



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

JOSÉ LUCAS FERREIRA DE OLIVEIRA

AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DE EVENTOS EXTREMOS NA
MACRODRENAGEM DE FORTALEZA/CE

FORTALEZA

2025

JOSÉ LUCAS FERREIRA DE OLIVEIRA

AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DE EVENTOS EXTREMOS NA
MACRODRENAGEM DE FORTALEZA/CE

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto

FORTALEZA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

O47a Oliveira, José Lucas Ferreira de.
Avaliação dos impactos de eventos extremos na macrodrenagem de Fortaleza/CE / José Lucas Ferreira de Oliveira. – 2025.
46 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2025.
Orientação: Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto.

1. Macrodrenagem. 2. Marés. 3. Hidrodinâmica. 4. Precipitações. I. Título.

CDD 620

JOSÉ LUCAS FERREIRA DE OLIVEIRA

AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DE EVENTOS EXTREMOS NA
MACRODRENAGEM DE FORTALEZA/CE

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia Hidráulica e Ambiental da
Universidade Federal do Ceará, como
requisito parcial para a obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: 18/12/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Osny Enéas da Silva
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Silvano Porto Pereira
Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE)

AGRADECIMENTOS

À minha querida mãe, Luana Ferreira dos Santos, por todo aprendizado, amor e paciência para comigo e pelo sacrifício que a senhora fez, faz e fará por mim. A senhora soube lidar com todas as adversidades para me criar, tornando-me o homem honrado e determinado que sou.

Ao meu pai, Carlos Eduardo Cândido da Silva, que, apesar da distância e das dificuldades impostas na sua vida, soube me educar para o bom caminho.

À minha irmã, Maria Eduarda Ferreira Cândido, por me alegrar mesmo naqueles dias mais difíceis com o seu afeto extravagante, mesmo eu não transparecendo a reciprocidade, às vezes.

À minha companheira, Samara Estevam Sales, pelas inúmeras lições e carões que você me proporcionou, as quais formaram meu caráter. E é com você, minha pinguizinha, que eu desejo desbravar o mundo e alçar novos voos.

À minha segunda mãe, Erenilda Lucas Santana da Silva, que entrou em minha vida antes mesmo de eu entender como o mundo funcionava e que soube entregar o melhor de si em todos os momentos, mesmo eu não sendo grato corriqueiramente.

Às minhas tias-avós (não vou citar todas, evitando a discriminação) pelo cuidado para comigo durante toda a minha jornada desde o maternal.

Ao meu ilustre orientador, Iran Eduardo Lima Neto, que, além de meu professor, posteriormente, orientador, tornou-se um colega de trabalho e amigo.

Aos meus colegas de turma que, apesar do distanciamento provocado pelo progresso natural do curso de engenharia civil, puderam realizar o meu convívio acadêmico mais leve e harmonioso.

“E será que toda a criatura vivente que passar por onde quer que entrarem estes rios viverá; e haverá muitíssimo peixe, porque lá chegarão estas águas, e serão saudáveis, e viverá tudo por onde quer que entrar este rio” (Ezequiel 47:9).

RESUMO

O estudo aborda os impactos de eventos climáticos extremos na macrodrenagem de Fortaleza, com foco nos rios Cocó e Maranguapinho. A pesquisa parte da constatação de que o litoral cearense sofre com o avanço do mar, resultado da elevação global do nível oceânico, da erosão costeira e de intervenções humanas inadequadas. Paralelamente, observa-se um aumento expressivo na frequência e intensidade das chuvas intensas no Brasil, que têm provocado alagamentos, enchentes e prejuízos sociais e econômicos de grande escala. A fundamentação teórica explora os fatores que influenciam as marés, desde aspectos astronômicos até condições atmosféricas e topográficas, e os mecanismos de formação das precipitações intensas, classificadas por intensidade e duração. Também são discutidos conceitos de hidrodinâmica fluvial, com destaque para o risco hidrodinâmico, que relaciona profundidade e velocidade da água.

Metodologicamente, o trabalho utiliza o software RAS Alpha, aliado a um Modelo Digital de Terreno de alta resolução, para simular cenários de sobre-elevação marítima e chuvas extremas. As condições de contorno foram definidas para meses representativos (janeiro e outubro), permitindo avaliar isoladamente e em conjunto os efeitos das marés e das precipitações. Os resultados indicam que a intrusão marinha nos estuários pode alterar significativamente a configuração dos manguezais e ampliar áreas de risco de inundação. Conclui-se que a rede de drenagem de Fortaleza não está preparada para enfrentar tais transformações, sendo urgente o desenvolvimento de sistemas de alerta e medidas mitigadoras capazes de reduzir vulnerabilidades sociais, ambientais e econômicas.

Palavras-chave: macrodrenagem; marés; hidrodinâmica; precipitações.

ABSTRACT

The study addresses the impacts of extreme climatic events on the macro-drainage system of Fortaleza, focusing on the Cocó and Maranguapinho rivers. It begins by noting that the Ceará coastline suffers from sea encroachment, driven by global sea-level rise, coastal erosion, and poorly planned human interventions. At the same time, Brazil has experienced a sharp increase in the frequency and intensity of heavy rainfall, leading to floods, inundations, and large-scale social and economic losses. The theoretical framework explores the factors influencing tides, from astronomical aspects to atmospheric and topographic conditions, and the mechanisms behind heavy rainfall, classified by intensity and duration. It also discusses concepts of fluvial hydrodynamics, emphasizing hydrodynamic risk, which relates water depth to flow velocity. Methodologically, the research employs the RAS Alpha software, combined with a high-resolution Digital Terrain Model, to simulate scenarios of sea-level rise and extreme rainfall. Boundary conditions were defined for representative months (January and October), allowing the isolated and combined assessment of tidal and precipitation effects. Results show that marine intrusion into estuaries can significantly alter mangrove configurations and expand flood-prone areas. The study concludes that Fortaleza's drainage network is not adequately prepared to withstand such transformations, highlighting the urgent need for early warning systems and mitigation measures to reduce social, environmental, and economic vulnerabilities.

Keywords: macro-drainage; tides; hydrodynamic; precipitation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa atualizado com os núcleos erosivos em praias cearenses.	12
Figura 2 - Alagamento causado por uma chuva intensa em fevereiro de 2025 em Fortaleza.	14
Figura 3 - Formação das marés.	18
Figura 4 - Elementos da seção transversal de um rio.	23
Figura 5 - Evolução da temperatura dos oceanos.	24
Figura 6 - Temperatura média global por ano.	26
Figura 7 - Logo do RAS Alpha.	29
Figura 8 - Variação da maré otimista em outubro.	32
Figura 9 - Variação da maré pessimista em outubro.	32
Figura 10 - Variação da maré otimista em janeiro (sem chuva).	33
Figura 11 - Variação da maré pessimista em janeiro (sem chuva).	33
Figura 12 - Variação da maré atual em janeiro (com chuva).	33
Figura 13 - Hidrograma de outubro na foz do Rio Cocó.	34
Figura 14 - Hidrograma de janeiro, sem chuva, na foz do Rio Cocó.	34
Figura 15 - Hidrograma de janeiro, com chuva, na foz do Rio Cocó.	35
Figura 16 - Hidrograma, na condição atual, na foz do Rio Cocó.	35
Figura 17 - Hidrograma, na estimativa otimista, na foz do Rio Cocó.	36
Figura 18 - Hidrograma, na estimativa pessimista, na foz do Rio Cocó.	36
Figura 19 - Hidrograma de outubro na foz do Rio Maranguapinho.	37
Figura 20 - Hidrograma de janeiro, sem chuva, na foz do Rio Maranguapinho.	37
Figura 21 - Hidrograma de janeiro, com chuva, na foz do Rio Maranguapinho.	38
Figura 22 - Hidrograma, na condição atual, na foz do Rio Maranguapinho.	38
Figura 23 - Hidrograma, na estimativa otimista, na foz do Rio Maranguapinho.	39
Figura 24 - Hidrograma, na estimativa pessimista, na foz do Rio Maranguapinho.	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Elucidação dos parâmetros de ajuste da equação IDF.	20
Tabela 2 - Compreensão de chuvas intensas por meio de indicadores padronizados.	20
Tabela 3 - Compreensão da duração de chuvas por meio de indicadores padronizados.	21
Tabela 4 - Classificação do risco hidrodinâmico.	23
Tabela 5 - Ajustes temporais das condições de contorno.	30
Tabela 6 - Risco hidrodinâmico em alguns pontos fluviais notáveis.	40
Tabela 7 - Quantificação das regiões inundadas e alagadas.	40

LISTA DE ABREVIATURAS E DE SIGLAS

ANA	Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico;
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais;
COGERH	Companhia de Gestão do Recursos Hídricos;
DHN	Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil;
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia;
HEC	Hydrologic Engineering Center;
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change;
MDT	Modelo Digital de Terreno;
NASA	National Aeronautics and Space Administration;
RAS	River Analysis System;
S2ID	Sistema Integrado de Informações sobre Desastres;
SIG	Sistema de Informação Geográfica;
SWMM	Storm Water Management Model;
TR	Tempo de retorno;
USACE	United States Army Corps Engineers;
WMO	World Meteorological Organization.

SUMÁRIO

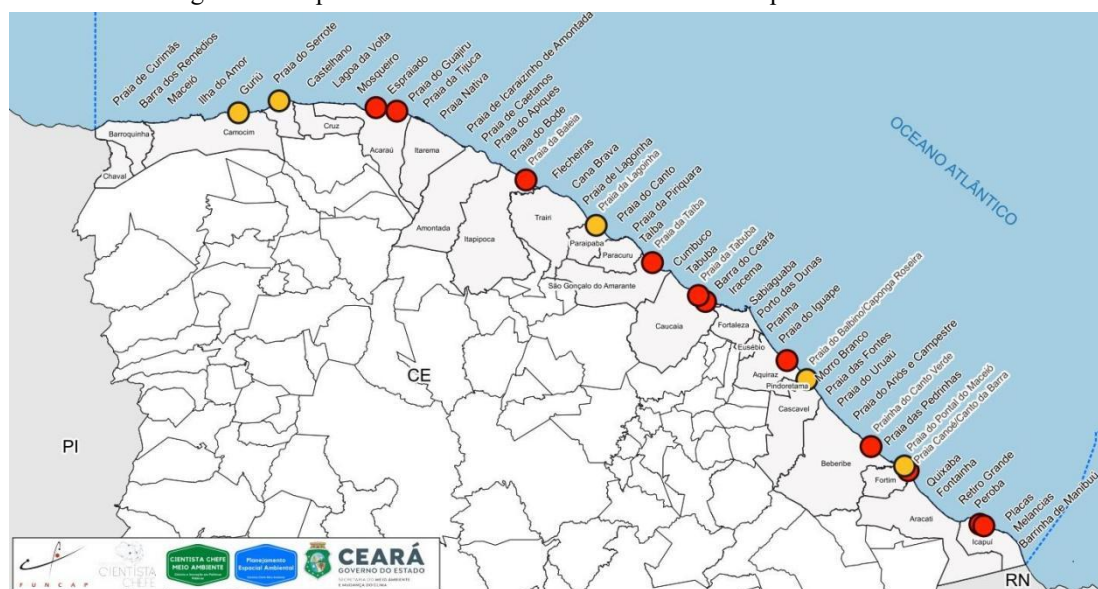
1. INTRODUÇÃO	12
1.1. AVANÇO DOS OCEANOS	12
1.2. HISTÓRICO DE CHUVAS	14
2. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	16
2.1. PROBLEMÁTICA	16
2.2. QUESTÕES MOTIVADORAS	16
2.3. JUSTIFICATIVA	16
3. OBJETIVOS	17
3.1. OBJETIVO GERAL	17
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
4.1. MARÉS	18
4.1.1. MACROFATORES.....	18
4.1.2. MESOFATORES	19
4.1.3. MICROFATORES	19
4.2. PRECIPITAÇÕES INTENSAS	20
4.3. HIDRODINÂMICA	22
5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
5.1. ELEVAÇÃO DO NÍVEL DO MAR.....	24
5.2. PRECIPITAÇÕES INTENSAS	26
5.3. DRENAGEM URBANA.....	27
6. MÉTODO	29
7. RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
8. CONCLUSÕES.....	42
REFERÊNCIAS	44
APÊNDICE A	48

1. INTRODUÇÃO

1.1. AVANÇO DOS OCEANOS

O litoral cearense, com seus 573 km de extensão, é conhecido por suas praias, falésias coloridas e vilarejos pesqueiros. No entanto, esse cenário vem sendo ameaçado por um fenômeno cada vez mais preocupante: o avanço do mar. A erosão costeira, intensificada por fatores naturais e antrópicos, tem provocado perdas significativas de território, afetando comunidades inteiras e exigindo respostas urgentes do poder público. As cidades mais atingidas, conforme Figura 1, são Icapuí, Aracati, Fortim e Beberibe [21].

Figura 1 - Mapa atualizado com os núcleos erosivos em praias cearenses.



Fonte: Figura 20 de [5].

O recuo da linha de costa no Ceará é resultado de uma combinação de fatores naturais e ações humanas. Entre os principais estão:

- A elevação do nível do mar, impulsionada pelas mudanças climáticas globais, que intensifica a força das ondas e das marés sobre a costa;
- Obras ineficientes, como espigões, portos e estradas costeiras, que alteram o fluxo natural das correntes marinhas e impedem a reposição natural de sedimentos;
- Extração de areia e ocupação desordenada, que fragilizam as dunas e a vegetação costeira, importantes barreiras naturais contra a erosão.

O avanço do mar no Ceará não é apenas uma questão ambiental, mas também social e econômica. As comunidades pesqueiras, que dependem diretamente do mar para sua subsistência, são as mais vulneráveis. A perda de moradias, escolas e estradas compromete a qualidade de vida e força o deslocamento de famílias inteiras. Além disso, o turismo, uma das principais fontes de renda da região, também é afetado pela degradação das praias.

1.2. HISTÓRICO DE CHUVAS

O cenário brasileiro de extremos hidrometeorológicos passou por notável agravamento quantitativo e qualitativo desde o final do século XX, com episódios de chuvas intensas alcançando níveis recordes em diversas regiões, um caso bem recente pode ser visto na Figura 2. Dados do S2ID do Governo Federal evidenciam um salto de 2.335 registros na década de 1990 para 7.539 eventos entre 2020 e 2023, um aumento superior a 220% [10 e 28].

Figura 2 - Alagamento causado por uma chuva intensa em fevereiro de 2025 em Fortaleza.



Fonte: [10].

Ao todo, 26.767 episódios extremos relacionados à chuva foram registrados entre 1991 e 2023, incluindo enchentes, enxurradas, tempestades e deslizamentos de solo. Cerca de 64% desses eventos possuem natureza hidrológica, com predomínio de enxurradas (55%) e inundações (35%) [17]. Eventos meteorológicos, especialmente temporais, somaram 31%; já os fenômenos de caráter geológico (principalmente deslizamentos) corresponderam a 5% dos casos [17].

Ademais, a abrangência territorial também se ampliou drasticamente: no início dos anos 1990, apenas 27% dos municípios haviam registrado desastres climáticos relacionados às chuvas; atualmente, cerca de 83% das cidades brasileiras já vivenciaram pelo menos um episódio desse tipo [22].

Outrossim, o Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas e o IPCC preveem, para este século, aumento de até 30% nos volumes de chuva nas regiões Sul e Sudeste,

enquanto o Norte e o Nordeste registrarão redução que pode chegar a 40%. Tal desequilíbrio tende a acirrar as assimetrias regionais e a vulnerabilidade social no país [16 e 27]. A frequência de dias consecutivos secos também tem aumentado no Norte e Nordeste, ampliando o contraste com períodos chuvosos extremos e tornando mais crítica a sazonalidade dos eventos [16].

O crescimento da frequência e da intensidade dos extremos de chuva trouxe impactos econômicos de proporções inéditas para o país. O levantamento mais recente estima que, apenas entre 2015 e 2025, mais de R\$ 500 bilhões foram perdidos em função dos extremos climáticos, dos quais uma parte substancial se refere a ocorrências associadas a chuvas intensas [26]. Além das perdas patrimoniais, as chuvas intensas trazem impactos diretos e indiretos para as populações afetadas, com destaque para comunidades vulneráveis, periféricas e urbanas. Entre 1991 e 2023, cerca de 91,7 milhões de pessoas foram impactadas por desastres climáticos associados às chuvas, um aumento de 82 vezes face às 400 mil pessoas afetadas nos anos 1990 [10 e 22].

2. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com o avanço das mudanças climáticas, urge a necessidade de se prever e de buscar combater os efeitos que os eventos extremos poderão causar em cidades costeiras brasileiras, com enfoque especial àquelas com rios estuarinos. Tal cenário, como já abordado no capítulo anterior, pode ser de extremo prejuízo tanto financeiro, quanto social e, como será explicado posteriormente, estes eventos, infelizmente, tornar-se-ão mais frequentes.

2.1. PROBLEMÁTICA

O avanço do nível dos oceanos, mais precisamente no litoral fortalezense, provocado pelo aumento sucessivo e desenfreado no derretimento das geleiras. Aumento na quantidade de chuvas intensas, ocasionando inundações e alagamentos.

2.2. QUESTÕES MOTIVADORAS

- a) Qual o impacto da elevação do nível do mar nos estuários dos rios Cocó e Maranguapinho [9 e 13]?
- b) O quão danoso será a ocorrência das chuvas intensas nas áreas mais suscetíveis às inundações e aos alagamentos [34]?
- c) A rede de drenagem está preparada para tal transformação [15, 18 e 19]? Caso não, como adaptá-las ou dimensioná-las para suportar as novas condições de solicitações [24]?

2.3. JUSTIFICATIVA

O presente trabalho tem relevância científica e tecnológica, uma vez que pretende desenvolver um sistema de alerta, às autoridades competentes, como o CEMADEN e a Defesa Civil, a urgência de se antecipar ante os sinistros provocados pela sobre-elevação marítima e pelas chuvas intensas - combinados ou não - oriundos das mudanças climáticas em Fortaleza, podendo, nos seus devidos ajustes, abranger todo o litoral brasileiro.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar o efeito de eventos extremos na linha costeira e nos estuários, provocados pela sobre-elevação marítima; e nas manchas de inundação, pelas chuvas intensas, na cidade de Fortaleza.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- I. Analisar o perfil de avanço marítimo na orla fortalezense;
- II. Determinar a influência da maré nos estuários dos rios Cocó e Maranguapinho;
- III. Classificar, quanto ao critério de risco hidrodinâmico, as manchas de inundação e de alagamento na cidade de Fortaleza;
- IV. Simular diferentes cenários de eventos climáticos extremos e propor medidas mitigadoras.

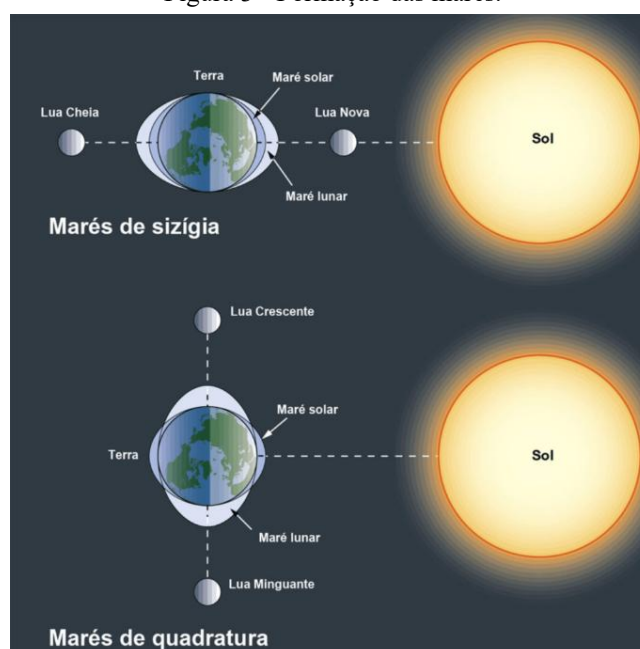
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1. MARÉS

De forma rigorosa, as marés são ondas com período de, aproximadamente, doze horas, provocadas pela ação gravitacional do sol e da lua. Para efeito de comparação, ondas capilares, que são aquelas semelhantes às pequenas perturbações na superfície d'água oriundas da queda de uma pedra em um lago, possuem períodos inferiores à 0,1s; ondas eólicas, as quais pode-se ver nas praias, 1-30s; e ondas de tsunami, 15-60min [1].

4.1.1. MACROFATORES

Figura 3 - Formação das marés.



Fonte: adaptado de [1].

Conforme a Figura 3, esse fenômeno tem dois extremos: o primeiro é quando a lua e o sol estão em conjunção ou em oposição com a terra e o segundo é quando a lua fica perpendicular à linha formada pelo sistema terra-sol. Vale salientar que a lua apresenta uma órbita elíptica, isto é, possui um perigeu e um apogeu. Quando a maré de sizígia ou de quadratura coincide com o perigeu lunar, há o incremento de 20% no valor médio das marés de sizígia e de quadratura comuns, em contrapartida, quando coincide com o apogeu lunar, ocorre a mitigação em 20% [29].

4.1.2. MESOFATORES

Diminuindo a escala, as condições atmosféricas também podem influenciar a amplitude das marés. Sendo assim, quando a pressão atmosférica está abaixo ou acima de 761mmHg, há o favorecimento, respectivamente, do ganho ou da perda de elevação [8]. Ou seja, a cada decréscimo ou acréscimo de 1mmHg na pressão atmosférica, as marés sofrerão um aumento ou uma redução de, aproximadamente, 1,35cm. Outro fator intermediário é o vento, o qual pode funcionar como um barramento da baixa-mar e/ou como um alavancador da preia-mar.

4.1.3. MICROFATORES

Por fim, diminuindo ainda mais a escala, adentra-se nos fatores topográficos das costas. Assertivamente, dependendo da formação, pode-se haver a reverberação da amplitude de maré. No litoral oriental do Brasil, a amplitude fica em torno de 2,4m e, em alguns locais dos estados do Amapá, do Pará e do Maranhão, este valor ultrapassa os 6m. A Baía de São Marcos/MA é o local do Brasil com a maior amplitude: 8m. Já no contexto mundial, a Baía de Fundy, no Canadá, é quem assume o topo do ranking com incríveis 17m. Como pôde-se observar tanto o Brasil, quanto o Canadá compartilham a mesma formação. As baías atuam como uma espécie de funil nos oceanos, retendo o recuo e prologando o avanço, por isso que a maioria dos casos em que há grandes amplitudes de marés ocorrem nestes locais [1].

Vale ressaltar que as marés enchentes tendem a serem mais rápidas que as marés secantes [29], por causa de alguns fatores, tais como:

- i) Atrito: em águas rasas, o fluxo da maré tem muito mais contato com o fundo e as margens, aumentando a fricção.
- ii) Topografia: como mencionado acima, estreitos e bacias influenciam na duração, uma vez que pode haver a ocorrência de acúmulo d'água a qual deve ser escoada por uma abertura bastante pequena ou então pela menor altura da lâmina, acarretando em uma celeridade pífia da onda de maré secante;
- iii) Estuários: a vazão fluvial atua como uma força hidrodinâmica que se opõe ao fluxo da maré enchente e se soma ao fluxo da maré secante, provocando uma assimetria, conseqüentemente, majorando o tempo de duração da maré secante.

4.2. PRECIPITAÇÕES INTENSAS

Uma forma de se quantificar a severidade de uma precipitação, com base na série histórica e em estudos estatísticos, é por meio das equações IDF (intensidade, duração e frequência) [31 e 33]. Tais equações são desenvolvidas, à priori, para cada cidade, mitigando as diferenças espaciais. No geral, as equações IDF possuem o esquema apresentado abaixo, no qual, geralmente, i é aferido em mm/min; TR, em anos; e t , em minutos.

$$i = \frac{\alpha(TR + \beta)^{\varphi_1}}{(t + \delta)^{\varphi_2}}$$

Onde:

α , φ_1 e φ_2 são parâmetros de ajuste por regressão linear múltipla;

β e δ são índices de regulação pela minimização do erro quadrático médio.

A Tabela 1 elenca como cada parâmetro de ajuste da equação IDF é refletido pelas condições climatológicas do local.

Tabela 1 - Elucidação dos parâmetros de ajuste da equação IDF.

Parâmetro	Valor baixo	Valor alto
α	Baixa sazonalidade intra-anual	Alta sazonalidade intra-anual
β	Chuvas efêmeras	Chuvas duradouras
δ	Distribuição uniforme mensal	Distribuição desigual mensal
φ_1	Baixa sazonalidade interanual	Alta sazonalidade interanual
φ_2	Distribuição uniforme anual	Distribuição desigual anual

Fonte: adaptado de [33].

Ademais, para se ter uma noção melhor da magnitude em valores, foi-se criada uma tabulação (ver Tabela 2) que busca trazer limites de intensidade de chuvas em função do dano empírico relacionado.

Tabela 2 - Compreensão de chuvas intensas por meio de indicadores padronizados.

Classificação	Limite inferior	Limite superior
Fraca	0 mm/h	2,5 mm/h
Moderada	2,6 mm/h	10 mm/h
Forte	10,1 mm/h	50 mm/h
Muito forte	50,1 mm/h	100 mm/h
Extrema	100,1 mm/h	-

Fonte: [35].

Já para a duração, existe uma tabulação similar (ver Tabela 3), a qual busca trazer os valores em algo mais palpável ou empírico.

Tabela 3 - Compreensão da duração de chuvas por meio de indicadores padronizados.

Classificação	Limite inferior	Limite superior
Curta	0	30min
Moderada	30min	2h
Prolongada	2h	6h
Persistente	6h	-

Fonte: [35].

As principais causas de formação de chuvas são:

- Orográficas: formadas pela ascensão de uma massa de ar úmido, devido a um obstáculo físico (montanha ou serra);
- Convectivas: oriundas da ascensão de uma grande quantidade de ar úmido, provocadas pelo intenso aquecimento da superfície;
- Frontais: ocasionadas pelo encontro de duas massas de ar totalmente opostas (uma massa quente e úmida e outra fria e seca).

Segundo padrões de análise IDF, enquanto episódios convectivos (chuvas rápidas e intensas, localizadas) têm duração tipicamente inferior a 1 hora, chuvas frontais e orográficas podem se estender por dias, sendo responsáveis pelos alagamentos mais persistentes e destrutivos nas cidades brasileiras [20].

4.3. HIDRODINÂMICA

Este campo da ciência pode ser dividido em dois grandes grupos: escoamento forçado e escoamento livre. Àquele, é caracterizado pela pressão do fluxo ser diferente da pressão atmosférica; enquanto o outro, igual à pressão atmosférica. O presente estudo irá focar somente no escoamento livre, o qual também pode ser dividido em três grupos: canais, rios e oceanos.

A hidrodinâmica fluvial, trata-se de um campo da mecânica dos fluidos de escoamento livre em leitos móveis, isto é, onde o fundo é variável com o tempo [14]. Em suma, o escoamento transiente pode ser descrito e quantificado pelas equações de Saint-Venant bidimensionais. Assertivamente, conforme Figura 4, cada elemento infinitesimal de volume é regido por características inerentes ao fluido e ao meio, os quais são impactados por impedâncias físicas internas (viscosidade) e externas (rugosidade ou número de Manning) [8].

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = q$$

Onde:

h é a altura da lâmina d'água, em m;

t é o tempo, em s;

u e v são as componentes das velocidades nas direções x e y, em m/s;

q é a vazão lateral por unidade de área, em m³/s/m².

Basicamente, esta equação afirma que a variação da quantidade de água em um ponto é igual à diferença entre o que entra e sai pelas bordas, mais o que é adicionado ou removido localmente.

Outrossim, como forma de representar a segunda Lei de Newton para volumes de água, a formulação original proposta foi alterada, mantendo as forças que atuam sobre o fluxo.

$$\begin{aligned} \frac{\partial(uh)}{\partial t} + \frac{\partial(u^2h)}{\partial x} + \frac{\partial(uvh)}{\partial y} + gh \frac{\partial h}{\partial x} &= S_x \\ \frac{\partial(vh)}{\partial t} + \frac{\partial(uvh)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2h)}{\partial y} + gh \frac{\partial h}{\partial y} &= S_y \end{aligned}$$

Onde:

g é a aceleração da gravidade, em m/s²;

S_x e S_y são as declividades da linha de energia nas direções x e y.

Figura 4 - Elementos da seção transversal de um rio.



Fonte: notas de aula UFRRJ, 2005.

Um parâmetro de suma importância é o risco hidrodinâmico, o qual pode ser descrito pelo produto da profundidade pela velocidade [34]. A mostra a classificação quanto às pessoas e às estruturas em função da magnitude deste parâmetro.

Tabela 4 - Classificação do risco hidrodinâmico.

Magnitude (m^2/s)	Risco às	
	Pessoas	Estruturas
0 – 0,5	Baixo	Baixo
0,5 – 0,75	Médio	
0,75 – 1	Alto	
1 – 3	Muito alto	Médio
3 – 5		Alto
5 – 7		Muito alto
>7		

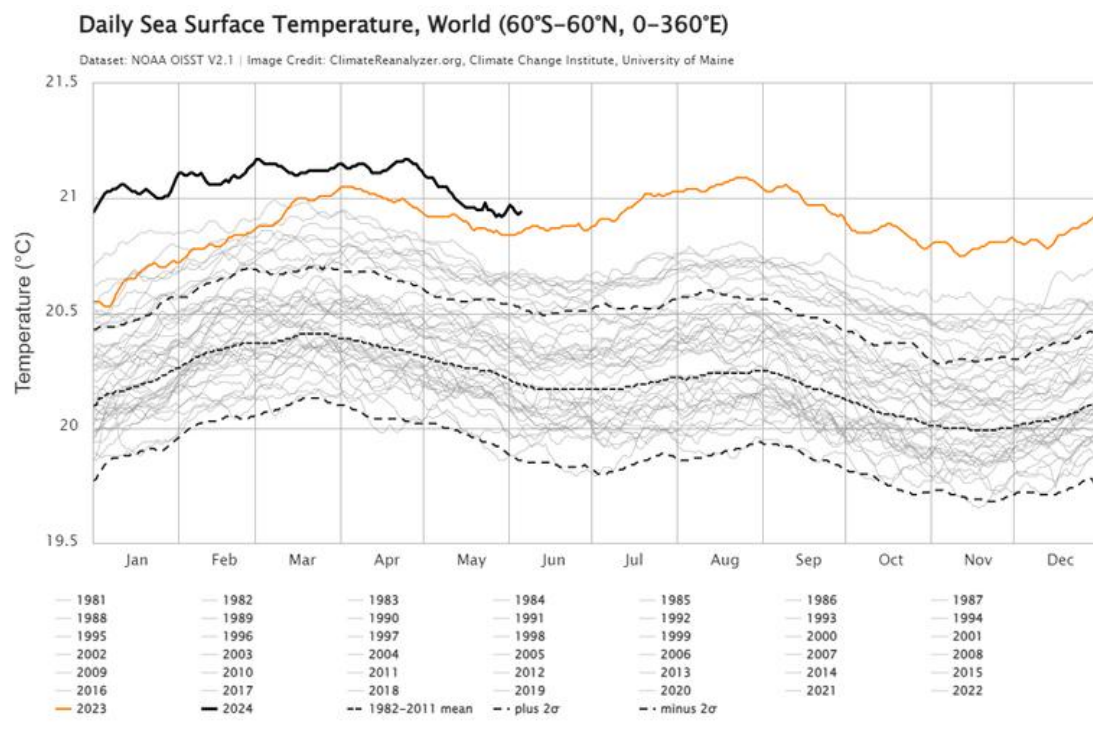
Fonte: adaptado de [34]

5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

5.1. ELEVAÇÃO DO NÍVEL DO MAR

A Figura 6 mostra a evolução da temperatura global, o que não é, necessariamente, refletida na temperatura dos oceanos, exibida na Figura 5, haja visto que, como há diferença no calor específico, essas massa de água gigantesca terão uma taxa de aumento mais retrógrada, porém mais duradoura [11].

Figura 5 - Evolução da temperatura dos oceanos.



Fonte: [12].

Diante disso, a maior geleira da Antártida, a *Thwaites Glacier* ou Geleira do Fim do Mundo, está sob forte risco de derretimento total. A *Thwaites* contém água suficiente para aumentar o nível do mar em mais de 60cm. Todavia, como ela também atua como uma rolha, segurando a vasta camada de gelo da Antártica, seu colapso poderia, em última instância, levar a um aumento de cerca de 300cm no nível do mar, devastando comunidades costeiras de Miami e Londres até Bangladesh e as ilhas do Pacífico [23].

Alguns estudos realizados em Fortaleza tanto no Rio Maranguapinho, quanto no Rio Cocó serviram como base para a realização deste presente trabalho [9 e 13]. Mais precisamente, no Rio Cocó, as modelagens para a condição atual indicaram que a região do Lagamar, distante cerca de 12km da foz na Sabiaguaba, é o ponto de inflexão entre o

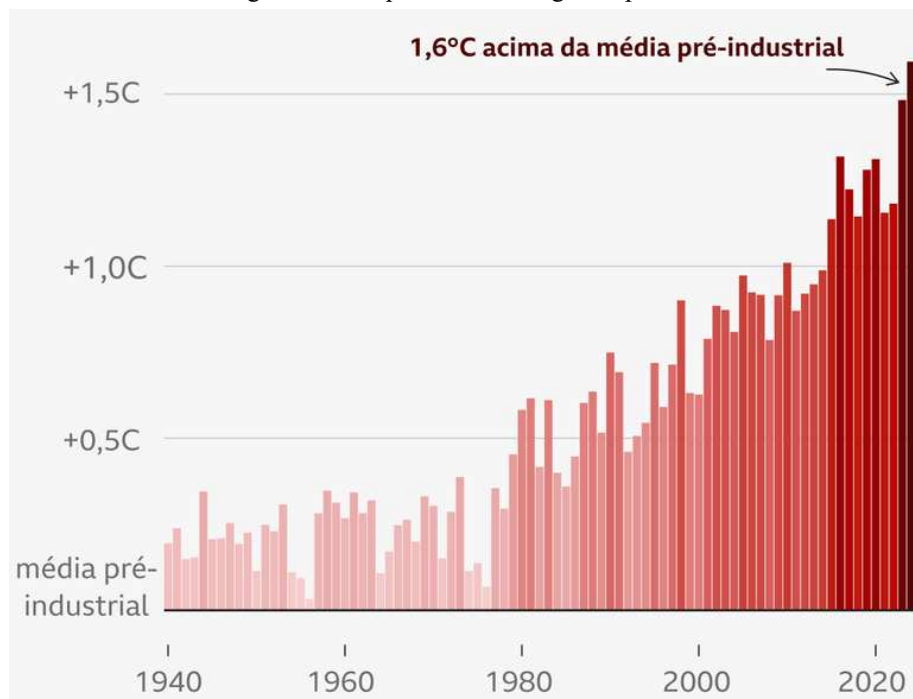
fluxo fluvial e o marítimo. Neste trecho, as variações de profundidade ficaram na ordem de 1,9m a 2,2m na simulação combinada entre o modelo 1D e 2D; e na simulação puramente 2D, houve maior domínio do fluxo fluvial perante o fluxo marítimo [13]. Vale ressaltar que este estudo focou mais na parte do comparativo entre os parâmetros de ajuste inerentes aos modelos unidimensional e bidimensional, tais como: número de Manning, tamanho das células computacionais, intervalo computacional ou passo de tempo, formulações matemáticas para a resolução no regime transiente e etc. [13]. Já o trabalho realizado no Rio Maranguapinho, teve por objetivo principal realizar o estudo das manchas de inundação em três sub-bacias (exutório na Barragem Maranguapinho, no bairro Canindezinho e no bairro Antônio Bezerra, a montante da Av. Mister Hull), sem o efeito da maré [9].

5.2. PRECIPITAÇÕES INTENSAS

Liberando grandes quantidades de água em um curto período de tempo, as chuvas intensas estão se tornando, cada vez mais, frequentes. O que deveria ocorrer há cada década está ocorrendo anualmente; a cada século, decenalmente; e, a cada milênio, secularmente [2 e 25].

Com o aumento da temperatura global, mostrado na Figura 6, provocado, sumariamente, pelo acúmulo exacerbado de gases causadores do efeito estufa, há mais evaporação. Com mais água em estado gasoso na atmosfera, a tendência é que as chuvas sejam agravadas [31].

Figura 6 - Temperatura média global por ano.



Fonte: [6].

5.3. DRENAGEM URBANA

A literatura recente sobre drenagem urbana e modelagem hidrológico-hidráulica em Fortaleza e em outros contextos fornece bases sólidas para compreender os efeitos de eventos extremos sobre sistemas de macrodrenagem. Os estudos selecionados [15, 18, 19 e 24] apresentam diferentes enfoques, mas convergem na importância da integração entre modelos matemáticos e ferramentas computacionais para avaliar impactos hidrológicos e sanitários.

O estudo sobre a predição de extravasamentos devido à infiltração de águas pluviais em interceptor de esgotamento sanitário de Fortaleza evidencia a vulnerabilidade da infraestrutura de esgotamento diante da entrada de vazões adicionais [15]. Esse trabalho mostra como o acúmulo de águas pluviais pode gerar extravasamentos, comprometendo tanto a eficiência hidráulica quanto a qualidade ambiental. O uso do SWMM como ferramenta de simulação destacou sua capacidade de representar processos de infiltração e escoamento superficial, fornecendo subsídios importantes para a gestão do sistema de esgotamento.

Já a pesquisa que acopla modelos hidrológicos e hidrodinâmicos para avaliar os impactos da poluição hídrica sobre a evaporação de lagos demonstra a relevância de integrar diferentes abordagens para capturar interações complexas entre qualidade da água e processos físicos [18]. Esse estudo reforça a necessidade de metodologias multidisciplinares, capazes de relacionar variáveis ambientais e hidrológicas em sistemas aquáticos.

A modelagem da drenagem urbana e a avaliação das cargas bacteriológicas na vertente marítima de Fortaleza, por sua vez, analisam como o escoamento urbano contribui para a poluição bacteriológica em áreas costeiras [19]. O trabalho evidencia a relação direta entre eventos de precipitação intensa e o transporte de contaminantes para o ambiente marinho, utilizando o SWMM para estimar cargas poluidoras e identificar pontos críticos de lançamento.

Outro estudo relevante é a integração do SWMM com ferramentas de SIG para modelagem hidrológico-hidráulica de uma bacia complexa. Essa abordagem demonstra o potencial da geoinformação para aprimorar a precisão das simulações, permitindo maior detalhamento espacial e facilitando a identificação de áreas críticas [24]. A combinação entre modelagem e geotecnologias reforça a importância de análises integradas para o planejamento urbano.

Em paralelo a esses trabalhos, o estudo em desenvolvimento propõe o uso do RAS Alpha, software voltado para simulações hidrodinâmicas em larga escala. Diferentemente do SWMM, que é amplamente utilizado para modelagem de drenagem urbana em escala local, o RAS Alpha se mostra mais adequado para a macrodrenagem, permitindo simulações em canais principais, rios urbanos e sistemas de grande porte. Essa escolha metodológica possibilita avaliar cenários de cheia e inundação em escala macro, capturando os efeitos de eventos extremos sobre toda a rede de drenagem de Fortaleza.

Embora o foco principal do RAS Alpha seja hidráulico, a literatura revisada mostra a importância de considerar também aspectos de qualidade da água, como poluição bacteriológica e infiltração de esgoto. O estudo atual poderá se beneficiar das metodologias desses trabalhos, incorporando parâmetros ambientais em análises complementares. Assim, o paralelo entre SWMM e RAS Alpha evidencia uma evolução metodológica: dos modelos voltados para microdrenagem e poluição difusa para simulações hidrodinâmicas de grande escala, mais alinhadas ao desafio da macrodrenagem urbana em Fortaleza.

6. MÉTODO

Para este trabalho, foi necessária a utilização do software *RAS Alpha* (ver Figura 7), um aprimoramento, tanto de interface, quanto de eficiência dos processos iterativos de resolução da propagação do fluxo, do antigo *HEC-RAS*, o qual é disponibilizado gratuitamente pelo USACE.

Figura 7 - Logo do *RAS Alpha*.



Fonte: [32].

A utilização do modelo computacional bidimensional presente no software facilita a resolução das equações de Saint-Venant presentes no tópico 4.3. A escolha do método 2D se fez necessária porque o escoamento será, majoritariamente, não unidimensional, haja visto que o fluxo não se limitará às calhas fluviais dos rios Cocó e Maranguapinho.

Utilizou-se um MDT com resolução de 30cm fornecido pela Prefeitura de Fortaleza, cerca de cem vezes mais preciso que o disponível gratuitamente em outras fontes, tais como: ANA e NASA. O MDT fornecerá todos os atributos geométricos, áreas e perímetros molhados das seções transversais e as inclinações longitudinais, para o software conseguir simular o modelo.

Os dados de entrada ou condições de contorno que o software utilizará para poder resolver, por meio do método dos volumes finitos, são:

- Maré acrescida das sobre-elevações;
- Vazões dos rios Cocó e Maranguapinho;
- Intensidade das chuvas.

Decidiu-se dividir a abordagem em dois meses, um chuvoso (janeiro) e um seco (outubro), a fim de estudar o comportamento isolado e em conjunto dos dois tipos de eventos extremos. Desse modo, as duas últimas condições de contorno variarão conforme o mês de análise. Utilizou-se a equação IDF de Fortaleza [2], a fim de gerar as intensidades, para uma duração de 24h.

$$i = \frac{21,711(TR - 2,07)^{0,138}}{(t + 15,95)^{0,76}}$$

Maiores detalhes acerca da diferença entre as duas últimas condições de contorno estão elucidados na Tabela 5. Vale salientar que, para o valor da intensidade de precipitação em janeiro, adotou-se o TR igual à 500 anos, conforme abordado no tópico acima. Como outubro é o mês com menor índice pluviométrico da série histórica de Fortaleza, optou-se por utiliza-lo somente com a simulação sem chuva, explicitando o efeito isolado das sobre-elevações.

Outrossim, os valores das vazões de outubro e de janeiro foram retirados, respectivamente, do Portal Hidrológico da FUNCEME, por meio da vazão regularizada e do Atlas dos Recursos Hídricos da COGERH, através dos dados dos vertedores [3 e 4]. Ademais, implementou-se o aporte da drenagem proveniente dos canais das avenidas Aguanambi e Eduardo Girão no exutório da Praça Manuel Dias Branco, sendo 1 m³/s e 5 m³/s para os cenários sem e com chuva, respectivamente, independentemente do mês de análise [7].

Tabela 5 - Ajustes temporais das condições de contorno.

Condição de contorno		Outubro	Janeiro
Vazão (L/s)	Rio Cocó	200,38	30.000
	Rio Maranguapinho	127,28	10.000
Intensidade (mm/h)		0	12,107

Fonte: o autor, 2025.

Em posse dos dados obtidos de uma maré de sizígia aferida na Praia da Sabiaguaba, a qual varia da cota 0,4m (baixa-mar) à 2,8m (preia-mar), no sistema do DHN [30], acrescentou-se a previsão otimista e a pessimista elencada em 5.1, mantendo também um cenário sem o acréscimo (condição atual), ou seja, nove simulações foram realizadas.

Após a obtenção de todas as condições de contorno (outubro e janeiro com e sem chuva), realizou-se as simulações no *RAS Alpha*. Foram realizados dois métodos de pós-avaliação:

- i. Calibração, por meio de imagens de satélite disponíveis no *Google Earth*, alterando o valor da rugosidade do terreno (N de Manning) dentro da malha computacional (ver APÊNDICE A);

- ii. Estabilidade numérica, através do número de Courant (C), o qual deve permanecer o mais próximo possível de 1. Para isso, os parâmetros do tamanho dos polígonos (ΔS) da malha computacional e do passo de tempo computacional (Δt) foram ajustados conforme equação abaixo, uma vez que a velocidade do fluxo (v) é inalterável nesta etapa.

$$C = v \times \frac{\Delta t}{\Delta S}$$

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No que se refere à intrusão do oceano no estuário do Rio Cocó, as Figuras 8 a 12 trazem como ficariam os limites propícios para a formação dos mangues, isto é, onde a água estaria salobra. Não se considerou o Rio Maranguapinho devido à alta densidade populacional nos arredores da sua várzea, inviabilizando a existência de um ecossistema.

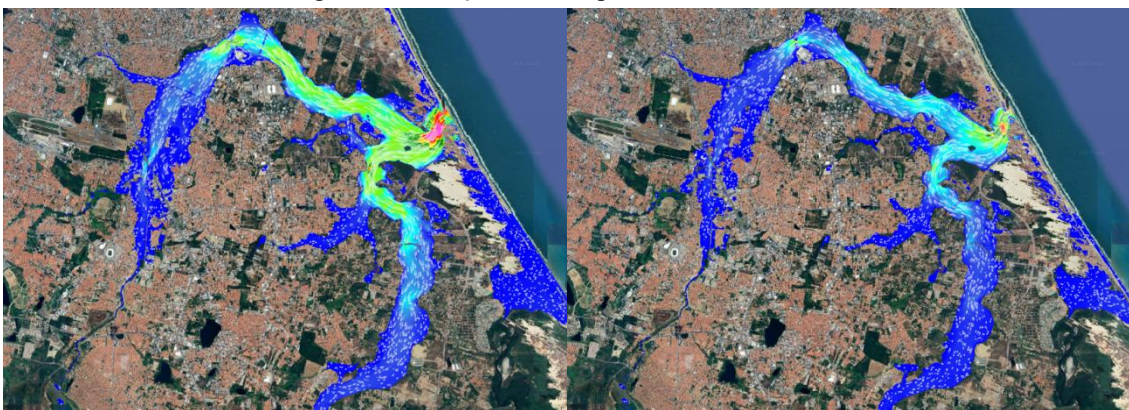
Figura 8 - Variação da maré otimista em outubro.



Fonte: o autor, 2025.

Nesta previsão, não houve grandes mudanças em relação à configuração atual – que, por sua vez, não destoou muito dos encontrados anteriormente [13] –, mantendo a área de mangue entre a Sabiaguaba e o Parque do Cocó, um pouco após à Av. Gal. Murilo Borges. Vale salientar que a mudança neste cenário provocou somente uma prolongação no término da zona salobra, isto é, os arredores da referida avenida [13].

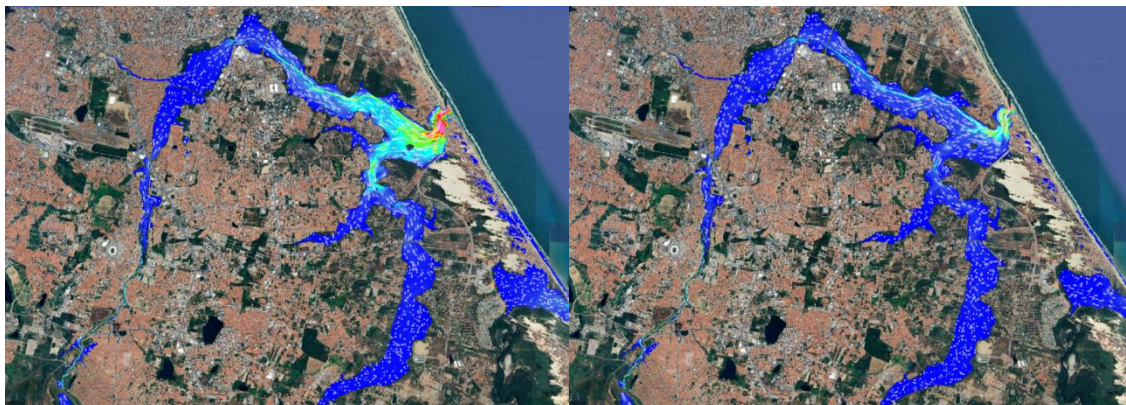
Figura 9 - Variação da maré pessimista em outubro.



Fonte: o autor, 2025.

Já nesta previsão, a região que antes era salobra agora virou salgada. Ademais, a região com tendência a virar manguezal ficou fixada entre o Parque do Cocó, após à Av. Eng. Santana Júnior, e o bairro Castelão, um pouco antes da Rua Fr. Viléla.

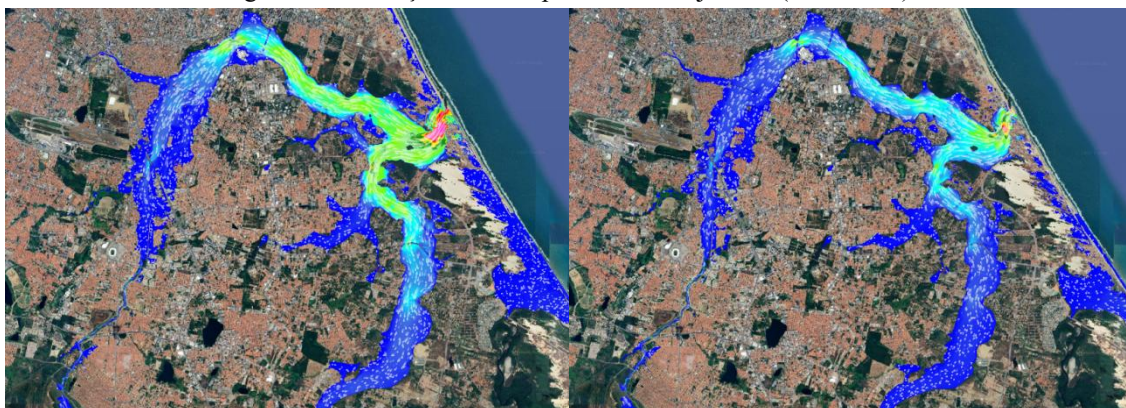
Figura 10 - Variação da maré otimista em janeiro (sem chuva).



Fonte: o autor, 2025.

Com poucas diferenças entre a Figura 8, a Figura 10 retornaria uma zona salobra um pouco inferior. Esta foi a simulação que mais se aproximou dos resultados encontrados no estudo anterior [13], mesmo em cenário de sobre-elevação marítima.

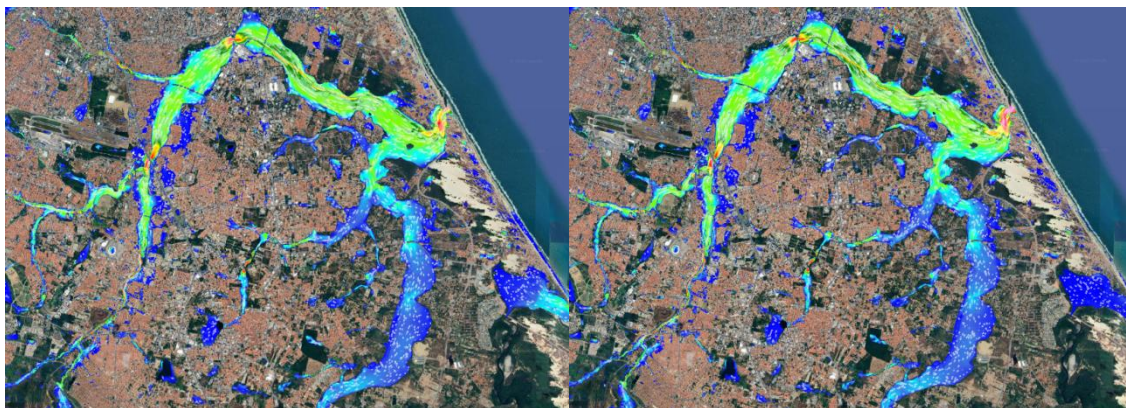
Figura 11 - Variação da maré pessimista em janeiro (sem chuva).



Fonte: o autor, 2025.

Com poucas diferenças entre a Figura 9, a Figura 11 deixaria a água salobra entre a região próxima ao shopping Iguatemi e à BR-116.

Figura 12 - Variação da maré atual em janeiro (com chuva).

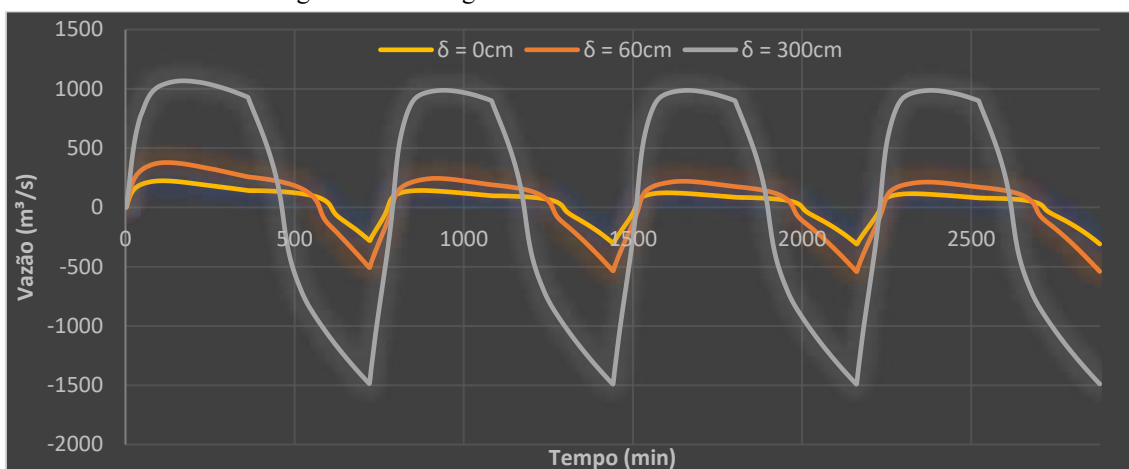


Fonte: o autor, 2025.

No cenário onde há somente o efeito da chuva, a região se reduziria, quando comparada à configuração atual, entre o começo da praia da Sabiaguaba e à região próxima ao shopping Iguatemi.

Ademais, como citado anteriormente, buscou-se averiguar o impacto isolado e em conjunto de cada um dos eventos extremos abordados neste estudo. Para isso, escolheu-se ambas as fozes dos rios. Vale mencionar que, para todos os resultados listados nas Figuras 13 a 24, o intervalo de tempo foi de 2880 minutos; além de que, os trabalhos anteriores não fizeram um estudo detalhado nas fozes [9 e 13].

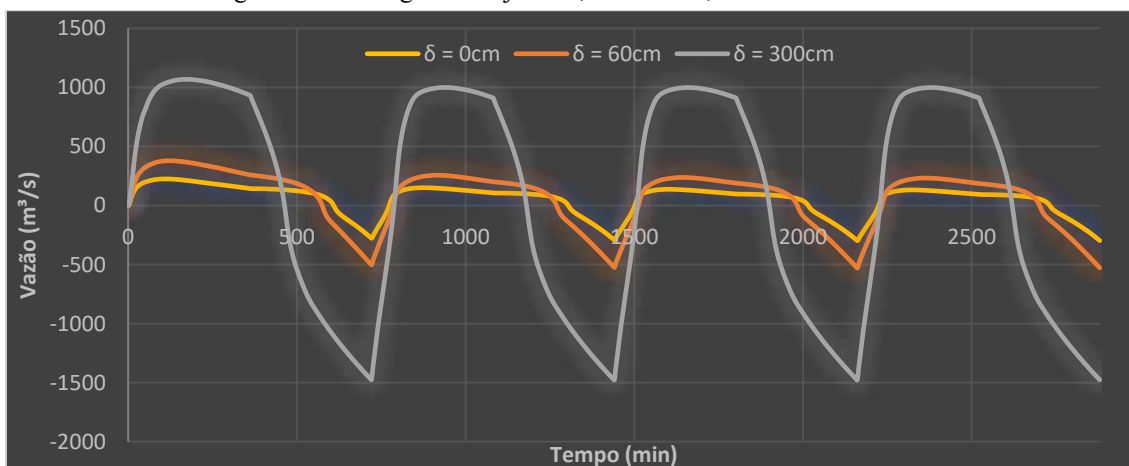
Figura 13 - Hidrograma de outubro na foz do Rio Cocó.



Fonte: o autor, 2025.

À medida que a sobre-elevação aumenta, maior a amplitude de vazão, o que é bem intuitivo, afinal, a área cresce para uma mesma seção transversal. Vale ressaltar que a maré enchente (curva ascendente) apresenta um período de resposta inferior à da maré secante (curva descendente), como já explicado nos itens i), ii) e iii) do tópico 4.1.3.

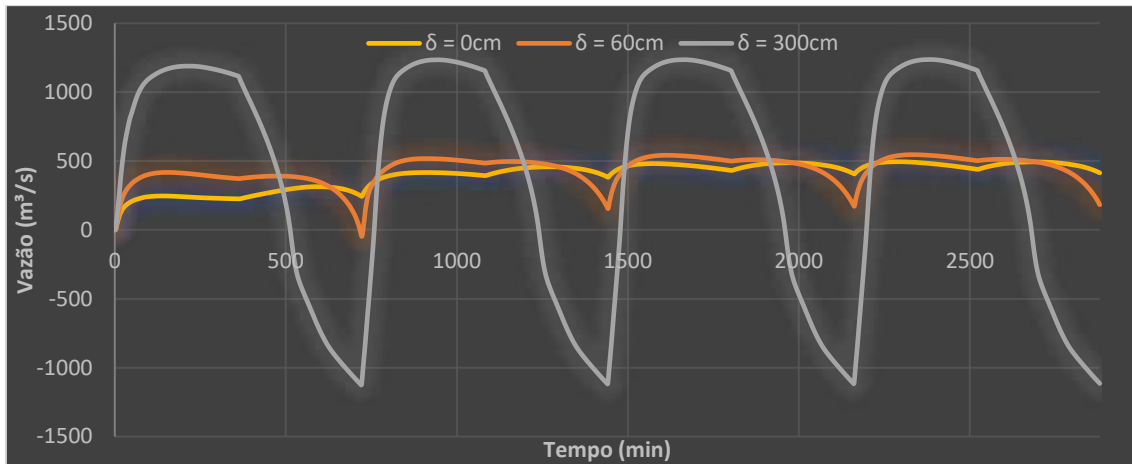
Figura 14 - Hidrograma de janeiro, sem chuva, na foz do Rio Cocó.



Fonte: o autor, 2025.

Assertivamente, a diferença entre as figuras acima é pífia, ressaltando a pouca discrepância entre o aporte de outubro e o de janeiro seco.

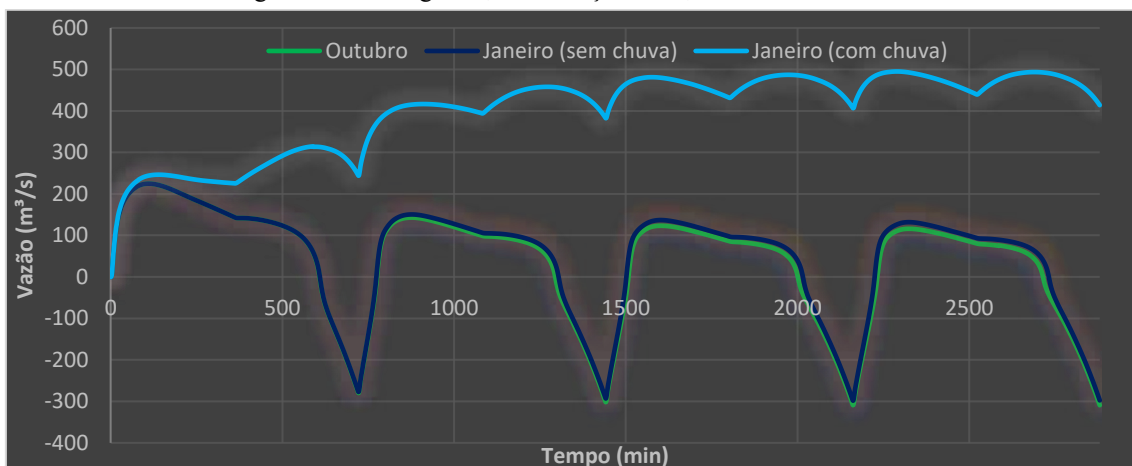
Figura 15 - Hidrograma de janeiro, com chuva, na foz do Rio Cocó.



Fonte: o autor, 2025.

Além do que já foi mencionado para as Figuras 13 e 14, a Figura 15 traz um diferencial importante: a pouca influência do oceano, principalmente na condição atual ($\delta = 0\text{cm}$), nas vazões. Fora que, com exceção do intervalo entre o minuto 717 ao 725 - no cenário otimista ($\delta = 60\text{cm}$) -, e o cenário pessimista, as vazões sempre estiveram positivas, diferentemente do que ocorre nas Figuras 13 e 14. Tal fenômeno pode ser explicado pelo volume exacerbado no Rio Cocó devido à precipitação extremamente forte, mas que não foi capaz de superar a estimativa pessimista ($\delta = 300\text{cm}$), a qual ainda permanece com um fluxo negativo.

Figura 16 - Hidrograma, na condição atual, na foz do Rio Cocó.

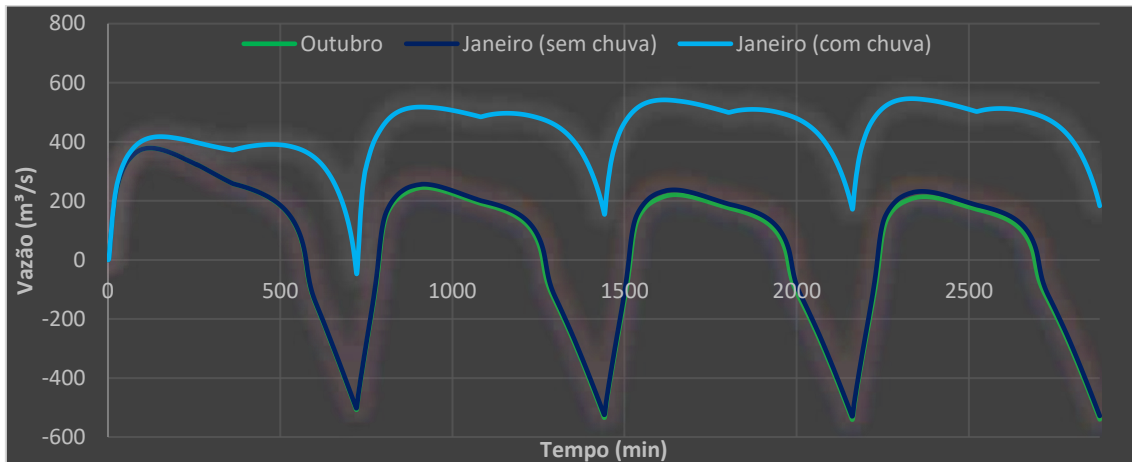


Fonte: o autor, 2025.

Percebe-se a influência do aporte fluvial quando, à medida este parâmetro

ascende, menor é a variação da vazão, isto é, comparando as curvas em verde e em azul escuro. Outrossim, no cenário com o maior aporte - curva em azul ciano -, como já mencionado, as vazões foram sempre positivas devido à baixa capacidade de impedância do oceano.

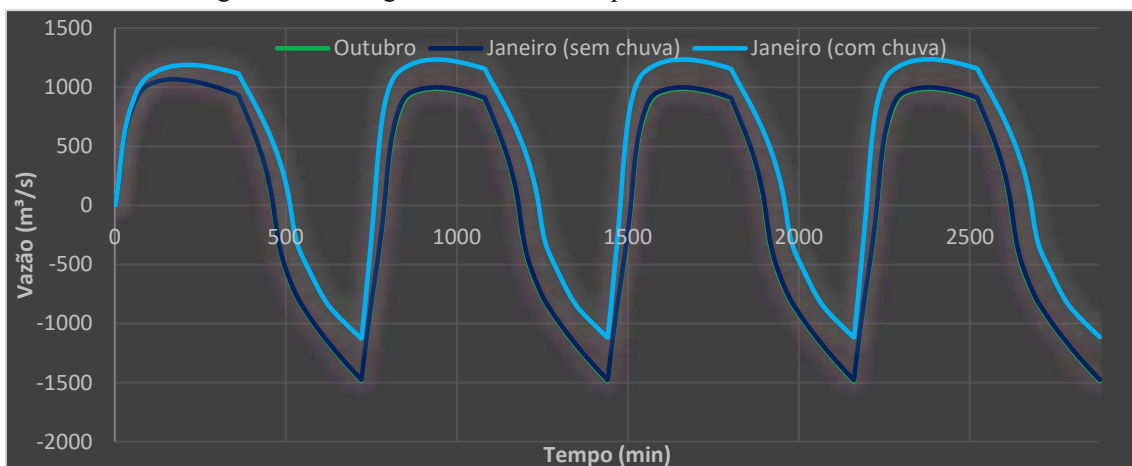
Figura 17 - Hidrograma, na estimativa otimista, na foz do Rio Cocó.



Fonte: o autor, 2025.

Já em um cenário onde a impedância marítima cresce, a influência do aporte fluvial vai diminuindo. Vale destacar que a diferença entre as curvas verde e azul escuro reduziu ainda mais, quando se comparado com a Figura 16.

Figura 18 - Hidrograma, na estimativa pessimista, na foz do Rio Cocó.

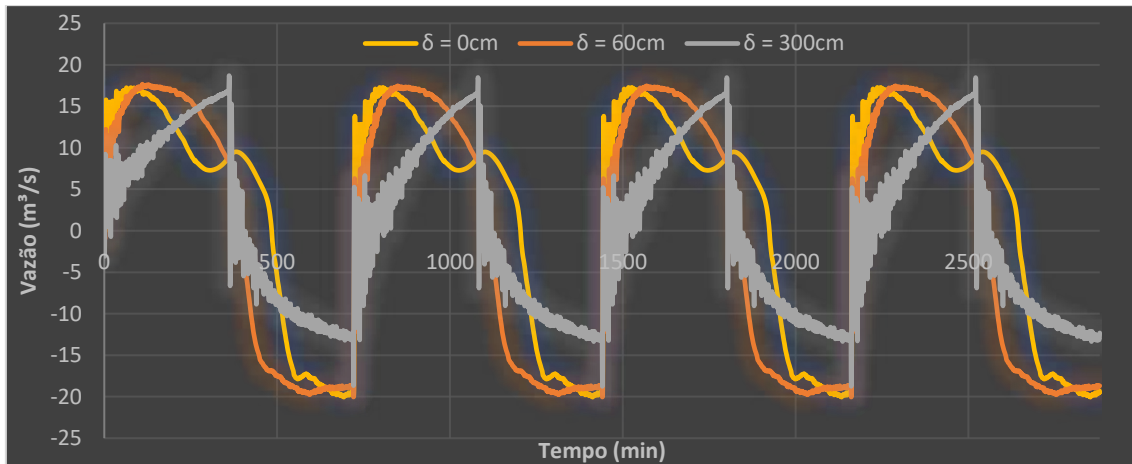


Fonte: o autor, 2025.

Observa-se, agora, que a curva verde e a curva azul escuro estão praticamente sobrepostas, além da aproximação da curva em azul ciano das outras duas. Ou seja, com uma impedância marítima grande, o comportamento tende a ser unicamente regido pela oscilação da maré.

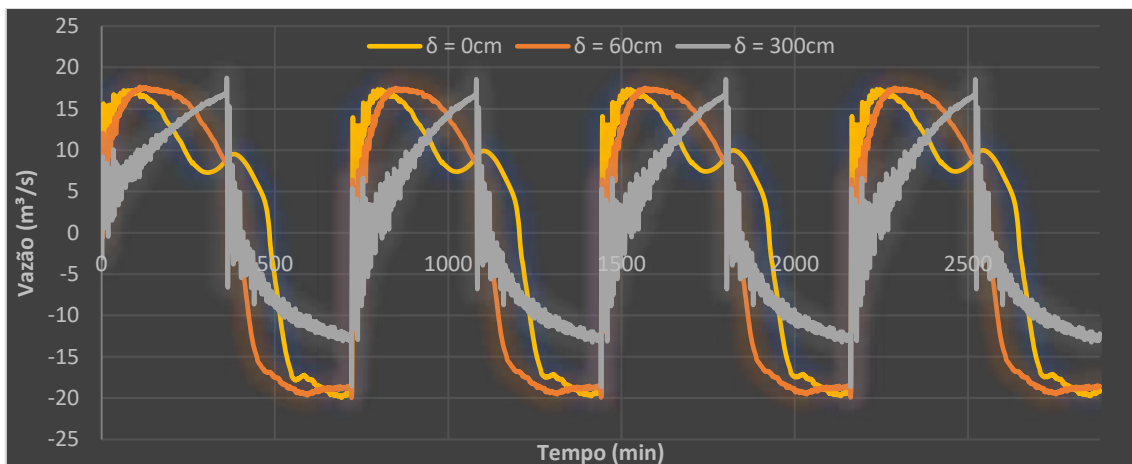
Saindo da foz do Rio Cocó na praia da Sabiaguaba e indo para a foz do Rio Maranguapinho na praia da Barra do Ceará, elaborou-se as figuras abaixo:

Figura 19 - Hidrograma de outubro na foz do Rio Maranguapinho.



Fonte: o autor, 2025.

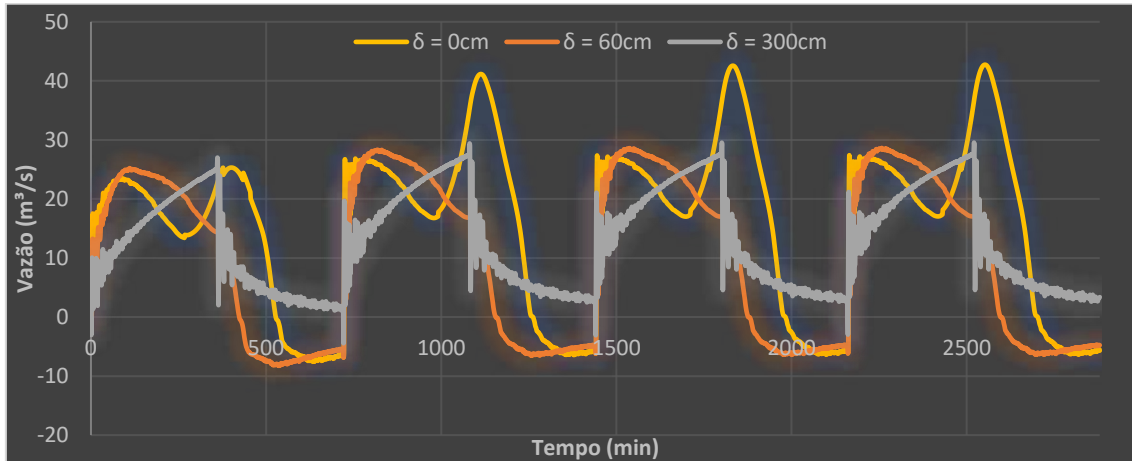
Figura 20 - Hidrograma de janeiro, sem chuva, na foz do Rio Maranguapinho.



Fonte: o autor, 2025.

Diferentemente das Figuras 13 e 14, as Figuras 19 e 20 apresentam um comportamento bastante destoante. A primeira dessemelhança ocorre na menor variação das vazões para o cenário pessimista; a segunda, em uma mini maré enchente, aproximadamente, 307 minutos após a principal na condição atual; e a terceira, a queda abrupta da vazão no começo da maré secante no cenário pessimista tanto em outubro, quanto em janeiro seco. A única semelhança decorre do que é postulado em 4.1.3, porém com um período de resposta, para a maré enchente, bastante curto em todos os três casos e em ambos os meses.

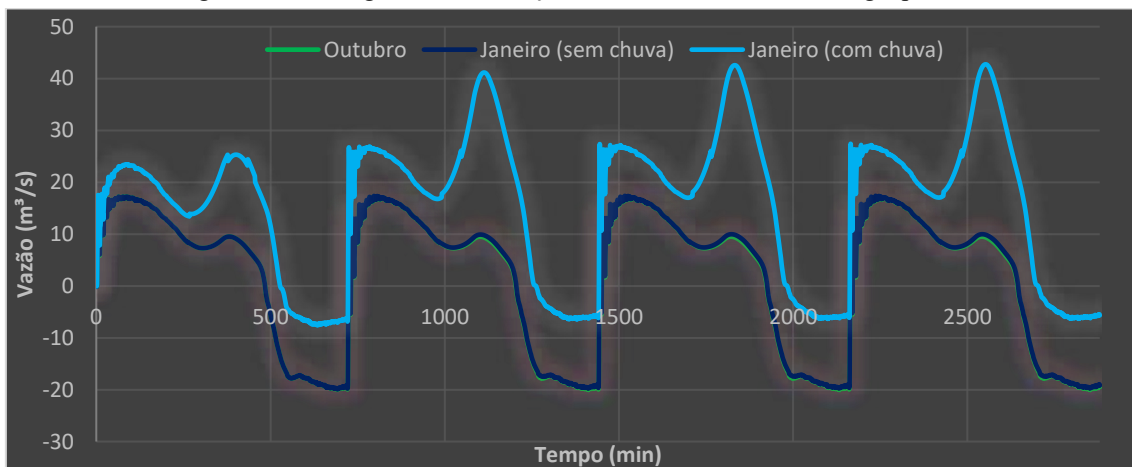
Figura 21 - Hidrograma de janeiro, com chuva, na foz do Rio Maranguapinho.



Fonte: o autor, 2025.

Ao se aumentar o aporte fluvial, através da precipitação, houve somente uma dilatação na variação nos cenários otimistas e pessimistas, o que é bem intuitivo. Todavia, a grande mudança na Figura 21 em relação às Figuras 19 e 20, dá-se pelo incremento significativo na segunda maré enchente após o segundo ciclo de oscilação.

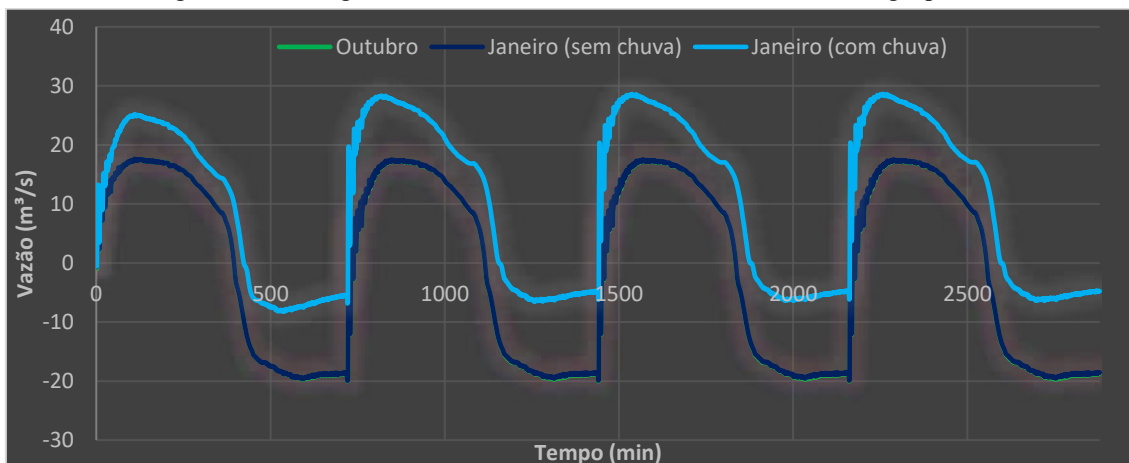
Figura 22 - Hidrograma, na condição atual, na foz do Rio Maranguapinho.



Fonte: o autor, 2025.

A Figura 22 elucida melhor o incremento na segunda maré enchente. E, quando se compara os três meses na mesma condição, percebe-se que o ganho ocorre por causa do fenômeno exposto no item ii) do tópico 4.1.3.

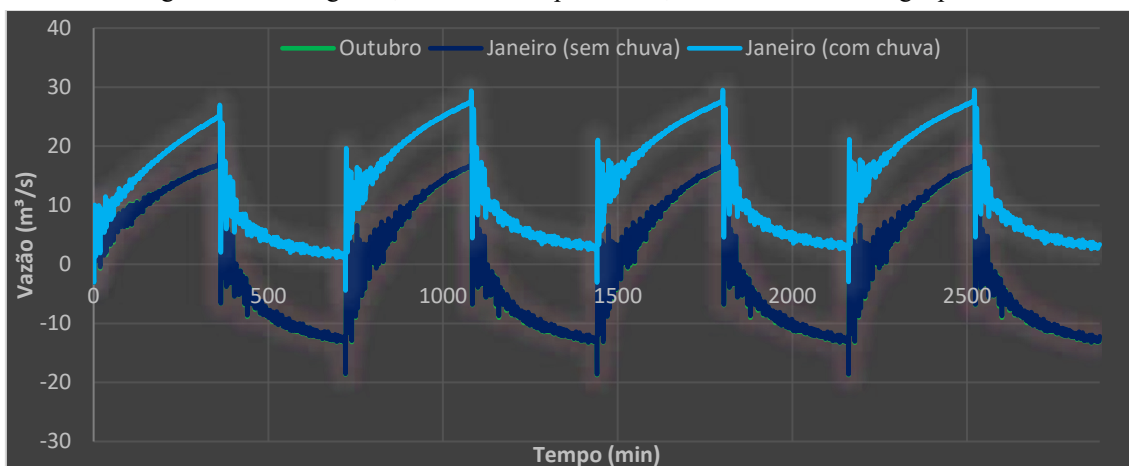
Figura 23 - Hidrograma, na estimativa otimista, na foz do Rio Maranguapinho.



Fonte: o autor, 2025.

Vale ressaltar que, assim como ocorreu na foz do Rio Cocó, aqui, para aportes fluviais nulos ou baixos, o cenário atual tende a se aproximar da condição otimista.

Figura 24 - Hidrograma, na estimativa pessimista, na foz do Rio Maranguapinho.



Fonte: o autor, 2025.

Por fim, vale mencionar a segunda maré enchente presente nos três meses, cujo período de resposta é bastante longínquo (302 minutos). O que difere um pouco do que é elucidado em 4.1.3, concomitantemente, com o período de resposta da maré secante sendo igual a 288 minutos.

Agora, tratando do critério de risco hidrodinâmico, a Tabela 6 mostra o grau de periculosidade em alguns trechos ao longo do Rio Cocó no cenário mais catastrófico, isto é, a simulação com a sobre-elevação pessimista em janeiro chuvoso. Optou-se por não elencar todos os trechos do Rio Maranguapinho por causa do baixo risco em boa parte de sua extensão (do bairro Canindezinho até o bairro Genibaú).

Tabela 6 - Risco hidrodinâmico em alguns pontos fluviais notáveis.

Ponte	Rio	Profundidade (m)	Velocidade (m/s)	Risco às	
				Pessoas	Estruturas
Sabiaguaba	Cocó	3,606	1,188	Muito alto	Médio
Av. Sebastião de Abreu	Cocó	4,812	0,317	Muito alto	Baixo
Av. Eng. Santana Jr.	Cocó	4,615	0,659	Muito alto	Médio
Av. Gal. Murilo Borges	Cocó	3,134	0,250	Alto	Baixo
BR-116 (próx. ao atacadão)	Cocó	3,022	0,901	Muito alto	Baixo
Av. Paulino Rocha	Cocó	3,261	1,372	Muito alto	Médio
Av. PR Costa e Silva	Cocó	3,594	1,101	Muito alto	Médio
Barra do Ceará	Maranguapinho	2,512	0,032	Baixo	Baixo
Av. Mister Hull	Maranguapinho	2,480	2,117	Muito alto	Alto

Fonte: o autor, 2025.

Afere-se, portanto, que, neste cenário mais devastador, o risco de perda de vidas humanas é bastante considerável. Já, para as estruturas, mais especificamente as pontes supracitadas, não são previstos tantos impactos. Entretanto, é importante destacar que o dimensionamento adequado dessas estruturas pode evitar sua ruína. Isso porque, mesmo que o cenário proposto (que já é bastante raro) venha a ocorrer durante um período de tráfego intenso, apenas nessas condições haveria um risco mais significativo. A seguir, é apresentada a Tabela 7, a qual detalha, numericamente, o impacto de cada simulação na rede de macrodrenagem fortalezense.

Tabela 7 - Quantificação das regiões inundadas e alagadas.

Identificação	Áreas (km ²)			Perímetros (km)		
	Inundadas		Alagadas	Inundadas		Alagadas
	Baixa-mar	Preia-mar		Baixa-mar	Preia-mar	
Outubro atual	21,616	23,983	-	315,78	341,01	-
Outubro otimista	24,184	27,178	-	333,16	367,81	-
Outubro pessimista	34,660	42,504	-	475,59	427,11	-
Janeiro seco atual	23,814	26,151	-	356,75	375,18	-
Janeiro seco otimista	25,768	28,694	-	369,38	402,19	-
Janeiro seco pessimista	35,530	43,349	-	513,21	462,77	-
Janeiro chuvoso atual	32,351	33,414	17,420	1.092,39	1.081,29	588,21
Janeiro chuvoso otimista	32,427	34,512	17,461	1.085,37	1.100,47	584,43
Janeiro chuvoso pessimista	36,542	43,477	19,677	1.065,81	1.017,20	573,90

Fonte: o autor, 2026.

Ao analisar os dados tabelados acima, percebe-se que a discrepância entre a condição atual e a previsão otimista varia de pequena à pífia, dependendo do cenário analisado. Agora, quando a previsão pessimista é incorporada, a mudança é drástica, especialmente nos meses onde não se considerou a pluviosidade. Outrossim, as variações de marés foram mais significativas nas previsões pessimistas, as quais variaram em 22,63%, 22,01% e 18,98%. Em relação às áreas alagadas, em concordância com o que já foi dito, a discrepância foi pífia, exceto quando a precipitação é inserida.

Diante do exposto, infere-se que os resultados aqui expostos interferem nos estudos realizados na drenagem urbana de Fortaleza [15, 18, 19 e 24], pois, as redondezas dos locais citados na Tabela 6 servem como estimativa de vazão que adentrará nas bocas de lobo e nos bueiros. Assertivamente, com a ajuda do sistema de drenagem urbano no combate aos alagamentos causados, primordialmente pela chuva, os danos às pessoas e às estruturas serão mitigados.

8. CONCLUSÕES

Destarte, a partir deste estudo, pôde-se inferir que o acréscimo no nível do Oceano Atlântico, na previsão mais otimista, teve impactos pequenos tanto no estuário, quanto na foz do Rio Cocó. Houve uma ligeira discrepância somente na foz do Rio Maranguapinho. Já, na previsão mais pessimista de sobre-elevação, os impactos foram bastante significativos, com mudanças consideráveis no regime salobro e na conformação hidrodinâmica da foz do Rio Cocó. Entretanto, na foz do Rio Maranguapinho, não houve uma reverberação significativa nas vazões quando se compara tanto o aporte fluvial, quanto as marés. Assertivamente, é válido destacar que, ao se elevar muito o nível na foz do Rio Maranguapinho, implicou-se em uma maré enchente catorze minutos superior à maré secante, o que retrata uma exceção à regra.

Outrossim, o efeito isolado das precipitações intensas implicou em um fluxo 100% e 96,25% unidirecional, respectivamente, no cenário atual e na projeção mais otimista, na foz do Rio Cocó, diferenciando-se das simulações sem chuva em outubro e em janeiro. Ademais, inferiu-se que o aporte pluvial gerou grandes volumes fluviais que foram suficientes para mitigar o efeito da amplitude de maré na foz do Rio Cocó, com exceção da previsão mais pessimista. O Rio Maranguapinho, neste cenário, foi impactado principalmente pela formação de uma segunda maré de enchente, mais vultuosa que a primeira, provocada pela topografia da sua foz, oriunda de um remanso hidráulico naquela região. Resumidamente: caso o oceano esteja prevalecendo contra o Rio Maranguapinho, haverá a exceção à regra do tempo de respostas das marés; se for o rio, a formação do remanso.

Em relação aos riscos provocados pela conjunção entre a sobre-elevação mais pessimista e a precipitação intensa, inferiu-se que os danos causados às estruturas serão pequenos ou médios em grande parte das calhas fluviais, exceto na ponte da Av. Mister Hull; e os danos causados às pessoas foram bastante significativos em quase toda a calha fluvial dos rios fortalezenses. Vale salientar que as zonas de inundação e de alagamento reverberaram um sério risco quanto à previsão pessimista, a qual foi claramente mais danosa quando se comparada aos outros cenários. Ademais, cabe destacar que, para o mês de janeiro, na estimativa pessimista, a comparação acerca da pluviosidade não representou uma divergência significativa, corroborando no conflito entre as zonas de inundação e de alagamento, diferentemente da condição atual e da estimativa otimista, as quais as áreas alagadas não chegaram a entrar em conato com as áreas inundadas.

Concomitantemente, deve-se promover medidas cautelosas quanto à drenagem urbana, visando, principalmente, à mitigação dos efeitos das chuvas, dado que está é a única forma de reduzir os alagamentos. Algumas das medidas podem ser a correta fiscalização e a manutenção periódica das infraestruturas de drenagem urbana e a implementação de jardins de chuva e/ou outras soluções baseadas na natureza (SBN) nos locais mais suscetíveis aqui descritos e, em última instância, uma readequação dos bueiros dos ramais de ligação de águas pluviais. (coleta adequada dos resíduos sólidos...)

Por fim, seguem algumas sugestões para trabalhos futuros, os quais podem usufruir deste estudo:

- i) Produzir uma continuação deste estudo, focando na qualidade da água, a fim de mensurar parâmetros como oxigênio dissolvido, demanda bioquímica de oxigênio, temperatura e etc.;
- ii) Realizar uma continuação deste estudo, focando no transporte de sedimentos, a fim de apurar os processos erosivos e acumulativos em vários locais da cidade de Fortaleza e de estimar o aporte de grãos no Oceano Atlântico;
- iii) Aferir a dinâmica costeira nas estimativas otimista e pessimista, seja superficial para efluentes, seja profunda para sedimentos. Assim como, a proteção costeira, na figura de estruturas de defesa contra as ondas e as correntes marítimas;
- iv) Fazer um levantamento da quantidade de casas ou de pessoas que serão afetadas pelas manchas de inundação.

REFERÊNCIAS

- [1] ALFREDINI, Paolo; ARASAKI, Emília. **Obras e gestão de portos e costas: a técnica aliada ao enfoque logístico e ambiental**. 2. ed. rev. e ampl. São Paulo: Edgard Blücher, 2009.
- [2] BATISTA, T. L. et al. **Equações IDF dos municípios cearenses geradas a partir de dados pluviométricos**. Revista Brasileira de Geografia Física, Fortaleza, 2024. 21 p.
- [3] CEARÁ. Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. **Atlas de Recursos Hídricos do Ceará**. Disponível em: <http://atlas.cogerh.com.br/>. Acesso em: 29 set. 2025.
- [4] CEARÁ. Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. **Portal Hidrológico do Ceará**. Disponível em: <http://www.hidro.ce.gov.br/>. Acesso em: 30 set. 2025.
- [5] CEARÁ. Programa Cientista Chefe do Meio-Ambiente. **Plano de Ações de Contingência para Processos de Erosão Costeira (PCEC) no Estado do Ceará**. Disponível em: https://drive.google.com/file/d/171DuINCnHwkByxDAtVemBDHkbXH7O7ds/view?usp=drive_link. Acesso em: 01 nov. 2025.
- [6] COPERNICUS CLIMATE CHANGE SERVICE. **Climate Data Store**. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, 2025. Disponível em: <https://cds.climate.copernicus.eu>. Acesso em: 25 out. 2025.
- [7] FORTALEZA. Prefeitura Municipal. **Fortaleza em Mapas**. Disponível em: <https://mapas.fortaleza.ce.gov.br>. Acesso em: 29 set. 2025.
- [8] FRENCH. P.W. **Coastal and Estuarine Management**. Routledge Environmental Management Series. London, 2024. E book.
- [9] GIORDANI, Lídio Campos. **Modelagem hidrológica e hidráulica no Rio Maranguapinho mediante cenário de mudanças climáticas**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Ambiental) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- [10] JORNAL NACIONAL. **Aumenta muito a frequência de desastres causados pelas chuvas no Brasil**. *GI*, 1 jul. 2025. Disponível em: <https://g1.globo.com/jornal-nacional/noticia/2025/07/01/aumenta-muito-a-frequencia-de-desastres-causados-pelas->

[chuvas-no-brasil.ghtml](#). Acesso em: 08 out. 2025.

[11] KUHLBRODT, Till et al. **The 2023 Ocean Temperature and Sea Ice Extremes in the Context of Longer-Term Climate Change**. American Meteorology Society, Reino Unido, 2024. p. 474–485.

[12] LA REPÚBLICA. **Las temperaturas de los océanos sorprenden a científicos: julio 2024 marca un día sin récord tras más de un año**. La República, 27 jul. 2024. Disponível em: <https://larepublica.pe/ciencia/2024/07/27/las-temperaturas-de-los-ocenos-sorprenden-a-cientificos-julio-2024-marca-un-dia-sin-record-tras-mas-de-un-ano-1043685>. Acesso em: 15 out. 2025.

[13] LEITÃO, Francisco Thibério Pinheiro. **Modelagem hidrodinâmica 1d, 1d/2d e 2d do efeito de maré no Rio Cocó. 2018**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Ambiental) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

[14] LEOPOLD, Luna B.; MILLER, John P. **Fluvial processes in geomorphology**. San Francisco: W. H. Freeman, c1964. 522 p. (A series of books in geology).

[15] LOPES, G. S.; CAVALCANTE, J. S.; MEDEIROS, C. D. M.; PEREIRA, S. P.; MESQUITA, J. B. F.; LIMA NETO, I. E. **Predição de extravasamentos devido à infiltração de águas pluviais em interceptor de esgotamento sanitário de Fortaleza/CE**. REVISTA DAE, v. 73, p. 1-14, 2025.

[16] MARRAFON; REBOITA. **Características da precipitação na América do Sul reveladas através de índices climáticos**. *Revista Brasileira de Climatologia*, 2020. 14 p.

[17] MARTINEZ, Aline Sbizera et al. **Temporadas das Águas: o aumento das chuvas extremas**. São Paulo: Programa Maré de Ciência – UNIFESP; Fundação Grupo Boticário de Proteção à Natureza, 2025. (Série Brasil em Transformação: o impacto da crise climática, Caderno Técnico II). Disponível em: <https://oeco.org.br/wp-content/uploads/2025/07/Brasil-em-transformacao-2-Temporadas-das-Aguas-O-Aumento-das-Chuvas-Extremas-1.pdf>. Acesso em: 16 out. 2025.

[18] MESQUITA, J. B. F.; LIMA NETO, IRAN E. **Coupling Hydrological and Hydrodynamic Models for Assessing the Impact of Water Pollution on Lake Evaporation**. *Sustainability*, v. 14, p. 13465, 2022.

- [19] MESQUITA, J. B. F.; PEREIRA, S. P.; LIMA NETO, I. E. **Modelagem da drenagem urbana e avaliação das cargas bacteriológicas na vertente marítima de Fortaleza, Ceará.** Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 25, p. 205-216, 2020.
- [20] PAIVA, Rodrigo et al. **Critérios hidrológicos para adaptação à mudança climática: chuvas e cheias extremas na Região Sul do Brasil.** Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS, 2024. Nota técnica.
- [21] PAULINO, Nicolas. **Avanço do mar causa processo erosivo em quase 50% do litoral do CE, e 16 praias têm maior risco; veja locais.** Diário do Nordeste, Fortaleza, 18 mar. 2025. Disponível em:
<https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/ceara/avanco-do-mar-causa-processo-erosivo-em-quase-50-do-litoral-do-ce-e-16-praias-tem-maior-risco-veja-locais-1.3630796>. Acesso em: 14 out. 2025.
- [22] PRIZIBISCZKI, Cristiane. **Brasil sofreu mais de 7,5 mil desastres climáticos relacionados à chuva entre 2020 e 2023.** *((o))eco*, 1 jul. 2025. Disponível em:
<https://oeco.org.br/noticias/brasil-sofreu-mais-de-75-mil-desastres-climaticos-relacionados-a-chuva-entre-2020-e-2023/>. Acesso em: 28 out. 2025.
- [23] RIGNOT, Eric; CIRACÌ, Enrico; SCHEUCHL, Bernd; TOLPEKIN, Valentyn; WOLLERSHEIM, Michael; DOW, Christine. **Widespread seawater intrusions beneath the grounded ice of Thwaites Glacier, West Antarctica.** Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 121, n. 22, e2404766121, 2024. DOI:
<https://doi.org/10.1073/pnas.2404766121>.
- [24] ROCHA, Maria de Jesus D.; PEREIRA, Silvano P.; LIMA NETO, Iran Eduardo. **Integração do SWMM e ferramentas SIG para modelagem hidrológico-hidráulica de bacia complexa.** Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental, Fortaleza, v. 26, n. 3, p. 451–459, 2021.
- [25] RODRIGUES, Bruno et al. **Atmospheric and oceanic mechanisms in precipitation in March 2018 in Ceará, Brazil.** Theoretical and Applied Climatology, v. 155, n. 9, p. 8633–8650, ago. 2024.
- [26] ROSA, Leopoldo. **Em dez anos, Brasil já perdeu R\$ 500 bilhões por causa dos extremos climáticos.** CBN, São Paulo, 28 out. 2025. Disponível em:
<https://cbn.globo.com/brasil/noticia/2025/10/28/em-dez-anos-brasil-ja-perdeu-r-500->

[bilhoes-por-caoa-dos-extremos-climaticos.ghml](#). Acesso em: 18 out. 2025.

[27] SAMPAIO, Lucas. **Mudanças do clima: as previsões do IPCC para a América do Sul**. *GI*, 9 ago. 2021. Disponível em: <https://g1.globo.com/natureza/aquecimento-global/noticia/2021/08/09/mudancas-do-clima-as-previsoes-do-ipcc-para-a-america-do-sul.ghml>. Acesso em: 18 out. 2025.

[28] SINIMBÚ, Fabiola. **Entenda a relação dos impactos climáticos com a vida cotidiana**. *Agência Brasil*, 5 mar. 2025. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/meio-ambiente/noticia/2025-02/entenda-relacao-dos-impactos-climaticos-com-vida-cotidiana>. Acesso em: 18 out. 2025.

[29] SORENSE, R. M. **Basic Coastal Engineering**. New York: Springer Verlag, 2006. 318 p.

[30] TÁBUA DE MARÉS. **Tábua de marés para a pesca**. Disponível em: <https://tabuademares.com>. Acesso em: 02 out. 2025.

[31] TUCCI, Carlos E. M. et al. **Drenagem urbana**. Porto Alegre: Ed. da UFRGS; ABRH, 1995. 428 p. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos, v. 5).

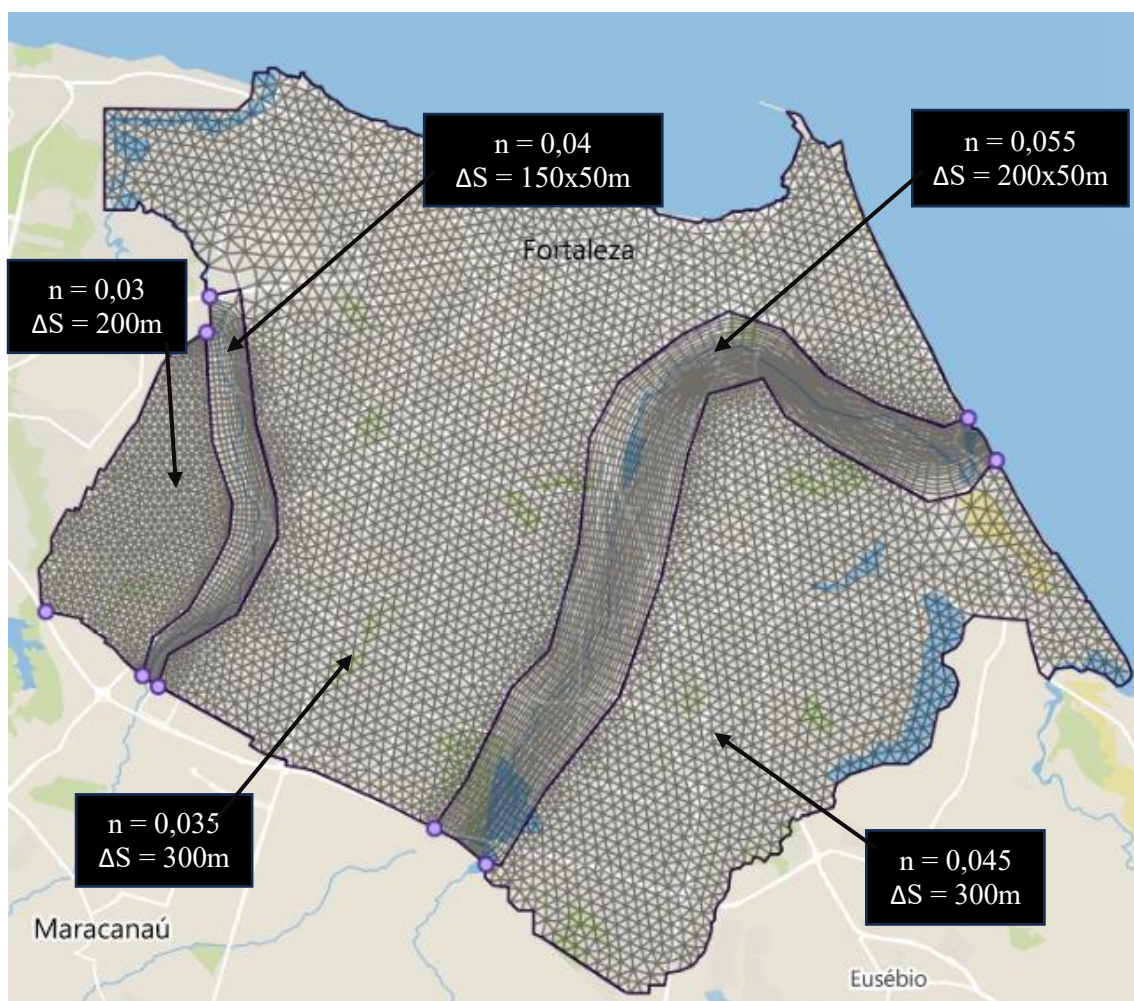
[32] United States Army Corps of Engineers. **River Analyses System**. Sacramento/CA - EUA, 2025. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/download.aspx>.

[33] VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill, 1975.

[34] VISEU, Maria T. F. **Segurança dos vales a jusante de barragens**. 2008. Tese (Doutorado) – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa. 420 p.

[35] World Meteorological Organization. **Home WMO**. Genebra, 2025. Disponível em: <https://worldweather.wmo.int/pt/home.html>. Acesso em: 19 out. 2025.

APÊNDICE A



Fonte: o autor, 2025.