



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR- LABOMAR
GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA

VITÓRIA VASCONCELOS DO NASCIMENTO

**USO DO MODELO DELFT3D NO ESTUDO DA DISPERSÃO DE PROPÁGULOS
DE MANGUE NO ESTUÁRIO DO RIO PACOTI**

FORTALEZA
2019

VITÓRIA VASCONCELOS DO NASCIMENTO

USO DO MODELO DELFT3D NO ESTUDO DA DISPERSÃO DE PROPÁGULOS DE
MANGUE NO ESTUÁRIO DO RIO PACOTI

Monografia apresentada ao curso de bacharelado em Oceanografia do Instituto de Ciências do Mar – LABOMAR da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Oceanografia.

Orientador: Prof. Dr. Carlos E. Peres
Teixeira.

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

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

- N1u NASCIMENTO, VITÓRIA VASCONCELOS DO.
USO DO MODELO DELFT3D NO ESTUDO DA DISPERSÃO DE PROPÁGULOS DE MANGUE NO ESTUÁRIO DO RIO PACOTI / VITÓRIA VASCONCELOS DO NASCIMENTO. – 2019.
50 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Instituto de Ciências do Mar, Curso de Oceanografia, Fortaleza, 2019.
Orientação: Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira.
1. Modelagem numérica. 2. Circulação estuarina. 3. Oceanografia Física. 4. Delft3D. 5. Dispersão de propágulos. I. Título.

CDD 551.46

VITÓRIA VASCONCELOS DO NASCIMENTO

USO DO MODELO DELFT3D NO ESTUDO DA DISPERSÃO DE PROPÁGULOS DE
MANGUE NO ESTUÁRIO DO RIO PACOTI

Monografia apresentada ao curso de bacharelado em Oceanografia do Instituto de Ciências do Mar – LABOMAR da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Oceanografia.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

MSc. Bárbara Pereira Paiva
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Alexander Cesar Ferreira Roman
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Aos meus pais, Eneida e Pedro.

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo agradeço a Deus que está acima de toda crença religiosa ou conceitos que o limitem, pois está no infinito de todas as coisas e rege toda a vida que compõem a Terra, inclusive a minha.

Sou grata a meus pais, pois sem eles seria impossível estar aqui. É deles, das minhas avós e avôs que vem minha inspiração em estudar o mar. Pessoas simples do interior litorâneo, tiraram do mar o sustento de suas vidas, fossem trabalhando em salinas ou da pesca, o mar é/ foi a fonte que sustenta nossa matéria.

Aos professores Geraldo e Ana Paula minha gratidão por mostrarem o caminho acadêmico e por acreditarem em mim. Ao professor Carlos pela sua orientação durante tantos anos e sempre se mostrar solícito em me escutar e ajudar.

Ao CNPq, FUNCAP e PROGRAD pelo fornecimento de bolsas que me auxiliaram no aprendizado da pesquisa científica e iniciação à docência ao longo da graduação.

Ao Laboratório de Geologia e Geomorfologia Costeira da UECE que forneceu a batimetria do estuário. Ao Gleidson do Laboratório de Dinâmica Costeira do Labomar que disponibilizou os dados de batimetria da plataforma. Ao Carlos Augusto Schettini da UFPE que forneceu os dados de corrente do Rio Pacoti. Ao Alexander e Carolina Bracho do laboratório de Zoobentos e o Prof. Marcelo Moro que compartilharam seus conhecimentos sobre mangue comigo.

Aos colegas do Laboratório Oceanografia Física (LOF) que me ajudaram imensamente na conclusão desse trabalho, esclarecendo dúvidas e dando boas risadas para não chorarmos na lida.

A todos que direta ou indiretamente estiveram comigo e prestaram suporte nos mais variados momentos. Foi com vocês que cresci como pessoa, pois ao longo da graduação aprendi muito mais que disciplinas. Aprendi que antes do profissional, de um graduado, há um ser que traz o seu caráter e deve lutar por suas crenças com integridade.

A meus irmãos Thomaz, Thiago e Virgínia. Nossas vidas juntos foi fundamental para a pessoa que me tornei. A partida de Suzanna (nome social do Thomaz) me ensinou e abriu muitos caminhos. Ela se faz presente em nossos corações. A Raíssa, grande amiga que ganhei no Labomar, obrigada por acreditar tanto em mim. Ao Lawrence por nosso companheirismo e maravilhosas conversas sobre o mar, sobre a terra. Eu amo todos vocês!

“Olhe cada caminho com cuidado e atenção. Tente quantas vezes julgar necessárias... Então faça a si mesmo uma pergunta: possui este caminho um coração? Em caso afirmativo o caminho é bom. Caso contrário, esse caminho não possui importância alguma.”

(Os Ensinamentos de Dom Juan)

RESUMO

Entender a influência de fatores físicos na distribuição dos propágulos de mangue ajuda na compreensão da distribuição do mangue e da sua vulnerabilidade às modificações naturais e antrópicas no ambiente. Neste estudo será utilizado o modelo de partículas Delft3D-PART para simular a influência de fatores físicos na dispersão de propágulos de mangue no estuário do rio Pacoti para as espécies *Avicennia germinans* e *Avicennia schaueriana*, descritas como *Avicennia spp.*, *Laguncularia racemosa* e *Rizophora mangle*. Os cenários hidrodinâmicos usados são três: 1- forçado por marés, 2-forçado por marés e descarga fluvial e 3-forçado por marés, descarga fluvial e vento. Cada um dos cenários possuem 45 dias de simulações onde os propágulos serão liberados no 16º dia e sua trajetória acompanhada até o final da simulação. No cenário forçado apenas por marés houve retenção de cerca de 75% dos propágulos dentro do estuário. Este aprisionamento próximo ao mangue aumenta sua possibilidade de estabelecimento pela proximidade de áreas favoráveis à implantação, principalmente para as espécies de *L. racemosa* e *R. mangle* por sua capacidade de afundarem para se estabelecerem enquanto que *Avicennia spp.* precisa estar livre do efeito da maré para se estabelecer. No cenário forçado por marés e descarga fluvial até o terceiro dia cerca de 90% dos propágulos de todas espécies haviam deixado o estuário, revelando o papel da descarga como transportadora dos propágulos para a plataforma. Na área da plataforma após cessar a influência da descarga a dispersão é dominada pela maré. No cenário forçado por marés, descarga fluvial e vento houve saída maior que 90 % dos propágulos do estuário até o sétimo dia. Na saída do estuário o vento forçou os propágulos de todas as espécies a maior tempo dentro do estuário. Na área externa ao rio o vento desviou todas as trajetórias para oeste, paralelos a linha de costa. O transporte de todos os propágulos para direção oeste abre conectividade dos propágulos das espécies do estudo com áreas de mangue a oeste do rio Pacoti. De um modo geral a maré é a principal forçante para dispersão dos propágulos dentro do estuário. A descarga é a forçante transportadora para a plataforma e o vento é a forçante que direciona a dispersão na área externa ao estuário.

Palavras-chave: Modelagem Numérica, Circulação Estuarina, Oceanografia Física, Delft3D, dispersão de propágulos.

ABSTRACT

Understanding the influence of the physical factors in the distribution of mangroves propagules help the comprehension of the mangroves distribution and its vulnerability through natural and anthropic modifications in the environment. At this study will be used Delft3D-PART particles model to simulate the influence of the physical factors in the dispersion of mangroves propagules in Pacoti's river estuary for the species *Avicennia germinans* and *Avicennia schaueriana*, described as *Avicennia spp.*, *Laguncularia Racemosa* and *Rizophora Mangle*. The hydrodynamic scenario used are three: 1- tidal forced, 2- tidal forced and fluvial discharge and 3- tidal forced, fluvial discharge and wind. Each one of the scenarios have 45 simulation days, where the propagules will be released in the day sixteen and its path followed until the final simulation. The forced scenario just for tidal had withheld 75% of the propagules within the estuary. The capture near the mangrove increases the possibility of establish through proximity of favorable areas to mainly implantation to the species *L. racemosa* and *R. mangle* occasioned by its capacity of sink for establishing while *Avicennia spp.* need to be free of tidal effects to establishing. In the scenario forced by tidal and fluvial discharge until the third day, about 90% of all species propagules had left the estuary, revealing the function of the discharge as transporting propagules to the shelf. At the shelf area after discharge influence cease the dispersion is tidal dominated. In the scenario forced by tidal, fluvial discharge and wind had output more than 90% of the propagules in the estuary until the seventh day. In the estuary exit, the wind forced the propagules of all species to more time in the estuary. In the external area of the river, the wind divert all the path to west, parallel to the shoreline. The transport of all propagules to west direction open connectivity of the studied species propagules with dispersion mangrove areas to west of pacoti's river. In a general mode the tidal is the mainly factor to the propagules dispersion within the estuary. The discharge is the transport factor the the shelf and the wind is the factor that directs the dispersion at the external area of the estuary.

Keywords: Numerical Modeling, Estuarine Circulation, Physical Oceanography, Delft3D, propagule dispersion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Padrão de estabelecimento em <i>L.racemosa</i>	16
Figura 2 – Padrão de estabelecimento em <i>Avicennia</i>	16
Figura 3 – Padrão de estabelecimento em <i>Rizophora mangle</i>	17
Figura 4 – Área de estudo.....	20
Figura 5. Detalhes da batimetria da área de estudo.....	21
Figura 6 – Representação da grade do modelo Delft3D.....	23
Figura 7 – Representação da grade numérica utilizada no estudo.....	24
Figura 8 – Rosa dos ventos de 12/05/2019 a 30/05/2019.....	25
Figura 9 – Rosa dos ventos de 15/12/2018 a 30/01/2019.....	26
Figura 10 – Local de liberação dos propágulos.....	26
Figura 11 – Comparação do nível do mar obtido pelo modelo e os dados observados (FEMAR).....	30
Figura 12 – Detalhe da comparação entre os dados de nível do mar observados e os dados de saída de modelo para o dia 07/10/2010.....	30
Figura 13 – Dados de correntes do estuário do Rio Pacoti obtidos pelo modelo.....	31
Figura 14 – Comparação entre os valores de corrente longitudinais modelados e observados para o dia 07/10/2010.....	32
Figura 15 – Trajetória para um propágulo de <i>Avicennia spp.</i> de 01/01/2019 a 30/01/2019 para o cenário forçado apenas com marés.....	34
Figura 16 – Trajetória para um propágulo de <i>L.racemosa</i> de 01/05/2019 a 30/05/2019 para o cenário forçado apenas com marés.....	34
Figura 17 – Trajetória para um propágulo <i>R. mangle</i> de 01/01/2019 a 30/01/2019 para o cenário forçado apenas com marés.....	35
Figura 18 – Trajetória para um propágulo de <i>Avicennia spp</i> até o dia 05/01/2019 para o cenário forçado por marés e descarga fluvial.....	36
Figura 19 – Trajetória para um propágulo de <i>Avicennia spp</i> até o dia 15/01/2019 para o cenário forçado por marés e descarga fluvial.....	36
Figura 20 – Trajetória para um propágulo de <i>Avicennia spp</i> até o dia 15/01/2019 para o cenário forçado por marés e descarga fluvial.....	37
Figura 21 – Trajetória para um propágulo de <i>Laguncularia racemosa</i> até o dia 05/05/2019 para o cenário forçado por marés e descarga fluvial.....	37

Figura 22 – Trajetória para um propágulo de <i>Rizophora mangle</i> até o dia 05/01/2019 para o cenário forçado por marés e descarga fluvial.....	38
Figura 23 – Trajetória para um propágulo de <i>Rizophora mangle</i> até o dia 15/01/2019 para o cenário forçado por marés e descarga fluvial.....	38
Figura 24 – Trajetória para um propágulo de <i>Avicennia spp.</i> até o dia 05/01/2019 para o cenário forçado por marés, descarga fluvial e ventos.....	40
Figura 25 – Trajetória para um propágulo de <i>Avicennia spp.</i> até o dia 10/01/2019 para o cenário forçado por marés, descarga fluvial e ventos.....	40
Figura 26 – Trajetória para um propágulo de <i>Laguncularia racemosa.</i> até o dia 05/05/2019 para o cenário forçado por marés, descarga fluvial e ventos.....	41
Figura 27 – Trajetória para um propágulo de <i>Laguncularia racemosa.</i> até o dia 10/05/2019 para o cenário forçado por marés, descarga fluvial e ventos.....	41
Figura 28 – Trajetória para um propágulo de <i>Rizophora mangle.</i> até o dia 05/01/2019 para o cenário forçado por marés, descarga fluvial e ventos.....	42
Figura 29 – Trajetória para um propágulo de <i>Rizophora mangle.</i> até o dia 10/01/2019 para o cenário forçado por marés, descarga fluvial e ventos.....	42
Figura 30 – Concentração de propágulos dentro do estuário até o cenário forçado com marés, sem descarga fluvial e sem vento.....	43
Figura 31 – Concentração de propágulos dentro do estuário até o cenário forçado com marés, com descarga fluvial e sem vento.....	44
Figura 32 – Concentração de propágulos dentro do estuário para o cenário forçado com marés, com descarga fluvial e com vento.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Período de simulação de cada cenário para as espécies estudadas.....	23
Tabela 2 – Algumas informações inseridas no modelo.....	25
Tabela 3 – Massa, comprimento, mês médio de pico de produção de propágulos e período de flutuação das espécies estudadas.....	27
Tabela 4 – Comparação dos componentes harmônicos de maré obtidos pela FEMAR e calculados para os resultados do modelo.....	29

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

COFECO	Colônia de Férias dos Empregados da Coelce
Delft3D-PART	Módulo de partículas do DELFT3D
FLOW	Módulo hidrodinâmico do DELFT3D
LGCO	Laboratório de Geologia e Geomorfologia Costeira e Oceânica
UECE	Universidade Estadual do Ceará
M2, S2, K1, O1, N2	Componentes Harmônicos de Maré
FEMAR	Fundação de Estudo do Mar
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
PART	Módulo de Trajetória de Partículas
ADCP	<i>Acoustic Doppler Current Profiler</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

- > Maior que
- < Menor que
- % Porcentagem

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVO	19
2.1	Geral	19
2.2	Específico	19
3	METODOLOGIA	20
3.1	Área de estudo	20
3.2	O modelo Delft3D	21
3.3	Módulo Flow	21
3.3.1	Forçantes	24
3.4	Módulo PART	25
3.5	Validação dos resultados	27
4	RESULTADO E DISCUSSÃO	28
4.1	Validação das simulações	28
4.1.1	Marés	28
4.1.2	Correntes	30
4.2	Cenários de dispersão dos propágulos	32
4.2.1	Cenário: Forçado por marés, sem descarga e sem vento	32
4.2.2	Cenário: Forçado por marés, com descarga fluvial e sem vento	34
4.2.3	Cenário: Forçado por marés, descarga fluvial e vento	38
4.3	Tempo de exposição	42
4.3.1	Cenário: Forçado por marés, sem descarga e sem vento	42
4.3.2	Cenário: Forçado por marés, com descarga fluvial e sem vento	43
4.3.3	Cenário: Forçado por marés, descarga fluvial e vento	44
5	CONCLUSÃO	45
6	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	46

1 INTRODUÇÃO

Etimologicamente o nome estuário possui origem da palavra latina *aestus*, que significa maré. Esse termo faz referência a corpos de água semi fechados onde há transição entre água doce e salgada, sendo a maré uma importante fonte de energia. Estes ambientes são retentores de nutrientes, o que lhes confere características atrativas para muitas espécies que nele se alimentam e reproduzem, o que justifica serem um dos ambientes mais férteis do mundo (ODUM; BARRETT, 2007).

Estuário é um corpo de água costeiro parcialmente fechado que é permanentemente ou periodicamente aberto ao mar e que recebe pelo menos descargas periódicas de um ou mais rios. Desta forma a salinidade é menor que a da água do mar e varia temporariamente e ao longo do seu comprimento. Em locais onde a perda de água por evaporação é alta, há pouca entrada de água doce e a maré possui pequena força, o estuário pode tornar-se hipersalino (POTTER, 2010).

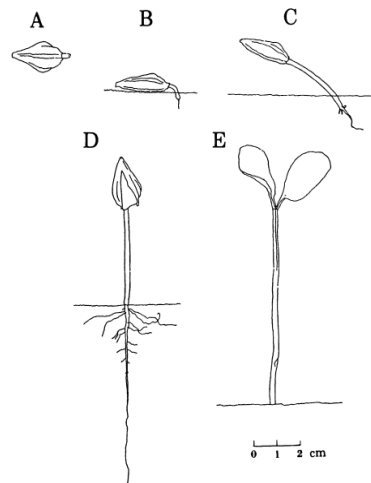
A gênese dos estuários possui tempo geológico recente, cerca de 5000 anos atrás. Os processos que lhe dão origem são relacionados às variações do nível do mar por congelamento ou derretimento das camadas de gelo (processos eustáticos). Estes processos também podem ser relativos aos movimentos na crosta terrestre com relação ao geoide (processos isostáticos). Ao final do processo transgressivo que ocorreu a aproximadamente 7000 anos atrás, o mar estabilizou no nível atual, alagando planícies costeiras e vales de rios, processo que deram origem aos estuários na configuração atual (MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, 2012).

A força da maré e da descarga do rio agem conjuntamente na mistura da água dentro do estuário, portanto controlam os gradientes de densidade. Estes gradientes por sua vez são formados e modificados pelo balanço entre a água que sai e entra. A entrada de água ocorre por precipitação e descarga do rio, enquanto que a saída ocorre pela evaporação. Considerando o balanço entre precipitação, descarga do rio e evaporação, os estuários podem ser divididos em: positivos ou negativos. Estuários positivos são aqueles em que a água por precipitação da chuva e descarga do rio excede a perda por evaporação. Os negativos geralmente são encontrados em áreas áridas, onde a perda por evaporação supera a entrada por chuva e descarga do rio. Neles em oposição aos estuários positivos, o gradiente de densidade aumenta em direção ao alto estuário. Há ainda, estuários do tipo rolha de sal onde um máximo de salinidade local impede a entrada da água do mar, durante a estação quente e seca (VALLE-LEVINSON, 2010).

A temperatura, salinidade, chuva e maré possuem importância no estabelecimento das espécies de mangue. Globalmente a temperatura restringe as áreas de mangue a isoterma de 20° C no inverno de cada hemisfério. A distribuição de chuvas também modifica a riqueza de espécies que aumenta proporcionalmente a abundância de chuvas. Regionalmente as espécies de mangue apresentam diferentes distribuições ao longo do estuário marcadas pela tolerância de cada espécie a diferentes intervalos de salinidade. Fatores que influenciam na salinidade como força da maré e escoamento também influenciam na disposição das espécies ao longo do estuário (DUKE, 1998). Outros fatores bióticos têm sido contabilizados na distribuição das espécies de mangue na zona intermareis como a predação dos propágulos por caranguejo ou mesmo a presença de espaços que permitem a passagem de luz onde novas árvores podem crescer (SMITH, 1987).

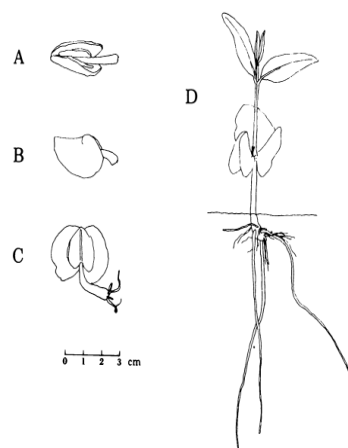
A alta dinâmica da zona intermareais levou o mangue a diversas adaptações. Dentre elas podem ser citadas algumas como a presença de raízes aéreas que facilitam a captação de oxigênio, já que o solo é hipóxico, grandes raízes que servem para suporte ao solo lamoso, glândulas que secretam o excesso de sal e propágulos vivíparos que resistem à dispersão por longas distâncias (DUKE, 1992). A viviparidade é uma adaptação do mangue para sobreviver longa dispersão no ambiente marinho. Ainda preso à árvore parental o zigoto formado pela reprodução sexual do mangue desenvolve-se diretamente de embrião em muda sem estágio de dormência da semente como ocorre nas plantas terrestres. O nome dado à unidade dispersiva do mangue é o propágulo. Outra característica adaptativa é a capacidade de flutuação do propágulos na água (Figuras 1, 2 e 3) que geralmente ocorre pela modificação da porção fibrosa da parede do propágulo, o mesocarpo. Os processos dispersivos que regem os propágulos ditam a distribuição das espécies de forma que a maior ou menor abundância de um grupo não é aleatória (Tomlinson, 2016).

Figura 1. Padrão de estabelecimento em *L.racemosa*; A, propágulo em dispersão; B, radícula se estabelece no sedimento; C, o propágulo torna-se ereto e resiste aos distúrbios da maré; D, pericarpo é rompido; E, Cotilédones expostos.



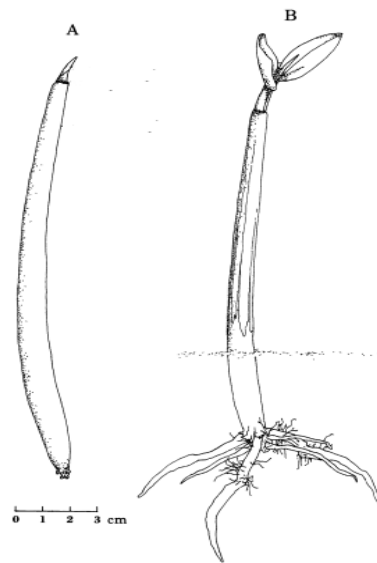
Fonte: Rabinowitz (1978).

Figura 2. Padrão de estabelecimento em *Avicennia*: A e B, propágulo logo após perder seu pericarpo; C, propágulo durante a dispersão; D, plântula com cotilédones expostos.



Fonte: Rabinowitz (1978).

Figura 3. Padrão de estabelecimento em *Rizophora mangle*: A, propágulo e B, plântula.



Fonte: Rabinowitz (1978, com adaptações)

Entender os fatores que regem a distribuição de espécies é necessário para compreender a distribuição atual do mangue e seus locais de estabelecimento de acordo com as variações de propriedades físicas e bióticas. Segundo Erfemeijer et al. (2008) a influência de fatores como vento e correntes na dispersão dos propágulos aliado ao seu tempo de sobrevivência pode modificar a possibilidade de sucesso no estabelecimento e crescimento de novas árvores de mangue. A partir deste entendimento é possível mensurar o efeito de modificações na dispersão dos propágulos através de modificações no ambiente por causas naturais ou modificações antrópicas. Nitto et al. (2013) verificou com o modelo Delft3D a dispersão de propágulos na reabilitação de áreas de fazendas de camarão abandonadas e obteve que a maré contribui no transporte dos propágulos para as áreas onde a recuperação do mangue é desejada.

Rabinowitz (1978) verificou o tempo de flutuação e estabelecimento de espécies de mangue para propágulos de espécies dos gêneros *Laguncularia*, *Avicennia* e *Rizophora* dentro de baldes, aquários e tanques onde os propágulos foram postos. Em cada um desses recipientes foram feitos experimentos com água salgada e doce, parada e corrente. Após intervalos de tempo propostos para dispersão nesses locais controlados, foram analisados os períodos de estabelecimento dos propágulos em baldes que continham solo para fixação. Para *Laguncularia* foram encontrados 8-55 dias de flutuação em água salgada e menor tempo em água doce, o estabelecimento foi maior para propágulos com menos que 10 dias de flutuação. Para a *Avicennia* foi encontrado tempo médio de vida de 16 semanas em água salgada e tempo para estabelecimento de três semanas. Para *Rizophora* não houve mortalidade em nenhum grupo ao final do experimento. Neste estudo foi mensurada a influência da salinidade e movimento da água no tempo de flutuação das espécies porém outros fatores como vento e morfologia do canal do estuário onde os propágulos foram retirados não foram considerados. Estes dois últimos fatores são importantes pela maior ou menor retenção dos propágulos e portanto influem no seu sucesso de estabelecimento.

Estudos que consideram a influência do vento na dispersão dos propágulos podem ser exemplificados por Stocken et al. (2013) que realizou uma combinação de 16 condições de vento e hidrodinâmica dentro de um tanque onde os propágulos das espécies *H. littoralis*, *X. granatum seed*, *A. marina*, *X. granatum fruit*, *R. mucronata*, *C. tagal*, *B. gymnoriza* foram postos. O tanque usado no estudo foi preenchido por água do mar. A corrente e o vento foram simulados pela mudança intensidade e direção. O resultado desse estudo serviu de base para construção de modelo que simula a dispersão dos propágulos no mangue de Gazy Bay, no Quênia. A influência do vento resultou em menor dispersão dos propágulos com maior densidade enquanto que os menos densos foram mais afetados pelo vento. A direção do vento quando oposta a saída do estuário, impediu que estes pudessem ser dispersos para oceano aberto.

As condições de vento e correntes propostas por Stocken et al. (2013) poderiam ter sido realizadas sem a presença de um tanque por modelos hidrodinâmicos como feito por Erfteimeijer et al. (2008) que fizeram uso de modelo numérico para verificar a influência do vento no transporte de propágulos de *Zostera marina* no estuário de Ems na Holanda. Eles analisaram o alcance dispersivo dos propágulos e a capacidade de regeneração da cobertura vegetal em áreas degradadas. Os autores utilizam o modelo de qualidade de água, Delft 3D-WAQ, e compararam a relação entre distância de dispersão, velocidade e direção do vento em diferentes cenários. Neste estudo eles obtiveram correlação positiva entre a direção predominante do vento e as maiores densidades de campos de *Zostera marina* existente no estuário.

Neste estudo será utilizado o mesmo modelo usado Erfteimeijer et al. (2008) e Nitto et al. (2013), o Delft3D. Com este modelo os forçantes vento, maré e descarga do rio serão usadas para verificar a influência dessas variáveis na dispersão de propágulos no estuário do rio Pacoti.

2 OBJETIVO

2.1 Geral

Determinar o padrão de dispersão dos propágulos das espécies *Rhizophora mangle*, *Avicennia spp.* e *Laguncularia racemosa* no estuário do Rio Pacoti e a influência de diferentes forçantes físicas neste processo.

2.2 Específico

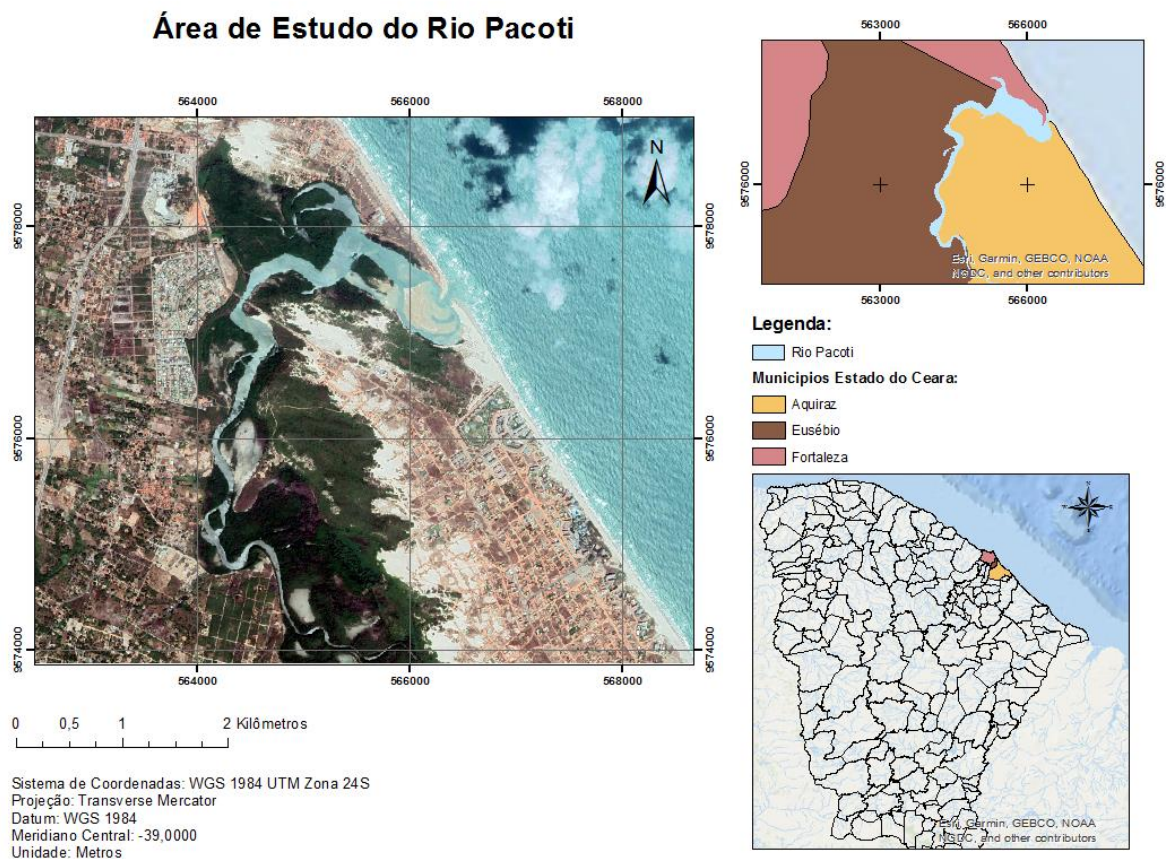
- Implementar um modelo hidrodinâmico para o estuário Rio Pacoti.
- Verificar a influência das variáveis físicas vento, descarga fluvial e marés na dispersão de diferentes espécies de mangue do rio Pacoti.

3 METODOLOGIA

3.1 Área de Estudo

A área de estudo está inserida na sub-bacia do baixo Pacoti que abrange três municípios: a parte norte de Eusébio, a área da praia da Colônia de Férias dos Empregados da Coelce (COFECO), em Fortaleza e a área turística do Porto das Dunas, no município de Aquiraz (Figura 4).

Figura 4. Área de estudo



Fonte: A autora.

A totalidade da bacia do rio possui elevada importância por ser fonte de abastecimento para os açudes Pacoti e Riachão, que abastecem a Região Metropolitana de Fortaleza. Além do mais, o rio passa por outros nove municípios sendo subsídio cultural e material para populações ribeirinhas (GORAYEB; SILVA; MEIRELES, 2004).

Na área de estudo é possível citar a presença de duas unidades geoambientais: Planície Litorânea e Tabuleiros Pré-Litorâneos. Na planície litorânea estão a faixa de praia e pós-praia, rochas de praia, planície flúvio-marinha e campos de dunas. (BARRA, 2014). A migração do campo de dunas na foz do rio Pacoti segue a direção dos ventos alíseos de nordeste. Estes ventos possuem velocidade média de 3 m/s, mas podem alcançar 9 m/s no segundo semestre (MAIA et al., 1998). Parte destes sedimentos retorna para a faixa de praia obstruindo parcialmente a desembocadura do rio (GORAYEB; SILVA; MEIRELES, 2004).

Os tabuleiros pré-litorâneos são formados por depósito de sedimentos que constituem a Formação Barreiras. Eles se encontram após os campos de dunas e prolongam-se até a depressão sertaneja (CEARÁ, 1996).

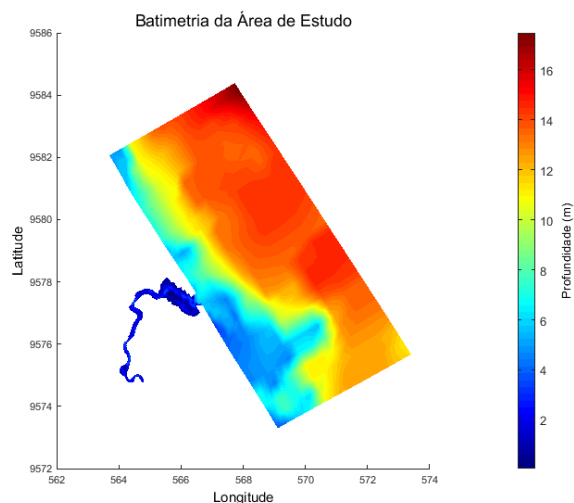
Com relação ao regime pluvial, a estação chuvosa ocorre entre os meses de janeiro a junho com média mensal de precipitação de 236,4 mm. As maiores precipitações ocorrem de fevereiro à maio. O período seco ocorre nos meses de julho a dezembro com média de precipitação de apenas 37,4 mm. Na estação chuvosa a média de temperatura é 26,67 ° C e na seca 26,65°C, caracterizando a região como clima tropical (BEZERRA, 2003).

A vegetação predominante as margens do estuário é o mangue. Ele se prolonga a cerca de 15 km da foz em direção ao interior do continente e ocupa área de 158 ha (BARRA, 2014). De acordo com Miranda, França e Coutinho (1994 apud Bezerra, 2003) as espécies de mangue presente no estuário do Rio Pacoti são as seguintes: *Rizophora mangle* (mangue vermelho), *Laguncularia racemosa* (mangue branco), *Avicennia schaueriana*, *Avicennia germinans* (mangue preto) e *Conocarpus erectus* (mangue botão). Foi criada em 15/02/2000 pelo Decreto Estadual n.º25.778 Área de Proteção Ambiental que visa a preservação do ecossistema costeiro presente na sua foz (MAIA, 2016).

3.2 O modelo Delft 3D

O modelo Delft3D foi desenvolvido pelo Instituto Deltares na Holanda e possui módulos com interface gráfica e ferramentas para pré e pós-processamento. É possível com este modelo simular cenários hidrodinâmicos, de ondas, qualidade de água, ecologia, sedimentos e morfodinâmica. O modelo foi desenvolvido para ambientes costeiros, entre os quais lagunas, rios e áreas estuarinas. Neste estudo será usado o módulo hidrodinâmico (FLOW) e de dispersão de partículas (PART). O modelo Delft3D resolve a simulação em 2D ou 3D. Em 2D é feita uma solução média vertical da circulação, enquanto que em 3D é utilizado mais de uma camada (DELTAIRES, 2017b), sendo possível simular as variações verticais das propriedades. Neste trabalho foi usado o modo 2D devido a área de estudo ser rasa (Figura 5) e haver grande mistura vertical, não havendo portanto a necessidade de mais de uma camada vertical.

Figura 5. Detalhes da batimetria da área de estudo.



Fonte: Dados da pesquisa

3.3 Módulo FLOW

Nesse módulo são simuladas as condições hidrodinâmicas do sistema (direção e intensidade de correntes e elevação do nível do mar) com base nas informações das forçantes descarga fluvial, marés e velocidade do vento e batimetria local. As condições hidrodinâmicas simuladas foram usadas como entrada para o módulo de partículas (Delft3D-PART) que simula a trajetória de partículas virtuais ao longo do tempo e espaço e que foram usadas na simulação da dispersão dos propágulos do mangue do rio Pacoti.

Antes da utilização dos dados hidrodinâmicos é necessário a validação dos resultados das simulações de forma a demonstrar que o modelo está representando de forma aceitável a realidade. Para validar as correntes obtidas do modelo hidrodinâmico foram simulados 30 dias, de 23/10/2010 a 23/11/2010, durante a estação seca que correspondem às datas na qual Schettini et al. (2017) coletaram os dados de corrente usados neste trabalho para validação da saída do modelo.

As coletas feitas no Rio Pacoti e usadas por estes autores ocorreram nos dias 7 a 9 de novembro de 2010. As simulações neste trabalho foram iniciadas em 23/10/2010 e finalizadas em 23/11/2010 de forma a estabilizar o modelo antes das datas de validação. Foi escolhido o intervalo de um mês, pois este é intervalo ideal para validação da maré por abranger os ciclos de marés de quadratura e sizígia. A variação do nível do mar do modelo também foi validada com a comparação com os dados do marégrafo do Porto do Mucuripe para o mesmo ano de 2010.

Após a validação dos resultados, foram realizadas simulações de 45 dias que serão usadas como base hidrodinâmica para o modelo de partículas. Com relação ao tempo, essas simulações podem ser divididas em dois períodos. O primeiro de 15/12/2018 a 30/01/2019 e o segundo de 15/04/2019 a 30/05/2019. As datas foram escolhidas de acordo com a média dos meses de maior produção de propágulos para cada espécie obtidos em trabalho de Nadia (2009). Foram simulados 45 dias que incluem os 15 dias para estabilização do modelo e 30 dias que serão usados para a dispersão das partículas que simulam os propágulos no modelo.

Com o intuito de se entender a importância de diferentes forçantes físicas na dispersão dos propágulos foram simulados os seguintes cenários para cada uma das espécies estudadas: apenas o efeito das marés sem descarga fluvial e sem vento, marés mais o efeito da descarga fluvial e sem vento e por último com todos os forçantes, marés, descarga fluvial e ventos. O trabalho não se ateve em simular cada uma das forçantes em sua respectiva data sazonal, fato verificado por haver descarga fluvial de 19 m³/s mesmo no mês de janeiro, o que dificilmente ocorre na região de estudo. O foco principal foi avaliar cada uma das forçantes possíveis e seus efeitos no mês de pico de produção de propágulos em cada umas das espécies estudadas. A seguir está à tabela 1 com as espécies, cada um dos cenários, o intervalo usado e o mês simulado.

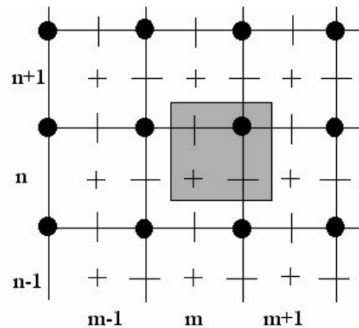
Tabela 1. Período de simulação de cada cenário para as espécies estudadas.

Espécie	Cenários	Períodos de simulação
<i>Laguncularia racemosa</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Marés • Marés mais descarga fluvial • Marés, descarga fluvial e ventos 	15 dias + mês de maio
<i>Avicennia spp.</i>		15 dias + mês de janeiro
<i>Rhizophora mangle</i>		15 dias + mês de janeiro

Fonte: A autora.

A grade do modelo discrimina o espaço físico onde informações de altura da água, direção e intensidade das correntes é simulada em cada um dos passos de tempo do modelo. Na figura 6 é mostrado como o modelo Delft3D representa as informações simuladas.

Figura 6. Representação da grade do modelo Delft3D.



Fonte: Deltares (2017b).

Onde:

+ nível da água, salinidade, temperatura.

- velocidade horizontal na direção m.

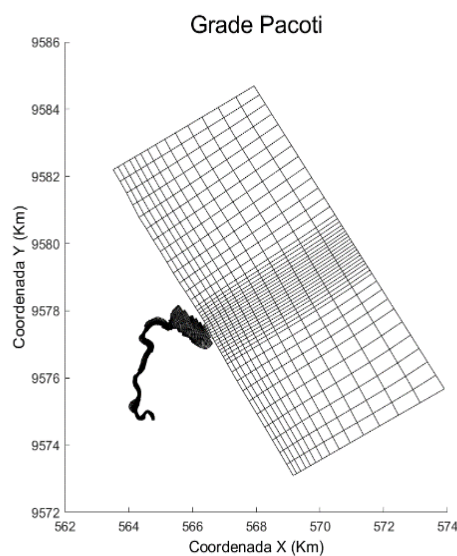
| velocidade horizontal na direção n.

A grade construída para este estudo possui resolução máxima de 6.56 m e mínima de 649 m e alcance desde a foz até 8,24 adentro do estuário, a área da grade na plataforma possui largura (direção n) de aproximadamente 2.4 km e comprimento (direção m) de 5 km. Optou-se por uma maior resolução dentro da área do estuário do rio Pacoti onde é desejável maior detalhamento de informações.

Na área que abrange a zona costeira foi usada uma menor resolução das células da grade. O sistema de coordenadas é cartesiano já que a área de domínio da grade possui extensão menor que 100 km², não sendo necessária a contabilização da esfericidade da superfície em questão (Figura 7). Outras informações sobre a parametrização do modelo hidrodinâmico podem ser encontradas na tabela 2.

A batimetria utilizada nas simulações para a área do rio foi concedida pelo Laboratório de Geologia e Geomorfologia Costeira e Oceânica (LGCO) da Universidade Estadual do Ceará (UECE) através de medições com GPS Náutico 521 S Garmin acoplado a ecossonda para o ano de 2010. A batimetria para a plataforma foi concedida pelo Laboratório de Dinâmica Costeira da Universidade Federal do Ceará.

Figura 7. Representação da grade numérica utilizada no estudo.



Fonte: A autora.

Os limites da grade em direção ao oceano demarcam a área externa ao domínio de modelagem. Este limite é chamado contorno aberto, nele informações de fluxo e transporte são adicionadas para determinar a influência da área não modelada nas soluções. Aqui o contorno aberto foi forçado com os dados de altura de maré (DELTARES, 2017a) calculados com base nos componentes harmônicos de maré (M2, S2, K1, O1, N2) disponibilizados pela Fundação de Estudo do Mar (FEMAR). Componentes harmônicos de maré são cada uma das oscilações harmônicas que somadas dão origem a maré correspondente a cada lugar e pelas marés de sizígia e quadratura (CASTELLO et al., 2015).

Tabela 2. Algumas informações inseridas no modelo.

Parâmetro	Valor
Quantidade de pontos na direção m	258
Quantidade de pontos na direção n	45
Sistema de Coordenadas	Cartesiano
Número de camadas	1
Passo de tempo	30 s
Tipo de forçante do nível da maré	Astronômica
Número de Chézy	Uniforme em 65 para na direção u e v
Viscosidade horizontal	1.0 m ² /s
Difusividade horizontal	1.0 m ² /s

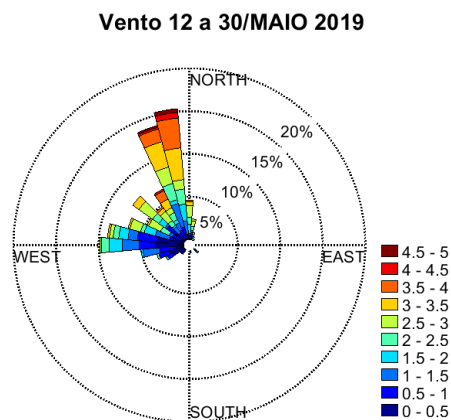
Fonte: A autora.

3.3.1 Forçantes

Os valores de descarga fluvial foram obtidos do trabalho de Molisani (2005), onde os valores médios são 19 m³/s e 1 m³/s para a estação de chuva e estiagem, respectivamente. Estes valores foram inseridos no limite superior da grade, com valores constantes no tempo.

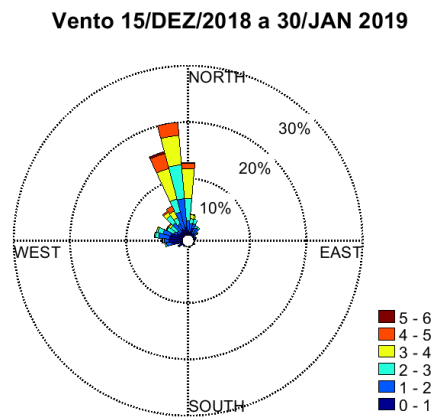
Nos cenários com descarga fluvial foi usado o valor de 19 m³/s correspondendo a estação chuvosa. No cenário sem descarga fluvial que corresponde a época de estiagem foi usado o valor de 1 m³/s. Os valores das velocidades e direções do vento para o período simulado foram obtidos das estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Nos cenários entre 15/12/2018 a 30/01/2019, os valores de direção e intensidade do vento foram uniformes no espaço e variaram no tempo (Figura 8). Nos cenários de 15/04/2019 a 30/05/2019 o vento foi uniforme no tempo e no espaço com valor obtido da média do vento de 12/05/2019 a 30/05/2019 já que a série temporal não cobriu todos os dias necessários (Figura 9).

Figura 8. Rosa dos ventos de 12/05/2019 a 30/05/2019.



Fonte: A autora.

Figura 9. Rosa dos ventos de 15/12/2018 a 30/01/2019.



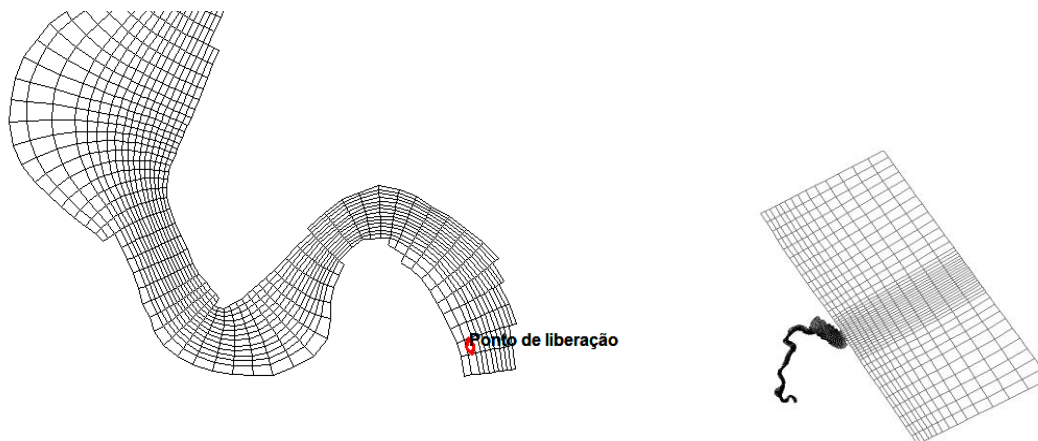
Fonte: A autora.

3.4 Módulo PART

O módulo de trajetória de partículas (PART) trabalha com transporte advectivo de partículas inertes em 3 ou 2 dimensões. Os propágulos de mangue serão representados pelas partículas no modelo. As informações de massa de cada uma delas foram inseridas de acordo com a massa dos propágulos das espécies estudadas. Características morfológicas dos propágulos não puderam ser simuladas pelo modelo. O local onde os propágulos foram liberados pode ser visto na figura 10.

No módulo PART é necessário especificar o número de partículas a ser liberado como representante de uma massa total. Por exemplo, se 10.000 partículas forem usadas no modelo para simular 100 gramas de partículas, cada partícula representa 0.01 g. (DELTARES, 2017b).

Figura 10. Local de liberação dos propágulos.



Fonte : A autora.

O intervalo de tempo usado para a liberação e o acompanhamento da dispersão foi baseado no mês médio de pico de produção de propágulos e no tempo de flutuação de cada espécie (Rabinowitz, 1978, Nadia, 2009). As informações de massa, comprimento dos propágulos, mês médio de pico da produção de propágulos e período de flutuação são mostradas na tabela 3 abaixo. Foi utilizado o intervalo de 30 dias para dispersão por representar o menor período de flutuação correspondente a *Laguncularia racemosa* e ser um intervalo comum de período de flutuação para as espécies de *Avicennia spp.* e *R. mangle*.

Como ressaltado anteriormente, foram utilizados 45 dias de simulação, de forma aos 15 primeiros dias serem usados na estabilização das simulações. Assim as partículas foram liberadas a partir do 16º dia e acompanhadas até o final da simulação. Os três cenários, foram feitos para *Laguncularia racemosa*, *Avicennia spp.* e *Rizophora mangle*, contabilizando 9 simulações no módulo PART.

Tabela 3. Massa, comprimento, mês médio de pico de produção de propágulos e período de flutuação das espécies estudadas.

Espécie	Massa (g)	Comprimento (cm)	Mês médio de pico da produção de propágulos	Período de Flutuação (dias)
<i>Laguncularia racemosa</i>	0.41 ± 0.02	2.19 ± 0.05	Maio	3-55
<i>Avicennia spp.</i>	1.10 ± 0.11	1.83 ± 0.05	Janeiro	90
<i>Rhizophora mangle</i>	14.0 ± 1.1	22.1 ± 1.0	Janeiro	180

Fonte: Rabinowitz (1978) e Nadia (2009).

A liberação das partículas neste estudo foi instantânea, ou seja, todas foram inseridas no modelo no mesmo ponto e no mesmo momento. O número mínimo de partículas necessário para ser inserido no modelo é dado a partir da seguinte equação:

$$C_{\min} = \frac{m_{\text{particle}}}{A_{\text{cell}} \times h_{\text{layer}}} = \frac{M_{\text{total}}}{N_{\text{total}} \times A_{\text{cell}} \times h_{\text{layer}}}$$

Fonte: Deltares (2017,b)

Onde:

C_{\min} : concentração mínima para resolução (Kg/m³)

$M_{\text{partícula}}$ massa por partícula [kg]

$A_{\text{célula}}$ área da célula computacional [m²]

H_{camada} profundidade da $A_{\text{célula}}$ [m]

N_{total} número total de partículas a ser liberado [-]

M_{total} massa total a ser liberada [kg]

Através dela é possível estimar a concentração mínima em kg/m³ que o modelo é capaz de realizar, baseado na resolução da menor área de célula do modelo e na menor profundidade. Dada esta concentração mínima, via regra de três, a quantidade de partículas mínima pode ser calculada. Usando a equação acima e os valores de massa de cada uma das sementes obtidos em Rabinowitz (1978), o valor mínimo para cada uma delas foi de 1000 partículas para cada uma das espécies simuladas. Para obtenção da concentração mínima (C_{\min}) a massa por partícula em quilogramas foi de 0.00041 kg para *L. racemosa*, 0.0011 kg para *Avicennia spp.* e 0.014 kg para *R. mangle*. A área da célula computacional ($A_{\text{célula}}$) é de 10 m² e a profundidade de $A_{\text{célula}}$ (H_{camada}) é de 1.75 m. Com estes valores o C_{\min} para *L. racemosa* foi de 2.34×10^{-5} , para *Avicennia spp* 6.3×10^{-5} e *R. mangle* 8×10^{-4} . Com estes valores pode-se chegar ao número total de partículas a ser liberado (N_{total}) que para foi aproximadamente 1000 partículas.

3.5 Validação dos resultados

A validação dos resultados será obtida através das comparações entre os valores de correntes disponíveis em Schettini et al. (2017) e os valores simulados. Também foram validados os resultados de nível da maré simulados, comparando-os com os dados disponíveis para o marégrafo do porto do Mucuripe. Para a verificação de concordância entre os valores de maré e corrente obtidos e os observados, foi usado método proposto por Wilmott (2013) e adaptado por Warner et al. (2005), chamado de parâmetro Skill:

$$\text{Skill} = 1 - \frac{\sum |X_{\text{model}} - X_{\text{obs}}|^2}{\sum (|X_{\text{model}} - \bar{X}_{\text{obs}}| + |X_{\text{obs}} - \bar{X}_{\text{obs}}|)^2}$$

Fonte: Wilmott (2013).

Onde:

\bar{X}_{model} média dos valores de saída do modelo

X_{model} valores de saída do modelo

X_{obs} valores observados

\bar{X}_{obs} média dos valores observados

Os valores de Skill vão de 0 até 1. Onde 0 significa completa discordância e 1 perfeita concordância entre o observado e o medido. Segundo Allen et al. (2007) os valores do skill são classificados como excelente quando >0.65 , entre 0.5-0.65 como muito bom, 0.2-0.5 como bom e <0.2 como ruim.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Validação das Simulações

4.1.1 Marés

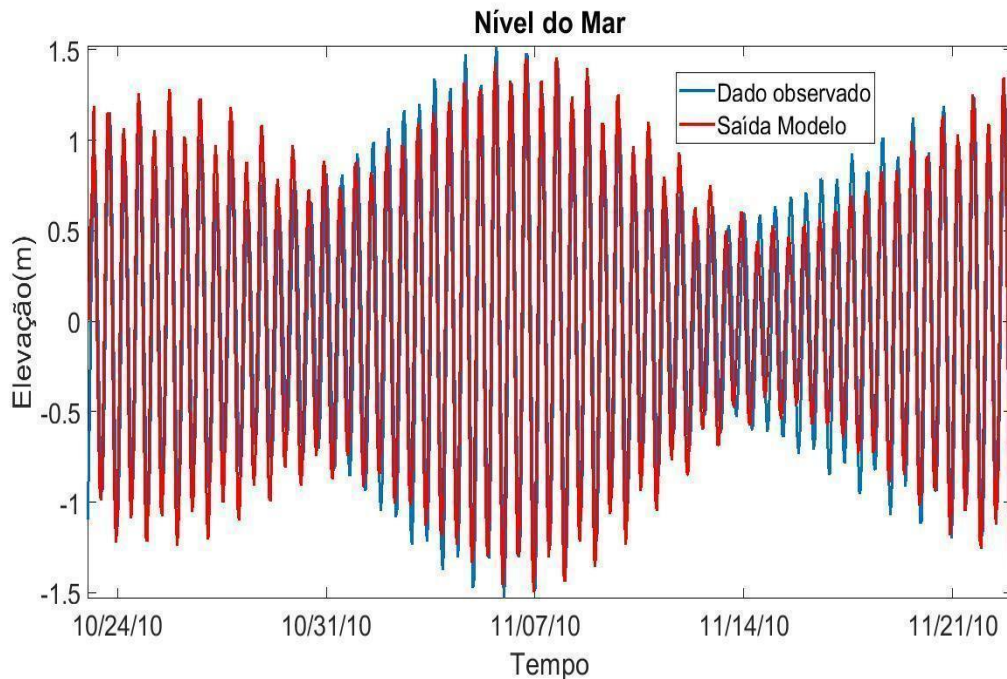
Os resultados da altura da maré obtidos pelo modelo foram validados através da comparação com os dados da estação maregráfica do Porto do Mucuripe em Fortaleza. São apresentados na Tabela 3 os valores dos componentes harmônicos do Porto do Mucuripe obtidas pela FEMAR e os componentes harmônicos obtidos da saída do modelo. De forma geral existe uma ótima concordância entre os valores medidos e simulados (Figura 11) e os erros encontrados são em geral menor do que 1% (Tabela 4). Os maiores erros de amplitude e fase foram, respectivamente, 1.37% e 1.28 %, ambos da componente O1 que ao contrário das componentes semi-diurnas M2 e S2, representam pouco da variabilidade total do nível do mar da região. O valor do parâmetro Skill da validação foi de 0.99, sendo classificado como Excelente.

Tabela 4. Comparação dos componentes harmônicos de maré obtidos pela FEMAR e calculados para os resultados do modelo.

Mucuripe	amplitude (cm) observado	amplitude (cm) modelo	Erro amplitude (%)	fase (g) graus (°) observado	fase (g) graus (°) modelo	erro de fase (%)
M2	96.2	96.1	0.1	132.00	131.87	0.1
S2	31	30.79	0.68	151.00	151.56	0.29
N2	19.5	19.73	1.18	115.00	115.54	0.47
K1	7.7	7.63	0.91	211.00	213.23	1.06
O1	7.3	7.2	1.37	186.00	183.62	1.28

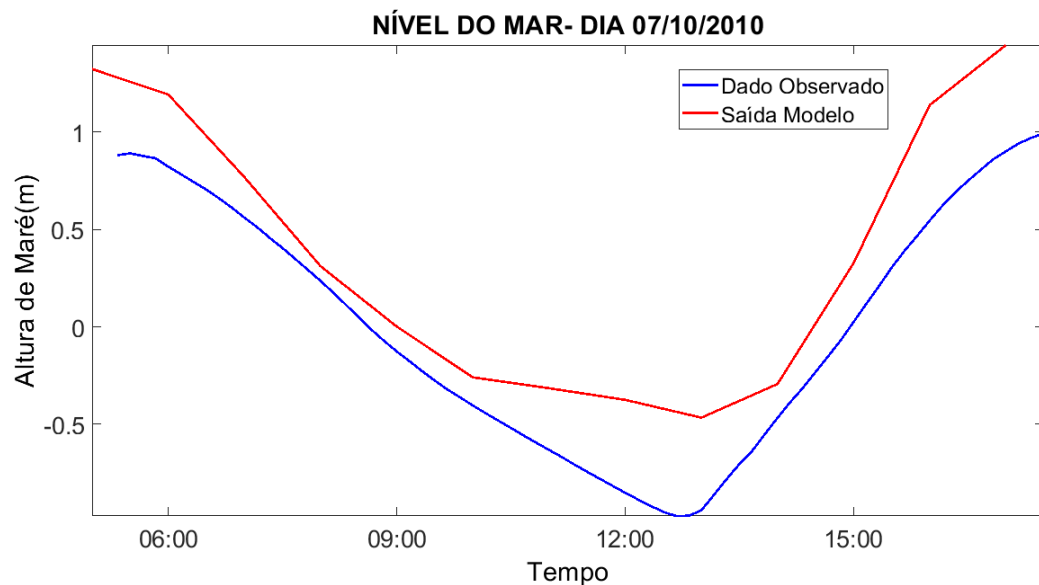
Fonte: dados da pesquisa.

Figura 11. Comparação do nível do mar obtido pelo modelo e os dados observados (FEMAR).



Fonte: dados da pesquisa.

Figura 12. Detalhe da comparação entre os dados de nível do mar observados e os dados de saída de modelo para o dia 07/10/2010.



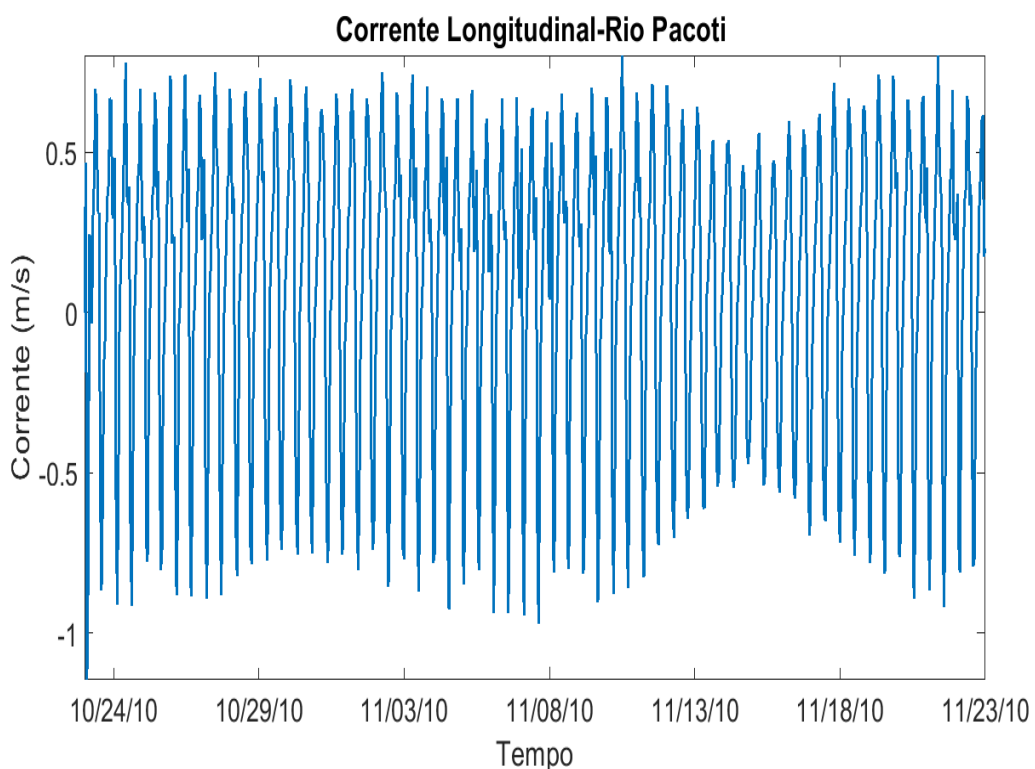
Fonte: dados da pesquisa.

A comparação entre os dados de altura de maré obtidos para o rio Pacoti para o dia 7 de novembro de 2010 e publicados por Schettini et al. (2017) e os dados simulados pelo modelo para a mesma data é mostrada na figura 12. Os dados do modelo estão superestimados com relação aos valores dos dados observados. O parâmetro Skill foi de 0.77 sendo classificado como excelente.

4.1.2 Correntes

Os valores de correntes calculados no modelo foram comparados com os valores publicados por Schettini et al. (2017) para o Rio Pacoti. O autor usou um *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP) que mede direção e velocidade de corrente. O modelo do ADCP usado é Aquadopp Profiler e obteve valores de corrente e nível de maré na foz do rio entre os dias 7 e 9 de Novembro de 2010. O equipamento foi configurado para coletar os dados a cada 10 min, com média 120s. O equipamento foi configurado para usar 20 células, cada uma com 30 cm, na direção vertical para coleta porém nas comparações foram usados os valores médios da coluna de água.

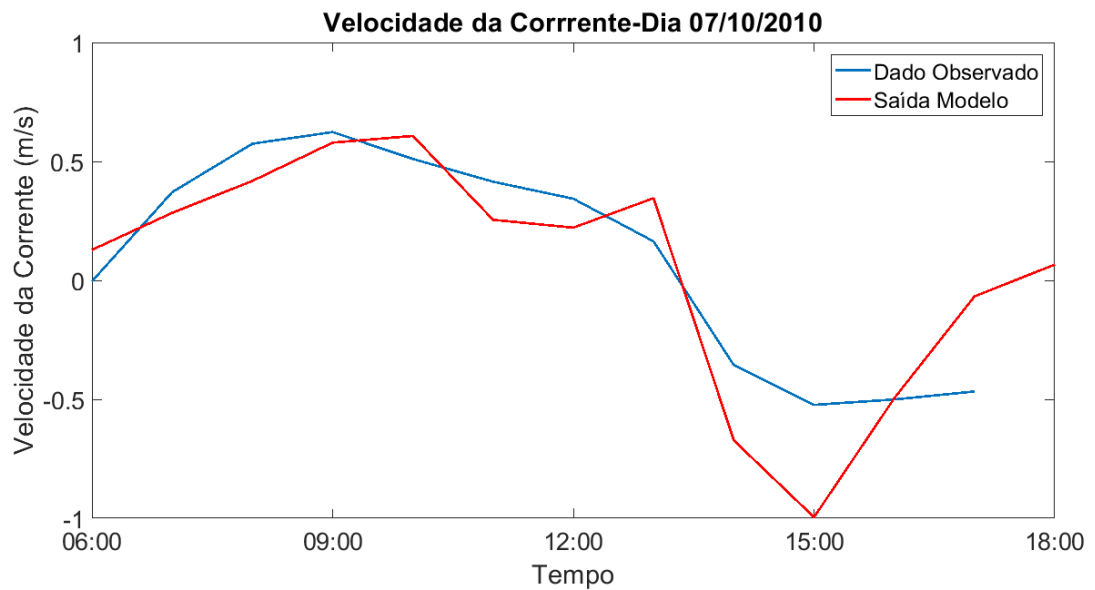
Figura 13. Dados de corrente do estuário do rio Pacoti obtidos pelo modelo.



Fonte: dados da pesquisa.

Os valores de correntes negativos correspondem a maré vazante e os positivos a maré enchente (Figura 13). A média dos picos de maré vazante foram 17% maior que a média dos picos de maré enchente para o mês de novembro de 2010. Essa dominância de vazante condiz com os resultados encontrados na literatura (Freire e Maia, 1991 , Schettini et al., 2017, Bezerra, 2003).

Figura 14. Comparação entre os valores de corrente longitudinais modelados e observados para o dia 07/10/2010.



Fonte: dados da pesquisa.

No dia 07/10/2010, é possível observar dominância de vazante no ciclo de maré, onde houve duração a mais de 120 minutos da maré vazante com relação ao tempo para maré enchente (Figura 14).

Com base nos valores acima, percebe-se que o modelo simulou bem as variações de nível do mar e a circulação do Rio Pacoti, sendo possível desta maneira o uso dos resultados hidrodinâmicos nos cenários de dispersão dos propágulos de mangue.

4.2 Cenários de dispersão dos propágulos

A seguir são apresentadas a trajetória de um propágulo de *Avicennia spp.*, *Laguncularia racemosa* e *Rizophora mangle* em cada um dos cenários modelados.

4.2.1 Cenário: Forçado por marés, sem descarga e sem vento.

De forma geral, nas simulações apenas com marés os propágulos não saem do estuário durante todo o período simulado, independente da espécie estudada, devido à ausência de outras forçantes que corroborem com a maré na dispersão dos propágulos (Figuras 15, 16 e 17). Há uma diversidade de trajetórias dentro do estuário, porém observadas as posições de início e término das trajetórias percebe-se que não existe grande dispersão.

A retenção dos propágulos dentro do estuário aumenta as chances de estabelecimento pela proximidade das porções de terra às margens do rio, que são possíveis locais onde as espécies estudadas podem se implantar.

Considerando que os propágulos aqui mostrados passam todo o período simulado sobre a influência da maré dentro do estuário podemos inferir segundo a literatura a influência da maré no seu estabelecimento, já que neste estudo este aspecto não foi possível simular.

Delgado et al.(2011) verificou a influência da maré no estabelecimento de *Laguncularia* e *Avicennia* através de amarração dos propágulos em áreas de diferentes inundações da maré. *L.racemosa* mostrou que pode se estabelecer embaixo da água pois após o crescimento de suas raízes seu propágulo afunda e é mais resistente aos distúrbios da maré, enquanto que *Avicennia* sob a ação da maré não possui a mesma habilidade e permanece flutuando. Esta característica para *Avicennia* é reforçada por estudo realizado por Balke et al. (2011) onde a influência da maré simulada dentro de um tanque no estabelecimento da espécie *Avicennia alba* dependeu de suas raízes crescerem e tornarem-se fortes o bastante para resistirem a força da maré e o carreamento do sedimento no seu entorno. O crescimento das raízes, porém só é possível se houver uma janela de tempo suficiente sem influência da força da maré que no estudo foi cerca de 8 dias.

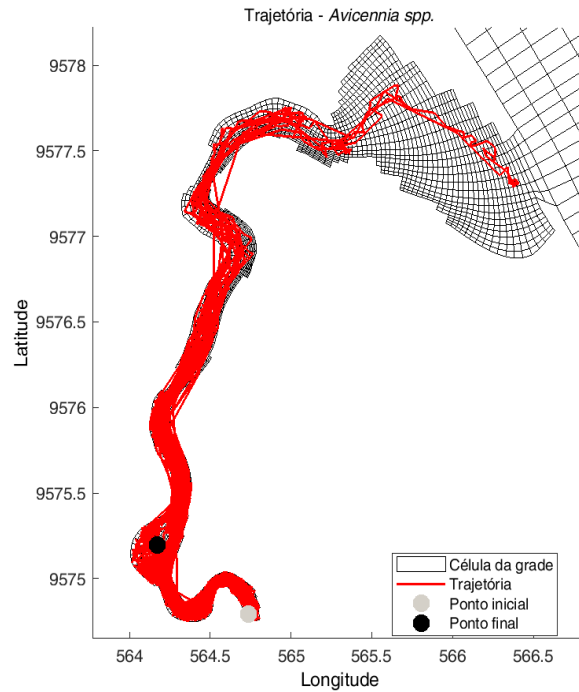
Considerando as características descritas por Delgado et al.(2011) para *L. racemosa*, a permanência da influência da maré durante o período simulado não impediria um possível estabelecimento desta espécie.

Já o propágulo de *Avicennia spp.* que neste estudo esteve por todo o período simulado sobre influência da maré, teria possibilidade de estabelecimento menor que de *L. racemosa* visto que necessita de intervalo sem força de maré para que possa desenvolver suas raízes e se estabelecer.

Rabinowitz (1978) em experimentos de estabelecimento de *Rizophora* em tanques com água salgada e doce observou que esta possui capacidade de afundar após o crescimento de suas raízes e diferente dos outros gêneros aqui estudados, ela é a única que pode novamente voltar a flutuar após não encontrar condições adequadas para se implantar no solo.

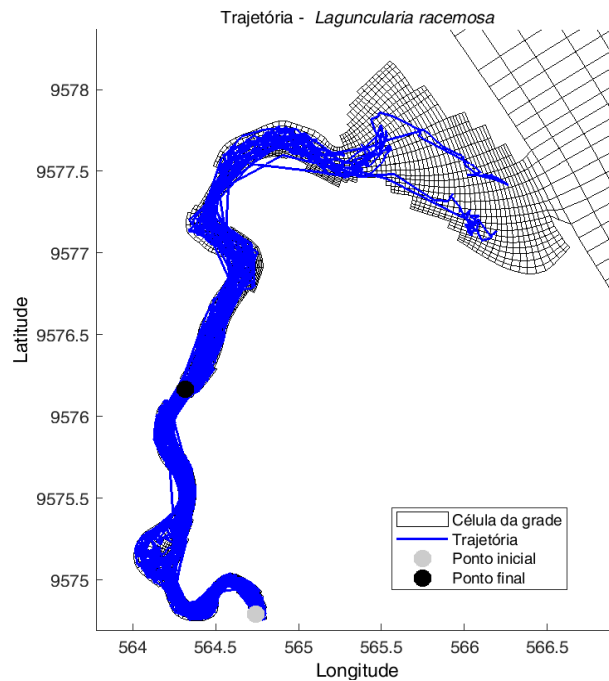
Portanto haveria chances de estabelecimento da espécie *R. mangle* mesmo ela estando sobre a influência da maré sobre todo o período simulado.

Figura 15. Trajetória para um propágulo de *Avicennia spp.* de 01/01/2019 a 30/01/2019 para o cenário forçado apenas com marés.



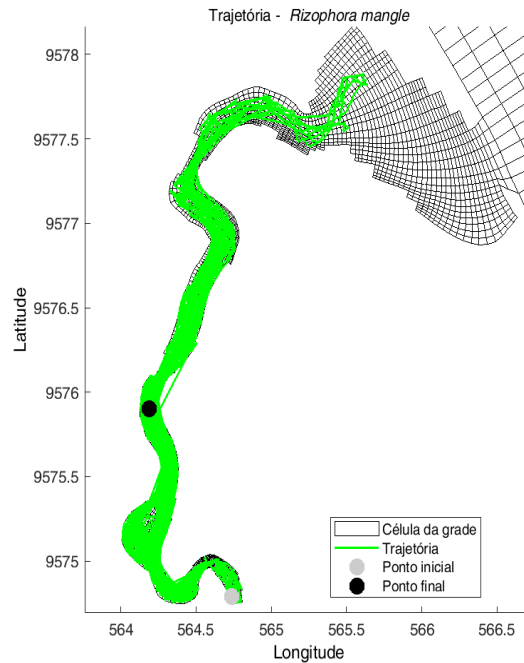
Fonte: dados da pesquisa.

Figura 16. Trajetória para um propágulo de *L.racemosa* de 01/05/2019 a 30/05/2019 para o cenário forçado apenas com marés.



Fonte: dados da pesquisa.

Figura 17. Trajetória para um propágulo *R. mangle* de 01/01/2019 a 30/01/2019 para o cenário forçado apenas com marés.



Fonte: dados da pesquisa.

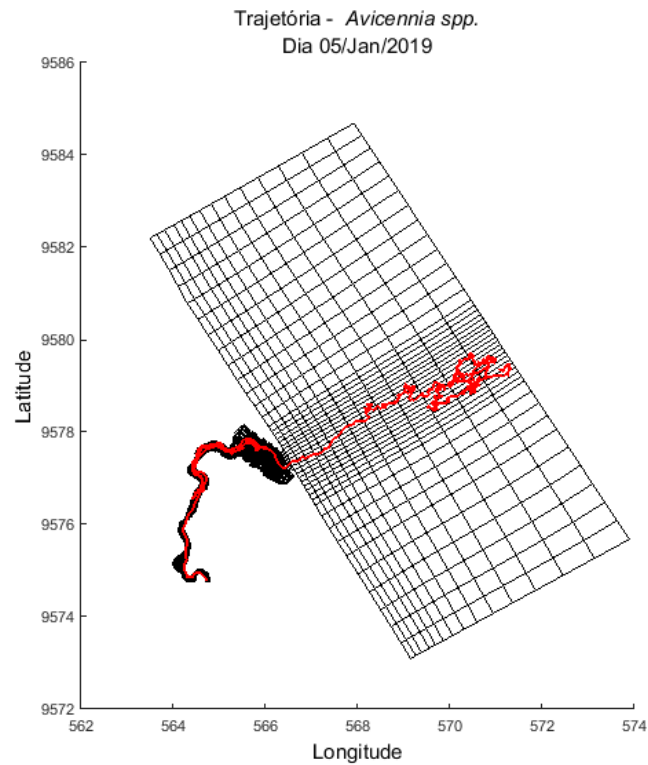
4.2.2 Cenário: Forçado por marés, com descarga fluvial e sem vento

Após cinco dias da liberação dos propágulos os mesmos já estão fora do estuário, mostrando que a descarga é responsável pelo seu rápido transporte (Figuras 18, 20 e 22) para a plataforma.

A trajetória dos propágulos ao saírem do estuário seguem direção perpendicular a costa até serem desviados para leste para *Avicennia ssp.* e *L. racemosa* (Figuras 18 e 20), e oeste para para *R. mangle* (Figura 22). Tal comportamento sugere o limite de influência da descarga do estuário na trajetória dos propágulos. Após o desvio na trajetória, a forçante predominante é a maré, isto pode ser observado pelas diversas elipses dos propágulos sobre seu próprio trajeto, característico da trajetória cíclica gerada pelas marés que foi igualmente encontrada em todas as espécies estudadas (Figuras 19, 21 e 23).

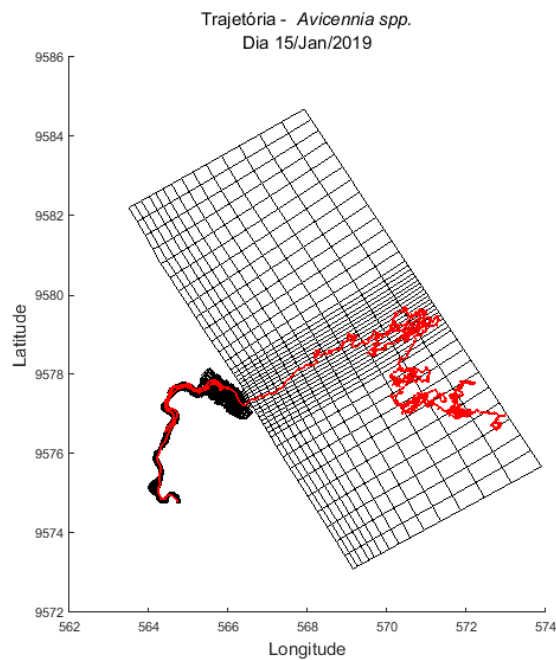
Após quinze dias da liberação dos propágulos as trajetórias estavam fora da área do domínio modelado (Figuras 19 e 23), exceto para *L. racemosa* que foi após vinte dias (Figura 21).

Figura 18. Trajetória para um propágulo de *Avicennia spp.* até o dia 05/01/2019 para o cenário forçado por marés e descarga fluvial.



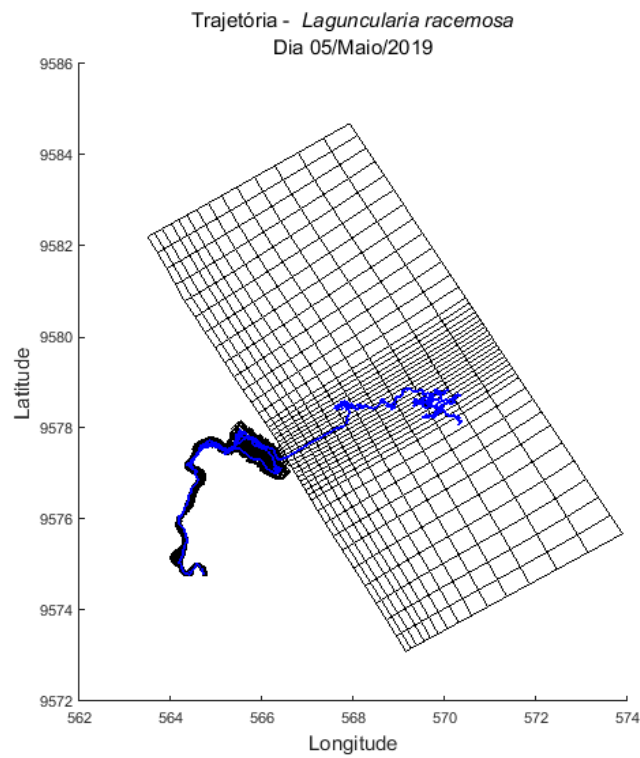
Fonte: dados da pesquisa.

Figura 19. Trajetória para um propágulo de *Avicennia spp.* até o dia 15/01/2019 para o cenário forçado por marés e descarga fluvial.



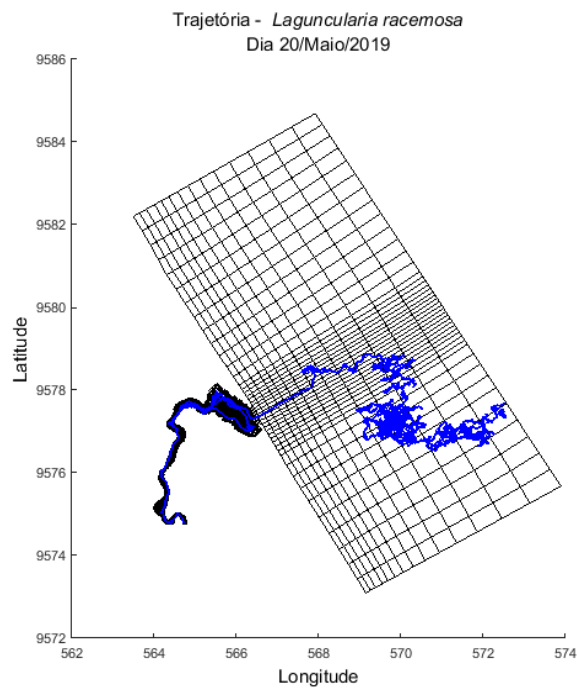
Fonte: dados da pesquisa.

Figura 20. Trajetória para um propágulo de *Laguncularia racemosa* até o dia 05/05/2019 para o cenário forçado por marés e descarga fluvial.



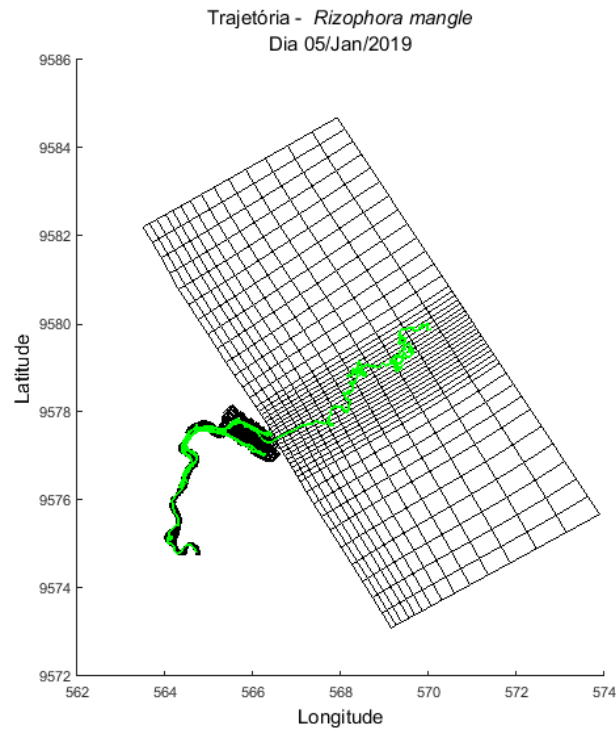
Fonte: dados da pesquisa.

Figura 21. Trajetória para um propágulo de *Laguncularia racemosa* até o dia 20/05/2019 para o cenário forçado por marés e descarga fluvial.



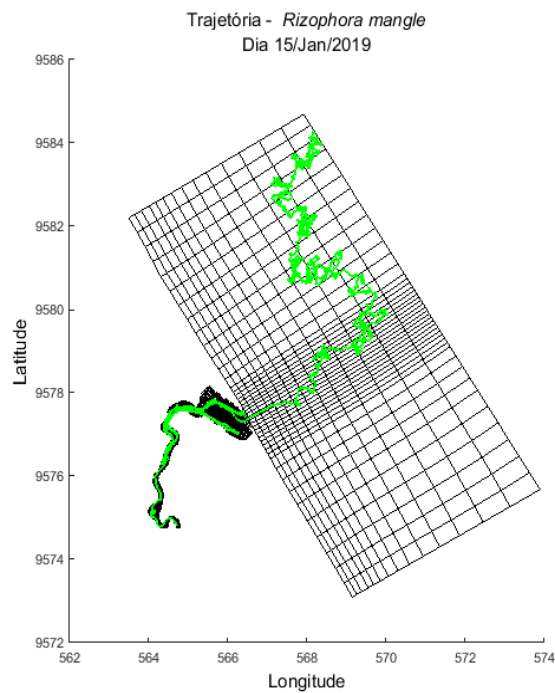
Fonte: dados da pesquisa.

Figura 22. Trajetória para um propágulo de *Rizophora mangle* até o dia 05/01/2019 para o cenário forçado por marés e descarga fluvial.



Fonte: dados da pesquisa.

Figura 23. Trajetória para um propágulo de *Rizophora mangle* até o dia 15/01/2019 para o cenário forçado por marés e descarga fluvial.



Fonte: dados da pesquisa.

4.2.3 Cenário: Forçado por marés, descarga fluvial e vento.

Após cinco dias de simulação é possível identificar a saída dos propágulos do estuário com continuidade de trajetória aproximadamente retilínea até ser desviado para oeste pelo vento. O desvio da trajetória marca o limite da influência da descarga fluvial quando a forçante vento passa a ser dominante (Figuras 24, 26 e 28).

Ao comparar a influência da descarga na plataforma com o exemplo anterior (Figuras 18, 20 e 22), nota-se que neste cenário os propágulos são transportados a distância perpendicular a costa menor até serem desviados pelo vento.

Após 10 dias de simulação os propágulos já se encontram fora do domínio modelado e a direção de transporte para todas as espécies foi para oeste (Figuras 25, 27 e 29).

Comparando os cenários com e sem vento, percebe-se que a descarga fluvial é uma importante forçante para o transporte dos propágulos para fora da área do estuário, enquanto que o vento possui pouca influência devido à pequena área de atuação dentro do rio e a direção do mesmo em relação ao eixo central do estuário. O vento teve um importante papel como dispersor na plataforma onde a pista de vento é maior (Figuras 25, 27 e 29). As partículas fora do estuário são transportadas na direção oeste devido influência do vento que sopra de sudeste.

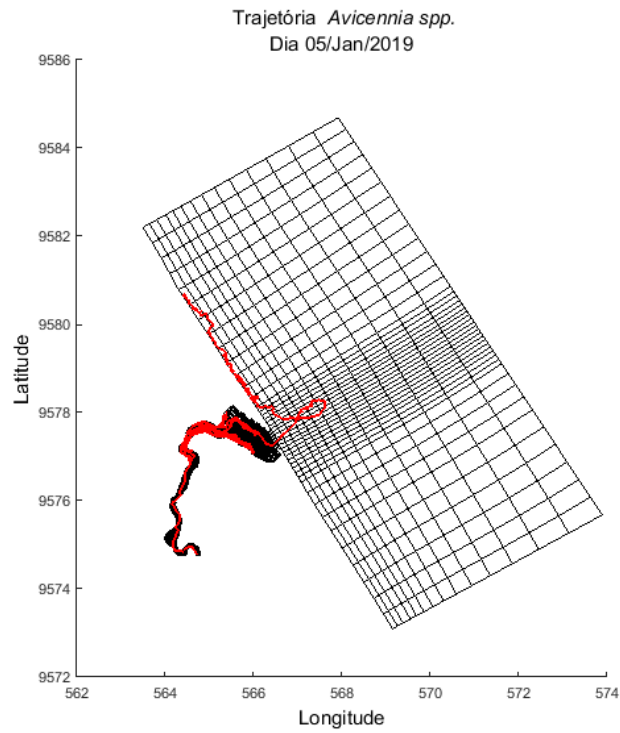
Em modelo desenvolvido por Stocken e Menemenlis (2017) para dispersão de propágulos de mangue na Baía de Gazy, Moçambique, ele verificou que espécies de *Avicennia* podem viajar até 3.000 km em bacias oceânicas.

Localmente Bittencourt (2013) usou flutuadores no modelo Regional Ocean Modelling System (ROMS) para verificar a conectividade entre os estuários do estado do Ceará. No cenário com maré e vento como forçantes foram encontrados valores de 10 dias para que flutuadores liberados do Rio Pacoti encontrassem o Rio Cocó, 30 dias até o Rio Ceará, 120 dias até o Rio Curú e aproximadamente 200 dias até o Rio Acaraú.

Estes resultados corroboram com o apresentado neste estudo no cenário onde na área externa a maré e o vento são encarregados do transporte dos propágulos para direção oeste. Nesta direção estão o estuário do rio Cocó, Ceará, Curú e Acaraú dentro do estado do Ceará. Todos estes estuários são possíveis locais de estabelecimento dos propágulos.

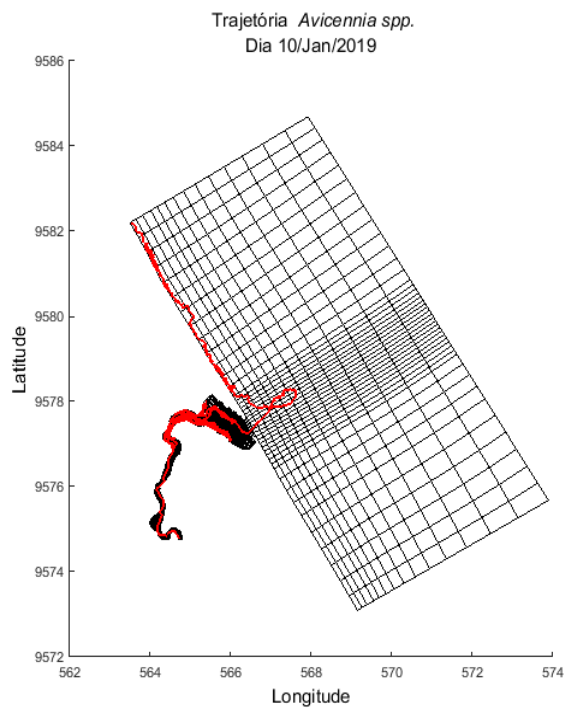
Considerando o tempo achado por Bittencourt (2013) para conexão entre os estuários a oeste do rio Pacoti e o período de flutuação das espécies estudadas, a *Avicennia spp.* Com tempo de flutuabilidade de 90 dias chegaria as proximidades do rio Curu. Os propágulos de *Rizophora mangle*, com tempo de flutuação de até 180 dias alcançariam próximo ao estuário do rio Acaraú. Já os propágulos de *Laguncularia racemosa* que possuem até 55 dias de flutuação chegariam até o rio Ceará.

Figura 24. Trajetória para um propágulo de *Avicennia spp.* até o dia 05/01/2019 para o cenário forçado por marés, descarga fluvial e ventos.



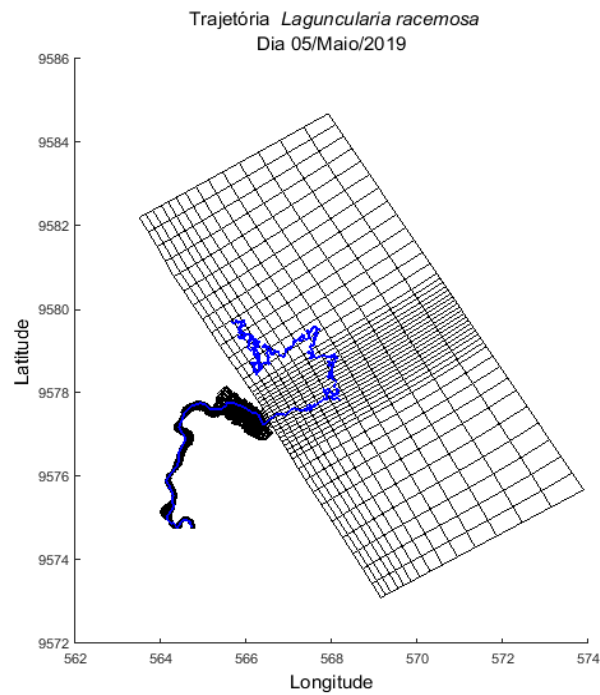
Fonte: dados da pesquisa.

Figura 25. Trajetória para um propágulo de *Avicennia spp.* até o dia 10/01/2019 para o cenário forçado por marés, descarga fluvial e ventos.



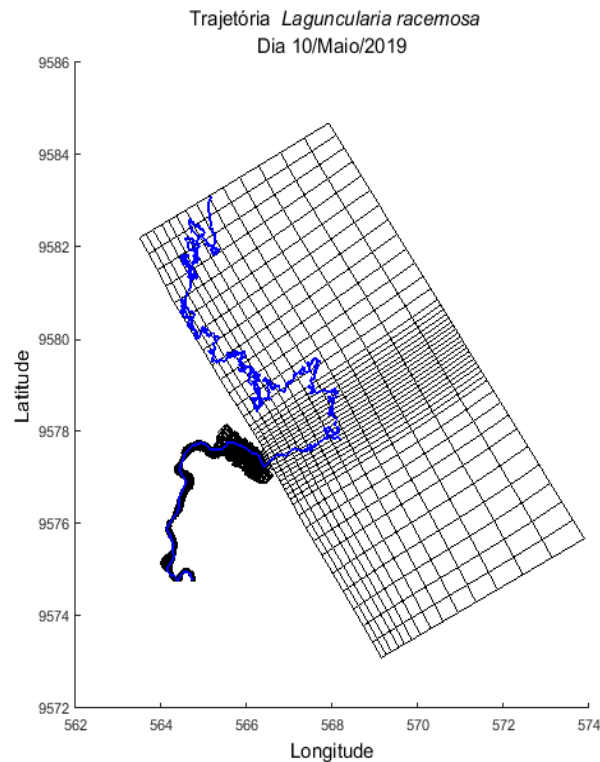
Fonte: dados da pesquisa.

Figura 26. Trajetória para um propágulo de *Laguncularia racemosa* até o dia 05/05/2019 para o cenário forçado por marés, descarga fluvial e ventos.



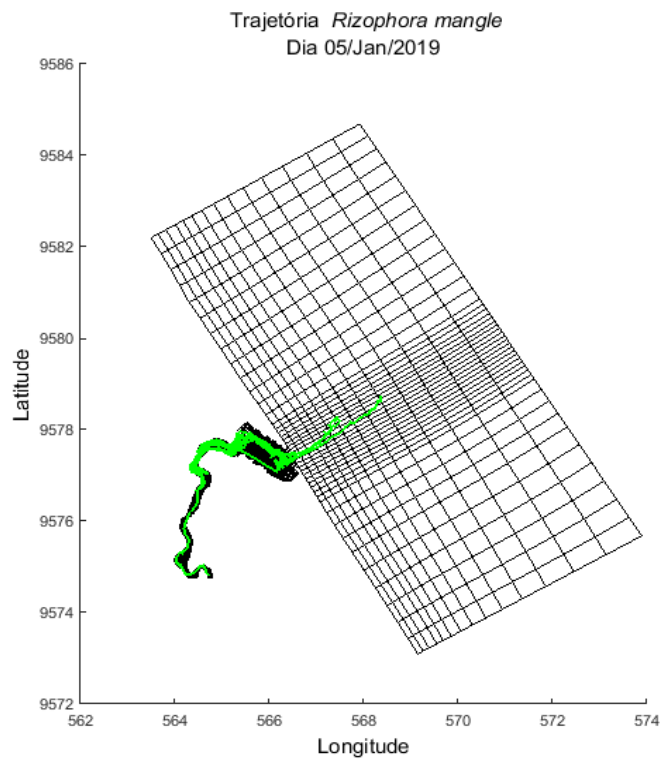
Fonte: dados da pesquisa.

Figura 27. Trajetória para um propágulo de *Laguncularia racemosa* até o dia 10/05/2019 para o cenário forçado por marés, descarga fluvial e ventos.



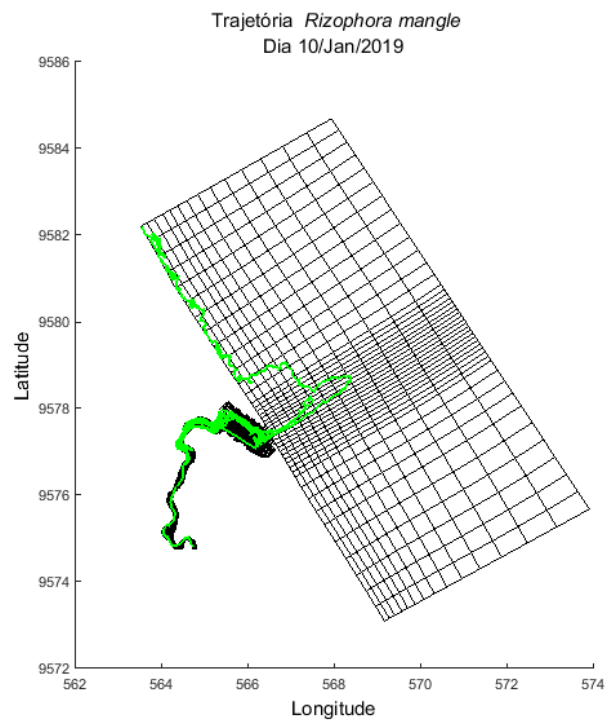
Fonte: dados da pesquisa.

Figura 28. Trajetória para um propágulo de *Rizophora mangle* até o dia 05/01/2019 para o cenário forçado por marés, descarga fluvial e ventos.



Fonte: dados da pesquisa.

Figura 29. Trajetória para um propágulo de *Rizophora mangle* até o dia 10/01/2019 para o cenário forçado por marés, descarga fluvial e ventos.



Fonte: dados da pesquisa.

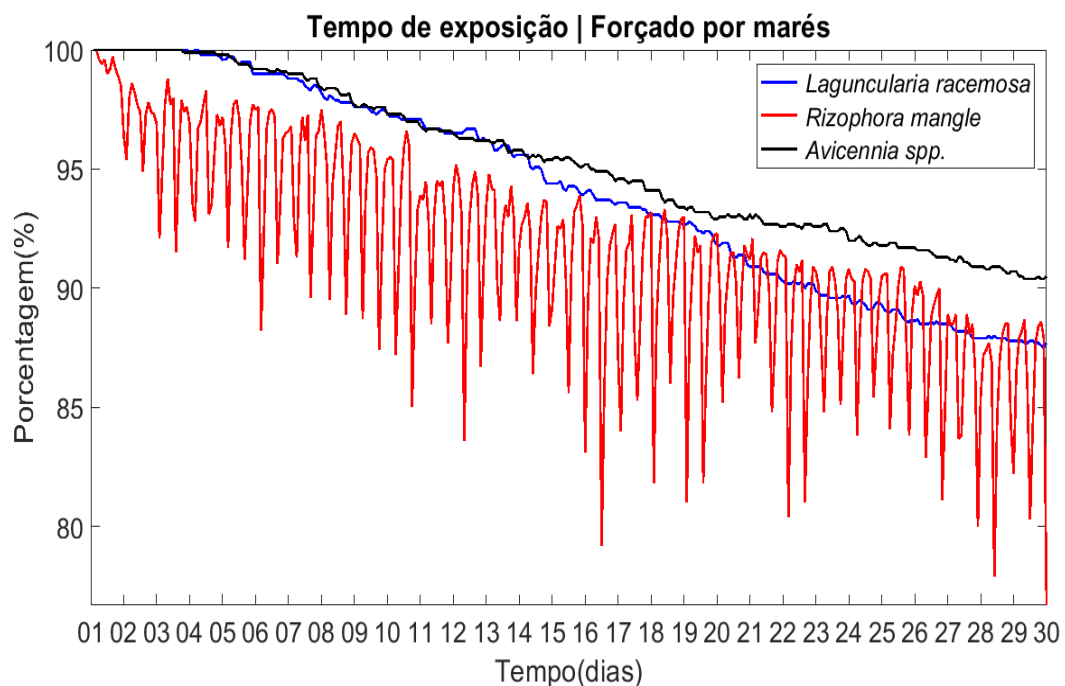
4.3 Tempo de exposição

O tempo de exposição corresponde ao tempo em que os propágulos permaneceram dentro do estuário sem atravessar o canal de saída. Isto é uma boa estimativa das trocas com a plataforma e da renovação de águas do sistema. A seguir os resultados de tempo de exposição para cada um dos cenários são apresentados, considerando a concentração inicial de 100% igual a 1000 propágulos lançados dentro do estuário e acompanhando quantos destes propágulos permanecem no sistema.

4.3.1 Cenário: Forçado por marés, sem descarga e sem vento.

A simulação para o cenário com marés e sem descarga e vento apresentou retenção dos propágulos dentro da área do estuário (Figura 30). Isto mostra que as marés sozinhas não são capazes de retirar todos os propágulos do sistema, apesar de distribuí-los como mostrado nos mapas de trajetória. Apesar de ser um cenário idealizado, estas condições são próximas a época de estiagem na região onde a descarga fluvial no rio Pacoti é quase nula. Após 30 dias de simulação 75 % dos propágulos ainda encontravam-se retidos no estuário abrindo a possibilidade de estabelecimento dentro do estuário de origem para mais da metade dos propágulos das espécies estudadas. Os propágulos de *Rizophora mangle* apresentou oscilações maiores (Figura 30) pois possui massa cerca de 12 vezes maior que a de *Avicennia spp.* e 34 vezes maior que a de *L. racemosa*. Portanto as oscilações maiores para *L.racemosa* corresponde ao maior transporte de massa forçado por marés.

Figura 30. Concentração de propágulos dentro do estuário para o cenário forçado com marés, sem descarga fluvial e sem vento.



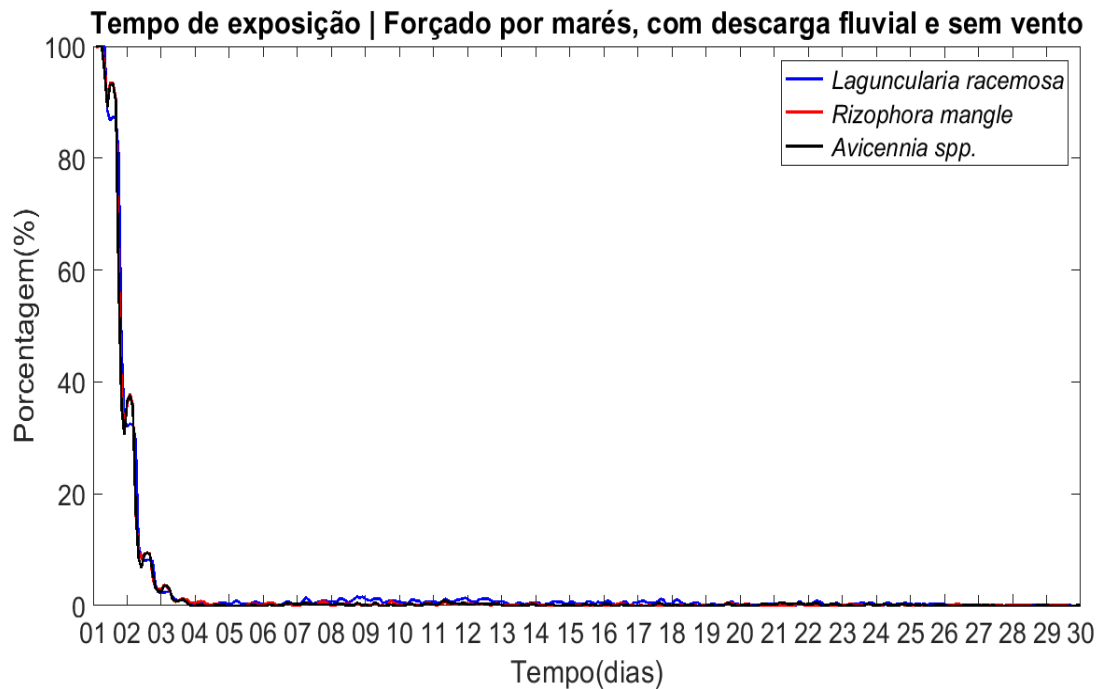
Fonte: dados da pesquisa.

4.3.2 Cenário: Forçado por marés, com descarga fluvial e sem vento

No cenário forçado por marés, descarga fluvial e sem vento (Figura 31) é possível observar um rápido transporte dos propágulos de mangue para fora da área do estuário em menos de três dias. Após o quinto dia de simulação todas as espécies apresentaram concentração de propágulos menor do que 3% dentro do estuário, situação esta que se prolonga até o final da simulação.

Este resultado mostra a grande influência da descarga fluvial como forçante para acelerar a saída dos propágulos de todas as espécies estudadas. Portanto quase que a totalidade dos propágulos expelidos do estuário se distanciam da possibilidade de estabelecimento no mangue de origem.

Figura 31. Concentração de propágulos dentro do estuário para o cenário forçado com marés, com descarga fluvial e sem vento.



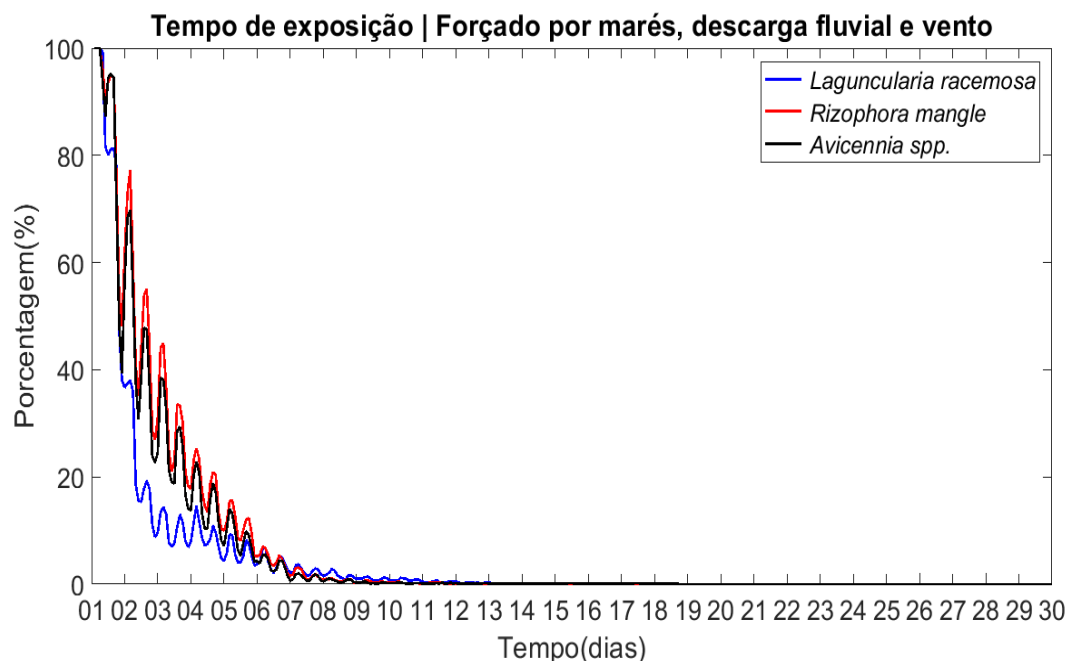
Fonte: dados da pesquisa.

4.3.3. Cenário: Forçado por marés, descarga fluvial e vento

No cenário forçado por marés, descarga fluvial e vento o transporte da maioria dos propágulos para fora do sistema ocorre em menos de 7 dias e as concentrações ficam menores do que 5% até o final da simulação (Figura 32). Este resultado é semelhante ao encontrado para o tempo de exposição no cenário forçado por marés e descarga fluvial figura 31, porém devido a uma maior retenção dos propágulos junto à costa, os mesmos retornam para dentro do estuário, o que pode ser observado pelas oscilações antes do quinto dia na figura 32. De forma geral percebe-se que o vento atua para manter os propágulos por mais tempo dentro do sistema. Stocken et al. (2015) encontrou comportamento semelhante em modelo simulado para o Baía de Gazy no Quênia, onde o vento de sul dificultava a saída dos propágulos de mangue estudados do estuário. A saída deles só foi possível em momentos que a velocidade do vento tornava-se mais baixa ou o vento mudava de direção.

Portanto o vento de sudeste na área de estudo age como uma forçante que aumenta a possibilidade de estabelecimento dos propágulos das espécies estudadas dentro do estuário de origem até o quinto dia. Passado 5 dias o vento passa a expelí-los para longe do estuário de origem na direção oeste, abrindo possibilidade para estabelecimento em estuários localizados nesta direção.

Figura 32. Concentração de propágulos dentro do estuário para o cenário forçado com marés, com descarga fluvial e com vento.



Fonte: dados da pesquisa.

5 CONCLUSÃO

Com o presente trabalho foi possível implementar o modelo e validá-lo. A influência das forçantes vento, descarga fluvial e marés na dispersão dos propágulos de mangue dentro do estuário do rio Pacoti também foi identificada. As simulações foram capazes de reproduzir a circulação e elevação do nível do mar dentro do estuário. O efeito isolado da circulação gerada pelas marés é responsável pelo transporte de propágulos dentro de todo o estuário, mas não é capaz de exportar os mesmos para área da plataforma, tal cenário corresponderia a época de estiagem na região estudada.

Quando a descarga fluvial é incluída nas simulações há transporte de quase todos os propágulos para a região costeira até o 3º dia de simulação. Neste cenário houve uma concentração remanescente menor que 5 % para os 30 dias restantes de simulação dentro do estuário. A descarga é portanto a forçante principal que dirige os propágulos para a plataforma, esta condição somente seria possível na estação chuvosa.

No cenário onde marés, descarga e vento foram considerados também houve rápida saída de quase todos os propágulos, porém o vento faz com que eles fiquem próximos à costa e a retornando no próximo ciclo de maré, fazendo com que o tempo de exposição seja um pouco maior que o cenário sem vento. O vento possui função modeladora da direção dos propágulos na plataforma onde a área da sua influência é maior que no estuário.

Considerando o trapeamento dos propágulos de mangue pela própria vegetação, característica que não pode ser simulada pelo modelo, há possibilidade de subestimação do tempo de residência dos propágulos dentro do estuário. Propõem-se estudos paralelos a este que contabilizem as características físicas das sementes dentro do mangue do rio Pacoti como massa, densidade e tempo de flutuação, juntamente com o trabalhos que acompanhem o trajeto dos propágulos dentro do rio Pacoti ou mesmo o trajeto de flutuadores para validação dos dados aqui obtidos.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

BALKE, T et al. Windows of opportunity: thresholds to mangrove seedling establishment on tidal flats. **Marine Ecology Progress Series**, [s.l.], v. 440, p.1-9, 28 out. 2011. Inter-Research Science Center. <http://dx.doi.org/10.3354/meps09364>.

BARRA, Otávio Augusto de Oliveira Lima et al. CARACTERIZAÇÃO GEOAMBIENTAL E OS CONFLITOS EXISTENTES NA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA DO BAIXO PACOTI, CEARÁ – BRASIL. **Revista Casa da Geografia de Sobral**, Sobral, v. 16, n. 2, p.66-83, 2014.

BEZERRA, Claudiane Quaresma Pinto. **Aspectos Hidrológicos e Balanço dos Principais Nutrientes Presentes no Estuário do Rio Pacoti**. 2003. 162 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003.

BITTENCOURT, Liana Pacheco. **VARIABILIDADE ESPACIAL E SAZONALIDADE DA CIRCULAÇÃO BAROTRÓPICA DA PLATAFORMA CONTINENTAL DO CEARÁ**. 2013. 69 f. Monografia (Especialização) - Curso de Oceanografia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

CASTELLO, Jorge P. et al. **Introdução às Ciências do Mar**. Pelotas: Textos, 2015. 601 p.

CEARÁ. COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS (COGERH). Plano Diretor da Bacia do Curu. V. I. Tomo I. Fortaleza, 1996.

DELGADO, P et al. The importance of propagule establishment and physical factors in mangrove distributional patterns in a Costa Rican estuary. **Aquatic Botany**, [s.l.], v. 71, n. 3, p.157-178, nov. 2001. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0304-3770\(01\)00188-7](http://dx.doi.org/10.1016/s0304-3770(01)00188-7)

DELTARES, Delft3D-FLOW: Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. User manual. Delft3D, v. 3.15.52614, Holanda, 2017a. 686 p.

DELTARES, D-Waq PART: Simulation of mid-field water quality and oil spills, using particle tracking. User manual. D-Water Quality, v. 2.15.52614, Holanda, 2017b. 130 p.

DUKE, N.C. Mangrove Floristics and Biogeography. Whashington: **Coastal and Estuarine Studies Series**, 1992.

DUKE, Norman C.; BALL, Marilyn C.; ELLISON, Joanna C.. Factors Influencing Biodiversity and Distributional Gradients in Mangroves. **Global Ecology And Biogeography Letters**, [s.l.], v. 7, n. 1, p.27-47, jan. 1998. JSTOR. <http://dx.doi.org/10.2307/2997695>.

ERFTEMEIJER, Pla et al. Eelgrass seed dispersal via floating generative shoots in the Dutch Wadden Sea: a model approach. **Marine Ecology Progress Series**, [s.l.], v. 358, p.115-124, 21 abr. 2008. Inter-Research Science Center. <http://dx.doi.org/10.3354/meps07304>.

FREIRE, G. S. S.; MAIA, L. P. Regime hidrodinâmico do estuário do rio Pacoti, *Revista de Geologia, Fortaleza*, v. 4, p. 29-32, 1991.

GORAYEB, Adryane; SILVA, Edson Vicente da; MEIRELES, Antônio Jeovah de Andrade. MEIO AMBIENTE E CONDIÇÕES DE SUSTENTABILIDADE DA PLANÍCIE FLÚVIO MARINHA DO RIO PACOTI – CEARÁ – BRASIL. **Geoambiente On-line**, Jataí-go, v. 2, n. 1, p.1-17, 2004.

MAIA, Rafaela Camargo. **Manguezais do Ceará**. Fortaleza: Ifce, 2016. 57 p.

MIRANDA, P. T. C.; FRANÇA, M. A. M.; COUTINHO, M. L. O. Composição Florística e Estrutura de Bosque de Mangue dos Rios Ceará, Cocó e Pacoti. Fortaleza: SEMACE, 1994.

MOLISANI, M. O. P. **Estimativa da descarga fluvial para os principais estuários do estado do Ceará**, Zoneamento Ecológico e Econômico da Zona Costeira do Estado do Ceará. Governo do Estado do Ceará, p.15, 2005.

NADIA, Tarcila Correia de Lima. Fenologia, Ecologia da Polinização e Reprodução de Espécies de Manguezal no Município de Goiana-PE. 2009. 145 f. Tese (Doutorado) - Curso de Biologia Vegetal, Botânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

NITTO, D. di et al. Modelling drivers of mangrove propagule dispersal and restoration of abandoned shrimp farms. **Biogeosciences**, [s.l.], v. 10, n. 7, p.5095-5113, 26 jul. 2013. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/bg-10-5095-2013>

ODUM, Eugene P.; BARRETT, Gary W.. **Fundamentos de ecologia**. São Paulo: Cengage Learning, 2007.

POTTER, Ian C. et al. The concept of an estuary: A definition that incorporates systems which can become closed to the ocean and hypersaline. **Estuarine, Coastal And Shelf Science**, [s.l.], v. 87, n. 3, p.497-500, abr. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2010.01.021>.

RABINOWITZ, Deborah. Dispersal Properties of Mangrove Propagules. **Biotropica**, [s.l.], v. 10, n. 1, p.47-57, mar. 1978. JSTOR. <http://dx.doi.org/10.2307/2388105>.

SCHETTINI, Carlos A.f.; VALLE-LEVINSON, Arnoldo; TRUCCOLO, Eliane C.. Circulation and transport in short, low-inflow estuaries under anthropogenic stresses. **Regional Studies In Marine Science**, [s.l.], v. 10, p.52-64, fev. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rsma.2017.01.004>.

SMITH, Thomas J.. Effects of seed predators and light level on the distribution of *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh. in tropical, tidal forests. **Estuarine, Coastal And Shelf Science**, [s.l.], v. 25, n. 1, p.43-51, jul. 1987. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0272-7714\(87\)90024-2](http://dx.doi.org/10.1016/0272-7714(87)90024-2).

STOCKEN, Tom van Der et al. Interaction between Water and Wind as a Driver of Passive Dispersal in Mangroves. **Plos One**, [s.l.], v. 10, n. 3, p.1-17, 26 mar. 2015. Public Library of Science (PLoS). <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0121593>.

STOCKEN, Tom van Der; MENEMENLIS, Dimitris. Modelling mangrove propagule dispersal trajectories using high-resolution estimates of ocean surface winds and currents. **Biotropica**, [s.l.], v. 49, n. 4, p.472-481, 21 abr. 2017. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/btp.12440>.

TOMLINSON, P. Barry. Seedlings and Seeds. **The Botany Of Mangroves**, [s.l.], p.135-153, 2006. Cambridge University Press. <http://dx.doi.org/10.1017/cbo9781139946575.011>.

VALLE-LEVINSON, Arnaldo. **Contemporary Issues in Estuary Physics**. Florida: Cambridge University Press, 2010.

WARNER, John C.. Numerical modeling of an estuary: A comprehensive skill assessment. *Journal Of Geophysical Research*, [s.l.], v. 110, n. 5, p.1-13, 2005. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2004jc002691>.

WILLMOTT, Cort J.. ON THE VALIDATION OF MODELS. **Physical Geography**, [s.l.], v. 2, n. 2, p.184-194, jul. 1981. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/02723646.1981.10642213>.