



MODELAGEM HIDRO-METEOCEANOGRÁFICA PARA VIAS FLUVIAIS E PORTOS – PREH VIA

DOI: 10.19177/rgsa.v8e12019881-906

**Aline Olivas Kaji¹, Danielle de Almeida Bressiani²
Maria Mercedes Gamboa-Medina³, Camila Cossetin Ferreira⁴,
Luiz Carlos Salgueiro Donato Bacelar⁵**



RESUMO

Apesar do grande potencial para o transporte aquaviário no Brasil, este modal ainda é pouco explorado. No entanto sua utilização para transporte de cargas, dados seus diferenciais competitivos (como menores custo e impactos ambientais, maior segurança e concentração de cargas), tem aumentado. Os recentes avanços da ciência, capacidade observacional e computacional no desenvolvimento de previsões ambientais mais confiáveis podem auxiliar no suporte à decisão e planejamento de operações ao longo de hidrovias e portos. Está sendo desenvolvida uma ferramenta de suporte ao planejamento e logística da navegação interior: PreHvia – Previsão Hidro-meteoceanográfica das vias fluviais e portos. Esta ferramenta web trará informações de previsão meteorológica e climática, assim como de vazão e cotas dos rios, e de altura d'água, corrente e onda na região próxima aos portos. Até o presente momento, o desenvolvimento da ferramenta é focado na região Amazônica, em especial para a hidrovia Tapajós-Amazonas e portos do Arquipélago da Ilha do Marajó, mas visiona a expansão para as demais hidrovias e portos brasileiros. Esse artigo discute as diversas metodologias e modelos numéricos, que estão sendo desenvolvidos e validados para previsões de tempo, clima, hidrológicas, hidrodinâmicas e oceânicas, assim como os resultados preliminares, dificuldades encontradas, os próximos passos e oportunidades para desenvolvimentos futuros. A ferramenta PreHvia é formada por quatro módulos principais: com modelos atmosférico e climático regionais, modelo hidrológico da bacia do Tapajós-Amazonas, modelo hidrodinâmico do Arquipélago de Marajó e modelo de ondas da região costeira e do Arquipélago de Marajó. Os diferentes modelos são acoplados formando um sistema de previsão de variáveis ambientais para os próximos dias, além do monitoramento e de uma climatologia e estatísticas que irão permitir o planejamento a longo prazo. A ferramenta fornecerá informações essenciais para um bom planejamento e operações eficientes, com maior segurança e menor riscos nas hidrovias e portos do país.

Palavras-chave: Portos. Hidrovias. Hidrologia. Hidrodinâmica. Meteorologia.

- ¹ Oceanógrafa pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) e tem mestrado em Engenharia Costeira pela Universidade de Tecnologia de Delft (TUDelft). Agência Brasileira de Meteorologia – Climatempo. E-mail: aline.kaji@climatempo.com.br ><<http://orcid.org/0000-0003-0913-7225>
- ² Agência Brasileira de Meteorologia – Climatempo. E-mail: danielle.bressiani@climatempo.com.br
- ³ Universidade de São Paulo. E-mail: mmgamboam@usp.br
- ⁴ Agência Brasileira de Meteorologia – Climatempo. E-mail: camila.ferreira@climatempo.com.br
- ⁵ Agência Brasileira de Meteorologia – Climatempo. E-mail: luiz.bacelar@climatempo.com.br

1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui enorme potencial para o modal de transporte aquaviário, no entanto este ainda é pouco explorado (Conselho Federal de Administração, 2013; Santana & Tachibana, 2010). Dadas as vantagens competitivas deste; por possibilitar menor custo operacional, menor impacto ambiental, além de segurança e concentração de carga (ANTAQ, 2011; Ripoll, 2010), o uso do modal vem crescendo para transporte de cargas (ANTAQ, 2013; Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil, Brasil, 2010). A previsão do uso deste modal para transporte de cargas para a próxima década é de significativo aumento; a estimativa do Governo Federal aponta para aumento maior que o dobro do uso atual.

Sendo assim as hidrovias e portos brasileiros podem desempenhar papel fundamental para o desenvolvimento e integração do país. Na Região Norte do Brasil o transporte aquaviário pelos rios da Bacia Amazônica sempre foi muito utilizado pelas populações. Devido à localização e potencial de navegabilidade da região o modal aquaviário tem crescido muito também para o transporte de cargas.

No entanto, existe uma limitação de dados na região norte do país (Bressiani *et al.*, 2015), frente à necessidade de informações e previsões para um bom planejamento e logística do transporte de carga. Além disso, apesar da região Amazônica ser bastante estudada, principalmente por ser uma região com características ambientais bastante particulares e únicas, ainda não existem estudos integrados que levem em consideração às diversas variáveis ambientais, nem uma ferramenta no país que englobe todas estas variáveis e previsões para auxiliar no suporte à decisão do setor.

O objetivo deste estudo é realizar, de forma consistente, a modelagem meteorológica, hidrológica, hidrodinâmica e oceânica para melhorar as previsões das variáveis ambientais que afetam a logística aquaviária nas hidrovias e portos e

possibilitar decisões mais informadas. Para isso, desenvolvemos uma ferramenta para suporte ao planejamento e logística da navegação interior e portos: PreHvia - Previsão Hidro-meteoceanográfica das vias fluviais e portos. A área de estudo para este artigo é a região Amazônica, em especial a hidrovia Tapajós-Amazonas e portos do Arquipélago da Ilha do Marajó, mas a ferramenta PreHvia visiona a expansão para as demais hidrovias e portos brasileiros.

A plataforma PreHvia será estruturada para prover o máximo de informações com base nas variáveis ambientais que possam auxiliar no suporte à decisão nas áreas de logística e navegação.

O desenvolvimento deste projeto possibilitará o avanço na área da ciência aplicada inter-relacionando: meteorologia, hidrologia, oceanografia e ambiental, com operacionalização; geração de informações para dar suporte à decisão para os setores de interesse; modelagem numérica de previsão para o médio e longo prazo, utilizando técnicas estatísticas para a correção, geração e validação de previsões por conjunto para a região Norte do país.

A ferramenta está sendo composta por quatro módulos principais:

Previsão meteorológica de médio (até quinze dias) e longo prazos (próximos meses) para a região Amazônica: composta por modelos numéricos de previsão testados com diferentes parametrizações físicas e resoluções espaciais e adaptados para a Região Norte do País, tendo os resultados comparados de modo a validar previsões mais confiáveis para a região com o horizonte de até quinze dias. Para a previsão climática dos próximos meses, previsões por conjunto de modelo climático mundial disponíveis serão utilizadas, após passarem por um pós-tratamento estatístico para a Região de interesse.

Previsão de Vazão e Cota para a Hidrovia do Tapajós-Amazonas: este sistema visa prover suporte ao planejamento e logística da navegação nessa hidrovia. Para este sistema está sendo desenvolvido um modelo hidrológico-ambiental semi-distribuído usando SWAT (*Soil & Water Assessment Tool*) (Arnold e Fohrer, 2005) para a Bacia do Tapajós e Amazonas, que será calibrado e validado. Para operacionalização o sistema será acoplado aos modelos meteorológicos, provendo previsão de vazão e cotas dos rios para os próximos dias e meses ao PreHvia.

Previsão de nível d'água e corrente nos portos do Arquipélago de Marajó: desenvolvimento de sistema de previsão hidrodinâmica para os principais portos do Arquipélago do Marajó, utilizando a suíte de modelos numéricos Delft3D. Este

sistema dará suporte à logística da navegação em áreas portuárias, provendo previsões para os próximos dias, possibilitando o planejamento do fluxo de embarcações nos portos. A validação do modelo foi realizada com os dados observados disponíveis e de sensoriamento remoto. Para operacionalização o sistema será acoplado aos modelos meteorológico e hidrológico.

Previsão de ondas na região costeira e adjacente aos portos do Arquipélago de Marajó:

este sistema fornecerá altura e período das ondas próximo aos portos e na região costeira adjacente possibilitando o planejamento do fluxo de embarcações nos portos. Para compor o sistema serão utilizados um modelo oceânico, já operacional WAVEWATCH-III (WW3), e o modelo de águas rasas SWAN (*Simulating Waves Nearshore*). O sistema será acoplado aos modelos meteorológico, hidrológico e hidrodinâmico.

Uma extensa base de dados foi desenvolvida para dar suporte à previsão, contendo dados observados provenientes de estações hidro-meteorológicas e de monitoramento ambiental públicas e privadas. Essa base de dados é constantemente atualizada de maneira automática. A análise de dados históricos serve de base para a calibração e validação dos modelos numéricos, bem como para o planejamento estratégico para logística portuária e navegação.

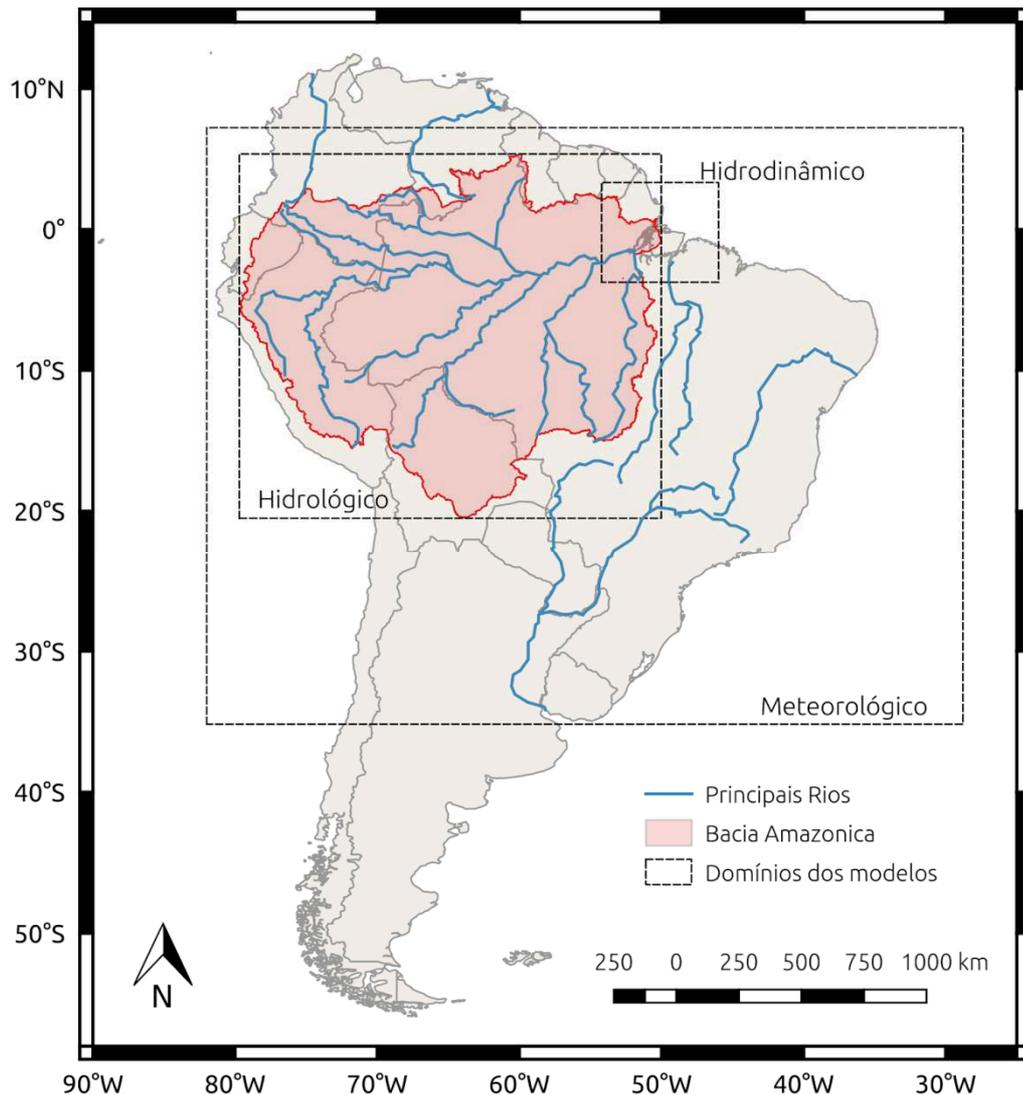
A área de estudo e um referencial teórico são descritos na seção 2. Já a metodologia para cada um dos sistemas de previsão é descrita na seção 3. Os resultados preliminares são descritos na seção 4. A análise dos resultados, bem como as dificuldades encontradas com a modelagem numérica de uma região extremamente complexa são discutidos na seção 4 e nas conclusões seção 5.

2. ÁREA DE ESTUDO

O projeto é focado na hidrovia do Tapajós-Amazonas e nos portos do Arquipélago de Marajó. As etapas do projeto possuem escalas espaciais diferentes: a previsão meteorológica engloba grande parte da América do Sul, a previsão hidrológica compreende a bacia do Amazonas e a previsão hidrodinâmica foca na região do Arquipélago de Marajó. A abrangência de cada um dos modelos é indicada na Figura 1.

Figura 1 - Área de estudo e as diversas escalas dos modelos meteorológico, hidrológico e hidrodinâmico





O clima da região Amazônica é classificado como equatorial, com um regime de chuvas regular e intenso durante todo ano e pouca variabilidade térmica. A distribuição da precipitação nessa vasta região não é homogênea, apresentando três núcleos com características semelhantes, agrupados segundo os totais de precipitação e os sistemas que os desencadeiam (HOREL *ET AL.*, 1989; FIGUEROA e NOBRE, 1990; MOLION, 1993). A primeira região apresenta os maiores volumes de chuva, aproximadamente 3500 mm/ano e se localiza nas encostas da Cordilheira dos Andes. O mecanismo que causa a maior parte desse volume é a convergência em baixos níveis, devido ao encontro dos ventos alísios com a montanha (Nobre, 1984; Villar *et al.*, 2009), além disso, a presença de linhas de instabilidade que se formam na costa e se deslocam contribui para esse total (Cohen, *et al.*, 2009). Os acumulados anuais na segunda região, ao longo da costa, próximo ao delta do Rio

Amazonas, são maiores que 3000 mm. Os fatores responsáveis por esses acumulados são as linhas de instabilidade que se formam nessa região (Cohen, 1989; Cohen *et al.*, 2009), a convergência noturna entre os ventos alísios e a brisa terrestre noturna e a convergência devido à diferença de rugosidade entre a superfície continental e o oceano (Molion, 1993). As regiões sudeste e centro-sul integram o terceiro núcleo, no qual os sistemas frontais de origem extratropical são a principal influência para organização da convecção (KOUSKY e FERREIRA, 1981; DE OLIVEIRA e NOBRE, 1995).

As regiões leste, central e sudoeste apresentam uma maior variabilidade anual da precipitação, com uma estação seca definida, devido à oscilação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) (MOLION, 1993). Quanto à variabilidade interanual, ela tem sido principalmente associada aos eventos de El Niño Oscilação Sul (ENOS) (ACEITUNO, 1988; MARENGO, 1995; NOBRE *et al.*, 2009).

Em relação à hidrologia, o trecho final e a foz do rio Amazonas, próximo do arquipélago de Marajó, faz parte da área do estudo, e, portanto, foi necessário considerar a bacia completa desse rio, e não somente a do rio Tapajós e as áreas que aportam diretamente à hidrovia Tapajós-Amazonas. A bacia do rio Amazonas é maior bacia do planeta com área de mais de 6 milhões de km²; ocupando territórios do Brasil, Peru, Equador, Bolívia, Colômbia, Venezuela e Guiana, conforme ilustrado na Figura 1. De sua área total, cerca de 3,89 milhões de km² encontram-se no Brasil, constituindo o 45% do país, abrangendo os estados do Acre, Amazonas, Roraima, Rondônia, Mato Grosso, Pará e Amapá (ANA, 2015). Com mais de 7 mil afluentes, possui 25 mil quilômetros de vias navegáveis. O rio Amazonas percorre cerca de 6.800km desde a cabeceira nos Andes peruanos a mais de 5mil metros de altura até sua foz, que fica no litoral norte do Brasil, onde entrega uma vazão média de 209.000 m³/s ao Oceano Atlântico

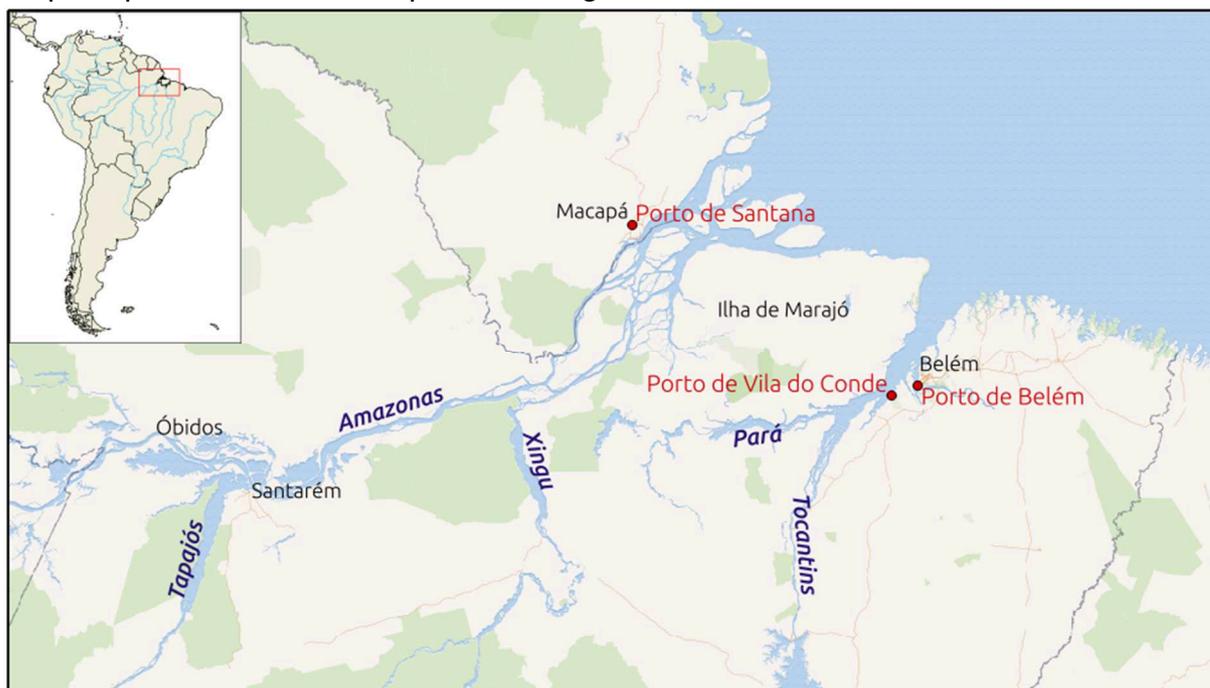
A modelagem hidrodinâmica foi focada no arquipélago de Marajó, localizado na foz dos rios Amazonas e Tocantins/Pará (Figura 2). Porém, devido à grande influência fluvial e as grandes amplitudes da maré, a área de estudo compreende (quase) toda a região do estuário do Amazonas que vai desde a cidade de Óbidos (limite interior) até a plataforma continental média (VINZON *et al.*, 2007). Apesar do limite marinho do estuário sofrer influência das correntes marinhas, o efeito dessas correntes na região dos portos é limitada (Prestes, 2016) e, portanto, neste momento não foram consideradas neste trabalho.

As principais forçantes físicas atuantes na região são a vazão fluvial e as marés. O rio Amazonas tem a maior descarga fluvial do mundo atingindo valores de mais de 270,000 m³/s durante o período de cheia entre maio e julho (Silva, 2009).

O rio Tocantins possui vazão média de aproximadamente 11,000 m³/s, que pode atingir até 50,000 m³/s no período de cheia, entre fevereiro e abril (Prestes, 2016), ambos atuam na região do Arquipélago de Marajó.

Já a maré astronômica da região é caracterizada como mesomaré, que possui amplitude em torno de 4 metros na foz do rio. As principais componentes astronômicas são a M2, S2, N2 (semi-diurnas), K1 e O1 (diurnas), havendo geração de componentes de águas rasas relevantes (M4 e Msf) (Gallo & Vinzon, 2015).

Figura 2 - Localização da área compreendida pelo modelo hidrodinâmico, incluindo os principais rios, cidades e portos da região

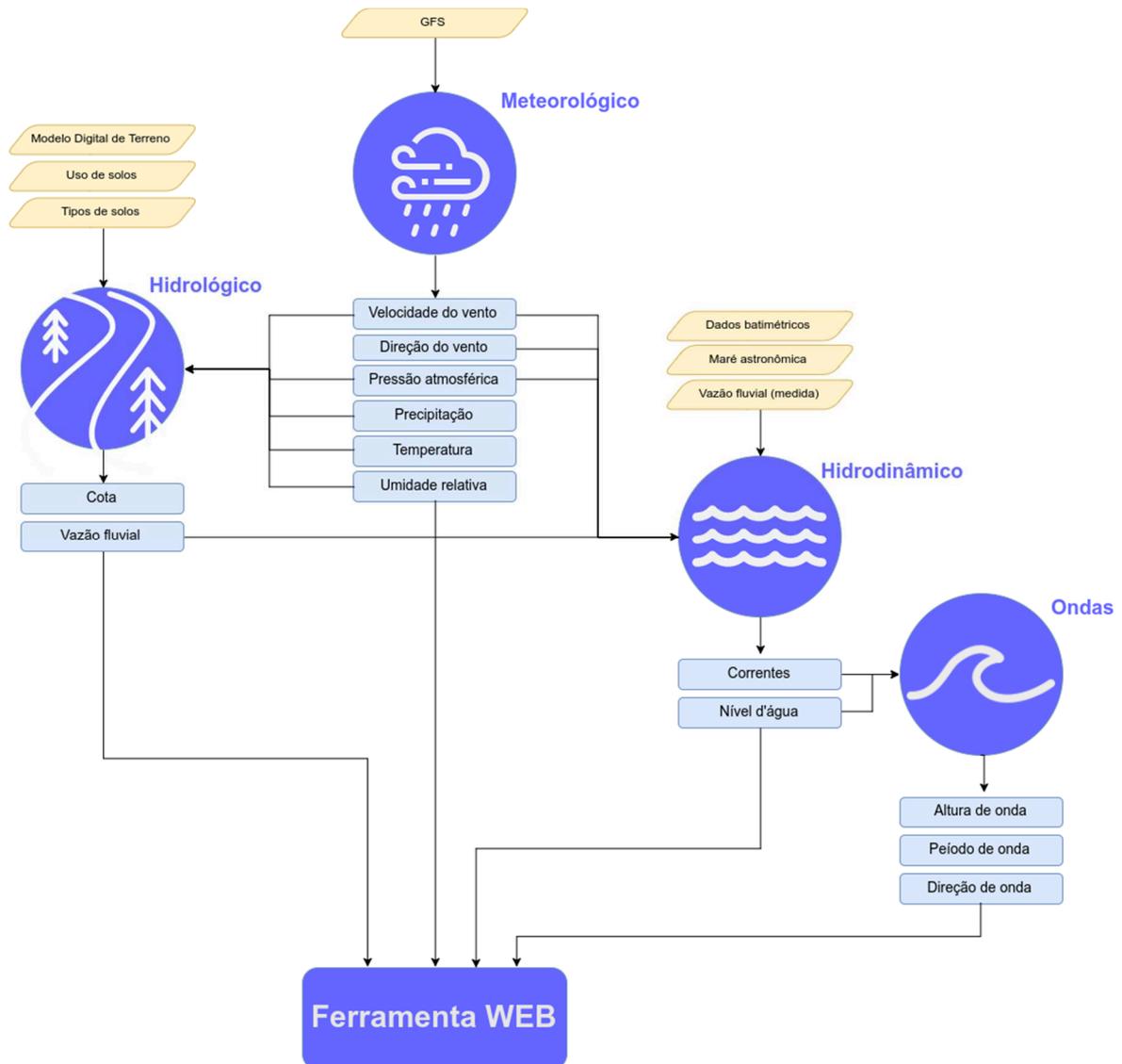


3. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do sistema de previsão hidro-meteorológica para a região foram utilizados diversos modelos numéricos. Esses modelos são acoplados uns aos outros e fornecem tanto previsão para os próximos dias, como as condições médias ao longo do ano para fins de planejamento a longo prazo. Um esquema da relação entre os diferentes modelos é ilustrado na Figura 3. Os modelos serão validados

através de comparação com dados medidos. Os diferentes modelos utilizados em cada um dos módulos são descritos a seguir.

Figura 3 - Visão geral da estrutura da ferramenta PreHvia.



3.1 Coleta e análise de dados

Foram coletados dados de diferentes fontes nacionais e internacionais, tais como: a Agência Nacional das Águas (ANA) e o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Foram consideradas as estações que estão dentro da bacia Amazônica e nas hidrovias de interesse. Esses dados são armazenados em bancos de dados relacionais e não-relacionais que são atualizados periodicamente através de um

sistema que coleta automaticamente os dados disponibilizados pelas diferentes fontes.

Foi realizado um levantamento da disponibilidade temporal dos dados para mapear estações com longos períodos de interrupção e eliminar possíveis pontos que pudessem alterar a análise estatística e para definir os melhores períodos para a calibração dos modelos numéricos (quando houvesse maior quantidade de dados e estações disponíveis).

Em seguida, foram calculados valores médios mensais e anuais para gerar uma climatologia hidro-meteorológica, que são utilizadas pelos modelos para completar dados faltantes. Os dados horários de nível d'água passaram por uma análise harmônica para definir amplitudes e fases dos principais componentes de maré.

Devido à escassez de dados e de estações hidro-meteorológicas na região Amazônica foi necessário ampliar a base de dados de precipitação por meio de interpolação e tratamento dos dados disponíveis. Para isso, dois métodos foram aplicados: interpolação pelo inverso da distância e o método da análise objetiva de Barnes (Rozante *et al.*, 2010) para combinar dados do hidro-estimador (estimativa de precipitação através da conversão da temperatura de brilho da leitura do satélite GOES-16), da *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM), *Global Precipitation Measurement* (GPM) e dados das estações pluviométricas. Esses dados são de extrema importância para a modelagem hidrológica e meteorológica.

3.2 Previsão meteorológica para a região Amazônica

As previsões de precipitação e vento são fundamentais para assegurar a navegabilidade e colaborar com o planejamento nas hidrovias e portos. Essas previsões servem de alicerce para todo o projeto, pois são usadas como dados de entrada para os modelos: hidrológico, hidrodinâmico e de ondas.

Para atender tanto o dia a dia das operações, quanto auxiliar no planejamento de longo prazo, no PreHvia serão utilizados dois modelos: um modelo regional de mesoescala, o *Weather Research and Forecast - WRF-ARW v3.9* (Skamarock *et al.*, 2008), responsável pelas previsões de curto e médio prazos e um modelo climático, o *Coupled Forecast System - CFS v2* (Saha *et al.*, 2014), que irá fornecer as previsões sazonais.

O modelo WRF roda com resoluções de 27 e 9 Km para toda a América do Sul e foi adaptado, por meio de mudanças em parametrização física, para as condições tropicais. Um sistema de previsão por conjunto, utilizando outros tipos de parametrizações, está desenvolvido para integrar o escopo do projeto. O uso desses sistemas demonstra ter grandes vantagens, pois, oferece ao usuário uma faixa de valores prováveis e, assim, dá subsídios para o seu processo de decisão.

O CFS é um sistema dinâmico de previsão sazonal, com acoplamento completo entre oceano-superfície-atmosfera, cada uma dessas componentes tem um modelo específico e mecanismos de troca entre suas variáveis. Esse sistema se tornou operacional no *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) em 2004 e possui um conjunto de vinte membros rodando em tempo real e escala global.

Os membros diferem em relação a data em que foram inicializados, começando cinco dias antes da data da rodada e utilizando os quatro horários de inicialização (00, 06, 12 e 18h). As previsões do CFS têm saídas de 6 em 6 horas e previsões, que se estendem para 9 meses futuros. Somente quatro membros desse conjunto são disponibilizados publicamente e já estão sendo utilizados para este projeto, para que o conjunto se torne mais robusto os quatro membros dos quatro horários de inicialização serão utilizados simultaneamente para cada tempo de previsão, criando um conjunto persistente de 16 membros. Atualmente, estão sendo trabalhados os dados de série histórica do CFS, para avaliação do comportamento do modelo na região de estudo. O objetivo dessa avaliação é elaborar uma estratégia para correção dos erros sistemáticos do modelo e aplicação de métodos de pós-processamento.

3.2 Previsão hidrológica para a Bacia do Rio Amazonas

Com o objetivo de simular o balanço hídrico e prever as vazões na Bacia do Rio Amazonas, foi construído um modelo computacional de base física e semi-distribuído utilizando o programa *SWAT (Soil & Water Assessment Tool)* (Arnold *et al.*, 2005). Os modelos em SWAT são amplamente utilizados para aplicações hidrológicas no mundo e no Brasil (Arnold *et al.*, 1998; Arnold *et al.*, 2005; Gassman *et al.*, 2007; Bressiani *et al.*, 2015). Ao ser um modelo de base física são consideradas as características principais de uma bacia, incluindo topografia, solos, coberturas, e meteorologia. Por outro lado, como modelo semi-distribuído permite a

análise de sub-bacias e em consequência a previsão das vazões e níveis d'água em diversos pontos da hidrografia.

O modelo hidrológico inclui toda a bacia do rio Amazonas, e considera as sub-bacias dos principais rios da bacia com diferentes níveis de detalhamento. Em particular, para a sub-bacia do Rio Tapajós, as principais variáveis hidrológicas que influenciam na navegação são simuladas em alta resolução espacial, o que oferece mais informações sobre os canais navegáveis.

Inicialmente, foi necessária a construção de um modelo digital de elevação do terreno da bacia, a partir da informação derivada da “Missão Topográfica Radar *Shuttle*” (SRTM, pela sigla em inglês) (Jarvis, 2008). O processamento e análise deste foi utilizado para a definição da rede de drenagem (hidrografia) e divisão de sub-bacias utilizado o algoritmo TauDEM (Tarboton & Ames, 2001), que também é utilizado pelo SWAT.

Ao modelo de elevação do terreno e de hidrografia foi integrada informação local (IBGE) e global (Batjes, 2016) sobre tipos de solo. A classificação de tipos de solo é utilizada para a definição de valores de propriedades hidrológicas dos solos, como condutividade hidráulica, entre outros. Os valores das propriedades hidrológicas foi calculado para cada tipo de solo da base de dados global, de menor resolução, utilizada na bacia fora do território do Brasil. Os dados de melhor resolução, dentro do Brasil, não incluem as propriedades hidrológicas, de forma que valores pontuais calculados foram regionalizados combinando tipos de solo e distribuição geográfica.

O mencionado cálculo dos valores das propriedades hidrológicas do solo é necessário porque há escassas informações diretamente obtidas para a região do estudo, de forma que essas propriedades têm que ser inferidas de propriedades mais facilmente estabelecidas e disponíveis, usando para tanto equações de pedo transferência propostas por TOMASELLA et al. (2000).

Além das propriedades hidrológicas relacionadas ao tipo do solo, a resposta hidrológica depende da cobertura do solo. Mapas de uso de solo de diferentes anos foram analisados (Ribeiro *et al*, 2014). Para integração no modelo hidrológico, todos os dados mencionados foram geoprocessados com o auxílio do complemento do SWAT no programa para processamento de sistemas de informação geográfica QGIS: o QSWAT (DILE *et al.*, 2016). Outras características especiais da bacia são consideradas, mas não detalhadas aqui por brevidade.

As entradas para o modelo hidrológico são completadas pelas informações meteorológicas, Dados históricos diários de temperatura, umidade, radiação, vento, pressão e precipitação, provenientes das estações meteorológicas do INMET) e dados observados de precipitação, vazão e cotas da rede de estações da ANA, além de outros adquiridos, foram referidos na seção Coleta e análise de dados deste artigo. Durante operação da ferramenta, as previsões meteorológicas serão utilizadas para a simulação hidrológica e posterior obtenção das previsões de vazão e nível de interesse.

3.4 Previsão hidrodinâmica do Arquipélago de Marajó

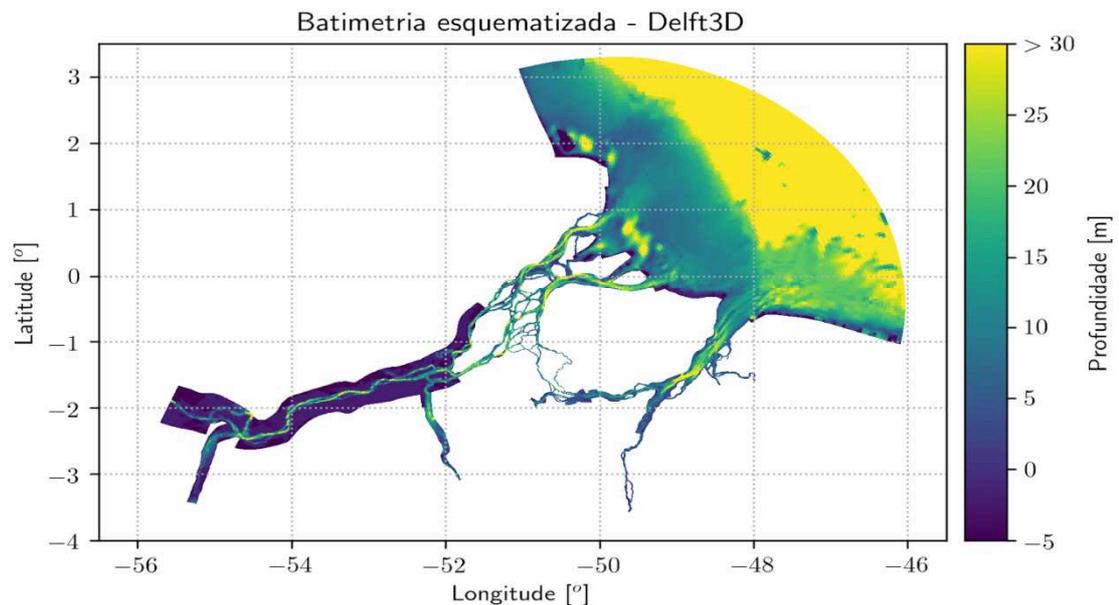
Para a previsão de nível d'água e corrente nos portos do Arquipélago de Marajó foi utilizado o software Delft3D. O Delft3D é composto por um conjunto de modelos numéricos para o cálculo de condições hidrodinâmicas, transporte de sedimentos, variações morfológicas e qualidade de águas em ambientes fluviais, estuarinos e costeiros (DELTARES, 2014). Ele é composto por diversos módulos, sendo o FLOW a parte responsável pelo cálculo do nível d'água e correntes. O Delft3D-FLOW resolve as equações de águas rasas não-lineares em 2 ou 3 dimensões. Essas equações são baseadas em simplificações das equações de Navier-Stokes para escoamentos incompressíveis.

O modelo foi dividido em 8 sub-domínios que funcionam de maneira interligada. Os sub-domínios possuem diferentes resoluções espaciais para poder representar adequadamente os rios e afluentes com dimensões bastante variadas. Dessa forma, uma grade mais grosseira é implementada na região costeira/oceânica enquanto uma grade mais refinada é utilizada nos canais menores como por exemplo no Porto de Santana. A batimetria é baseada nas cartas náuticas da Marinha do Brasil (Centro de Hidrografia da Marinha), na base de dados global GEBCO (GEBCO, 2014) e em medições locais próximas aos portos (GREGÓRIO, 2008). As profundidades foram convertidas do nível de referência local para um nível de referência global. A Figura 4 mostra a batimetria esquematizada do modelo hidrodinâmico.

O modelo possui rugosidade do fundo variável ao longo do domínio para correta representação das regiões de lama, característica da região da foz do

Amazonas. Essas áreas com alto teor de sedimento fino em suspensão reduzem a fricção do fundo e tem efeito importante na propagação da maré.

Figura 4 - Batimetria composta para o modelo hidrodinâmico.



O modelo é forçado pela vazão dos rios, pelo nível do mar na plataforma continental e pelo campo de vento obtido pelo modelo meteorológico. A variação do nível do mar é descrita pelas componentes astronômicas de maré derivadas do modelo *TOPEX/Poseidon Global Inverse Solution* (TPXO, EGBERT & EROFEEVA, 2002). A vazão dos rios principais é obtida através do modelo hidrológico e de dados medidos pela Agência Nacional de Águas (ANA), e para onde não há dados é feita uma estimativa com base nos dados observados e simulados.

Para a validação do modelo hidrodinâmico, os resultados do modelo foram comparados com dados medidos in-situ. Primeiramente, as componentes de maré dos dados de nível d'água nas estações da ANA e nos pontos de controle do modelo foram calculadas por meio da análise harmônica, utilizando o T-TIDE (Pawlowicz *et al.*, 2002). Então, a amplitude e fase das principais componentes de maré do modelo foram comparadas com os valores calculados para os dados da ANA e os valores fornecidos pelo BNDO. Nas estações onde há medições horárias de nível d'água os

dados também poderão ser comparados diretamente (ponto a ponto) no futuro para uma calibração mais detalhada.

Adicionalmente, analisaremos a variação espacial e temporal do nível médio do Rio Amazonas nas estações da ANA onde há medições diárias e por dados de altimetria derivados das bases de dados do DAHITI (Schwatke et al., 2015). O padrão de velocidade e direção das correntes será comparado qualitativamente com os dados observados e publicados na literatura. A vazão do estreito de breves será comparada com a informação fornecida em Silva (2009).

3.5 Previsão de ondas

A altura e período das ondas próximo aos portos são calculados com o modelo numérico SWAN (Simulating Waves Nearshore) (Booij *et al.*, 2002). Este é um modelo espectral de ondas de terceira geração, mantido pela Delft University of Technology, que calcula a agitação marítima gerada pelo vento com foco em regiões costeiras e águas interiores.

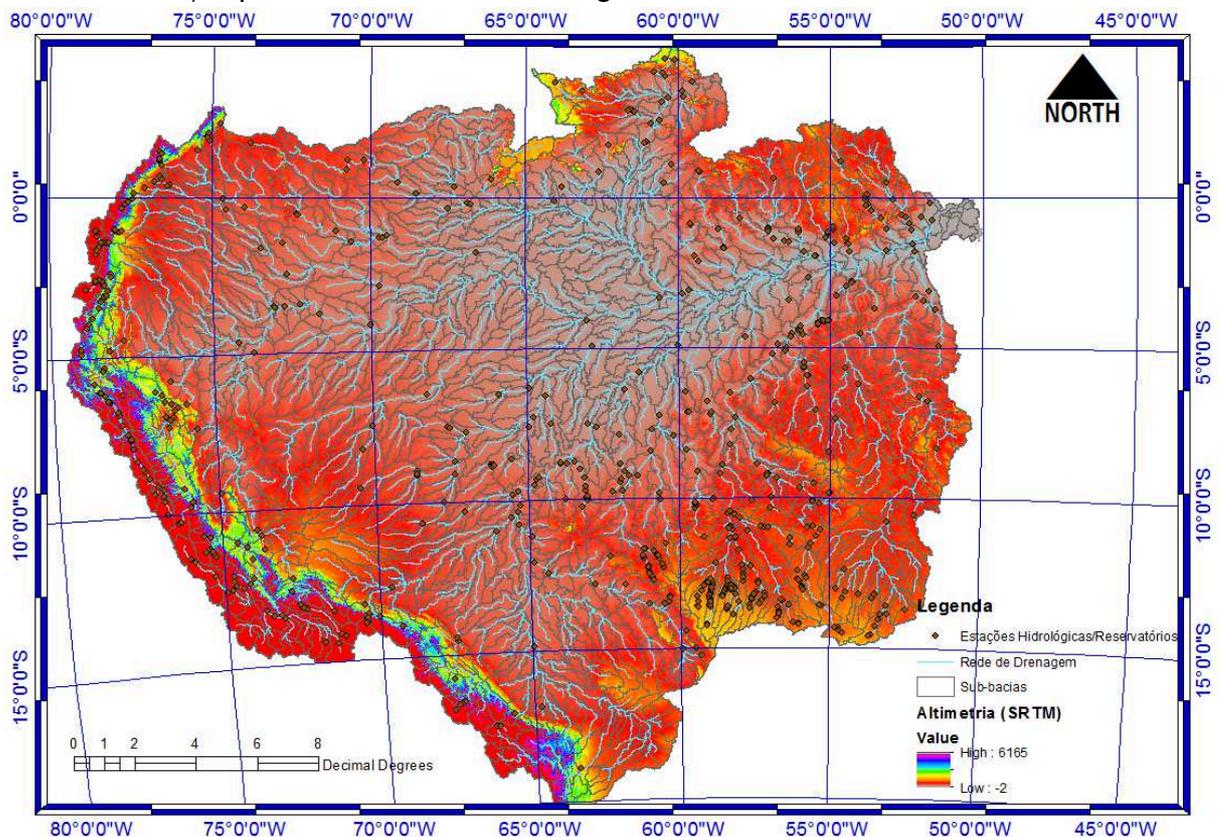
Esse modelo é aninhado ao modelo regional de ondas baseado no WAVEWATCH-III (WW3). O WAVEWATCH-III (WW3) versão 4.18 (Tolman, 2004) é um modelo de terceira geração, desenvolvido no Marine Modeling and Analysis Branch (MMAB) do Environmental Modeling Center (EMC) do National Centers for Environmental Prediction (NCEP).

O modelo regional do Atlântico Sul, tem resolução de 15 km e compreende toda a costa brasileira. Adicionalmente, é utilizado um domínio adicional abrangendo a costa do litoral norte do Brasil, com resolução de 10 km. O modelo é forçado pelo modelo meteorológico e validado com dados de altimetria e outros dados disponíveis. Esse modelo fornece condições de contorno para o modelo de águas rasas (SWAN). A resolução do modelo de águas rasas varia de 5km na região mais offshore a 500m próximo aos portos. A batimetria é baseada na batimetria do modelo hidrodinâmico. O modelo é forçado com o espectro de ondas derivado do WW3, do vento do modelo meteorológico WRF e do nível d'água e correntes do modelo hidrodinâmico Delft3D.

4 RESULTADOS

A Bacia Amazônica definida a partir do Modelo Digital de Elevação construído é apresentada na Figura 5, junto à rede de drenagem discretizada e as sub-bacias utilizadas na modelagem hidrológica, assim como alguns pontos de controle para os quais o modelo será calibrado e validado. Os pontos de controle (estações hidrológicas e reservatórios) foram levados em consideração para delimitação das sub-bacias. Foram delimitadas 1.962 sub-bacias para uma área de drenagem aproximada de 7.500.000 km².

Figura 5 - Bacia Amazônica: Altimetria, sub-bacias e rede de drenagem discretizados no modelo hidrológico SWAT. Pontos de controle (estações hidrológicas ou reservatórios) representados sob a drenagem.



As análises de tipos de solo, especificamente das suas propriedades hidrológicas, tiveram como resultado a determinação de 19 tipos de solo predominantes na bacia. Para cada tipo foi estabelecido, com base na informação disponível um perfil de solo médio, e para cada um dos seus horizontes valores das propriedades de interesse. Um exemplo dos dados destes perfis com a localização de seus pontos e os valores de condutividade hidráulica média para os horizontes do solo são apresentados na

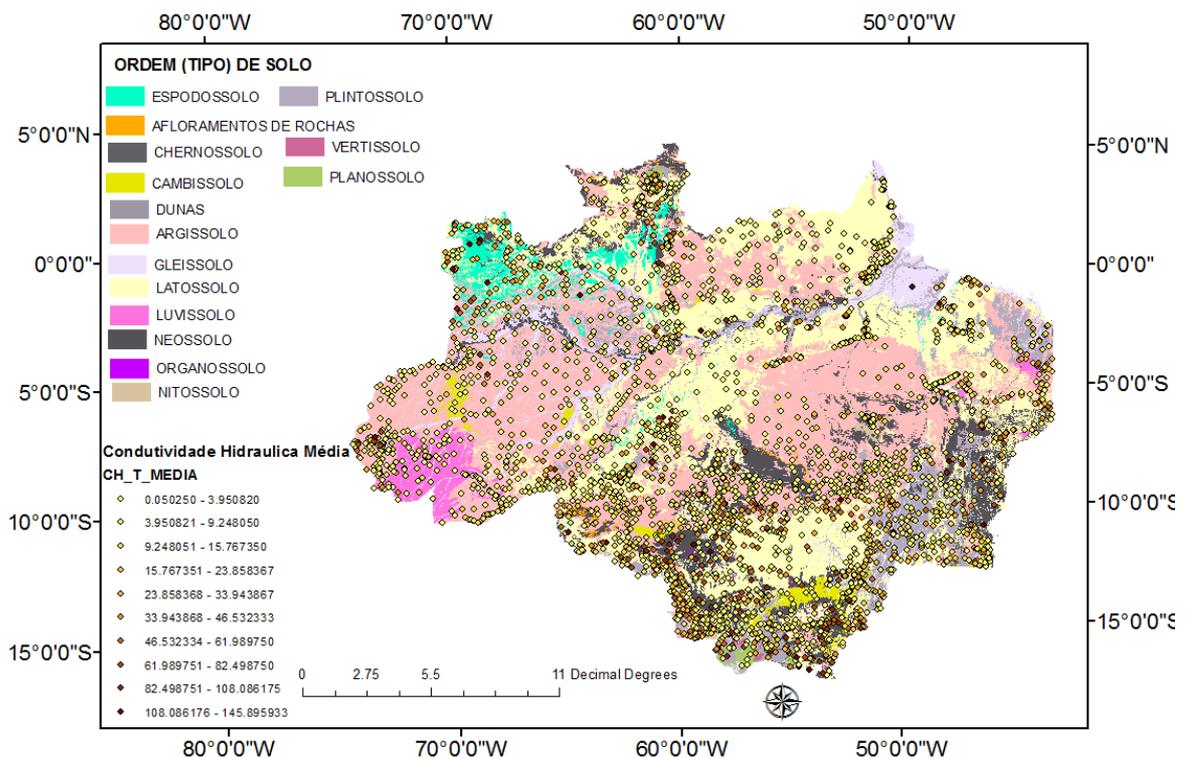
Figura 6. Dadas as diferentes características físicas da região e alguns padrões de tipos de solos foi adotada uma subdivisão das características dos tipos de solos em três regiões.

O SWAT usa um esquema de desagregação de dois níveis; uma identificação preliminar de sub-bacias é realizada com base em critérios topográficos, seguida por uma discretização adicional usando as considerações de uso e tipo de solo. Áreas com o mesmo tipo de solo e uso formam uma Unidade de Resposta Hidrológica (HRU), uma unidade computacional básica considerada homogênea na resposta hidrológica à mudança da cobertura da terra.

A partir do cruzamento das informações de tipos e usos dos solos e da declividade (do modelo digital de elevação) foram criadas 15.146 HRUs que representam o número de combinações entre os percentuais das classes de 331 tipos de solo e 15 diferentes usos da terra na bacia Amazônica em 5 classes de declividade do terreno.

Para calibração dos parâmetros das equações do balanço hídrico no modelo, foi escolhido o período entre os anos de 2000 e 2015 para maior representatividade atual das variáveis físicas em estudo. Os dados meteorológicos (precipitação, vento, radiação, umidade relativa e temperatura máxima e mínima) são condicionantes para as simulações das vazões. Assim como os postos hidrométricos de vazão e cota, com maior disponibilidade de dados para o período selecionado. Primeiramente será realizada uma calibração manual com base em "*soft-data*" e na sequência será feita uma calibração com enfoque na vazão, com o propósito de ajustar as vazões simuladas às vazões observadas nos postos de monitoramento hidrológico. Para isto está sendo utilizado o algoritmo SUFI2 do software SWAT-CUP 9 (ABBASPOUR, 2011). A calibração será realizada de acordo com o um procedimento sistematizado para calibração proposto por BRESSIANI (2016).

Figura 6 - Mapeamento de Tipos de Solos na área brasileira da Bacia; localização de perfis de solo e distribuição do parâmetro de condutividade hidráulica (Fonte: IBGE, <https://mapas.ibge.gov.br/tematicos/solos>).



Experimentos com o modelo hidrodinâmico, ainda não calibrado, apresentam resultados satisfatórios. A Figura 7 mostra a diferença entre os valores simulados e observados da componente M2 de maré. Em geral o modelo apresenta erros de menos de 10 cm, com algumas estações com maiores desvios. Os maiores erros são encontrados na foz do canal norte do Amazonas e ao longo da costa do Amapá, região onde há grande amplificação da maré devido aos bancos de lama adjacentes.

A amplitude da componente M2 é superestimada na foz do Rio Pará e no estreito de Breves. No caso do estreito de breves, isso ocorre provavelmente devido à diferenças na batimetria dos canais e pela desconsideração de diversos canais

menores na região. A região da foz do Rio Pará é provavelmente afetada pela distribuição de rugosidade do fundo.

As estações nos portos de Santana, Vila do Conde e Belém apresentam resultados bastante precisos, com erros na ordem de 2 cm. A Figura 8 mostra a série temporal do nível d'água observado e modelado na estação da COSANPA em Belém (PA), indicando que o modelo consegue representar a variação de maré suficientemente bem. Velocidades de correntes de maré de até 2.8 nós foram calculadas para a região adjacente ao Porto de Belém (Figura 9), o que está próximo dos valores indicados nas cartas náuticas da Marinha do Brasil (2.9 nós 1 hora antes da preamar durante maré de sizígia, Carta 320).

Figura 7 - Diferença em amplitude da componente M2 calculada pelo modelo hidrodinâmico (sem calibração) e observada. Valores negativos (em azul) indicam valores subestimados e valores positivos (em vermelho) indicam pontos superestimados pelo modelo.

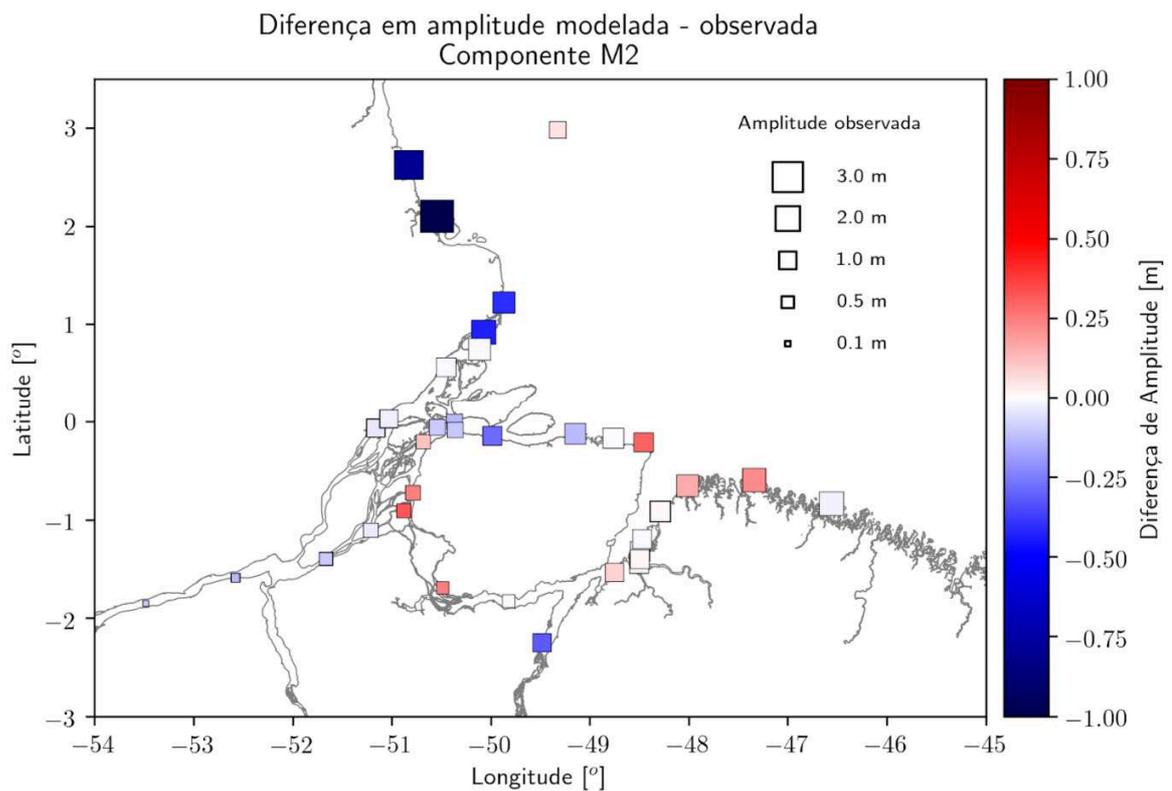


Figura 8 - Série temporal do nível d'água observado e modelado na estação da COSANPA em Belém (PA).

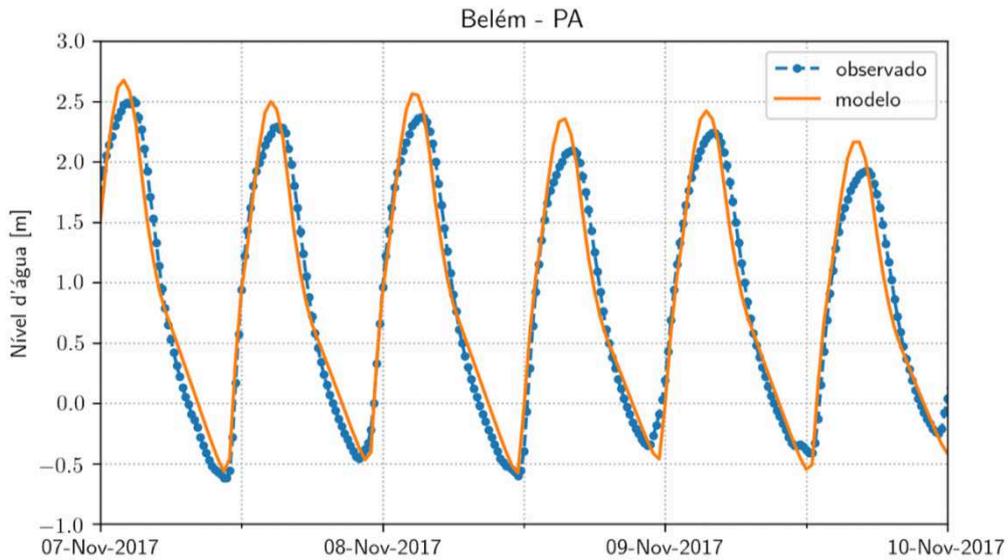
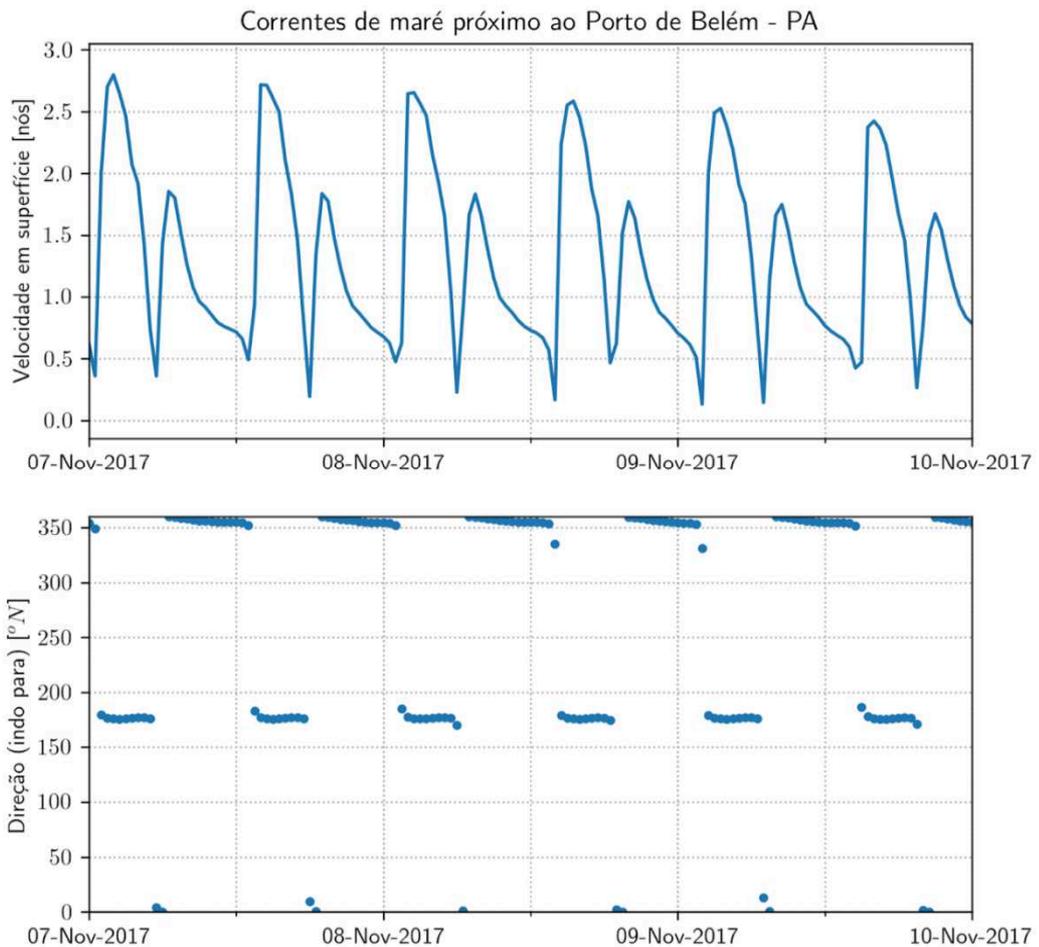


Figura 9 - Correntes de maré próximo ao Porto de Belém. Os valores de velocidade representam a média ao longo da coluna d'água. É mostrada a direção para a qual a corrente está fluindo (nesse local a maré enchente tem direção 180° com fluxo de norte para sul e a maré vazante tem direção 360° com fluxo de sul para norte).



5 CONCLUSÕES

Uma metodologia inovadora, que integra diferentes áreas de conhecimento, foi apresentada para melhorar a previsão de variáveis ambientais que impactam a operação em portos e a navegação interior. Os modelos já apresentam resultados muito promissores, mesmo sem calibração. Esse trabalho resultará em uma ferramenta web que dará suporte à tomada de decisão para empresas de logística, portos e gestores. Além de fornecer uma base de dados histórica para planejamento a longo prazo e estudos ambientais e científicos.

A ferramenta PreHvia consiste de um sistema integrado de previsão meteorológica, hidrológica e hidrodinâmica composta por diversos modelos numéricos robustos e conceituados. Resultados preliminares mostram o potencial da ferramenta de reproduzir as condições ambientais locais como vento, nível d'água, maré, correntes e vazão fluvial.

Como resultados finais desse projeto prevemos empresas mais informadas, resilientes na área de navegabilidade, minimizando os riscos e perdas econômicas. Além do avanço nas áreas ambiental, de meteorologia, hidrologia e oceanografia para a região Amazônica.



HYDROLOGICAL AND MET-OCEAN MODELLING FOR WATERWAYS AND PORTS - PREHVIA

ABSTRACT

Despite the great potential for transport via waterways in Brazil, this modal is still underused. However, cargo transport via waterways has increased in the last years due to its competitive differentials (such as lower cost and environmental impacts, increased safety and amount of cargo that can be transported). Recent scientific progress and increase in observational and computational capabilities lead to the development of more reliable environmental forecasts, which can assist in the decision making process and planning of operations along waterways and ports. We are developing a tool to support planning and logistics of inland navigation: Despite the great potential for water transportation in Brazil, this modal is still little explored. However, its use to transport cargo, given its competitive differentials (such as lower cost and environmental impacts, increased safety and cargo concentration), has increased. Recent advances in science, observational and computational capabilities

in the development of more reliable environmental forecasts can assist in the decision support and planning of operations along waterways and ports. A tool to support the planning and logistics of inland navigation is being developed: *PreHvia - hydrological and met-ocean forecast of ports and waterways*. This web platform will provide information on weather and climate forecast, river discharge, water levels, current and waves in the region near the ports. To date, the development of the tool is focused on the Amazon region, especially the Tapajós-Amazonas waterway and the ports of the Marajó Island Archipelago, but envisages the expansion to other Brazilian waterways and ports. This article discusses the various methodologies and numerical models that are being developed and validated for weather, climate, hydrologic, hydrodynamic and oceanic forecasts, as well as preliminary results, difficulties encountered, next steps and opportunities for future developments. The PreHvia tool is composed of four main modules: regional atmospheric and climatic models, hydrological model of the Tapajós-Amazonas basin, hydrodynamic model of the Marajó Archipelago and wave model of the coastal region and the Marajó Archipelago. The different models are coupled into a forecast system of several environmental variables, which combines local observations of the current conditions and the forecast for the coming days. Additionally, the system includes statistical analysis and climate forecast for the coming months to assist in the long-term planning. The tool will provide essential information for better planning and more efficient operations along waterways and ports, with increased safety and less risks.

Keywords: Ports. Waterways. Hydrology. Hydrodynamics. Oceanography. Meteorology.



REFERÊNCIAS

- Abbaspour, K. C. (2011). SWAT-CUP4: SWAT Calibration and Uncertainty Programs – A User Manual. Eawag, 2011.
- Aceituno, P. (1988) On the functioning of the southern oscillation in the South American sector. Part I: Surface climate. *Monthly Weather Review*, v. 116, n. 3, p. 505–524.
- ANA – Agência Nacional de Águas. (2015) Cojuntura dos recursos hídricos no Brasil: regiões hidrográficas brasileiras – Edição especial. Brasília, 2015
- ANTAQ - Agência Nacional de Transportes Aquaviários (2011). Estatísticas da navegação interior 2010.

- ANTAQ - Agência Nacional de Transportes Aquaviários (2013). Plano Nacional de Integração Hidroviária – PNIH (relatório de metodologia).
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., Williams, J. R., (1998). Large area hydrologic modeling and assessment: Part I. Model development. J. American Water Resour. Assoc. 34(1), 73-89.
- Arnold, J. G., Fohrer, N. (2005) SWAT2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling. Hydrol. Process. 19(3): 563-572.
- Batjes, N.H., Harmonized soil property values for broad-scale modelling (WISE30sec) with estimates of global soil carbon stocks. Geoderma. 269: 61-68
- Booij, N., Ris, R., and Holthuijsen, L. H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions: 1. model description and validation. Journal of geophysical research: Oceans, 104(C4):7649–7666.
- Bressiani, D. A., Gassman, P. W., Fernandes, J. G., Garbossa, L. H. P., Srinivasan, R., Bonumá, N. B., and Mendiondo, E. M. (2015). Review of soil and water assessment tool (SWAT) applications in Brazil: Challenges and prospects. International Journal of Agricultural and Biological Engineering , 8(3):9.
- Bressiani, D. A. (2016) Coping with hydrological risks through flooding risk index, complex watershed modeling, different calibration techniques, and ensemble streamflow forecasting. 04/Março/2016. 200 p. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo. São Carlos, 2016.
- Cohen, J. C. P. (1989). Um estudo observacional de linhas de instabilidade na Amazônia. Tese (Doutorado), INPE.
- Cohen, J., Cavalcanti, I., Braga, R., and Neto, L. (2009). Squall lines along the north-northeast coast of South America. Weather and Climate in Brazil, 75–93.
- CFA - Conselho Federal De Administração (2013). Plano Brasil de infraestrutura logística: Uma abordagem sistêmica. sistema CFA/CRAS.
- Deltares (2014). Delft3D-FLOW manual v. 3.15.34158
- de Oliveira, A.; Nobre, C. (1985). Meridional penetration of frontal systems in South America and its relation to organized convection in the Amazon.
- Dile, Y. T., Daggupati, P., George, C., Srinivasan, R., & Arnold, J. (2016). Introducing a new open source GIS user interface for the SWAT model. Environmental modelling & software, 85, 129-138.

CHM - Centro de Hidrografia da Marinha. Marinha do Brasil. Cartas Raster. Disponível em <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-segnav/cartas-raster>

Egbert, G. D. and Erofeeva, S. Y. (2002). Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 19(2):183–204.139

Figueroa, S. N. and Nobre, C. A. (1990). Precipitation distribution over central and western tropical south america. *Climanalise*, 5(6):36–45.

Gallo, M.; Vinzon, S. (2015). Estudo numérico do escoamento em planícies de marés do canal Norte (estuário do rio Amazonas). *RIBAGUA- Revista Iberoamericana del Agua*, 2(1):38–50.

Gallo, M. N. (2004). A influência da vazão fluvial sobre a propagação da maré no estuário do rio Amazonas. Master's thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Gassman, P. W., Reyes, M. R., Green, C. H., Arnold, J. G. (2007) The soil and water assessment tool: Historical development, applications, and future research directions. *Transactions ASAE*. 50(4), 1211–1250.

GEBCO - General Bathymetric Chart of the Oceans. Disponível em <https://www.gebco.net/>.



GPM - Global Precipitation Measurement | NASA. Disponível em https://www.nasa.gov/mission_pages/GPM/main/index.html

Gregório, A. M. S. (2008). Contribuição à gestão ambiental da Baía de Guajará Belém - Pará - Amazônia) através de estudo batimétrico e sedimentológico. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geociências.

Horel, J. D., Hahmann, A. N., and Geisler, J. E. (1989). An investigation of the annual cycle of convective activity over the tropical Americas. *Journal of Climate*, 2(11):1388–1403.

Jarvis, A., Reuter, H., Nelson, A. , and Guevara, E. “Hole-filled SRTM for the globe Version 4”. 2008.

Kousky, V. E. and Ferreira, N. J. (1981). Interdiurnal surface pressure variations in Brazil: their spatial distributions, origins and effects. *Monthly Weather Review*, 109(9):1999–2008.

- Marengo, J. A. (1995). Interannual variability of deep convection over the tropical South American sector as deduced from ISCCP C2 data. *International Journal of Climatology*, 15(9):995–1010.
- Ministério Dos Transportes, Portos E Aviação Civil, Brasil (2010). Plano nacional de logística e transportes: Um plano de estado, nacional e federativo. curso de logística e mobilização nacional 2010. Escola Superior de Guerra.
- Molion, L. C. B. (1993). Amazonian rainfall and its variability. *Hydrology and Water*.
- Nobre, C. A. (1984). The amazon and climate.
- Nobre, C. A., Obregón, G. O., Marengo, J. A., Fu, R., and Poveda, G. (2009). Characteristics of amazonian climate: main features. *Amazonia and Global Change*, edited by: Keller, M., Bustamante, M., Gash, J., Silva Dias, P., *Geophys. Mon. Ser.*, 186:149–162.
- Pawlowicz, R., Beardsley, B., and Lentz, S. (2002). Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE. *Computers & Geosciences*, 28(8):929–937.
- Prestes, Y. O. (2016). Interações Físicas Entre o Estuário do Rio Pará e a Plataforma Continental no Norte do Brasil. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Departamento de Oceanografia, Programa de Pós-graduação em Oceanografia.
- Ribeiro C B M, Mohanty B P, Bressiani D A, Fernandes J G, Rotunno Filho O C R. 2014. Parameterization of physical and climatic characteristics in the Amazon basin for hydrological simulation with SWAT model. Book of Abstracts of the 2014 SWAT Conference. Disponível em <https://swat.tamu.edu/media/99100/book-of-abstracts-final-2014-07-14.pdf>
- Ripoll, F. G. (2010). Proposta de uma análise logística no agronegócio como fator competitivo para a distribuição e comercialização da soja em grão no estado de mato grosso. Master's thesis, Universidade de Brasília, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Programa de Pós-Graduação em Agronegócios.
- Rozante, J. R., Moreira, D. S., de Goncalves, L. G. G., and Vila, D. A. (2010). Combining TRMM and surface observations of precipitation: Technique and validation over South America. *Weather and Forecasting*, 25(3):885–894.
- Saha, S., Moorthi, S., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Behringer, D., Hou, Y., Chuang, H., Iredell, M., *et al.* (2014). The NCEP climate forecast system version 2. *Journal of Climate*, 27(6):2185–2208.

- Santana, W. A. and Tachibana, T. (2010). Caracterização dos elementos de um projeto hidroviário, vantagens, aspectos e impactos ambientais para a proposição de metodologias técnico-ambientais para o desenvolvimento do transporte comercial de cargas nas hidrovias brasileiras. *Engevista*, 6(3).
- Schwatke, C., Dettmering, D., Bosch, W., and Seitz, F. (2015). DAHITI - an innovative approach for estimating water level time series over inland waters using multi-mission satellite altimetry: *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19, 4345-4364, doi:10.5194/hess-19-4345-2015.
- Silva, I. O. (2009). Distribuição da vazão fluvial no estuário do Rio Amazonas. Master's thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Wang, W., and Powers, J. G. (2008). A description of the advanced research WRF version 3. NCAR Technical Note -475+STR.
- Tarboton D., Ames D. P. (2001). Advances in the mapping of flow networks from digital elevation data. World Water and Environmental Resources Congress. ASCE, May 2001. <http://hydrology.usu.edu/taudem/taudem5/index.html>
- Tomasella, J., Hodnett, M., Rossato, L., Pedotransfer (2000). Functions for the Estimation of Soil Water Retention in Brazilian Soils. *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 64 No. 1, p. 327-338.
- Tolman, H. The Wavewatch III Development Group (2014), User Manual and System Documentation Of Wavewatch III version 4.18. Tech. Note 316, NOAA/NWS/NCEP/MMAB.
- Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) - NASA. Disponível em <https://trmm.gsfc.nasa.gov/>
- Villar, J. C., Ronchail, J., Guyot, J. L., Cochonneau, G., Naziano, F., Lavado, W., De Oliveira, E., Pombosa, R., and Vauchel, P. (2009). Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia, And Ecuador). *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 29(11):1574–1594.
- Vinzon, S., Gallo, M., da Silva, M. S., Fernandes, R. D., and Silva, I. (2007). Uma caracterização do estuário do Rio Amazonas, de Óbidos à plataforma continental. *Anais do 11o Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário*.