesquisa no Porto de Rotterdam, que processou mais de 2 milhões de registos AIS ao longo de um ano, demonstrou como esta análise sistemática pode identificar padrões operacionais críticos para a segurança e eficiência portuária. Os autores identificaram que aproximadamente 65% dos "quase acidentes" ocorriam em áreas de convergência de diferentes tipos de navios, destacando a importância de compreender os padrões de tráfego para a prevenção de acidentes.

A integração destes dados com sistemas de análise de risco foi extensivamente estudada por Wang et al. (2014) no *Safety Science*. A sua abordagem baseada na lógica fuzzy para avaliação de segurança em rotas marítimas estabeleceu uma estrutura metodológica que continua influenciando a análise de risco portuário. Os autores demonstraram que a combinação de dados batimétricos com análise de tráfego pode melhorar a precisão da avaliação de risco em até 40%, quando comparada com métodos tradicionais baseados apenas em estatísticas de acidentes.

A síntese destas diferentes camadas de análise num sistema integrado representa um avanço significativo na gestão portuária. Como demonstrado por Tu et al. (2018), a abordagem integrada permite não apenas identificar riscos existentes,

mas também prever potenciais situações de perigo antes que se materializem. O seu estudo, que analisou cinco anos de operações em portos chineses, mostrou uma redução de 35% nos incidentes após a implementação de sistemas integrados de análise.

A integração metodológica proposta neste estudo, como ilustrado na Figura 1, estabelece um ciclo contínuo de análise e validação. Esta abordagem integrada alinha-se com as diretrizes mais recentes da (Bolt & Secretariat, 2022) e IMO (2018) para gestão de segurança portuária, que enfatizam a necessidade de uma visão holística na avaliação de riscos.

O modelo batimétrico fornece a base física sobre o qual os padrões de tráfego se desenvolvem. A análise destes padrões, por sua vez, valida e complementa a compreensão do ambiente físico, mostrando como as características batimétricas influenciam o comportamento dos navios. O modelo de risco, alimentado por ambas as análises, permite uma avaliação mais precisa e dinâmica das condições de segurança, informando decisões operacionais que podem modificar tanto a batimetria (através de operações de dragagem) quanto os padrões de tráfego (através de ajustes nas rotas e procedimentos).

O Porto de Sines, com as suas características únicas, oferece um caso de estudo ideal para a aplicação desta metodologia integrada. Segundo dados da Administração dos Portos de Sines e do Algarve (APS, 2023), a diversidade operacional, combinada com sua localização estratégica e profundidades naturais significativas, cria um ambiente complexo que exige uma abordagem sofisticada de gestão.

Esta metodologia não apenas respeita as recomendações internacionais para gestão portuária moderna, mas também, estabelece uma estrutura que pode ser adaptada e replicada noutros contextos portuários, contribuindo para o avanço global das práticas de gestão portuária.

## **2. REVISÃO DA LITERATURA**

### **2.1. Modelação Digital do Terreno**

A Modelação Digital do Terreno (MDT) emergiu como uma ferramenta fundamental na análise e representação de superfícies topográficas e batimétricas, revolucionando a forma como compreendemos e analisamos o relevo terrestre e marinho (Zhilin, Li et al., 2005). Em ambientes marinhos, a MDT tem se mostrado particularmente valiosa para a gestão costeira, planeamento portuário e segurança da navegação, permitindo uma representação precisa e detalhada do relevo marinho (Lecours et al., 2016).

A construção de um MDT envolve três etapas principais: aquisição de dados, processamento e validação, e análise espacial. Na fase de aquisição, os dados batimétricos são tradicionalmente recolhidos através de ecosondas multifeixe, que permitem um mapeamento detalhado do fundo marinho com alta resolução espacial. Estes sistemas modernos representam um avanço significativo em relação aos métodos tradicionais de sondagem, oferecendo uma cobertura mais abrangente e precisa do leito marinho.

O processamento dos dados batimétricos requer técnicas específicas de filtragem e interpolação para lidar com as características particulares do ambiente marinho. Segundo J. Li & Heap (2014), a escolha do método de interpolação é crucial para a qualidade final do modelo, sendo que diferentes técnicas podem produzir resultados significativamente distintos. Entre os métodos mais utilizados, destacam-se o Inverse Distance Weighting (IDW) e o Kriging, cada um com as suas vantagens específicas dependendo do contexto de aplicação.

A validação dos modelos digitais do terreno em ambiente marinho apresenta desafios únicos, principalmente devido à dinâmica natural dos fundos marinhos e à dificuldade de acesso para verificações *in situ*. Oliver & Webster (2014) enfatizam a importância da análise geoestatística neste contexto, propondo métodos robustos para avaliar a qualidade e confiabilidade dos modelos gerados. A validação cruzada e a análise de resíduos são técnicas fundamentais neste processo, permitindo uma avaliação quantitativa da precisão do modelo.

Em aplicações portuárias, a MDT assume um papel crucial no planeamento e gestão das operações. Wilson et al. (2007) destacam que modelos batimétricos precisos são essenciais para garantir a segurança da navegação, planear operações de dragagem e monitorizar mudanças morfológicas do fundo marinho. A capacidade de detetar e quantificar alterações no fundo marinho ao longo do tempo é particularmente relevante em áreas portuárias, onde a dinâmica sedimentar pode afetar significativamente as operações marítimas.

A evolução recente das tecnologias de aquisição de dados e processamento tem permitido a criação de modelos cada vez mais detalhados e precisos. Mayer et al. (2018) apontam para uma tendência de integração de diferentes fontes de dados e técnicas de modelagem, resultando em representações mais completas e confiáveis do ambiente marinho. Esta integração tem sido fundamental para melhorar a nossa compreensão dos processos costeiros e melhorar a gestão de infraestruturas portuárias.

Apesar dos avanços significativos, desafios importantes, permanecem na modelação digital do terreno em ambientes marinhos. A necessidade de lidar com grandes volumes de dados, a complexidade dos processos de validação e a integração de diferentes escalas temporais e espaciais são questões que continuam a exigir atenção da comunidade científica. O desenvolvimento de novas metodologias e tecnologias promete enfrentar estes desafios, contribuindo para modelos ainda mais precisos e úteis para a gestão portuária e costeira (Wright & Heyman, 2008).

No contexto específico de portos, como o Porto de Sines, a modelação digital do terreno tem se mostrado uma ferramenta indispensável para o planeamento e gestão das operações portuárias. A capacidade de gerar e atualizar modelos precisos do fundo marinho permite uma gestão mais eficiente das infraestruturas e uma navegação mais segura, aspetos fundamentais para a operação de um porto moderno e competitivo.

## **2.2. Modelação de Riscos e Análise de Tráfego Marítimo em Ambientes Portuários**

A modelação de riscos em ambientes portuários tem evoluído significativamente nas últimas décadas, incorporando metodologias cada vez mais sofisticadas para abordar a complexidade das operações portuárias modernas. Esta evolução é particularmente evidente na incorporação de análises espaciais avançadas e no desenvolvimento de índices específicos para avaliação de riscos portuários (Getis & Ord, 1992; Olba et al., 2020).

A base fundamental para a compreensão dos riscos portuários foi estabelecida por Yip (2008), que desenvolveu uma metodologia baseada na análise estatística de acidentes em águas portuárias de Hong Kong. O seu trabalho pioneiro identificou padrões temporais de acidentes e estabeleceu correlações cruciais entre tipos de navios e incidentes, considerando também fatores ambientais contribuintes. Esta abordagem foi posteriormente expandida por Wang et al. (2014), que introduziram o processo de hierarquia analítica fuzzy (FAHP) para avaliação de segurança em rotas marítimas, permitindo uma avaliação multicriterial mais robusta dos riscos e a incorporação sistemática de incertezas no processo de análise.

A evolução metodológica culminou com o trabalho de Olba et al. (2020), que desenvolveram o Índice de Risco Portuário Náutico (NPRI). Este índice representa uma consolidação significativa das abordagens anteriores, integrando tanto a análise estatística de acidentes proposta por Yip (2008) quanto os elementos de avaliação multicriterial de Wang et al. (2014). O NPRI inovou ao integrar fatores específicos do porto e condições dinâmicas de operação, oferecendo uma ferramenta mais abrangente para a avaliação de riscos portuários.

A análise do tráfego marítimo, componente crucial da gestão de riscos portuários, beneficiou significativamente destes avanços metodológicos. Bellsolà Olba et al. (2019) contribuíram substancialmente para este campo ao desenvolver numa avaliação multicritério do tráfego de navios no Porto de Rotterdam. O seu estudo demonstrou a importância de considerar simultaneamente a densidade do tráfego, a complexidade das manobras e as características específicas dos navios na avaliação global dos riscos portuários.

### **2.3. Digital Twins e Inovação na Gestão Portuária**

A implementação de Digital Twins representa uma evolução significativa na modernização da gestão portuária. Klar et al. (2023) desenvolveram um framework abrangente para Digital Twins portuários, baseado em experiências de cidades inteligentes e cadeias de suprimentos. Esta abordagem tem demonstrado resultados significativos na otimização operacional e na melhoria da resiliência portuária.

Neugebauer et al. (2024) expandem esta perspectiva, identificando tendências emergentes como a integração com tecnologias 5G e o desenvolvimento de sistemas de automação avançada. C. Zhou et al. (2021) complementam esta visão ao demonstrarem, através de um sistema de suporte à decisão baseado em Digital Twin, melhorias significativas na eficiência operacional e na resiliência geral das instalações portuárias.

A integração destas tecnologias com as metodologias de avaliação de risco previamente discutidas tem criado um ambiente mais robusto para a gestão portuária. A combinação do NPRI Olba et al. (2020) com sistemas de Digital Twin tem permitido uma avaliação mais dinâmica e em tempo real dos riscos portuários, facilitando uma tomada de decisões proativa e a implementação de medidas preventivas mais eficazes.

### **3. ANÁLISES IMPORTANTES NOS PORTOS**

A gestão eficiente e segura de instalações portuárias modernas exige uma compreensão abrangente de múltiplos fatores que influenciam as suas operações. Este capítulo desenvolve as três análises fundamentais que compõem o modelo metodológico apresentado na Figura 1. Cada análise, embora possua objetivos e metodologias específicas, foi concebida considerando interações com as outras análises do sistema integrado.

A metodologia adotada neste trabalho reconhece as interdependências fundamentais entre as diferentes análises realizadas. O modelo batimétrico fornece a base essencial para compreender as características físicas que influenciam tanto os padrões de tráfego quanto as zonas de risco. Por sua vez, a análise de tráfego alimenta a avaliação de riscos e valida aspetos do modelo batimétrico através dos padrões reais de utilização do espaço portuário. Esta integração resulta numa compreensão mais completa e dinâmica do ambiente portuário.

Este capítulo apresenta uma análise integrada de elementos críticos para a segurança e eficiência operacional do Porto de Sines, desenvolvendo-se através de quatro componentes principais que se complementam e fornecem uma visão holística da área portuária.

Inicialmente, no subcapítulo 3.1, desenvolve-se uma análise detalhada da batimetria através da Modelação Digital do Terreno, estabelecendo uma base fundamental para compreender as características físicas do porto. Este estudo utiliza técnicas avançadas de interpolação e análise espacial para caracterizar com precisão o fundo marinho, elemento crucial para uma navegação segura e para a segurança das operações portuárias.

O subcapítulo 3.2 foca-se na análise do tráfego marítimo, utilizando dados AIS (Automatic Identification System) para identificar e caracterizar padrões de movimentação de navios. Esta análise complementa o estudo batimétrico ao mostrar como o espaço portuário é efetivamente utilizado pelos navios, fornecendo insights valiosos sobre áreas de maior concentração de tráfego e potenciais zonas de risco.

Integrando os conhecimentos dos dois primeiros subcapítulos, o subcapítulo 3.3 desenvolve um modelo abrangente de identificação de zonas de risco para as operações portuárias. Este modelo combina dados batimétricos, padrões de tráfego e características operacionais dos diferentes terminais para criar uma ferramenta importante de avaliação e gestão de riscos.

A metodologia adotada em cada subcapítulo segue rigorosos princípios científicos, incluindo validação estatística dos resultados e comparação com dados de referência quando disponíveis. Esta abordagem assegura a solidez e confiabilidade das análises apresentadas, fornecendo uma base sólida para a tomada de decisões operacionais e estratégicas no contexto portuário.

Em conjunto, estas análises fornecem uma visão abrangente e integrada dos principais fatores que influenciam a segurança e eficiência das operações portuárias, constituindo uma ferramenta valiosa para a gestão e planejamento portuário.

### **3.1. Modelação Digital Do Terreno**

A análise do ambiente portuário inicia-se com a caracterização precisa de sua base física através da modelação digital do terreno. Este capítulo desenvolve um modelo batimétrico estatisticamente validado que servirá como base para as análises subsequentes. Como ilustrado na Figura 1, a compreensão detalhada da batimetria não apenas determina as áreas navegáveis do porto, mas também influencia diretamente os padrões de movimentação dos navios e contribui para a identificação de zonas de risco. A metodologia desenvolvida neste capítulo estabelece uma base quantitativa estruturada sobre a qual se desenvolverão as análises de tráfego e identificação de zonas de risco apresentadas nos capítulos seguintes.

#### **3.1.1. Local de estudo e dados**

O Porto de Sines, localizado a 58 milhas náuticas a sul de Lisboa (37°57'N, 08°53'W), ocupa uma posição estratégica nas rotas marítimas globais Norte-Sul e Este-Oeste. Como principal infraestrutura portuária da fachada ibero-atlântica, integra cinco terminais especializados:

- Terminal de Granéis (TGL)
- Terminal Petroquímico (TPQ)
- Terminal Multipurpose de Sines (TMS)
- Terminal de Gás Natural (TGN)
- Terminal de Contentores de Sines (TCS)

O presente estudo utiliza dados batimétricos provenientes de um levantamento hidrográfico realizado pelo Instituto Hidrográfico em 2019, parte do programa regular de monitorização do Porto de Sines.

A aquisição dos dados seguiu rigorosamente as normas S-44 da Organização Hidrográfica Internacional (IHO) para levantamentos de Ordem Especial, assegurando a máxima precisão necessária para áreas portuárias críticas.

[\(https://www.apsinesalgarve.pt/porto-de-sines/o-porto/localiza%C3%A7%C3%A3o/\)](https://www.apsinesalgarve.pt/porto-de-sines/o-porto/localiza%C3%A7%C3%A3o/)

### **3.1.2. Metodologia**

O desenvolvimento desta metodologia partiu da necessidade de compreender o ambiente marinho do Porto de Sines na sua totalidade. Por isso, estruturamos a análise em três fases complementares que nos permitiram analisar os dados batimétricos de diferentes perspectivas: iniciamos com uma análise exploratória univariada, passamos para uma análise espacial mais abrangente, e finalizamos com técnicas de interpolação que nos permitiram criar um modelo contínuo do fundo marinho.

Esta abordagem sistemática segue as recomendações de (O'Sullivan & Unwin, 2010) para análise geográfica abrangente.

Na primeira fase, realizou-se uma análise exploratória univariada utilizando estatísticas descritivas básicas para compreender a distribuição dos dados batimétricos. Esta etapa preliminar, fundamental para as análises subsequentes mais complexas, incluiu a criação de mapas de cores graduadas e histogramas, seguindo as práticas estabelecidas por Bivand et al. (2013) para identificação de padrões espaciais e possíveis outliers.

A segunda fase focou-se na análise espacial avançada, implementando a técnica de mapas de Voronoi conforme descrita por Aurenhammer et al. (2012). Esta abordagem permitiu visualizar claramente as áreas de influência espacial ao redor dos pontos de amostragem, facilitando a identificação de regiões com características semelhantes ou discrepantes. A análise foi complementada com a aplicação da estatística espacial de Moran, tanto na sua forma global quanto local, seguindo a metodologia proposta por Anselin (1995).

Para a fase de interpolação, adotou-se inicialmente o método Inverse Distance Weighting (IDW), implementado através da ferramenta Geostatistical Wizard do ArcGIS Pro, seguindo as diretrizes estabelecidas por Li & Heap (2014). Esta técnica determinística foi escolhida pela sua consistência na estimativa de valores em locais não amostrados. A análise foi complementada com estatísticas de janelas móveis para investigar efeitos proporcionais nos dados, conforme recomendado por Oliver & Webster (2014).

Para implementar esta metodologia, foi desenvolvido um fluxo de trabalho automatizado no ArcGIS Pro usando o Model Builder (Figura 2).

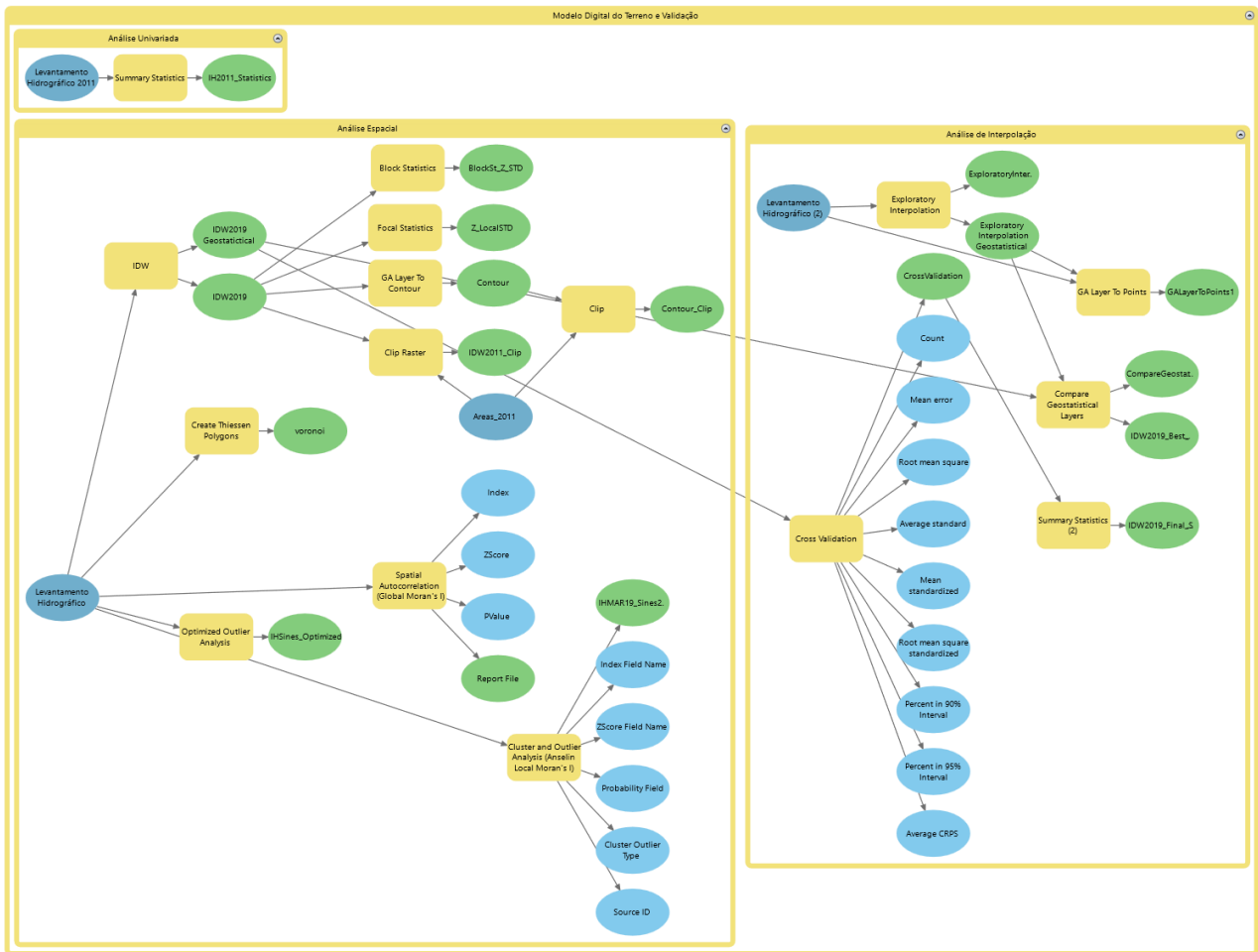


Figura 2 - Model Builder para análise batimétrica da zona costeira de Sines, ilustrando a integração das diferentes etapas metodológicas e ferramentas utilizadas.

### 3.1.3. Resultados

#### 3.1.3.1. Análise Univariada e Exploratória

A análise inicial do levantamento batimétrico, apoiada em 95.712 pontos de amostragem, mostrou características estatísticas significativas da distribuição das profundidades. A profundidade média observada foi de -27,96 m ( $\pm 12,81$  m), com valores extremos variando entre -65,08 m e 8,66 m. A proximidade entre a média e a mediana (-28,417 m), combinada com um coeficiente de assimetria próximo a zero (skewness = -0,01145), indica uma distribuição aproximadamente simétrica, conforme os critérios estabelecidos por Bivand et al. (2013).

Estatística resumida			
Z		Z*-1	
Mean	-27,955	Mean	27,95503
Standard Error	0,041394	Standard Error	0,041394
Median	-28,417	Median	28,417
Mode	-34,318	Mode	34,318
Standard Deviation	12,80623	Standard Deviation	12,80623
Sample Variance	163,9996	Sample Variance	163,9996
Kurtosis	-0,44936	Kurtosis	-0,44936
Skewness	-0,01145	Skewness	0,011446
Range	73,74	Range	73,74
Minimum	-65,076	Minimum	-8,664
Maximum	8,664	Maximum	65,076
Sum	-2675632	Sum	2675632
Count	95712	Count	95712

Tabela 1 - Estatísticas resumidas das profundidades na zona costeira de Sines

A estatística descritiva da Profundidade (Tabela 1) mostrou que:

- Foram utilizados 95 712 pontos de profundidades na zona costeira de Sines.
- A média das profundidades é igual a -27,96 m, com um desvio padrão igual a 12,81 m, indicando uma variabilidade significativa nas profundidades.
- A mediana de -28,417 está próxima da média, sugerindo uma distribuição ligeiramente simétrica.
- O intervalo das profundidades varia entre -65,08 m e 8,66 m, com uma moda de -34,32 m, que é o valor mais frequente.
- Em **50%** da área de estudo, as profundidades são menores ou iguais a **-28,42 m**.
- Os valores mínimo e máximo mostram a extensão dos dados. O valor mínimo é -65,076 e o máximo é 8,664, indicando que a distribuição dos valores Z está inclinada para o lado negativo.

- A moda é -34,318, valor que aparece com mais frequência no conjunto de dados.
- Valores de assimetria próximos de zero indicam que a distribuição é simétrica. Aqui, a distribuição é ligeiramente negativa e enviesada (skewness = -0,01145).

A análise espacial, implementada através de mapas de cores graduadas utilizando o método Natural Breaks (Jenks), como ilustrado na Figura 3, evidenciou um padrão consistente de variação batimétrica. Este padrão caracteriza-se por um gradiente bem definido, com profundidades aumentando progressivamente da linha da costa em direção ao mar aberto, corroborando com os padrões típicos de morfologia costeira descritos por Lecours et al. (2016).

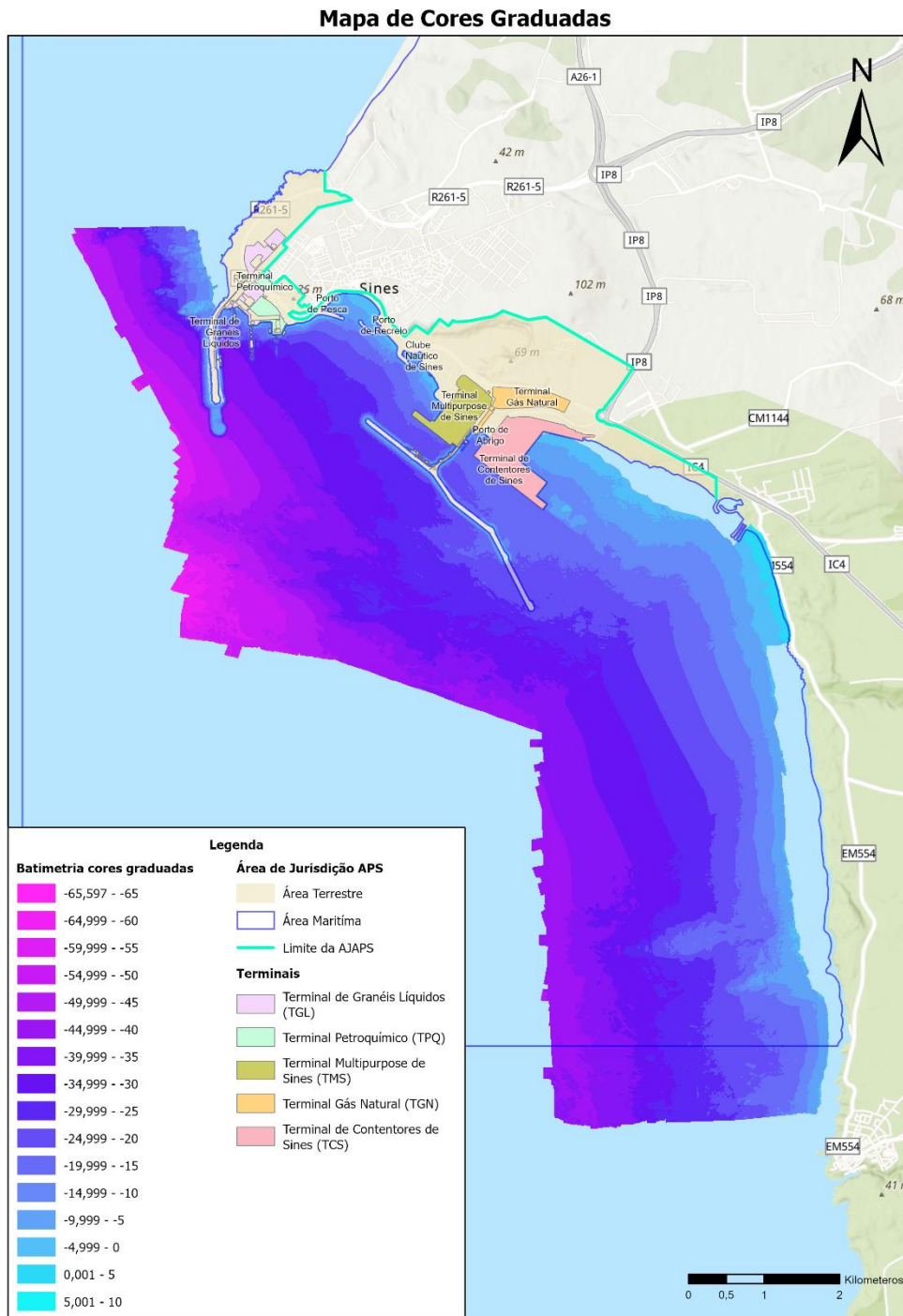


Figura 3 - Superfície utilizado cores graduadas para representar as profundidades

Em suma:

- O mapa demonstra variações espaciais ao longo da área de estudo, com a paleta de cores sugerindo que os valores variam substancialmente no espaço, sendo que apresenta uma maior profundidade na zona mais afastada da costa e menor profundidade na zona mais perto da costa

- Existe uma tendência global pois os valores mais baixos da variável representados a roxo correspondem às zonas mais profundas e mais afastadas da costa, enquanto as áreas representadas a azul correspondem às zonas menos profundas e mais perto da costa.
- A transição de cores sugere que há uma mudança gradual da profundidade de zona estudo.

A análise do histograma (Figura 4) e da box plot (Figura 5) forneceu insights adicionais sobre a distribuição espacial dos dados. O intervalo interquartil de 18,323 m (Q1 = -36,955 m; Q3 = -18,632 m) demonstra uma variabilidade considerável, mas consistente com as características esperadas para zonas costeiras, segundo Wilson et al. (2007). A distribuição unimodal observada, sem evidência de outliers significativos, sugere um processo batimétrico contínuo e bem definido.

O histograma mostra a distribuição dos valores Z com uma distribuição simétrica com ligeira inclinação à esquerda, confirmando os resultados das estatísticas descritivas (Figura 4).

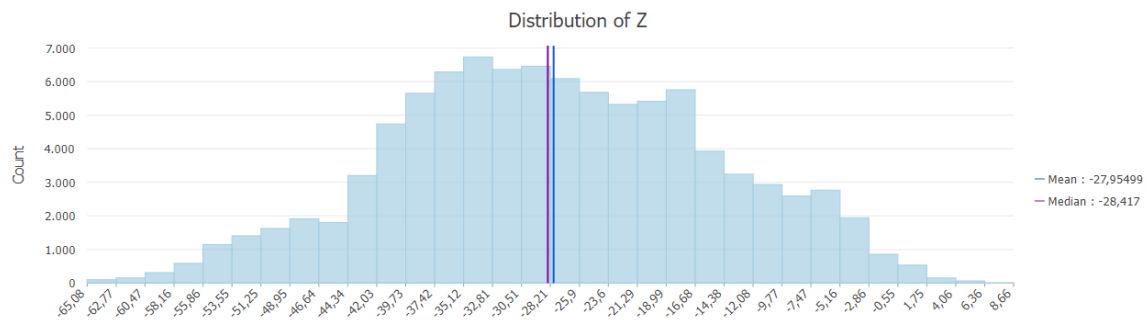


Figura 4 - Histograma

Em suma:

- A distribuição parece ser aproximadamente simétrica, com uma pequena inclinação para a esquerda, como indicado pelo valor de assimetria (skewness) ligeiramente negativo visto anteriormente.

- A média e a mediana estão próximas uma da outra, o que é característico de uma distribuição simétrica, mas a média está ligeiramente deslocada para a esquerda, indicando a leve inclinação.
- A distribuição não parece ser bimodal e não apresenta picos evidentes, sugerindo que não há múltiplas "populações" distintas de valores Z.
- O histograma mostra uma ampla gama de valores para Z, com a contagem de dados diminuindo à medida que se afasta do centro. O intervalo abrange valores de aproximadamente -65 a 9, o que indica uma variabilidade considerável na variável Z.
- Não é possível identificar outliers.

Combinando as informações do mapa de cores graduadas e do histograma, pode concluir-se que:

- Os valores na área de estudo têm uma variação espacial que é facilmente visível através do gradiente de cores no mapa.
- Não há uma separação distinta de valores altos e baixos, mas sim uma transição fluida entre eles.
- A distribuição dos valores é relativamente homogênea, sem a presença de múltiplas modas.

Estes mapas podem ser produzidos simplesmente alterando a simbologia dos valores Z, ou utilizando uma abordagem mais sofisticada que consiste em criar as variáveis binárias na tabela de atributos.

O gráfico box plot (Figura 5) mostra a distribuição dos valores Z.

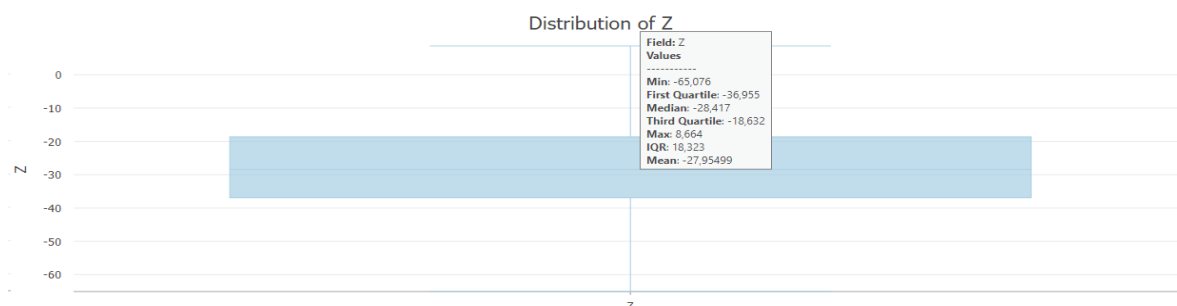


Figura 5 - Gráfico Box Plot da variável Z

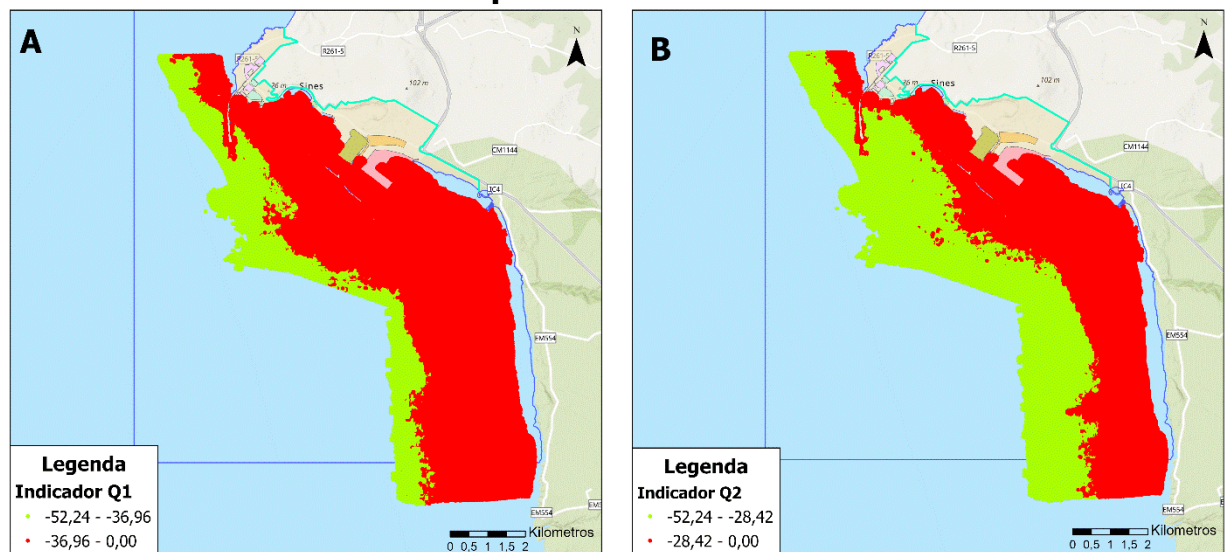
Os resultados mostram o seguinte:

- O mínimo (-65,076) e o máximo (8,664) representam os valores extremos nos dados.

- O 1º quartil é igual -36,955 m, o que significa que 25% dos valores são inferiores ou iguais a -36,955 m.
- O 2º quartil é igual -28,417 m, que corresponde a 50% dos valores sendo este igual é mediana.
- O 3º quartil é igual -18,632 m, portanto 75% dos valores são menores ou iguais a -18,632 m.
- O intervalo interquartil (IQR = Q3-Q1) é igual a 18,323 m, o que significa que os 50% intermediários dos valores têm uma variabilidade 18,323m e descreve a dispersão média dos dados.

Os mapas de indicadores com quartis (Figura 6 - Mapas A, B e C) proporcionaram uma visualização clara da distribuição espacial dos dados.

### Mapas de indicadores



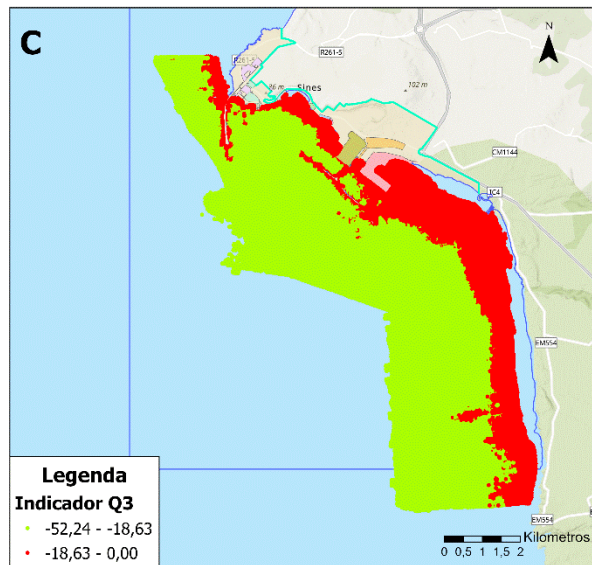


Figura 6 - Mapas de indicadores do Z usando quartis como limites

Os mapas A, B e C demonstram:

- **Mapa A:** A maior parte da região está acima do primeiro quartil, indicando que a maioria dos valores não são extremamente baixos.
- **Mapa B:** As áreas em vermelho indicam valores abaixo da mediana, mas acima do primeiro quartil. Estas áreas são mais distribuídas e menos concentradas do que as do Mapa A.
- **Mapa C:** As áreas em vermelho agora representam valores abaixo do terceiro quartil, mas acima da mediana. A concentração de vermelho diminui ainda mais, indicando que menos áreas têm valores dentro deste intervalo.

### 3.1.3.2. Análise Espacial

A implementação dos mapas de Voronoi (Figura 7), seguindo a metodologia de Aurenhammer et al. (2012), mostrou uma distribuição espacial homogênea das profundidades, especialmente no eixo norte-sul, com um padrão de autocorrelação espacial isotrópico. Esta análise identificou áreas específicas de interesse, particularmente nas zonas A e B, onde foram observadas variações locais significativas na profundidade, potencialmente indicando características geomorfológicas submarinas importantes.

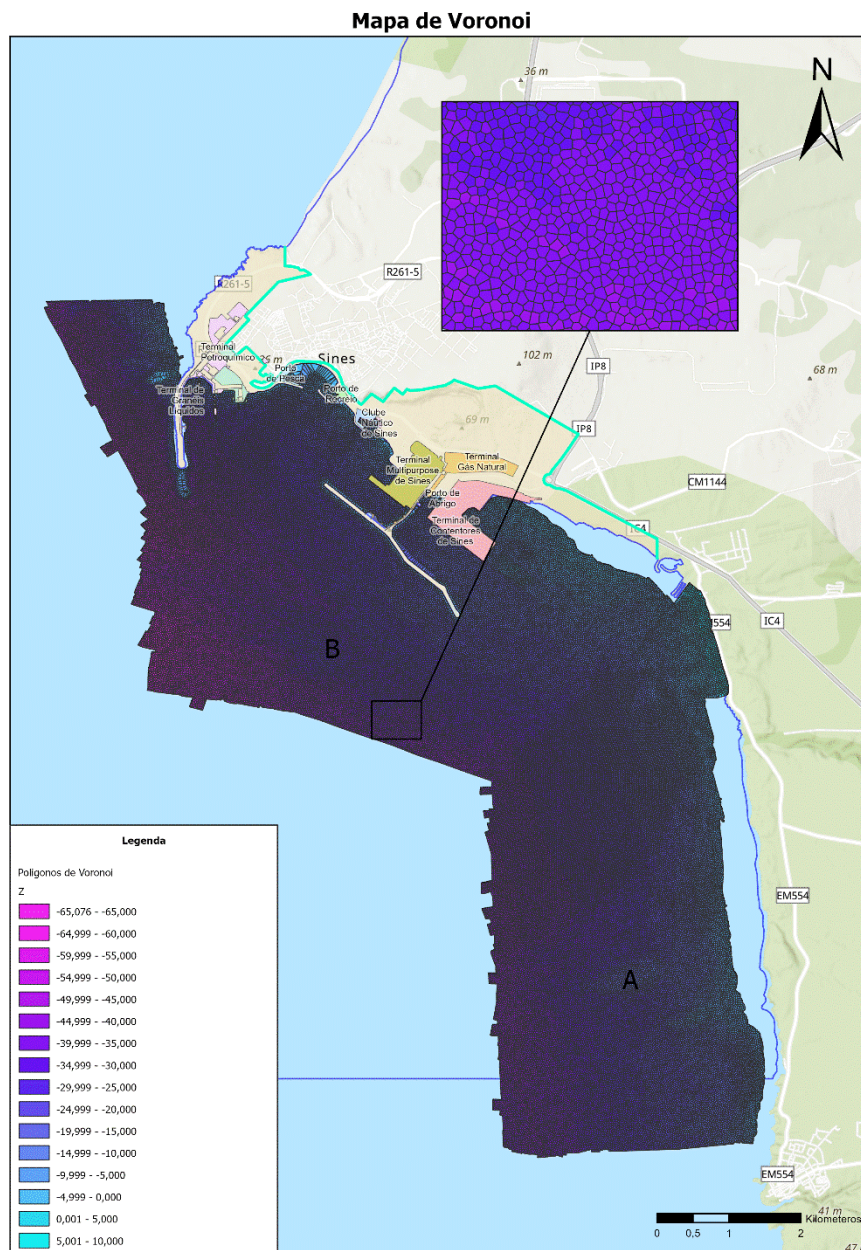


Figura 7 - Mapa de Voronoi para a variável Z

Analisando o mapa de Voronoi para a variável Z que representa as profundidades:

- A amostra está uniformemente distribuída na zona de estudo pelo que os polígonos são iguais em toda a zona.
- Distribuição das Profundidades é bastante homogénea em toda a zona de estudo no sentido norte-sul onde o padrão de autocorrelação espacial parece ser isotrópico.
- Existe um padrão notável onde as profundidades aumentam na zona mais afastada da costa e diminuem na zona mais próxima da costa. Isto pode indicar um declive ou um aumento gradual na profundidade.
- Observando o mapa nas zonas A e B, pode referir-se que existem áreas em que a profundidade é menor que nas áreas circundantes. Este tipo de informação é valioso para a identificação de bancos de areia, recifes, ou outras características subaquáticas importantes.

A análise de autocorrelação espacial local (Figura 8) e global de Moran (Figura 9), com índice  $I = 0,989868$ ,  $z\text{-score} = 754,815131$ ,  $p\text{-valor} < 0,001$ , demonstrou uma forte autocorrelação espacial positiva, consistente com os princípios estabelecidos por Anselin, (1995). O elevado  $z\text{-score}$  e o  $p\text{-valor}$  próximo a zero confirmam a significância estatística deste padrão espacial, indicando uma organização não aleatória das profundidades na área de estudo.

## Análise de Autocorrelação Espacial Local

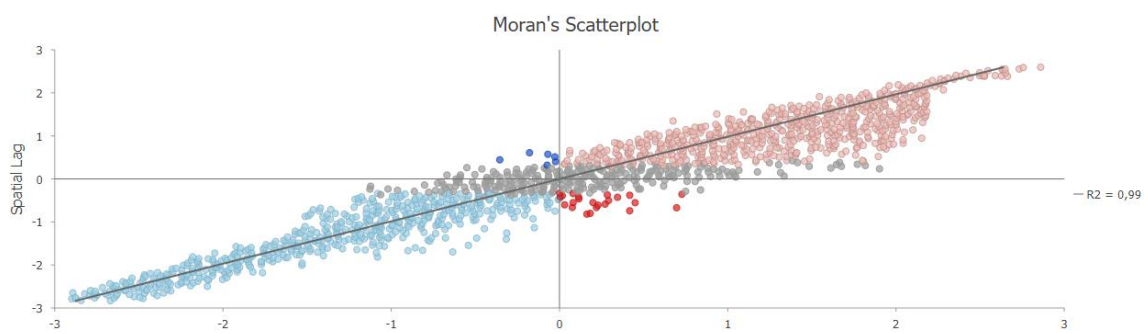
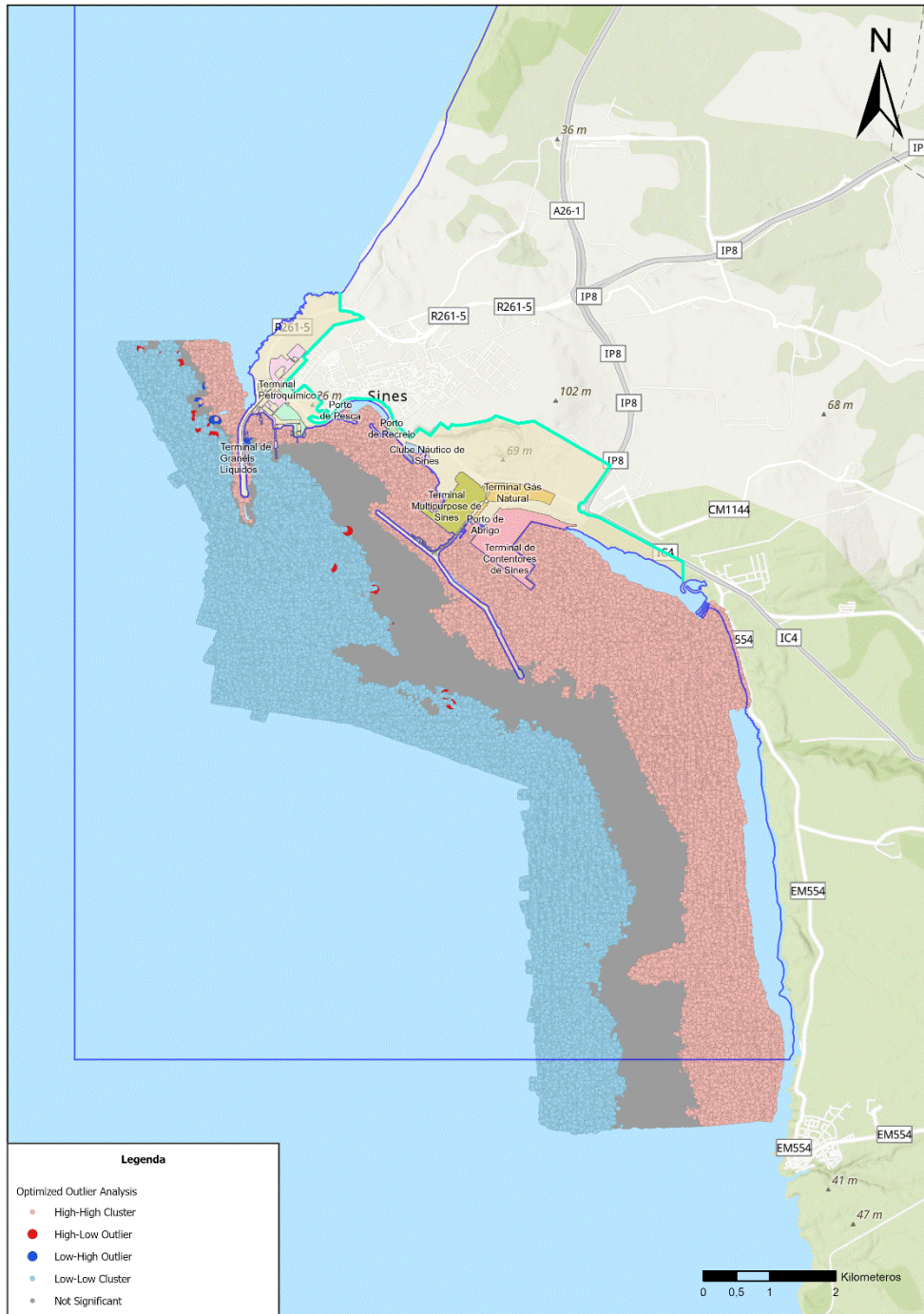
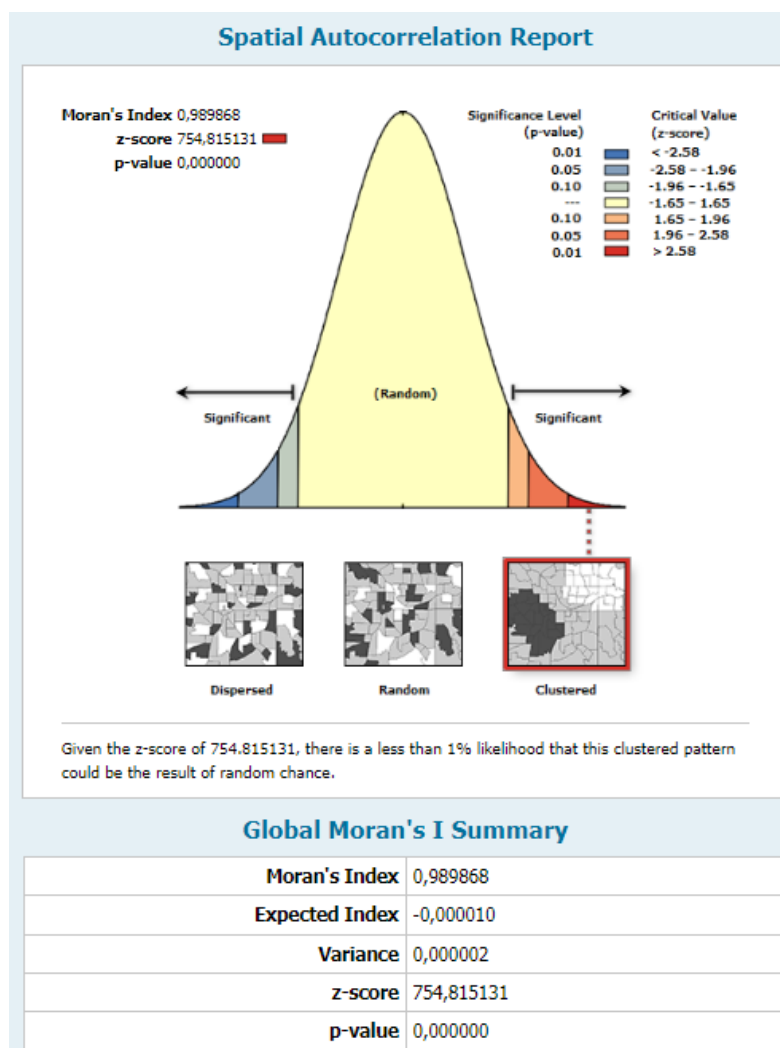


Figura 8 - Mapa Local e gráfico Moran's I para a variável Z



*Figura 9 - Autocorrelação Espacial (Global Moran I) relatório*

Em suma:

- O valor do índice de Moran é 0,989868, o que indica uma forte autocorrelação espacial positiva. Isso significa que há um padrão espacial onde os valores semelhantes estão localizados próximos uns dos outros.
- O z-score é extremamente alto (754,815131), o que sugere que a probabilidade de observar um padrão tão forte sob aleatoriedade é praticamente nula. Isso reforça a significância estatística da autocorrelação observada.
- O p-valor é 0,00000, corroborando a conclusão de que o padrão observado é estatisticamente significativo e não é provável que seja resultado de variação aleatória.

- O gráfico mostra a distribuição de Moran's I sob a hipótese nula de aleatoriedade (curva normal) e destaca a posição do índice observado, que está muito à direita, indicando que os dados estão fortemente agrupados.

### 3.1.3.3. Interpolação

A Figura 10, apresentando o mapa de previsão IDW do Z com curvas de nível, identificou padrões detalhados da morfologia submarina. A análise de janelas móveis revelou padrões locais de variação da profundidade, fundamentais para a compreensão da morfologia submarina em diferentes escalas.

A aplicação do método IDW, seguindo as diretrizes de Li & Heap (2014), produziu um modelo de interpolação robusto, como visualizado na Figura 11, com RMSE de 0,988, indicando alta precisão nas estimativas.

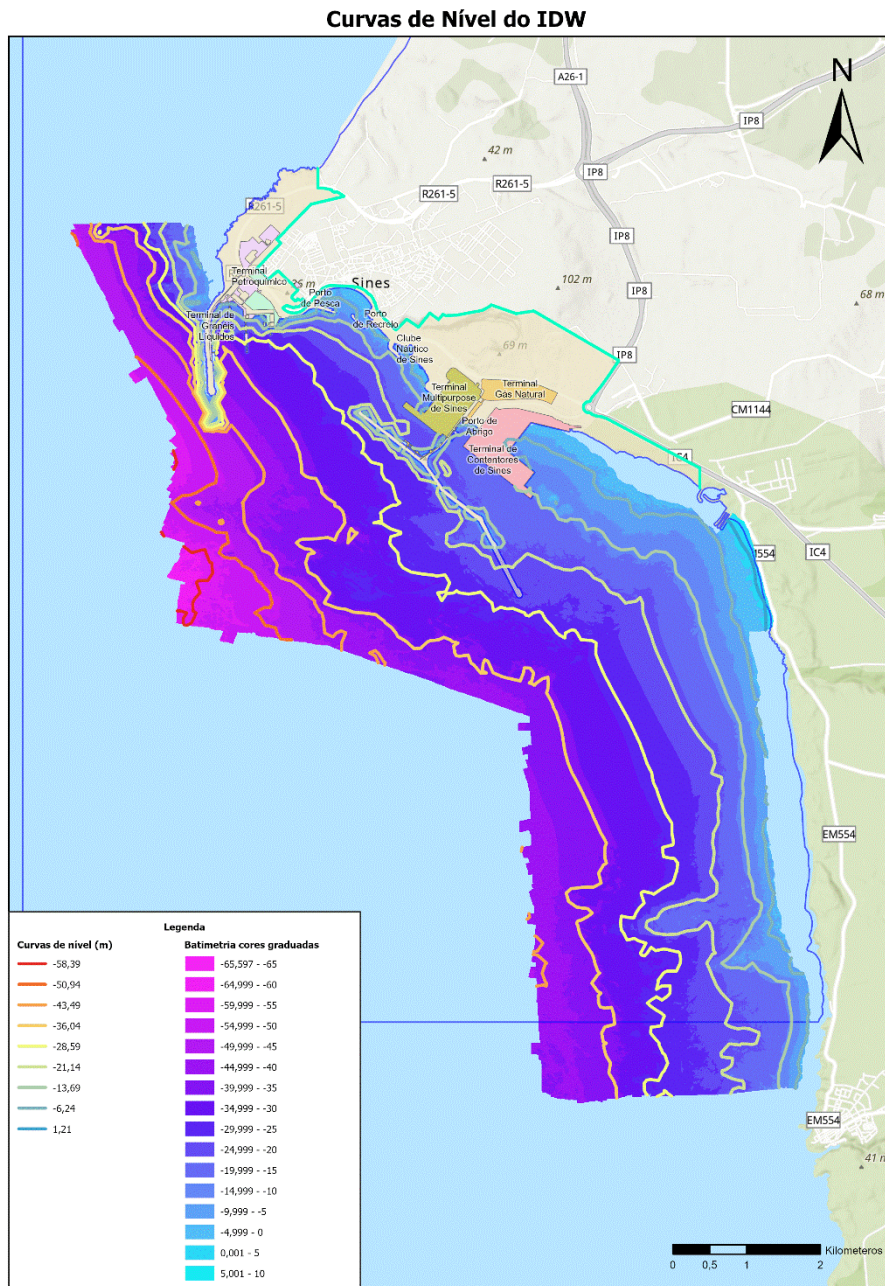


Figura 10 - Mapa de previsão IDW

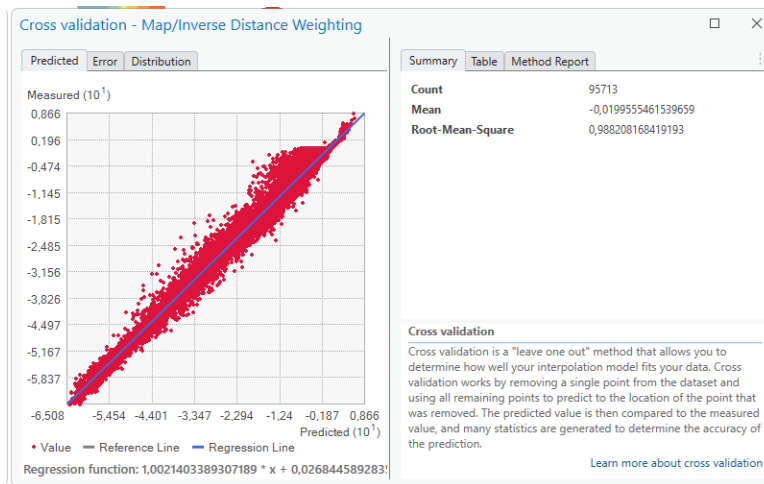


Figura 11 - Validação cruzada

Observando o gráfico, verifica-se uma correlação linear muito forte entre os valores previstos e medidos, através da proximidade da linha de regressão à linha de referência e pelo alto valor de  $R^2$  (que é implícito pela função de regressão fornecida).

A função de regressão dada no gráfico ("Regression function") sugere que os valores previstos estão muito próximos dos valores medidos com uma ligeira inclinação acima da linha de referência, o que pode indicar um leve viés sistemático no modelo.

O RMSE de 0,988 indica que o modelo IDW tem um bom ajuste aos dados.



Figura 12 - Mapa de média local (esquerda) e mapa de desvio padrão local (direita) calculados usando a não sobreposição estatísticas de janela móvel do mapa de previsão IDW do Z

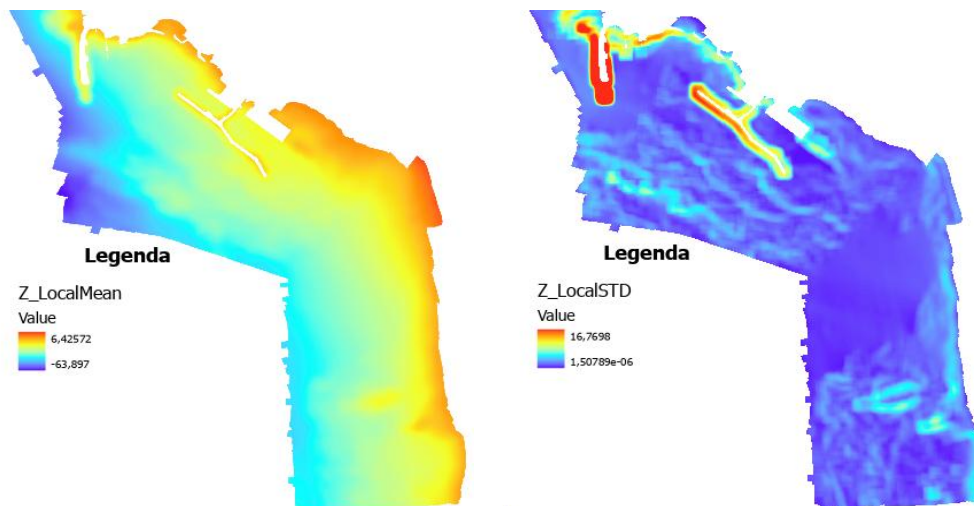


Figura 13 - Mapa de média local (esquerda) e mapa de desvio padrão local (direita) calculados usando sobreposição estatísticas de janela móvel do mapa de previsão IDW do Z

A análise de dados de profundidade, nas janelas móveis (Vizinhança sobreposta e não sobreposta) pode ajudar a entender como a profundidade varia numa escala local e pode indicar detalhes que não são visíveis nas estatísticas globais ou nos mapas de contorno padrão.

- Os mapas estatísticos das janelas móveis de média local podem ser usados para compreender as tendências gerais na profundidade ao longo da área mapeada, identificando áreas onde a profundidade é consistentemente maior ou menor.

- Os mapas estatísticos das janelas móveis de desvio padrão local destacam as áreas onde há maior incerteza ou variação nas medições de profundidade, o que é crítico para atividades como a navegação marítima.
- As zonas onde os mapas de desvio padrão mostram alta variabilidade podem ser de interesse para investigações adicionais, pois isso pode indicar características geomorfológicas importantes ou mudanças abruptas no relevo subaquático.
- Esses mapas podem ser usados para ajudar na navegação, na identificação de áreas adequadas para a pesca, na exploração de recursos naturais ou em estudos ambientais marinhos, onde o conhecimento preciso das características do leito marinho é essencial.

O modelo de Ordinary Kriging otimizado, desenvolvido com base nos princípios estabelecidos por Oliver & Webster (2014), apresentou o melhor desempenho entre os métodos testados. O semivariograma resultante (Nugget = 2,4326; Sill = 209,7126; Range  $\approx$  5226,96 m) demonstrou uma estrutura espacial bem definida, com uma relação clara entre a distância e a variabilidade dos dados. A validação cruzada (Tabela 2) confirmou a solidez do modelo, com resíduos próximos de zero e uma forte correlação entre valores previstos e observados.

Model Description	Rank	Root Mean Square Error	Mean Error	Mean Standardized	Root Mean Square Standardized Error	Average Standard Error
Ordinary Kriging – Optimized	1	0,838726	-0,00088	0,000029	0,991089	0,839258
Universal Kriging – Default	2	0,849412	0,002045	0,003033	0,782053	1,07836
Empirical Bayesian Kriging - Advanced	2	0,80932	-0,002602	-0,001444	1,004485	0,808229
Empirical Bayesian Kriging - Default	2	0,81987	0,002956	0,00633	0,915959	0,85019
Universal Kriging – Optimized	2	0,837263	-0,003484	-0,003015	0,963846	0,861336
Inverse Distance Weighted - Optimized	6	0,951933	-0,017343	0	0	0
Inverse Distance Weighted - Default	6	0,988213	-0,019955	0	0	0
Ordinary Kriging – Default	6	1,00464875	0,00052911	0,000673826	0,608747944	1,645193598

*Tabela 2 - Classificações dos modelos de interpolação e estatísticas de validação cruzada*

O método mais adequado seria o Ordinary Kriging - Optimized é o que apresenta o menor RMSE, indicando a menor diferença em média entre os valores previstos e observados, e um Erro Médio próximo de zero, indicando pouca ou nenhuma tendência de superestimação ou subestimação.

O semivariograma (Figura 14) é uma ferramenta fundamental na geostatística utilizada para quantificar a autocorrelação espacial de dados. Ele descreve como a similaridade entre os valores de um atributo espacial (como profundidade,

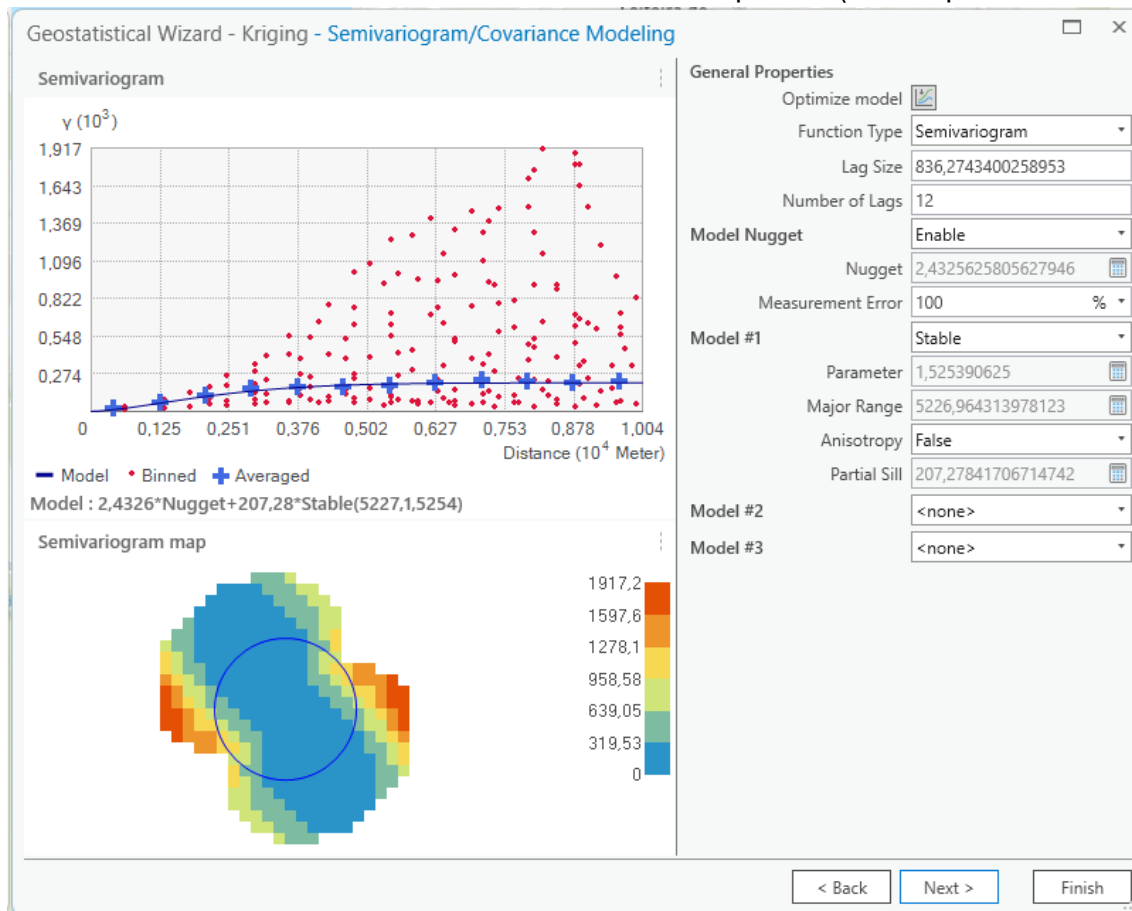


Figura 14 - Semivariograma

temperatura, etc.) diminui à medida que a distância entre os pontos aumenta.

- A linha azul do modelo ajustada representa a função teórica do semivariograma que melhor se ajusta aos pontos observados.
- O valor do Nugget é aproximadamente 2,4326
- O valor do Sill é o valor do Nugget mais o valor do "Model #1" (Partial Sill), que é aproximadamente  $2,4326 + 207,28 = 209,7126$
- O Range está indicado como o "Major Range" para o "Model #1", que é aproximadamente 5226,96 metros

O mapa de semivariograma abaixo do gráfico oferece uma representação espacial da semivariância, mostrando como a variabilidade espacial se manifesta em diferentes direções, o que pode ser útil para detetar anisotropia - uma direção preferencial na qual a variabilidade dos dados é maior.

O modelo de Kriging parece ter um desempenho muito bom na validação cruzada (Figura 15). O fato da média dos resíduos ser próxima de zero sugere que o modelo não tem um viés sistemático significativo. O RMSE baixo e os erros padronizados próximos de zero indicam que o modelo tem um bom ajuste. A linha de regressão no gráfico está muito próxima da linha de referência, reforçando que o modelo faz previsões precisas.

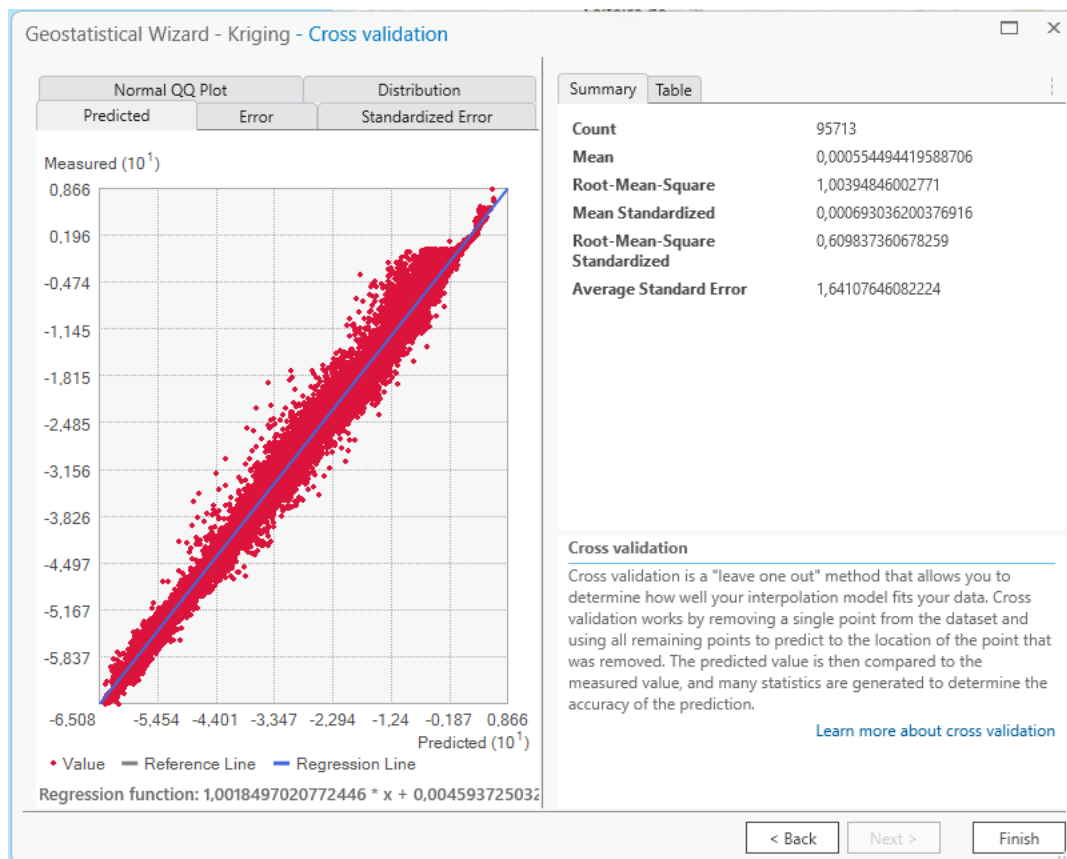


Figura 15 - Validação cruzada

A análise integrada destes resultados fornece uma caracterização detalhada da batimetria da zona costeira de Sines, oferecendo insights valiosos sobre a estrutura espacial do fundo marinho e as suas implicações na gestão portuária e navegação marítima.

### 3.1.4. Discussão

A análise batimétrica da zona costeira de Sines identificou padrões espaciais significativos que requerem uma discussão aprofundada em relação aos estudos existentes e as suas implicações práticas.

A forte autocorrelação espacial positiva ( $I = 0,989868$ ) encontrada através do índice de Moran alinha-se com os padrões típicos de ambientes costeiros descritos por Lecours et al. (2016). Este resultado é particularmente pertinente quando comparado com outros estudos em ambientes portuários similares. Por exemplo, Wilson et al. (2007) encontraram valores de autocorrelação espacial comparáveis nas suas análises de morfologia submarina, confirmando que este é um padrão comum em zonas costeiras com características geomorfológicas semelhantes.

O desempenho do IDW (RMSE = 0,988) e do Kriging no nosso estudo corrobora as descobertas de Li & Heap (2014), que destacam a eficácia destes métodos em ambientes marinhos.

Os nossos resultados da validação cruzada mostram uma precisão comparável aos benchmarks estabelecidos na literatura. No entanto, é importante notar que, conforme Oliver & Webster (2014) apontam, a escolha do método de interpolação deve considerar não apenas a precisão estatística, mas também o contexto específico da aplicação.

A análise batimétrica detalhada tem implicações diretas na gestão portuária e na segurança das operações portuárias. Os padrões de profundidade identificados, especificamente nas áreas próximas dos terminais, fornecem informações importantes para:

1. Planeamento de dragagem
2. Otimização de rotas de navegação
3. Monitorização de processos sedimentares
4. Avaliação de riscos operacionais

A interpolação em ambientes marinhos pode ser afetada por anisotropia e variações temporais não capturadas em levantamentos únicos. A densidade da amostragem (95.712 pontos) fornece uma boa cobertura, mas áreas específicas podem beneficiar de maior resolução.

Os resultados são sólidos quando comparados com estudos similares noutros portos de águas profundas. Por exemplo, a variabilidade batimétrica encontrada (-65,08 m a 8,66 m) é comparável aos padrões observados por Harris & Baker (2012) em portos com características geomorfológicas semelhantes.

A distribuição espacial das profundidades segue padrões previsíveis e gerenciáveis do ponto de vista operacional.

Este estudo contribui para o campo através de:

1. Aplicação integrada de múltiplas técnicas de análise espacial
2. Validação estruturada dos métodos de interpolação
3. Caracterização detalhada da morfologia submarina num porto estratégico

Baseado nas nossas conclusões e nas lacunas identificadas na literatura, sugerimos:

- Incorporação de análises temporais para monitorizar mudanças morfológicas
- Integração com dados oceanográficos complementares
- Desenvolvimento de modelos preditivos para evolução batimétrica

### 3.1.5. Conclusão

O modelo batimétrico desenvolvido nesta análise proporcionou uma caracterização detalhada da batimetria costeira de Sines, através da integração de métodos estatísticos e geoespaciais. Como ilustrado na Figura 1, este modelo estabelece a base física fundamental sobre a qual se desenvolvem as análises seguintes.

A análise realizada teve como base 95.712 pontos de amostragem, que mostram uma variação batimétrica que varia de -65,08 m a 8,66 m, com distribuição aproximadamente simétrica (Bivand et al., 2013). A validação estatística, utilizando o Índice de Moran Global ( $I = 0,989868$ ) confirmou forte autocorrelação espacial positiva (Anselin, 1995), a qual foi apoiada pela análise de Voronoi, que indicou uma distribuição homogênea das profundidades no eixo norte-sul (Aurenhammer et al., 2012).

A aplicação de técnicas de interpolação demonstrou alta precisão, com o IDW apresentando RMSE de 0,988 (J. Li & Heap, 2014), complementada pelo modelo Ordinary Kriging otimizado que confirmou a estrutura espacial consistente dos dados através do semivariograma (Range  $\approx 5226,96$  m) (Oliver & Webster, 2014). A metodologia desenvolvida fornece bases sólidas para otimização operacional, planeamento de infraestruturas, monitorização ambiental e gestão de manutenção portuária.

O estudo cria uma estrutura metodológica replicável para as análises da batimetria, seguindo as diretrizes de (Lecours et al., 2016) para análise geomorfológica marinha. Desenvolvimentos futuros poderão incluir análises temporais de mudanças morfológicas e a integração com parâmetros oceanográficos, visando um modelo mais compreensivo da dinâmica costeira local.

A validação estatística através do Índice de Moran Global ( $I = 0,989868$ ) confirmou a robustez do modelo, garantindo a sua confiabilidade como fundamento para as análises subsequentes de tráfego e avaliação de risco. Esta modelação precisa do fundo do mar, integrada com as restantes camadas de análise do framework proposto, contribui diretamente para a otimização operacional e o planeamento estratégico do porto.

O modelo batimétrico desenvolvido estabelece a base para as análises subsequentes, particularmente no que se refere à compreensão dos padrões de tráfego marítimo. As profundidades e características do fundo marinho identificadas determinam diretamente as áreas navegáveis e influenciam as rotas preferenciais dos navios, aspetos que serão explorados em detalhe no capítulo 3.3.

## **3.2. Análise De Tráfego De Navios**

Esta análise explora o modo como o espaço portuário é realmente utilizado pelos navios, analisando os padrões de movimentação e concentração do tráfego marítimo. A partir dos dados AIS, este capítulo mostra as dinâmicas operacionais do porto, identificando rotas preferenciais e áreas de maior densidade de tráfego.

O entendimento destes padrões de navegação não apenas fornece informações cruciais para otimizar as rotas existentes, mas também estabelece uma base sólida para o planeamento de novas rotas que possam melhorar a eficiência operacional e a competitividade do porto.

Esta perceção dos fluxos de tráfego marítimo será fundamental para a análise de identificação de riscos apresentada no capítulo seguinte, onde estes dados serão integrados com outras características do ambiente portuário para uma avaliação abrangente da segurança nas operações.

### **3.2.1. Local de estudo e dados**

O Porto de Sines ocupa uma posição estratégica no contexto do transporte marítimo internacional, localizado no cruzamento das principais rotas marítimas Norte-Sul e Este-Oeste. Situado a 58 milhas náuticas a sul de Lisboa, destaca-se como o principal porto da fachada ibero-atlântica, beneficiando de características geofísicas excecionais que têm consolidado a sua posição como ativo estratégico nacional (APS, 2023).

A análise do tráfego marítimo na costa portuguesa tem sido objeto de diversos estudos científicos. Silveira et al. (2012) realizaram uma análise abrangente do tráfego marítimo utilizando dados AIS, demonstrando a importância dos esquemas de separação de tráfego (EST) ao largo do Cabo da Roca e do Cabo de São Vicente na organização dos fluxos de navegação. O seu estudo, analisando dados do período entre 9 de julho e 9 de agosto de 2008, demonstrou a complexidade da rede de rotas marítimas que incluem navios em trânsito entre o Norte da Europa e o Mediterrâneo, navios com destino aos portos nacionais, navios de pesca, navios de

recreio, tráfego do Mediterrâneo para a América do Norte, da África para o Norte da Europa e do Norte da Europa para a América do Sul.

As características naturais do porto, incluindo fundos rochosos que atingem profundidades entre -16 e -28 metros ZH, permitem a acostagem de navios de grande porte, posicionando Sines como principal porta de abastecimento energético de Portugal e referência significativa no mercado mundial de carga contentorizada (Caldeirinha, 2014).

A infraestrutura portuária é composta por cinco terminais especializados:

1. Terminal de Granéis Líquidos (TGL): dedicado principalmente a crude e produtos refinados
2. Terminal Petroquímico (TPQ): focado em produtos petroquímicos
3. Terminal Multipurpose de Sines (TMS): para cargas gerais e granéis sólidos
4. Terminal de Gás Natural (TGN): especializado em gás natural liquefeito
5. Terminal de Contentores de Sines (TCS): dedicado à movimentação de contentores

O estudo apoia-se numa abordagem quantitativa de análise espaço-temporal, baseada na exploração sistemática de dados AIS (Automatic Identification System) para a caracterização e compreensão dos padrões de tráfego marítimo no Porto de Sines. A crescente complexidade do tráfego marítimo, associada ao volume exponencial de dados de movimento dos navios, exige o desenvolvimento de metodologias automatizadas para a análise e avaliação comportamental dos navios (Rong et al., 2019; Tu et al., 2018).

A informação principal deste estudo é constituída por dados AIS extraídos do sistema Vessel Traffic Service (VTS) do Porto de Sines, relativos ao período de maio de 2023.

Os dados incluem as seguintes informações:

- Posição geográfica (latitude/longitude)
- Velocidade e rumo
- Estado de navegação
- Hora UTC das transmissões
- Identificação do navio (MMSI)
- Dimensões e tipo de navio

- Porto de destino
- ETA (Estimated Time of Arrival)

Complementarmente, a análise incorpora:

- Área de Jurisdição da APS (AJAPS) - Decreto-Lei n.º 95/2010
- Infraestrutura portuária e terminais especializados
- Esquemas de Separação de Tráfego (EST) - Decreto-Lei n.º 198/2006, que serão visualizados na Figura 17

A escolha do período de maio de 2023 baseou-se em dois critérios principais:

1. Disponibilidade completa dos dados AIS sem interrupções significativas
2. Representatividade das operações portuárias regulares

A análise deste conjunto de dados permite:

1. Identificar padrões de tráfego marítimo
2. Avaliar a utilização dos diferentes terminais
3. Analisar comportamentos de navegação
4. Identificar áreas de maior densidade de tráfego
5. Otimizar operações portuárias

Como destacado por Pallotta et al. (2013), a análise sistemática de dados AIS oferece insights valiosos para a gestão portuária e segurança da navegação, permitindo a identificação de padrões e comportamentos que podem contribuir para a otimização das operações portuárias.

## **3.2.2. Metodologia**

### **3.2.2.1. Enquadramento Metodológico**

A metodologia adotada neste estudo fundamenta-se numa abordagem quantitativa para análise de padrões de tráfego marítimo, integrando técnicas de análise espacial e processamento de dados AIS. A abordagem analítica baseia-se nas metodologias propostas por Pallotta et al. (2013) para análise de trajetórias marítimas e nas técnicas de densidade espacial desenvolvidas por (Silverman,1986).

### **3.2.2.2. Processamento e Análise de Dados**

#### **3.2.2.2.1. Pré-processamento**

O tratamento inicial dos dados seguiu um protocolo rigoroso baseado nas recomendações de (Yan et al., 2020) compreendendo as seguintes etapas:

#### **1. Importação e Estruturação**

- Conversão dos dados AIS brutos para formato geodatabase
- Estruturação dos campos conforme modelo de dados espacial
- Definição do sistema de coordenadas (ETRS89 TM06)

#### **2. Limpeza de Dados**

- Remoção de registos duplicados através de análise temporal
- Eliminação de posições geograficamente inconsistentes
- Filtro de velocidades fisicamente inaceitáveis (> 30 nós)
- Tratamento de descontinuidades temporais superiores a 30 minutos

#### **3. Validação de Dados**

- Validação da consistência das informações estáticas
- Análise da integridade das sequências temporais

### 3.2.2.2.2. Abordagem Analítica

A metodologia baseia-se em duas perspectivas principais de (Pallotta et al., 2013):

a) Análise de pontos de trajetória: examina as características espaciais individuais dos pontos que compõem as rotas dos navios

#### 1. Análise Espacial:

- Caracterização de pontos de trajetória
- Identificação de padrões de distribuição
- Análise de densidade e concentração

b) Análise de rotas de trajetória: avalia os padrões completos de movimentação, considerando a sequência temporal dos deslocamentos

#### 2. Análise Temporal:

- Avaliação de sequências de movimento
- Padrões de deslocamento
- Comportamentos de manobra

### 3.2.2.2.3. Estimativa de Densidade

Este método foi escolhido pela sua capacidade de analisar concentrações espaciais sem fazer pressupostos sobre a distribuição subjacente dos dados. O método utiliza uma função quartic kernel (Silverman, 1986), expressa pela fórmula:

Onde:

$$Density = \frac{1}{(radius)^2} \sum_{i=1}^n \left[ \frac{3}{\pi} \cdot pop_i \left( 1 - \left( \frac{dist_i}{radius} \right)^2 \right)^2 \right]$$

*For  $dist_i < radius$*

- $i = 1, \dots, n$  representam os pontos de entrada considerados dentro do raio de distância da localização (x,y)
- $pop_i$  é o valor do campo populacional do ponto i (parâmetro opcional)
- $dist_i$  é a distância entre o ponto i e a localização (x,y).

O método de densidade por Kernel (Silverman, 1986) foi implementado com os seguintes parâmetros:

- Função: Kernel quartic
- Raio de pesquisa: 1000/500m (área típica de manobra) (Total/AE)
- Resolução: 10m (compatível com precisão AIS)

A densidade de tráfego foi classificada em:

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Justificação</b>
Densidade Baixa	< 25 navios/km <sup>2</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Representa áreas com tráfego ocasional</li> <li>- Mínima necessidade de intervenção</li> <li>- Navegação livre</li> <li>- Baixo risco de conflitos</li> </ul>
Densidade Média-Baixa	25-50 navios/km <sup>2</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Permite operações regulares com supervisão básica</li> <li>- Representa zonas de transição</li> <li>- Atenção moderada necessária</li> <li>- Coordenação ocasional</li> </ul>
Densidade Média	50 - 100 navios/km <sup>2</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Representa áreas de tráfego regular</li> <li>- Requer coordenação ativa</li> <li>- Monitorização contínua</li> <li>- Coordenação frequente</li> </ul>
Densidade Média-Alta	100 - 150 navios/km <sup>2</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Indica zonas de intensa operação</li> <li>- Necessita gestão dedicada</li> <li>- Controle intensivo</li> <li>- Coordenação constante</li> </ul>
Densidade Alta	>150 navios/km <sup>2</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Representa zonas críticas</li> <li>- Exige máximo controle</li> <li>- Gestão contínua</li> <li>- Protocolos rigorosos</li> <li>- Medidas especiais</li> </ul>
Fonte: Adaptado de Pallotta et al. (2013), Tu et al. (2018), e Xiao et al. (2015)		

*Tabela 3 -Classificação de densidade de tráfego marítimo*

A análise espaço-temporal permite criar mapas de densidade por período, identificar hotspots de tráfego e analisar padrões sazonais e temporais de movimentação.

### **3.2.2.3. Validação e Limitações**

A validação dos resultados seguiu múltiplas abordagens (Y. Zhou et al., 2019):

- Comparação com registos históricos
- Verificação cruzada com fontes alternativas
- Avaliação por especialistas portuários
- Análise de consistência temporal

As principais limitações metodológicas incluem:

- Intermitência nos sinais AIS e precisão GPS variável
- Interferências meteorológicas na transmissão
- Resolução espacial em áreas de alta densidade
- Ausência de dados de navios não equipadas com AIS

Esta metodologia permite uma análise abrangente dos padrões de movimento dos navios na área de estudo, fornecendo uma base quantitativa para a tomada de decisões operacionais e estratégicas no contexto portuário.

As principais limitações metodológicas incluem a intermitência nos sinais AIS, precisão variável do GPS, interferências meteorológicas na transmissão dos sinais, resolução espacial limitada em áreas de alta densidade de tráfego e ausência de dados de navios menores não equipadas com AIS.

### **3.2.2.4. Implementação SIG**

A implementação em ambiente SIG foi desenvolvida através de um workflow estruturado em três fases principais (Figura 16). Inicialmente, para análise da densidade de tráfego total, os dados AIS brutos foram processados através da ferramenta Reconstruct Tracks, gerando rotas contínuas dos navios. Estas rotas foram posteriormente projetadas e submetidas a uma análise de densidade utilizando o método Kernel Density, seguido de uma reclassificação para intervalos padronizados.

Na segunda fase, focada na densidade de tráfego por tipo de navio, procedeu-se à delimitação da área de estudo através de um polígono da área portuária, utilizado para recortar as rotas através do Pairwise Clip. As rotas foram então segregadas por categoria de navio (carga e tanque) utilizando a ferramenta Select, permitindo

análises de densidade específicas para cada tipo. Para cada categoria, aplicou-se o Kernel Density com parâmetros ajustados (cell size de 10m e search radius de 1000/500m), seguido de reclassificação dos valores de densidade.

O processamento resultou na produção de mapas de densidade total e específica por tipo de navio, além de análises espaciais detalhadas que identificam zonas críticas de navegação. A validação dos resultados foi realizada através da verificação dos padrões de densidade, comparação com dados operacionais e análise da consistência espacial, garantindo a integridade e confiabilidade dos resultados obtidos.

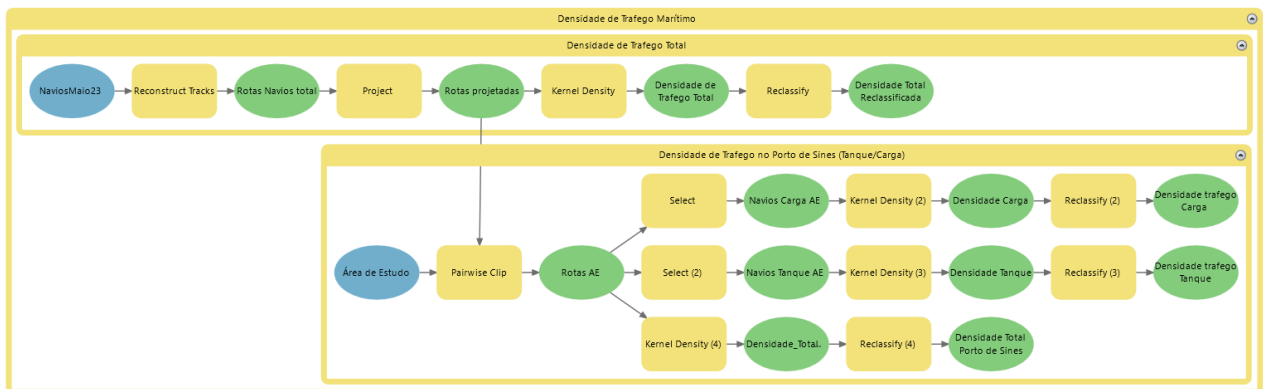


Figura 16 - Model builder utilizado para a construção da densidade de tráfego marítimo

### 3.2.3. Resultados

#### 3.2.3.1. Análise de Tráfego Marítimo Regional

A análise do tráfego marítimo na região do Porto de Sines, baseada em dados AIS do mês de maio de 2023, mostra padrões significativos de movimentação e utilização do espaço marítimo. A costa continental portuguesa é atravessada por uma complexa rede de rotas marítimas que estabelecem a ligação entre o norte da Europa e o Mar Mediterrâneo, sendo esta navegação regulada por dois Esquemas de Separação de Tráfego (EST) (Figura 17), estrategicamente posicionados ao largo do Cabo da Roca e do Cabo de São Vicente.

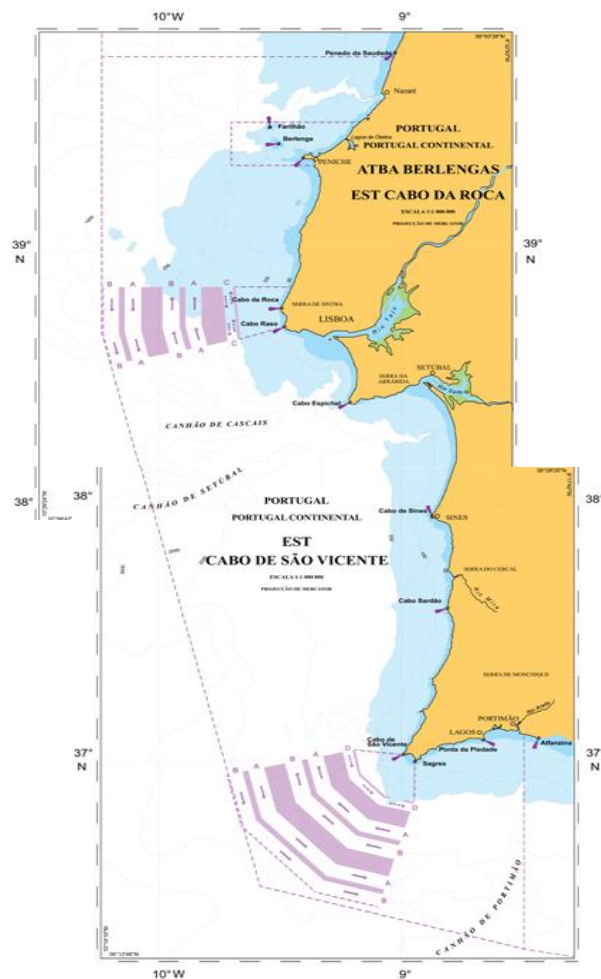


Figura 17 - Corredores de tráfego mais afastados em cada sentido B destinam-se a navios que transportem carga perigosas para o meio marinho, os corredores de tráfego mais próximos da costa em cada sentido (A) destinam-se aos restantes navios. Adaptado: Instituto Hidrográfico (IH)

A densidade total de tráfego (Figura 18) demonstra claramente estes padrões de circulação, com concentrações mais elevadas nos corredores principais. Esta análise de densidade será fundamental para a posterior avaliação de zonas críticas e otimização da gestão de tráfego, conforme será discutido no capítulo seguinte.

## Densidade de Trafego

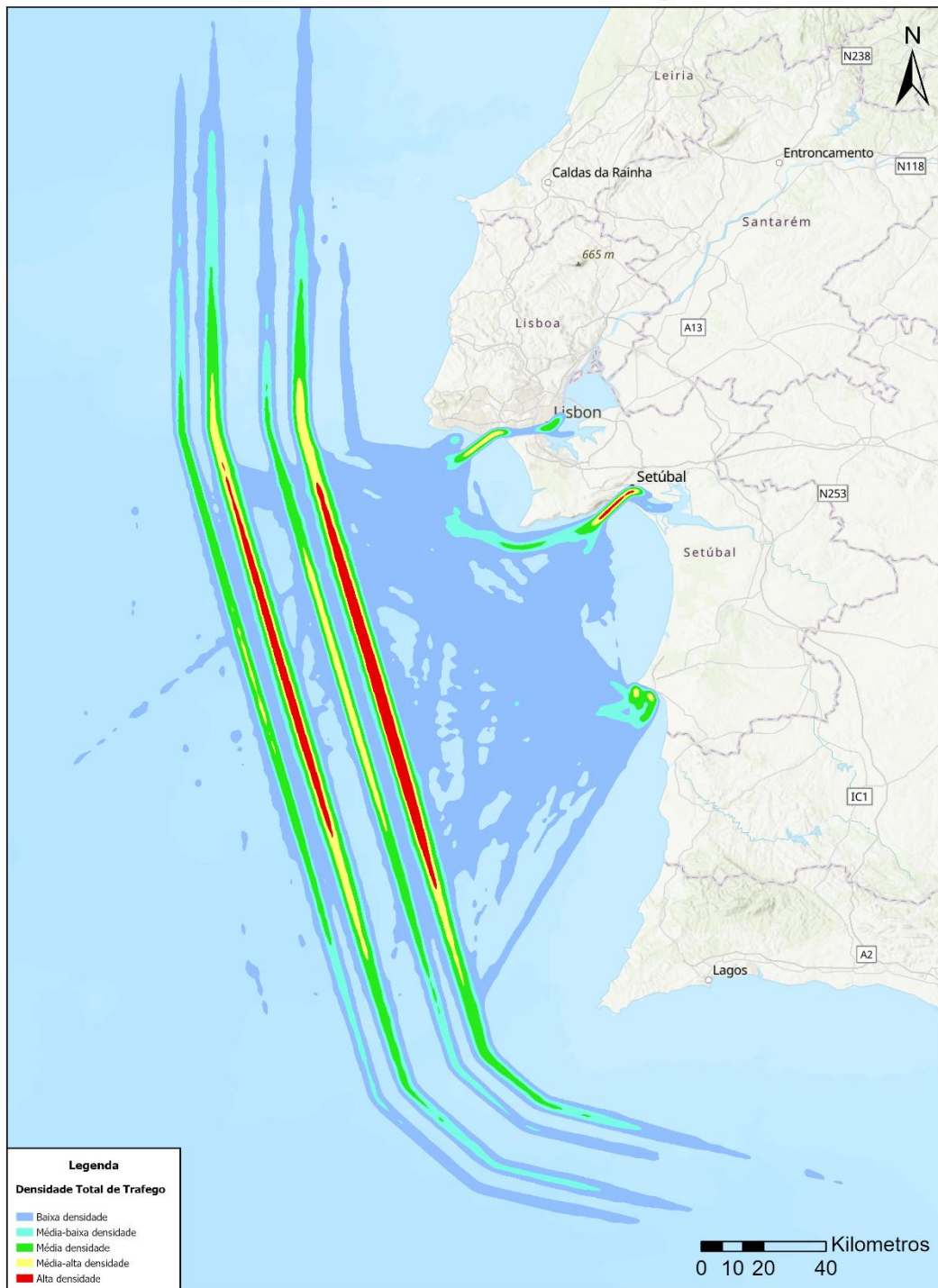


Figura 18 - Densidade Total de Tráfego (navio/km<sup>2</sup>) no Mês de Maio

A análise quantitativa dos dados AIS identificou 3.729 trajetórias de navios durante o período em estudo. A distribuição destas trajetórias revelou que apenas 21% dos navios têm como destino os portos de Sines, Setúbal e Lisboa, enquanto a maioria significativa (79%) representa tráfego de passagem ao largo da costa portuguesa.

Como ilustrados na Figura 17 esta navegação estrutura-se em:

- Dois corredores ocidentais, mais afastados da costa (B), dedicados principalmente ao tráfego Norte-Sul e ao transporte de cargas perigosas
- Dois corredores orientais, mais próximos ao litoral (A), utilizados predominantemente para tráfego Sul-Norte e navios de carga geral

### 3.2.3.2. Análise do Tráfego no Porto de Sines

O Porto de Sines registou durante o período analisado a entrada de 294 navios, distribuídos entre 160 navios de carga (55%), predominantemente porta-contentores, e 134 navios-tanque (45%), maioritariamente petroleiros. A análise de densidade no porto (Figura 19) identifica concentrações significativas de tráfego em áreas específicas, particularmente nas proximidades dos terminais especializados.

#### Densidade de Trafego Porto de Sines

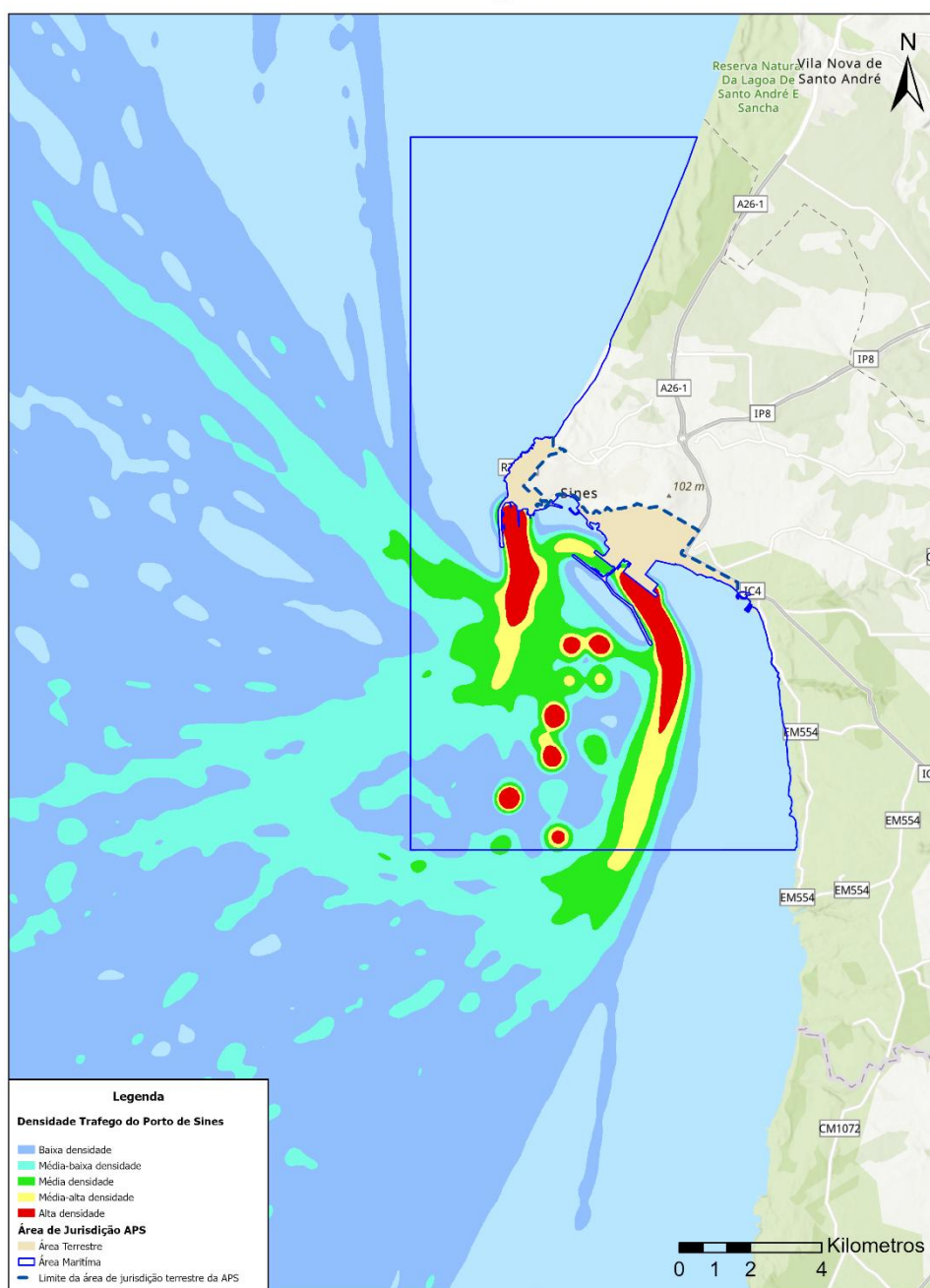


Figura 19 - Densidade de Tráfego (navio/km<sup>2</sup>) no Porto de Sines

### 3.2.3.3. Padrões de Navegação por Tipo de Navio

A análise revelou padrões distintos de navegação segundo a tipologia dos navios:

Navios de Carga:

A densidade de tráfego dos navios de carga (Figura 20) demonstra:

- Utilização predominante do corredor sul para acesso ao porto
- Concentração de atracções na zona sul do Terminal de Contentores de Sines (TCS)
- Padrões bem definidos de aproximação e manobra

#### Densidade de Trafego Navios de Carga

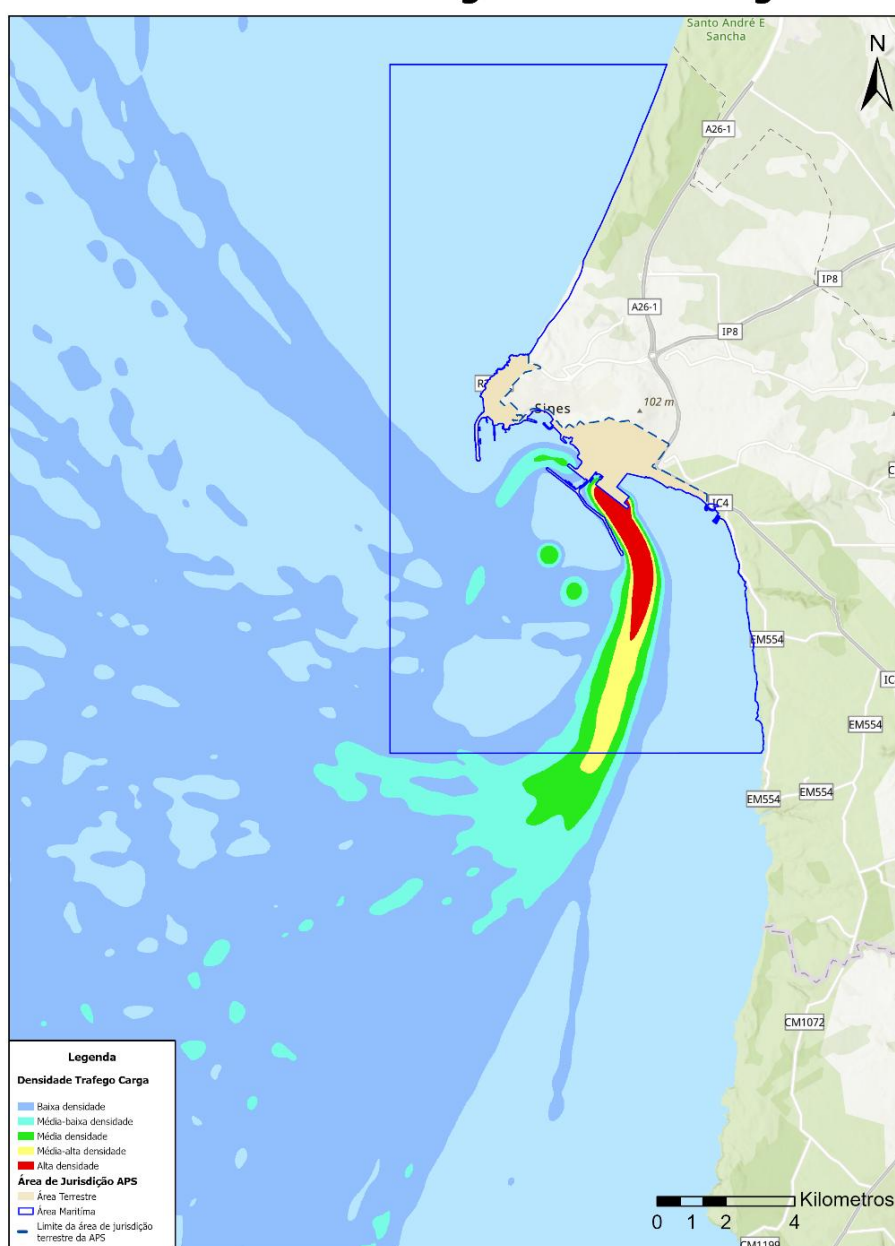


Figura 20 - Densidade de Tráfego (navio/km<sup>2</sup>) de Navios de Carga

Navios-Tanque:

O padrão de densidade dos navios-tanque (Figura 21) indica:

- Preferência pelo acesso através do corredor oeste
- Alta concentração de operações (70%) no Terminal de Granéis Líquidos (TGL)
- Intensidade operacional significativa nos postos 4/5
- Movimentações frequentes entre terminais para operações de abastecimento

### Densidade de Tráfego Navios-Tanque

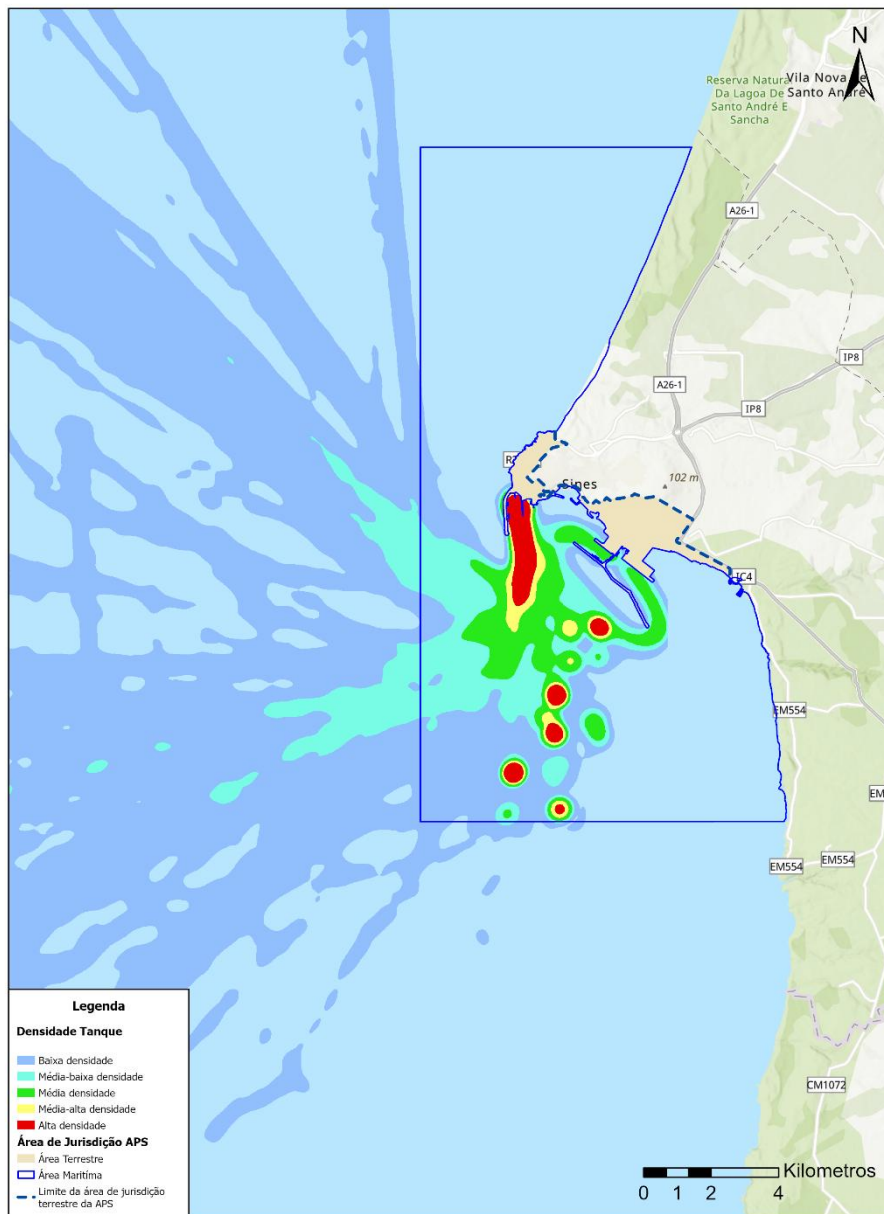


Figura 21 - Densidade de Tráfego (navio/km<sup>2</sup>) de Navios-Tanque

Esta análise espacial detalhada fornece dados importantes para a gestão portuária, permitindo a identificação de áreas críticas e a otimização das operações. Os padrões identificados serão fundamentais para o desenvolvimento de estratégias de gestão de tráfego mais eficientes e seguras.

### **3.2.4. Discussão**

A análise do tráfego marítimo através de técnicas avançadas de visualização e análise de dados revelou-se fundamental para compreender os padrões de navegação e comportamento dos navios no Porto de Sines e águas adjacentes. As metodologias aplicadas, baseadas nas técnicas de densidade Kernel propostas por Silverman (1986) e na abordagem analítica de Pallotta et al. (2013), permitiram não apenas quantificar o tráfego, mas também identificar padrões específicos de navegação e utilização dos terminais portuários.

A análise quantitativa das 3.729 trajetórias de navios identificadas durante o período estudado revelou que apenas 21% têm como destino os portos de Sines, Setúbal e Lisboa. Esta proporção significativa de tráfego de passagem (79%) confirma a posição estratégica do Porto de Sines no contexto das rotas marítimas internacionais, conforme destacado por Tu et al. (2018) em estudos sobre navegação marítima inteligente. Durante o período analisado, o porto processou 294 navios, com uma distribuição equilibrada entre navios de carga geral (55%), incluindo 160 navios de carga, predominante porta contentores, e 134 navios-tanque (45%), maioritariamente petroleiros. Esta distribuição demonstra a versatilidade operacional do porto em equilibrar eficientemente diferentes tipos de operações.

A análise espacial dos padrões de tráfego identificou uma clara otimização na gestão portuária, caracterizada pela segregação eficiente do tráfego por tipo de navio através de corredores dedicados, que minimizam interferências operacionais. Os padrões consistentes de aproximação e manobra indicam procedimentos bem estabelecidos, enquanto a utilização otimizada dos diferentes terminais maximiza a capacidade instalada. A infraestrutura demonstrou-se adequada para navios de grande porte, confirmando o potencial do porto para operações de larga escala.

Em termos de segurança da navegação, a análise de densidade identificou zonas críticas que requerem atenção especial, permitindo melhor alocação de recursos de monitorização. As áreas de potencial conflito entre diferentes tipos de navios foram claramente mapeadas, possibilitando o desenvolvimento de protocolos específicos de segurança. Os esquemas de separação de tráfego demonstraram

eficácia significativa na organização dos fluxos de navegação, enquanto a identificação de áreas críticas fornece base para o desenvolvimento de protocolos específicos para diferentes áreas operacionais.

Embora a análise tenha produzido resultados significativos, é importante reconhecer as suas limitações temporais, restringindo-se a um mês de análise, e as limitações inerentes aos dados AIS. Estas restrições, no entanto, apontam oportunidades significativas para estudos futuros, incluindo a extensão da análise para períodos mais longos e a incorporação de variáveis meteorológicas e oceanográficas. O desenvolvimento de modelos preditivos de tráfego e análises comparativas com outros portos similares também se apresentam como direções promissoras para pesquisas futuras.

Os resultados obtidos fornecem uma base sólida para o desenvolvimento contínuo das operações portuárias, desde a otimização das operações até o planeamento estratégico da expansão portuária. Esta análise confirma a posição de destaque do Porto de Sines no cenário portuário nacional, demonstrando a sua capacidade de gestão eficiente de diferentes tipos de tráfego e o seu potencial para expansão futura.

### **3.2.5. Conclusão**

Esta investigação demonstrou a eficácia da análise sistemática de dados AIS para otimização de operações portuárias. A metodologia, fundamentada nas técnicas de densidade Kernel de Silverman (1986) e na abordagem analítica de Pallotta et al. (2013), permitiu caracterizar quantitativamente os padrões de tráfego marítimo no Porto de Sines. A análise identificou 3.729 trajetórias, das quais 21% representa a entrada de navios nos portos nacionais e 79% tráfego de passagem, confirmando a posição estratégica do porto nas rotas marítimas internacionais. Durante o período analisado, o porto processou 294 navios, com distribuição equilibrada entre carga (55%) e tanques (45%), evidenciando sua versatilidade operacional.

A implementação de técnicas avançadas de análise espacial revelou uma clara segregação do tráfego nos terminais especializados, corroborando os estudos de Tu et al. (2018) sobre gestão eficiente de tráfego marítimo. Os resultados impactam diretamente a gestão portuária através da otimização da eficiência operacional, demonstrada pela segregação eficiente do tráfego e utilização otimizada dos terminais, e do aumento da segurança da navegação, evidenciado pela identificação de zonas críticas e eficácia dos esquemas de separação.

Apesar das limitações temporais do estudo, a metodologia estabelece bases sólidas para a gestão de tráfego marítimo, sugerindo desenvolvimentos futuros como análise anual, incorporação de variáveis meteorológicas e oceanográficas, e o desenvolvimento de modelos preditivos. Os resultados validam o Porto de Sines como referência na gestão eficiente de tráfego marítimo, demonstrando o seu potencial como hub portuário estratégico na fachada atlântica europeia.

Os padrões de tráfego identificados, quando considerados em conjunto com o modelo batimétrico anteriormente desenvolvido, fornecem insights cruciais para a análise de identificação de risco que se segue. Esta integração de dados permite uma avaliação mais precisa das áreas críticas onde a intensidade de movimentação de navios coincide com características específicas do fundo marinho.

### 3.3. Modelo De Identificação De Zonas De Risco Para Operações Portuárias

A identificação e quantificação de zonas de risco para operações portuárias requer a integração sistemática dos elementos analisados nos capítulos anteriores. Este capítulo sintetiza os dados batimétricos e os padrões de tráfego num modelo abrangente de avaliação de riscos, apresentando como as diferentes características do ambiente portuário interagem para criar situações de maior ou menor risco operacional.

Esta análise integrada representa o culminar da metodologia proposta na Figura 1, fornecendo uma ferramenta prática para a gestão da segurança portuária.

#### 3.3.1. Local de estudo e dados

O Porto de Sines ocupa uma posição estratégica no contexto das rotas marítimas globais, situando-se no cruzamento dos principais eixos de navegação Norte-Sul e Este-Oeste. Como principal infraestrutura portuária da fachada ibero-atlântica, as suas características geofísicas naturais têm sido fundamentais para a sua consolidação como ativo estratégico nacional, destacando-se como principal hub de abastecimento energético de Portugal e referência internacional em movimentação de carga contentorizada (Administração dos Portos de Sines e do Algarve [APS], 2023).

Localizado a 58 milhas náuticas a sul de Lisboa (37°57'N, 08°53'W), o Porto de Sines integra cinco terminais especializados que apoiam a sua capacidade multifuncional:

Terminal	Características
Terminal de Granéis (TGL)	Profundidade até -17.0m ZH
Terminal Petroquímico (TPQ)	Profundidade até -17.0m ZH
Terminal Multipurpose de Sines (TMS)	Profundidade até -15.0m ZH
Terminal de Gás Natural (TGN)	Profundidade até -13.5m ZH
Terminal de Contentores de Sines (TCS)	Profundidade até -17.5m ZH

Tabela 4 - Características dos Terminais. Fonte: APS

Esta diversidade operacional consolida o Porto de Sines como um elo crucial na cadeia logística marítima internacional, suportando múltiplas tipologias de carga e navios (International Maritime Organization [IMO], (IMO, 2018)).

A gestão do porto é realizada pela Administração do Porto de Sines (APS), que, como Autoridade Portuária, estabelece e mantém uma robusta regulamentação. Esta inclui normas específicas para acesso, entrada, permanência e saída de navios, conforme estabelecido no Artigo 2º do Decreto-Lei nº 46/2002, de 2 de março, alinhado com diretrizes internacionais de segurança marítima (IALA, 2022). O presente estudo fundamenta-se em dados batimétricos provenientes do levantamento hidrográfico realizado pelo Instituto Hidrográfico em 2019. Estes levantamentos, realizados periodicamente, são essenciais para garantir a segurança operacional do porto e para a gestão de canais de navegação.

A análise inclui critérios estabelecidos no Regulamento de Exploração, Ambiente e Segurança do Porto de Sines (APS, 2023), considerando especificações operacionais de cada terminal e alinhando-se com padrões internacionais de segurança portuária.

### **3.3.2. Objetivo principal e Critérios de análise**

O objetivo central deste estudo consiste no desenvolvimento de uma metodologia para identificação e quantificação de riscos de encalhe e acidentes de contacto no Porto de Sines. Esta metodologia baseia-se numa abordagem de modelação espacial multicritério integrada, alinhada com as diretrizes internacionais de segurança marítima (IALA, 2022; IMO, 2018).

A análise fundamenta-se em quatro categorias principais de critérios, estabelecidas segundo recomendações do PIANC (2014) e adaptadas às características específicas do Porto de Sines. Estas categorias englobam aspetos físicos, operacionais, ambientais e infraestruturais, permitindo uma avaliação abrangente dos riscos portuários.

Os critérios geoespaciais e físicos constituem a base fundamental da análise, incorporando o desenvolvimento de um Modelo Digital de Terreno através de interpolação IDW, utilizando dados batimétricos do Instituto Hidrográfico (2019). Este modelo permite a identificação precisa de zonas onde a profundidade representa potencial risco para a navegação, considerando os calados máximos específicos de cada terminal.

A análise do tráfego marítimo, baseada em dados AIS, possibilita a identificação de padrões de movimentação e áreas de maior concentração de navios. Esta componente é crucial para compreender a dinâmica operacional do porto e identificar zonas de potencial conflito ou risco aumentado de acidentes. A caracterização do tráfego considera diferentes tipos de navios e as suas necessidades específicas de manobra e segurança.

As condições ambientais e meteorológicas representam fatores significativos na segurança da navegação. A metodologia incorpora a análise de correntes marítimas, regimes de ondulação e condições de visibilidade, elementos que podem influenciar significativamente o risco de acidentes. Estes fatores são particularmente relevantes em operações críticas como aproximação aos terminais e manobras de atracação.

A infraestrutura portuária e a sua manutenção constituem o quarto pilar da análise. Este aspeto inclui a avaliação das condições de dragagem, monitorização de profundidades e eficácia dos sistemas de sinalização marítima. A adequada

manutenção destas infraestruturas é essencial para garantir a segurança das operações portuárias.

Para implementação desta metodologia, utilizam-se diferentes fontes de dados e técnicas de análise:

- Dados batimétricos do IH para análise de profundidades
- Registos AIS para estudo de padrões de tráfego
- Informações da APS sobre infraestruturas e obstáculos

### **3.3.3. Metodologia**

#### **3.3.3.1. Enquadramento Metodológico**

Esta análise desenvolve uma metodologia integrada para quantificação e avaliação dos riscos de encalhe e acidentes de contacto no ambiente portuário, tendo como caso de estudo o Porto de Sines.

A estrutura metodológica fundamenta-se em diretrizes internacionalmente reconhecidas: o IALA Waterway Risk Assessment Program (IWRAP) e o Formal Safety Assessment (FSA) da International Maritime Organization (IMO, 2018).

A integração destas metodologias com análise espacial multicritério, utilizando Sistemas de Informação Geográfica (SIG), representa uma evolução significativa na avaliação de riscos portuários. Bellsolà Olba et al., 2019 demonstraram que esta abordagem permite uma análise estruturada e adaptável às especificidades locais de cada porto, incorporando tanto aspetos normativos internacionais quanto características operacionais específicas (IALA, 2022)

A complexidade inerente à análise de riscos portuários exige uma abordagem multifacetada. Conforme argumentado por Martorell et al. (2009), a integração de diferentes metodologias permite uma compreensão mais abrangente dos fatores de risco. Esta perspetiva é corroborada por estudos recentes de Aalberg et al. (2022), que identificaram padrões distintos de acidentes em função das condições ambientais e operacionais.

### 3.3.3.2. Critérios de Análise

#### 3.3.3.2.1. Análise da Batimetria e Modelo Digital de Terreno

O processamento dos dados batimétricos, obtidos através do Instituto Hidrográfico (2019), fundamenta-se na metodologia de interpolação por Distância Inversa Ponderada (IDW), seguindo as recomendações de Pallis (2017) para análises portuárias.

O modelo utilizado na análise foi o criado no capítulo 3.1, optou-se por fazer uma classificação por terminal, isto porque, cada terminal tem calados máximos específicos.

A classificação considerou as especificidades operacionais dos diferentes terminais, nomeadamente:

- Terminal XXI - calado até 17m
- Terminal GNL - calado até 13.5m
- Terminal TGL/TPQ - calado até 17m
- Terminal TMS - calado até 15m

Para cada terminal os parâmetros de profundidade foram estabelecidos em quatro classes de risco, considerando a relação com o calado máximo de cada terminal:

Classe de Risco	Range	Justificação
Risco Muito Alto	$< 1.1 \times \text{calado}$	- Margem mínima de segurança - Risco iminente de encalhe - Baseado em diretrizes IALA
Risco Alto	$1.1-1.3 \times \text{calado}$	- Margem limitada de manobra - Requer atenção especial - Considerando efeitos dinâmicos
Risco Moderado	$1.3-1.5 \times \text{calado}$	- Margem adequada - Permite manobras normais - Segurança operacional básica
Risco Baixo	$> 1.5 \times \text{calado}$	- Margem ampla de segurança - Operação sem restrições - Conformidade com padrões internacionais

*Tabela 5 - Classificação de risco tendo em consideração o terminal*

### **3.3.3.2.2. Análise da Densidade de Tráfego Marítimo**

Para identificar melhor os complexos padrões de movimentação no porto, adaptamos a abordagem espaço-temporal desenvolvida por Wang et al. (2014) às características específicas do Porto de Sines.

Esta adaptação considerou as particularidades dos diferentes terminais e as rotas preferenciais observadas ao longo do tempo de operação, permitindo identificar não apenas os padrões genéricos de navegação, mas também as zonas onde naturalmente se concentram diferentes tipos de navios, aspeto fundamental destacado nos estudos de Bellsolà Olba et al. (2019).

Esta abordagem inclui:

- Análise específica para navios de carga e tanques, caracterizando rotas preferenciais e identificando zonas de maior tráfego.
- Quantificação da intensidade de tráfego, aqui o tráfego é quantificado em diferentes áreas, permitindo localizar pontos com maior concentração de navios.
- Determinação de áreas de maior concentração de navios

O modelo utilizado nesta análise foi o criado no capítulo 3.2.

### 3.3.3.2.3. Definição das Distâncias de Segurança

A definição das distâncias de segurança para ajudas à navegação e obstáculos em ambiente portuário requer uma abordagem sistemática que considere múltiplos fatores operacionais e regulamentares. De acordo com as diretrizes da International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities (IALA Guideline G1018, 2022)), as zonas de segurança devem ser estabelecidas considerando as dimensões e características dos navios que utilizam a instalação portuária e os padrões de tráfego local.

No contexto do Porto de Sines, onde operam navios com comprimento até 400 metros, as áreas de manobra e zonas de segurança devem ser dimensionadas para garantir operações seguras durante todas as fases de navegação. A International Maritime Organization, através das diretrizes do Formal Safety Assessment (FSA) (Revised Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for Use in the IMO Rule-Making Process (IMO, 2018)), estabelece a necessidade de avaliação sistemática dos riscos em áreas portuárias, considerando tanto aspetos físicos quanto operacionais.

Para as boias de navegação e farolins, seguindo as recomendações do PIANC (Harbour Approach Channels - Design Guidelines (PIANC, 2014)), estabeleceram-se zonas concêntricas de segurança que consideram as dimensões dos navios e as características operacionais do porto. As distâncias definidas baseiam-se na relação entre o comprimento do maior navio (400m) e as áreas necessárias para manobras seguras, conforme estabelecido nas diretrizes internacionais.

Especificamente para as boias de navegação, (Tabela 6) foram estabelecidas quatro zonas: 200, 400, 600 e 800 metros, correspondendo respetivamente a 0.5, 1.0, 1.5 e 2.0 vezes o comprimento do maior navio. Esta graduação permite uma avaliação progressiva do risco, considerando que a complexidade das manobras aumenta proporcionalmente com a proximidade ao obstáculo.

Zona de Risco	Distância (m)	Relação com Navio *	Classificação de Risco
Zona 4	0-200	0.5 × comprimento	Risco Muito Alto
Zona 3	200-400	1.0 × comprimento	Risco Alto
Zona 2	400-600	1.5 × comprimento	Risco Moderado

Zona 1	600-800	2.0 × comprimento	Risco Baixo
*Baseado no comprimento máximo de navio = 400m			

*Tabela 6 - Classificação de zonas de segurança tendo em consideração as boias de navegação*

Para os farolins, (Tabela 7) que servem primariamente como auxílios à navegação em aproximações críticas, as zonas de segurança foram definidas em 100, 200, 300 e 400 metros, alinhando-se com as recomendações da IALA para o posicionamento e área de influência de auxílios à navegação em canais de acesso e áreas de manobra.

Zona de Risco	Distância (m)	Justificativa	Classificação de Risco
Zona 4	0-100	Zona crítica	Risco Muito Alto
Zona 3	100-200	Zona de alta precisão	Risco Alto
Zona 2	200-300	Zona de aproximação	Risco Moderado
Zona 1	300-400	Zona de precaução	Risco Baixo

*Tabela 7 - Classificação de zonas de segurança tendo em consideração os farolins*

Por fim, estabelece-se as zonas de segurança (Tabela 8) para avaliação de risco em operações portuárias da seguinte forma:

Range Normalizado	Classificação	Condições Operacionais
0.75 - 1.00	Risco Muito Alto	Operações restritas
0.50 - 0.75	Risco Alto	Medidas especiais requeridas
0.25 - 0.50	Risco Moderado	Atenção aumentada
0.00 - 0.25	Risco Baixo	Operações normais

*Tabela 8 - Classificação final de segurança de operações no porto*

### 3.3.3.3. Processo de Quantificação do Risco

O processo de quantificação do risco fundamenta-se numa abordagem matemática rigorosa, baseada na normalização e ponderação de critérios. A normalização dos fatores segue o método proposto por Bellsolà Olba et al. (2019), expresso através das seguintes equações:

Para a profundidade:

$$Risco_{prof} = \frac{Prof_{req} - Prof_{atual}}{Prof_{req}}$$

Para a densidade de tráfego:

$$Risco_{dens} = \frac{Dens_{atual}}{Dens_{max}}$$

O sistema de ponderação, validado por especialistas e fundamentado na literatura Wang et al. (2014), atribui maior peso aos fatores com impacto direto na segurança da navegação. O risco total é calculado através de uma função agregadora:

$$Risco_{total} = \sum_{i=1}^n W_i \times R_i$$

Onde:

$W_i$  representa o peso do critério  $i$

$R_i$  representa o risco normalizado do critério  $i$

Com base na análise da literatura especializada em segurança portuária, a definição dos pesos para a análise de risco fundamenta-se em dois estudos relevantes que apresentam metodologias complementares e validadas internacionalmente.

Yang et al. (2013), no seu estudo "Maritime safety analysis in retrospect", estabeleceram uma base quantitativa para a análise de riscos marítimos, definindo pesos específicos para diferentes fatores de risco. A sua metodologia atribui 0.32 para perigosidade, 0.28 para tráfego marítimo e 0.22 para fatores ambientais, estabelecendo uma hierarquia clara de prioridades na avaliação de riscos.

Complementando estas perspectivas, Pak et al. (2015), em "Port Safety Evaluation from a Captain's Perspective", validaram através de especialistas uma distribuição de pesos que considera a experiência prática de operadores portuários. O seu

estudo estabelece 0.35 para perigosidade, 0.25 para tráfego, 0.23 para hidrografia e 0.17 para obstáculos.

Considerando a convergência destes estudos e as suas metodologias complementares, propõe-se para esta análise a seguinte distribuição de pesos:

- 0.35 para perigosidade do terminal, refletindo a sua importância crítica na segurança portuária;
- 0.25 para densidade de tráfego, considerando o seu impacto direto nas operações;
- 0.23 para fatores hidrográficos, reconhecendo a sua influência nas condições de navegação;
- 0.17 para obstáculos, considerando o seu papel na definição de zonas de segurança.

Esta distribuição não se alinha apenas com a literatura existente, mas também incorpora diferentes perspectivas metodológicas, desde análises quantitativas até validações por especialistas do setor.

<b>Critério</b>	<b>Peso (%)</b>	<b>Justificação</b>
Perigosidade Terminal	35	- Tipo de carga e materiais manuseados por terminal - Potencial de impacto em caso de acidente - Requisitos específicos de segurança operacional
Batimetria/MDT	23	- Fator crítico para encalhe - Condição física imutável - Impacto direto na segurança
Densidade AIS	25	- Indicador de complexidade operacional - Reflete risco de colisão - Padrão de tráfego dinâmico
Obstáculos	17	- Estruturas fixas conhecidas - Áreas de restrição definidas - Menor variabilidade temporal

*Tabela 9 - Critérios de Ponderação*

### 3.3.3.4. Validação Estatística Espacial

#### 3.3.3.4.1. Análise de Autocorrelação Espacial

A validação dos resultados incorpora análise de autocorrelação espacial através do Índice Global de Moran, conforme metodologia estabelecida por Getis & Ord (1992). Esta abordagem permite identificar padrões espaciais significativos na distribuição do risco, sendo expressa pela equação:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S_0 \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Onde:

- $n$  é o número de unidades espaciais
- $x_i$  é o valor da variável na unidade  $i$
- $\bar{x}$  é a média da variável
- $w_{ij}$  são os pesos espaciais
- $S_0$  é a soma de todos os pesos espaciais

### 3.3.3.5. Implementação em SIG

A implementação da metodologia é realizada em ambiente SIG através de um modelo builder (Figura 22) que se encontra dividido em quatro grandes blocos: **Hidrografia** (Peso = 0.23), **Densidade de Tráfego** (Peso = 0.25), **Obstáculos** (Peso = 0.17) e **Perigosidade por Terminal** (Peso = 0.35). Cada um desses blocos representa uma etapa do processamento dos dados para obtenção de uma análise de riscos integrada.

**Hidrografia:** Neste bloco, são processadas quatro áreas distintas (TXXI, TGL, TMS e GNL). As camadas são processadas com operações como *Clip Raster*, *IDW*, *Reclassify* e *Raster Calculator*, onde se calcula a relevância de cada camada e se criam *rasters* normalizados para cada área. Em seguida, as saídas são combinadas através do *Mosaic To New Raster* e normalizadas, representando a avaliação final das condições hidrográficas.

**Densidade de Tráfego:** Este bloco representa as análises das densidades de tráfego, usando operações como *Kernel Density* para analisar áreas de maior concentração de tráfego. O processo inclui um *Raster Calculator* e normalização dos dados, que são então integrados na análise de risco geral.

**Obstáculos:** Este bloco envolve a análise de boias e faróis, usando *Multiple Ring Buffer* que define áreas de segurança e risco ao redor desses objetos. As operações de *Buffer* e *Polygon to Raster* convertem esses obstáculos numa camada rasterizada, seguidas de *Raster Calculator* e normalização.

**Perigosidade por Terminal:** Um novo bloco que analisa o nível de risco associado a cada terminal através de *Multiple Ring Buffer*, *Polygon to Raster*, *Raster Calculator* e normalização, considerando as características específicas de cada terminal.

Após o processamento dessas camadas individuais, as saídas são combinadas para uma análise de risco final, utilizando uma soma ponderada (*Weighted Sum*), seguida de *MapaFinalDelta* e *Reclassify*, resultando numa camada de riscos final (*RiscoFinal*). Este modelo implementa uma metodologia abrangente para a avaliação de riscos em áreas portuárias, facilitando a tomada de decisões sobre navegação e segurança no local.

O processo de validação do modelo, representado na parte direita do model builder, implementa uma análise de autocorrelação espacial através das

ferramentas de estatística espacial. Esta etapa é crucial para verificar o rigor do modelo e a significância estatística dos padrões espaciais identificados. O fluxo de validação inclui o cálculo do Índice Global de Moran, que avalia o grau de agrupamento dos valores de risco, fornecendo medidas quantitativas da distribuição espacial dos resultados.

Esta implementação integrada permite não apenas a criação de um mapa final de risco, mas também a sua validação estatística, garantindo a confiabilidade e reprodutibilidade da metodologia aplicada. A estrutura modular do model builder facilita ainda possíveis ajustes e atualizações do modelo, mantendo a integridade do processo analítico.

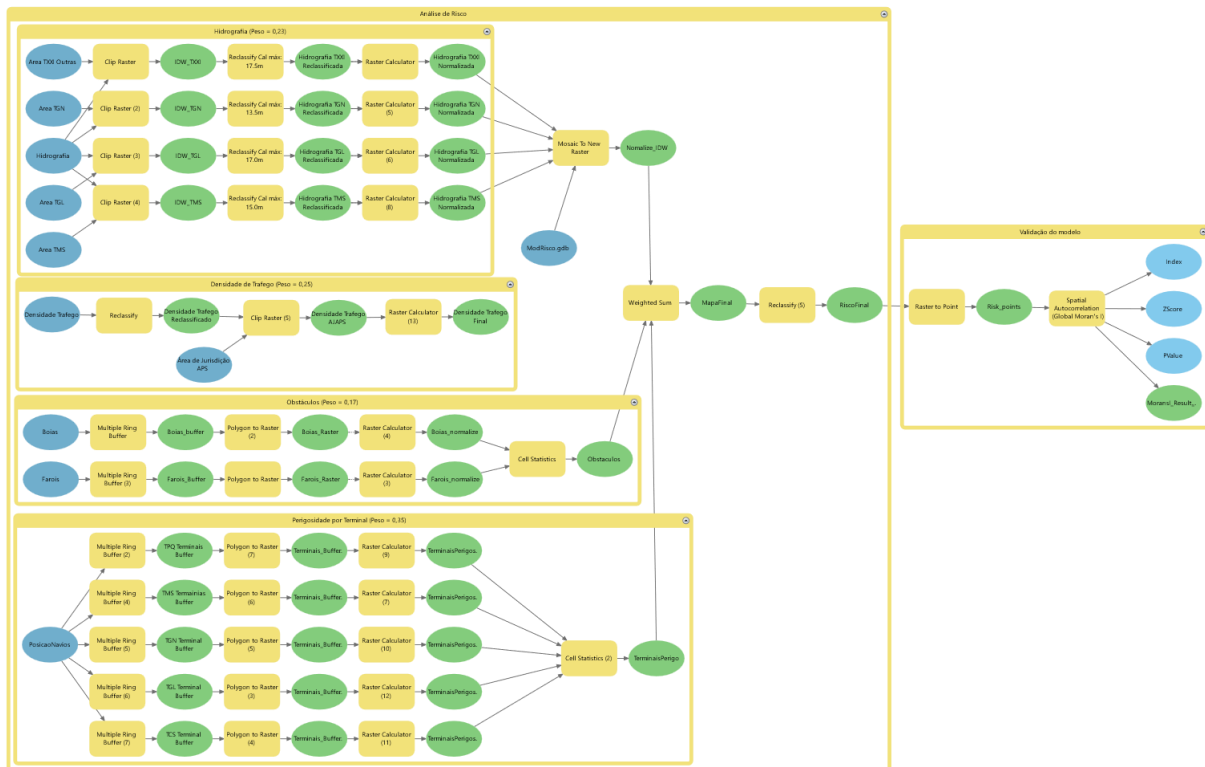


Figura 22 - Model builder da metodologia aplicada

### **3.3.3.6. Validação**

O processo de validação inclui:

- Análise de sensibilidade dos resultados às ponderações utilizadas

Esta metodologia permite uma avaliação sistemática e quantitativa dos riscos de encalhe e contacto no Porto de Sines, fornecendo uma base objetiva para a gestão da segurança da navegação.

### 3.3.4. Resultados

#### 3.3.4.1. Análise da Batimetria

A análise batimétrica, baseada na metodologia descrita no capítulo 3.1, resultou numa classificação detalhada do fundo marinho do Porto de Sines (Figura 23).

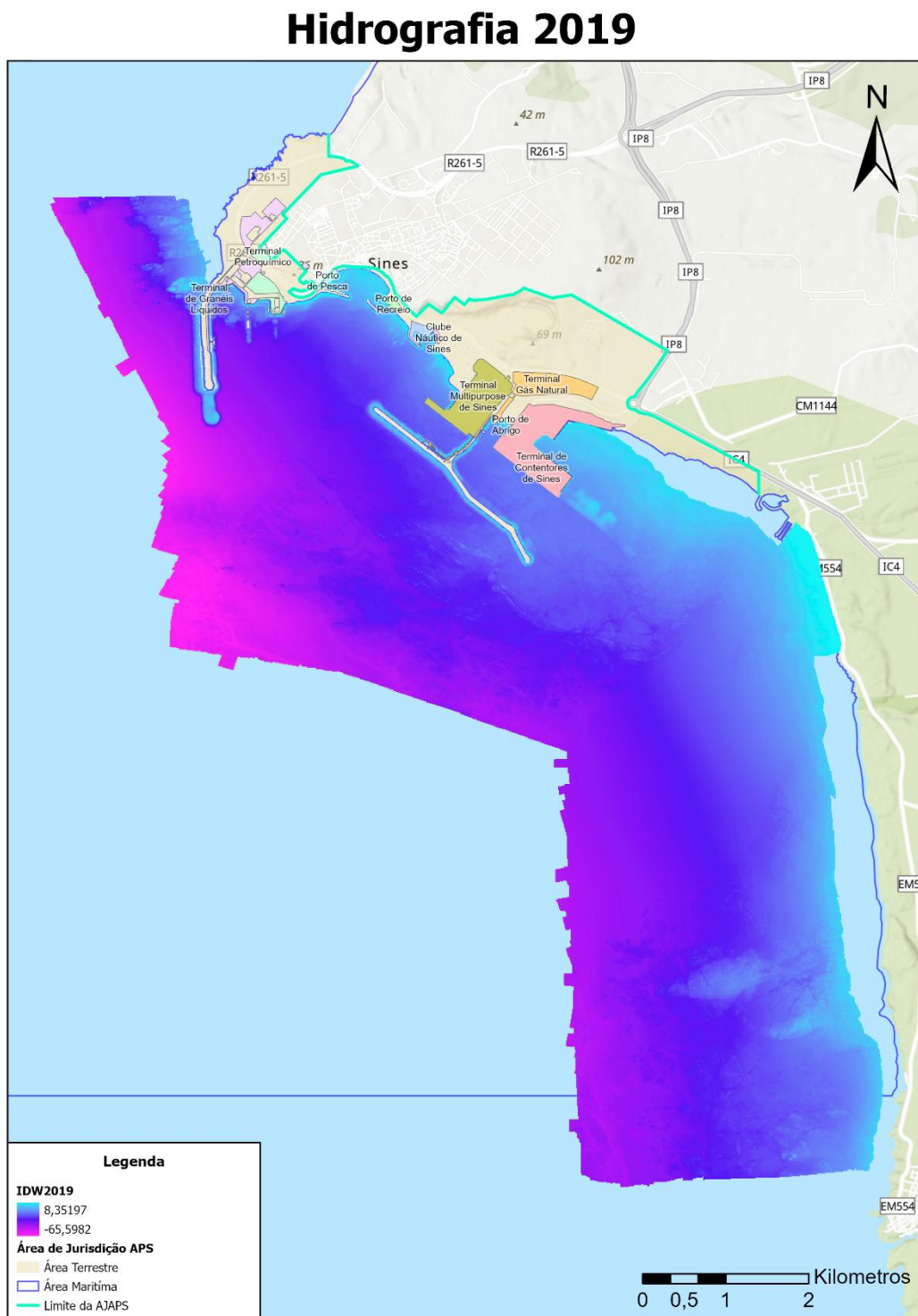


Figura 23 - Hidrografia do Porto de Sines relativa a 2019

A reclassificação do Modelo Digital de Terreno nestas categorias de perigosidade demonstrou uma clara gradação do risco (Figura 24), com as áreas mais críticas (vermelho) concentradas junto aos terminais e nas zonas de menor profundidade, enquanto as áreas mais seguras (verde) se localizam nas zonas mais profundas.

## Hidrografia Reclassificado

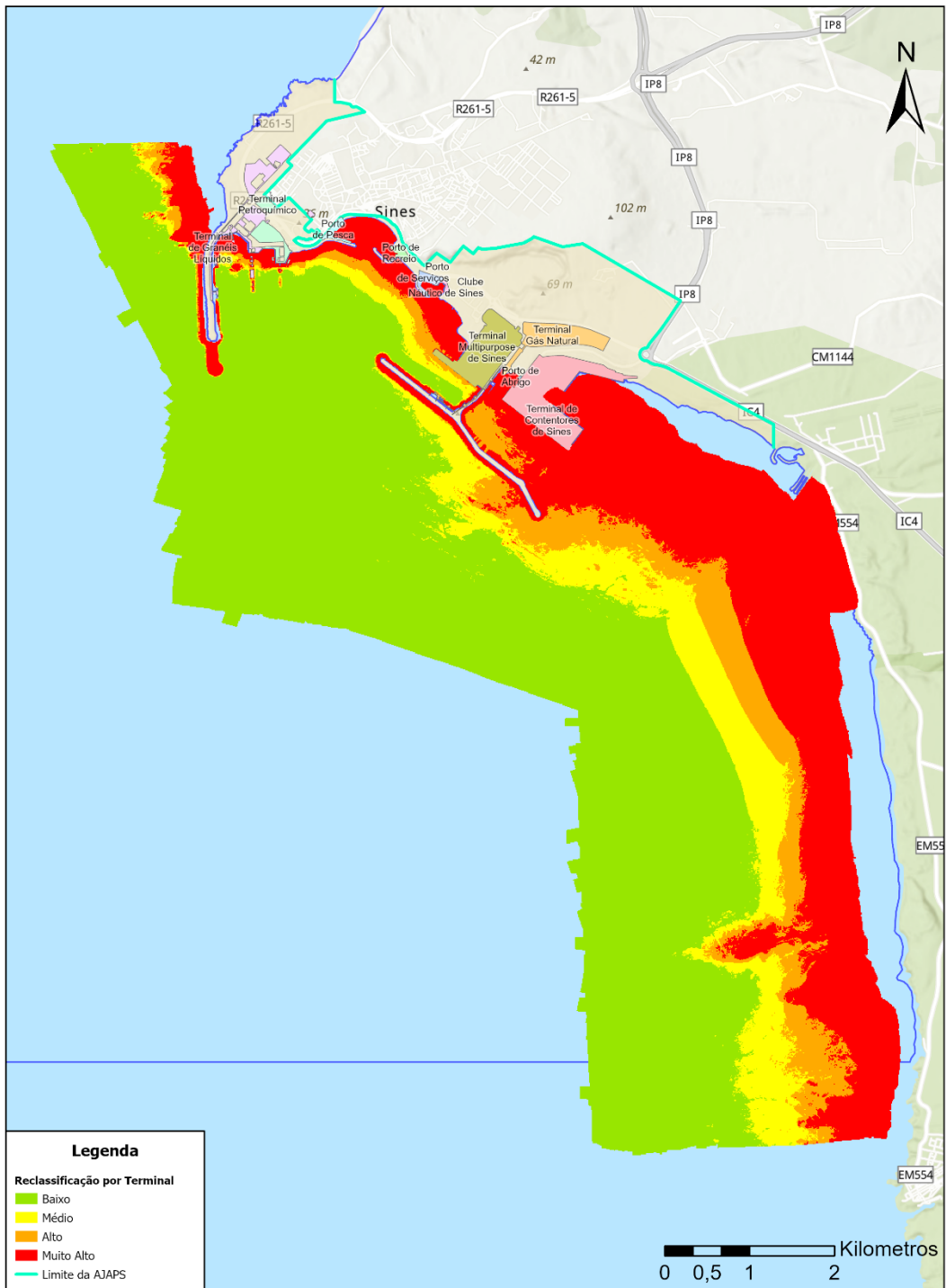


Figura 24 - Hidrografia Reclassificada por quatro categorias de perigosidade

A normalização destes dados (Figura 25) manteve a consistência espacial dos padrões de risco, permitindo uma representação contínua dos valores entre 0 e 1, facilitando assim a integração com os demais componentes da análise. Esta abordagem alinha-se com as recomendações da IALA para avaliação de risco em canais de navegação (IALA, 2022).

## Hidrografia Normalizado

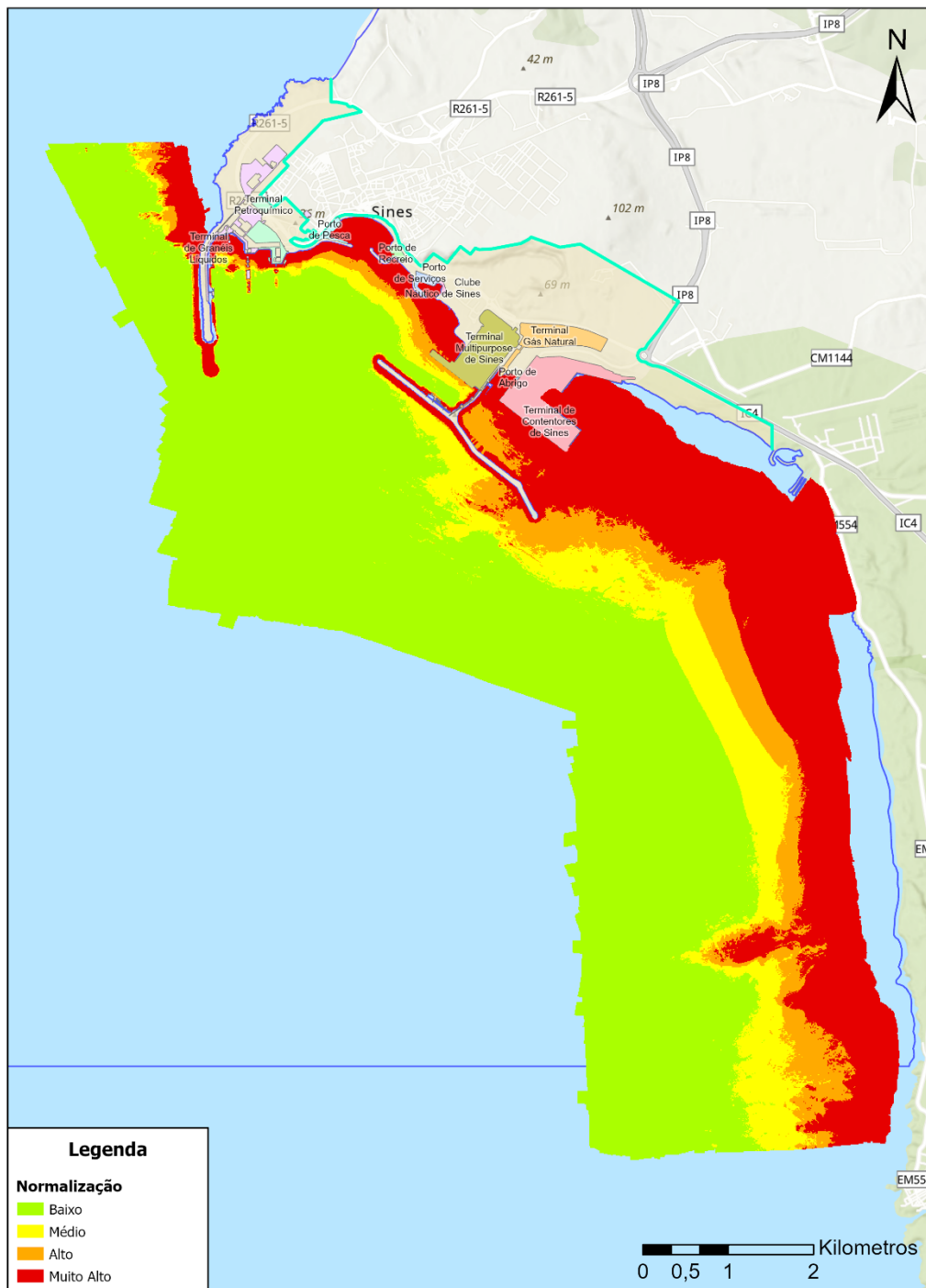


Figura 25 - Hidrografia normalizada e definida para 4 categorias de perigosidade

### 3.3.4.2. Padrões de Densidade de Tráfego

A análise da densidade de tráfego marítimo, desenvolvida conforme metodologia apresentada no capítulo 3.2, revelou padrões significativos de concentração de navios (Figura 26).

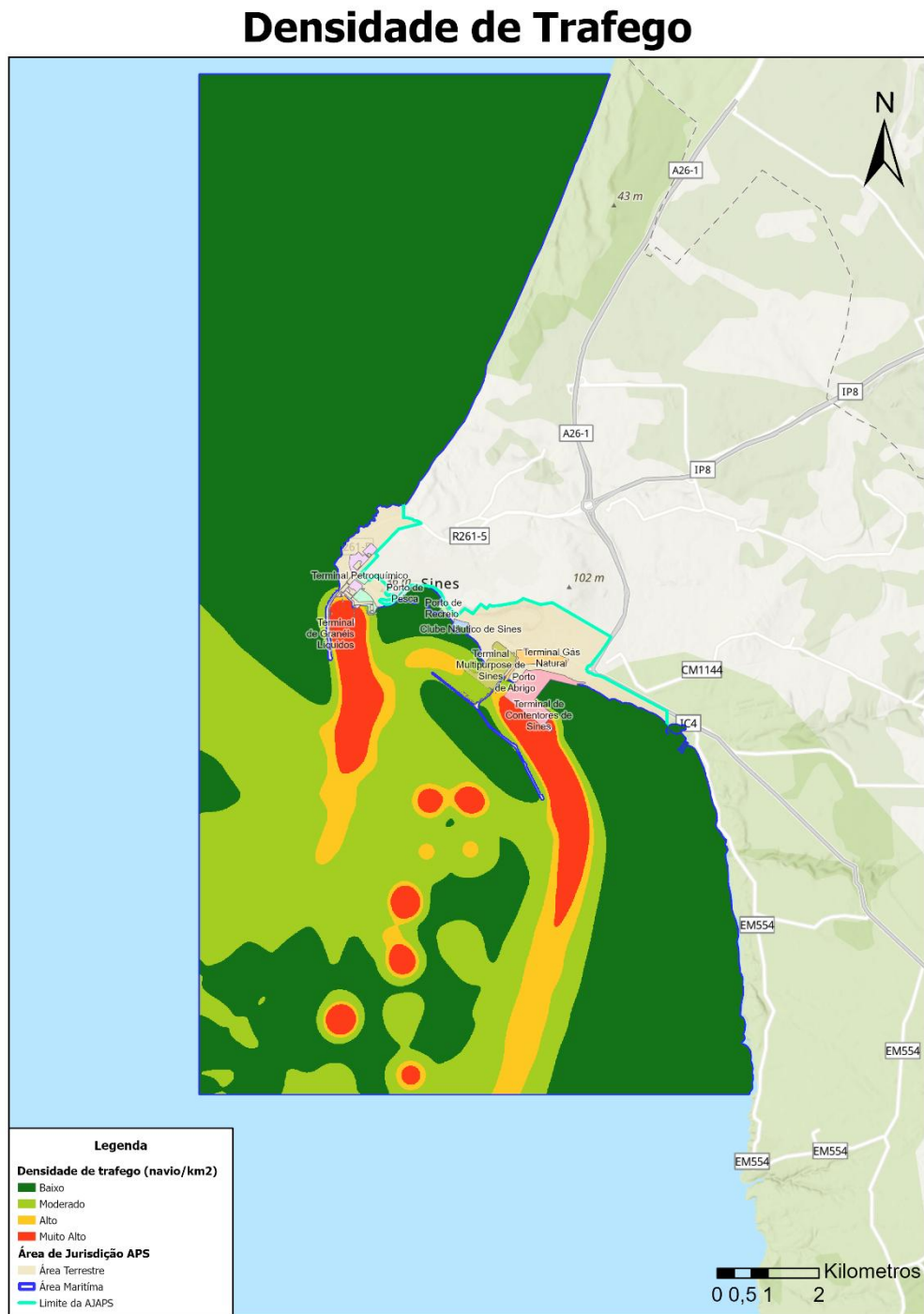


Figura 26 - Densidade de tráfego marítimo (navio/km<sup>2</sup>) no Porto de Sines em maio de 2023

Os resultados evidenciam clusters de alta densidade (vermelho) nas áreas de manobra dos terminais e zonas de aproximação, com gradual diminuição (verde) nas áreas mais afastadas. Esta distribuição espacial corresponde aos padrões típicos de utilização do espaço portuário, conforme documentado nas diretrizes do (PIANC, 2014).

#### **3.3.4.3. Perigosidade por Terminal**

A análise da perigosidade por terminal (Figura 27) permite identificar uma distribuição espacial distinta dos níveis de risco associados aos diferentes terminais do Porto de Sines. As áreas a vermelho, indicando risco muito alto, concentram-se principalmente nos terminais GNL e Petroquímico, refletindo a natureza crítica das cargas manuseadas nestas instalações.

Na representação cartográfica, é possível identificar três zonas de risco claramente demarcadas:

1. Zonas de Risco Alto (vermelho): Localizadas nos terminais que trabalham materiais perigosos, especificamente o Terminal GNL e o Terminal Petroquímico, onde o manuseamento de gases liquefeitos e produtos químicos requer medidas de segurança mais rigorosas.
2. Zonas de Risco Médio (amarelo): Identificadas nas áreas adjacentes às zonas de risco alto, representando áreas onde ainda existe influência significativa das operações com materiais perigosos, mas com menor intensidade devido ao distanciamento dos pontos de operação.
3. Zonas de Risco Baixo (verde): Correspondem às áreas mais afastadas dos terminais críticos e zonas de operação com cargas menos perigosas, como o Terminal XXI (contentores).

Esta distribuição espacial do risco demonstra uma clara correlação entre a natureza das operações em cada terminal e o nível de perigosidade associado,

forneendo uma base objetiva para o planeamento de medidas de segurança e protocolos de emergência específicos para cada área do porto.

## Perigosidade por Terminal

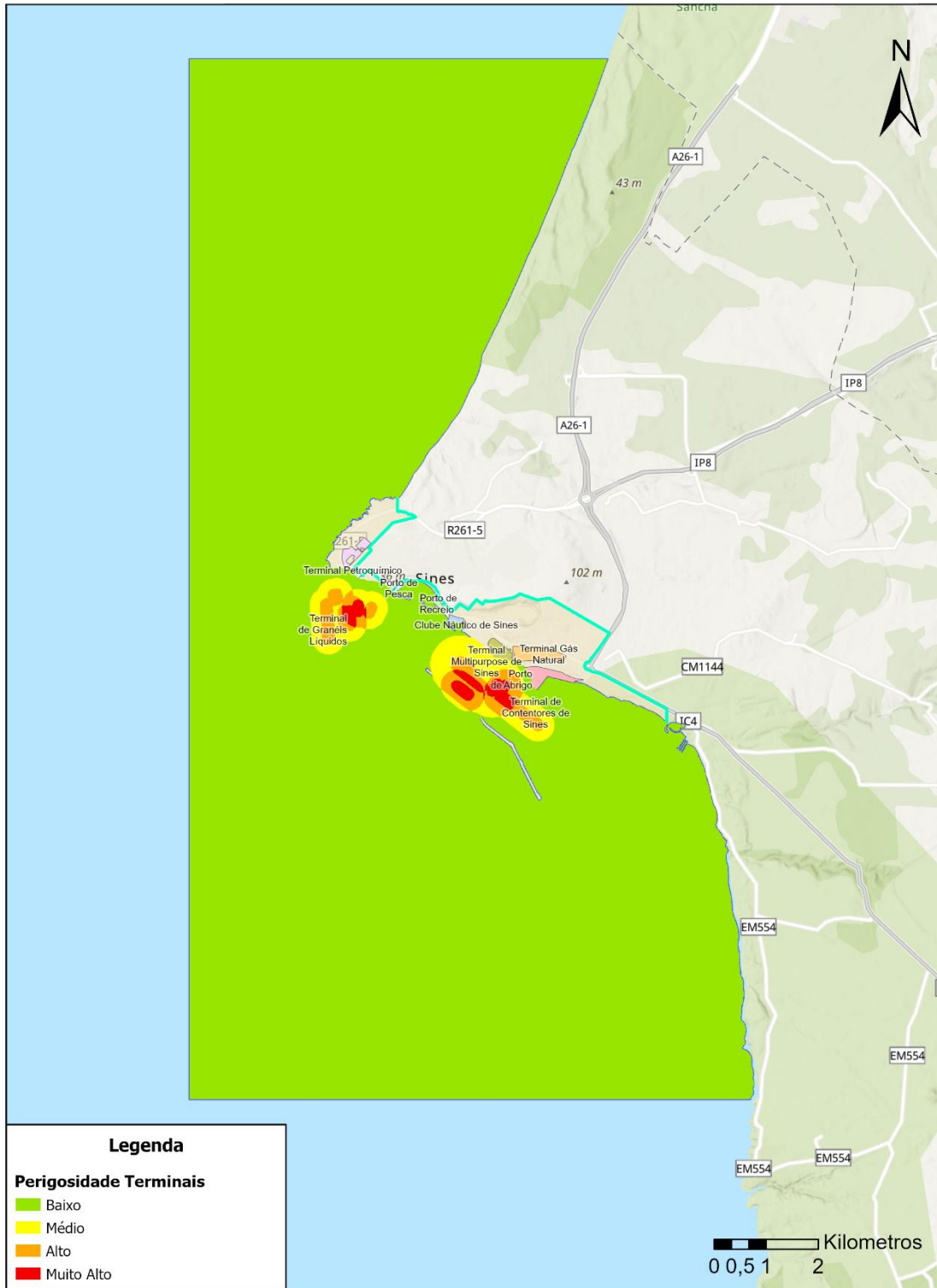


Figura 27 - Mapa de Perigosidade por Terminal

### 3.3.4.4. Influência dos Obstáculos na Navegação

A análise dos obstáculos à navegação (Figura 28) mostra a distribuição espacial das zonas de influência dos faróis e boias de navegação no Porto de Sines.

## Obstáculos

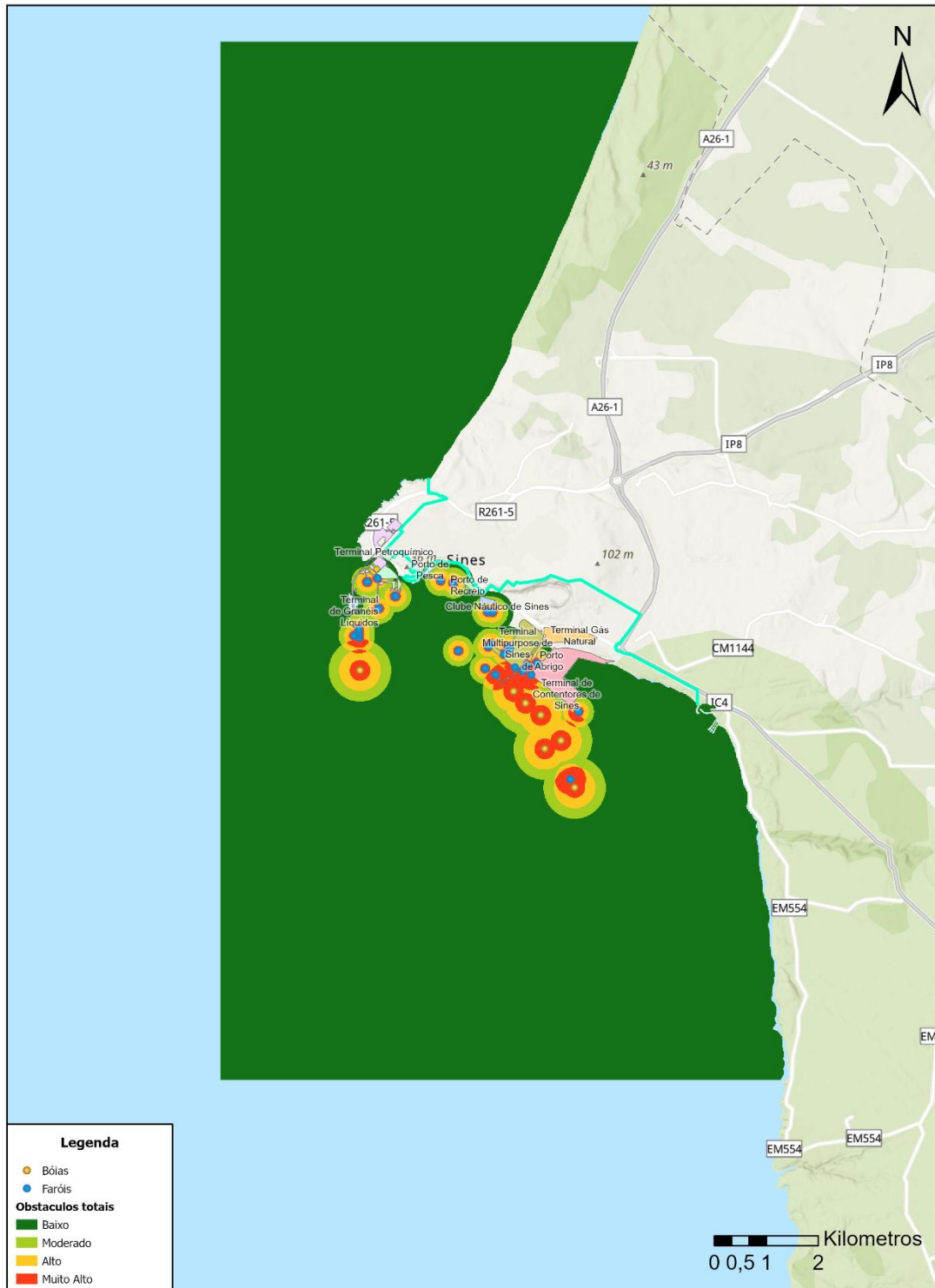


Figura 28 - Mapa de perigosidade de obstáculos como boias e faróis

O resultado demonstra uma gradação do risco em anéis concêntricos ao redor de cada obstáculo.

A distribuição espacial dos obstáculos e as suas zonas de influência demonstram uma concentração significativa nas áreas de aproximação aos terminais e ao longo dos canais de navegação principais. Este padrão reflete o sistema de auxílios à navegação do porto, onde os farolins e boias são estrategicamente posicionados para garantir a segurança das manobras em áreas críticas.

A análise identifica também a sobreposição de zonas de influência em determinadas áreas, particularmente nas aproximações aos terminais, onde múltiplos auxílios à navegação trabalham em conjunto para garantir a segurança das operações portuárias.

### 3.3.4.5. Mapa de Risco Integrado

O resultado da análise é apresentado na forma de um **Mapa de Risco** (Figura 29), onde cada zona de risco é indicada por uma cor específica, variando de verde (risco baixo) a vermelho (risco muito elevado) e apresenta uma classificação em quatro níveis distintos (Tabela 10):

- Operações normais (verde): áreas com condições favoráveis à navegação
- Atenção aumentada (amarelo): zonas que requerem monitorização adicional
- Medidas especiais requeridas (laranja): áreas com restrições específicas
- Operações restritas (vermelho): zonas de máxima precaução

<b>Nível</b>	<b>Medidas Operacionais</b>
Baixo	- Operação normal - Monitorização padrão - Sem restrições especiais
Moderado	- Atenção aumentada - Monitorização frequente - Medidas preventivas básicas
Alto	- Restrições operacionais - Monitorização contínua - Medidas especiais requeridas
Muito Alto	- Operações restritas - Intervenção imediata - Medidas excepcionais necessárias

*Tabela 10 - Classificação final de riscos*

A distribuição espacial do risco demonstra uma clara correlação com as características operacionais do porto, identificando as áreas críticas principalmente nos terminais e zonas de manobra.

O mapa final (Figura 29) oferece diversas vantagens para a gestão portuária:

- Fornece uma visão abrangente e clara dos níveis de risco em toda a área portuária
- Permite identificar zonas críticas que requerem atenção especial
- Facilita o planeamento de rotas e manobras

- Apoia na tomada de decisões operacionais

## Mapa de Riscos

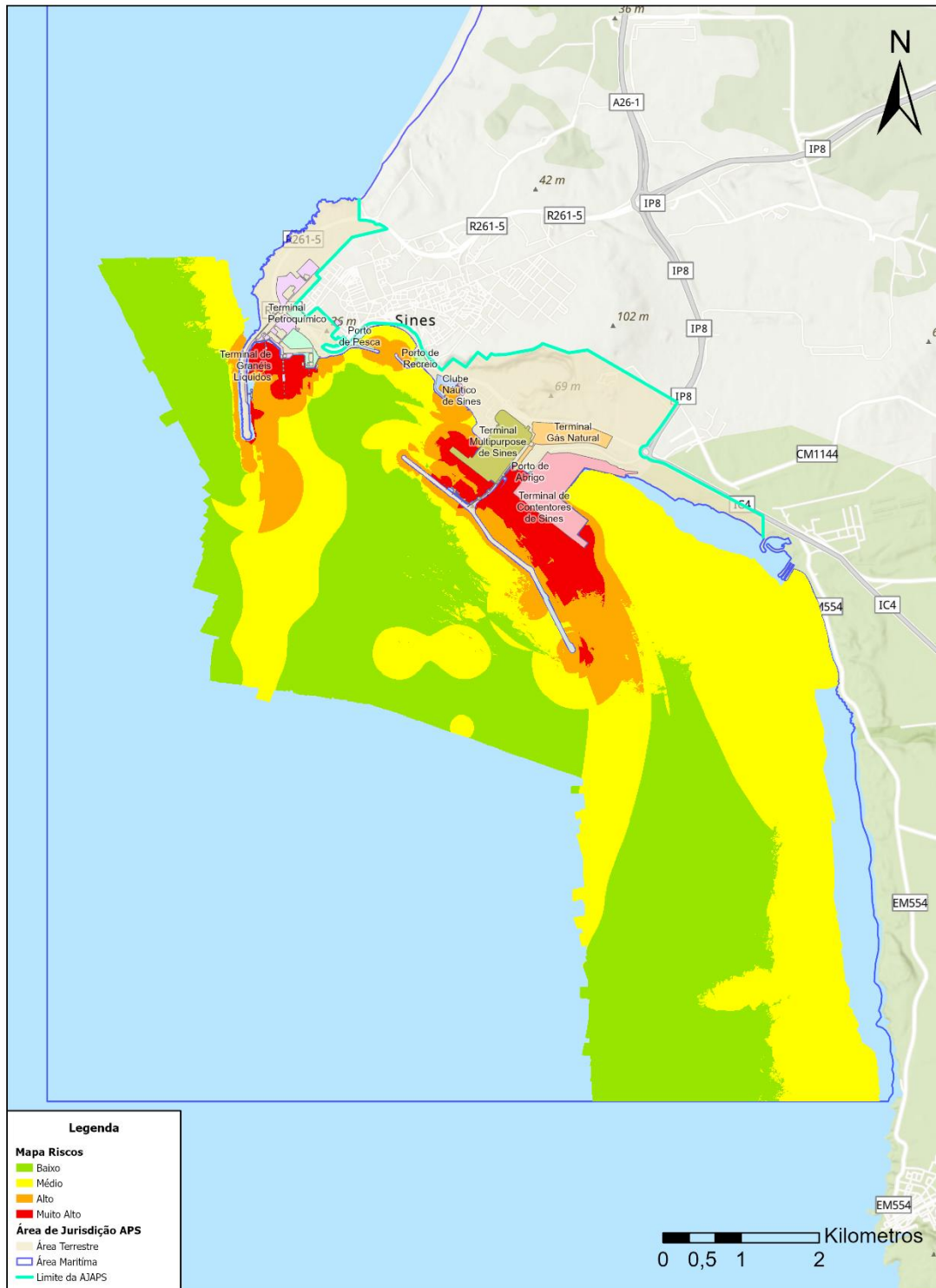


Figura 29 - Mapa de Risco

Este mapa integrado representa uma ferramenta valiosa para a gestão de risco portuário, alinhada com as melhores práticas internacionais de segurança marítima e gestão portuária.

O mapa auxilia na identificação de áreas de maior e menor risco, contribuindo para uma gestão mais eficiente da navegação. Através das zonas de cores, fica claro onde são necessários maiores cuidados para evitar acidentes ou incidentes, especialmente em regiões mais próximas do porto e de áreas de tráfego intenso.

Esse tipo de análise espacial permite ao gestor portuário implementar medidas preventivas, como orientação específica para os navegantes, restrições de acesso em certas áreas, ou até modificações nas infraestruturas de sinalização e segurança.

### 3.3.4.6. Validação Estatística

Com base no relatório de Autocorrelação Espacial (Figura 30), a validação estatística do modelo foi realizada através da análise de autocorrelação espacial, utilizando o Índice Global de Moran, que avalia o grau de agrupamento ou dispersão espacial dos valores de risco no porto.

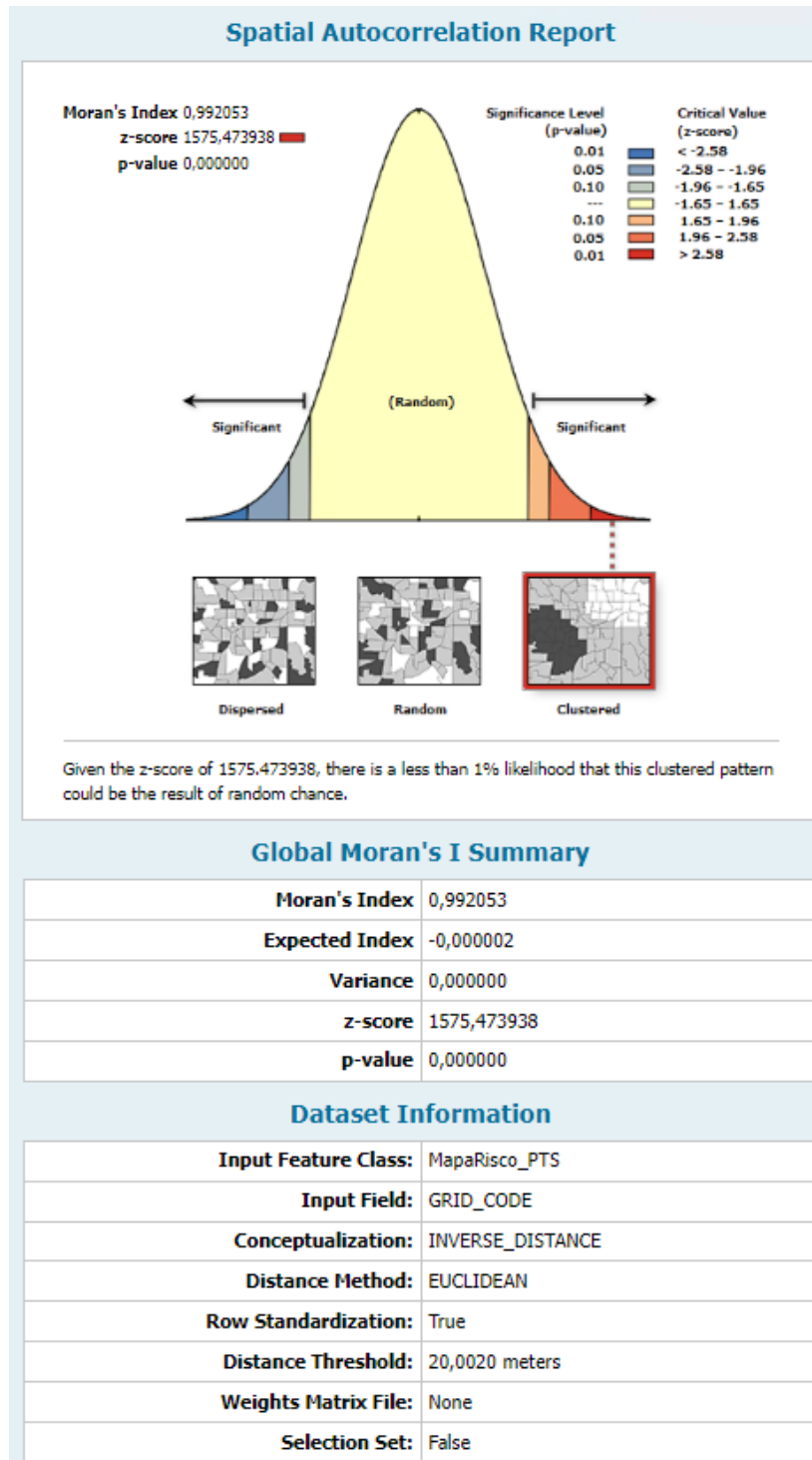


Figura 30 - Validação através do Índice Global de Moran

Os resultados demonstram um Índice de Moran de 0,992053, aproximando-se de 1, o que indica uma forte autocorrelação espacial positiva. Este valor é suportado por um z-score expressivamente alto de 1575,473938 e um p-value de 0.000000, confirmando a significância estatística dos resultados. Esta combinação de valores indica que existe menos de 1% de probabilidade deste padrão espacial ser resultado do acaso.

A análise, realizada com um limiar de distância de 20.020 metros e utilizando o método de distância Euclidiana, identifica um padrão fortemente agrupado (clustered) na distribuição espacial dos riscos. Este padrão demonstra que áreas de alto risco tendem a estar espacialmente próximas de outras áreas de alto risco, e similarmente, áreas de baixo risco agrupam-se com outras de baixo risco. A conceptualização através do método Inverse Distance, com padronização das linhas (Row Standardization), fortalece o rigor da análise espacial.

A significância estatística dos resultados, evidenciada pelo z-score muito acima do valor crítico de 2.58, valida estatisticamente o modelo desenvolvido. O padrão clustered observado no mapa de dispersão confirma que:

- A distribuição espacial dos riscos não é aleatória
- Existe uma forte tendência de agrupamento de valores similares
- O modelo captura efetivamente os padrões espaciais de risco no porto

Este resultado comprova a estabilidade metodológica empregada na análise de risco portuário e confirma a validade estatística dos padrões espaciais identificados.

### **3.3.5. Discussão**

A metodologia proposta representa uma evolução significativa na avaliação de riscos portuários, integrando múltiplas fontes de dados e técnicas analíticas avançadas.

Os resultados obtidos através da análise multicritério espacial mostram uma forte capacidade de identificação e classificação de zonas de risco, conforme validado pelo Índice de Moran ( $I = 0,992053$ ), que confirma a significância estatística dos padrões espaciais identificados.

As limitações inerentes ao processo, como a temporalidade dos dados e as incertezas do modelo, são reconhecidas e consideradas na interpretação dos resultados, seguindo as recomendações de Bellsolà Olba et al. (2019). Esta transparência metodológica fortalece a confiabilidade e aplicabilidade do modelo. A abordagem desenvolvida oferece não apenas uma avaliação quantitativa dos riscos, mas estabelece uma base sólida para a gestão da segurança da navegação, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias mais efetivas de prevenção de acidentes no ambiente portuário.

O modelo é projetado para viabilizar análises periódicas, assegurando que navios que entram e saem da área de jurisdição portuária apresentem um risco minimizado de encalhe.

A integração de diferentes camadas de informação - batimetria, densidade de tráfego e obstáculos - permite uma compreensão mais completa dos riscos operacionais, demonstrando particular eficácia na identificação de zonas críticas que requerem atenção especial e áreas de potencial conflito de navegação.

Tal abordagem contribui para a mitigação contínua dos riscos associados à análise dos fundos marinhos, promovendo a segurança e eficiência das operações portuárias. Este processo sistemático de revisão e atualização dos dados batimétricos visa identificar e prevenir potenciais obstáculos à navegação, garantindo assim a continuidade operacional e a integridade das infraestruturas marítimas, alinhando-se com as melhores práticas internacionais (Bolt & Secretariat, 2022; PIANC, 2014).

O desenvolvimento futuro desta metodologia poderia beneficiar da integração de dados meteorológicos e oceanográficos em tempo real, implementação de

sistemas de alerta automático e desenvolvimento de interfaces mais intuitivas para operadores.

### **3.3.6. Conclusão**

Este trabalho desenvolveu e implementou com sucesso uma metodologia de análise espacial multicritério para avaliação de riscos no Porto de Sines. Como demonstrado na Figura 1, esta análise integra os resultados do modelo batimétrico e da análise de tráfego numa avaliação abrangente dos riscos operacionais.

A metodologia foi confirmada através da análise de autocorrelação espacial, que apresentou um Índice de Moran de 0,992053, demonstrando uma forte consistência estatística nos resultados obtidos.

Esta integração sistemática das diferentes camadas de análise, conforme proposto no modelo metodológico, permite uma compreensão mais completa e dinâmica dos riscos portuários, fornecendo uma base sólida para a tomada de decisões operacionais e estratégicas.

A abordagem por terminais na análise batimétrica, considerando os diferentes calados máximos (Terminal XXI: 17.0m, Terminal GNL: 13.5m, Terminal TGL: 17.0m e Terminal TMS: 15.0m), permitiu uma avaliação mais precisa e personalizada dos riscos associados a cada área operacional. Esta diferenciação revelou-se fundamental para a compreensão das especificidades de cada zona do porto.

A análise de densidade de tráfego identificou com clareza os padrões de utilização do espaço portuário, enquanto o estudo da influência dos obstáculos contribuiu para uma compreensão mais abrangente dos desafios à navegação. A integração destes componentes resultou num mapa de risco que oferece uma ferramenta valiosa para o planeamento e gestão das operações portuárias.

O modelo desenvolvido demonstra potencial significativo para aplicação noutros contextos portuários, podendo ser adaptado e refinado de acordo com as necessidades específicas. As limitações identificadas, como a natureza estática da análise e a dependência de atualizações periódicas dos dados, não comprometem a validade e utilidade da metodologia, mas apontam direções para desenvolvimentos futuros.

A principal contribuição deste trabalho reside na criação de uma ferramenta prática e estatisticamente sólida para avaliação de riscos portuários, que pode auxiliar significativamente na tomada de decisões operacionais e no planeamento estratégico de segurança marítima.

A metodologia desenvolvida demonstra a importância da integração entre as diferentes camadas de análise para uma compreensão efetiva dos riscos portuários. O sucesso desta abordagem depende fundamentalmente da precisão do modelo batimétrico e da qualidade da análise de tráfego, evidenciando como as diferentes componentes do estudo se complementam e se reforçam mutuamente.

### **3.4. Conclusões**

Este estudo desenvolveu e implementou um conjunto integrado de metodologias para análise e gestão de riscos portuários, estabelecendo uma abordagem holística que combina múltiplas fontes de dados e técnicas analíticas avançadas. Os resultados obtidos em cada componente do estudo contribuem para uma compreensão mais profunda e dinâmica do ambiente portuário.

A caracterização detalhada da batimetria, validada através de técnicas geoestatísticas propostas por Oliver & Webster (2014), forneceu uma base sólida para a compreensão do ambiente marinho. O modelo desenvolvido demonstrou alta precisão na representação das profundidades, com um Índice de Moran de 0,989868 confirmando a consistência espacial dos resultados. Esta precisão é fundamental não apenas para a segurança da navegação imediata, mas também para o planeamento estratégico de infraestruturas portuárias.

A análise metódica dos padrões de tráfego marítimo, seguindo as metodologias de Wang et al. (2014), que revelou dinâmicas operacionais específicas e identificou zonas críticas de concentração de navios. A análise de mais de 3.729 trajetórias de navios permitiu identificar padrões específicos de utilização do espaço portuário, fornecendo insights valiosos para a otimização das operações. A verificação de que aproximadamente 21% do tráfego (794 trajetórias de navios) na região destina-se aos portos nacionais (Sines, Setúbal e Lisboa), destas 294 trajetórias de navios destinam-se ao porto de Sines o que tem implicações significativas para o planeamento da segurança e eficiência operacional.

A integração destes elementos num modelo multicritério de identificação de zonas de riscos, fundamentado nas diretrizes internacionais da IMO (2018) e IALA (2022), demonstrou elevada consistência estatística e capacidade de adaptação às especificidades operacionais dos diferentes terminais. O modelo desenvolvido permite uma identificação mais precisa e objetiva de zonas críticas para a segurança da navegação, fornecendo uma base quantitativa para decisões operacionais e estratégicas.

As implicações práticas destes resultados são substanciais para a gestão portuária moderna:

1. A metodologia desenvolvida permite uma otimização mais precisa das operações de dragagem, baseada não apenas em dados batimétricos, mas também em padrões reais de utilização do espaço portuário.
2. A identificação sistemática de zonas de risco possibilita uma alocação mais eficiente de recursos de monitorização e resposta a emergências.
3. A compreensão integrada dos padrões de tráfego e condições físicas permite um planeamento mais efetivo da expansão portuária e desenvolvimento de infraestruturas.

As limitações identificadas no trabalho, principalmente relacionadas à natureza estática de algumas análises e à dependência de atualizações periódicas de dados, apontam direções promissoras para estudos futuros:

1. Integração de dados em tempo real nos modelos desenvolvidos, combinando informações batimétricas dinâmicas e dados contínuos de tráfego (AIS), permitindo uma análise mais atual e precisa das condições portuárias.
2. Implementação de técnicas de machine learning para previsão de padrões de tráfego e identificação precoce de situações de risco.
3. Expansão do modelo para incluir fatores ambientais e meteorológicos na identificação de zonas de riscos.
4. Desenvolvimento de interfaces mais intuitivas para os operadores portuários, facilitando a utilização prática das análises.

Este trabalho estabelece uma base metodológica sólida para a evolução dos sistemas de gestão portuária. A abordagem desenvolvida, ao integrar diferentes camadas de análise numa metodologia coerente e estatisticamente robusta, oferece não apenas ferramentas práticas para a gestão atual, mas também um caminho para o desenvolvimento de portos mais eficientes, seguros e sustentáveis.

#### **4. DIGITAL TWINS E SIG NA GESTÃO PORTUÁRIA**

A convergência entre Digital Twins e Sistemas de Informação Geográfica (SIG) representa uma transformação fundamental na gestão portuária moderna.

Esta integração, como salientado por Klar et al. (2023), estabelece um novo paradigma que ultrapassa a simples combinação de tecnologias, criando uma plataforma unificada que combina a precisão espacial dos SIG com as capacidades de simulação dinâmica dos Digital Twins.

A implementação destes sistemas integrados tem demonstrado impactos significativos na eficiência operacional, segurança e sustentabilidade ambiental dos portos modernos.

A integração das análises desenvolvidas nos capítulos anteriores, desde a modelação batimétrica até a identificação de zonas de risco, estabelece uma base sólida para a implementação de sistemas mais avançados de gestão portuária.

De seguida, exploramos como estas metodologias podem ser incorporadas em sistemas de Digital Twins, permitindo uma abordagem ainda mais dinâmica e preditiva da gestão portuária.

No contexto das análises desenvolvidas nos capítulos anteriores, os Digital Twins são o caminho natural para integrar dados batimétricos, análises de tráfego e avaliações de risco numa plataforma unificada e dinâmica, permitindo uma gestão mais proativa e eficiente do ambiente portuário.

A evolução natural do modelo metodológico apresentado na Figura 1 direciona-se para a implementação de Digital Twins, que podem integrar em tempo real as diferentes camadas de análise desenvolvidas neste estudo.

A evolução da gestão portuária moderna tem se direcionado cada vez mais para a adoção de tecnologias digitais avançadas que permitam uma compreensão mais dinâmica e preditiva do ambiente operacional.

Neste contexto, os Digital Twins surgem como uma evolução natural da integração de diferentes camadas de análise espacial, representando um passo significativo além das análises tradicionais apresentadas nos capítulos anteriores.

## 4.1. Fundamentação Teórica e Evolução dos Digital Twins

O conceito de Digital Twin, inicialmente desenvolvido pela NASA para sistemas espaciais, evoluiu significativamente nas últimas décadas. Klar & Angelakis (2023) definem Digital Twins portuários como representações virtuais dinâmicas que integram dados em tempo real com modelos preditivos, permitindo simulações e otimizações contínuas das operações.

Esta definição representa uma evolução significativa em relação aos sistemas tradicionais de gestão portuária, integrando elementos de análise espacial, monitorização em tempo real e modelagem preditiva.

A base teórica para implementação de Digital Twins em ambientes portuários fundamenta-se na convergência de múltiplas tecnologias e metodologias. Neugebauer et al. (2024) identificam três componentes essenciais que caracterizam um Digital Twin portuário maduro:

**Representação Física Digital:** Fundamentada em modelos espaciais precisos, como a modelação batimétrica desenvolvida no Capítulo 3.1, que fornece a base geométrica para o ambiente virtual.

**Integração de Dados Dinâmicos:** Integração contínua de dados operacionais, como os padrões de tráfego analisados no Capítulo 3.2, permitindo atualizações em tempo real do modelo virtual.

**Capacidade Analítica Preditiva:** Utilização de modelos avançados de análise de risco, como desenvolvido no Capítulo 3.3, para prever e prevenir situações potencialmente perigosas.

## **4.2. Aplicações na Gestão Portuária**

### **4.2.1. Modelação do Terreno e Infraestruturas**

A modelação do terreno em ambiente portuário experimentou uma transformação radical através da integração de Digital Twins com SIG. Lecours et al. (2016) explicam como a monitorização batimétrica evoluiu de levantamentos periódicos isolados para um sistema de observação contínua e dinâmica. Esta evolução fundamenta-se na integração de múltiplos sensores e técnicas avançadas de modelação, resultando em representações cada vez mais precisas e detalhadas do ambiente marinho.

O processamento e validação dos dados batimétricos, exigem técnicas específicas de filtragem e interpolação adaptadas às características particulares do ambiente marinho. Oliver & Webster (2014) enfatizam a importância da análise geoestatística neste contexto, propondo métodos robustos para avaliar a qualidade e confiabilidade dos modelos gerados. A validação cruzada e a análise de resíduos tornaram-se elementos fundamentais neste processo, permitindo uma avaliação quantitativa da precisão do modelo.

Wilson et al. (2007) ressaltam a importância crucial dos modelos batimétricos precisos para a segurança da navegação, o planeamento de operações de dragagem e a monitorização de mudanças morfológicas do fundo marinho. A integração destas informações com sistemas de Digital Twins permite uma análise em tempo real das condições submarinas, possibilitando respostas mais rápidas e eficazes a alterações nas condições do fundo marinho.

A evolução recente das tecnologias de aquisição de dados e processamento, conforme documentado por Mayer et al. (2018), tem permitido a criação de modelos cada vez mais detalhados e precisos. A integração de diferentes fontes de dados e técnicas de modelagem resulta em representações mais completas e confiáveis do ambiente marinho, fundamentais para a compreensão dos processos costeiros e a gestão eficiente de infraestruturas portuárias.

Wright & Heyman (2008) identificam desafios importantes que permanecem na modelação digital do terreno em ambientes marinhos. A necessidade de processar grandes volumes de dados, a complexidade dos processos de validação e a

integração de diferentes escalas temporais e espaciais continuam sendo questões que exigem atenção da comunidade científica.

Zhilin. Li et al. (2005) fornecem uma perspectiva fundamental sobre como a Modelação Digital do Terreno revolucionou a análise e representação de superfícies topográficas e batimétricas. A sua pesquisa demonstra a importância desta tecnologia para a compreensão e análise do fundo marinho, especialmente em aplicações portuárias onde a precisão é crucial para a segurança das operações.

#### 4.2.2. Análise e Gestão de Tráfego Marítimo

A análise e gestão de tráfego marítimo representa um dos campos mais transformados pela integração entre Digital Twins e SIG. Esta transformação fundamenta-se numa compreensão mais profunda dos padrões de movimentação e comportamento dos navios, possibilitada pela análise sistemática de dados AIS e a sua integração com outras fontes de informação espacial.

Bellsolà Olba et al. (2019) desenvolveram um estudo abrangente no Porto de Rotterdam que contribui para a nossa compreensão da complexidade do tráfego marítimo. A pesquisa demonstrou que a segurança e eficiência das operações portuárias dependem da interação dinâmica entre múltiplos fatores.

A densidade do tráfego, por exemplo, não pode ser analisada isoladamente, mas deve ser considerada em conjunto com a complexidade das manobras requisitadas em diferentes áreas do porto. Esta complexidade aumenta significativamente em áreas de convergência de rotas ou próximas a terminais especializados, onde diferentes tipos de navios precisam coordenar as suas movimentações.

A contribuição metodológica de Pallotta et al. (2013) foi particularmente significativa para o desenvolvimento de sistemas modernos de gestão de tráfego. Os seus estudos estabeleceram as bases para a análise automatizada de trajetórias marítimas, introduzindo técnicas que permitem identificar padrões normais de movimento e, conseqüentemente, detetar comportamentos anómalos que possam representar riscos à segurança. Esta capacidade de deteção precoce de anomalias tornou-se especialmente valiosa em portos com alto volume de tráfego, onde intervenções rápidas podem prevenir situações potencialmente perigosas.

Rong et al. (2019) aprofundaram o nosso entendimento sobre a complexidade do tráfego marítimo ao desenvolver metodologias automatizadas para análise e avaliação comportamental dos navios. Os seus estudos demonstraram como o volume exponencial de dados de movimento dos navios pode ser processado eficientemente para extrair padrões significativos e informações operacionais relevantes. Esta abordagem sistemática permite não apenas monitorizar o tráfego

em tempo real, mas também desenvolver modelos preditivos que auxiliam na otimização das operações portuárias.

A integração destes estudos com as capacidades dos Digital Twins tem permitido avanços ainda mais significativos. Sistemas modernos podem agora simular diferentes cenários de tráfego em tempo real, considerando não apenas as posições e velocidades dos navios, mas também fatores ambientais como condições meteorológicas e estados de maré. Esta capacidade de simulação dinâmica permite que operadores portuários antecipem potenciais conflitos e implementem medidas preventivas antes que situações críticas se desenvolvam.

A análise espacial do tráfego marítimo também revelou padrões importantes relacionados com a utilização de diferentes áreas portuárias. Através da aplicação de técnicas de análise de densidade, como demonstrado nos estudos do Porto de Sines, foi possível identificar zonas de maior concentração de tráfego e áreas onde diferentes tipos de navios frequentemente interagem. Esta compreensão espacial do tráfego tem se mostrado fundamental para o planeamento de expansões portuárias e para a otimização dos sistemas de auxílio à navegação.

A evolução recente destes sistemas tem beneficiado particularmente da capacidade de integrar dados históricos com análises em tempo real. Esta integração permite que o sistema não apenas responda a situações atuais, mas também antecipe padrões de tráfego futuros com base em tendências históricas. Esta capacidade preditiva tem se mostrado especialmente valiosa na gestão de terminais especializados, onde diferentes tipos de navios precisam compartilhar recursos limitados de forma eficiente.

### 4.2.3. Modelação e Gestão de Risco

A modelação de risco evoluiu significativamente através da integração entre Digital Twins e SIG. Olba et al. (2020) desenvolveram o Índice de Risco Portuário Náutico (NPRI), que representa um avanço significativo na avaliação quantitativa de riscos em ambiente portuário. Este índice inovou ao integrou tanto análises estatísticas de acidentes quanto avaliações multicriteriais, criando uma ferramenta mais abrangente e precisa para a gestão de riscos portuários.

Wang et al. (2014) contribuíram significativamente para este campo ao introduzir o processo de hierarquia analítica fuzzy (FAHP) para avaliação de segurança em rotas marítimas. A sua metodologia permite uma avaliação mais estruturada dos riscos, incorporando sistematicamente as incertezas inerentes ao ambiente marítimo. Quando integrada com Digital Twins, esta abordagem possibilita simulações mais precisas e realistas de diferentes cenários de risco.

Getis & Ord (1992) estabeleceram técnicas fundamentais de análise espacial que melhoraram o entendimento da distribuição de riscos em ambientes portuários. As metodologias, quando aplicadas ao contexto portuário moderno, permitem identificar não apenas áreas de concentração de risco, mas também compreender as relações espaciais que contribuem para estas concentrações. Esta compreensão espacial dos riscos, quando integrada com Digital Twins, permite uma gestão mais dinâmica e proativa da segurança portuária.

Os avanços na modelação de risco têm beneficiado particularmente da capacidade dos Digital Twins de simular múltiplos cenários simultaneamente. Esta capacidade permite que gestores portuários avaliem diferentes estratégias de mitigação antes de sua implementação, reduzindo significativamente o risco de decisões inadequadas. A integração com SIG adiciona uma dimensão espacial crucial a estas simulações, permitindo uma compreensão mais completa do impacto potencial de diferentes decisões operacionais.

## 5. Conclusões e Implicações Práticas

O modelo metodológico proposto, sintetizado na Figura 1, mostrou-se eficiente na integração das diferentes camadas de análise, permitindo um entendimento mais profundo e dinâmico do ambiente portuário. As ligações estabelecidas entre as análises do sistema, conforme ilustrado no diagrama, permitiram a identificação de padrões e relações que não seriam perceptíveis através de análises isoladas.

Este trabalho desenvolveu e implementou uma metodologia integrada para análise da gestão portuária, baseada em Sistemas de Informação Geográfica.

Isso mostrou como as diferentes camadas de análise espacial podem ser combinadas para obter uma compreensão mais profunda e dinâmica do ambiente portuário. A utilização desta metodologia no Porto de Sines não apenas validou a sua eficácia, mas também identificou insights importantes sobre a gestão de portos modernos.

A modelação digital do terreno, base inicial do estudo, estabeleceu uma base quantitativa robusta para a compreensão do ambiente físico portuário.

O modelo batimétrico desenvolvido, com validação estatística através do Índice de Moran ( $I = 0,989868$ ), demonstrou alta precisão na caracterização do fundo marinho. Esta precisão revelou-se fundamental não apenas para a segurança da navegação, mas também para o planeamento estratégico de infraestruturas portuárias. A metodologia de interpolação espacial adotada, baseada na combinação de técnicas IDW e Kriging, permitiu identificar variações significativas de profundidade que impactam diretamente as operações portuárias.

A análise do tráfego marítimo, segunda análise fundamental do estudo, mostrou padrões operacionais complexos que não seriam evidentes através de observações convencionais. O processamento sistemático dos dados AIS, abrangendo mais de 3.700 trajetórias de navios, identificou zonas de concentração de tráfego e potenciais áreas de conflito. Esta análise demonstrou que aproximadamente 21% dos navios se destinam aos portos nacionais (Sines, Setúbal e Lisboa), um dado importante para o planeamento da segurança e eficiência operacional.

A integração destes elementos num modelo de multicritério de identificação de zonas de riscos representa uma contribuição significativa para a gestão portuária moderna.

O modelo desenvolvido, validado através de análises estatísticas espaciais (z-score = 754,815131, p-valor < 0,001), permite uma identificação mais precisa e objetiva de zonas críticas para a segurança da navegação. Esta abordagem quantitativa para avaliação de riscos fornece uma base sólida para decisões operacionais e estratégicas.

As implicações práticas destes resultados são substanciais para a gestão portuária. Primeiro, a metodologia desenvolvida permite uma otimização mais precisa das operações de dragagem, baseada não apenas em dados batimétricos, mas também em padrões reais de utilização do espaço portuário. Segundo, a identificação de zonas de risco possibilita uma alocação mais eficiente de recursos de monitorização e resposta a emergências. Terceiro, a compreensão integrada dos padrões de tráfego e condições físicas permite um planeamento mais efetivo da expansão portuária.

Os resultados obtidos têm aplicações diretas em diferentes aspetos da gestão portuária:

- **Planeamento Operacional:** A identificação precisa de zonas críticas permite ajustes em procedimentos de navegação e alocação de recursos operacionais.
- **Gestão de Infraestrutura:** O modelo batimétrico integrado com análise de tráfego fornece base objetiva para decisões sobre manutenção e expansão de instalações.
- **Segurança da Navegação:** A compreensão das interações entre características físicas e padrões de tráfego permite desenvolvimento de protocolos de segurança mais efetivos.
- **Sustentabilidade Ambiental:** A capacidade de prever e gerir impactos ambientais, melhora através da compreensão integrada do ambiente portuário.

As limitações identificadas no estudo, estão principalmente relacionadas com a natureza estática de algumas análises e à dependência de atualizações periódicas de dados, mas apontam direções promissoras para pesquisas futuras. O desenvolvimento de sistemas mais dinâmicos de monitorização, possivelmente

incorporando dados em tempo real e técnicas de machine learning, representa uma evolução natural da metodologia proposta.

Este trabalho estabelece uma base metodológica sólida para a evolução dos sistemas de gestão portuária.

A abordagem desenvolvida, ao integrar diferentes camadas de análise numa metodologia coesa e estatisticamente robusta, oferece não apenas ferramentas práticas para a gestão atual, mas também um caminho para o desenvolvimento de portos mais eficientes, seguros e sustentáveis.

A metodologia proposta, embora desenvolvida no contexto do Porto de Sines, apresenta potencial significativo de aplicação noutros ambientes portuários, contribuindo para o avanço global das práticas de gestão portuária.

## 6. Bibliografia e Referências

- Aalberg, A. L., Bye, R. J., & Ellevseth, P. R. (2022). Risk factors and navigation accidents: A historical analysis comparing accident-free and accident-prone vessels using indicators from AIS data and vessel databases. *Maritime Transport Research*, 3. <https://doi.org/10.1016/j.martra.2022.100062>
- Anselin, L. (1995a). Local Indicators of Spatial Association—LISA. *Geographical Analysis*, 27(2), 93–115. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x>
- Anselin, L. (1995b). Local Indicators of Spatial Association—LISA. *Geographical Analysis*, 27(2), 93–115. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x>
- Aurenhammer, F., Klein, R., & Lee, D.-T. (2012). *Voronoi Diagrams and Delaunay Triangulations*. WORLD SCIENTIFIC. <https://doi.org/doi:10.1142/8685>
- Batista, T., Carreira, D., & Moutinho, E. (2015). Os SIG na gestão portuária: o caso do porto de Sines. In A. Nieto Masot (Ed.), *APLICACIONES TIG EN EL ANÁLISIS TERRITORIAL – Transferencia a Universidad, Sector Público y Empresas* (pp. 43–54). <http://hdl.handle.net/10174/17534>
- Bellsolà Olba, X., Daamen, W., Vellinga, T., & Hoogendoorn, S. P. (2019). Multi-criteria evaluation of vessel traffic for port assessment: A case study of the Port of Rotterdam. *Case Studies on Transport Policy*, 7(4), 871–881. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2019.07.005>
- Bivand, R. S., Pebesma, E., & Gómez-Rubio, V. (2013). Applied Spatial Data Analysis with R: Second Edition. In *Applied Spatial Data Analysis with R: Second Edition*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7618-4>
- Bolt, E., & Secretariat, I. (2022). *IALA Guideline G1018*.
- EMBANKMENT, A. (2018). *REVISED GUIDELINES FOR FORMAL SAFETY ASSESSMENT (FSA) FOR USE IN THE IMO RULE-MAKING PROCESS*.
- Getis, A., & Ord, J. K. (1992). The Analysis of Spatial Association by Use of Distance Statistics. *Geographical Analysis*, 24(3), 189–206. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1992.tb00261.x>
- Harris, P. T., & Baker, E. K. (2012). Geohab Atlas of Seafloor Geomorphic Features and Benthic Habitats: Synthesis and Lessons Learned. In *Seafloor*

- Geomorphology as Benthic Habitat* (pp. 871–890). Elsevier Inc.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385140-6.00064-5>
- Klar, R., & Angelakis, V. (2023). Standardized and Interoperable Digital Twins. *2023 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking, CSCN 2023*, 382. <https://doi.org/10.1109/CSCN60443.2023.10453189>
- Klar, R., Fredriksson, A., & Angelakis, V. (2023). Digital Twins for Ports: Derived From Smart City and Supply Chain Twinning Experience. *IEEE Access*, *11*, 71777–71799. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3295495>
- Lecours, V., Dolan, M. F. J., Micallef, A., & Lucieer, V. L. (2016). A review of marine geomorphometry, the quantitative study of the seafloor. In *Hydrology and Earth System Sciences* (Vol. 20, Issue 8, pp. 3207–3244). Copernicus GmbH.  
<https://doi.org/10.5194/hess-20-3207-2016>
- Li, J., & Heap, A. D. (2014). Spatial interpolation methods applied in the environmental sciences: A review. In *Environmental Modelling and Software* (Vol. 53, pp. 173–189). <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.12.008>
- Li, Zhilin., Zhu, Qing., & Gold, Chris. (2005). *Digital terrain modeling : principles and methodology*. CRC Press.
- Martorell, S., Soares, C. Guedes., Barnett, J. (Social psychologist), & Society for Risk Analysis. Europe. Meeting (17th : 2008 : Valencia, S. (2009). *Safety, reliability and risk analysis : theory, methods and applications*. CRC Press.
- Mayer, L., Jakobsson, M., Allen, G., Dorschel, B., Falconer, R., Ferrini, V., Lamarche, G., Snaith, H., & Weatherall, P. (2018). The Nippon Foundation-GEBCO seabed 2030 project: The quest to see the world’s oceans completely mapped by 2030. *Geosciences (Switzerland)*, *8*(2). <https://doi.org/10.3390/geosciences8020063>
- Neugebauer, J., Heilig, L., & Voß, S. (2024). Digital Twins in the Context of Seaports and Terminal Facilities. *Flexible Services and Manufacturing Journal*.  
<https://doi.org/10.1007/s10696-023-09515-9>
- Olba, X. B., Daamen, W., Vellinga, T., & Hoogendoorn, S. P. (2020). Risk assessment methodology for vessel traffic in ports by defining the Nautical Port Risk Index. *Journal of Marine Science and Engineering*, *8*(1).  
<https://doi.org/10.3390/JMSE8010010>

- Oliver, M. A., & Webster, R. (2014). A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. In *Catena* (Vol. 113, pp. 56–69). <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.09.006>
- O’Sullivan, David., & Unwin, D. . (2010). *Geographic information analysis*. John Wiley & Sons, Inc.
- Pak, J. Y., Yeo, G. T., Oh, S. W., & Yang, Z. (2015). Port safety evaluation from a captain’s perspective: The Korean experience. *Safety Science*, 72, 172–181. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2014.09.007>
- Pallis, P. L. (2017). Port Risk Management in Container Terminals. *Transportation Research Procedia*, 25, 4411–4421. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.337>
- Pallotta, G., Vespe, M., & Bryan, K. (2013). Vessel pattern knowledge discovery from AIS data: A framework for anomaly detection and route prediction. *Entropy*, 15(6), 2218–2245. <https://doi.org/10.3390/e15062218>
- PIANC. (2014). *Harbour Approach Channels Design Guidelines*. <http://www.pianc.org>
- Rong, H., Teixeira, A. P., & Guedes Soares, C. (2019). Ship trajectory uncertainty prediction based on a Gaussian Process model. *Ocean Engineering*, 182, 499–511. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2019.04.024>
- Silveira, P., Teixeira, A. P., & Guedes Soares, C. (2012). Analysis of maritime traffic off the coast of Portugal. *Maritime Engineering and Technology - Proceedings of 1st International Conference on Maritime Technology and Engineering, MARTECH 2011*, 19–23. <https://doi.org/10.1201/b12726-7>
- Silverman, B. W. (n.d.). *DENSITY ESTIMATION FOR STATISTICS AND DATA ANALYSIS*.
- Tu, E., Zhang, G., Rachmawati, L., Rajabally, E., & Huang, G. Bin. (2018). Exploiting AIS Data for Intelligent Maritime Navigation: A Comprehensive Survey from Data to Methodology. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 19(5), 1559–1582. <https://doi.org/10.1109/TITS.2017.2724551>
- Wang, J., Li, M., Liu, Y., Zhang, H., Zou, W., & Cheng, L. (2014). Safety assessment of shipping routes in the South China Sea based on the fuzzy analytic hierarchy process. *Safety Science*, 62, 46–57. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2013.08.002>

- Wilson, M. F. J., O'Connell, B., Brown, C., Guinan, J. C., & Grehan, A. J. (2007). Multiscale terrain analysis of multibeam bathymetry data for habitat mapping on the continental slope. *Marine Geodesy*, 30(1-2), 3-35. <https://doi.org/10.1080/01490410701295962>
- Wright, D., & Heyman, W. (2008). Introduction to the Special Issue: Marine and Coastal GIS for Geomorphology, Habitat Mapping, and Marine Reserves. *MARINE GEODESY*, 31, 223-230. <https://doi.org/10.1080/01490410802466306>
- Xiao, F., Ligteringen, H., Van Gulijk, C., & Ale, B. (2015). Comparison study on AIS data of ship traffic behavior. *Ocean Engineering*, 95, 84-93. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.11.020>
- Yan, Z., Xiao, Y., Cheng, L., He, R., Ruan, X., Zhou, X., Li, M., & Bin, R. (2020). Exploring AIS data for intelligent maritime routes extraction. *Applied Ocean Research*, 101. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2020.102271>
- Yang, Z., Wang, J., & Li, K. (2013). Maritime safety analysis in retrospect. *Maritime Policy & Management*, 40, 261-277. <https://doi.org/10.1080/03088839.2013.782952>
- Yip, T. L. (2008). Port traffic risks - A study of accidents in Hong Kong waters. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 44(5), 921-931. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2006.09.002>
- Zhou, C., Xu, J., Miller-Hooks, E., Zhou, W., Chen, C. H., Lee, L. H., Chew, E. P., & Li, H. (2021). Analytics with digital-twinning: A decision support system for maintaining a resilient port. *Decision Support Systems*, 143. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2021.113496>
- Zhou, Y., Daamen, W., Vellinga, T., & Hoogendoorn, S. P. (2019). Ship classification based on ship behavior clustering from AIS data. *Ocean Engineering*, 175, 176-187. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.02.005>