

GERENCIAMENTO DE DADOS ESPAÇO-TEMPORAIS HETEROGÊNEOS EM SUPORTE AO PROCESSO DE TOMADA DE DECISÃO¹

Management of heterogeneous spatial-temporal data in support of the decision-making process

Ana Emília de Souza Silva¹ 

Resumo: A integração de dados espaço-temporais caracterizados por multidomínios terrestres, marítimos e atmosféricos em uma estrutura de armazenamento organizada, acessível, consistente e confiável, e que possa apoiar eficientemente o processo de tomada de decisão — que suporte crescimento, flexibilidade e absorção de dados heterogêneos, da qual a informação possa ser extraída com toda a sua integridade — torna-se essencial em aplicações sensíveis, tais como avaliação de cenários, planejamento territorial e até na compreensão do sistema Terra. Apesar da sua importância, a integração de dados espaço-temporais, relacionados ou não, dinâmicos e de amplo espectro, permanece como um desafio, considerando que a construção de um modelo de dados único envolve complexidades como a multidimensionalidade e a heterogeneidade desses dados. A abordagem investigada responde aos principais desafios de integração dos dados espaço-temporais, projeta um modelo conceitual e lógico em um banco de dados orientado por grafos, centrado no tempo e no espaço, e os implementa por meio de uma simulação de aplicação militar. Os resultados alcançados demonstram que o gerenciamento de dados baseado em grafos possui características de alta escalabilidade, alta flexibilidade, baixa manutenibilidade e pouca exigência quanto a recursos computacionais. A abordagem fornece uma nova referência para desenvolvedores na integração de dados espaço-temporais multidomínios, quaisquer que sejam eles.

Palavras-chave: Integração de Dados. Dados Multidimensionais. Modelagem em Grafos. Sistemas de Suporte à Decisão. Simulação de Aplicação Militar Anfíbia.

Abstract: Integration of spatial-temporal data characterized by multidomain terrestrial, maritime and atmospheric storage structure, which is organized, accessible, consistent and reliable, and can efficiently support decision-making processes—supporting growth, flexibility and heterogeneous absorption of equally heterogeneous data, from which information can be extracted in all its integrity—becomes essential in sensitive applications such as scenario analysis, territorial planning, and even understanding the Earth System. Despite its importance, the integration of spatial-temporal data, whether related or not, dynamic, and wide-ranging, remains a challenge, considering that the need to construct a single data model involves complexities such as the multidimensionality and heterogeneity of these data. The investigated approach responds to the main challenges of spatial-temporal data integration, designs conceptual and logical models within a graph-oriented database, centered on time and space, and implements them through a military application simulation. The results demonstrate that graph-based data management has characteristics of high scalability, high flexibility, low maintenance requirements, and low demands on computer resources. The approach provides a new reference for developers when integrating multidomain spatial-temporal data, regardless of the domain.

Keywords: Data Integration. Multidimensional Data. Graph Modeling. Decision Support Systems. Amphibious Military Application Simulation.

¹ Capitão de Corveta (EN). Encarregada da Divisão de Dados Ambientais do Centro de Hidrografia da Marinha, Niterói, RJ – Brasil. E-mail: ana.silva@marinha.mil.br

¹Parte dos resultados deste estudo foi publicada na dissertação da autora (SILVA, 2024).

1. INTRODUÇÃO

Numa era de múltiplas transformações sociais, econômicas e internacionais, com constantes ajustes geopolíticos, percebe-se que vivemos uma grande mudança de paradigmas, em que a incerteza, as relações em redes e a interdependência econômica se fazem cada vez mais presentes e contribuem para diminuir a distância entre as pessoas e os Estados, e, por consequência, tendem a elevar a probabilidade de ocorrência de conflitos. Novos ambientes para a segurança interna e externa se sucedem.

Por outro lado, os fenômenos acima delineados fazem surgir a concretude dos dados geográficos nas ações da guerra, permeando a logística, a inteligência e a estratégia nas componentes de preparo, operações e condução política dos enfrentamentos potenciais ou reais.

Dessa forma, o emprego de dados geoespaciais integrados na rotina operacional das diversas organizações governamentais, civis ou militares é a prática que viabiliza a estratégia e a tomada de decisão em todos os escalões, vindo a ser um novo conjunto de elementos para a nova matriz da modernização bélica, fluida em seus autovalores e autovetores, de modo a prover adaptação, concisão, precisão e sustentação às ações a serem empreendidas nos níveis político, estratégico, operacional e tático.

No que se refere ao Poder Marítimo e, especificamente, ao seu componente militar, à Marinha do Brasil cabe proteger o ativo marítimo nacional constituído pelas Águas Jurisdicionais Brasileiras, compostas pela Amazônia Azul e pelas Águas Interiores, assegurando sua livre utilização.

Em termos de projeção sobre o Poder Nacional, basta citar que o peso da Economia Marítima já se aproxima dos 20% do produto interno bruto. Onde existe relevante importância econômica, também existe inegável importância estratégica.

O poder naval, como parte integrante das Forças Armadas, possui objetivos que visam à segurança e à defesa nacional, bem como, quando necessário, à relativa projeção do poder do país.

O Brasil, por meio do Plano de Levantamento da Plataforma Continental Brasileira (LEPLAC), da Comissão Interministerial para os Recursos do Mar (CIRM), já solicitou o reconhecimento internacional de uma área marítima com a expansão da jurisdição brasileira para cerca de 5,7 milhões de km². Se, por um lado, essa notável extensão da Amazônia Azul representa uma grande vantagem estratégica para o Brasil no Atlântico Sul, por outro, a garantia da soberania nacional na Amazônia Azul requer profundo conhecimento

científico e tecnológico, visando à apropriação desse ambiente para o bem-estar da população, segurança e defesa nacional.

Em um cenário de crescente disputa pelos recursos do mar, evidentes ou subjacentes, a Amazônia Azul pode transformar-se em ameaça latente caso o Brasil não disponha de poder dissuasório que desincentive ambições econômicas e projeção de poder sobre ela. Parâmetros como a profundidade da água e a topografia do leito marinho podem afetar a propagação das ondas sonoras e a eficiência dos sensores submarinos, bem como permitir melhor emprego desses meios.

Assim, a integração de dados de natureza física, biológica, química e temporal constitui pré-requisito fundamental para a inteligência operativa no cenário submarino, facilitando também a aplicação da inteligência artificial na agilização dos processos de tomada de decisão com maior consciência situacional.

A agilização dos processos de tomada de decisão em teatros de operação é crucial para o sucesso de operações militares e humanitárias. Isso envolve a otimização do fluxo de informações, o uso eficiente de tecnologias e a garantia permanente de que os comandantes tenham acesso rápido e preciso aos dados de largo espectro espaço-temporal, integrados e atualizados, necessários à melhor tomada de decisões.

Desse modo, o projeto metodológico delineado neste estudo permite superar os problemas fundamentais de gerenciamento de bancos de dados complexos: a capacidade de armazenamento integrado e gestão de grandes conjuntos de dados espaço-temporais heterogêneos; e a recuperação desses dados baseados no tempo, no espaço e em classes de representação de objetos.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral a proposição de uma abordagem para a integração de dados espaço-temporais heterogêneos, sob a forma vetorial, em um banco de dados (BD) orientado por grafos. Ressaltem-se os seguintes objetivos específicos:

- propor uma nova visão de modelo conceitual para a integração de dados espaço-temporais de multidomínios;
- desenvolver um modelo lógico sob a ótica do modelo conceitual proposto, baseado em grafos;
- realizar a recuperação integrada de dados espaço-temporais heterogêneos segundo as necessidades operacionais de uma simulação de aplicação militar.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. MODELO CONCEITUAL DE REPRESENTAÇÃO INTEGRADA E MODELO LÓGICO ORIENTADO POR GRAFOS

Uma vez identificada a necessidade de um modelo conceitual que atendesse aos desafios da integração de dados — a multidimensionalidade e a heterogeneidade (DING *et al.*, 2022) —, esse modelo deveria contemplar a coexistência de diferentes objetos no mesmo espaço-tempo (WACHOWICZ, 2014) e permitir a absorção de todos os modelos de dados preexistentes. O modelo lógico, por sua vez, deveria projetar as soluções do modelo conceitual e ter um esquema flexível (ZHANG *et al.*, 2023), permitindo adicionar classes de representação de objetos de qualquer modelo de dados, pretéritos ou futuros, a qualquer momento, sem planejamento prévio (BECHBERGER; PERRYMAN, 2020). Dessa forma, assumiu-se a hipótese de que a abordagem mais adequada para a construção do BD fosse orientada por grafos, em vista de sua extrema flexibilidade tanto para conexão quanto para a expansão do modelo lógico de dados, razões pelas quais estão amplamente difundidos nas áreas de Inteligência Artificial e Ciência de Dados, o que os torna potencialmente importantes na área da Inteligência Militar. Silva (2024) apresenta a literatura minudentemente consultada na pesquisa.

3.2. SIMULAÇÃO DE UMA APLICAÇÃO DE UM BANCO DE DADOS ORIENTADO POR GRAFOS

Um cenário decisório pode ser estabelecido de forma investigativa, quando se busca explicar a consequência de um evento pretérito (AHMADUN; WONG; MAT SAID, 2020); preditiva, quando se busca determinar a probabilidade de ocorrência de eventos futuros (LI *et al.*, 2022); e corretiva, quando se constroem, sobre o cenário preexistente, adições ou correções de dados ou informações.

Por isso, foi desenvolvida uma simulação de incursão militar anfíbia para uma determinada Área de Operações, cujo objetivo é prever a melhor trajetória de incursão, partindo do ponto de fundeio de um navio doca (ND) até um ponto objetivo (PO), localizado na porção terrestre do território inimigo, sendo essa simulação orientada por diretrizes preestabelecidas.

Para o cumprimento do objetivo da simulação, o algoritmo apresenta três fases bem definidas, descritas na Figura 1.

A primeira fase refere-se à recuperação de um conjunto de dados do BD orientado por grafos, com limites espaciais e temporais preestabelecidos de uma Área de Operações (caso 1). Em seguida, procede-se à construção dos cenários operacionais representativos de instantes t (CO_t), segundo as necessidades do planejamento que se pretende efetuar (caso 2). Por fim, aplicam-se as diretrizes do planejamento para cada CO_t (caso 3). Dessa forma, a simulação fornecerá uma síntese de parâmetros decisórios (PD) e um mapa operacional (MO_t) para a melhor trajetória de incursão para cada instante t .

Cabe salientar que, para a construção dessa simulação, foram definidas diretrizes de planejamento de forma a viabilizar a conjugação de parâmetros, não havendo, portanto, qualquer ligação com teorias militares de ações de desembarque de forças expedicionárias. Sendo assim, restaram definidas:

- o ponto de fundeio do ND será definido de forma que o tempo total (TT) de incursão, desde o ponto de fundeio do ND até a tomada do PO, seja mínimo, tendo como prerrogativa inicial que a incursão terrestre percorra a menor distância possível;
- a trajetória da incursão pode ocorrer a partir de qualquer direção para o território inimigo;
- o avanço terrestre se dará por meio das vias de transporte cartografadas, que apresentam comportamento semelhante relativo à pluviosidade;

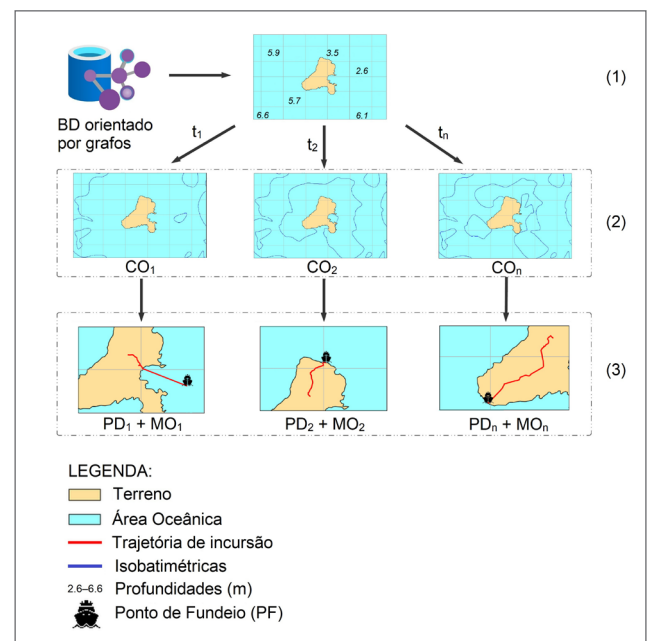


Figura 1. Visão geral das etapas de simulação.

- não será considerado qualquer tipo de defesa;
- a trajetória de incursão será dividida em duas partes, sendo elas a: a marítima, onde será utilizada a Embarcação de Desembarque de Carga Geral (EDCG), e a terrestre, quando ocorre o avanço da tropa em marcha;
- a definição do trajeto de incursão priorizará o desembarque direto na praia;
- as áreas marítimas que ficam cobertas e descobertas pela água do mar, de acordo com o movimento das marés, terão os mesmos tipos de terreno que as vias de transporte e as mesmas condições quanto à pluviosidade.

Nessa simulação, foram definidos os valores dos parâmetros operacionais de entrada: o calado do ND (m), a velocidade média do EDCG (km/h), a velocidade de deslocamento da tropa em função da pluviosidade e a localização do PO.

Com base nas diretrizes de planejamento, identificou-se que a Área de Operações (Figura 1; caso 1) deveria ser definida pelo volume de dados composto pelos seguintes objetos: *sondagem*, referente aos valores da coluna de água reduzidos ao zero hidrográfico; *maré*, previsão da altura estimada da lâmina de água para instantes t ; *precipitação*, volume de chuva médio mensal para uma determinada região; *estradas*, conjunto de arruamentos; *tenças*, característica geológica do fundo marinho; e *terreno*, porção terrestre da superfície da Terra. Nessa etapa, o objeto *maré*, com recorrência aproximada de 6 horas, define os instantes t de construção dos CO_t . Para simplificar a recuperação de dados no BD, o atributo *data_hora* será incluído em todos os objetos.

A segunda etapa, mostrada na Figura 1, caso 2, consiste na construção dos CO_t , preservando o volume original recuperado do BD, mas atualizado para o instante t . Os valores do atributo *sondagem* são ajustados para *sondagem_t*, obtidos pela soma de *sondagem* com *maré_t*. Com esses valores, o algoritmo traça automaticamente as isobatimétricas para as profundidades de 0 m e para o calado do ND, definido como parâmetro de entrada.

A terceira etapa, mostrada na Figura 1, caso 3, aplica as diretrizes do planejamento da incursão militar a cada CO_t . Para cada instante t , a simulação gera a síntese de PD: distância marítima (DM), distância terrestre (DT), TT e MO. O cálculo de TT utiliza os demais parâmetros operacionais de entrada.

3.2.1. Materiais

A simulação foi executada em uma área de operações sintética definida entre os paralelos $-9,45^\circ$ e $-14,24^\circ$ e os

meridianos $-51,08^\circ$ e $-45,74^\circ$, com o parâmetro temporal para 2024, sendo este armazenado sob a forma YYYY-MM-DDTHH:MM:SSZ (ISO 8601). Registros de três modelos de dados foram integrados em um único modelo, seguindo as diretrizes conceituais e lógicas propostas: IHO *Electronic Navigational Chart* (S-101) e IHO *Water Level Information for Surface Navigation* (S-104), ambos derivados do S-100 (IHO, 2025); Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2025); e Especificações Técnicas para a Representação de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-EDGV) (DSG, 2025).

O BD foi implantado no Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados (SGBD) *Open Source ArangoDB*, selecionado por oferecer recursos suficientes sem que suas limitações comprometessem os objetivos deste trabalho. Detalhes sobre o ArangoDB podem ser encontrados em Silva (2024). Nessa área, o volume de dados recuperado totalizou 7.607 registros, dos quais 1.414 correspondem à *maré*, com valores entre $-0,4$ a $6,6$ m. A simulação foi executada duas vezes, considerando ND de 3 m e 7 m. Os valores dos demais parâmetros operacionais de entrada, os dados de construção do BD, os códigos-fonte e os resultados das simulações estão disponíveis em Silva (2025).

4. RESULTADOS

4.1. MODELO CONCEITUAL E LÓGICO DA REPRESENTAÇÃO INTEGRADA

A solução proposta para os desafios técnicos da integração de dados espaço-temporais, em conformidade com as condições iniciais, é apresentada na Figura 2. À esquerda, encontra-se o modelo conceitual de representação integrada e, à direita, o modelo lógico orientado por grafos.

O modelo conceitual propõe uma estrutura básica composta por classificações intermediárias, organizadas da semântica mais ampla à mais específica, formando uma hierarquia de classes. Essa base absorve as classes de representação de objetos de outros modelos de dados por meio de sua reorganização na hierarquia de classes (Figura 2, à esquerda). Além disso, nesse modelo conceitual, os registros de objetos que compartilham o mesmo x , y , z e t são armazenados em conjunto, independentemente do domínio de aplicação ou do modelo de dados de origem.

A Figura 2, à direita, apresenta a proposta do modelo lógico orientado por grafos em um diagrama de classes UML (*Unified Modeling Language*), com o mínimo de classes necessárias para refletir o modelo conceitual. De forma intuitiva, um grafo é uma teia de dados relacionados direta ou indiretamente. Seus elementos, nós e arestas, possuem semântica e agrupam registros com o mesmo contexto. Cada classe UML representa um nó com atributos próprios e, cada relação, uma aresta direcionada. Silva (2024) apresenta uma descrição detalhada dos modelos conceitual e lógico, assim como o processo de construção, implementação e realização de consultas no BD.

4.2. SIMULAÇÃO DE UMA APLICAÇÃO DE UM BANCO DE DADOS ORIENTADO POR GRAFOS

A simulação começa com a recuperação, no BD, dos registros de objetos contidos na Área de Operações definida. Os registros dos objetos *sondagem* e *tença* correspondem às classes de representação de objetos soundings e seabedArea da S-101; *maré* à classe waterLevel da S-104; *precipitação* à classe homônima do INMET; e *terreno* e *estrada* às classes pais e via_deslocamento da ET-EDGV. A Figura 3 apresenta uma

amostra dos dados espaço-temporais, com a disposição de nós e arestas resultante da integração dos três modelos de dados.

Para cada calado do ND (3 m e 7 m), foram construídos 1.414 CO_t entre 2024-01-01T03:58:00Z e 2024-12-31T19:21:00Z. Para cada CO_t foi calculada a melhor trajetória de incursão, resultando em 1.414 PD_t e 1.414 MO_t por calado.

Em síntese, os resultados encontrados nas simulações apresentaram diferenças esperadas e incontestáveis. Os resultados das duas simulações na mesma área de operações variam abruptamente com mudanças nos parâmetros operacionais, como o calado, e nos parâmetros ambientais, como a *pluviosidade*, que afeta diretamente a velocidade da tropa, e a *maré*, que condiciona a distância máxima de aproximação do ND ao território inimigo. A Figura 4 apresenta a influência do parâmetro ambiental *maré*. Como a *maré* atinge valores de até 6,6 m, o calado de 7 m limitou a aproximação do ND, restringindo-a a uma única direção (Leste) em todo o período analisado (Figura 4, superior), em razão dos valores e da distribuição das sondagens na Área de Operações. Já o calado de 3 m ofereceu maior vantagem operacional, permitindo incursões originadas do ND em seis direções distintas,

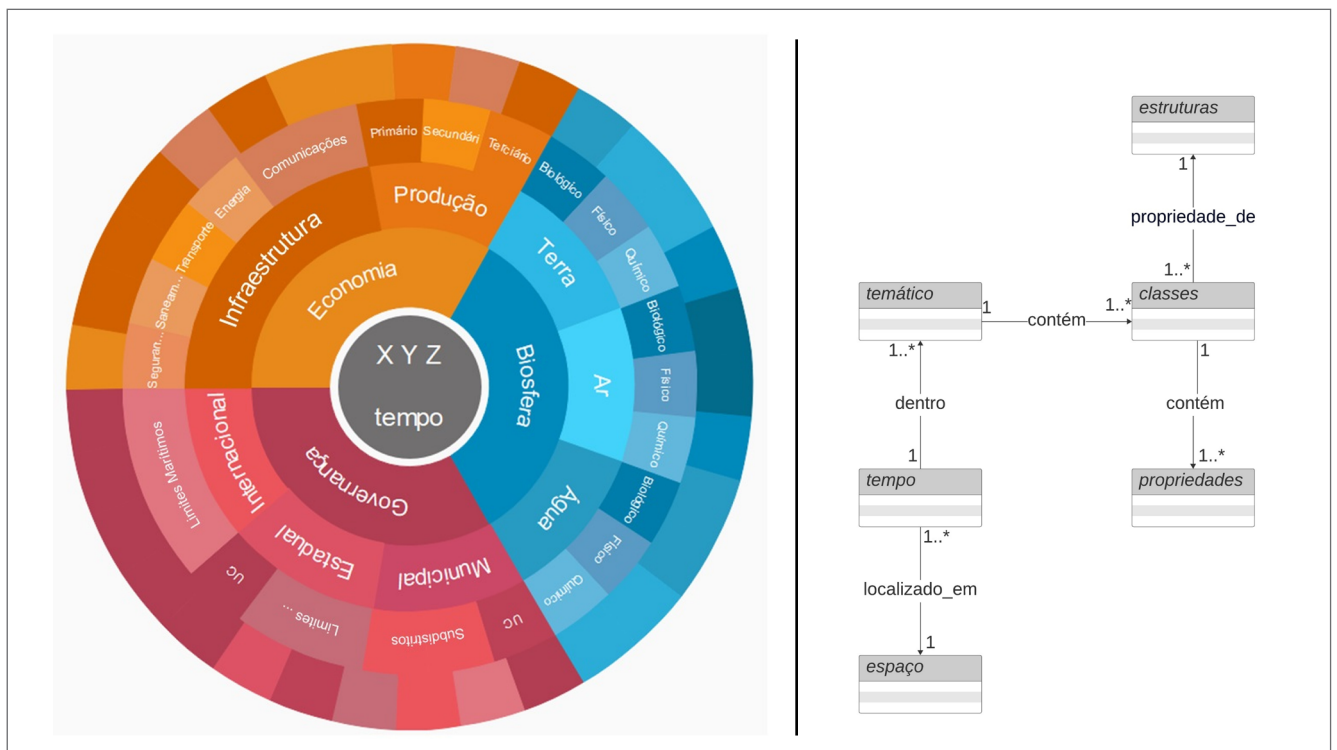


Figura 2. À esquerda, visão geral do modelo conceitual de representação integrada; à direita, o modelo lógico de referência correspondente. Fonte: Silva (2024).

ao menos uma por quadrante. Nesse caso, todos os CO_t com *maré* ≥ 0,4 m possibilitaram trajetórias que desembarcavam as tropas diretamente na praia, dispensando o uso do EDGV.

Os inúmeros resultados dos PD_t podem ser resumidos em um gráfico, permitindo que o tomador de decisão identifi- que rapidamente TT máximos, mínimos e médios, com suas

frequências mensais, para os calados investigados. Por exem- plo, nas simulações executadas, o menor TT é de 89 minu- tos (calado de 3 m, 50% dos dias de setembro a novembro) e de 192 minutos (calado de 7 m, ≥96% dos dias). Com essa referência de tolerância, é possível analisar os demais PD, DT, DM, trajetória de incursão e MO, assim como realizar

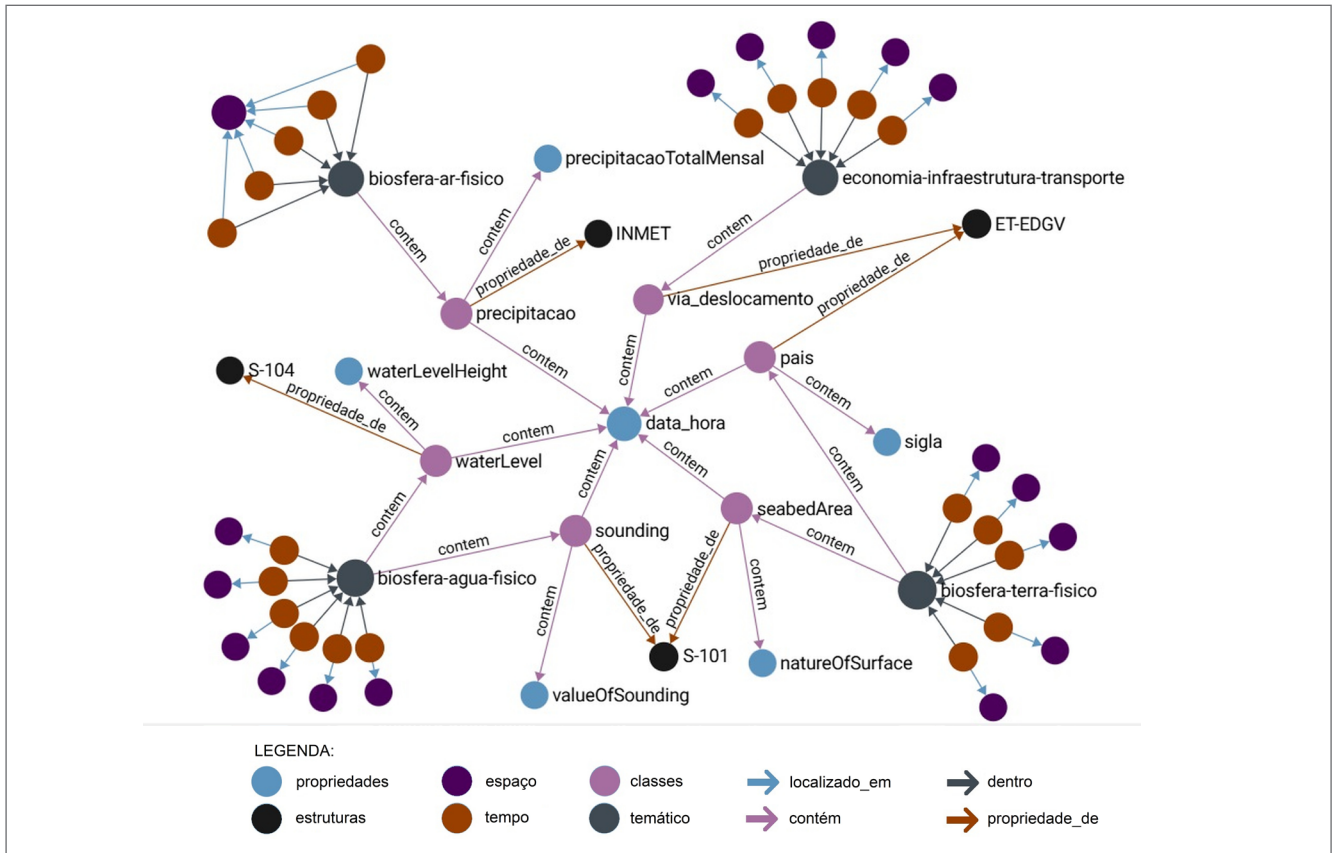


Figura 3. Amostra do grafo recuperado do banco de dados.

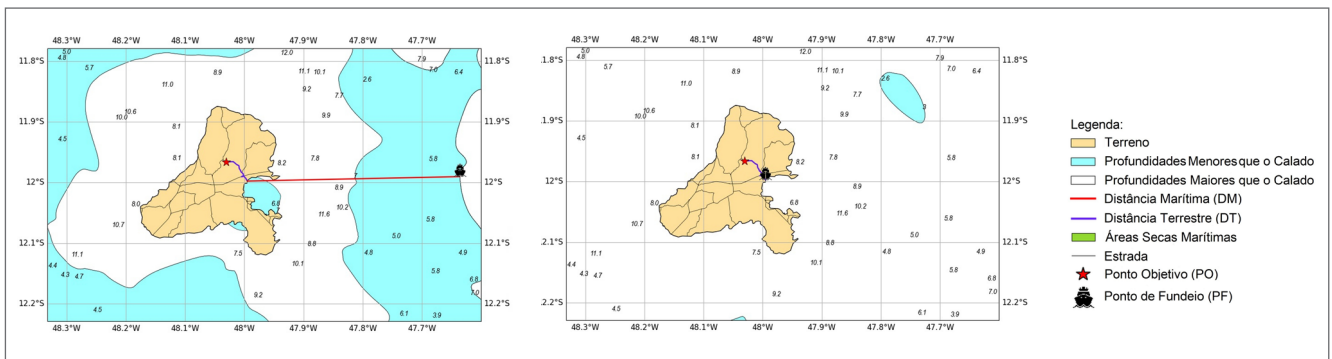


Figura 4. Comparação dos mapas operacionais (MO) para o mesmo t = 2024-09-19T07-30-00Z e maré = 6,6 m; MO superior, calado de 7 m; MO inferior, calado de 3 m.

novas simulações alterando parâmetros operacionais iniciais, como a disponibilidade de meios flutuantes, e/ou parâmetros ambientais, como a repetição da simulação com previsões meteorológicas de curto prazo. Os demais resultados obtidos nas simulações estão disponíveis em Silva (2025).

5. CONCLUSÃO

A integração de dados espaço-temporais heterogêneos mostrou-se viável por meio dos modelos conceitual e lógico

de representação integrada. A simulação de operação militar comprovou sua aplicabilidade.

Ambos os modelos mostraram-se flexíveis, permitindo a integração contínua de dados espaço-temporais, somente alcançável sob o paradigma de orientação por grafos. Além disso, foram constatadas as premissas iniciais de baixa manutenibilidade, alta integridade e alta escalabilidade, ao mesmo tempo em que se reduz significativamente a necessidade de recursos computacionais, porém sem nenhum tipo de desenvolvimento adicional, como módulos, APIs (*Application Programming Interface*) e *frameworks*.

REFERÊNCIAS

- AHMADUN, F.; WONG, M. M. R.; MAT SAID, A. Consequences of the 2004 Indian Ocean Tsunami in Malaysia. *Safety Science*, v. 121, p. 619-631, 1º jan. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.05.016>
- BECHBERGER, D.; PERRYMAN, J. *Graph databases in action*. Shelter Island, New York: Manning, 2020.
- DING, Y. *et al.* Integrated data-model-knowledge representation for natural resource entities. *International Journal of Digital Earth*, v. 15, n. 1, p. 653-678, 31 dez. 2022. <https://doi.org/10.1080/17538947.2022.2047802>
- DSG. *Especificação Técnica para Estruturação de Dados Geoespaciais Vetoriais*. Disponível em: <https://geoportal.eb.mil.br/portal/index.php/normas/et-edgv>. Acesso em: 24 ago. 2025.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). *Dados históricos*. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>. Acesso em: 15 ago. 2025.
- INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION (IHO). *Standardization of Maritime Activities*. Disponível em: <https://iho.int/en/iho-publications>. Acesso em: 15 ago. 2025.
- LI, H. *et al.* Integrated representation of geospatial data, model, and knowledge for digital twin railway. *International Journal of Digital Earth*, v. 15, n. 1, p. 1657-1675, 31 dez. 2022. <https://doi.org/10.1080/17538947.2022.2127949>
- SILVA, A. E. S. *Gerenciamento de dados espaço-temporais, terrestres, marítimos e atmosféricos, baseado em grafos*. Dissertação (Mestrado) - Diretoria de Hidrografia e Navegação, 2024.
- SILVA, A. E. S. *anasilva-code/Data-Code*. 23 jun. 2025. Disponível em: <https://github.com/anasilva-code/Data-Code>. Acesso em: 16 ago. 2025.
- WACHOWICZ, M. *Object-Oriented Design for Temporal GIS*. Londres: CRC Press, 2014.
- ZHANG, C. *et al.* A graph-based approach for representing addresses in geocoding. *Computers, Environment and Urban Systems*, v. 100, p. 101937, 1º mar. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2022.101937>