



## Unificação das Referências Verticais na Zona Costeira: Uma Revisão Abrangente para a Gestão da Amazônia Azul

### *Unification of Vertical References in the Coastal Zone: A Comprehensive Review for Blue Amazon Management*

Salomão Soares <sup>1</sup> e Regiane Dalazoana <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil. E-mail. [salomao.soares@ufpr.br](mailto:salomao.soares@ufpr.br).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4826-776X>

<sup>2</sup> Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil. E-mail. [regiane@ufpr.br](mailto:regiane@ufpr.br).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5468-0679>

Recebido: 11.2025 | Aceito: 04.2026

**Resumo:** Neste artigo de revisão, discute-se o desafio estratégico de unificar dados topográficos e batimétricos em um modelo contínuo, condição essencial para a gestão dos 5,7 milhões de km<sup>2</sup> da Amazônia Azul e para o desenvolvimento da zona costeira brasileira. A complexidade desta integração reside na natureza dinâmica de múltiplas referências verticais que variam no tempo e no espaço. Demonstra-se que a tradicional conexão via marégrafos ou a determinação de Modelos de Separação (SEP) apresenta limitações em escala nacional. Além disso, as tecnologias convencionais de altimetria por satélite e a modelagem do geóide apresentam uma severa lacuna observacional na interface oceano-continente. Sendo assim, a Topografia do Nível Médio do Mar é fundamental para a unificação das referências verticais na zona costeira; porém, a sua determinação rigorosa ainda enfrenta barreiras indissociáveis nas esferas técnico-científicas e operacionais. Experiências internacionais evidenciam a necessidade de uma transição para abordagens interdisciplinares. Conclui-se que a superação da lacuna observacional costeira no Brasil exige o abandono de interpolações determinísticas em prol de técnicas estocásticas, acopladas a modelos hidrodinâmicos e geoidais de alta resolução, alinhando o país às diretrizes do Sistema de Referência Internacional de Altitudes (IHRS) para garantir a gestão eficiente e soberana do seu território costeiro e marítimo.

**Palavras-chave:** *Data* Verticais. Topografia do Nível Médio do Mar. Amazônia Azul.

**Abstract:** This review article discusses the strategic challenge of unifying topographic and bathymetric data into a continuous model, an essential condition for managing the 5.7 million km<sup>2</sup> of the Blue Amazon and for the development of the Brazilian coastal zone. The complexity of this integration lies in the dynamic nature of multiple vertical datums that vary over time and space. It is demonstrated that the traditional connection via tide gauges or the determination of Separation Models (SEP) presents limitations at the national scale. Furthermore, conventional satellite altimetry technologies and geoid modeling reveal a significant coastal observational gap at the ocean-continent interface. Therefore, the Sea Surface Topography is fundamental for the unification of vertical references in the coastal zone; however, its rigorous determination still faces inseparable barriers in both technical-scientific and operational spheres. International experiences highlight the need for a transition to interdisciplinary approaches. It is concluded that overcoming the coastal observational gap in Brazil requires abandoning deterministic interpolations in favor of stochastic techniques, coupled with high-resolution hydrodynamic and geoidal models, aligning the country with the guidelines of the International Height Reference System (IHRS) to ensure efficient and sovereign management of its coastal and maritime territory.

**Keywords:** Vertical *Data*. Sea Surface Topography. Blue Amazon.

## 1 INTRODUÇÃO

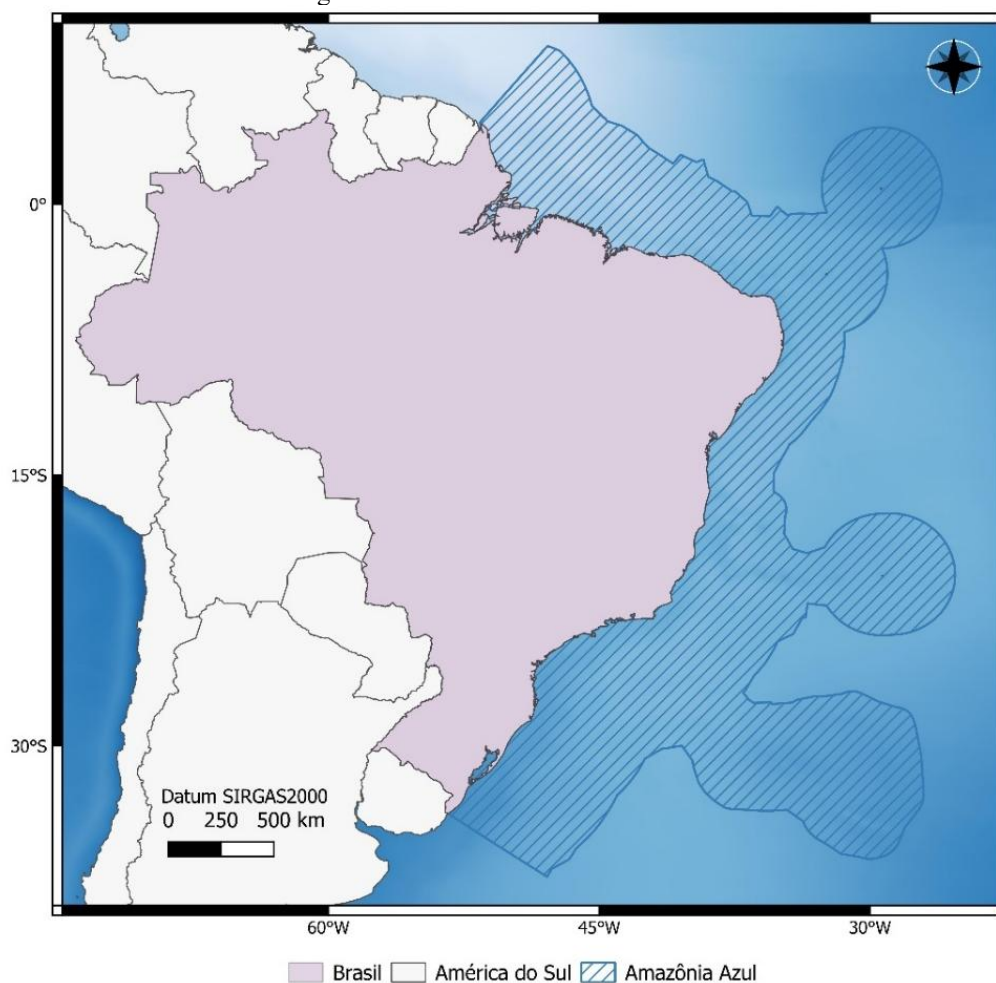
As cartografias terrestre e marítima desenvolveram-se de maneira independente, resultando em um conjunto heterogêneo de dados referenciados a diferentes *data* verticais (ou seja, superfícies de referência utilizadas para medir altitudes e profundidades) (FIG, 2006; 2014). Segundo as Nações Unidas (2019), um modelo integrado e contínuo das áreas terrestres e submersas é essencial para promover o desenvolvimento

sustentável das regiões costeiras. A compreensão sistêmica das elevações e das profundidades (altitudes e batimetrias) facilita a identificação de locais adequados para o desenvolvimento de atividades humanas e aprofunda o entendimento de fenômenos físicos, ecossistemas, além de apoiar a gestão dos oceanos e dos recursos marinhos (Filmer et al., 2024). Tecnologias cada vez mais precisas impulsionam a demanda por soluções rápidas e confiáveis. Assim, a conexão entre diferentes conjuntos de dados, referenciados a distintos pontos ao longo da fronteira costeira (ou seja, pontos de referência utilizados para posicionamento e cálculos), torna-se essencial para atender a requisitos industriais e científicos (Slobbe et al., 2013).

Em 2019, o Comitê de Especialistas em Gestão de Informações Geoespaciais Globais das Nações Unidas (UN-GGIM) elegeu 'Elevação e Profundidade' como um dos seus 14 dados geoespaciais fundamentais (Nações Unidas, 2019), ressaltando a urgência de desenvolver modelos integrados que descrevam, de forma unificada, as superfícies terrestres e submersas. A integração oceano-continente, além de uma necessidade cartográfica, é um pilar para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030, desempenhando um papel crítico no planejamento de cidades costeiras resilientes (ODS 11), na mitigação das mudanças climáticas globais (ODS 13) e na conservação e no uso sustentável dos recursos marinhos (ODS 14).

Segundo o IBGE (2022), mais de 50% da população brasileira vive a menos de 150 km da zona costeira (ZC), que se estende por mais de 8.500 km ao longo de 17 estados e 463 municípios. Essa faixa litorânea abriga uma intensa concentração de atividades econômicas e sociais, como cidades e áreas urbanas, portos, indústrias, turismo, pesca, aquicultura e geração de energia (MMA, 2018). Por meio do Plano de Levantamento da Plataforma Continental Brasileira (LEPLAC), o Brasil expandiu sua jurisdição marítima para aproximadamente 5,7 milhões de km<sup>2</sup>, consolidando a chamada Amazônia Azul. A Figura 1 apresenta o limite atual da Amazônia Azul (IBGE, 2024) e a parte marítima é representada pelo modelo DTU25MSS (Andersen & Nilsson, 2025).

Figura 1 – Limite da Amazônia Azul.



Elaboração: Os autores (2026).

A gestão da Amazônia Azul exige coordenação científica, política e tecnológica. Do ponto de vista ambiental, destacam-se problemas como a poluição marinha, a sobrepesca e os impactos das mudanças climáticas. A elevação do nível do mar e a acidificação dos oceanos ameaçam recifes e manguezais (MMA, 2018; IOC–UNESCO, 2024). A segurança energética e a exploração de recursos naturais geram dilemas, sobretudo devido à expansão de atividades em alto-mar e à necessidade de equilibrar desenvolvimento e conservação. A recente autorização de pesquisa para perfurações marítimas na bacia da Foz do Amazonas ilustra esse cenário (IBAMA, 2025). Trata-se de uma região estratégica, por onde circulam mais de 95% do comércio exterior brasileiro e que responde por cerca de 95% da produção nacional de petróleo. Isso indica a necessidade de investimentos em monitoramento, patrulhamento e infraestrutura científica para garantir a soberania e o uso sustentável (Marinha do Brasil, 2023).

No âmbito institucional, a fragmentação de políticas públicas e a interrupção de iniciativas estratégicas prejudicaram a integração de dados, especialmente por terem, em 2019, extinguido colegiados, o que paralisou a Comissão Nacional de Cartografia (CONCAR) e seus comitês, inclusive o Comitê de Integração das Componentes Verticais Terrestres e Marítimas (CICVTM). Essas ações interromperam a integração de dados e de referenciais geodésicos entre o continente e o oceano (MMA, 2018; Decreto nº 9.759, 2019). A ausência de dados oceanográficos e geodésicos contínuos, bem como de uma rede nacional de altimetria costeira, compromete a capacidade de modelagem e de previsão (Silva et al., 2024; Santana, 2024). Contudo, a criação da Comissão Nacional de Geoinformação (CONGEO) em 2025 marca a reestruturação e o fortalecimento da governança da geoinformação (Portaria GM/MPO nº 32, 2025).

Nesse contexto de retomada institucional e de busca por soluções técnicas, torna-se evidente a necessidade de aprimorar a integração entre os referenciais terrestres e marítimos. A vinculação tradicional, baseada em estações maregráficas, não oferece a resolução espacial nem a integração necessária, pois sua mera interpolação, sem considerar efeitos hidrodinâmicos, é limitada (Luz, 2016). A definição e conexão entre *Data Verticais*, integrando oceano e continente, apresentam complexidades, dadas as variações dos referenciais verticais em função do contexto de definição (Wöppelmann et al., 2006). O aprimoramento das estratégias de integração é crucial para superar esses desafios.

A Topografia do Nível Médio do Mar (TNMM), conhecida como Topografia Dinâmica Média (*Mean Dynamic Topography – MDT*) na oceanografia e como Topografia da Superfície do Mar (*Sea Surface Topography – SSTop*) na geodésia, desempenha um papel fundamental na integração de referenciais verticais em zonas costeiras (Heck & Rummel, 1990). A TNMM é determinada usando altimetria por satélite (ALTSAT) e modelos geoidais, sendo definida como a diferença entre a superfície média do mar (*Mean Sea Surface – MSS*) e o geóide, e incorpora efeitos hidrodinâmicos, como correntes (movimentações de grandes massas de água), temperatura e salinidade. Por apresentar superfície contínua e de alta resolução, a TNMM permite extrapolar o nível médio do mar para áreas sem estações maregráficas, tornando-se uma alternativa robusta de vinculação vertical oceano-continente (Santana & Dalazoana, 2022; Souza, Dalazoana & Santana, 2025).

Ademais, a TNMM também é útil em estudos de circulação oceânica e modelagem climática, possibilitando aprofundar o conhecimento sobre fenômenos como o *El Niño* e a *La Niña* (Dong et al., 2025). Para a oceanografia operacional, voltada à gestão da Amazônia Azul, a TNMM pode ser utilizada em sistemas de previsão oceânica para monitorar e prever correntes, marés e a variabilidade da circulação oceânica (Mulet et al., 2021; AVISO, 2025). Estimativas da TNMM, derivadas de observações de satélite e de medições costeiras, já são utilizadas para validar e melhorar a precisão de modelos de circulação oceânica de alta resolução (Tang et al., 2025).

Porém, a determinação precisa da TNMM na ZC apresenta desafios consideráveis para a ALTSAT convencional. A contaminação do sinal na proximidade da terra, dentro da "pegada" (área coberta pelo sensor, também chamada "*footprint*"), e as correções aplicadas, como as de maré e as atmosféricas, introduzem maiores incertezas nessa área (Bosch, 2002; Andersen & Scharroo, 2011; Filmer et al., 2018). Isso compromete a qualidade dos modelos MSS e das anomalias de gravidade obtidas por altimetria, utilizadas como insumo para a geração de modelos geoidais (Guo et al., 2025). Já os modelos geoidais também apresentam problemas próximos à costa, devido à cobertura muitas vezes inadequada de dados gravimétricos terrestres, marinhos e aéreos, e a erros de omissão decorrentes da sua resolução espacial limitada, proveniente de sensores orbitais

(Mazloff et al., 2014; Ribeiro et al., 2022).

O avanço recente das missões altimétricas SAR, impulsionado pela chegada do satélite SWOT, eleva as expectativas de melhoria dos produtos derivados da ALTSAT (Nilsson et al., 2025). Apesar disso, ainda persiste uma lacuna observacional decorrente da ausência ou da degradação das observações, sobretudo em áreas rasas e com batimetria complexa, nas quais a acurácia pode ser significativamente reduzida (Slobbe et al., 2013; Birol et al., 2025).

Diante dos avanços tecnológicos e metodológicos recentes em Geodésia Costeira, este artigo tem como objetivo atualizar e expandir discussões já iniciadas. Revisitamos as bases estabelecidas por Santana et al. (2020) sobre Modelos de Separação (SEP) e por Santana e Dalazoana (2020), relativas à integração dos referenciais verticais terrestres e oceânicos. Ao atualizar o estado da arte, identificamos complexidades e barreiras metodológicas na correlação entre os níveis de referência na ZC brasileira. Apresentamos as referências verticais usuais e aprofundamos as relações entre os componentes geométricos, físicos e marítimos. Analisamos novas estratégias para determinar a TNMM e destacamos as atualizações internacionais. Evidenciamos a transição da modelagem costeira para abordagens interdisciplinares, que integram os campos da gravidade, da hidrodinâmica e de técnicas estocásticas avançadas. Por fim, traçamos caminhos para que o Brasil estabeleça um Sistema de Referência Vertical Unificado, contínuo e alinhado ao IHRF, para gerir adequadamente a Amazônia Azul.

## 2 REFERÊNCIAS VERTICAIS PARA ALTITUDES E PROFUNDIDADES

As referências verticais são superfícies adotadas como origem ou base para medição de altitudes e profundidades. Elas podem variar na ZC, conforme a finalidade. São fundamentais para garantir consistência na representação da elevação dos pontos sobre o continente e das profundidades no oceano. A seguir, apresenta-se um panorama geral das principais referências verticais utilizadas na ZC.

### 2.1 Data verticais brasileiros e a rede de nivelamento

O desenvolvimento dos sistemas de altitudes terrestres no Brasil, assim como nas redes altimétricas de outras nações com bordas oceânicas, baseou-se no nível médio do mar (NMM) (*Mean Sea Level – MSL*). O Brasil conta com dois *data* verticais que servem como origens do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB). Eles são representados pelo NMM, determinado a partir das médias anuais do Porto de Imbituba, em Santa Catarina, entre 1949 e 1957, e do Porto de Santana, no Amapá, entre 1957 e 1958 (IBGE, 2019).

Esta concepção clássica considerava o NMM, livre de perturbações, como a referência teórica que melhor se ajustava ao geóide e, assim, era adotado como referência vertical terrestre. Entretanto, sabendo-se que o nível do mar está em constante movimento, obras de engenharia em regiões costeiras precisam estar conectadas à rede altimétrica oficial do país e, mais ainda, precisam conhecer a relação entre o NMM local atual e o *datum* vertical terrestre (IBGE, 2009).

Antes do ajustamento da rede altimétrica com número geopotencial, ocorrido em 2018, havia uma distribuição deficiente de observações gravimétricas, o que inviabilizava o cálculo das respectivas diferenças de geopotencial, necessárias à obtenção de altitudes com significado físico (IBGE, 2019). Assim, historicamente, optou-se pela disponibilização de altitudes normais-ortométricas, às quais os desníveis brutos medidos em campo eram aplicados uma correção pelo não paralelismo das equipotenciais (LUZ, 2008). Atualmente, o SGB utiliza a altitude normal de Molodensky, aplicando-se a gravidade real no cálculo das diferenças de potencial e a gravidade média normal na obtenção da altitude (IBGE, 2019). Pontua-se que, devido à obtenção do número geopotencial basear-se em nivelamento geométrico, que depende de uma referência, permanece um efeito sistemático associado ao *datum* utilizado (o chamado *offset do datum*). Isso significa que qualquer variação temporal não modelada no NMM definido como origem afeta sistematicamente toda a rede de nivelamento propagada para o interior.

Outras questões a serem consideradas são a evolução temporal e a existência dessa rede de nivelamento, iniciada em 1945. Até 1990, o valor de  $4mm\sqrt{km}$  foi utilizado para o controle da qualidade do fechamento das seções e, após esse período, foi alterado para  $3mm\sqrt{km}$ , passando a ser a técnica de verificação de abalo o critério mínimo para a densificação (IBGE, 2017). Porém, em estudo recente sobre o

controle geodésico da estação maregráfica de Imbituba, Santos, Soares & Klein (2022) apontaram uma taxa média da variação vertical das referências de nível (RRNN) na região de  $-0,17 \text{ mm/a}$ . Ou seja, com o passar dos anos, a verificação de abalo torna-se uma atividade cada vez mais complexa. Quanto à existência da rede, não é raro ter dificuldades em encontrar essas RRNN em bom estado. Soares, Dalazoana & Araki (2025) identificaram que 49,6 % das RRNN que compõem a rede de nivelamento estavam destruídas ou não foram encontradas, de acordo com o Banco de Dados Geodésicos (BDG). Além disso, das RRNN classificadas em bom estado, com alta prioridade de verificação da realidade física, 86% não eram visitadas há mais de 20 anos.

## 2.2 Altitudes físicas ( $H$ ) e o Sistema de Referência Internacional de Altitudes (*International Height Reference System – IHRS*)

Os conceitos de altitude física baseiam-se comumente no campo de gravidade quase estacionário da Terra, por meio do número geopotencial ( $C$ ) de um ponto  $P$ , definido como a diferença entre o potencial da gravidade na superfície de referência ( $W_0$ ) e no ponto considerado ( $W_P$ ). Vários sistemas métricos de altitude, usados como sistemas nacionais, podem ser derivados dessa relação, sendo os mais comuns a altitude ortométrica de Helmert, a normal de Molodensky e a normal-ortométrica. Para mais detalhes sobre esses tipos de altitudes físicas, consulte Heiskanen e Moritz (1967); Freitas e Blitzkow (1999); Sánchez (2002); Luz (2008); IBGE (2019).

Para sua realização prática, esses sistemas de altitude física exigem a materialização de um *datum* vertical que sirva como a superfície de referência ( $W_0$ ). Historicamente, essa materialização foi alcançada por meio da determinação clássica do *datum* vertical, que estabeleceu o NMM como a superfície que melhor representa uma equipotencial global. Esta serviu de base para a implantação de redes de controle vertical nos países.

Entretanto, atualmente, sabe-se que fatores como correntes oceânicas, temperatura, salinidade e ventos fazem com que o NMM varie de um local a outro. Como resultado, o "zero" de um país não corresponde ao "zero" de outro (Sánchez & Sideris, 2017). Sendo assim, essas superfícies de referência locais apenas se aproximam do geoide devido ao efeito da TNMM e às anomalias locais do nível do mar, com desvios que podem atingir  $\pm 2 \text{ m}$  (Torge & Müller, 2012; Sánchez & Sideris, 2017). Somam-se a isso as limitações do método clássico de nivelamento geométrico que, apesar de sua altíssima precisão local, está sujeito a erros sistemáticos em larga escala. Trata-se de um procedimento moroso e de alto custo, restrito a áreas continentais conectadas e incapaz de conectar oceanos (Heck, 2004).

A geodésia contemporânea busca estabelecer sistemas globais de referência que integrem, com alta precisão, parâmetros geométricos e físicos da Terra (Sánchez et al., 2021). Apesar dos avanços já obtidos nos sistemas geodésicos celestes e terrestres, a ausência de um referencial vertical unificado global persistiu até a adoção do IHRS pela Associação Internacional de Geodésia (*International Association of Geodesy – IAG*) em 2015 (Drewes et al., 2016).

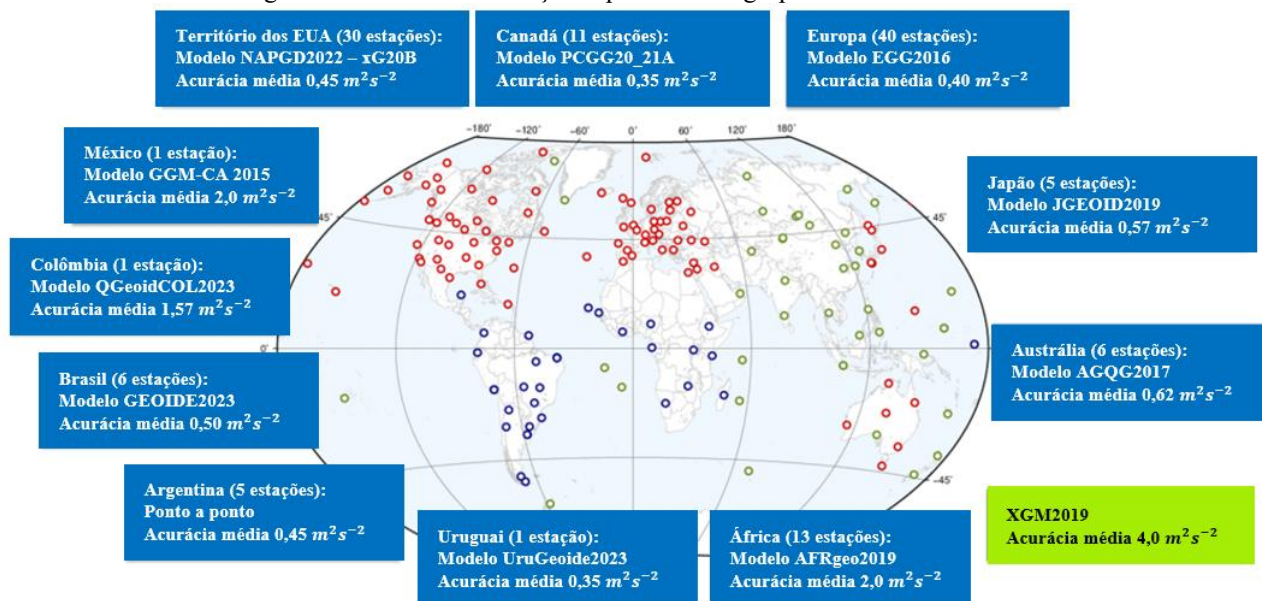
A implementação prática desse sistema, denominado Rede Internacional de Referência de Altitudes (*International Height Reference Frame – IHRF*), visa fornecer coordenadas físicas consistentes em todo o mundo. A IAG convencionou o  $W_0$  em  $62.636.853,4 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ , com erro formal de  $\pm 0,02 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ , como o valor do potencial de referência para o IHRS/IHRF, ou seja, o geoide global. A meta atual é determinar valores estáticos com precisão de  $\pm 0,1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$  (equivalente a  $\pm 1 \text{ cm}$ ) (Sánchez & Sideris, 2017; Sánchez et al., 2021).

O IHRS/IHRF promove a unificação de *data* verticais locais e garante a consistência em aplicações geodésicas e oceanográficas. No entanto, a materialização desse sistema global enfrenta um obstáculo significativo: a grande disparidade na densidade e na qualidade dos dados essenciais entre os países. Modelos Globais do Geopotencial (MGGs), como o EGM2008 ou o XGM2019e, oferecem a componente de longo comprimento de onda, mas carecem de resolução espacial adequada. Assim, para alcançar a precisão centimétrica, a determinação do potencial deve basear-se na integração dos MGGs com dados gravimétricos terrestres, marinhos e aéreos, gerando modelos regionais de alta precisão (Ribeiro et al., 2022). Um exemplo desse esforço nacional para superar essas deficiências é o projeto estadunidense GRAV-D (NOAA, 2023).

Atualmente, a estratégia global baseia-se na padronização flexível (Huang & Ågren, 2024), com foco em regiões com dados esparsos (como partes do Brasil), visando melhorar a coleta de dados para resolver o Problema de Valor de Contorno da Geodésia (PVCG) (Vergos et al., 2024). A Figura 2 apresenta os resultados

obtidos por diversos grupos de estudo envolvidos na determinação do IHRF.

Figura 2 – Resultados alcançados por diversos grupos de estudos do IHRF.



Fonte: Adaptada de Sánchez et al. (2024).

De acordo com Sánchez et al. (2024), a primeira solução para o IHRF foi concluída, alcançando precisão de 3 a 40 cm nos números geopotenciais. A publicação de metadados e coordenadas geométricas e de potencial estará disponível no site do Centro de Coordenação do IHRF (<https://ihrfcc.topo.auth.gr/>), responsável por garantir a sustentabilidade a longo prazo do IHRF/IHRF. Ainda de acordo com os autores, uma próxima solução para o IHRF será determinada, considerando novas estações, novos dados de gravidade, melhores padrões e modelos (topografia e MGG), melhores algoritmos de cálculo, etc.

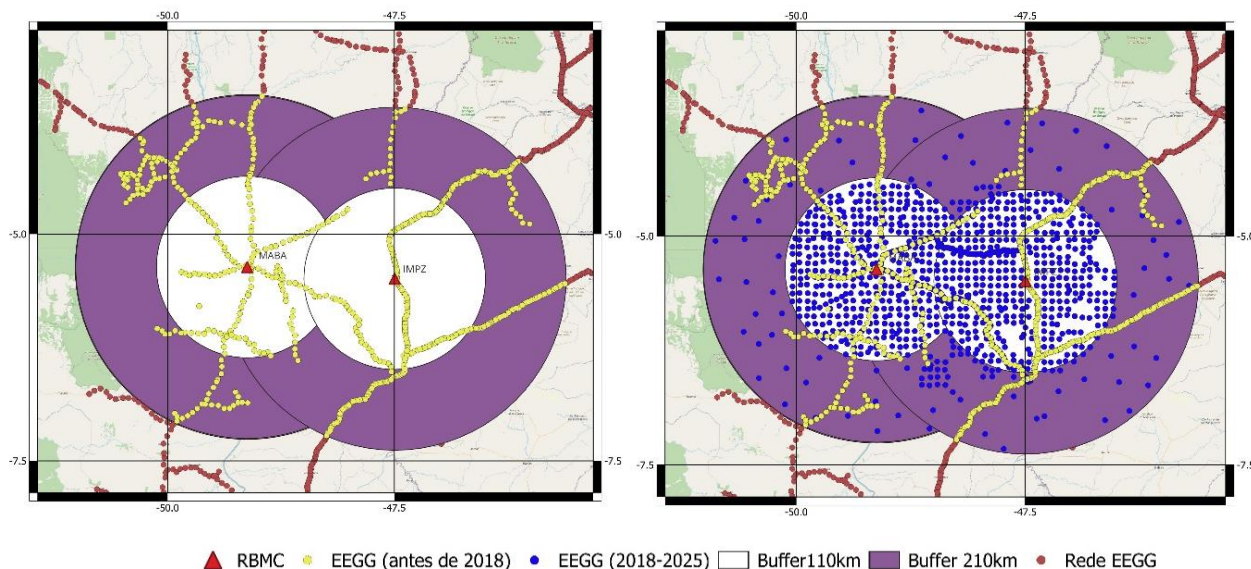
No âmbito nacional, a determinação do IHRF impulsiona a formação de consórcios de pesquisa e de forças-tarefa interinstitucionais. Estes são regidos pelas diretrizes do Sistema de Referência Geodésico para as Américas (SIRGAS), que atua na integração das estações IHRF nas Américas (Guimarães et al., 2024a).

O IBGE atua como o principal condutor oficial do processo, sendo responsável pela seleção de seis estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC) para compor a primeira solução do IHRF, localizadas em Imbituba (SC), Presidente Prudente (SP), Cuiabá (MT), Brasília (DF), Marabá (PA) e Fortaleza (CE). As ações operacionais do instituto incluem a densificação dos levantamentos gravimétricos no entorno dessas estações e a complexa tarefa de vinculação à rede de nivelamento (Guimarães et al., 2022a; Guimarães et al., 2022b; Padilha, 2025). Destaca-se que o primeiro grande passo do IBGE ocorreu em 2018, com o reajuste da rede de nivelamento com base em números geopotenciais e a adoção das altitudes normais como oficiais (IBGE, 2019). Acessando o BDG do IBGE, das 6 estações selecionadas para se tornarem estações IHRF, apenas a de Imbituba não está conectada à rede de nivelamento (IBGE, 2026).

O empenho do IBGE na garantia da infraestrutura mínima necessária à densificação do IHRF no Brasil pode ser observado na Figura 3 a seguir, na qual a estação de Marabá, representante da Região Norte do país, apresentava, até 2018, um cenário crítico para uma estação de referência. Após 2018, houve um empenho significativo na densificação da rede de nivelamento e das estações gravimétricas (EEGG) na região. Com os dados do BDG, percebe-se que o esforço buscou contemplar a estação vizinha de Imperatriz (MA), o que é um indicio positivo de que o IBGE almeja ampliar o número de estações IHRF no Brasil.

Paralelamente à infraestrutura do SGB, instituições como a Escola Politécnica da USP (EPUSP), o Centro de Estudos de Geodesia (CENEGEO) e o Instituto Geográfico e Cartográfico (IGC) realizaram esforços coordenados para o avanço da gravimetria absoluta no país. Foram implantadas cerca de 15 estações gravimétricas absolutas, estrategicamente próximas às estações da RBMC. Essa iniciativa é importante não apenas para a consolidação física do IHRF, mas também para a materialização do *International Terrestrial Gravity Reference Frame* (ITGRF) no território nacional (Guimarães et al., 2020; Guimarães et al., 2022b).

Figura 3 – Evolução temporal de EEGG nas proximidades das estações RBMC de Marabá e Imperatriz.



Elaboração: Os autores (2026).

O aprimoramento do sistema nacional de altitudes tem-se concentrado na modelagem do geopotencial por meio de formulações matemáticas para a resolução do PVCG, utilizando métodos como a Série de Brovar e a Transformada Rápida de Fourier (Ferreira, 2011; Silva, 2020). Além disso, tendo em vista as dimensões continentais do país, a técnica de Modelagem Topográfica Residual (Residual Terrain Model – RTM) tem sido utilizada para preencher lacunas nos dados gravimétricos, possibilitando a modelagem das componentes de alta frequência do campo de gravidade (Padilha, 2025). Nas estações IHRF localizadas na ZC, a estratégia vem exigindo métodos que integrem dados de campanhas de gravimetria marinha conduzidas pelo *Bureau Gravimétrique International* (BGI), pela Marinha do Brasil e pela Agência Nacional do Petróleo (ANP), além da contribuição da ALTSAT, visando uma representação mais precisa das heterogeneidades locais (Ribeiro et al., 2022, 2023). O estado da arte nesta unificação é representado por modelos geoidais e quase geoidais regionais modernos, como o SAM\_GEOID2023 e o SAM\_QGEOID2023, desenvolvidos para conectar os *data* verticais da América do Sul ao sistema de referência global (Guimarães et al., 2024b; Guimarães et al., 2025). Todo esse esforço conjunto concentra-se na integração de dados gravimétricos terrestres, aéreos e marinhos com modelos globais, visando superar as limitações de cobertura de dados que ainda persistem, especialmente na ZC.

### 2.3 A altitude elipsoidal (*h*) e modelos de conversão

A altitude elipsoidal (*h*) é a distância vertical de um ponto até um elipsoide de referência específico, medida ao longo da normal à sua superfície (Heiskanen & Moritz, 1967; Seeber, 2003). Existem diversos elipsoides adotados globalmente, como o WGS84 para o sistema GPS, o Topex para determinados produtos derivados da ALTSAT e o PZ-90 para o sistema GLONASS. O valor depende intrinsecamente do elipsoide adotado, o que exige transformações geodésicas para a compatibilização dos dados. Renganathan (2010), por exemplo, constatou, por meio da Eq. (1), que as altitudes elipsoidais associadas ao elipsoide Topex são aproximadamente 70 cm mais baixas do que as associadas ao elipsoide WGS84.

$$\delta h = h_1 - h_2 = -((a_2 - a_1) \cos^2 \Psi + (b_2 - b_1) \sin^2 \Psi) \tag{1}$$

onde  $\delta h$  corresponde à diferença das altitudes  $h_1$  e  $h_2$  referidas aos dois elipsoides,  $a_1$  e  $a_2$  são os semieixos maiores e  $b_1$  e  $b_2$  são os semieixos menores dos elipsoides e  $\Psi$  é a latitude geocêntrica do ponto de interesse para o qual se deseja realizar a conversão.

O modelo elipsoidal é uma superfície de referência altamente estável para a interoperabilidade entre *data* verticais díspares (Robin et al., 2016). Além disso, a determinação da altitude elipsoidal é extremamente útil para o monitoramento de deformações, evidenciando que a crosta terrestre não é um referencial estático.

O uso de séries temporais GNSS permite quantificar o Movimento Vertical da Terra (*Vertical Land Motion – VLM*), pois as estações GNSS fixas à crosta terrestre registram o movimento vertical do próprio terreno (Calado, 2023).

Apesar de sua utilidade geométrica, o elipsoide é uma superfície matemática que, por não ser equipotencial, não permite que as alturas descrevam o fluxo de fluidos (água) sob a ação da gravidade. A água não flui de "maior  $h$ " para "menor  $h$ " (Luz, 2008). Portanto, modelos de conversão são necessários para atribuir significado físico à altitude elipsoidal, como os modelos geoidais. Dos Santos (2019) apresentou a análise do fluxo do rio São Lourenço no Canadá por meio de levantamento GNSS e de nivelamento geométrico. O uso da altitude elipsoidal, sem um modelo de conversão, indicou um sentido de fluxo inverso ao natural do rio, o que demonstra a desvinculação total do campo de gravidade da Terra. Para solucionar essa limitação, a altitude elipsoidal é relacionada a um referencial físico. O principal referencial físico é o geóide, a superfície equipotencial do campo de gravidade que melhor se ajusta ao NMM. A altura de um ponto acima do geóide é chamada de altitude ortométrica ( $H$ ). A separação vertical entre o geóide e um elipsoide de referência específico é chamada de altura geoidal ( $N$ ), também conhecida como ondulação geoidal. A relação geométrica entre elas é obtida através da seguinte relação, conforme Eq. (2):

$$h = H + N \quad (2)$$

Contudo, a determinação rigorosa da altitude ortométrica ( $H$ ) apresenta uma dificuldade prática significativa, pois depende do conhecimento da densidade e da distribuição das massas topográficas entre a superfície e o geóide, e detalhes a esse respeito podem ser consultados em Freitas e Blitzkow (1999) e no IBGE (2019). A fim de evitar qualquer hipótese sobre essas densidades, foi desenvolvido o conceito de altitudes normais ( $H_N$ ), cuja superfície de referência é o quase geóide, afastado do elipsoide pela anomalia de altitude ( $\zeta$ ), conforme Eq. (3):

$$h = H_N + \zeta \quad (3)$$

Em países como o Brasil, que adotaram as altitudes normais, a transformação oficial entre a altitude elipsoidal e o referencial vertical do SGB é realizada por meio de modelos de conversão, sendo o *hgeoHNOR2020* o modelo atual (IBGE, 2023). Não se trata de um modelo geoidal ou quase geoidal puro, mas sim de uma superfície de conversão ajustada a partir de observações GNSS sobre RRNN da rede de nivelamento, com base em uma adaptação do modelo geoidal gravimétrico em grade MAPGEO2015 (IBGE, 2023). O *hgeoHNOR2020* é restrito à área continental do país, onde as incertezas do modelo são devidamente conhecidas e documentadas. Portanto, o seu uso na área oceânica é inadequado.

## 2.4 O datum da Carta Náutica e as referências verticais marítimas

Na interface marítima, a referência vertical primária para a segurança da navegação e para as obras de engenharia é o *datum* da Carta Náutica (DCN), adotado no Brasil como o Nível de Redução (NR). A Organização Hidrográfica Internacional (IHO, 2010) recomenda o uso da Maré Astronômica Mais Baixa (*Lowest Astronomical Tide – LAT*) como DCN e da Maré Astronômica Mais Alta (*Highest Astronomical Tide – HAT*) como referência para autorizações verticais, sendo ambos os níveis previstos sob condições astronômicas e meteorológicas médias, calculados preferencialmente com séries temporais de 19 anos (Pugh, 1987). Contudo, a Marinha do Brasil adota como DCN o Nível de Redução (NR), calculado por meio de uma combinação matemática de componentes harmônicos específicos (Marinha do Brasil, 2024; DHN, 2017).

Já o nível de referência fundamental na ZC é o Nível Médio do Mar (NMM), definido como a média das alturas da superfície do mar em relação a um referencial terrestre (IHO, 2010). O NMM serve como referência primária para os demais níveis hidrográficos. Entretanto, como o NMM não é uma superfície equipotencial, ele se afasta do geóide, criando uma separação denominada TNMM. Como destaca o IBGE (2009), essa diferença representa uma complicação prática significativa. Um *datum* vertical terrestre é geralmente fixado a partir da determinação do NMM em um ponto de origem e em uma época determinada; porém, devido à TNMM, o NMM físico medido em outros pontos e épocas não coincide com essa referência.

Esse *offset* ( $\Delta$ ) impacta diretamente a precisão na conexão entre altitudes e profundidades em projetos de engenharia.

Estimativas do NMM e da TNMM podem ser obtidas pela integração de dados da ALTSAT e da maregrafia, porém, a compatibilização exige correções distintas. O efeito do barômetro inverso, por exemplo, pode gerar discrepâncias de até 7 cm, sendo comumente aplicado em produtos ALTSAT, mas negligenciado em séries maregráficas (Ponte, 2006). Fatores críticos, como a natureza da medição relativa dos marégrafos, também exigem atenção, pois o equipamento registra o nível do mar em relação à crosta, que pode sofrer subsidência ou soerguimento (VLM), o que requer monitoramento por GNSS para evitar contaminação das séries temporais de longo prazo (Wöppelmann & Marcos, 2016; Calado, 2023). Além disso, a comparação de modelos globais de MSS com séries maregráficas exige translação cinemática de época e correção de efeitos como marés terrestres e carga oceânica, sem as quais a integração oceano-continente de alta precisão torna-se inviável (Pugh, 2004; IBGE, 2010; Santamaría-Gómez et al., 2017).

## 2.5 O modelo de Separação (SEP) e a integração oceano-continente

O Modelo de Separação (SEP) é um modelo matemático que descreve a separação geométrica entre o DCN e um elipsoide de referência global (Santana et al., 2020). Com um modelo SEP implementado, é possível utilizar o posicionamento GNSS de alta precisão (*maré-GPS*) para obter profundidades em tempo real. Ressalta-se que os modelos SEP e geoidal são complementares na determinação de um Sistema de Referência Vertical Unificado, o que exige a integração das informações dos referenciais elipsoidal, geoidal e oceânico. Contudo, a construção do SEP impõe obstáculos científicos e operacionais significativos (Santana et al., 2020).

O primeiro obstáculo reside na falta de infraestrutura de dados e nos elevados custos de implementação. A necessidade de uma base sólida de dados maregráficos, geodésicos e gravimétricos constitui um gargalo, pois a baixa densidade espacial dos marégrafos dificulta a extrapolação precisa (Santana & Dalazoana, 2020). Além disso, a obtenção de modelos geoidais de altíssima precisão no ambiente marinho frequentemente exige campanhas de gravimetria aerotransportada, o que implica um custo elevado (Slobbe et al., 2018b). Soma-se a isso a cinemática da crosta, na qual processos contínuos de VLM exigem monitoramento ininterrupto (Feng, Jin & Zhang, 2013; Santana et al., 2020; Calado, 2023).

Ademais, o rigor temporal e morfológico é difícil de alcançar. A definição de um nível de maré requer séries longas, mas o litoral apresenta topografia em constante mudança (canais e bancos de areia), o que altera a propagação da onda ao longo dos anos, enquanto perturbações meteorológicas introduzem ruído caótico nos modelos hidrodinâmicos (Pugh, 2004; Santana & Dalazoana, 2020; Slobbe et al., 2018b). A modelagem hidrodinâmica também apresenta deficiências operacionais em zonas complexas: modelos barotrópicos (2D) são frequentemente incapazes de representar processos baroclínicos, e a representação 3D é computacionalmente custosa. Em zonas intermarés, a definição da LAT entra em colapso, forçando adaptações matemáticas artificiais que sacrificam o rigor físico (Slobbe et al., 2018a). Por fim, erros de referenciamento vertical provocam anomalias que comprometem a precisão subdecimétrica necessária às cartas náuticas modernas (Slobbe et al., 2018a; Santana et al., 2020).

Diante desses obstáculos, o modelo SEP isolado revela-se geometricamente frágil para a integração continental. A robustez só é atingida quando o geoide fornece a base absoluta equipotencial do campo de gravidade em conjunto com o SEP. Contudo, a modelagem do geoide na interface oceano-continente ainda é prejudicada pela baixa qualidade dos dados orbitais próximos à costa e pela escassez de dados gravimétricos.

## 2.6 Referências verticais advindas da altimetria por satélite (ALTSAT)

As informações derivadas da ALTSAT possuem alta resolução espacial e alta precisão em regiões de grande profundidade referidas a um elipsoide de referência global (Plag & Pearlman, 2009). A combinação de dados derivados da ALTSAT e de marégrafos permite atenuar os problemas associados à baixa resolução espacial das observações maregráficas (Dalazoana et al., 2009). Ademais, a ALTSAT fornece informações essenciais para o refinamento do geoide com base nos desvios da vertical (Guo et al., 2025).

Seeber (2003) apresenta o princípio de medição da ALTSAT, baseado na emissão de pulsos de energia na faixa de micro-ondas. De modo geral, a tecnologia do radar altímetro opera na banda Ku, com frequência

de aproximadamente 13,5 GHz, o que corresponde a um comprimento de onda ( $\lambda$ ) de aproximadamente 2,2 cm.

A medida fundamental do altímetro é a altura da superfície do mar (*Sea Surface Height – SSH*) representada pela distância vertical entre a superfície do mar e um elipsoide de referência (ex.: GRS80; Topex; WGS84). Calcula-se conforme Eq. (4) (Chelton et al., 2001):

$$SSH = h_{sat} - (R + \sum \Delta R_{corr}) \quad (4)$$

onde,

$h_{sat}$ : Altitude do satélite acima do elipsoide (determinada por GNSS, SLR, DORIS);

$R$ : Alcance medido pelo radar altimétrico, que corresponde à distância entre o satélite e a superfície do mar, determinado multiplicando-se a velocidade da luz no vácuo pelo tempo de ida e volta do sinal eletromagnético dividido por 2 ( $R = \frac{1}{2} c \cdot \Delta t$ );

$\sum \Delta R_{corr}$ : Correções combinadas que envolvem

$\Delta R_{iono}$  = Atraso ionosférico;

$\Delta R_{tropo} = \Delta R_{seco} + \Delta R_{úmido}$  (Atraso troposférico);

$\Delta R_{tide}$  = Correções de marés oceânicas;

$\Delta R_{IB}$  = Correção de barômetro invertido;

$\Delta R_{SSB}$  = Sea State Bias (viés do estado do mar).

Detalhes sobre os erros que influenciam as medidas do radar altímetro, bem como suas magnitudes e métodos de estimativa, podem ser encontrados em Chelton et al. (2001) e Birol et al. (2025). Outra referência importante para a conexão de *data* verticais é a MSS, que deriva da média temporal da SSH, sendo a materialização espacial (contínua) da altitude elipsoidal do nível médio do mar, componente essencial para a determinação da TNMM (Chelton et al., 2001).

## 2.7 Conceitos de maré permanente

Um aspecto técnico importante na definição global das superfícies de referência é o tratamento da maré permanente, que corresponde à deformação contínua da Terra causada pela atração gravitacional do Sol e da Lua. De acordo com Mäkinen (2021), para lidar com essa deformação permanente causada à Terra e ao campo de gravidade, dois conceitos (*tide-free* e *mean-tide*) são aplicados à forma geométrica da Terra e três conceitos (*tide-free*, *zero-tide* e *mean-tide*) são aplicados ao campo de gravidade.

No conceito *tide-free*, também conhecido como *non-tidal*, os efeitos de maré são totalmente eliminados nos levantamentos, posição e potencial; é como se o Sol e a Lua não existissem ou fossem trasladados artificialmente ao infinito. No conceito de *mean-tide*, considera-se, nas posições, o efeito médio da maré e os respectivos efeitos diretos e indiretos sobre o potencial. Já o conceito *zero-tide* considera, de forma indireta, apenas os efeitos da maré permanente sobre o potencial.

De acordo com Sánchez et al. (2021), as fórmulas de conversão tradicionais entre diferentes sistemas de maré foram desenvolvidas por Ekman (1989). Tais formulações avaliam o potencial na superfície de uma esfera, tratando genericamente o modelo *tide-free*. Devido ao achatamento da Terra, a precisão de um milímetro é o limite metodológico que se pode alcançar com essa aproximação esférica. Para superar essa limitação, Mäkinen (2021) revisou a teoria completa, redefinindo a terminologia formal de "sistemas" para "conceitos" de maré e delineando fórmulas de conversão rigorosas com precisão de 0,1 mm.

A compatibilização desses conceitos é crítica para a integração oceano-continente. As altitudes elipsoidais referidas aos sistemas globais (como ITRS/ITRF e SIRGAS2000) são convencionalmente tratadas no conceito *tide-free*, enquanto as altitudes da superfície do mar obtidas por ALTSAT adotam comumente o conceito *mean-tide* (Filmer et al., 2024). Consequentemente, na relação entre as observações maregráficas e os modelos MSS, bem como na determinação da TNMM, é necessário compatibilizar as referências. Para garantir o rigor geodésico e evitar vieses sistemáticos, tanto os modelos geoidais quanto as superfícies altimétricas (MSS) precisam estar rigorosamente atrelados ao mesmo conceito de maré permanente antes de qualquer operação matemática.

Segundo Mäkinen (2021), no que tange à componente puramente geométrica da altitude elipsoidal, os conceitos *zero-tide* e *mean-tide* são estritamente idênticos. A transição a partir de coordenadas *tide-free*, como as oriundas de posicionamento GNSS vinculadas ao ITRF/SIRGAS2000 e representadas nas formulações matemáticas pelo índice *NT*, é realizada diretamente pela soma da projeção do vetor de deslocamento sobre a normal ao elipsoide ( $h_T$ ), conforme apresentado na Eq. (5):

$$h_{MT} = h_{ZT} = h_{NT} + h_T(\varphi). \quad (5)$$

Portanto, para garantir a correta integração com os modelos MSS, a altitude geométrica da superfície do mar determinada nas estações maregráficas deve ser convertida para o conceito *mean-tide* utilizando a Eq. (6), cuja expressão numérica para a correção  $h_T(\varphi)$ , dada em milímetros, depende exclusivamente da latitude geodésica.

$$h_T(\varphi) = 60,34 - 179,01 \sin^2 \varphi - 1,82 \sin^4 \varphi \quad (6)$$

onde,

$h_{NT}$ : Altitude elipsoidal no conceito *tide-free* (*non-tidal*);

$h_{MT}$  e  $h_{ZT}$ : Altitude elipsoidal nos conceitos *mean-tide* e *zero-tide* respectivamente;

$h_T(\varphi)$ : Correção radial da maré permanente para a coordenada geométrica (mm);

$\varphi$ : Latitude geodésica da estação.

### 3 ESTRATÉGIAS DE CONEXÃO ALTIMÉTRICA COM A TNMM

As estratégias de determinação da TNMM possuem duas vertentes: a abordagem oceanográfica e a geodésica, que podem, inclusive, ser combinadas (Rio & Hernandez, 2004; Filmer et al., 2018; Tang et al., 2025). De acordo com Heck (2004), as abordagens oceanográficas, como o nivelamento estérico e o nivelamento dinâmico (geostrófico), visam determinar diferenças de potencial entre pontos costeiros ou sobre regiões oceânicas. Trata-se de avaliações aproximadas das equações hidrodinâmicas gerais de movimento. São necessários dados locais de temperatura e salinidade para calcular a densidade da água do mar e, conseqüentemente, o campo de pressão hidrostática. A partir desses dados, é possível inferir as correntes geostróficas e, por integração vertical, a TNMM (Rio & Hernandez, 2004). Os principais problemas dessa abordagem são a complexidade na aquisição desses dados e a falta de resolução espacial em regiões costeiras, onde os maregrafos geralmente são instalados (Freitas et al., 2002). Já os modelos oceânicos globais são projetados para uso em oceanos profundos, e seu uso na costa e em plataformas continentais rasas deve ser avaliado com cautela (Woodworth et al., 2012).

Nas abordagens geodésicas a forma mais direta de se pensar em conexão de *data* verticais em regiões continentais é através do nivelamento geométrico combinado com medições de gravidade. Este método determina a diferença de potencial da gravidade (número geopotencial,  $C$ ) entre um ponto fundamental ( $P_0$ , geralmente uma estação maregráfica) e qualquer outro ponto ( $P$ ) usando a integral (ou soma discreta) da gravidade ( $g$ ) ao longo do desnível ( $dn$ ) (Heck, 2004).

Estratégias de conexão de *data* verticais através da determinação da TNMM vêm evoluindo gradativamente. Essa abordagem baseia-se no princípio geométrico fundamental de separação entre a superfície média do mar e o geoide, expresso pela Eq. (7):

$$TNMM = h_{NMM} - N \quad (7)$$

onde  $TNMM$  é a Topografia do Nível Médio do Mar;  $h_{NMM}$  é a altitude elipsoidal do nível médio do mar. Essa variável pode ser materializada de forma espacial e contínua através de um modelo de Superfície Média do Mar (MSS) derivado da ALTSAT ou de forma pontual e local através do posicionamento GNSS sobre as referências de nível das estações maregráficas;  $N$  é a altura geoidal (ou ondulação geoidal) no mesmo ponto ou região, fornecida por um modelo global do geopotencial ou modelo geoidal regional.

A aplicação prática dessa estratégia de conexão, no entanto, exige uma rigorosa compatibilização temporal. Como as superfícies de referência são dinâmicas, conectar o NMM derivado de observações maregráficas a modelos MSS requer a harmonização das épocas de observação, o tratamento de efeitos atmosféricos, como o inverso do barômetro, e a aplicação do conceito de maré permanente (Giehl, Dalazoana & Santana, 2022; Filmer et al., 2024). Além disso, a propagação do NMM para uma época de referência comum requer a remoção do efeito do VLM das séries maregráficas, utilizando séries temporais GNSS contínuas para a correta vinculação espacial. Negligenciar essa harmonização temporal e física introduz vieses sistemáticos que inviabilizam a integração precisa na interface oceano-continente.

As limitações da abordagem de posicionamento por gravidade e satélite incluem a baixa acurácia desses modelos de geoide ao longo da costa (Huang, 2017), além da baixa resolução espacial obtida por GNSS. A estratégia de integração de produtos de altimetria por satélite representa um avanço inestimável para a oceanografia e a geodesia, proporcionando um mapeamento preciso da dinâmica oceânica global, elevando nosso entendimento dos oceanos e promovendo a unificação dos *data* verticais.

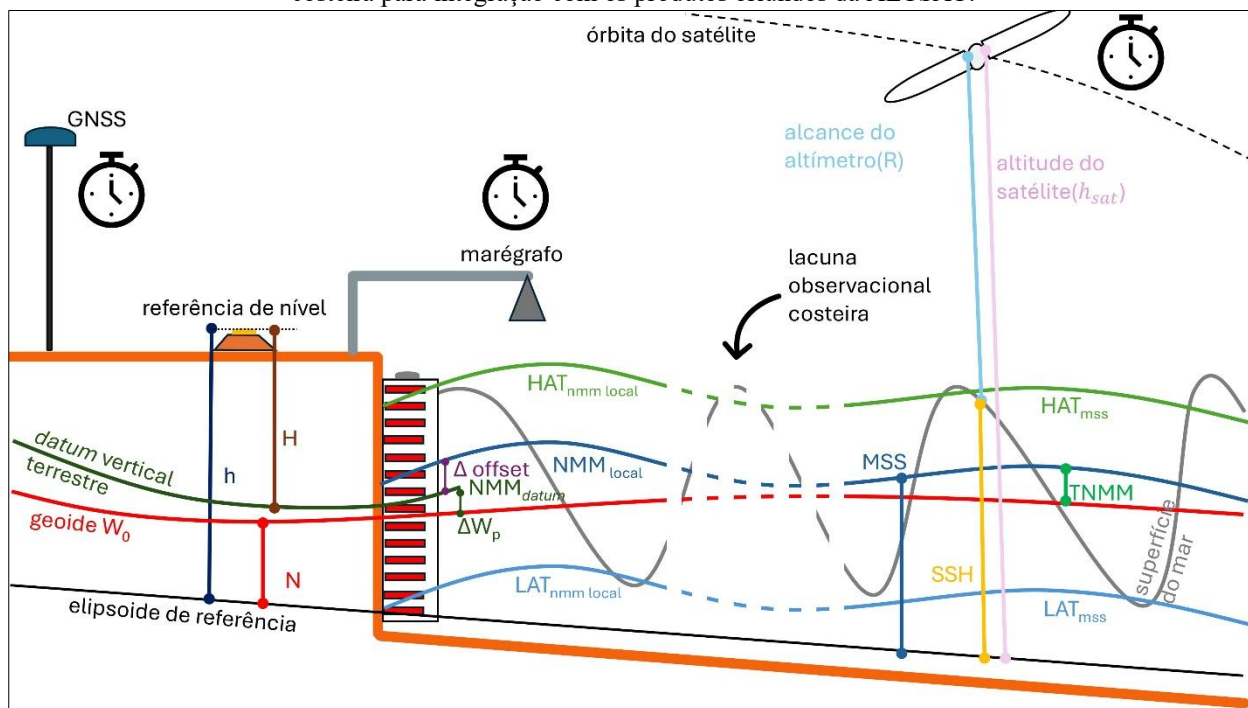
Vale ressaltar que a ALTSAT não realiza medições pontuais, mas sim calcula um valor médio correspondente à superfície do mar que reflete o sinal emitido pelo sensor. Nas regiões costeiras, esse sinal, contaminado por ruídos decorrentes da rugosidade da superfície oceânica e da reflexão especular da terra firme, compromete a precisão da medição. Ou seja, próximo da ZC, os produtos de ALTSAT perdem qualidade, o que gera uma lacuna observacional, dificultando a conexão direta com os dados provenientes das observações maregráficas (Vignudelli et al., 2005; Andersen & Scharroo, 2011).

Com o avanço das missões altimétricas de radar de abertura sintética (*Synthetic Aperture Radar* – SAR), há expectativa de melhoria na resolução espacial e na precisão dos dados, em comparação com as missões altimétricas convencionais (Idžanović et al., 2017; Nilsson et al., 2025). A tecnologia SAR mitiga parte da contaminação do sinal por meio do processamento Doppler e melhora a resolução ao longo da trilha; contudo, esse processamento exige algoritmos complexos (*retracking*) projetados especificamente para discriminar os ecos de águas rasas e as reflexões terrestres (Passaro et al., 2014; Birol et al., 2025). Assim, a lacuna observacional costeira tende a se tornar cada vez menor. Giehl, Dalazoana & Santana (2022) obtiveram resultados positivos na comparação absoluta entre o satélite Sentinel-3A e as estações maregráficas da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia (RMPG), a uma distância média de 5 km da ZC; porém, Filmer et al. (2024) recomendam cautela na interpretação dos resultados em distâncias inferiores a 10 km.

Os produtos ALTSAT melhoraram significativamente nosso conhecimento do oceano aberto e agora são um componente essencial de muitos sistemas marinhos operacionais e de estudos climáticos. Mas seu uso próximo à costa continua sendo um desafio, tanto do ponto de vista técnico quanto do científico (Birol et al., 2025). A Figura 4 ilustra essas relações entre as superfícies e a ocorrência da referida lacuna observacional costeira. Os relógios na figura ilustram a importância de compatibilizar as épocas de referência nas análises devidas.

Para transpor essa lacuna, são necessários avanços nos componentes geométrico, físico e marítimo. No que tange ao componente geométrico, a conexão entre os dados válidos de ALTSAT em alto-mar e as estações maregráficas terrestres envolve um complexo desafio de extrapolação espacial para a avaliação de modelos MSS. A literatura demonstra que métodos determinísticos clássicos de interpolação (como o inverso do quadrado da distância, linear ou cúbica) frequentemente colapsam na zona costeira por não conseguirem filtrar o ruído terrestre residual e, sobretudo, por não fornecerem uma quantificação adequada da incerteza (Cressie, 1993; Le Traon, Nadal & Ducet, 1998). Nesse contexto de exigência de rigor probabilístico, abordagens geoestatísticas avançadas e técnicas de Aprendizado de Máquina, como a Krigagem e a inferência Bayesiana via Processos Gaussianos (Souza, Dalazoana & Santana, 2025; Rasmussen & Williams, 2006), despontam como a fronteira do conhecimento para modelar a covariância espacial do oceano e preencher o vazio costeiro de forma estocástica e fisicamente coerente (Lary et al., 2016). Com isso, é possível determinar uma distância ótima de confiabilidade dos modelos MSS na ZC.

Figura 4 – Esquema conceitual da relação entre as referências de nível na zona costeira e a lacuna observacional costeira para integração com os produtos oriundos da ALTSAT.



Elaboração: Os autores (2026).

Para além da interpolação puramente espacial/estatística, a limitação dos produtos ALTSAT na ZC também abre espaço para o uso da modelagem hidrodinâmica como um dos elementos necessários à aproximação da TNMM. Ela utiliza equações físicas para simular o movimento da água no oceano, considerando fatores como ventos, marés, gradientes de pressão e batimetria (Iliffe et al., 2013; Slobbe et al., 2018; Tang et al., 2025). Simulações hidrodinâmicas de longo prazo também podem ser utilizadas para estimar a circulação média do oceano e, conseqüentemente, auxiliar na determinação da TNMM quando integradas a modelos geoidais e observações maregráficas (Jahanmard et al., 2021).

Apesar disso, os cuidados do método permeiam a resolução e a parametrização, bem como a qualidade das forçantes e das condições de contorno. A validação rigorosa dos modelos hidrodinâmicos com dados observacionais independentes e a quantificação das incertezas dos resultados dos modelos são necessárias para aumentar a confiança nas estimativas (Turner et al., 2010; Shi & Myers, 2016; Tang et al., 2025).

Nesse cenário, a evolução das técnicas de conexão precisa ocorrer em todas as direções. Não é suficiente dispor de um modelo hidrodinâmico de alta resolução se o modelo geoidal costeiro for de baixa qualidade. Como os valores de nível do mar dos modelos hidrodinâmicos estão, via de regra, vinculados a referenciais de nível marítimo conectados aos terrestres nos marégrafos, a sua conversão rigorosa para a altitude elipsoidal depende intrinsecamente de um ótimo modelo geoidal. É apenas por meio dessa conversão precisa que se torna possível estabelecer uma vinculação contínua entre as observações costeiras locais e os modelos MSS. Sendo assim, a evolução da TNMM está irrevogavelmente atrelada à evolução da modelagem do geopotencial na ZC, que permitirá determinar um geóide de alta precisão, essencial para atuar como ponte física-geométrica e isolar o sinal dinâmico do oceano.

Assim, pensar numa conexão altimétrica global passa obrigatoriamente pela evolução do IHRF e do PVCG, conceito fundamental na Geodésia Física que busca determinar o campo de gravidade da Terra e a forma do geóide a partir de medições na superfície terrestre (Freitas & Blitzkow, 1999; Guimarães & Blitzkow, 2011). A TNMM pode ser vista como um componente do PVCG, que representa a diferença entre a superfície física do oceano e o geóide. A solução do PVCG, em suas diversas formulações, como, por exemplo, o problema de Stokes ou o de Molodensky, permite determinar o geóide e, conseqüentemente, derivar a TNMM (Mather, 1974). Por outro lado, a solução depende da qualidade e da densidade dos dados da gravidade disponíveis na superfície da Terra; a obtenção de dados de alta qualidade em áreas oceânicas é complexa, o que afeta a precisão da solução do PVCG e, conseqüentemente, da TNMM nessas regiões. Modelos regionais

e locais de geoides vinculados ao propósito do IHRF contribuem para avanços na unificação dos *data* verticais na ZC (Guimarães et al., 2025). Contudo, para que essa modelagem viabilize uma transição contínua e rigorosa da interação oceano-continente, é indispensável a realização de campanhas sistemáticas de coleta de dados gravimétricos e oceanográficos, superando o vazio observacional que ainda restringe a integração geodésica costeira.

## 4 EXPERIÊNCIAS INTERNACIONAIS

Diante das crescentes demandas para a gestão costeira, a análise das abordagens internacionais permite avaliar sua aplicabilidade ao contexto brasileiro. A seguir, apresenta-se um panorama das soluções VDatum nos Estados Unidos, VORF no Reino Unido, BATHYELLI na França e AUSHYDROID na Austrália. A avaliação dessas iniciativas evidencia estratégias distintas e desafios recorrentes na busca por uma referência vertical contínua e precisa na interface oceano-continente.

### 4.1 VDatum

O VDatum é uma ferramenta computacional gratuita, desenvolvida em conjunto pela NOAA's, *Office of Coast Survey* (OCS), *National Geodetic Survey* (NGS) e pelo *Center for Operational Oceanographic Products and Services* (CO-OPS), com a funcionalidade de transformar altitudes entre *data* marítimos, físicos e geométricos. Atualizações periódicas são realizadas para inclusão de novas áreas e melhorias de métodos e modelos estando atualmente na versão 4.7.1, lançada em junho de 2025 (NOAA, 2025).

Desde o projeto piloto realizado na baía de Tampa na região da Flórida em 2000, onde o modelo hidrodinâmico *Princeton Ocean Model* foi utilizado alcançando um desvio padrão de 2,7 cm entre os dados previstos pelo modelo e os observados na região (Parker et al., 2001; Parker et al., 2003), até os dias atuais, o VDatum progrediu de maneira consistente, possuindo atualmente abrangência nacional, e com objetivo de ampliar sua cobertura para até, pelo menos, 220 milhas náuticas da costa (Tang et al., 2025).

A metodologia baseia-se na criação de grades de transformação que contêm os valores de separação entre os *data* verticais em pontos específicos de uma área geográfica (NOAA, 2012). De acordo com Myers et al. (2005; 2007), o processo se inicia com a coleta de dados de batimetria e de linha de costa, seguida da geração de uma grade de elementos finitos. Em seguida, aplicam-se as condições de contorno no Modelo Avançado de Circulação para Águas Oceânicas, Costeiras e Estuarinas (*Advanced Circulation Model for Oceanic, Coastal and Estuarine Waters – ADCIRC*), atualmente na versão 55.

Aplicações desenvolvidas antes de 2016 tinham as correções dos dados do modelo conduzidas pela ferramenta de Interpolação de Constituintes e Residuais de Marés (*Tidal Constituent And Residual Interpolation – TCARI*), desenvolvida por Hess et al. (1999), baseada na solução determinística de primeira ordem da equação de Laplace para a interpolação espacial. Aplicações posteriores passaram a utilizar um novo método de interpolação estatística, conhecido como método da incerteza espacialmente variável (*Spatially Varying Uncertainty – SVU*) (Shi & Myers, 2016). A nova abordagem de interpolação não apenas reduziu o viés e os erros, mas também produziu uma incerteza espacialmente variável (Tang et al., 2025). Por fim, os dados são enviados ao NGS para inclusão no software VDatum (Myers et al., 2005).

O VDatum conta com a estrutura da rede maregráfica da *National Water Level Observation Network* (NWLON) com 306 marégrafos, além de uma quantidade significativa de estações temporárias (Michalski, 2023). Como exemplo de um trecho de 8.200 km que se assemelharia à costa brasileira, foram utilizados 1.987 marégrafos, segundo Myers *apud* Keyzers et al. (2015). Ademais, as recentes atualizações para *West Coast and Chesapeake/Delaware Bay* incorporaram dados ALTSAT, referência elipsoidal IGS14 e o modelo geoidal experimental xGEOID20B (Tolkova et al., 2023; Tang et al., 2025).

O xGEOID é uma série de modelos geoidais experimentais desenvolvidos pelo NGS, que combinam dados de gravidade obtidos por satélites, levantamentos terrestres e gravimetria aerotransportada (NGS, 2025). Trata-se de um produto preliminar, concebido como etapa intermediária para o lançamento do novo modelo geoidal dos EUA. O sufixo 20B indica que o modelo utiliza dados disponíveis até aproximadamente 2020 e, especificamente na versão “B”, incorpora medições aerotransportadas do projeto GRAV-D (NOAA, 2023). Com isso, na zona costeira, erradica-se a lacuna observacional entre a gravimetria terrestre e a gravimetria

marinha e satelital, o que melhora consideravelmente a determinação do modelo geoidal na transição oceano-continente.

Na determinação da TNMM definida como a elevação do xGEOID20B em relação ao NMM local, todos os dados do NMM foram baseados na época de referência mais recente (1983-2001). As diferenças entre o modelo e o observado nos marégrafos são apresentadas na Tabela 1 (Tang et al., 2025).

Tabela 1 – Estatísticas da TNMM interpolada pelos métodos mínima curvatura e SVU.

Região	Método	Mínimo (m)	Máximo (m)	Média (m)	Desvio Padrão (m)
Todas as sub-regiões	Mínima Curvatura	-2,29	0,067	-0,219	0,058
Todas as sub-regiões	SVU	0,019	0,06	0,029	0,002

Fonte: Tang et al. (2025).

## 4.2 Vertical Offshore Reference Frame (VORF)

O projeto VORF foi iniciado em 2005 pelo *UK Hydrographic Office* (UKHO) com o objetivo de estabelecer um conjunto de superfícies verticais contínuas que conectassem os principais sistemas de referência utilizados nas regiões terrestres e marítimas. A área de abrangência do modelo incluiu as águas territoriais do Reino Unido e da Irlanda até o limite da plataforma continental. De acordo com Iliffe et al. (2013), um dos principais propósitos foi permitir a transformação precisa de profundidades obtidas por GNSS diretamente em superfícies de maré, como o DCN, otimizando os levantamentos hidrográficos e reduzindo a dependência de observações maregráficas ou de modelos locais de maré.

A metodologia foi estruturada em três etapas principais. A primeira consistiu na determinação do modelo MSS em relação ao elipsoide GRS80. Em regiões oceânicas, a mais de 30 km da costa, utilizou-se o modelo altimétrico DNSC06MSS, derivado das missões TOPEX/Poseidon, Jason-1, ERS-1, ERS-2, Geosat e GFO. Já nas zonas costeiras, onde a altimetria sofre degradação, foram integradas séries históricas de 75 marégrafos da rede *Permanent Service for Mean Sea Level* (PSMSL) e de mais de 385 marégrafos temporários operados pela Marinha Real Britânica, com 253 estações com uma média de 3 meses, 25 entre 3 meses e 1 ano e 107 com mais de 1 ano de dados. Esses dados foram ajustados para a época de referência 2000,0 por meio de um modelo espaço-temporal (Iliffe et al., 2007).

A segunda etapa envolveu a transformação dos níveis médios do mar para o sistema ETRF89, com base em conexões de nivelamento, observações GNSS e modelos de correção de *datum*. A terceira e última etapa consistiu na modelagem das superfícies de maré (DCN, LAT, HAT, MSL, entre outras), a partir de modelos hidrodinâmicos de alta resolução, com malha de 3,5 km e observações empíricas. As superfícies foram interpoladas com a técnica de *thin plate splines* (TPS), utilizando uma função de distância marítima que pondera a conectividade entre os pontos (Turner et al., 2010). Todas as interpolações utilizaram como base o modelo geoidal OSGM05, alcançando-se, assim, a TNMM por colocação por mínimos quadrados e uma função de covariância derivada das características do marégrafo e dos dados de altimetria (Iliffe et al., 2013).

O modelo foi validado por meio de 245 testes em pontos costeiros, 63 comparações entre marégrafos e GNSS e 6 campanhas em alto mar. Os resultados demonstraram que o modelo atinge, na maioria das áreas, acurácia de 0,10 m nas zonas costeiras e de 0,15 m em mar aberto, com uma certeza de 68% ( $1\sigma$ ). No entanto, foram identificadas discrepâncias significativas em alguns pontos, como em *Portland*, com diferenças de 0,69 m entre os valores observados e os modelados, o que evidencia limitações do VORF em zonas com hidrodinâmica altamente complexa (UKHO, 2015).

## 4.3 BATHYmetry referred to the ELLipsoid (BATHYELLI)

O projeto liderado pelo *Service Hydrographique et Océanographique de la Marine* (SHOM) foi lançado em 2005 com o objetivo de estabelecer *data* verticais hidrográficos em toda a área costeira metropolitana francesa de forma consistente, precisa e acessível (Tanguy et al., 2014).

Ele gera modelos de superfície para referências verticais marítimas, como o NMM, LAT, HAT e Zero Hidrográfico (ZH), referenciados ao elipsoide GRS80 e ao sistema geodésico legal RGF93. O princípio do projeto é unificar o NMM obtido a partir de estações maregráficas com as observações MSS provenientes da ALTSAT, utilizando os dados da ALTSAT a uma distância de 10 milhas da costa (~16 km). Para preencher as

lacunas entre essas medições e garantir continuidade espacial, foram realizados levantamentos GPS cinemáticos embarcados e pós-processados até 15 milhas náuticas (~28 km), permitindo a construção de superfícies verticais contínuas. Para a unificação dos dados, utilizou-se a interpolação pelo método dos mínimos quadrados com funções de covariância, sobre uma grade de elementos finitos (Pineau-Guillou & Dorst, 2013).

Atualmente, o projeto encontra-se na versão 2.1 lançada em março de 2023. Segundo o SHOM, o BATHYELLI não é certificado para navegação; trata-se de uma referência científica e técnica, útil especialmente para a integração com sistemas GNSS, o planejamento de levantamentos hidrográficos e a interoperabilidade entre superfícies verticais (SHOM, 2023). A Tabela 2 apresenta a comparação entre as Referências Altimétricas Marítimas 2014 (*Références Altimétriques Maritimes 2014* – RAM 2014) e o modelo BATHYELLI v1.1.

Tabela 2 – Estatísticas sobre a diferença nas alturas elipsoidais do nível médio entre os produtos RAM 2014 e BATHYELLI v1.1.

Fachada marítima	Nº de portos	$\mu(\Delta\text{NM/GRS80})$	RMS( $\Delta\text{NM/GRS80}$ )
Atlântico	40	0,7 cm	16,8 cm
Mediterrâneo continental	13	12,2 cm	36,3 cm
Córsega mediterrânea	7	1,9 cm	11,6 cm

Fonte: Tanguy et al. (2014).

#### 4.4 AUSHYDROID

O AUSHYDROID evoluiu como uma solução australiana para conectar referenciais verticais terrestres e marítimos, com o objetivo de permitir transformações precisas entre o *datum* de Carta Náutica (LAT) e o elipsoide de referência (Todd et al., 2004). A motivação central foi atender à crescente necessidade de dados costeiros contínuos e de alta resolução para aplicações como a modelagem de inundações, a segurança marítima e o planejamento costeiro, especialmente diante do aumento do nível do mar (Keyzers et al., 2015). Atualmente, o grupo de trabalho AUSHYDROID é conduzido pelo Comitê Intergovernamental para Levantamento e Mapeamento (ICSM), sob a liderança do Escritório Hidrográfico Australiano (AHO), com a tarefa de desenvolver um modelo que facilite a conexão vertical ao longo de toda a borda australiana (Filmer et al., 2024).

A análise atual baseou-se na determinação da altura elipsoidal da LAT, por meio da conexão entre observações maregráficas por GNSS, modelos de maré oceânicos, MSS, modelos geopotenciais e TNMM. Para superar a lacuna observacional dos modelos ALTSAT, adotou-se a interpolação bicúbica entre os modelos e os marégrafos utilizando o modelo *General Bathymetric Chart of the Ocean* (GEBCO) na aproximação (Filmer et al., 2018). Avaliações recentes indicam que, nas regiões costeiras, a acurácia foi de  $\pm 20$  cm, mas sofreu degradação em áreas complexas, como estuários e baías, onde, em alguns casos, os erros ultrapassaram 50 cm em comparação com os marégrafos. Essa limitação aponta para a necessidade de maior densidade de marégrafos conectados ao elipsoide de referência e de uma melhor modelagem em áreas críticas. Dos 142 marégrafos disponíveis na área de estudo, apenas 25 foram utilizados; os demais apresentavam restrições, como falta de conexão GNSS, ausência de metadados, registros de curta duração (< 41 dias), entre outras. Os melhores resultados só foram alcançados com 19 marégrafos com observações superiores a 5 anos (Filmer et al., 2024).

Filmer et al. (2024) destacam que, embora os modelos possam realizar com precisão a MSS, há incertezas quanto aos cálculos dos modelos globais do geopotencial e à qualidade das informações oceanográficas utilizadas nesses modelos. Além disso, há escassez e heterogeneidade nos dados observacionais ao longo da costa, especialmente a ausência de conexões GNSS em marégrafos históricos.

## 5 CONTEXTO BRASILEIRO

A ausência de um Sistema de Referência Vertical Unificado no Brasil impede a interoperabilidade direta entre diferentes conjuntos de dados geoespaciais. Dados hidrográficos produzidos pela Marinha do Brasil são normalmente referidos ao NR; levantamentos topográficos civis utilizam, em geral, o nível médio

do mar local ou referências associadas ao SGB; observações GNSS são referidas ao elipsoide; enquanto modelos geoidais fornecem superfícies equipotenciais destinadas à conversão entre referenciais geométricos e físicos.

Essa diversidade de referenciais verticais evidencia uma fragmentação conceitual e operacional entre instituições civis, científicas e militares responsáveis pela produção de dados geoespaciais no país. Sem um modelo unificado e acordado nacionalmente, torna-se difícil integrar dados produzidos por diferentes atores. Assim, perde-se precisão e continuidade nos estudos ambientais e hidrográficos, além de se comprometer a capacidade nacional de gerar conhecimento sobre o próprio território. As implicações diretas dessa falta de correlação rigorosa refletem-se em erros significativos na modelagem de inundações costeiras, inconsistências no licenciamento ambiental de estruturas marítimas e portuárias, além de dificultar o estabelecimento preciso de limites de soberania marítima.

Nesse sentido, a criação da Comissão Nacional de Geoinformação (CONGEO), em 2025, com destaque para o seu Comitê Temático de Mapeamento Costeiro (CT-MAPCOST), representa uma oportunidade para reestruturar a governança da geoinformação no Brasil e fortalecer a integração entre geodésia, oceanografia e o planejamento espacial marinho (Portaria GM/MPO nº 32, 2025). No âmbito dessa iniciativa, o comitê temático deverá propor uma área piloto destinada ao mapeamento costeiro de alta precisão, com o objetivo de subsidiar a futura normatização dessas atividades em âmbito nacional. Espera-se que essa atividade contribua para a padronização de metodologias, a avaliação de novas tecnologias e o aprimoramento da precisão de modelos geoidais e hidrodinâmicos.

Entre os resultados esperados, destacam-se o fortalecimento do planejamento e da gestão costeira, o aprimoramento das estratégias de gestão de riscos e de resposta a desastres, bem como a redução da chamada “lacuna observacional costeira”. Adicionalmente, tais ações podem contribuir para o desenvolvimento de mecanismos mais robustos de adaptação às mudanças climáticas (Portaria GM/MPO nº 32, 2025).

A determinação precisa da TNMM constitui um desafio científico complexo, porém essencial para a compreensão da circulação oceânica e para o estabelecimento de conexões consistentes entre diferentes referenciais verticais. As diversas abordagens disponíveis, sejam de natureza oceanográfica ou geodésica, oferecem diferentes estratégias de estimativa. Cada método apresenta vantagens e limitações próprias, de modo que a combinação integrada dessas abordagens se torna fundamental para reduzir incertezas e alcançar representações mais precisas e especialmente detalhadas da superfície oceânica.

Experiências internacionais demonstram que a implementação de um sistema nacional consistente requer a cooperação entre múltiplas instituições, a harmonização de séries históricas de observações, a validação rigorosa de modelos e o desenvolvimento de ferramentas operacionais capazes de integrar diferentes tipos de dados. Nesse contexto, torna-se indispensável uma abordagem interdisciplinar que articule conhecimentos de geodésia e de oceanografia física.

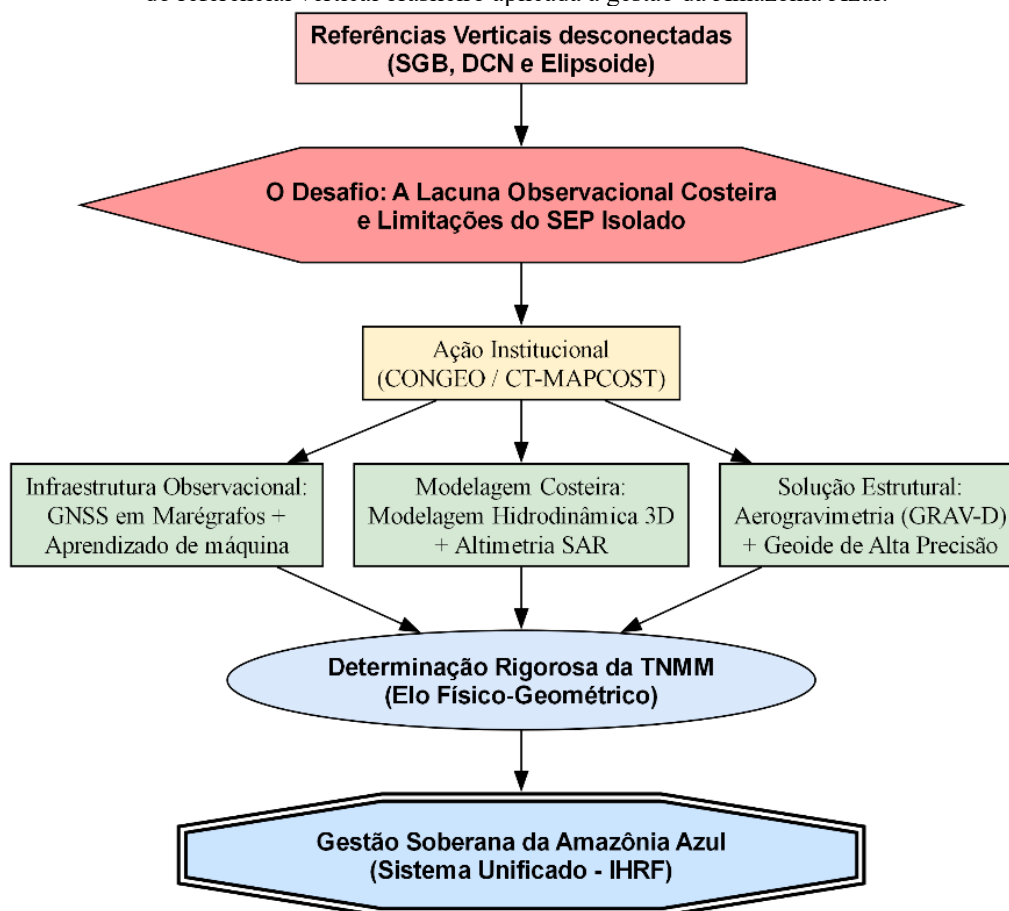
A análise dos projetos internacionais revisados evidencia desafios recorrentes, entre os quais se destacam a ausência ou a insuficiência de metadados, a predominância de marégrafos de curta duração, a necessidade de campanhas adicionais de rastreamento GNSS e as limitações na disponibilidade de dados gravimétricos costeiros. No que se refere aos métodos de conexão entre referenciais verticais, os resultados mais robustos têm sido obtidos em estudos que combinam séries maregráficas de longo prazo, modelagem hidrodinâmica de alta resolução devidamente calibrada, modelos geoidais consistentes e dados provenientes da ALTSAT.

A integração entre a abordagem do PVCG, dados ALTSAT e modelos hidrodinâmicos apresenta-se como uma alternativa robusta para estimar a TNMM. Tal estratégia permite explorar as complementaridades entre diferentes fontes de informação, sendo particularmente relevante em contextos de escassez de dados gravimétricos. Embora avanços recentes apontem para a obtenção de gravidade na ZC por meio de levantamentos aerogravimétricos, ainda em desenvolvimento em diversos países (VU et al., 2024; WU et al., 2025), a integração entre métodos geodésicos e oceanográficos permanece uma solução viável e operacional.

Para sintetizar a complexidade deste cenário e delinear o caminho tecnológico necessário para superar a lacuna observacional costeira no país, a Figura 5 apresenta um fluxograma estratégico. O esquema evidencia que as barreiras inerentes aos métodos clássicos exigem uma governança institucional integrada (CONGEO), culminando em uma progressão de soluções baseadas em inferência estocástica, modelagem de alta resolução

e controle do geopotencial para viabilizar a determinação rigorosa da TNMM.

Figura 5 – Proposta de fluxograma estratégico para a superação da lacuna observacional costeira visando à unificação do referencial vertical brasileiro aplicada à gestão da Amazônia Azul.



Elaboração: Os autores (2026).

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste cenário de escassez de dados e de complexidade geodésica na unificação de *data* verticais, a superação do vazio costeiro brasileiro exige uma abordagem estratégica multifacetada. No âmbito da infraestrutura observacional, torna-se premente a integração das redes de marégrafos ao referencial elipsoidal por meio da ampliação da RBMC e de campanhas GNSS episódicas. Esta integração deve ultrapassar as fronteiras da rede gerida pelo IBGE (RMPG) e incorporar as estações da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), do Sistema de Monitoramento da Costa Brasileira (SiMCosta) (FURG, 2026) e redes estaduais, como a da EPAGRI/CIRAM (2026) em Santa Catarina, garantindo interoperabilidade nacional. Além disso, o Controle Geodésico de Estações Maregráficas (CGEM) carece de periodicidade normativa para atestar a estabilidade dos sensores. Reconhece-se que, face à vasta extensão da costa brasileira, essa periodicidade esbarra em severos limitadores logísticos e orçamentários, o que exige abordagens estratégicas e a priorização de estações fundamentais.

Para o controle de qualidade e a integração espacial das observações maregráficas, recomenda-se explorar técnicas de aprendizado de máquina e de inferência bayesiana. A modelagem estocástica apresenta um potencial imenso não apenas para padronizar os dados de entrada, mas, principalmente, para transpor a zona de exclusão costeira da ALTSAT. O acoplamento dessas técnicas geoestatísticas a modelos hidrodinâmicos e geoidais de alta resolução representa o estado da arte para superar a quebra de estacionaridade física em estuários complexos, conforme observado no processo evolutivo do VDatum.

Em paralelo ao avanço estocástico, as atividades de modelagem costeira devem concentrar-se na ampliação e calibração de modelos hidrodinâmicos regionais, com especial enfoque nas origens dos *data* verticais do SGB (Imbituba e Santana), nas estações candidatas ao IHRF e em regiões que já enfrentam adversidades. A atual escassez de modelos locais precisos impõe a dependência de modelos globais, cuja

resolução frequentemente não atende às especificidades baroclínicas e morfológicas de zonas de maré complexas. Este aprimoramento hidrodinâmico deve caminhar em sintonia com a exploração de novas missões altimétricas com tecnologia SAR, que prometem reduzir a lacuna observacional próxima à linha de costa.

Como solução estrutural e definitiva para o país, a estratégia inegociável é a conceção de um projeto nacional de aerogravimetria para a zona costeira e as águas rasas, inspirado no bem-sucedido projeto estadunidense GRAV-D. Ainda que exija elevados investimentos, este levantamento é a única via para determinar um modelo geoidal costeiro de alta consistência e alinhado ao IHRF. Tal iniciativa resolveria diretamente o PVCG na interface oceano-continente, promovendo a âncora absoluta necessária para que o referencial vertical brasileiro atinja a precisão centimétrica. Este esforço torna-se ainda mais crítico no contexto de missões como a SWOT, que exigem um modelo geoidal rigoroso para explorar o seu pleno potencial de observação da TNMM.

A gestão da Amazônia Azul demanda precisão vertical, continuidade dos dados e integração entre diferentes domínios técnicos. A desconexão atual das referências verticais dificulta essa tarefa e impõe limites à soberania do Estado brasileiro em seu território marítimo. A unificação altimétrica e batimétrica no Brasil, considerando o contexto do IHRS/IHRF, representará um avanço essencial para consolidar a geoinformação de acordo com as referências verticais mais recentes. Não se trata apenas de alinhar medidas; trata-se de estabelecer um Sistema de Referência Vertical Unificado contínuo sobre o qual o país poderá observar, modelar e proteger seu território e seu oceano.

## Agradecimentos

O autor principal agradece ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística pela concessão do afastamento temporário para realização de Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu.

## Contribuição dos Autores

Conceptualização: Soares, S. e Dalazoana, R.; Curadoria dos Dados: Soares, S.; Análise Formal e Investigação: Soares, S. e Dalazoana, R.; Metodologia: Soares, S.; Supervisão: Dalazoana, R.; Redação - minuta inicial: Soares, S.; Redação - revisão e edição: Soares, S. e Dalazoana, R.

## Conflitos de Interesse

Os autores declaram não haver conflitos de interesse.

## Referências

- Andersen, O. B., & Nilsson, B. (2025). *DTU25MSS Mean Sea Surface*. [Dataset]. Technical University of Denmark. <https://doi.org/10.11583/DTU.29412275.v1>
- Andersen, O. B., & Scharroo, R. (2011). Range and geophysical corrections in coastal regions: and implications for mean sea surface determination. In: S. Vignudelli, A. Kostianoy, P. Cipollini, & J. Benveniste (Eds.), *Coastal Altimetry*. Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-12796-0\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-642-12796-0_5)
- AVISO. (2025). *Mean Dynamic Topography - AVISO altimetry*. <https://www.aviso.altimetry.fr/en/applications/ocean/large-scale-circulation/mean-dynamic-topography.html>
- Birol, F., Bignalet-Cazalet, F., Cancet, M., Daguze, J.-A., Fkaier, W., Fouchet, E., Léger, F., Maraldi, C., Niño, F., Pujol, M.-I., & Tran, N. (2025). Understanding uncertainties in the satellite altimeter measurement of coastal sea level: insights from a round-robin analysis. *Ocean Science*, 21, 133–150. <https://doi.org/10.5194/os-21-133-2025>
- Bosch, W. (2002). The Sea Surface Topography and its Impact to Global Height System Definition. In: H. Drewes, A. H. Dodson, L. P. S. Fortes, L. Sánchez, & P. Sandoval (Eds.), *Vertical Reference Systems* (pp. 225-230). Springer-Verlag. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-04683-8\\_43](https://doi.org/10.1007/978-3-662-04683-8_43)
- Calado, L. G. L. P. (2023). *Estimativa do deslocamento vertical de estações maregráficas a partir da*

- modelagem de séries temporais de coordenadas GNSS*. [Tese de doutorado, Universidade Estadual Paulista]. Repositório Institucional UNESP. <https://hdl.handle.net/11449/253514>
- Chelton, D. B., Ries, J. C., Haines, B. J., Fu, L.-L., & Callahan, P. S. (2001). Satellite altimetry. In: L.-L. Fu & A. Cazenave (Eds.), *Satellite altimetry and the earth sciences: A handbook of techniques and applications* (pp. 1–131). Academic Press. <https://www.sciencedirect.com/bookseries/international-geophysics/vol/69>
- Cressie, N. A. C. (1993). *Statistics for Spatial Data*. John Wiley & Sons, Inc.
- Dalazoana, R., Luz, R. T., & Freitas, S. R. C. de. (2009). Estudos do NMM a partir de séries temporais maregráficas e de altimetria por satélites visando a integração da rede vertical brasileira ao SIRGAS. *Revista Brasileira De Cartografia*, 57(2). <https://doi.org/10.14393/rbcv57n2-44953>
- Decreto nº 9.759, de 11 de abril de 2019. (2019). Extingue e estabelece diretrizes, regras e limitações para colegiados da administração pública federal. Presidência da República. [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019-2022/2019/decreto/d9759.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2019/decreto/d9759.htm)
- Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN). (2017). *NORMAM 25: Normas da Autoridade Marítima para Levantamentos Hidrográficos* (2a ed.). Marinha do Brasil. <https://www.marinha.mil.br/dpc/sites/www.marinha.mil.br/dpc/files/bibliografia/qt/NORMAN-25-DHN.pdf>
- Dong, X., Zhang, R.-H., Hu, J., Gao, C., & Chen, M. (2025). Thermodynamic processes prolong triple La Niña events in a hybrid coupled ocean-atmosphere model. *Climate Dynamics*, 63(2). <https://doi.org/10.1007/s00382-024-07564-w>
- Dos Santos, M. C. (2019). Tendências modernas e questões relacionadas com a definição e realização de sistemas verticais: a experiência canadense. *Revista Brasileira de Cartografia*, 67, 1627–1639. <https://doi.org/10.14393/rbcv67n0-49252>
- Drewes, H., Kuglitsch, F., Adám, J., & Rózsa, S. (2016). The geodesist's Handbook 2016. *Journal of Geodesy*, 90(10), 907–1205. <https://doi.org/10.1007/s00190-016-0948-z>
- Ekman, M. (1989). Impacts of geodynamic phenomena on systems for height and gravity. *Bulletin Géodésique*, 63, 281–296. <https://doi.org/10.1007/BF02520477>
- Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI). (2026). *Litoral On-line*. Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia. <https://ciram.epagri.sc.gov.br/litoral-online>
- Fédération Internationale des Géomètres (FIG). (2006). *FIG Guide on the Development of a Vertical Reference Surface for Hydrography* (No. 37). <https://www.fig.net/resources/publications/figpub/pub37/pub37.pdf>
- Fédération Internationale des Géomètres (FIG). (2014). *Ellipsoidally Referenced Surveying for Hydrography* (No. 62). <https://www.fig.net/resources/publications/figpub/pub62/Figpub62.pdf>
- Feng, G., Jin, S., & Zhang, T. (2013). Coastal sea level changes in Europe from GPS, tide gauge, satellite altimetry and GRACE, 1993–2011. *Advances in Space Research*, 51(6), 1019–1028. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.09.011>
- Ferreira, V. G. (2011). *Solução do tipo Brovar para o Segundo Problema de Valor de Contorno da Geodésia com vistas à modernização de Sistemas de Altitudes*. [Tese de doutorado, Universidade Federal do Paraná]. Acervo Digital UFPR. <https://hdl.handle.net/1884/25954>
- Filmer, M. S., Hughes, C. W., Woodworth, P. L., Featherstone, W. E., & Bingham, R. J. (2018). Comparison between Geodetic and Oceanographic Approaches to Estimate Mean Dynamic Topography for Vertical Datum Unification: Evaluation at Australian Tide Gauges. *Journal of Geodesy*, 92(12), 1413–1437. <https://doi.org/10.1007/s00190-018-1131-5>
- Filmer, M. S., Johnston, P. J., Jayaswal, Z., Taylor, A., Chittleborough, J., Claessens, S. J., Seifi, F., Kuhn, M., Mccubbine, J., & Entel, M. (2024). Connecting Land and Sea Vertical Datums: A Data Evaluation for Developing Australia's AUSHYDROID Model. *Marine Geodesy*, 47(3), 183–213. <https://doi.org/10.1080/01490419.2024.2305898>

- Freitas, S. R. C., & Blitzkow, D. (1999). Altitudes e Geopotencial. *IGeS Bulletin*, 9, 47-62. <https://cartografica.ufpr.br/home/wp-content/uploads/2015/06/altitudesegeopotencial.pdf>
- Freitas, S. R. C., Medina, A. S., & Lima, S. R. S. (2002). Associated Problems to Link South American Vertical Networks and Possible Approaches to Face Them. In: H. Drewes, A. H. Dodson, L. P. S. Fortes, L. Sánchez, & P. Sandoval (Eds.), *Vertical Reference Systems* (pp. xx-xx). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-04683-8\\_59](https://doi.org/10.1007/978-3-662-04683-8_59)
- Fundação Universidade Federal do Rio Grande (FURG). (2026). *Sistema de Monitoramento da Costa Brasileira (SiMCosta)*. Centro de Estudos dos Oceanos e Clima. <https://www.simcosta.furg.br/home>
- Guimarães, G. N., & Blitzkow, D. (2011). Problema de valor de contorno da Geodésia: uma abordagem conceitual. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 17(4). <https://doi.org/10.1590/S1982-21702011000400007>
- Guimarães, G. N., Blitzkow, D., Matos, A. C. O. C. de, Castro Junior, C. A. C., & Inoue, M. E. B. (2020). 30 anos de Medições Gravimétricas Absolutas no Brasil. *Revista Brasileira De Cartografia*, 72(1), 159-176. <https://doi.org/10.14393/rbcv72n1-50229>
- Guimarães, G. N., Blitzkow, D., Matos, A. C. O. C. de, Silva, V. C., & Inoue, M. E. B. (2022a). O Estabelecimento do IHRF no Brasil: Situação Atual e Perspectivas Futuras. *Revista Brasileira De Cartografia*, 74(3), 651-670. <https://doi.org/10.14393/rbcv74n3-64949>
- Guimarães, G. N., Blitzkow, D., Matos, A. C. O. C. de, Silva, V. C., & Inoue, M. E. B. (2022b). O estabelecimento do IHRF e do ITGRF no Brasil: situação e perspectivas. [Trabalho apresentado]. *XII Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas*, Curitiba.
- Guimarães, G. N., Matos, A. C. O. C. de, & Blitzkow, D. (2024b). Connecting the Brazilian Vertical System to the International Height Reference Frame by estimating the vertical datum parameters. *Journal of South American Earth Sciences*, 142, 104990. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2024.104990>
- Guimarães, G. N., Matos, A. C. O. C. de, & Blitzkow, D. (2025). High-resolution regional gravity field modeling to connect the local vertical systems in South America to the IHRF. *Earth, Planets and Space*, 77, 98. <https://doi.org/10.1186/s40623-025-02226-5>
- Guimarães, G. N., Tocho, C., Piña, W. H. S., Matos, A. C. O. C. de, Gómez, A., Antokoletz, E. D., & Blitzkow, D. (2024a). *Guía 06: Directrices para el cálculo de los valores de potencial de gravedad en las estaciones IHRF de la región SIRGAS* (1a ed.). <https://doi.org/10.5281/zenodo.15476094>
- Guo, J., Wei, X., Li, Z., Jia, Y., Chang, X., & Liu, X. (2025). SDUST2023GRA\_MSS: the new global marine gravity anomaly model determined from mean sea surface model. *Scientific Data*, 12, 108. <https://doi.org/10.1038/s41597-025-04394-1>
- Heck, B. (2004). Problems in the Definition of Vertical Reference Frames. In: F. Sansò (Ed.), *V Hotine-Marussi Symposium on Mathematical Geodesy*. Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-10735-5\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-662-10735-5_22)
- Heck, B., & Rummel, R. (1990). Strategies for Solving the Vertical Datum Problem Using Terrestrial and Satellite Data. In: H. Siinkel & T. Baker (Eds.), *Sea Surface Topography and the Geoid* (pp. 116-128). Springer.
- Heiskanen, W. A., & Moritz, H. (1967). *Physical Geodesy*. W. H. Freeman.
- Hess, K. W., Schmalz, R. A., Zervas, C., & Collier, W. C. (1999). *Tidal constituent and residual interpolation (TCARI): A new method for the tidal correction of bathymetric data* (NOAA Technical Report NOS CS 4).
- Huang, J. (2017). Determining coastal mean dynamic topography by geodetic methods. *Geophysical Research Letters*, 44, 11125–11128. <https://doi.org/10.1002/2017GL076020>
- Huang, J., & Ågren, J. (2024). *IHRF CONVENTIONS – SIMPLIFIED* (Version 1.0). [https://ihrfcc.topo.auth.gr/wp-content/uploads/2024/08/IHRF\\_Conventions\\_Simplified\\_Jonas\\_v2.pdf](https://ihrfcc.topo.auth.gr/wp-content/uploads/2024/08/IHRF_Conventions_Simplified_Jonas_v2.pdf)
- Idžanović, M., Ophaug, V., & Andersen, O. B. (2017). The coastal mean dynamic topography in Norway observed by CryoSat-2 and GOCE. *Geophysical Research Letters*, 44, 5609–5617. <https://doi.org/10.1002/2017GL073777>
- Illiffe, J. C., Ziebart, M. K., & Turner, J. F. (2007). A new methodology for incorporating tide gauge data in

- sea surface topography models. *Marine Geodesy*, 30(4), 271–296. <https://doi.org/10.1080/01490410701568384>
- Iliffe, J. C., Ziebart, M. K., Turner, J. F., Talbot, A. J., & Lessnoff, A. P. (2013). Accuracy of vertical datum surfaces in coastal and offshore zones. *Survey Review*, 45(331), 254–262. <https://doi.org/10.1179/1752270613y.0000000040>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). (2009). *Esclarecimento sobre a relação entre o Datum Vertical do SGB (Imbituba e Santana) e os Níveis de Redução e “Zeros” Hidrográficos no Litoral Brasileiro*. [https://geoftp.ibge.gov.br/metodos\\_e\\_outros\\_documentos\\_de\\_referencia/outros\\_documentos\\_tecnicos/rmpg/relacao\\_dvs.gb\\_nr\\_zh.pdf](https://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/outros_documentos_tecnicos/rmpg/relacao_dvs.gb_nr_zh.pdf)
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). (2010). *Instruções técnicas para controle geodésico de estações maregráficas - CGEM e sua vinculação vertical ao Sistema Geodésico Brasileiro - SGB*. (Manuais técnicos em Geociências, n. 11). <https://www.ibge.gov.br/geociencias/metodos-e-outros-documentos-de-referencia/revista-e-manuais-tecnicos/15826-manual-tecnico-em-geociencias.html?edicao=16446&t=publicacoes>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). (2017). *Especificações e Normas para Levantamentos Geodésicos associados ao Sistema Geodésico Brasileiro*. [https://geoftp.ibge.gov.br/metodos\\_e\\_outros\\_documentos\\_de\\_referencia/normas/normas\\_levantamentos\\_geodesicos.pdf](https://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/normas_levantamentos_geodesicos.pdf)
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). (2019). *Reajustamento da rede altimétrica com números geopotenciais (2a ed.)*. Coordenação de Geodésia. <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101666.pdf>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). (2022, 28 de junho). *Censo 2022: informações de população e domicílios por setores censitários auxiliam gestão pública*. Notícias. <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/39525-censo-2022-informacoes-de-populacao-e-domicilios-por-setores-censitarios-auxiliam-gestao-publica>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). (2023). *Modelo hgeoHNOR2020 para conversão de altitudes geométricas em altitudes normais (2a ed.)*. Coordenação de Geodésia. <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv102048.pdf>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). (2024). *Adequação do limite leste do Sistema Costeiro-Marinho à Amazônia Azul*. <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/informacoes-ambientais/15842-biomas.html?edicao=41055&t=acesso-ao-produto>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). (2026). *Banco de Dados Geodésicos (BDG)*. <https://www.bdg.ibge.gov.br/appbdg/>
- Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). (2025). *IBAMA emite licença de operação para perfuração marítima no bloco FZA-M-59, na bacia da Foz do Amazonas*. Notas. <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/notas/2025/ibama-emite-licenca-de-operacao-para-perfuracao-maritima-no-bloco-fza-m-59-na-bacia-da-foz-do-amazonas>
- Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO (IOC–UNESCO). (2024). *State of the Ocean Report*. (IOC Technical Series, 190). <https://doi.org/10.25607/4wbg-d349>
- International Hydrographic Organization (IHO). (2024). *Resolutions of the International Hydrographic Organization*. (Publication M-3 – 2nd Edition 2010 - Updated July 2024). [https://iho.int/uploads/user/pubs/misc/M3-E-2024\\_July.pdf](https://iho.int/uploads/user/pubs/misc/M3-E-2024_July.pdf)
- Jahnmard, V., Delpeche-Ellmann, N., & Ellmann, A. (2021). Realistic dynamic topography through coupling geoid and hydrodynamic models of the Baltic Sea. *Continental Shelf Research*, 222. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278434321000789>
- Keysers, J. H., Quadros, N. D., & Collier, P. A. (2015). Vertical Datum Transformations across the Australian Littoral Zone. *Journal of Coastal Research*, 31(1), 119–128. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-12->

[00228.1](#)

- Lary, D. J., Alavi, A. H., Gandomi, A. H., & Walker, A. L. (2016). Machine learning in geosciences and remote sensing. *Geoscience Frontiers*, 7(1), 3-10. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.07.003>
- Le Traon, P. Y., Nadal, F., & Ducet, N. (1998). An Improved Mapping Method of Multisatellite Altimeter Data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 15(2), 522–534. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1998\)015<0522:aimmom>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1998)015<0522:aimmom>2.0.co;2)
- Luz, R. T. (2008). *Estratégias para modernização da componente vertical do Sistema Geodésico Brasileiro e sua integração ao SIRGAS*. [Tese de doutorado, Universidade Federal do Paraná]. Acervo Digital UFPR. <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/17075>
- Luz, R. T. (2016, 16 a 18 de novembro). Atividades para Integração das Superfícies de Referência Vertical na Zona Costeira Brasileira. [Trabalho apresentado]. *Simpósio SIRGAS*, Quito, Equador. [https://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol21/48\\_Luz\\_2016\\_IntegracionSuperficiesVerticalesCosteras.pdf](https://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol21/48_Luz_2016_IntegracionSuperficiesVerticalesCosteras.pdf)
- Mäkinen, J. (2021). The permanent tide and the International Height Reference Frame IHRF. *Journal of Geodesy*, 95, 106. <https://doi.org/10.1007/s00190-021-01541-5>
- Marinha do Brasil. (2023). *Amazônia Azul*. [https://www.mar.mil.br/hotsites/amazonia\\_azul/index.html](https://www.mar.mil.br/hotsites/amazonia_azul/index.html)
- Marinha do Brasil. (2024). *Sondagem Batimétrica*. Centro de Hidrografia da Marinha. <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-segnav-lev-hidro/sondagem-batimetrica>
- Mather, R. S. (1974). On the Solution of the Geodetic Boundary Value Problem for the Definition of Sea Surface Topography. *Geophysical Journal International*, 39(1), 87–109. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1974.tb05440.x>
- Mazloff, M. R., Gille, S. T., & Cornuelle, B. (2014). Improving the geoid: Combining altimetry and mean dynamic topography in the California coastal ocean. *Geophysical Research Letters*, 41, 8944–8952. <https://doi.org/10.1002/2014GL062402>
- Michalski, M. (2023). *Introduction to tidal & geodetic vertical datums*. NOAA/National Ocean Service. [https://tidesandcurrents.noaa.gov/datum-updates/assets/pdf/VA\\_April\\_2023\\_Tidal\\_geodetic\\_Presentation.pdf](https://tidesandcurrents.noaa.gov/datum-updates/assets/pdf/VA_April_2023_Tidal_geodetic_Presentation.pdf)
- Ministério do Meio Ambiente (MMA). (2018). *Programa Nacional para Conservação da Linha de Costa – PROCOSTA*. Secretaria de Recursos Hídricos e Qualidade Ambiental. [https://antigo.mma.gov.br/images/arquivos/gestao\\_territorial/Procosta/PROCOSTA-versao\\_digital.pdf](https://antigo.mma.gov.br/images/arquivos/gestao_territorial/Procosta/PROCOSTA-versao_digital.pdf)
- Mulet, S., Rio, M.-H., Etienne, H., Artana, C., Cancet, M., Dibarboure, G., Feng, H., Husson, R., Picot, N., Provost, C., & Strub, P. T. (2021). The new CNES-CLS18 global mean dynamic topography. *Ocean Science*, 17, 789–808. <https://doi.org/10.5194/os-17-789-2021>
- Myers, E. P., Wong, A., & Hess, K. (2005). Development of a national VDatum, and its application to sea level rise in North Carolina. [Trabalho apresentado]. *U.S. Hydrographic Conference*, San Diego, CA, USA.
- Myers, E., Hess, K., & Yang, Z. (2007). VDatum and strategies for national coverage. [Trabalho apresentado]. *Marine Technology Society/IEEE Oceans Conference*, Vancouver, British Columbia, Canada.
- Nações Unidas. (2019). *The Global Fundamental Geospatial Data Themes*. Department of Economic and Social Affairs, Statistic Division. [https://ggim.un.org/meetings/GGIM-committee/9th-Session/documents/Fundamental\\_Data\\_Publication.pdf](https://ggim.un.org/meetings/GGIM-committee/9th-Session/documents/Fundamental_Data_Publication.pdf)
- National Geodetic Survey (NGS). (2025). *Research Geoids — USGG and xGEOID*. <https://www.ngs.noaa.gov/research/geopotential-datums/research-geoids.shtml>
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2012). *VDatum Manual for Development and Support of NOAA's Vertical Datum Transformation Tool, VDatum (Version 1.01)*. [https://vdatum.noaa.gov/download/publications/Manual\\_2012.06.26.pdf](https://vdatum.noaa.gov/download/publications/Manual_2012.06.26.pdf)
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2023). *GRAV-D Project Homepage*. National Geodetic Survey. <https://geodesy.noaa.gov/GRAV-D/>

- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2025). *VDatum: Current Events*. <https://vdatum.noaa.gov/about/currentevents.html>
- Nilsson, B., Andersen, O. B., & Knudsen, P. (2025). Assessment of the performance of SWOT for observing the static ocean topography. *Geophysical Research Letters*, 52, e2024GL112290. <https://doi.org/10.1029/2024GL112290>
- Padilha, T. K. (2025). *Análise do uso da solução do tipo Brovar no PVCG fixado para a modelagem do geopotencial na estação IHRF PPTE*. [Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná]. Acervo Digital UFPR. <https://hdl.handle.net/1884/96848>
- Parker, B., Milbert, D. G., Wilson, R., Hess, K. W., Bailey, J., Berry, R., Fowler, C., & Gesch, D. (2001). A Tampa Bay bathymetric / topographic digital elevation model with internally consistent shorelines for various datums. [Trabalho apresentado]. *Twelfth Biennial International Symposium of the Hydrographic Society*, University of East Anglia, Norwich, UK. [https://vdatum.noaa.gov/download/publications/2001\\_parker\\_TampaDEM.pdf](https://vdatum.noaa.gov/download/publications/2001_parker_TampaDEM.pdf)
- Parker, B., Milbert, D., Hess, K., & Gill, S. (2003). *National Vdatum - The Implementation of a National Vertical Datum Transformation Database* [Relatório Técnico]. National Ocean Service. [https://vdatum.noaa.gov/download/publications/2003\\_parker\\_USHydro\\_nationalvdatum.pdf](https://vdatum.noaa.gov/download/publications/2003_parker_USHydro_nationalvdatum.pdf)
- Passaro, M., Cipollini, P., Vignudelli, S., Quartly, G. D., & Snaith, H. M. (2014). ALES: A multi-mission adaptive subwaveform retracker for coastal and open ocean altimetry. *Remote Sensing of Environment*, 145, 173–189. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.008>
- Pineau-Guillou, L., & Dorst, L. (2013). Creation of Vertical Reference Surfaces at Sea Using Altimetry and GPS. In: Z. Altamimi & X. Collilieux (Eds.), *Reference Frames for Applications in Geosciences* (pp. xx-xx). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-32998-2\\_33](https://doi.org/10.1007/978-3-642-32998-2_33)
- Plag, H.-P., & Pearlman, M. (Eds.). (2009). *Global Geodetic Observing System: Meeting the requirements of a global society on a changing planet in 2020*. Springer.
- Ponte, M. R. (2006). Low-Frequency Sea Level Variability and the Inverted Barometer Effect. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 23(4), 619-629. <https://doi.org/10.1175/JTECH1864.1>
- Portaria GM/MPO nº 32, de 14 de março de 2025. (2025). Institui a Comissão Nacional de Geoinformação (CONGEO). Diário Oficial da União. <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/mpo-n-32-de-14-de-marco-de-2025-617960249>
- Pugh, D. T. (1987). *Tides, Surges and Mean Sea-Level*. John Wiley & Sons.
- Pugh, D. T. (2004). *Changing Sea Levels: Effects of Tides, Weather and Climate*. Cambridge University Press.
- Rasmussen, C. E., & Williams, C. K. I. (2006). *Gaussian Processes for Machine Learning*. MIT Press. <http://www.GaussianProcess.org/gpml>
- Renganathan, V. (2010). *Arctic Sea Ice Freeboard Heights from Satellite Altimetry*. [Tese de doutorado, University of Calgary]. Repositório Institucional. [https://www.ucalgary.ca/engo\\_webdocs/AB/10.20301\\_VRenganathan.pdf](https://www.ucalgary.ca/engo_webdocs/AB/10.20301_VRenganathan.pdf)
- Ribeiro, L. C., Guimarães, G. N. do, & Marotta, G. S. (2023). Combining terrestrial, marine, and satellite gravity data to compute gravity potential values at IHRF stations. *Applied Geomatics*, 15, 455–472. <https://doi.org/10.1007/s12518-023-00507-w>
- Ribeiro, L. C., Marotta, G. A., & Guimarães, G. N. (2022). Analysis of marine gravity data: study to the brazilian near coast geodetic stations in the context of the International Height Reference Frame. *Geociências*, 41(4), 943-961. <https://doi.org/10.5016/geociencias.v41i04.16937>
- Rio, M. H., & Hernandez, F. (2004). A mean dynamic topography computed over the world ocean from altimetry, in situ measurements, and a geoid model. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109(C12). <https://doi.org/10.1029/2003JC002226>
- Robin, C., Nudds, S., MacAulay, P., Godin, A., De Lange Boom, B., & Bartlett, J. (2016). Hydrographic Vertical Separation Surfaces (HyVSEPs) for the Tidal Waters of Canada. *Marine Geodesy*, 39(2), 195–222. <https://doi.org/10.1080/01490419.2016.1160011>

- Sánchez, L. (2002). *Determinación de alturas físicas en Colombia*. Institut Für Planetare Geodäsie Technische Universität Dresden.  
[https://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Determinacion\\_de\\_alturas\\_fisicas\\_en\\_Colombia.pdf](https://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Determinacion_de_alturas_fisicas_en_Colombia.pdf)
- Sánchez, L., & Sideris, M. G. (2017). Vertical datum unification for the International Height Reference System (IHR). *Geophysical Journal International*, 209(2), 570-586. <https://doi.org/10.1093/gji/ggx025>
- Sánchez, L., Ågren, J., Huang, J., Wang, Y. M., Mäkinen, J., Pail, R., Barzaghi, R., Vergos, G. S., Ahlgren, K., & Liu, Q. (2021). Strategy for the realisation of the international height reference system (IHR). *Journal of Geodesy*, 95(3), 33. <https://doi.org/10.1007/s00190-021-01481-0>
- Sánchez, L., Barzaghi, R., & Vergos, G. S. (2024, 4-6 de setembro). Towards a first solution for the International Height Reference Frame (IHRF). [Trabalho apresentado]. *GGHS2024 Joint Section 2, IGFS and GGOS Symposium "Gravity, Geoid and Height System 2024"*, Thessaloniki, Greece. [https://ihrfcc.topo.auth.gr/wp-content/uploads/2024/10/Sanchez\\_et\\_al\\_IHRF\\_Solution\\_GGHS2024.pdf](https://ihrfcc.topo.auth.gr/wp-content/uploads/2024/10/Sanchez_et_al_IHRF_Solution_GGHS2024.pdf)
- Santamaría-Gómez, A., Gravelle, M., Dangendorf, S., Marcos, M., Spada, G., & Wöppelmann, G. (2017). Uncertainty of the 20th century sea-level rise due to vertical land motion errors. *Earth and Planetary Science Letters*, 473, 24-32. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.05.038>
- Santana, F. R., Krueger, C. P., Santana, T. A., Nascimento, G. A. G., & Oliveira Junior, A. M. (2020). Cartas Náuticas com Modelos SEP: Evolução Histórica, e Perspectivas para Hidrografia Brasileira. *Revista Brasileira De Cartografia*, 72, 1299-1328. <https://doi.org/10.14393/rbcv72nespecial50anos-56616>
- Santana, T. A. (2024). *Desafios e perspectivas para a vinculação dos data verticais oceânicos a um referencial geodésico global*. [Tese de doutorado, Universidade Federal do Paraná]. Acervo Digital UFPR. <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/89992>
- Santana, T. A., & Dalazoana, R. (2020). Integração dos Referenciais Verticais Terrestre e Oceânico: Conceitos Relacionados, Projetos Desenvolvidos e Desafios. *Revista Brasileira De Cartografia*, 72(2), 345-364. <https://doi.org/10.14393/rbcv72n2-52611>
- Santana, T. A., & Dalazoana, R. (2022). Analysis of vertical reference levels in the brazilian coast: comparing local and global approaches. *Bulletin of Geodetic Sciences*, 28(3), e2022012. <https://doi.org/10.1590/s1982-21702022000300012>
- Santos, E. G. dos, Soares, S., & Klein, I. (2022). Avaliação da Variação Vertical Local Voltada à Integridade de Séries Temporais Maregráficas. *Revista Brasileira de Cartografia*, 74(4), 1003-1028. <https://doi.org/10.14393/rbcv74n4-66090>
- Seeber, G. (2003). *Satellite geodesy* (2a ed.). Walter de Gruyter.
- Service Hydrographique Et Océanographique De La Marine (SHOM). (2023). *Surfaces BathyElli v2.1 Descriptif de contenu du produit externe*. [https://services.data.shom.fr/static/specifications/Descriptif\\_Contentu\\_ProduitExterne\\_Bathyelli\\_v2\\_1.pdf](https://services.data.shom.fr/static/specifications/Descriptif_Contentu_ProduitExterne_Bathyelli_v2_1.pdf)
- Shi, L., & Myers, E. (2016). Statistical Interpolation of Tidal Datums and Computation of Its Associated Spatially Varying Uncertainty. *Journal of Marine Science and Engineering*, 4(4), 64. <https://www.mdpi.com/2077-1312/4/4/64/pdf>
- Silva, V. C. (2020). *Sistema Gravimétrico de Referência do estado de São Paulo: contribuição ao referencial geodésico*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. <http://doi.org/10.11606/D.3.2020.tde-05042021-153203>
- Silva, R., Noernberg, M., & Lopes, A. (2024). Challenges and responses to sea level rise in the context of climate change: A case study of the Paranaguá Estuarine Complex. *Ocean and Coastal Research*, 72(suppl 1), e24062. <https://doi.org/10.1590/2675-2824072.22127>
- Slobbe, D. C., Verlaan, M., Klees, R., & Gerritsen, H. (2013). Obtaining instantaneous water levels relative to a geoid with a 2D storm surge model. *Continental Shelf Research*, 52, 172-189. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2012.10.002>
- Slobbe, D. C., Sumihar, J., Frederikse, T., Verlaan, M., Klees, R., Zijl, F., Farahani, H. H., & Broekman, R.

- (2018a). A Kalman Filter Approach to Realize the Lowest Astronomical Tide Surface. *Marine Geodesy*, 41(1), 44-67. <https://doi.org/10.1080/01490419.2017.1391900>
- Slobbe, D. C., Klees, R., Verlaan, M., Zijl, F., Alberts, B., & Farahani, H. H. (2018b). Height system connection between island and mainland using a hydrodynamic model: a case study connecting the Dutch Wadden islands to the Amsterdam ordnance datum (NAP). *Journal of Geodesy*, 92, 1439–1456. <https://doi.org/10.1007/s00190-018-1133-3>
- Soares, S., Dalazoana, R., & Araki, H. (2025). Uma abordagem baseada em lógica fuzzy para o diagnóstico e planejamento da rede de nivelamento do Sistema Geodésico Brasileiro. *Revista de Geociências do Nordeste*, 11(2), 225–240. <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2025v11n2ID40465>
- Souza, L. M. de, Dalazoana, R., & Santana, T. A. (2025). Estimativas da Topografia do Nível Médio do Mar na costa brasileira por meio da Altimetria por Satélites: Estimates of Average Mean Dynamic Topography on the Brazilian coast using Satellite Altimetry. *Revista de Geociências do Nordeste*, 11(1), 922–935. <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2025v11n1ID38308>
- Tang, L., Shi, L., Meyers, E., Jeong, I., White, S., Riley, J., Peeri, S., Murry, N., Huang, L., Michalski, M., Fanelli, C., Hoang, C., & Graham, D. (2025). *Regional VDatum Upgrade for the U.S. West Coast: Tidal Datums, Tides Assimilation, Spatially Varying Uncertainty, and Topography of the Sea Surface* [Relatório Técnico]. NOAA Technical Memorandum NOS CS 61. [https://vdatum.noaa.gov/download/publications/TM-61\\_VDatum\\_WestCoast\\_SVU.pdf](https://vdatum.noaa.gov/download/publications/TM-61_VDatum_WestCoast_SVU.pdf)
- Tanguy, Y.-M., Jan, G., & Pastol, Y. (2014). Les références verticales maritimes en France: méthodologie de création des surfaces BATHYELLI. *Revue XYZ*, (140). [https://diffusion.shom.fr/shom\\_downloadable/download/freelink/product\\_id/412/](https://diffusion.shom.fr/shom_downloadable/download/freelink/product_id/412/)
- Todd, P., Martin, R. J., & Broadbent, G. J. (2004). Infrastructure supporting mapping of tidal planes and lines. [Trabalho apresentado]. *2004 Trans Tasman Surveyors Conference*, Auckland, New Zealand. [https://legacy.iho.int/mtg\\_docs/com\\_wg/IHOTC/IHOTC7/Infrastructure\\_Supporting\\_Mapping\\_of\\_Tidal\\_Planes\\_and\\_Lines\\_Paper.pdf](https://legacy.iho.int/mtg_docs/com_wg/IHOTC/IHOTC7/Infrastructure_Supporting_Mapping_of_Tidal_Planes_and_Lines_Paper.pdf)
- Tolkova, E., Tang, L., Riley, J., Jeong, I., & White, S. (2023). *VDatum Update for Chesapeake Bay, Delaware Bay, and Adjacent Waters: Tidal Datums, Sea Surface Topography, and Their Spatially Varying Uncertainties* [Relatório Técnico]. NOAA Technical Memorandum NOS CS 55. [https://vdatum.noaa.gov/download/publications/noaa\\_48085\\_DS1.pdf](https://vdatum.noaa.gov/download/publications/noaa_48085_DS1.pdf)
- Torge, W., & Müller, J. (2012). *Geodesy* (4a ed.). Walter de Gruyter.
- Turner, J. F., Iliffe, J. C., Ziebart, M. K., & Jones, C. (2010). Interpolation of tidal levels in the coastal zone for the creation of a hydrographic datum. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 27, 605–613. <https://doi.org/10.1175/2009JTECHO645.1>
- United Kingdom Hydrographic Office (UKHO). (2015). Admiralty VORF Notes and Caveats – Version 2.2 [Relatório Técnico]. UKHO. <https://data.admiralty.co.uk/portal/sharing/rest/content/items/d7b4de45ac4b4a7ca9aaecab37a59194/data>
- Vergos, G. S., Sánchez, L., & Barzaghi, R. (2024, 10-11 de outubro). Coordination Center for the IHRF. [Trabalho apresentado]. *GGOS Days 2024 Symposium*, Potsdam, Germany. [https://ihrfcc.topo.auth.gr/wp-content/uploads/2024/10/IHRFCC\\_GGOSDays2024.pdf](https://ihrfcc.topo.auth.gr/wp-content/uploads/2024/10/IHRFCC_GGOSDays2024.pdf)
- Vignudelli, S., Cipollini, P., Roblou, L., Lyard, F., Gasparini, G. P., Manzella, G., & Astraldi, M. (2005). Improved satellite altimetry in coastal systems: Case study of the Corsica Channel (Mediterranean Sea). *Geophysical Research Letters*, 32, L07608. <https://doi.org/10.1029/2005GL022602>
- Vu, D. T., Bonvalot, S., Seoane, L., Gabalda, G., Remy, D., Bruinsma, S., Bidet, Y., Bresson, A., Zahzam, N., Rouxel, D., Salaün, C., Lalancette, M.-F., Forsberg, R., Jensen, T., & Jamet, O. (2024). Potential of cold-atom airborne gravimetry to improve coastal gravity field and quasigeoid modelling. *Journal of Geodesy*, 98(4). <https://doi.org/10.1007/s00190-024-01839-0>
- Woodworth, P. L., Hughes, C. W., Bingham, R. W., & Gruber, T. (2012). Towards worldwide height system unification using ocean information. *Journal of Geodetic Science*, 2(4), 302–318.

<https://doi.org/10.2478/v10156-012-004-8>

Wöppelmann, G., & Marcos, M. (2016). Vertical land motion as a key to understanding sea level change and variability: vertical land motion and sea level change. *Reviews of Geophysics*, 54(1), 64–92.

<https://doi.org/10.1002/2015RG000502>

Wöppelmann, G., Zerbini, S., & Marcos, M. (2006). Tide gauges and Geodesy: a secular synergy illustrated by three present-day case studies. *Comptes Rendus Geoscience*, 338(14-15), 980–991.

<https://doi.org/10.1016/j.crte.2006.07.006>

Wu, Y., Andersen, O. B., Abulaitijiang, A., Wang, B., He, X., Shi, H., Luo, Z., & Wang, H. (2025). Marine quasi-geoid enhancement from SWOT wide-swath data and its mapping of mean dynamic topography over island areas. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 63, 4209920.

<https://doi.org/10.1109/TGRS.2025.3592243>

## Biografia do autor principal



Salomão Soares, natural do Rio de Janeiro, nascido em 1980. É Engenheiro Cartógrafo pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ, 2003) e Mestre em Estudos Populacionais e Pesquisas Sociais pela Escola Nacional de Ciências Estatísticas (ENCE, 2006). Atualmente, é doutorando em Ciências Geodésicas pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Atua como Tecnologista no Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), na Coordenação de Geodésia. Seus interesses de pesquisa incluem sistemas de referência vertical, altimetria por satélite e maregrafia.



Esta obra está licenciada com uma Licença [Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.