



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

FABÍOLA CARDOSO DA MOTA

**Avaliação do Modelo Hidrodinâmico SMC: uma aplicação na Costa
Norte Brasileira.**

BELÉM

2016

FABÍOLA CARDOSO DA MOTA

**Avaliação do Modelo Hidrodinâmico SMC: uma aplicação na Costa
Norte Brasileira.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará em cumprimento às exigências para a obtenção de título de Mestre em Geofísica.

Área de Concentração: Geofísica
Marinha

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Rollnic

BELÉM

2016

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFPA

Mota, Fabíola Cardoso da, 1989-

Avaliação do modelo hidrodinâmico SMC: uma aplicação na costa norte brasileira. / Fabíola Cardoso da Mota. - 2016.

Orientador: Marcelo Rollnic.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geofísica, Belém, 2016.

1. Costa - Maiandeuá, Ilha de (PA). 2. Gerenciamento costeiro - Maiandeuá, Ilha de (PA) - Modelos matemáticos. 3. Monitorização ambiental - Maiandeuá, Ilha de (PA) - Modelos matemáticos. 4. Sistema de Modelagem Costeira (SMC-Brasil). I. Título.

CDD 22. ed. 628.10981

FABÍOLA CARDOSO DA MOTA

**Avaliação do Modelo Hidrodinâmico SMC: uma aplicação na Costa Norte
Brasileira.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará em cumprimento às exigências para a obtenção de título de Mestre em Geofísica.

Data da Defesa: 24/ 05/ 2016

Data da aprovação: 24/ 05/ 2016

Conceito: 8,5 (Bom)

Banca Examinadora:



Prof^o. Marcelo Rollnic - Orientador
Doutor em Oceanografia.
Universidade Federal do Pará



Prof^o. Alexandre Melo Casseb do Carmo – Membro
Doutor em Meteorologia.
Universidade Federal do Pará



Prof^o. Marcus André Silva – Membro
Doutor em Oceanografia.
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Agradeço:

- ✓ A Deus;
- ✓ Ao Professor Dr^o Marcelo Rollnic por me orientar (GEOFMAR);
- ✓ A CPGf;
- ✓ A CAPS (pela oportunidade de bolsa);
- ✓ Ao LAIT (pelo empréstimo de aparelhos);
- ✓ A Márcia Regina Lima de Oliveira pela colaboração com o Ministério do Meio Ambiente;
- ✓ A Laura Ribas, pelas forças com o modelo;
- ✓ A Thaís Borba pelo compartilhamento da batimetria e traduções;
- ✓ A Pamela Yhaohannah pelas rotinas.
- ✓ Arthur Santos, Matheus Lopes e ao Maurício Costa e pelas ajudas e incentivos;
- ✓ E aos demais amigos do GEOFMAR, LOF, e da Oceanografia pelo apoio moral.

RESUMO

Os ambientes costeiros são altamente dinâmicos por serem palco da atuação de complexos processos que ocorrem na transição entre o oceano e o continente. As mudanças na zona costeira em resposta às alterações climáticas resultam em diversos impactos, causando declínio nos valores econômicos, ecológicos, ambientais e de subsistência. O gerenciamento costeiro integrado é um processo que pode ser definido como sendo contínuo e dinâmico, no qual decisões são tomadas para o uso sustentável, desenvolvimento e proteção dos recursos das áreas costeiras e marinhas. A principal meta do gerenciamento costeiro integrado é melhorar a qualidade de vida das comunidades humanas que dependem dos recursos costeiros, levando em consideração a manutenção da diversidade biológica e a produtividade dos seus ecossistemas. O Sistema de Modelagem Costeiro (SMCBrasil), foi introduzido no Brasil, pelo Ministério do Meio Ambiente, com o intuito de padronizar a modelagem em toda a Costa do País. Este trabalho objetiva testar, avaliar e comparar as ferramentas do Modelo hidrodinâmico do SMCBrasil à Costa Norte do Brasil (Praia da Princesa-Ilha de Algodão), através de métodos simples dessa ferramenta, com a finalidade de ampliar o conhecimento dos processos costeiros que governam essa região através da modelagem. A fim de entender os processos envolvidos na área de estudo, a metodologia consistiu em coletar dados de campo para conhecer a intensidade dos parâmetros costeiros da região. Foi desenvolvido 6 casos no modelo que representassem as teorias de onda (Linear, Stokes e Composto) e de transporte sedimentar (Bailard e Soulsby) para dois instantes de maré: baixa-mar e preamar. Foram criadas duas malhas na área de estudo, e escolhido um ponto de entrada que melhor se adequasse a ela e as condições limites do modelo. Dentre as formulações estudadas, as ondas propagadas pela teoria Composta foram as que melhor representaram a área de estudo em questão, e o transporte de sedimentos simulado pela teoria de Soulsby sofreu menos interferência da interpolação do que o de Bailard, uma vez que considera o transporte de fundo e de suspensão. Os casos simulados neste trabalho foram baseados em condições de contorno que ocorrem com maior frequência no local, desta forma os resultados encontrados servem como base para entender como funciona os processos costeiros desse estudo de maneira geral.

Palavras-chave: Zona Costeira. Modelagem. SMCBrasil.

ABSTRACT

Coastal environments are highly dynamic because of complex processes that occur in the transition between the ocean and the continent. Climate changes induce changes in the coastal zone that cause decline in economic, environmental and subsistence values. The integrated coastal zone management is a continuous and dynamic process, in which decisions should be taken in order to sustainable development and protection of resources of coastal and marine areas. The main goal of integrated coastal zone management is to improve the life quality of human communities that are dependent of coastal resources, taking into account the maintenance of biological diversity and ecosystems productivity. The coastal modelling system called SMC Brazil was introduced in Brazil by the Ministry of Environment in order to standardize the modeling throughout the coastal zone of the country. This study aims to implement the model SMCBrasil in North Coast of Brazil (Princesa beach- Algodual Island), evaluate it and analyze the hydrodynamic answers, in order to know more about coastal processes that govern this region. In order to understand the processes in the study area, the methodology consisted in collect in situ data to know about the intensity of coastal parameters. 6 cases were created in the model to represent the wave theories (Linear, Stokes and Composite) and sediment transport (Bailard and Soulsby) for two moments of tide: low tide and high tide. Two mesh grids were created in the study area, and one entry point that would fit better to it and the conditions limits of the model was chosen. The propagated waves by the composed theory represented the study area in question more than the others, and the simulated sediment transport simulated by Soulsby theory suffered less interference of interpolation than the Bailard, since it considers the bed transport and suspension. The simulated cases in this study were based on boundary conditions that more often occur on the study area, so the results can be used as a basin to understanding how the coastal processes occur in it in general way.

Keyword: Coastal zone. Modelling. SMCBrasil.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Pontos selecionados de geração da base de dados de maré astronômica (a) e meteorológica (b) do SMC-Brasil.	22
Figura 2- Terminologia usada para confecção da malha.	31
Figura 3- Mapa da área de estudo.	33
Figura 4- Imagem real da área de estudo em 2D.	34
Figura 5- Detalhamento dos casos a serem propagados.	36
Figura 6- Malhas. a) representada no SMC 3.0 e b) representada no SMC-Tools. ...	38
Figura 7- Localização (a) e distância (b) do ponto de dados de entrada.	39
Figura 8- Condições médias de Hs do ponto DOW avaliado.	39
Figura 9- Condições médias do Tp do ponto DOW avaliado.	40
Figura 10- Condições médias de maré do ponto DOW avaliado.	41
Figura 11- Condições médias de direção do ponto DOW avaliado.	42
Figura 12- Variação do nível de maré do ponto In Situ.	46
Figura 13- Variação das velocidades da corrente do ponto In Situ.	47
Figura 14- Isolinhas de Hs (a), corrente (b) e transporte: Soulsby (c) e Bailard (d), avaliadas no caso 01 (Baixa-mar), a partir do modelo Composto.	49
Figura 15- Isolinhas de Hs (a), corrente (b) e transporte: Soulsby (c) e Bailard (d), avaliadas no caso 02 (Preamar), a partir do modelo Composto.	49
Figura 16- Isolinhas de Hs (a), corrente (b) e transporte: Soulsby (c) e Bailard (d), avaliadas no caso 03 (Baixa-mar), a partir do modelo de Stokes.	51
Figura 17- Isolinhas de Hs (a), corrente (b) e transporte: Soulsby (c) e Bailard (d), avaliadas no caso 04 (Preamar), a partir do modelo Stokes.	51
Figura 18- Isolinhas de Hs (a), corrente (b) e transporte: Soulsby (c) e Bailard (d), avaliadas no caso 05 (Baixa-mar), a partir do modelo Linear.	53
Figura 19- Isolinhas de Hs (a), corrente (b) e transporte: Soulsby (c) e Bailard (d), avaliadas no caso 06 (Baixa-mar), a partir do modelo Linear.	53
Figura 20- Distribuição dos campos de altura de onda durante a Baixa-mar. Teorias: Composto (C1), Stokes (C3) e Linear (C5).....	55
Figura 21- Distribuição dos campos de altura de onda durante a Preamar. Teorias: Composto (C2), Stokes (C4) e Linear (C6).....	56
Figura 22- Distribuição dos campos de corrente durante a Baixa-mar. Teorias: Composto (C1), Stokes (C3) e Linear (C5).....	58

Figura 23- Distribuição dos campos de corrente durante a Preamar. Teorias: Composto (C2), Stokes (C4) e Linear (C6).....	59
Figura 24- Distribuição dos campos transporte durante a Baixa-mar (Soulsby).	62
Figura 25- Distribuição dos campos de transporte durante a Preamar (Soulsby).	63
Figura 26- Distribuição dos campos de transporte durante a Baixa-mar (Bailard).	64
Figura 27- Distribuição dos campos de transporte durante a Preamar (Bailard).	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Configurações da malha.	37
Tabela 2- Orientação do ponto Dow.....	38
Tabela 3- Condições iniciais dos casos criados para o módulo OLUCA-MC e COPLA-MC.	43
Tabela 4- Condições iniciais dos casos criados para o módulo EROS-MC,	44
Tabela 5- Dados medidos em campo.....	45
Tabela 6- Análise do modelo.....	66

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	13
CAPÍTULO 2: JUSTIFICATIVA	15
CAPÍTULO 3: OBJETIVOS	16
3.1 Objetivo Geral	16
3.2 Objetivos Específicos	16
CAPÍTULO 4: REVISÃO TEÓRICA	17
4.1 Onda	17
4.2 Maré	19
4.3 Modelo (Sistema de Monitoramento Costeiro-SMC)	20
4.3.1 Ferramenta SMC-TOOLS.....	21
4.4 Formulação Matemática	23
4.4.1 Parâmetros da base OLUCA-MC.....	23
4.4.2 Parâmetros da base COPLA-MC	25
4.4.3 Parâmetros da base EROS-MC	28
4.5 Malha	31
CAPÍTULO 5: MÉTODO	32
5.1 Área de Estudo	32
5.1.1 Praia Modelada	34
5.2 Materiais e Métodos	35
5.2.1 Amostragem	35
5.2.2 Modelagem	35
5.2.3 Batimetria	36
5.2.4 Modelo	36
CAPÍTULO 6: RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
6.1 Dados Amostrados	45
6.2 Dados Modelados	48
CAPÍTULO 7: CONCLUSÃO	67

REFERÊNCIAS	69
-------------------	----

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

Os ambientes costeiros são altamente dinâmicos por serem palco da atuação de complexos processos que ocorrem na transição entre o oceano e o continente. As condições oceanográficas das águas costeiras diferem, particularmente, daquelas do oceano; onde as variações físicas, químicas e biológicas, no espaço e no tempo são bem maiores. Entre os fatores responsáveis por isso estão as descargas fluviais, as correntes de maré, além dos efeitos da costa sobre a circulação (PICKARD, 1968).

De acordo com Nicolodi e Petermann (2010), o litoral brasileiro possui cerca de 8.698 km de extensão e área aproximada de 514 mil km², constitui-se em um perene desafio à gestão em face da diversidade de situações existentes neste território. São aproximadamente 300 municípios com ligação direta com o mar, os quais têm, na faixa de praia, um espaço privilegiado para o desenvolvimento de atividades turísticas, lazer, pesca, entre outras. É nesse cenário dinâmico e de alta mobilidade, tanto física quanto socioeconômica, que residem aproximadamente 18% da população do país, sendo que 16 das 28 regiões metropolitanas encontram-se no litoral.

As mudanças na zona costeira em resposta às alterações climáticas resultam em diversos impactos, causando declínio nos valores econômicos, ecológicos, ambientais e de subsistência. Tais impactos, embora sejam sentidos, dependem das peculiaridades locais e, por isso, ocorrem de forma desigual ao longo de países e regiões, como resultado de graus distintos de exposição e vulnerabilidade (SZLAFSZTEIN, 2009).

De acordo com CICIN-SAIN (1993), o gerenciamento costeiro integrado é um processo que pode ser definido como sendo contínuo e dinâmico, no qual decisões são tomadas para o uso sustentável, desenvolvimento e proteção dos recursos das áreas costeiras e marinhas. Tem ainda a função de unir os mais diversos setores governamentais, a sociedade organizada e a ciência, de forma a compatibilizar o processo de gestão por meio de interesses setoriais e públicos, preparando e implementando, assim, um plano integrado para a conservação e o desenvolvimento dos ecossistemas e recursos costeiros. A principal meta do gerenciamento costeiro integrado é melhorar a qualidade de vida das comunidades humanas que dependem

dos recursos costeiros, levando em consideração a manutenção da diversidade biológica e a produtividade dos seus ecossistemas (GESAMP, 1996).

Nesse contexto, estudos de modelagem em ambientes costeiros são desafiadores. O surgimento de modelos matemáticos ajudam a simplificar os sistemas hidrodinâmicos através do estudo, apenas, de um fragmento da realidade, tornando este muito mais complexo. O Sistema de Modelagem Costeiro (SMCBrasil), modelo desenvolvido pela Universidade de Cantabria/Espanha foi introduzido no Brasil com o intuito de disponibilizar uma ferramenta única capaz de representar as diferentes mudanças da costa brasileira. Este trabalho objetiva modelar uma pequena porção da costa Norte do Brasil através do uso dessa ferramenta, com a finalidade de conhecer a ferramenta e os processos costeiros que governam essa região.

CAPÍTULO 2: JUSTIFICATIVA

Nos últimos anos, o uso da Zona Costeira tem aumentado, provocando um número elevado de atuações para tirar proveito dos recursos da costa. Os avanços científicos, por meio de novos recursos metodológicos têm permitido entender os processos que ocorrem na Zona costeira (ondas, marés e correntes...).

O Sistema de Modelagem Costeiro (SMCBrasil), modelo desenvolvido na (Universidade de Cantabria/Espanha), foi introduzido no Brasil, pelo Ministério do Meio Ambiente, uma vez que o SMC é um modelo de baixa complexidade, seu uso por empresas e pesquisadores fica mais viável. Este modelo já foi aplicado em praias da região nordeste, sudeste e sul do Brasil, e nunca introduzido na costa norte brasileira. Por isso, este trabalho objetiva modelar uma pequena porção da costa Norte do Brasil através de métodos e teorias simples dessa ferramenta, com a finalidade de testar a aplicabilidade do mesmo, para representar os processos costeiros que governam essa região através da modelagem.

CAPÍTULO 3: OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

A aplicabilidade das ferramentas do Modelo hidrodinâmico SMCBrasil na Costa Norte do Brasil (Praia da Princesa-Ilha de Algodóal).

3.2 Objetivos Específicos

- Aplicar o modelo hidrodinâmico SMCBrasil na ilha de Algodóal;
- Simular 6 casos a partir do banco de dados;
- Avaliar, em uma mesma região, os diferentes métodos de modelamento;
- Gerar modelo de altura, corrente e transporte da área de estudo modelada;
- Comparar variações em dois estágios de maré.
- Avaliar pontos positivos e negativos da utilização do Modelo para região.

CAPÍTULO 4: REVISÃO TEÓRICA

4.1 Onda

As ondas constituem perturbações que se movem sobre ou através de um meio, transferem energia e pouca massa, e podem estar relacionadas à forças periódicas (ex. marés astronômicas). Contudo, a maioria das ondas, resulta de perturbações não periódicas causadas por tempestades, e até mesmo pela ação dos ventos (LEÇA et al., 2004). Distante da costa as ondas dependem da: intensidade do vento, do tempo em que é soprado sobre a superfície do mar, sobre qual área ele afeta a superfície (*fetch*) e em que direção sopra (SMCBrasil, 2014a). Embora o mecanismo de geração das ondas não seja ainda totalmente compreendido, a maioria das teorias considera que inicialmente a superfície da água entraria em ressonância com os fluxos de pressão turbulenta dos ventos, e passaria a apresentar pequenas elevações e depressões (LEÇA et al., 2004).

Uma vez criadas, as ondas perturbam o fluxo eólico que por sua vez aumentam as oscilações da pressão – mecanismo de retroalimentação positiva. O posicionamento de um ponto de baixa pressão à frente da crista favorece o empinamento da onda. A altura das ondas aumenta ao longo da pista, onde a interação entre as ondas permite a combinação de energia e aumento da altura. Devido à irradiação lateral de energia, um campo de geração (pista) mais largo gera ondas mais altas. O aumento da altura só ocorre se a velocidade do vento for superior à velocidade da onda (SMCBrasil, 2014a).

Nas praias existe uma relação entre as ondas (dinâmica marinha) e a forma (morfologia) da praia, denominada "Morfodinâmica de praias". Assim a morfologia da praia corresponde às condições da dinâmica, mas também a dinâmica depende das condições morfológicas (SMCBrasil, 2014a).

Das propriedades da onda, as mais importantes são H_s e T . A altura de uma onda específica é influenciada por ondas componentes, cada uma com sua frequência e amplitude. Para muitas aplicações de estudos do campo de ondas faz-se necessário escolher uma única altura de onda, que caracterize um estado de mar particular (LEÇA et al., 2004). Uma das mais usadas é a altura significativa (H_s ou $H_{1/3}$), que representa a altura média do terço das ondas mais altas que ocorrem durante um certo intervalo de tempo. As maiores alturas médias ocorrem no sul do país, com valores em torno de 2,5 metros. Estes fluxos de ondas estão associados

aos ventos intensos das frentes frias sinóticas e à formação de anticiclones subtropicais do Atlântico Sul. No setor norte o valor médio é de 1,5 metros devido principalmente à Zona de convergência intertropical, ou pela passagem de tempestades tropicais. O período de pico é o período associado ao maior nível de energia encontrado a partir de uma análise espectral (LEÇA et al., 2004).

Segundo Leça et al (2004), a descrição física do movimentos das ondas esta fragmentada em um número de teorias que se aplicam em distintas situações, onde estão reunidas em dois grupos: as que tratam das pequenas ondas, utilizadas, principalmente, na descrição das ondas de gravidade em águas profundas; e as teorias das ondas longas (mais aplicadas a ondas de água rasas). As teorias de ondas buscam calcular as mudanças na elevação da superfície da água, comprimento da onda, velocidade da onda, diâmetro orbital vertical e horizontal, velocidades vertical e horizontal, e pressão potencial. A teoria de ondas mais simples e mais utilizada em aplicações costeiras é a de Airy (conhecida como teoria Linear), apesar das características não lineares de muitos processos costeiros. Quando as ondas se aproximam da costa, estas experimentam uma série de processos, tais como: o empinamento de onda, refração, difração, reflexão e finalmente a rebentação; e para estudos de casos em que se deseja um melhor grau de aproximação dos dados, as teorias de Stokes e o módulo Composto de Dalrymple são melhores empregadas. A diferença entre os dois modelos não lineares é quase imperceptível devido à legitimidade do modelo de Stokes nas regiões onde se comparam (SMCBrasil, 2014d).

Quando a onda interage com a costa, grande quantidade de energia é descarregada na zona costeira. Ao interagir com a morfologia de fundo, a onda tende a modificar, transformar e filtrar as ondas incidentes. Essas alterações ocorrem por interações primárias, tais como: a refração, difração, e reflexão (não propagada pelo modelo SMCBrasil); e interações secundárias como: empolamento e arrebatamento (LEÇA et al., 2004).

As ondas refratam-se analogamente ao fenômeno da refração de outros tipos de ondas. Ao passar de um meio para outro com índices de refração diferentes, ocorre um desvio na sua direção de propagação; a diferença de profundidade faz com que parte da frente de onda em águas mais profunda tenha uma celeridade maior do que a parte em água mais rasa, dessa forma, a onda tende a atingir a praia paralelamente às linhas batimétricas. Além da mudança do rumo de propagação, a

refração causa alterações na altura da onda, nesse caso, na mesma frente de onda, pode-se encontrar alturas diferentes. Assim, a refração tem uma grande importância na distribuição da energia ao longo da costa (ALFREDINI e ARASAKI, 2009).

De acordo com ALFREDINI e ARASAKI (2009), a difração é o fenômeno tridimensional do resultado de uma atenuação da agitação por causa da presença de um obstáculo, e é responsável pela propagação das ondas nas zonas de sombra geométricas referidas ao rumo das ondas. A energia é transferida ao longo das frentes de ondas, transversalmente às ortogonais, com celeridades igual à da onda.

A arrebentação ocorre devido à instabilidade que a onda sofre ao encontrar profundidades rasas. À medida que a onda se propaga sobre fundo de profundidade decrescente, o seu comprimento diminui, simultaneamente com o aumento de sua altura, acarretando a redução da celeridade e o aumento da velocidade orbital horizontal, e arrebenta. Esse fenômeno está associado a um rápido aparecimento de uma forte turbulência, e não pode ser traduzido pela teoria linear de ondas, que só pode ser representada antes das ondas atingirem a arrebentação (ALFREDINI e ARASAKI, 2009).

Para Alfredini e Arasaki (2009), o empolamento consiste na alteração da altura da onda decorrente da redução de profundidade, pouco antes da arrebentação, onde a onda atinge sua altura máxima.

4.2 Maré

As marés são ondas de águas rasas, onde há alterações periódicas, na altura da superfície do oceano, causadas através do alinhamento gravitacional dos astros (Sol e Lua) com a Terra, gerando as marés astronômicas, que a partir desse efeito combinado da atração gravitacional, promove modificações significativas nas alturas das marés, sendo a força gravitacional responsável pelas variações observadas entre marés de sizígia e de quadratura, além das variações semi-diurnas (SILVA et al., 2004; GARRISON, 2010).

Existem três tipos de marés: diurnas, semi-diurnas e mistas (FRANCO, 1997). Marés diurnas são aquelas onde há apenas uma preamar (PM) e uma baixa-mar (BM) durante um período lunar, onde não existem diferenças, significativas, dos níveis de maré sucessíveis; marés semi-diurnas apresentam dois ciclos de preamar e dois de baixa-mar com o mesmo nível aproximadamente, ao longo de um dia

lunar; a maré mista, também, apresenta duas preamares e duas baixa-mares ao longo de um ciclo lunar, mas com desigualdades significativas de uma preamar, ou de uma baixa-mar para outra (GARRISON, 2010).

Quanto à força de atração dos astros, as marés podem ser classificadas como sendo de sizígia ou de quadratura. As marés de sizígia acontecem duas vezes a cada lunação (em um intervalo de duas semanas), ocorre devido o alinhamento entre o Sol e a Lua nos dias de Lua Nova e de Lua Cheia, ocasionando nas maiores e menores, respectivamente, preamares e baixa-mares. No entanto, quando há sobreposição das forças do Sol, Terra e Lua, as preamares são mais baixas e as baixa mares são mais altas, denominando-as de marés de quadratura, ocorrendo durante a Lua Minguante e Crescente (FRANCO, 1997; GARRISON, 2010).

Segundo Garrison (2010), quanto a amplitude, as marés são classificadas em: micromarés (amplitudes < 2 m), mesomarés (amplitudes entre 2 a 4 m) e macromarés (amplitudes > a 6 m).

Além do tráfego de embarcações de pequeno, médio e de grande porte, uma vez que para seu deslocamento necessitam da subida dos níveis das águas, as marés possuem uma enorme importância ecológica, reprodutiva e econômica, pois possibilitam a troca de nutrientes, espécies e etc., entre o continente e a drenagem fluvial (BARTELS; ANGENHEISTER, 1970).

4.3 Modelo (Sistema de Monitoramento Costeiro-SMC)

O SMC foi inicialmente desenvolvido pelo Instituto Hidráulico Ambiental da Cantábria (IH Cantábria) da Universidade da Cantábria, com o apoio da Diretoria Geral de Costas do Ministério do Meio Ambiente da Espanha (SMCBrasil, 2014b).

Esse sistema é uma ferramenta computacional que combina metodologias de trabalho, bases de dados de cartas náuticas e modelos numéricos orientados para o estudo e/ou solução de problemas na zona costeira. As ferramentas do SMC-Brasil podem ser divididas em duas: (1) o SMC Tools que inclui uma base de dados de batimetria, ondas, nível do mar, transporte de sedimentos, etc.; além de ter duas ferramentas de processamento de dados integradas, uma para realizar a análise estatística das variáveis ambientais, e outra ferramenta que permite realizar a transferência de uma série de ondas a partir de profundidades indefinidas para pontos na costa; e (2) o Sistema de Modelagem Costeira (SMC) que integra uma

série de modelos numéricos, que permitem dar um suporte prático à correta aplicação da metodologia de trabalho (SMCBrasil, 2014b).

Segundo o manual de referência SMCBrasil (2014b), o objetivo básico do modelo é proporcionar uma ferramenta numérica no campo da engenharia costeira que facilite aos técnicos a elaboração de estudos passo a passo, aplicando as metodologias de trabalho propostas nos Documentos Temáticos. Busca-se, através da unificação de critérios técnicos e da organização sistemática dos modelos numéricos, que os técnicos aumentem a qualidade de seus estudos e, desta forma, vejam o aumento da confiabilidade dos dados gerados.

O SMC-Brasil é composto principalmente por duas ferramentas: (1) o SMC-TOOLS que permite acessar o módulo IH-DATA, este inclui as bases de dados das cartas náuticas do litoral brasileiro, dados de ondas e dados de nível do mar (maré astronômica e meteorológica). Os dados de ondas podem ser caracterizados através de uma análise estatística de suas variáveis ambientais, a partir do módulo IH-AMEVA, que também permite realizar a transformação de ondas dos pontos GOW/DOW em direção à costa (IH-DYNAMICS). Estes módulos fornecem dados de entrada necessários para os modelos do SMC e para o processamento de resultados. (2) A ferramenta SMC, a qual consiste de dois módulos: o módulo de análise de curto prazo de praia, formado pelos programas MOPLA e PETRA e o módulo de análise de médio e longo prazo da praia, formado pelo modelo de praia em equilíbrio (SMCBrasil, 2014b).

4.3.1 Ferramenta SMC-TOOLS

Os módulos desta ferramenta são os seguintes:

a) Módulo IH-DATA (BACO, DOW, GOS e GOT)

O programa “Baco” consiste em um banco de dados cujo objetivo fundamental é fornecer informação batimétrica a partir das cartas náuticas do litoral brasileiro, com a ideia de facilitar, dentro do SMC, o trabalho de combinar as informações batimétricas provenientes de várias fontes (SMCBrasil, 2014c).

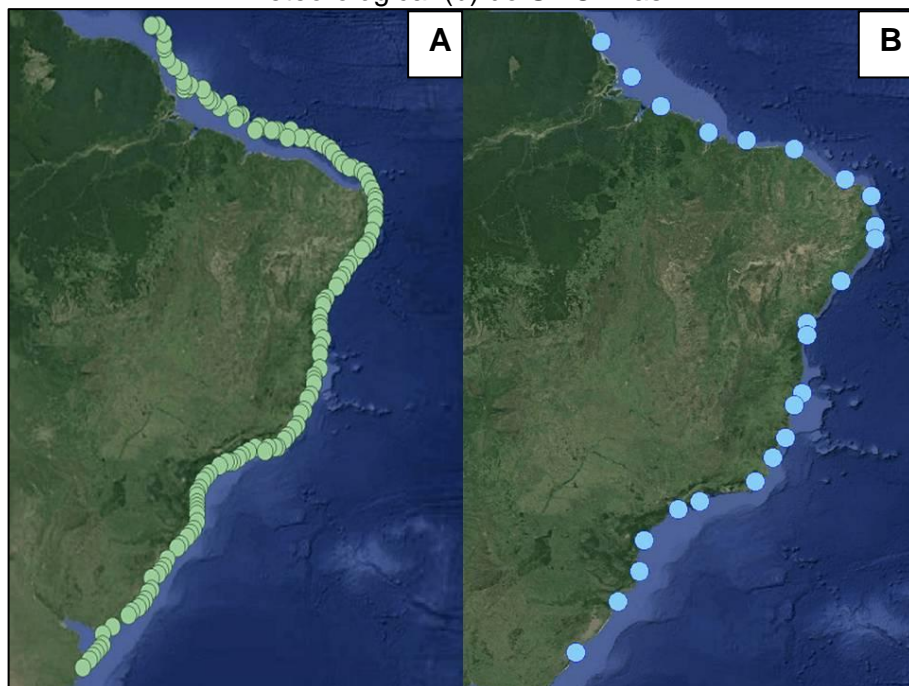
Dentro do módulo IH-DATA, além dos dados batimétricos há uma base de dados de séries temporais de ondas com informação de 60 anos (1948-2008) e

resolução de um dado por hora, denominados de pontos DOW (*Downscaling Oceanic Wave*) (SMCBrasil, 2014c).

Além do banco de dados DOW, internamente são utilizadas outras duas bases de dados: a base de dados de maré meteorológica denominada GOS (*Global Ocean Surges*) que possui informações de 60 anos (1948-2008) a cada hora e a base de dados de maré astronômica, também com informações de 60 anos, denominada GOT (*Global Ocean Tides*) (SMCBrasil, 2014c).

A base de dados de maré meteorológica do SMC-Brasil consta de 24 pontos distribuídos por toda a costa brasileira separados, entre si, a uma distancia media de 100 km. A base de dados GOT do SMC-Brasil foi gerada a partir de 10 constantes harmônicas obtidas da simulação numérica global TPXO (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1, Mf e Mm). Estas constantes harmônicas correspondem as principais forçantes lunares e solares da maré astronômica (Figura 1) (SMCBrasil, 2014c).

Figura 1- Pontos selecionados de geração da base de dados de maré astronômica (a) e meteorológica (b) do SMC-Brasil.



Fonte: Adaptado do (SMC Brasil, 2014a).

b) Módulo IH-AMEVA

O IH-AMEVA é um módulo de análise estatística de variáveis ambientais. O objetivo deste módulo é caracterizar os dados de ondas que o usuário necessite dentro do SMC (SMCBrasil, 2014c).

4.3.2 Ferramenta SMC- MOPLA (Programa de morfodinâmica de praias)

Este programa modela a evolução morfodinâmica das praias em curto prazo. É composto por seis modelos numéricos que simulam a propagação das ondas, o sistema de correntes induzido pela quebra das ondas, o cálculo do transporte de sedimentos e a evolução da batimetria. Os modelos foram organizados em dois grupos: por um lado àqueles que modelam os processos associados à propagação de um trem de ondas monocromáticas, e por outro, os que modelam a propagação de um estado do mar, representado por um espectro de energia de ondas (SMCBrasil, 2014b).

Conforme expresso no Documento Temático acima, os primeiros modelos são aplicados, fundamentalmente, para caracterizar a morfodinâmica média em um trecho de costa. Este primeiro grupo é composto pelos seguintes programas:

- OLUCA-MC: Modelo parabólico de propagação de ondas monocromáticas;
- COPLA-MC: Modelo de correntes em praia induzidas pela quebra de ondas;
- EROS-MC: Modelo bidimensional e horizontal de evolução morfológica de uma praia, considerando ondas monocromáticas;

4.4 Formulação Matemática

Os programas que definem o modelo são regidos pelas formulações matemáticas e os parâmetros abaixo:

4.4.1 Parâmetros da base OLUCA-MC

O Oluca-MC faz parte do “Modelo Integral de Propagação de Ondas, Correntes e Morfodinâmica em Praias” (Mopla). O qual integra uma série de modelos

numéricos que permite, da mesma forma que o Oluca-MC, realizar a análise em curto prazo em praias (SMCBrazil, 2014d).

O autor acima, afirma que a equação empregada neste modelo para modelar a propagação das ondas considera os fenômenos de: Empolamento, refração por fundo, difração, presença de correntes, dissipação de energia, quebra, dispersão por amplitude; e é a seguinte:

$$\begin{aligned} & (C_g + U) \frac{\partial A}{\partial x} + V \frac{\partial A}{\partial y} + i(k_0 - k)(c_g + U) + \frac{\sigma}{2} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{c_g + U}{\sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{V}{\sigma} \right) \right] A - \\ & \frac{i}{2} \frac{\partial}{\partial y} \left[(c c_g - V^2) \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{A}{\sigma} \right) \right] + \frac{i}{2} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[UV \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{A}{\sigma} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[UV \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{A}{\sigma} \right) \right] \right\} + \\ & \frac{1}{4k} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial y} \left[(c c_g - V^2) \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{A}{\sigma} \right) \right] + 2i \frac{\partial}{\partial x} \left[\sigma V \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{A}{\sigma} \right) \right] \right\} - \frac{\beta}{4} \frac{\partial}{\partial y} \left[(c c_g - \right. \\ & \left. V^2) \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{A}{\sigma} \right) \right] + \frac{i}{4k} \left[\frac{\partial}{\partial y} (\omega V) + 3 \frac{\partial}{\partial x} (\omega U) \right] \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{A}{\sigma} \right) + \frac{\gamma A}{2} + \frac{i\sigma}{2} \mathbf{G}(|\mathbf{A}|, \mathbf{kh}) \mathbf{A} = 0 \end{aligned}$$

A função $G(A, kh)$ do termo não linear é:

$$G(|\mathbf{A}|, kh) = \begin{cases} 0 & \text{Teoria Linear} \\ k^2 D |\mathbf{A}|^2 & \text{Teoria de Stokes} \\ (1 + f_1 K^2 |\mathbf{A}|^2 D) \frac{\tanh(kh + f_2 k |\mathbf{A}|)}{\tanh(kh)} - 1 & \text{Modelo Composto} \end{cases}$$

O fator γ de dissipação de energia da onda é:

$$\gamma = \frac{2\sigma f k |\mathbf{A}|}{3\pi \sinh(2kh) \sinh(kh)} (1 - i) \quad \text{Para camada limite turbulenta no fundo}$$

onde:

$V = 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, Viscosidade cinemática;

$F = 4 f_u$, Coeficiente de atrito da onda;

f_u = Coeficiente de Darcy- Weisbach;

C_p = Coeficiente de permeabilidade;

K = Parâmetro do modelo de dissipação por quebra;
 T = Parâmetro do modelo de dissipação por quebra;
 As variáveis definidas da equação utilizada são:
 $A = A(x, y)$, função complexa da amplitude da onda;
 $h = h(x, y)$, profundidade;
 U , vetor velocidade da corrente;
 T , período da onda;
 \dot{u} , frequência angular absoluta;
 \acute{o} , frequência angular intrínseca;
 c , celeridade de fase ou da onda;
 c_g , celeridade de grupo;
 k , número de onda local,
 k_0 , número de onda média em y .

Para a aplicação do modelo para um caso geral de propagação de ondas, as equações apresentadas são resolvidas pelo método de diferenças finitas sobre uma malha retangular. A resolução numérica das equações necessita transformar o domínio contínuo em um domínio discreto, formado por uma rede mais ou menos densa de pontos ou nós, onde são definidas cada uma das variáveis envolvidas no problema.

4.4.2 Parâmetros da base COPLA-MC

Segundo SMCBrasil (2014-e), os dois parâmetros importantes que influenciam no movimento das correntes são: a rugosidade do fundo, expressada pelo número de Chézy, c ($m^{1/2}/s$) e a viscosidade turbulenta (ϵ).

a) Rugosidade Do Fundo

O termo de atrito é um termo consumidor de quantidade de movimento devido ao atrito do fluxo (interação onda - corrente) com o fundo. Grande quantidade de modelos de rugosidade na zona de rebentação foi apresentado na

literatura, onde apresentam sistemas combinados de onda-corrente (SMCBrasil, 2014). O principal problema destas formulações, em nível numérico, é a dificuldade de sua calibração devido à quantidade de parâmetros que intervêm e a dificuldade em alguns casos para sua medição. Tanto no Copla-MC quanto no Copla-SP são utilizadas expressões análogas às do fluxo em rios e estuários; que neste tipo de modelos funcionaram apropriadamente (SMCBrasil,2014e).

O termo de rugosidade depende da profundidade; para menor profundidade, maior resistência ao fluxo, consumindo maior quantidade de movimento, também depende das velocidades médias e de um coeficiente denominado de Chézy, c . (SMCBrasil,2014e).

b) Coeficiente De Atrito De Chézy

Para o caso de correntes a partir de uma onda monocromática, foi implementada uma formulação de rugosidade constante ($c = \text{cte.}$) em todo o domínio de cálculo. A faixa de variabilidade recomendada nas praias para este tipo de formulação de atrito com c está entre (5 e 20 $\text{m}^{1/2}/\text{s}$). Este é um valor muito menor que o típico em áreas de estuários e rios (30 a 50 $\text{m}^{1/2}/\text{s}$), devido ao grande atrito gerado pela onda. O modelo avalia o coeficiente de rugosidade de Chézy, c ($\text{m}^{1/2}/\text{s}$) como uma função espacial e temporal da hidrodinâmica e das características dos sedimentos do fundo:

$$c(x, y, t) = 18 \log \left(\frac{12H}{K_{swc}} \right)$$

onde x , y são as coordenadas espaciais no plano $t = \text{tempo}$, $H(x,y,t)$ é a profundidade total em metros e $K_{swc}(x,y,t)$ é a rugosidade efetiva em metros. A rugosidade hidráulica representada por K_{swc} é um fluxo com fundo móvel, definido como:

$$K_{swc} = K_s + K_{sf}$$

onde:

K_s : é a rugosidade associada ao tamanho dos sedimentos do fundo, rugosidade de Nykuradse; e K_{sf} : é a rugosidade associada às formas do leito, devido à interação onda corrente (Van Rijn, 1993). Normalmente, em fluxos de corrente (fluxo em caudais, rios, etc.), sem a presença da onda, a rugosidade efetiva é uma ordem de

magnitude menor ($K_s \sim 0.1 K_{swc}$). Propõe-se no modelo com área recomendada ($0.0 < K_{swc} \leq 2.0$), definindo-se por defeito em áreas de praia com interação onda-corrente ($K_{swc} = 1.0$ m).

c) Viscosidade Turbulenta (ε)

Este parâmetro é utilizado para descrever a "turbulência" na zona de rebentação. Assumindo que a turbulência nesta área é isotrópica, o termo de turbulência é escrita usualmente da seguinte forma:

Em x:

$$\varepsilon \left[\left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) \right]$$

Em y:

$$\varepsilon \left[\left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) \right]$$

Esta expressão é baseada na analogia com o fluxo laminar, onde os esforços cortantes são assumidos proporcionais ao gradiente da velocidade média.

A intensidade da turbulência causada pela quebra das ondas está distribuída em toda a zona de rebentação. O conhecimento atual sobre a difusão da turbulência, no entanto, não é suficiente e uma discussão em detalhe relacionada a este parâmetro é impossível hoje em dia. Muitas expressões têm sido propostas para ε , mas nenhuma delas deixa de ser mais que uma hipótese.

A turbulência, da mesma forma que o atrito, consome a quantidade de movimento e começa a ser mais importante que o termo de atrito para maiores profundidades, na ordem do tamanho dos elementos da malha. Neste modelo é permitido, da mesma forma que com c , definir ε como uma constante em toda a malha. Um valor típico para ε em praias varia entre 15 e 25, que são tamanhos típicos das malhas na zona de rebentação.

4.4.3 Parâmetros da base EROS-MC

O modelo Eros é um modelo numérico que resolve as equações do fluxo de sedimentos dentro da zona de rebentação, assim como as alterações na batimetria integradas às variações espaciais do transporte de sedimentos. Os modelos morfodinâmicos baseiam-se na modelagem de processos físicos que afetam a praia, propagação de ondulação, correntes geradas pela quebra, transporte de sedimentos e variação da batimetria. Em função da interação entre esses componentes podem-se definir dois tipos de modelos: Os modelos de erosão – sedimentação inicial; e os modelos de evolução morfodinâmica (utilizados na confecção dos gráficos desse trabalho). Os modelos de evolução morfodinâmica (MEM) levam em consideração a interação entre a variação do fundo e as condições hidrodinâmicas. Geralmente, admitem-se algumas condições hidrodinâmicas estacionárias durante um intervalo de tempo específico, dando origem a uma variação do fundo. Com a nova batimetria são recalculadas as condições hidrodinâmicas e os novos fluxos de transporte. O modo MEM é utilizado quando se quer ter uma estimativa das variações da batimetria de uma praia frente à ação de uma tempestade (SMCBrasil, 2014f).

O módulo de transporte de sedimento determina o transporte de sedimentos baseado no campo de ondas e no campo de correntes. Optando-se por duas formulações amplamente aceitas: A de Bailard (1981) e a de Soulsby – Van Rijn (1997), as duas formulações computam o transporte total, soma do transporte em suspensão e do transporte de fundo (SMCBrasil, 2014f).

a) Formulação de Bailard

A fórmula derivada por Bailard (1981) pode ser escrita como a soma de quatro termos:

$$q_t = q_{bo} - q_{bs} + q_{so} - q_{ss}$$

Os termos representam:

q_t = transporte total de fundo e suspensão (q_x , q_y);

q_{bo} = transporte de fundo sobre o leito plano;

q_{bs} = transporte de fundo devido ao efeito da inclinação;

q_{so} = transporte em suspensão sobre o leito plano;

q_{ss} = transporte em suspensão devido ao efeito da inclinação.

com:

$$q_{bo} = \frac{C_f \varepsilon_B}{g(s-1)\tan\phi} \langle |u|^2 u \rangle$$

$$q_{bs} = \frac{C_f \varepsilon_B \tan\beta}{g(s-1)\tan^2\phi} \langle |u|^3 \rangle i$$

$$q_{so} = \frac{C_f \varepsilon_s}{g(s-1)w_s} \langle |u|^3 u \rangle$$

$$q_{ss} = \frac{C_f \varepsilon_s^2 \tan\beta}{g(s-1)w_s^2} \langle |u|^5 \rangle i$$

onde:

g = aceleração da gravidade (m/s²);

$s = \frac{\rho_s}{\rho_w}$, é a densidade relativa;

ρ_s = densidade do sedimento (ton/m³);

ρ_w = densidade da água (ton/m³);

C_f = coeficiente de atrito, tal que $\tau = \rho C_f |u|u$;

τ = tensão tangencial no fundo (Nw/m²);

u = velocidade no fundo devido à ação conjunta de onda-corrente (m/s);

ϕ = ângulo de atrito interno do sedimento (°);

$\tan\beta$ = inclinação do leito (-);

i = vetor unitário na direção de inclinação acima (-);

w_s = velocidade de queda do grão (m/s);

ε_B = fator de eficiência do transporte pelo fundo (= 0,1);

ε_s = fator de eficiência do transporte em suspensão (= 0,02);

$\langle . \rangle$ = é uma média de tempo;

$| |$ = é o valor absoluto.

b) Formulação de Soulsby – van Rijn

Soulsby (1997) sugere uma expressão analítica experimental que se aproxima da formulação para onda-corrente de Van Rijn (1993). Esta fórmula avalia tanto o transporte de fundo como por suspensão sobre o fundo horizontal.

$$q_t = A_s U \left[\left(U^2 + \frac{0,018}{C_D} U_{rms}^2 \right)^{\frac{1}{2}} - U_{cr} \right]^{2,4}$$

onde:

$$q_t = (q_x, q_y);$$

$$A_s = A_{sb} + A_{ss};$$

$$A_{sb} = \frac{0,005h (D_{50}/h)^{1,2}}{[(s-1)g D_{50}]^{1,2}}$$

$$A_{ss} = \frac{0,012 D_{50} D_*^{-0,6}}{[(s-1)g D_{50}]^{1,2}}$$

U = velocidade média na vertical (u, v);

U_{rms} = velocidade orbital quadrática-média, $U_{rms} = (u_{orb}, v_{orb,y})_{rms}$;

$$C_D = \left[\frac{0,4}{\ln(h/z_0 - 1)} \right]^2 = \text{coeficiente de atrito devido a corrente};$$

U_{cr} = veloc. crítica de início do movimento (assumindo a rugosidade efetiva $k_s = 3D_{90}, D_{90}, 2D_{50}$);

h = profundidade;

D_{50} = Diâmetro médio do sedimento;

D_{90} = Diâmetro que é excedido em 10% no peso;

z_0 = rugosidade do fundo ($\cong 0,006 m$);

s = densidade relativa;

g = aceleração da gravidade;

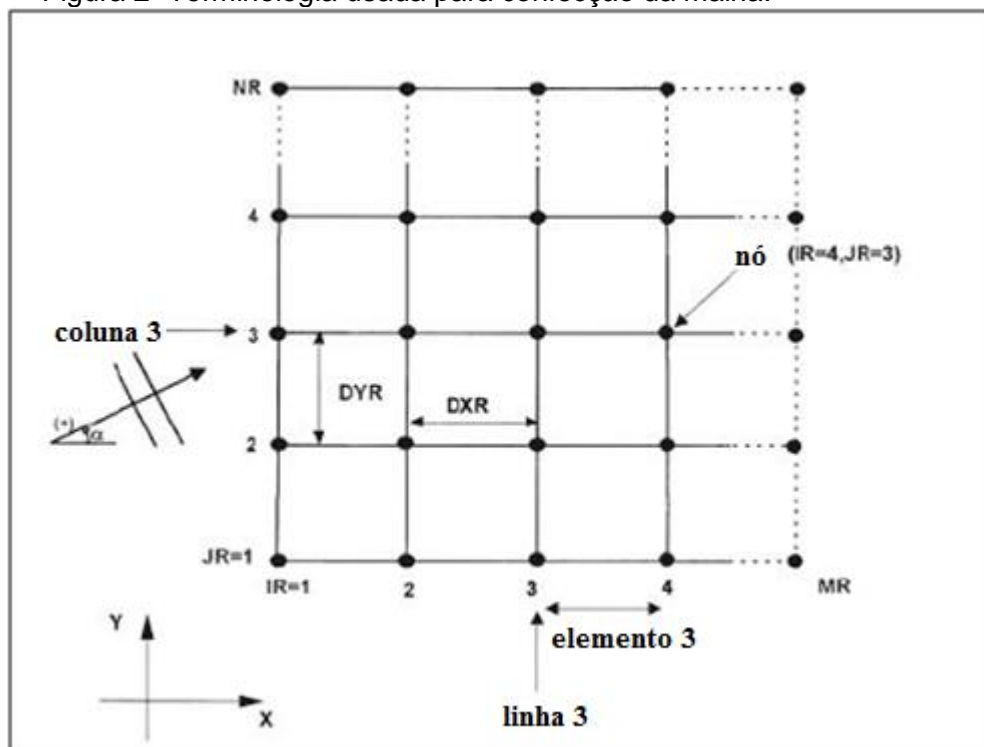
ν = viscosidade cinemática da água ($\nu = 2 \cdot 10^{-6} m^2/s$);

$$D_* = \left[\frac{g(s-1)}{\nu^2} \right]^{1/3} D_{50} .$$

4.5 MALHA

De acordo com o Manual de utilização do SMC Brasil (2014), a terminologia usada para uma malha de referência é mostrada na Figura 1. Tal malha está formada por uma rede retangular de pontos de dimensões $MR \times NR$ em X e Y . O eixo X tem aproximadamente a direção da propagação das ondas, desde o alto mar até a linha da costa, sendo o eixo Y perpendicular a ele. Em cada um dos pontos ou nós são definidos os dados de entrada, a profundidade h e os componentes U e V da velocidade da corrente, assim como os valores da amplitude complexa A (Figura 2).

Figura 2- Terminologia usada para confecção da malha.



Fonte: Manual de Referencia do SMC Brasil (2014).

CAPÍTULO 5: MÉTODO

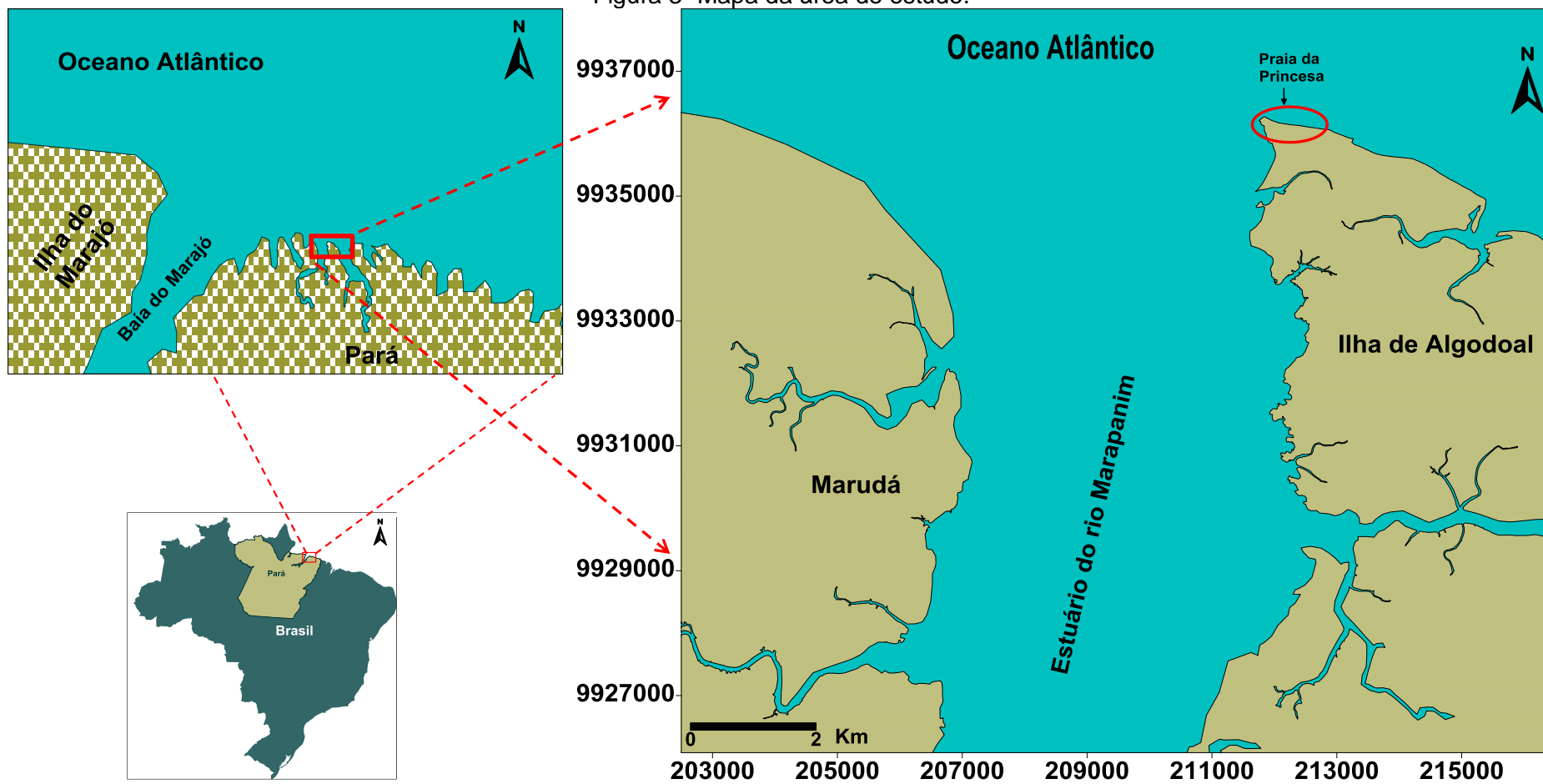
5.1 Área de Estudo

A Área de Proteção Ambiental (APA) de Algodual-Maiandeuá é um dos pontos mais procurados por veranistas na microrregião do Salgado Paraense. Trata-se de uma ilha constituída por quatro vilas separadas por manguezais e canais de maré, apresentando extensas praias, áreas de dunas e lagos. A ilha é banhada pelos estuários Maracanã à leste e Marapanim à oeste, pelo furo do Mocoóca ao sul, o qual conecta os dois estuários citados, e é banhada pelo oceano Atlântico ao norte. O clima regional é classificado como tropical quente e úmido, com médias anuais de insolação de 2.200 hora/ano, da temperatura do ar é de 25 a 26° C e a da umidade é entre 80% a 85% e precipitação cerca de 2000 mm/ano (RUIVO et al., 2002; INMET, 2015), onde, o período mais chuvoso se manifesta entre os meses de dezembro a junho, e o seco entre Julho a Novembro (MORAES et al., 2005).

Está sob um regime de macromaré semidiurna, atingindo alturas de até 5,5 m. O clima de ventos da região está associado a Zona de convergência intertropical, com predominância de ventos de SE e E de junho a novembro e, ventos de NE de Dezembro a maio (NITTROUER ; DEMASTER, 1996; Santos 2006), com maiores intensidades em setembro atingido máximas acima de 9 m/s. O domínio modelado abrangeu a Praia da Princesa localizada na porção norte da ilha, banhada pelo Oceano Atlântico (Figura 3).

Os os principais sedimentos reconhecidos nesta região são representados pelo Grupo Barreiras (Mioceno/Pleistoceno), Pós-Barreiras (Pleistoceno) e recentes (Holoceno). A estruturação fisiográfica da região é sustentada pelos sedimentos do Grupo Barreiras, que é dividido em três litofácies: argiloarenosa, arenosa e conglomerática (GOÉS ; TRUCKENBRODT ,1980).

Figura 3- Mapa da área de estudo.



5.1. 1 Praia Modelada

A praia da Princesa possui cerca de 3,8 km de extensão, largura de 200-420 m na baixa-mar de sizígia (Figura 4), e uma suave inclinação em direção ao oceano entre $0,73-1,28^\circ$, característica de praia dissipativa (SHORT, 2003; SILVA, 2014). As alturas máximas de marés encontradas podem alcançar valores superiores a 5,8 m (marés equinociais de sizígia), sendo a mesma caracterizada por uma alta energia hidrodinâmica em consequência das condições de macromarés que geralmente resultam em fortes correntes de maré, principalmente em períodos equinociais (SILVA, 2014).

Figura 4- Imagem real da área de estudo em 2D.



Fonte: Modificado do Google Earth (2015).

5.2 Materiais e Métodos

A fim de entender os processos envolvidos na área de estudo, a metodologia consistiu em coletar dados no campo para comparar dados reais com dados modelados.

5.2.1 Amostragem

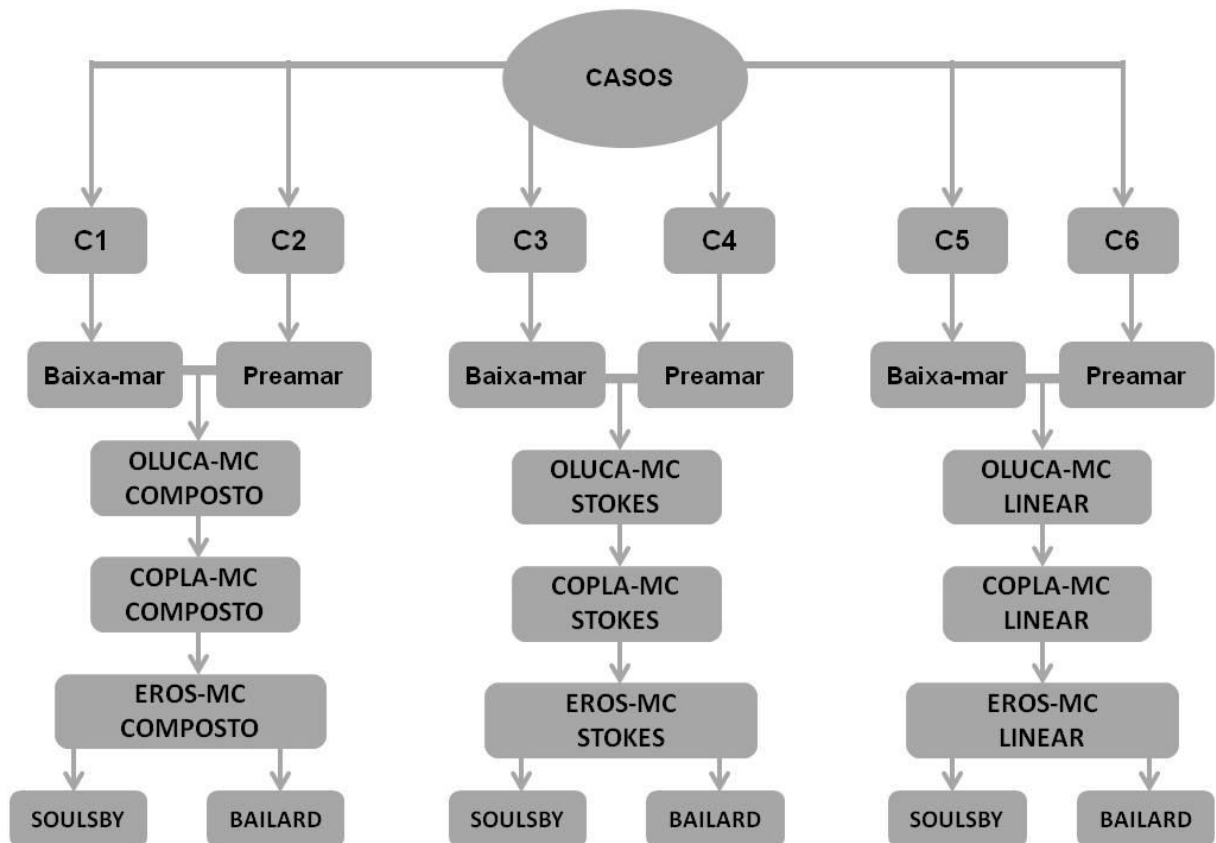
Os dados obtidos (altura significativa, período significativo, maré, velocidade da corrente) foram coletados em duas campanhas: Março e Outubro de 2012, todos, sob condição de maré de sizígia, durante um ciclo de maré. Os resultados de onda e período significativos foram calculados a partir da conversão do parâmetro de pressão adquirido com a utilização de sondas de pressão com sensor OBS, modelo TurbiInfinity ATU75W-USB. Este equipamento foi programado para coletar informações continuamente em intervalos de 0,1s. Os dados de corrente foram coletados a partir da utilização de correntômetros com sensores eletromagnéticos, modelo Infinity-EM AEM-USB, que registram sentido, direção e intensidade de corrente; foram programados à fazer registros contínuos em intervalos de 60 s.

5.2.2 Modelagem

Foram criadas duas malhas (uma geral fora da costa e uma que abrangesse a área de estudo) para que o modelo se propagasse, devido a características individuais da área de estudo. A modelagem consistiu em usar como dados de entrada: altura significativa, período significativo, direção da onda e amplitude da maré.

A partir das análises acima, foram criados 6 casos de propagação na extensão SMC 3.0, e nos submodelos que subdividem o programa. Os casos correspondem a um dado durante a Preamar e um durante a baixa-mar para dados similares de onda e de corrente, conforme pode ser visualizado na Figura 5.

Figura 5- Detalhamento dos casos a serem propagados.



5.2.3 Batimetria

A batimetria geral da área de estudo foi retirada do próprio SMCTools, que tem como base as cartas náuticas dispostas ao longo da costa brasileira. Entretanto, um detalhamento batimétrico foi inserido a partir de Borba (2011).

5.2.4 Modelo

Foi aplicado o módulo de geração de ondas e correntes a partir de modelo hidrodinâmico 2D, um sistema profissional de modelos computacionais registrado pela Universidade de Cantabria (SMCBrasil, 2014).

5.2.4.1 Malha

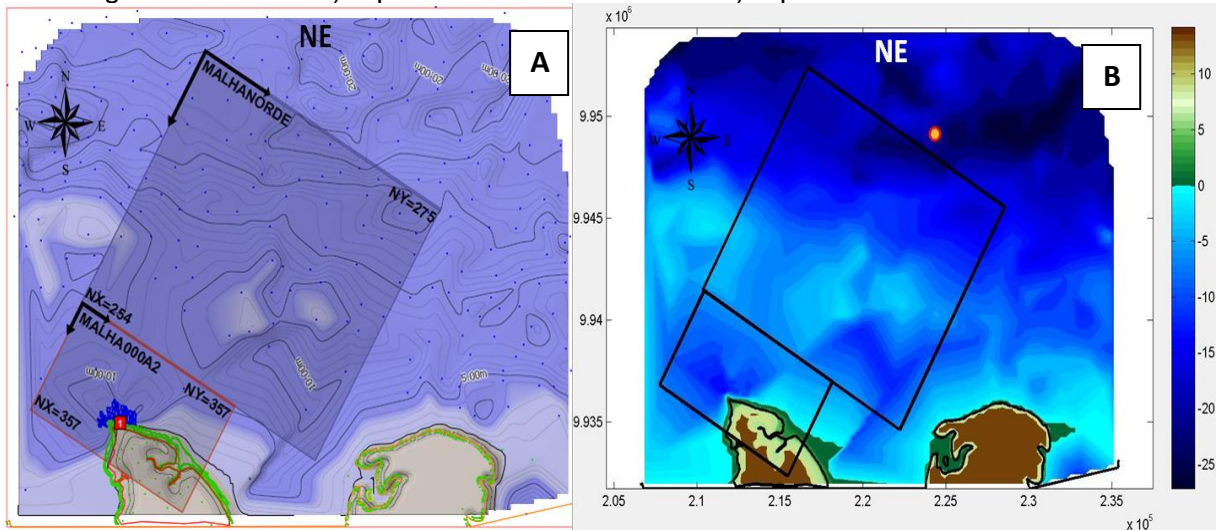
Para uma melhor amostragem, a malha deve-se configurar de modo que o eixo **x** do plano cartesiano fique paralelo a direção de propagação da onda, e o eixo **y** transversal a essa direção. De maneira que a área de estudo esteja inserida a mais ou menos um ângulo de 55° (limite de propagação das malhas Mopla).

Foram criadas duas malhas: uma geral de direção nordeste que esta inserida totalmente em área oceânica, e uma acoplada a malha geral, também de nordeste (Figura 6), abrangendo a área de estudo. Cada malha foi criada obedecendo o predominante regime de vento da região. As configurações das malhas estão inseridas na Tabela 01.

Tabela 1- Configurações da malha.

CONFIGURAÇÕES	MALHAS	
	GERAL (MALHANORDE)	ACOPLADA01 (MALHA000A2)
Origem X	216687,82	210443,01
Origem Y	9952429,38	9941439,30
Rumo	-120,06	-120 06
Dimensões X	12640	5340
Dimensões Y	13715,01	8909,75
Espaçamento X (Linhas)	49,96	15
Espaçamento Y (Colunas)	50,05	25,03
Número de Linhas	254	357
Número de Colunas	275	357

Figura 6- Malhas. a) representada no SMC 3.0 e b) representada no SMC-Tools.



Fonte: Adaptado do SMC 3.0 e SMC-Tools.

5.2.4.2 Condições De Contorno

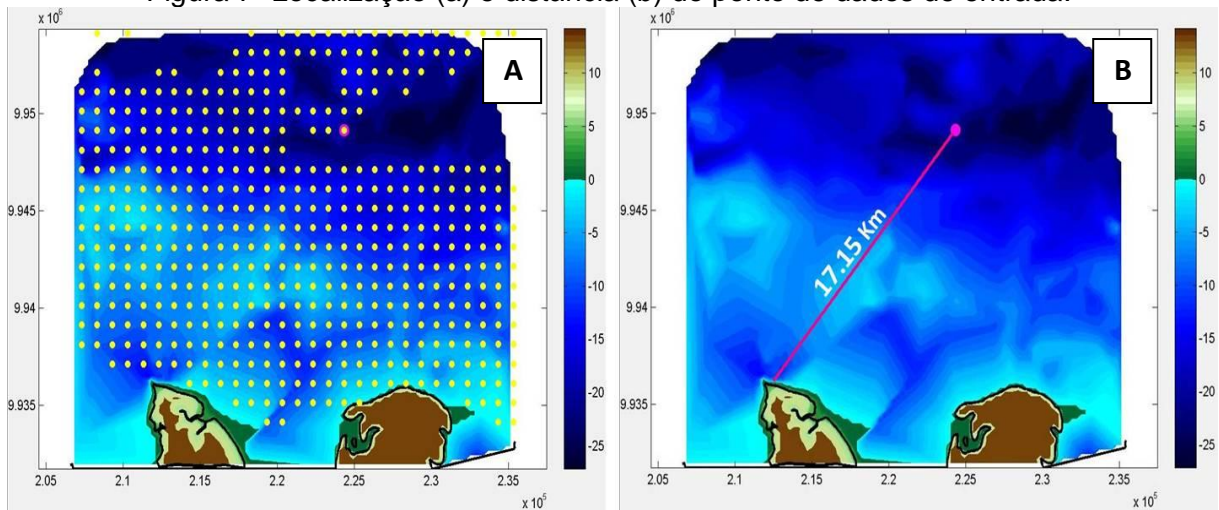
A Tabela 02 mostra a orientação do Ponto selecionado para remoção dos dados, de onde serão retiradas as condições de contorno dos casos a serem propagados. Quanto mais longe da costa, melhor o ponto Dow a ser selecionado, pois a onda sofre menos refração do fundo oceânico; no entanto, o ponto selecionado que melhor se adequou ao posicionamento e as condições da malha é representado na Figura 7-a, sua distância ao ponto amostrado é cerca de 17,15 km em linha reta diagonal (Figura 7-b).

Com a intenção de se estudar resultados de curto prazo, foram usados valores médios dos parâmetros utilizados como dados de entrada para o modelo. E desses valores, foi aproveitado o valor com maior probabilidade de ocorrência.

Tabela 2- Orientação do ponto Dow.

Localização	Graus (°)	UTM (m)
Latitude	-0,460	9949140
Longitude	47,477	224337
Profundidade	-----	19,993

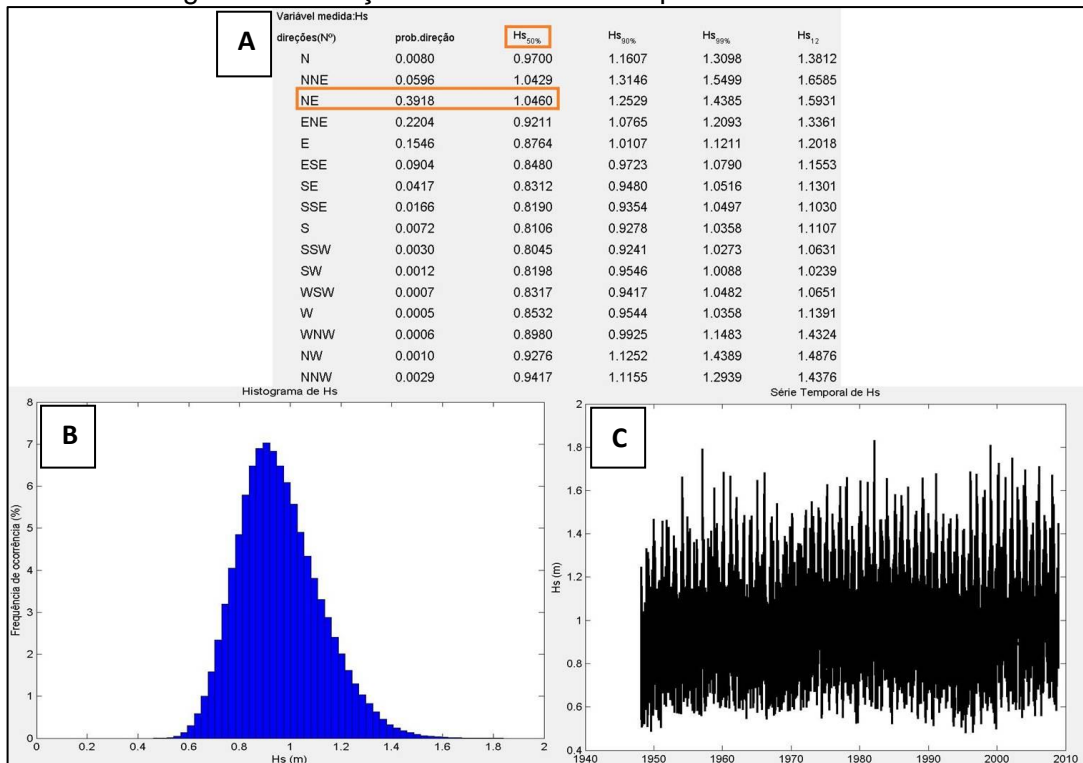
Figura 7- Localização (a) e distância (b) do ponto de dados de entrada.



a) Altura Significativa (Hs)

A altura significativa de onda que serviu como entrada para o cálculo dos resultados foi a de maior probabilidade (Figura 8-a), onde o valor foi arredondado para 1,05 metros.

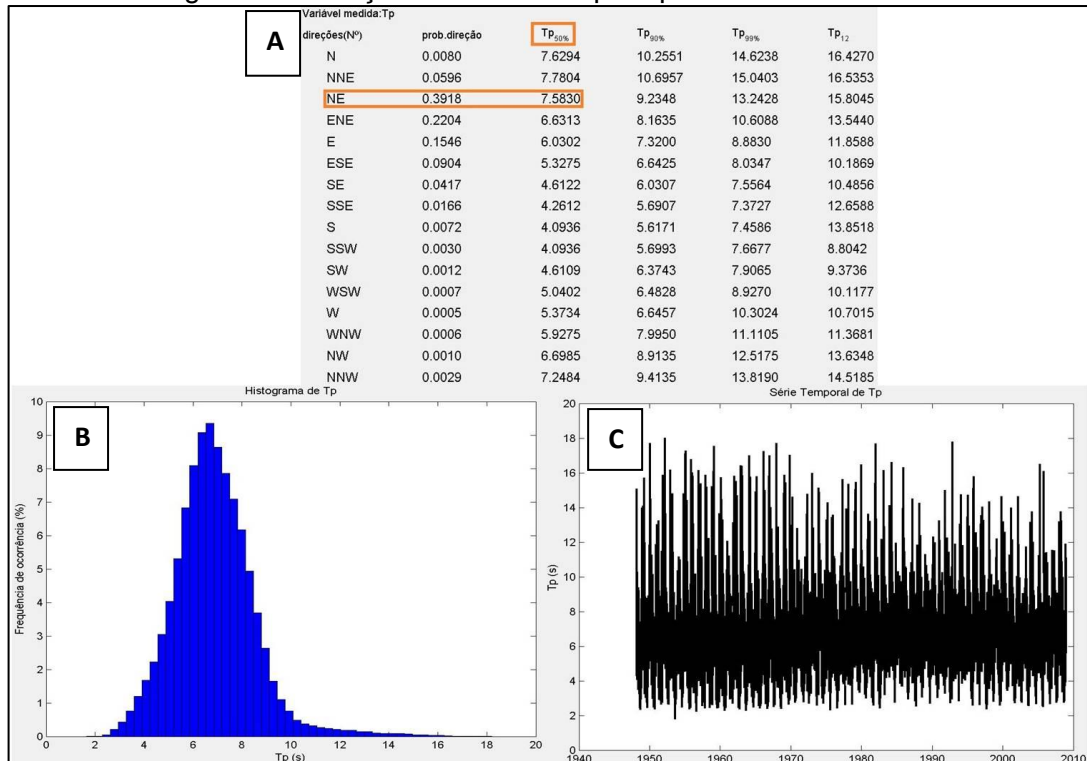
Figura 8- Condições médias de Hs do ponto DOW avaliado.



b) Período Significativo

O período de onda que serviu como entrada para o cálculo dos resultados foi o de maior probabilidade (Figura 9-a), onde o valor foi arredondado para 7, 58 segundos .

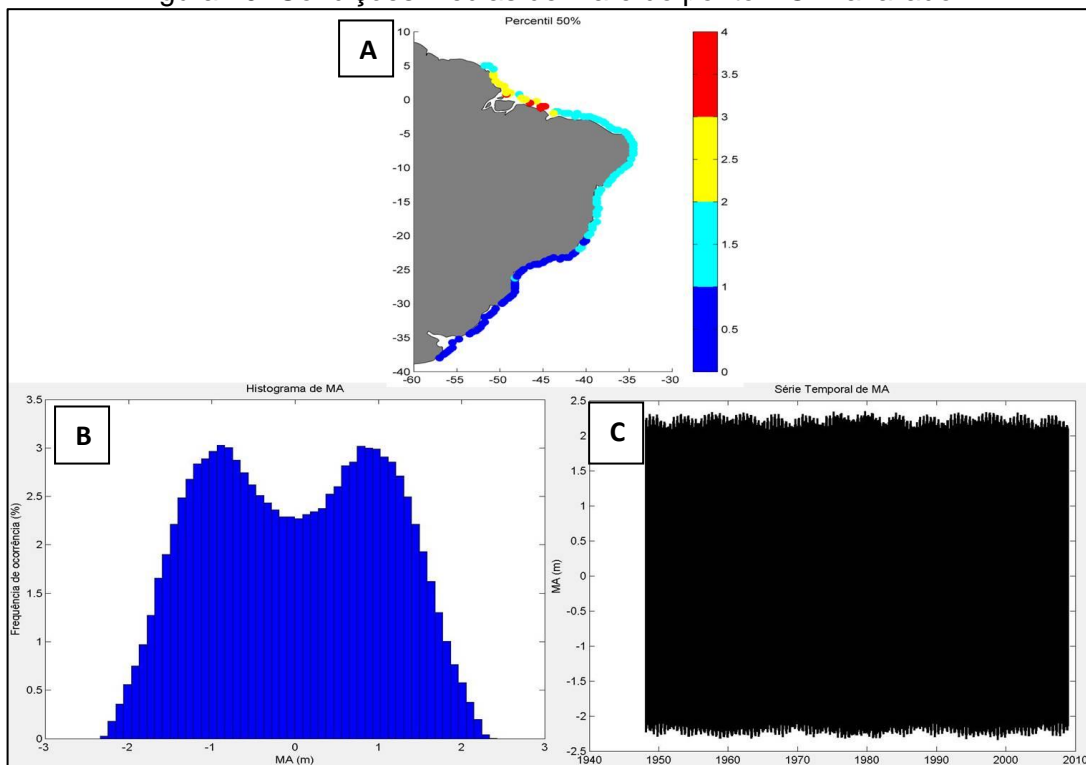
Figura 9- Condições médias do Tp do ponto DOW avaliado.



c) Maré

A amplitude das marés astronômicas identificadas no ponto selecionado é demonstrada na figura 10, cujos os valores de entrada foram de 4 e 0 metros correspondem, respectivamente, a preamar e baixa-mar. Esses valores foram utilizados devido, principalmente, as análises da Figura 10-b.

Figura 10- Condições médias de maré do ponto DOW avaliado.



c) Direção da Onda

A orientação, preferencial, de propagação da onda até a costa é de Nordeste, como demonstrada na figura 11, onde o valor adotado como entrada do modelo foi de $30,1^\circ$ devido uma adequação na orientação da malha.

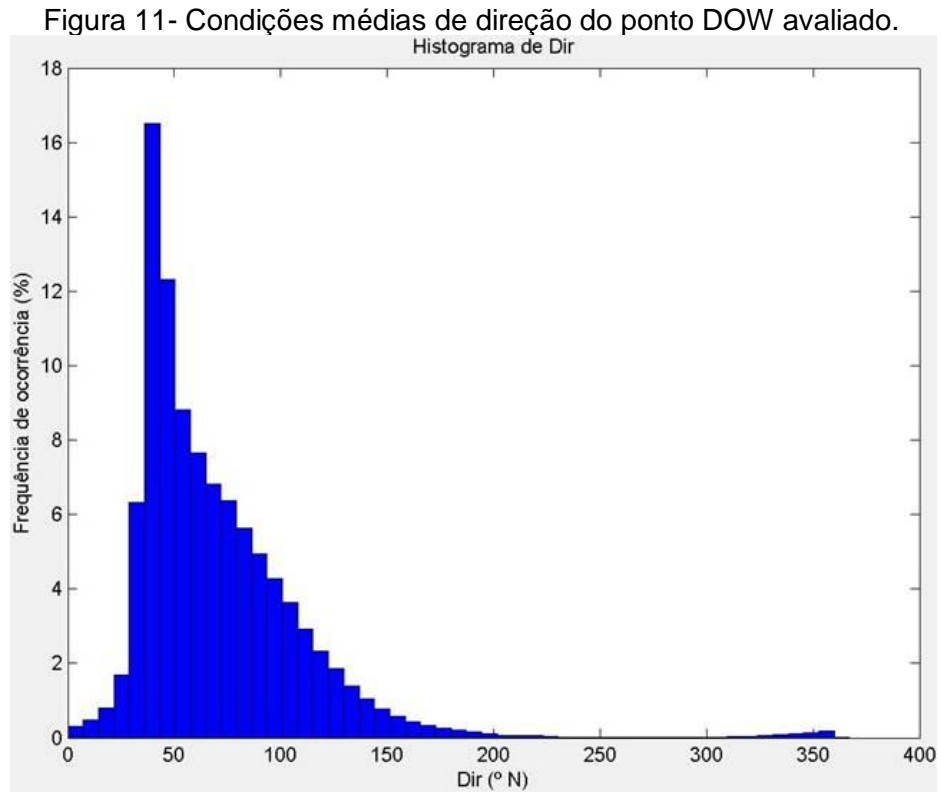


Tabela 3- Condições iniciais dos casos criados para o módulo OLUCA-MC e COPLA-MC.

CASOS	OLUCA-MC (SMCBrasil, 2014-c)					COPLA-MC (SMCBrasil, 2014-b)			
	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°)	Maré (m)	Modelo	Courant Δt (s)	Nº interações	ϵ (m ² /s)	Kswc
C1	1,05	7,58	30,1	0	Composto	2	250	8	1
C2	1,05	7,58	30,1	4	Composto	2	250	8	1
C3	1,05	7,58	30,1	0	Stokes	2	250	8	1
C4	1,05	7,58	30,1	4	Stokes	2	250	8	1
C5	1,05	7,58	30,1	0	Linear	2	250	8	1
C6	1,05	7,58	30,1	4	Linear	2	250	8	1

Tabela 4- Condições iniciais dos casos criados para o módulo EROS-MC,

CASOS	EROS-MC (SMCBrasil, 2014-e)						
	D50 (mm)	D90 (mm)	ângulo de atrito interno (°)	Massa específica Ton/m ³	Porosidade	Característica da Simulação	Modelo
C1	0,22	0,26	35	2,65	0,3	EEM	Soulsby
							Bailard
C2	0,22	0,26	35	2,65	0,3	EEM	Soulsby
							Bailard
C3	0,22	0,26	35	2,65	0,3	EEM	Soulsby
							Bailard
C4	0,22	0,26	35	2,65	0,3	EEM	Soulsby
							Bailard
C5	0,22	0,26	35	2,65	0,3	EEM	Soulsby
							Bailard
C6	0,22	0,26	35	2,65	0,3	EEM	Soulsby
							Bailard

EEM: Estudo de Evolução Morfodinâmica.

CAPÍTULO 6: RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Dados Amostrados

O período do ano que apresentou a maior Hs durante todos os estágios da maré foi Outubro de 2012 (Período menos chuvoso), no instante de Preamar a Hs foi de 0,8m e Ts de 0,66 s, no instante de maré vazante a Hs foi de 0,7m e Ts 0,66s. O mês de Março apresentou as menores alturas significativas de onda, cujos valores de Preamar e maré vazante alcançaram, respectivamente, magnitude de 0,79 m (1,47 s), e 0,51 m (1,53 s) (Tabela 5).

Através da análise dos dados obtidos em campo pode-se observar que há uma condição de inversa proporcionalidade entre Hs e Ts de onda.

O principal agente intensificador das ondas na região é o vento. Silva (2014) observou que durante o período menos chuvoso, os ventos são mais intensos, com velocidade média de 6,4 m/s e máxima de 8,3 m/s na praia da Princesa, onde foram predominantes os ventos de E, e NE na praia no início da maré vazante. No período chuvoso predominaram ventos de NE, com velocidade média de 4,6 m/s, e máxima de 6,8 m/s.

Tabela 5- Dados medidos em campo.

Mês/2012		Hs	Ts	Hmáx	Tmáx
Março	Ciclo (maré)	0,54	1,47	1,31	3,30
	Enchente	0,56	1,41	1,31	3,20
	Preamar	0,79	1,47	1,31	2,80
	Vazante	0,51	1,53	1,19	3,30
	Baixa-mar	-----	-----	-----	-----
Outubro	Ciclo (maré)	0,70	0,65	1,30	2,40
	Enchente	0,70	0,60	1,30	2,40
	Preamar	0,80	0,66	1,22	1,40
	Vazante	0,71	0,66	1,24	1,80
	Baixa-mar	-----	-----	-----	-----

Em relação a maré, os valores de amplitude para o mês de Março e Outubro foram, respectivamente, 4,9 metros e 3,57 metros (Figura 12).

A corrente longitudinal mais intensa ocorreu no mês de março durante a maré de enchente, atingindo 1,05 m/s, com intensidade média de 0,72 m/s. A intensidade máxima e média para o mês de outubro foi de 0,51 m/s e 0,25 m/s, respectivamente (Figura 13).

Essa similaridade foi descrita por Silva (2014) na mesma região, onde as correntes costeiras mais intensas ocorrem durante a enchente, atingindo intensidade média de 71,4 cm/s na praia da Princesa, podendo estar ligada à atuação predominante dos ventos alísios de NE.

Figura 12- Variação do nível de maré do ponto *In Situ*.
Março Outubro

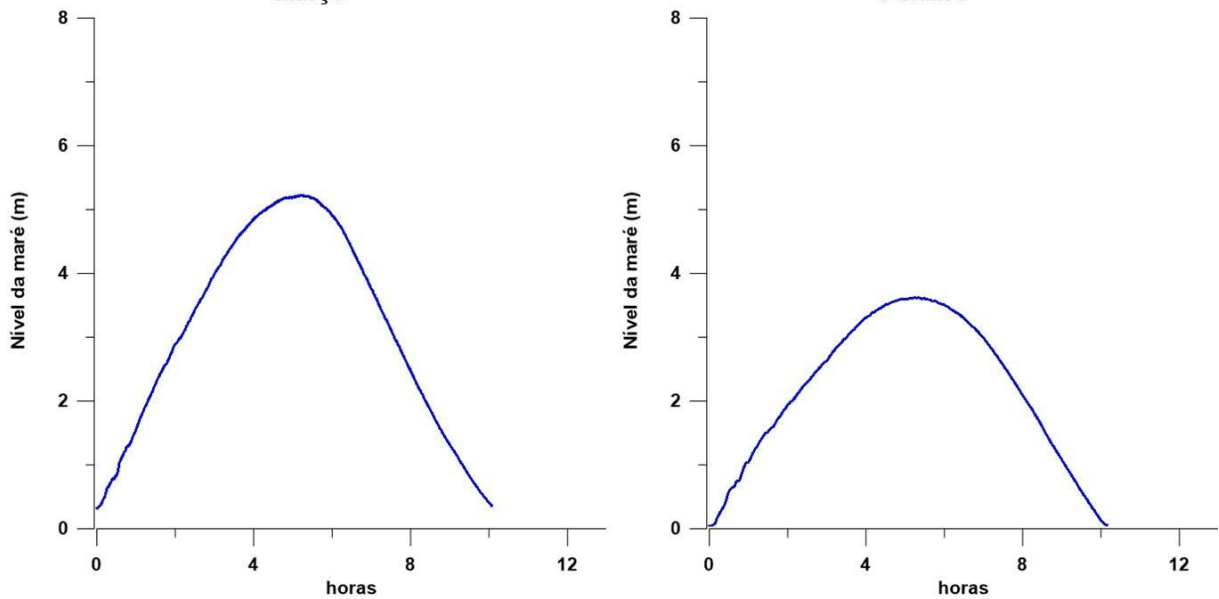
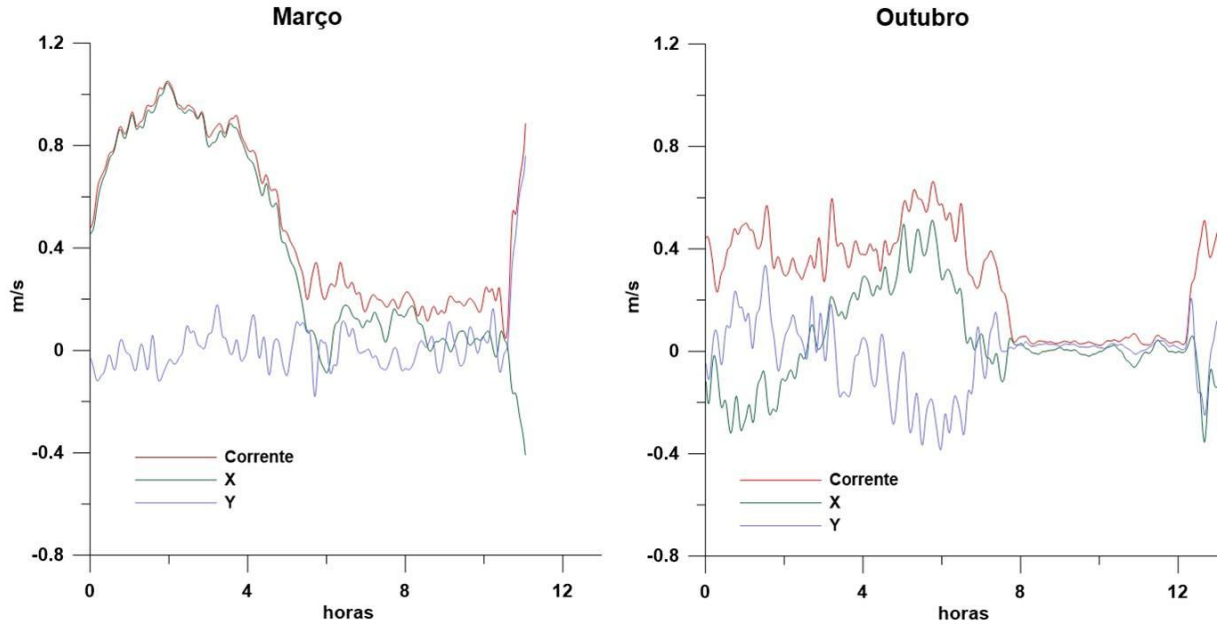


Figura 13- Variação das velocidades da corrente do ponto *In Situ*.



6.2 Dados Modelados

Considerando-se os dados gerados da base de dados do SMC-Brasil no ponto escolhido (entre os anos de 1948 e 2008), verifica-se que a direção da onda predominante são aquelas provenientes de nordeste (NE).

As figuras 14 (caso 01) e 15 (caso 02) nos permite visualizar a propagação da onda monocromática a partir do modelo composto, respectivamente, para os instantes de baixa-mar e preamar. As ondas que incidem na costa durante a baixa-mar chegam a uma altura significativa de, aproximadamente, 0,2 metros. No setor leste da praia, os valores de corrente oscilam entre 0,1 a 0,2 m/s, chegando a atingir um valor máximo de 0,5 m/s. Próximo ao ponto de coleta de dados, a simulação do modelo infere uma velocidade de, aproximadamente 0,04 m/s. Em relação ao transporte resultante, nas mesmas regiões onde as correntes possuem maiores intensidades, os valores da simulação oscilam entre 0,3 a 0,6 m³/h/m, podendo alcançar valores de até 1,4 m³/h/m, segundo o modelo de transporte de Soulsby. O transporte para a região, segundo Bailard, oscila entre 0,1 a 0,4 m³/h/m, atingindo até 0,65 m³/h/m (Figura 14). No momento de preamar (Figura 15), o trem de ondas não sofre uma refração completa com o fundo oceânico próximo a costa, uma vez que a onda escolhida vem de uma cota batimétrica de 20 metros de profundidade, dessa forma, ele não gira o suficiente para ficar paralelo a linha costa, fazendo com que o onda atinja a costa com uma intensidade que varia de 0,5 a 1,5 metros, gerando correntes longitudinais. Durante a preamar, a intensidade dessa corrente oscila entre 0,1 a 0,36 m/s, sendo que em alguns casos isolados pode atingir até 0,66 m/s. Segundo o modelo de Solsby, o transporte, predominante, varia de 0,4 a 0,6 m³/h/m. Pelo módulo de Bailard esse transporte predominante se dá entre 0,1 a 0,38 m³/h/m.

Figura 14- Isolinhas de Hs (a), corrente (b) e transporte: Soulsby (c) e Bailard (d), avaliadas no caso 01 (Baixa-mar), a partir do modelo Composto.

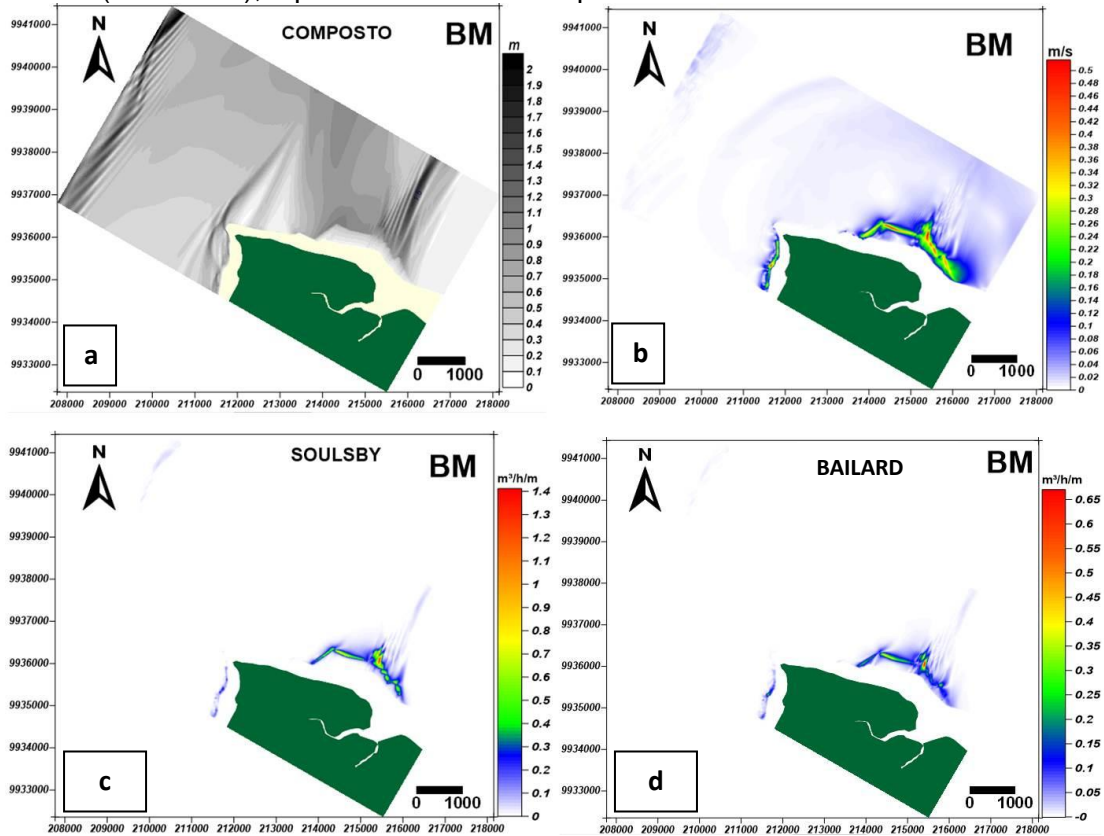
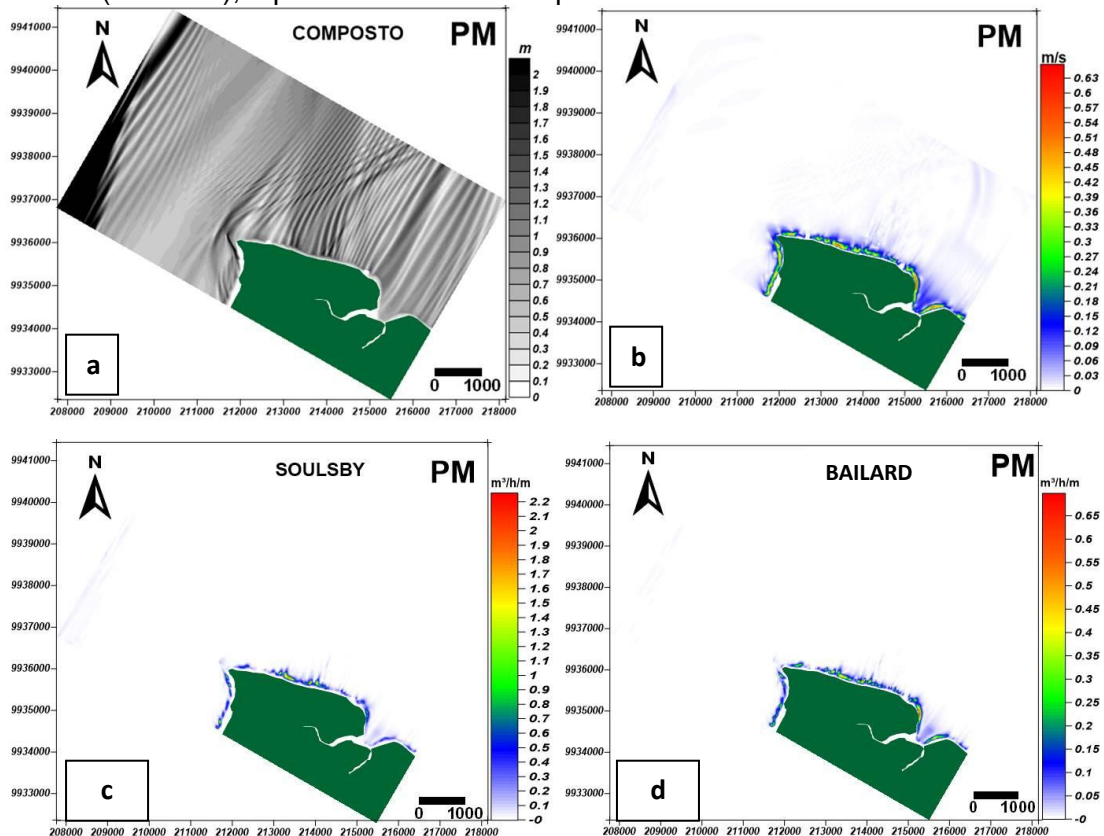


Figura 15-Isolinhas de Hs (a), corrente (b) e transporte: Soulsby (c) e Bailard (d), avaliadas no caso 02 (Preamar), a partir do modelo Composto.



As figuras 16 (caso 03) e 17 (caso 04) demonstram a propagação da onda monocromática a partir do modelo de Stokes, respectivamente, para os instantes de baixa-mar e preamar. As ondas que incidem na costa durante a baixa-mar chegam a uma altura significativa de, aproximadamente, 0,3 metros. Em relação aos parâmetros de corrente e transporte, suas maiores intensidades se limitam, ainda mais ao setor leste da praia, onde os valores de corrente oscilam entre 0,1 a 0,28 m/s, chegando a atingir um valor máximo de 0,5 m/s. Próximo ao ponto de coleta de dados, a simulação do modelo infere uma velocidade de, aproximadamente 0,02 m/s. Na região de limitação, em relação ao transporte de Soulsby, essa região apresenta valores que oscilam entre 0,1 a 0,5 m³/h/m, podendo alcançar valores de até 2 m³/h/m. Segundo Bailard, seu transporte oscila entre 0,05 a 0,4 m³/h/m, atingindo até 0,75 m³/h/m (Figura 16).

No instante de preamar, o trem de ondas, também, não sofre uma refração completa com o fundo, desse modo, ele não gira o suficiente para ficar paralelo a linha costa, fazendo com que o onda atinja a costa com uma intensidade que varia de 0,4 a 1,2 metros, próximo ao ponto de coleta dos dados as Hs foram de, aproximadamente 0,4 metros. A intensidade da corrente, nesse instante, oscila entre 0,15 a 0,35 m/s, sendo que em alguns casos isolados ela a chega a atingir 0,65 m/s. Segundo o modelo de Solsby, o transporte, predominante, varia de 0,5 a 0,7 m³/h/m, atingindo até 2,7 m³/h/m. Pelo módulo de Bailard esse transporte predominante se dá entre 0,1 a 0,25 m³/h/m, alcançando até 0,6 m³/h/m próximo ao ponto de coleta (Figura 17).

Figura 16- Isolinhas de Hs (a), corrente (b) e transporte: Soulsby (c) e Bailard (d), avaliadas no caso 03 (Baixa-mar), a partir do modelo de Stokes.

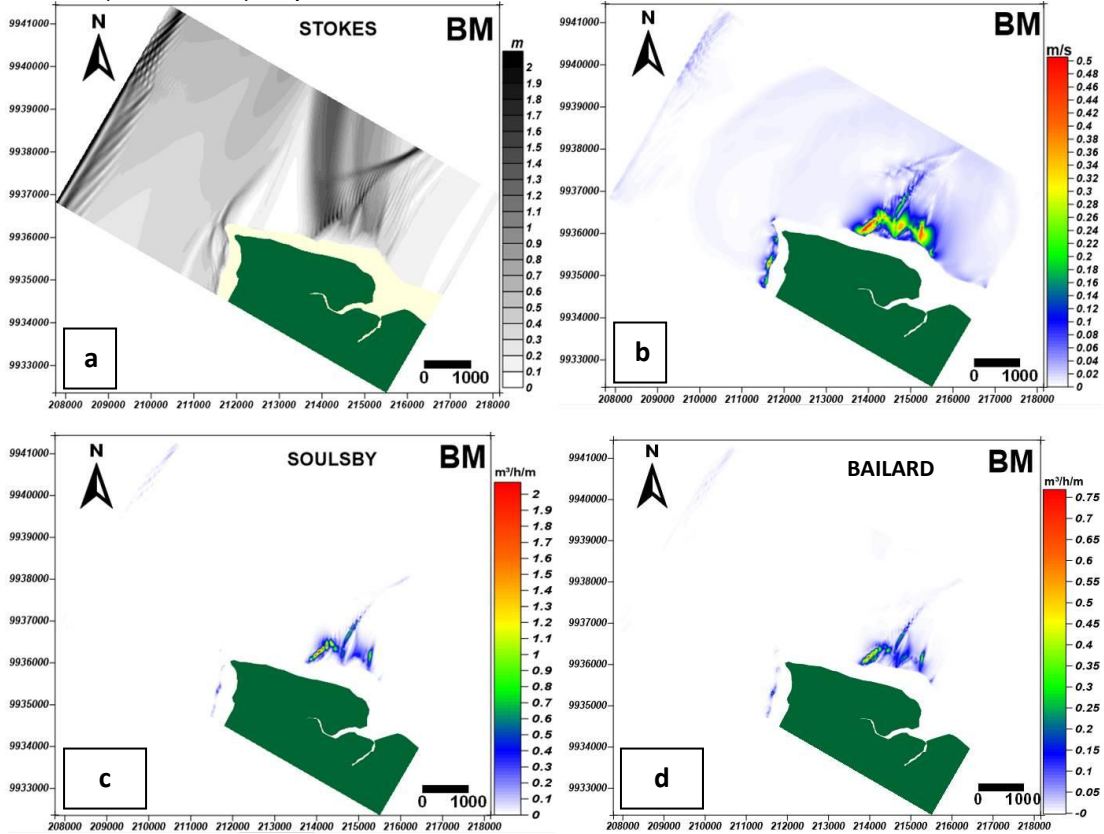
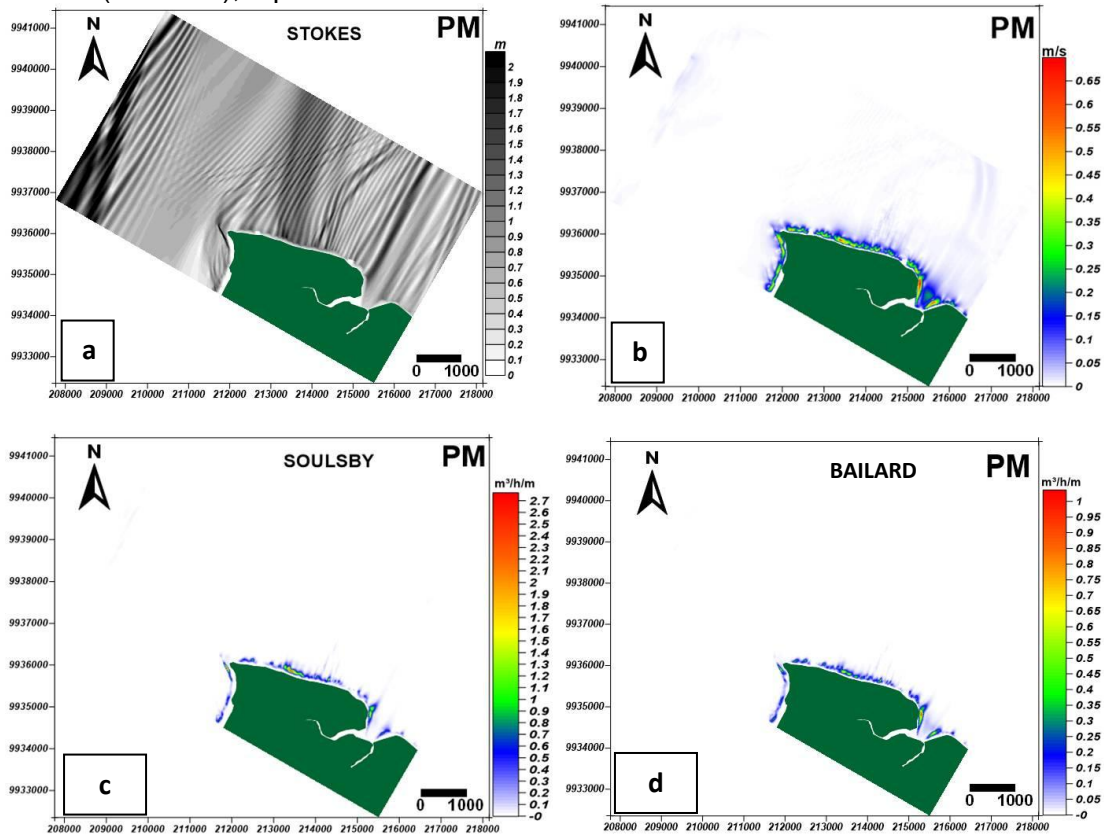


Figura 17-Isolinhas de Hs (a), corrente (b) e transporte: Soulsby (c) e Bailard (d),avaliadas no caso 04 (Preamar), a partir do modelo Stokes.



As figuras 18 (caso 05) e 19 (caso 06) representam a propagação da onda segundo o módulo de onda Linear, suas limitações de propagação, principalmente para os parâmetros de corrente e transporte se assemelham aos resultados apresentados pelo módulo de Stokes. As ondas que incidem na costa durante a baixa-mar chegam a uma altura significativa que varia de 0,3 a 1,6 metros. Os valores de corrente oscilam entre 0,1 a 0,28 m/s, chegando a atingir um valor máximo de 0,5 m/s. Próximo ao ponto de coleta de dados, a simulação do modelo infere uma velocidade de, aproximadamente 0,02 m/s. Na região de limitação, em relação ao transporte de Soulsby, essa região apresenta valores que oscilam entre 0,3 a 0,5 m³/h/m, podendo alcançar valores de até 2 m³/h/m. Segundo Bailard, seu transporte oscila entre 0,1 a 0,4 m³/h/m, atingindo até 0,75 m³/h/m (Figura 18).

No instante de preamar (Figura 19), o trem de ondas continua não sofrendo uma refração completa com o fundo, a intensidade da onda próximo a costa varia de 0,5 a 1,8 metros, próximo ao ponto de coleta dos dados as Hs foram de, aproximadamente 0,6 metros. A intensidade da corrente oscila entre 0,15 a 0,4 m/s, em alguns pontos isolados ela chega a atingir 0,7 m/s, valor este, também, encontrado próximo ao ponto de amostragem. Segundo o modelo de Soulsby, o transporte, predominante, varia de 0,44 a 0,66 m³/h/m, atingindo até 2,77 m³/h/m. Pelo módulo de Bailard esse transporte predominante se dá entre 0,15 a 0,27 m³/h/m, próximo ao ponto de amostragem, esse valor alcança até 0,4 m³/h/m.

Figura 18- Isolinhas de Hs (a), corrente (b) e transporte: Soulsby (c) e Bailard (d), avaliadas no caso 05 (Baixa-mar), a partir do modelo Linear.

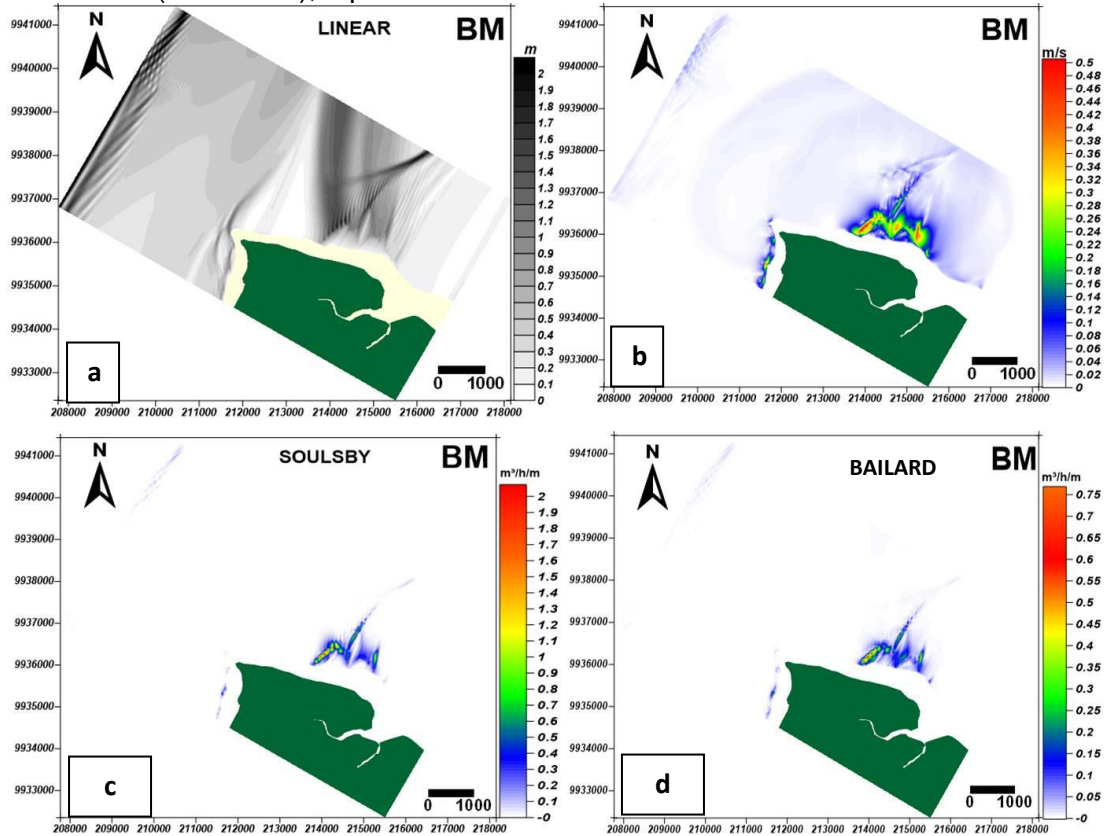
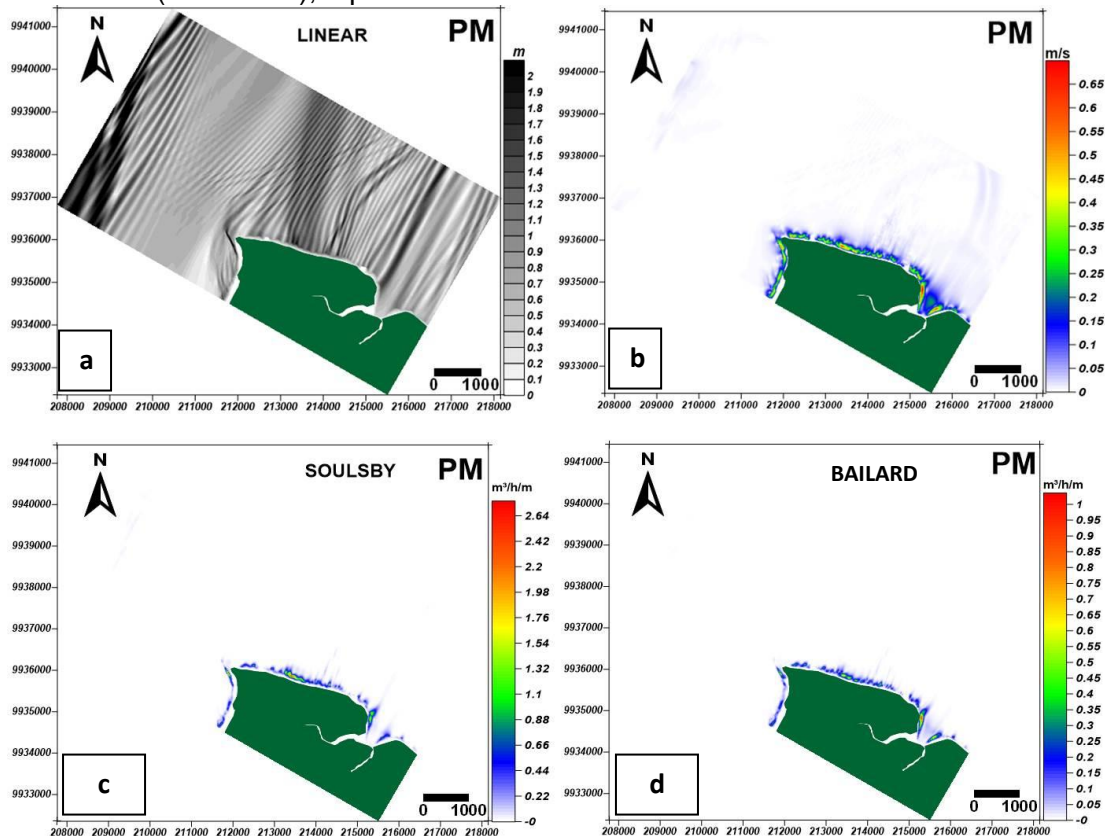


Figura 19- Isolinhas de Hs (a), corrente (b) e transporte: Soulsby (c) e Bailard (d), avaliadas no caso 06 (Baixa-mar), a partir do modelo Linear.



As figuras 20 e 21 apresentam a distribuição da altura significativa de onda ao longo do domínio computacional modelado durante os instantes de baixa-mar e preamar, respectivamente. A partir dos resultados obtidos no modelo, a onda de 1,05 m de altura propagada na fronteira NE do domínio computacional focaliza as maiores energia através das teorias do sub-módulo do OLUCA-MC: STOKES e LINEAR, onde a H_s presente no ponto de controle atinge 0,3 metros durante a baixa-mar e 0,7 metros na preamar. No entanto, a teoria COMPOSTO possui os parâmetros que mais se aproximam dos dados medidos na região, com ondas de menor energia durante todo o domínio.

É evidente a presença da zona de sombra na frente da praia em todos os submódulos, devido à atenuação da energia de onda incidente na praia pela presença de bancos, e erros de interpolação do modelo. É de se esperar uma discrepância nos resultados, a principal diferença esperada é em relação ao vento, pois este agente energético possui grande influência no transporte de sedimentos local, visto que é o fenômeno precursor das ondas; estas, quebrarem, provocam as correntes, que por sua vez, geram o transporte.

Barbosa et al (2007), verificou na praia de Ajuruteua (Nordeste do Pará) que o valor médio da altura de onda na rebentação (H_b) foi 0,8 m e o valor médio de $H_{1/3}$ (H_s) foi 1,2 m, para os períodos, respectivos, de 8,8 s e 9,2 s.

Figura 20- Distribuição dos campos de altura de onda durante a Baixa-mar. Teorias: Composto (C1), Stokes (C3) e Linear (C5)

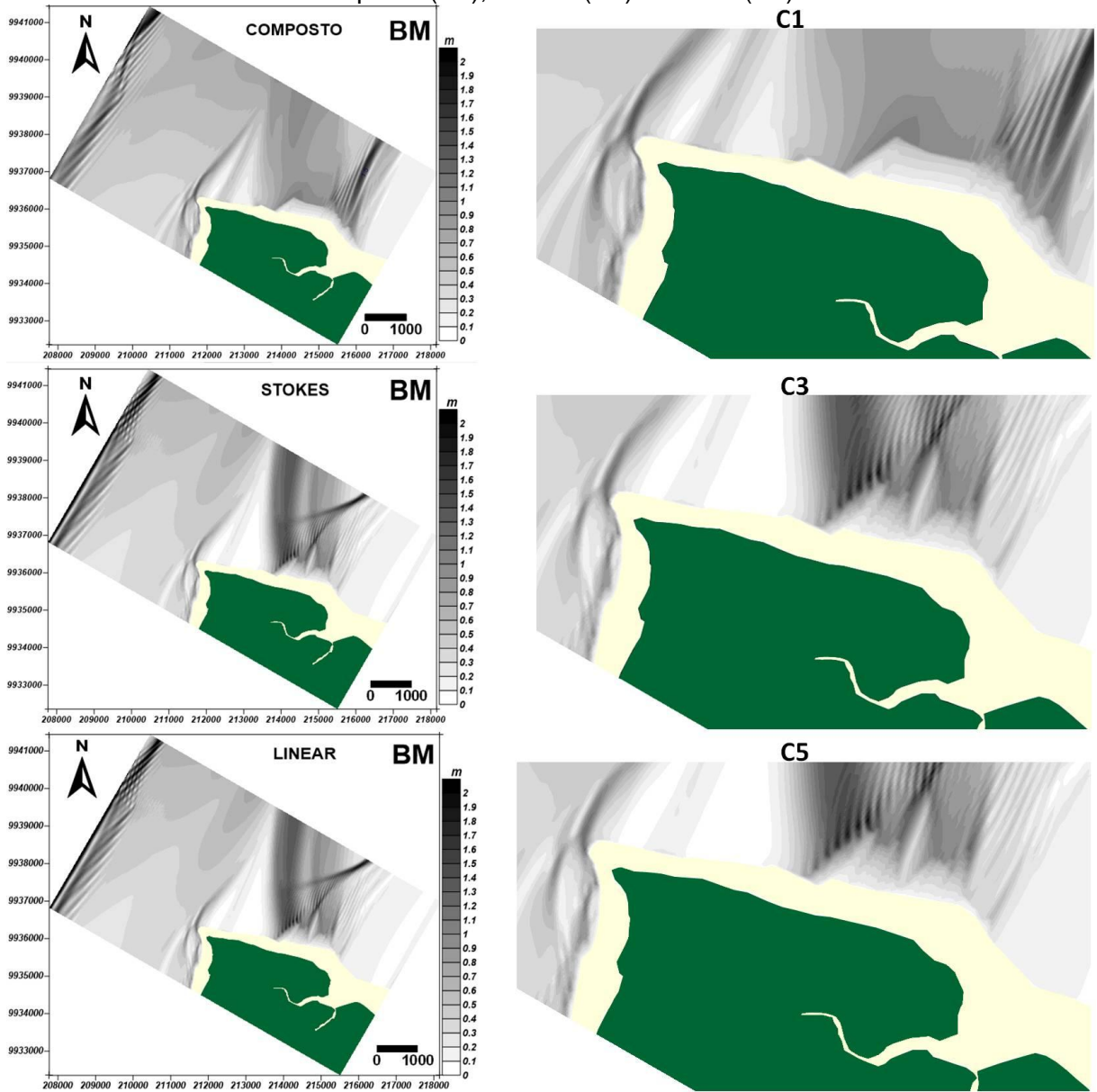
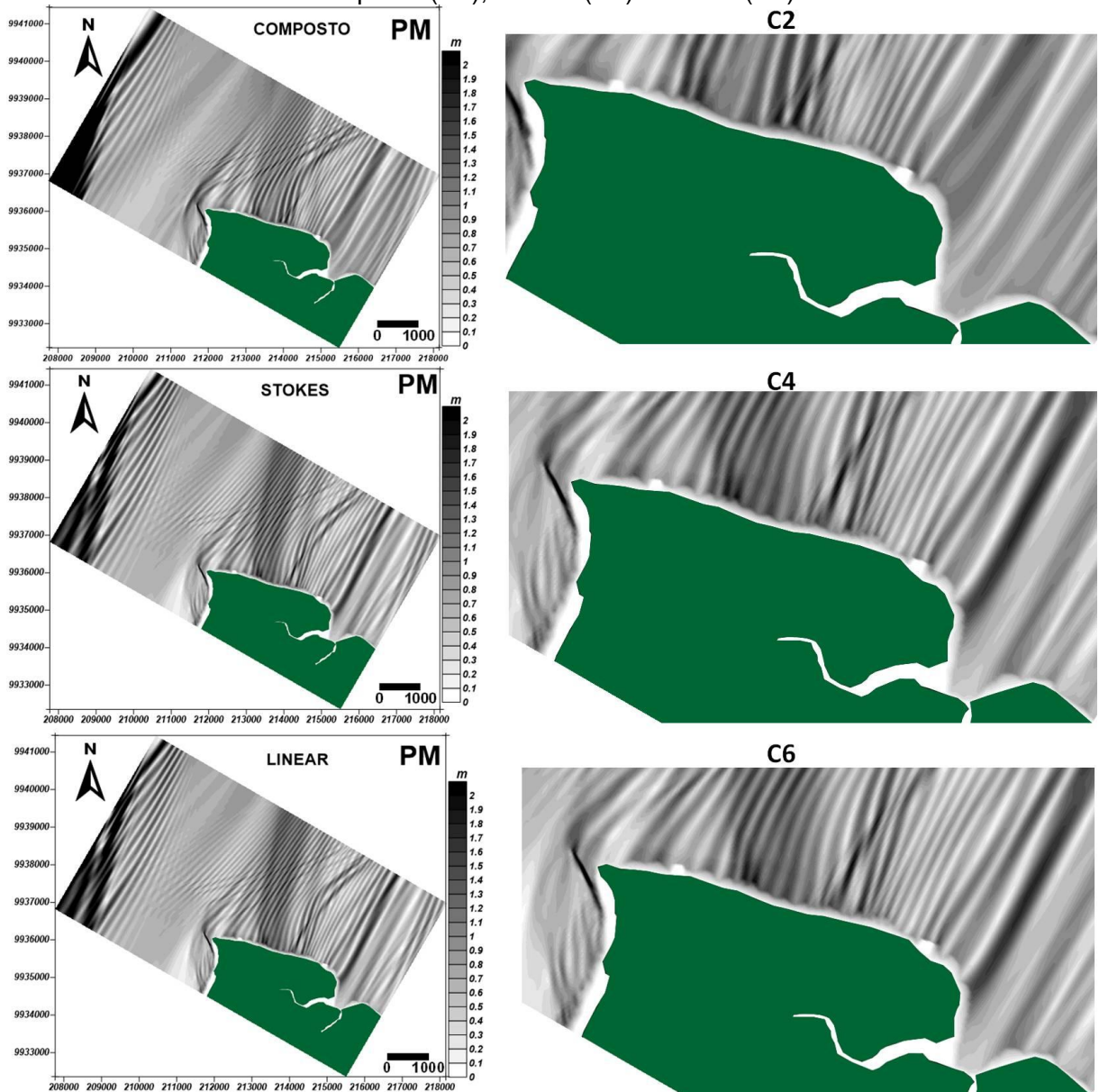


Figura 21- Distribuição dos campos de altura de onda durante a Preamar. Teorias: Composto (C2), Stokes (C4) e Linear (C6)



A distribuição dos campos de corrente ao longo da área de estudo é apresentada nas Figuras 22 e 23. Observa-se um intenso fluxo longitudinal na baixa-mar na margem leste da praia (Figura 22), que chega a atingir cerca de 0,52 m/s, como as correntes são calculadas de acordo com os tensores de radiação das ondas, é de se esperar onde existe uma concentração de energia de onda neste local. Foi observada uma componente energética na margem esquerda da ilha de algodão, esta componente provavelmente está associada ao fluxo lateral que existe em estruturas costeiras em praias. Este fluxo lateral seria o retorno da energia incidente na praia, funcionando como uma corrente de retorno paralela linha de costa. Próximo ao ponto de coleta de dados, a corrente longitudinal se direciona, preferencialmente, para Sudeste (SE) em todos os casos que representam o instante de baixa-mar. Nesse instante, a corrente criada pela quebra da onda pelo submódulo Composto, representada por C1 da figura 22, se distribui claramente ao longo da linha de costa, onde algumas vezes se direciona de nordeste (NE) para SE.

No instante de Preamar (Figura 23), as correntes mais intensas se distribuem ao longo da linha de costa, onde chegam a atingir até 0,66 m/s das correntes geradas através do submódulo de onda Composto (C2), onde a direção preferencial, próximo ao ponto de controle, é para Noroeste (NW). Para os submódulos de Stokes (C4) e Linear (C6), a corrente longitudinal aproximar-se de 0,7 m/s, com direção para Sudoeste (SW). No setor leste da Praia da Princesa, em todos os submódulos, a direção resultante é para SE.

Barbosa et al (2007), em seu estudo realizado na praia de Ajuruteua (Nordeste do Pará), observou que a intensidades das correntes, na zona de surf, variaram de 0,1m/s a 0,78 m/s, sendo os maiores valores registrados, principalmente no período de enchente, possivelmente em decorrência da direção predominante dos ventos vindos de NE. Por outro lado, a direção das correntes de maré foi NW-SE durante os períodos de enchentes e SE-NW durante as vazantes.

Figura 22- Distribuição dos campos de corrente durante a Baixa-mar. Teorias: Composto (C1), Stokes (C3) e Linear (C5)

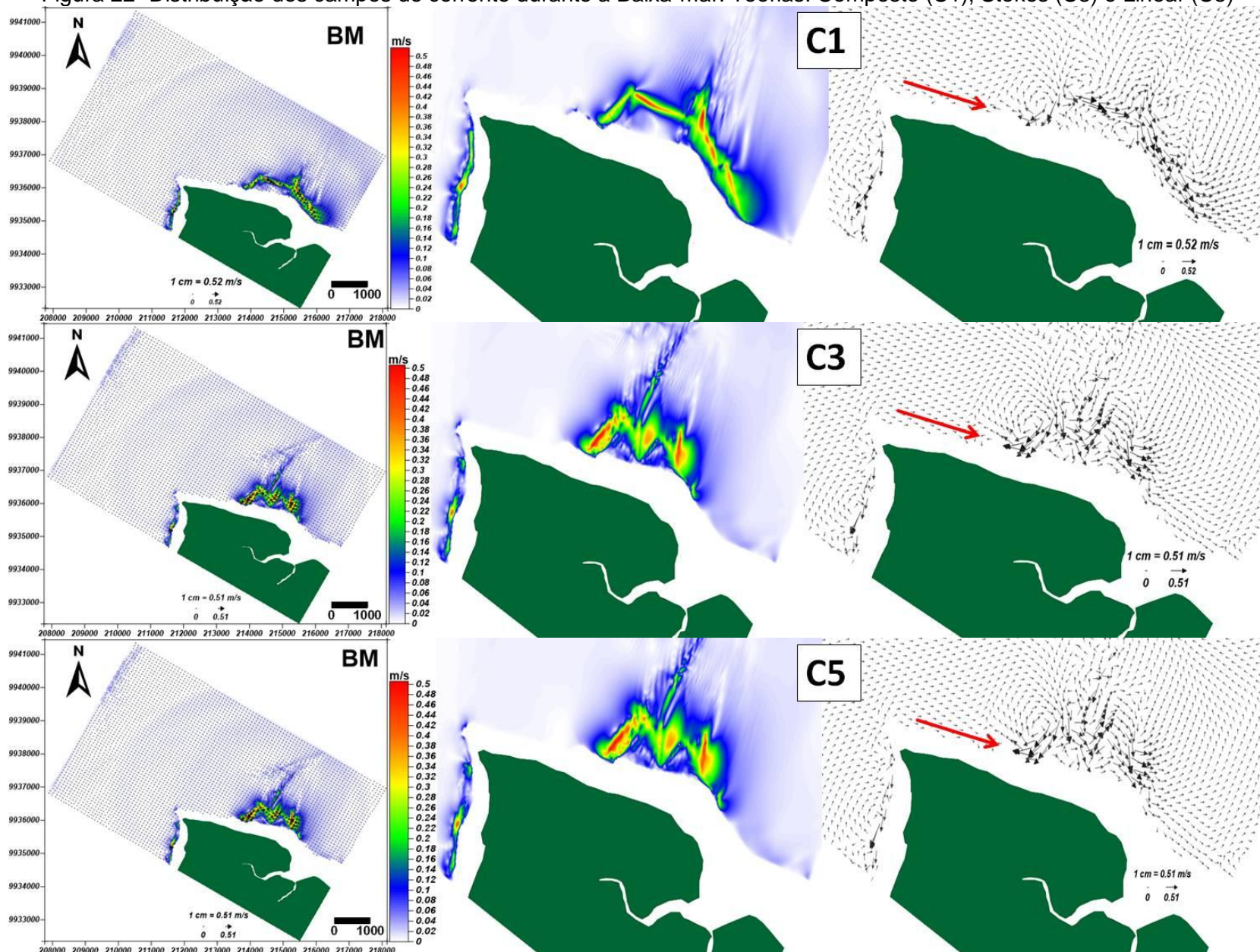
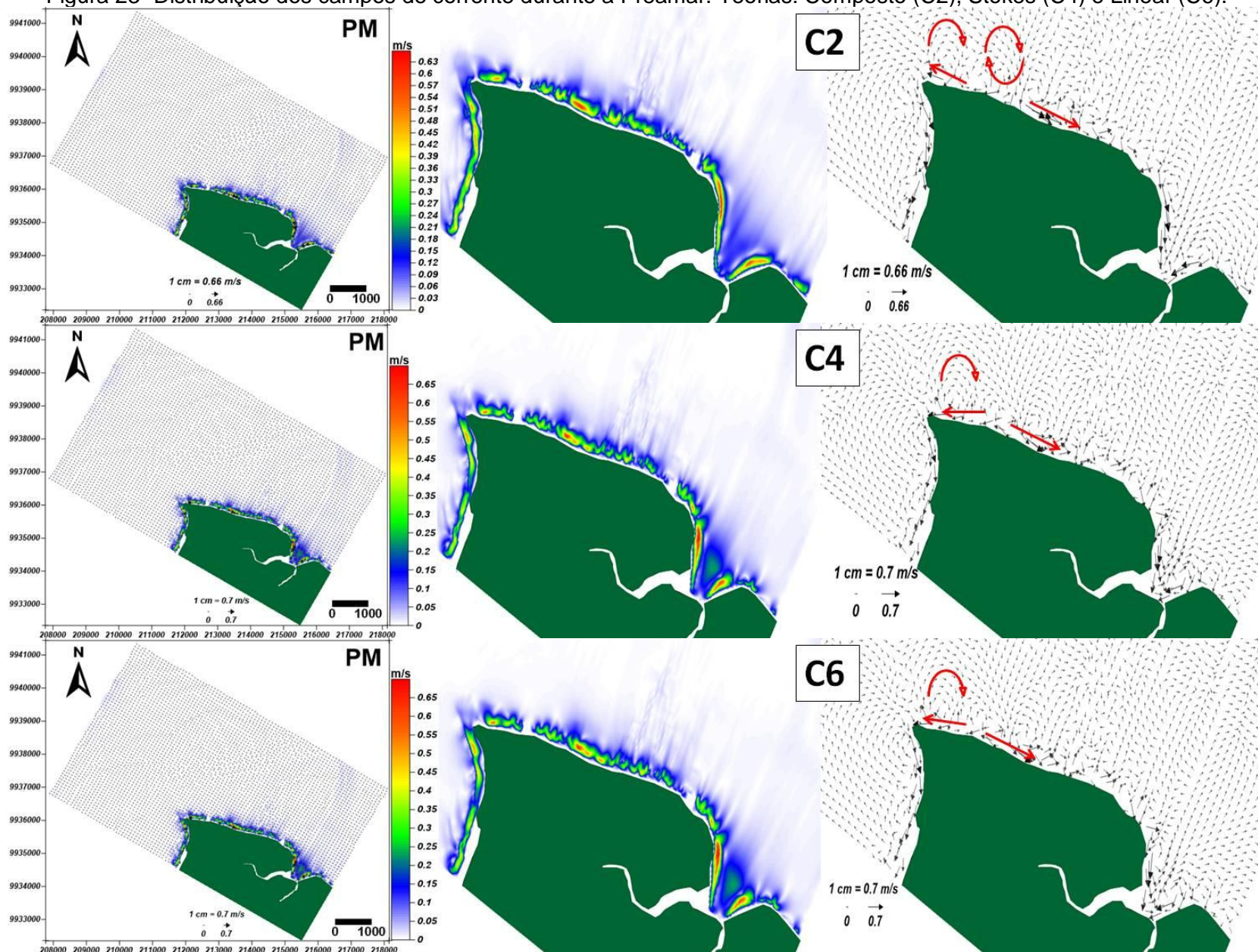


Figura 23- Distribuição dos campos de corrente durante a Preamar. Teorias: Composto (C2), Stokes (C4) e Linear (C6).



A modelagem do transporte de areia na Praia da Princesa, segundo o modelo de Soulsby é apresentado nas Figuras 24 e 25, respectivamente, instantes de baixa-mar e preamar. Durante o instante de baixa-mar (Figura 24), a linha de costa da Praia da Princesa apresenta um padrão de transporte mais intenso na porção leste da praia, nesta área existe uma deriva litorânea no sentido sudeste com taxa de transporte máxima que varia de $1,41 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ (C1) à $2,07 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ (C3 e C5), que representam, respectivamente, o transporte sedimentar gerado através do módulo Composto, Stokes e Linear. Em todos os casos da Baixa-mar. Foi possível notar, próximo à costa, zonas de recirculação que apresentam diferentes configurações, conforme a agitação vai de nordeste para sudeste. Em frente à análise de coletas de dados, verifica-se um corredor de transporte com direção preferencial para sudeste.

Para a situação de Preamar (Figura 25), verificou-se um aumento na quantidade de transporte sedimentar, onde os valores variaram de $2,06$ (c2) a $2,77 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ (c4 e c6). Nesse instante não é notada uma nítida zona de recirculação, mas a direção, preferencial do transporte sedimentar se dá para Sudeste.

A modelagem do transporte de areia na Praia da Princesa, segundo o modelo de Bailard é apresentado nas Figuras 26 e 27, respectivamente, instantes de baixa-mar e preamar. Durante o instante de baixa-mar (Figura 26), o padrão de transporte mais intenso se dá na porção leste da praia, nesta área, o padrão de circulação se dá no sentido nordeste para sudeste com taxa de transporte máxima que varia de $0,67 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ (C1), e para sudoeste $0,77 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ (C3 e C5), que representam, respectivamente, o transporte sedimentar gerado através do módulo Composto, Stokes e Linear. Em todos os casos da Baixa-mar, foi possível notar, próximo a costa, zonas de sombras que estão associadas a forma de como o modelo ler e interpola as ondas nessa região, onde são comumente difratadas pela grande quantidade de bancos encontrados na praia da princesa.

Para a situação de Preamar (Figura 27), foi verificado um aumento na quantidade de transporte sedimentar, onde os valores variaram de $0,7$ (c2) a $1,04 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ (c4 e c6). Nesse instante pode ser notada uma zona de recirculação, próximo ao ponto de coletas de dados; e um transporte preferencial para Nordeste no setor leste da ilha, onde a magnitude do transporte é mais intensa.

A uma clara diferença da intensidade do transporte dos dois níveis de maré para as duas teorias de transporte sedimentar: a de Soulsby e a de Bailard. Sendo que a faixa onde existe um maior transporte é mais ou menos próxima da

linha de costa, de acordo com que o nível de maré seja mais elevado ou mais baixo, respectivamente.

O processo de transporte de sedimentos na zona de rebentação tem uma importância fundamental na determinação do processo de recuperação da zona costeira. O movimento de espraiamento na face praias é um dos principais mecanismos de transporte de sedimentos entre as regiões da praia e, então, é um fator relevante nas mudanças ocorrentes na linha de costa, ou seja, erosão e deposição (MASSELINK ; HUGHES, 1998).

Em seu estudo realizado na praia do Cassino- RS, Sprovieri et al (2010) observou que a equação utilizada para simular efeitos de transporte de sedimentos que mais se adéqua aos fenômenos costeiros da região é a proposta por Soulsby, uma vez, que esta formulação é uma expressão analítica experimental que aproxima a formulação de onda-corrente de van Rijn, e é efetiva para o transporte de fundo e de suspensão. As taxas de transporte de areia envolvidas nesta área chegaram a atingir $0,50 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$, no período de primavera e verão.

Braga (2007) ao estudar a Praia de Ajuruteua, também no NE do Pará, constatou que esta morfologia construída por eventos de alta energia de ondas (época menos chuvosa onde a ação de ondas é tão expressiva quanto à atuação da maré).

Figura 24- Distribuição dos campos transporte durante a Baixa-mar (Soulsby).

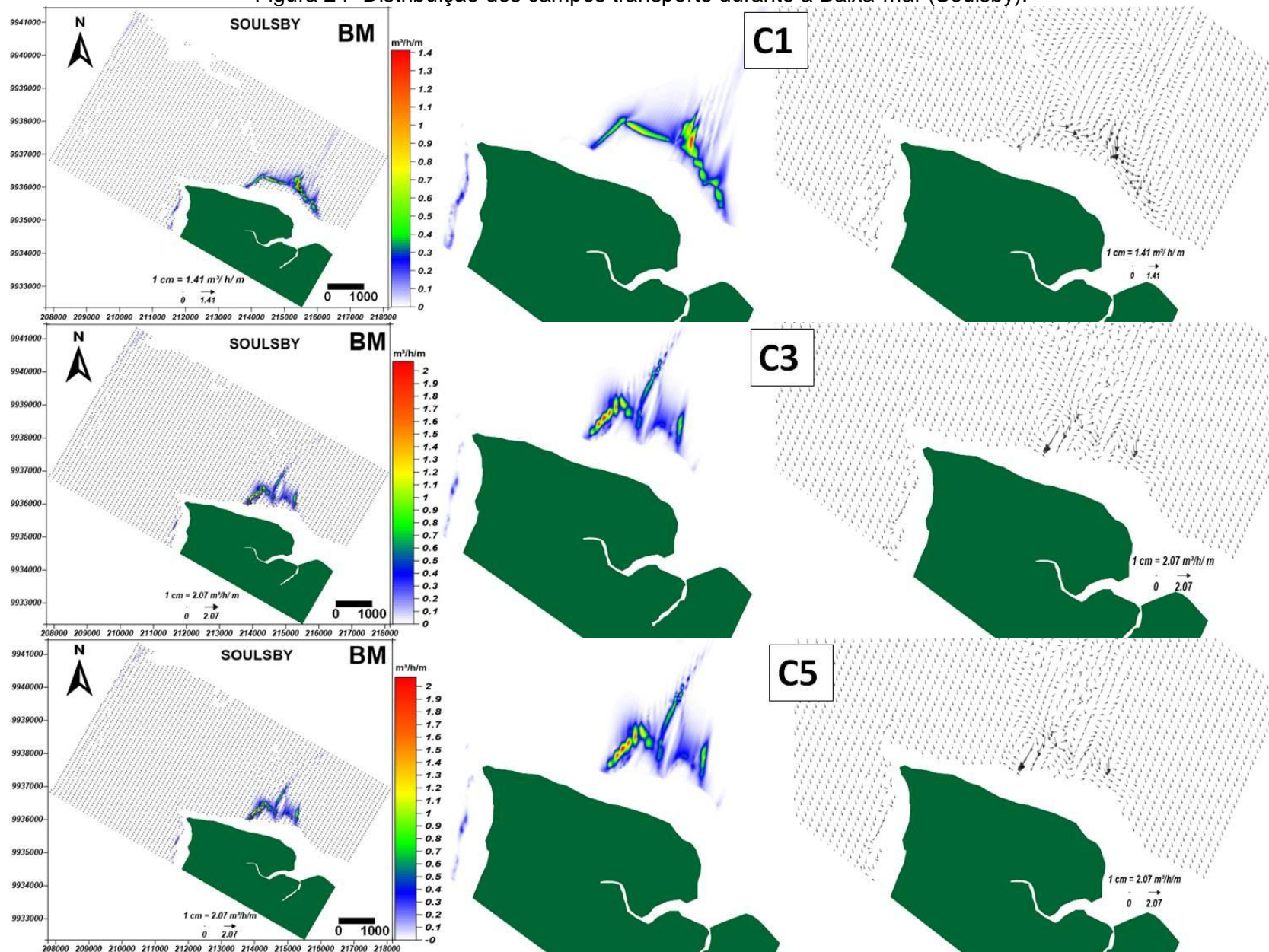


Figura 25- Distribuição dos campos de transporte durante a Preamar (Soulsby).

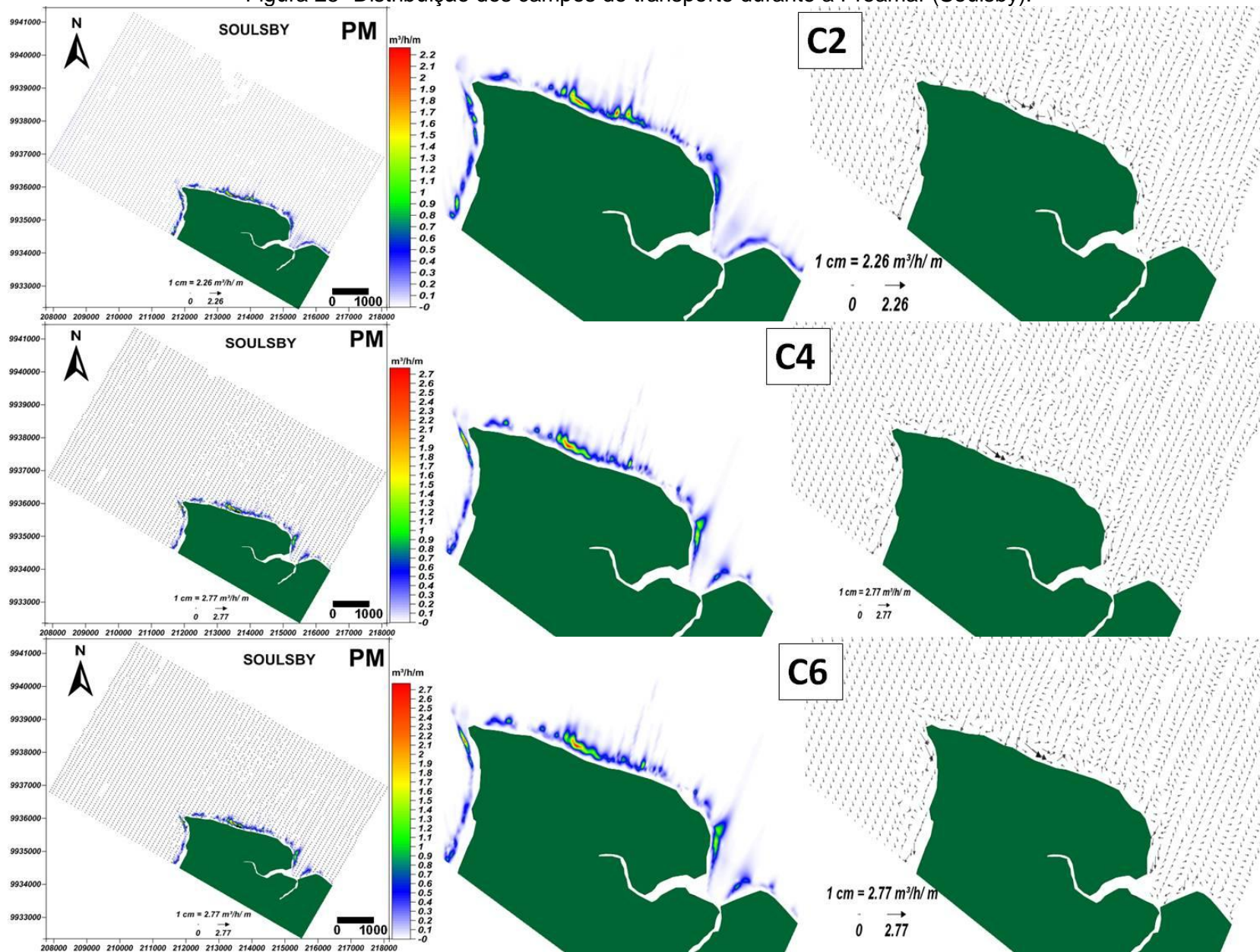


Figura 26- Distribuição dos campos de transporte durante a Baixa-mar (Bailard).

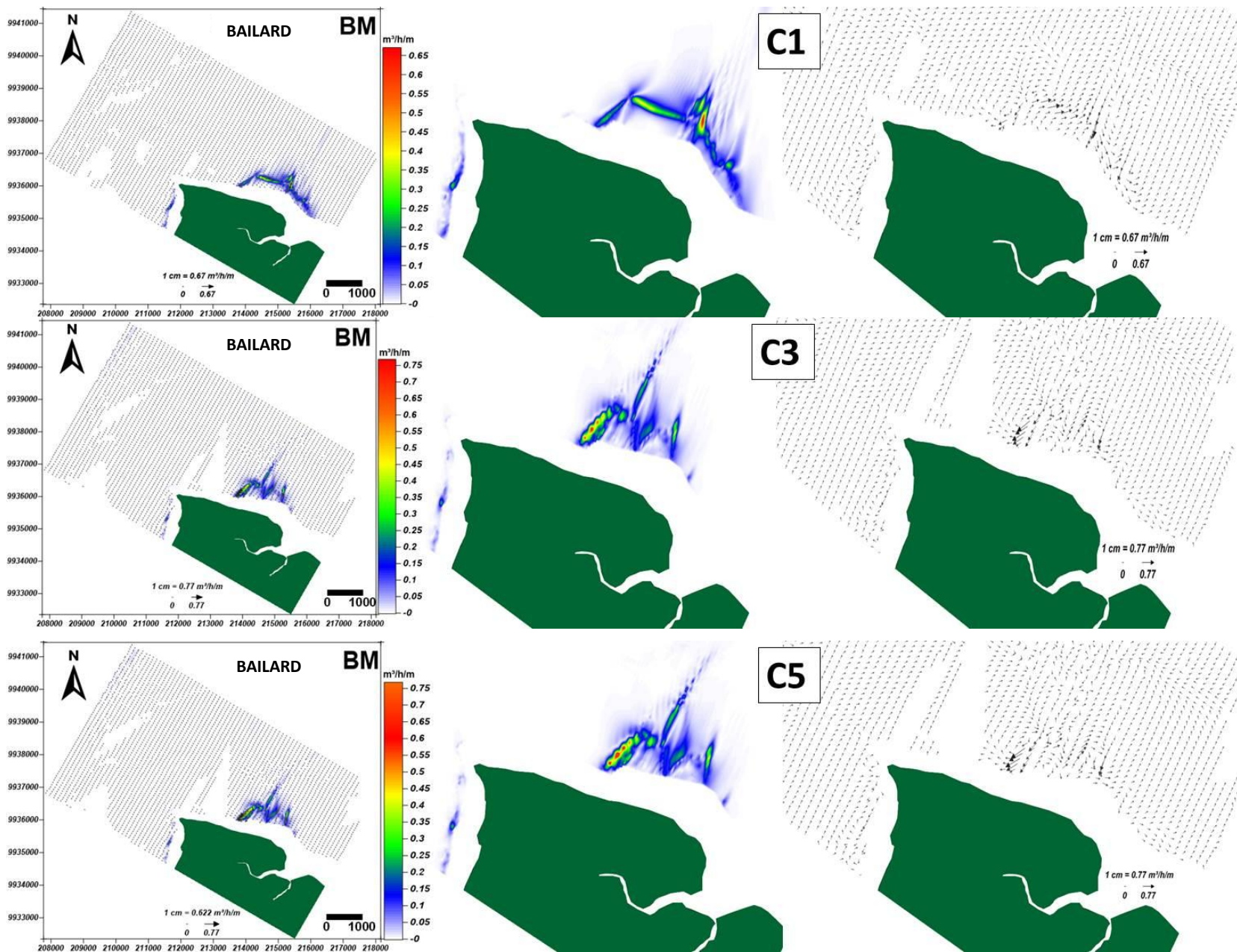
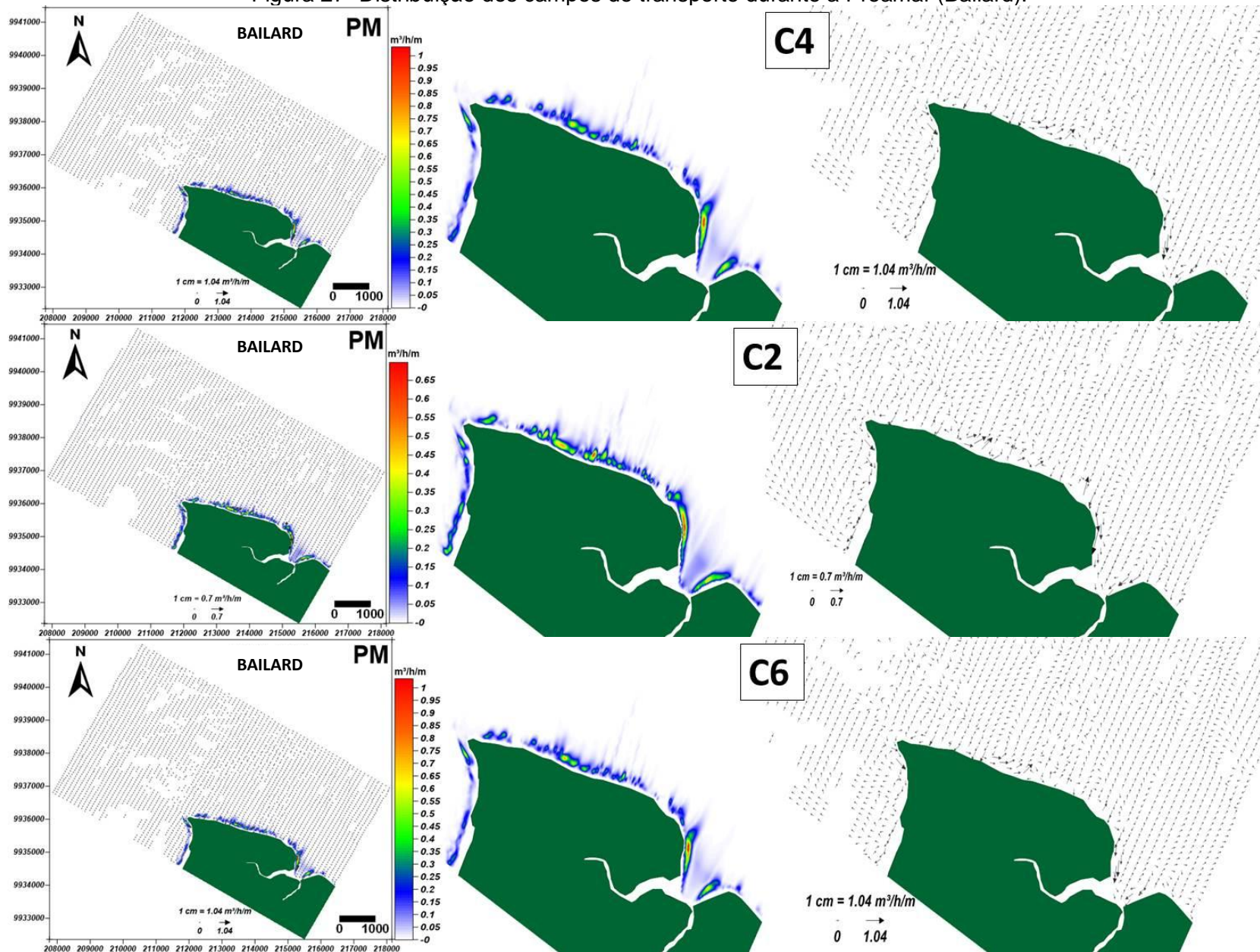


Figura 27- Distribuição dos campos de transporte durante a Preamar (Bailard).



A tabela 6 demonstra os pontos positivos e negativos do modelo, onde são propagadas, apenas, ondas cuja direção de propagação esteja entre +/- 55°, em relação a orientação da malha no eixo x. Outro ponto importante é que o modelo não calcula os efeitos da reflexão das ondas, no entanto, representa bem a combinação dos efeitos de difração e refração. Além de fornecer dados de corrente resultante por quebra de onda e de transporte de sedimento.

Um aspecto positivo e importante do modelo, é que ele é todo integralizado com condições de contorno gerais a respeito da costa do Brasil, uma vez que na sua interface "tolls", há vários pontos de análise de casos da região. No entanto, um grande problema do SMC pra Costa Norte Brasileira é que seus efeitos são governados pela ação de quebra das ondas nas praias oceânicas, porém os efeitos de maré são muitos mais significativos para a costa da região, uma vez, que nossas praias são caracterizadas como sendo de meso a macromarés.

Tabela 6- Análise do modelo.

Características	SMC
Domínio Calculado	Pequeno
Ação dos Ventos	Não
Contornos de entrada de onda	Um
Malha Geral	Retangular, pré determinada pelo usuário
Malha de detalhe	Externa à malha geral
Cálculo de difração	Bom
Corrente resultante por quebra de onda	Sim
Reflexão das ondas	Não
Parâmetros livres usados pelo usuário	Poucos ou nenhum

Fonte: Adaptado de Silveira (2009).

CAPÍTULO 7: CONCLUSÃO

Considerando os casos, a teoria de ondas COMPOSTA possui os parâmetros que mais se aproximam dos dados medidos na região, com ondas de menor energia durante todo o domínio, principalmente no estágio de baixa-mar. As correntes longitudinais geradas a partir da quebra das ondas foram bem mais distribuídas ao longo da linha de costa no instante de preamar, onde apresentaram as maiores intensidades com direções preferenciais para NW, próximo ao ponto de coleta de dados, com associação de pequenos vórtices. No setor leste da praia, nesse mesmo instante, sua direção se dá par SE.

A teoria de transporte que melhor representa a Costa Norte Brasileira é a de Soulsby, uma vez que considera os efeitos do transporte de fundo e em suspensão sobre o fundo horizontal, e leva em conta a velocidade crítica de início do movimento. Além de ser a que menos sofre com erros de interpolação ocasionados pelo modelo. Dificultando a monitoração da intensidade dos processos costeiros locais.

Ressalta-se que é de se esperar uma discrepância nos resultados, pois os dados medidos em campo acoplam fenômenos naturais, como o vento e a reflexão, que não são introduzidos na modelagem. A principal diferença esperada é em relação ao vento, pois este agente energético possui grande influência no transporte de sedimentos no local. O SMC não possui acoplamento entre vento e ondas.

Há a necessidade de se explorar os restantes módulos do SMC, como uma análise espectral da onda, uma vez que a onda tratada no trabalho se refere apenas a monocromática.

Apesar de não ser um software comercial, possui uma interface simples de utilizar, para um usuário com conhecimentos gerais sobre agitação marítima e engenharia costeira. Tem limitações próprias a qualquer software atual de modelação deste tipo de fenômenos, devido à grande imprevisibilidade e complexidade dos fenômenos envolvidos. No entanto, os resultados apresentaram boa qualidade, tornando esta ferramenta útil no que diz respeito a estudos deste tipo, uma vez, que os casos simulados foram baseados em condições de contorno que ocorrem com maior frequência no local, desta forma os resultados encontrados servem como base para entender como funciona os processos costeiros desse estudo de maneira geral.

A escassez de registros dos parâmetros oceanográficos, principalmente, sobre o regime ondas, e transporte sedimentar é um fator limitante na caracterização do regime hidrodinâmico que influencia a região costeira paraense. Este fato dificulta, e impossibilita uma análise quantitativa mais precisa sobre a modelagem na região, através de uma calibração mais eficaz.

REFERÊNCIAS

- ALFREDINI, Paolo; ARASAKI, Emilio. *Obras e gestão de portos e costas*. 2. ed. [São Paulo]: Editora Blucher, 2009.
- BARBOSA, V.M.; GREGÓRIO, A.M.S.; BUSMAN, D.V.; COSTA, R.A.A.M.; SOUZA FILHO, P .W .M. e; PEREIRA, L.C.C. Estudo morfodinâmico durante uma maré equinocial de sizígia em uma praia de Macromaré do litoral Amazônico (Praia de Ajuruteua-P A, Brasil). *Boletim Paranaense de Geociências*, v. 60, p. 31-43, 2007.
- BARTELS, J.; ANGENHEISTER, G. *Geofísica*. [S.l.]: Meridiano Limitada, 1970. 403p.
- BIRD, E.C.F. *Coastal geomorphology: an introduction*, 1ed. [S.l.]: John Wiley, 2000. 322p.
- BORBA, T.A.C. *Morfodinâmica e hidrodinâmica de praias do litoral Nordeste Paraense, Brasil*. 2011. 39f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Oceanografia, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2011.
- CALAZANS, D. K. *Estudos oceanográficos: do instrumental ao prático*. Pelotas, RS: Textos, 2011. 461p.
- CALLIARI, L.J.; KLEIN, A.H. da F. Características morfodinâmicas e sedimentológicas das praias oceânicas entre Rio Grande e Chuí, RS. *Pesquisas*, v. 20, n.1, p. 48–56, 1993.
- CICIN-SAIN, B. Sustainable development and integrated coastal management. *Ocean & Coastal Management* , v. 21, n.1-3, p. 11-43, 1993.
- COMISSÃO INTERMINISTERIAL PARA OS RECURSOS DO MAR (CIRM). *Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro*. Brasília, 1990. 31 p.
- COSTA, J.B.S.; BORGES, M.S.; IGREJA, H.L.S.; PINHEIRO, R.V.L. Aspectos da tectônica cenozóica na região do salgado, litoral Nordeste do estado do Pará. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 3., 1991, Belém. Belém: SBG, 1991. p 156-165.
- EL-ROBRINI, M. Deposição e assoreamento das rias do Nordeste do estado do Pará – Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 37., 1992, São Paulo. *Anais...* São Paulo: SBG, 1992. (Sessões Técnicas v. 2) p. 79-80.
- FRANCO, A. S. *Marés: fundamentos, análises e previsão*. 1 ed. Niterói- RJ: Diretoria de Hidrografia e Navegação, 1997. 268p.
- GARRISON, T. *Fundamentos de oceanografia*. 4. ed. Norte-Americana. São Paulo: Cengage Learning, 2010. 440p.
- GESAMP. *The contributions of science to integrated coastal management*. Rome: FAO, 1996. 66p. (Reports and Studies, n. 61)

GOES, A.M.; TRUNCKENRODT, W. Caracterização faciológica e Interpretação ambiental dos sedimentos Barreiras na região Bragantina, Nordeste do estado do Pará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31.,1980, Camboriu. *Anais...* Camboriu: SBG, 1980. v. 2 p. 766-771.

GRANT, W.D.; MADSEN, O.S. Combined wave and current Interaction with a rough bottom. *J. Geophys. Res.*, v. 84, p. 1797-1808, 1979.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acessado em: 24 de Setembro de 2015.

JOHNSON, I.G. Wave boundary layer and function factors. *Coastal Engrg. Conf.*, ASCE, 1966. p. 127-148. (Proc. 10th).

LEÇA, E. E.; LEITÃO, S. N.; COSTA, M. F. *Oceanografia: um cenário tropical*. Recife: Universidade Federal de Pernambuco. Centro de Tecnologia e Geociências. Departamento de Oceanografia; Bagaço, 2004. 761p.

LONGUET-HIGGINS, M.S. Longshore currents generated by obliquely incident sea waves. 1, 2, 5 *Geophys. Res.*, v. 75, p. 6778-6801, 1970.

MONTEIRO, M. C. Estudo morfodinâmico de uma praia de macromaré no litoral Amazônico, Ajuruteua - Pa. *Revista Científica da UFPA*. 2006. Disponível em: <http://www.cultura.ufpa.br/rcientifica/cabeçalho.php?conteudo=4.14>. Acessado em: 12/02/2016.

MARTORANO, L.G.; PERREIRA, L.C.; CÉSAR, E.G.M.; PEREIRA, I.C.B. *Estudos climáticos do estado do Pará, classificação climática (Köppen) e deficiência hídrica (Thornthwhite Mather)*. Belém: SUDAM/ EMBRAPA, SNLCS, 1993.

MASSELINK, G.; HUGHES, M. Field investigation of sediment transport in swash zone. *Continental Shelf Research*, v. 18, p. 1179 – 1799, 1998.

MORAES, A.C.R. *Contribuições para a gestão da zona costeira do Brasil: elementos para uma geografia do litoral brasileiro*. São Paulo, SP, Brasil: EDUSP - Editora da Universidade de São Paulo, 1999. 229p.

MORAES, B.C.; COSTA, J.M.N.; COSTA, A.C.L.; COSTA, M.H. Variação espacial e temporal da precipitação no estado do Pará. *Acta Amazônica*, v. 35, p. 207-214, 2005.

NASCIMENTO, I. B. A. *Batimetria e aspectos morfodinâmicos de canais de maré da costa Leste da Ilha do Marajó (Pará)*. 2010. 60f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação) - Faculdade de Oceanografia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.

NICOLODI, J.L.; PETERMANN, R.M. Mudanças climáticas e a vulnerabilidade da zona costeira do Brasil: aspectos ambientais, sociais e tecnológicos. *Revista da Gestão Costeira Integrada*, v.10, n. 2, p.151-177, 2010. DOI:10.5894/rgci206

NITTROUER, C. A.; DEMASTER, D.J. The Amazon shelf setting: tropical, energetic, and influenced by a large river. *Continental Shelf Research*, v. 16, n. 5/6, p. 553-573, 1996.

PICKARD, G. L. *Oceano grafia descritiva: uma introdução*. Rio de Janeiro, Fundação de Estudos do Mar, 1968. p.165-167.

RUIVO, M. L. P.; AMARAL, I. G.; RIBEIRO, E. L. C.; GUEDES, A. L. S. Os solos de uma topossequência na Ilha de Algodoal/ Maiandeuá, Nordeste do estado do Pará: composição química e produção de matéria orgânica. *Acta Amazônica*, v. 32, p. 257-266, 2002.

SANTOS, V.F. *Ambientes costeiros amazônicos: avaliação de modificações por sensoriamento remoto*. 2006. 306f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2006.

SHORT, A.D. Australia beach systems – the morphodynamics of wave through tidedominated beach dune systems. *Journal of Coastal Research*, v. 35, p. 7-20, 2003.

SILVA, C.G.; PATCHINEELAM, S.M; BAPTISTA NETO, J.A.; PONZI, V.R.A. Ambientes de sedimentação costeira e processos morfodinâmicos atuantes na linha de costa. In: BAPTISTA NETO, J.A.; PONZI, V.R.A.; SICHEL, S.E. (orgs.). *Introdução à geologia marinha*. Rio de Janeiro: Interciência, 2004. p. 175 -218.

SILVA, M.S. *Morfoestratigrafia e evolução holocênica da planície costeira de Salinópolis, Nordeste do estado do Pará*. 1996. 145f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós- Graduação em Geologia e Geoquímica, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 1996.

SILVA, P. V. M. *Estudo da morfodinâmica sazonal e quantificação de transporte sedimentar costeiro nas praias de Fortalezinha e Princesa, Algodoal/Maiandeuá (Nordeste do estado do Pará)*. 2014. xviii, 89 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós- Graduação em Geologia e Geoquímica. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Pará, 2014.

SMCBRASIL-a. *Documento temático de onda*. 2014. Disponível em: <<http://smcbrasil.ihcantabria.com/descargas/>>. Acesso em: 15/03/2015.

SMCBRASIL-b. *Manual do usuário SMC Brasil*. 2014. Disponível em: <<http://smcbrasil.ihcantabria.com/descargas/>>. Acesso em: 15/03/2015.

SMCBRASIL-c. *Manual de referência - SMC tools*. 2014. Disponível em: <<http://smcbrasil.ihcantabria.com/descargas/>>. Acesso em: 15/03/2015.

SMCBRASIL-d. *Manual de referência OLUCA MC, modelo de propagação de onda monocromática*. 2014. Disponível em: <<http://smcbrasil.ihcantabria.com/descargas/>>. Acesso em: 15/03/2015.

SMCBRASIL-e. *Manual de referência COPLA-MC/SP, modelo de correntes de quebra em praias*. 2014. Disponível em: <<http://smcbrasil.ihcantabria.com/descargas/>>. Acesso em: 15/03/2015.

SMCBRASIL-e. *Manual de referência EROS, modelo de erosão/ sedimentação*. 2014. Disponível em: <<http://smcbrasil.ihcantabria.com/descargas/>>. Acesso em: 15/03/2015.

SOUZA, C.R.G.; SOUZA-FILHO, P.W.M.; ESTEVES, L.S.; VITAL, H.; DILLENBURG, S.R.; PATCHINEELAM, S.M.; ADDAD, J.E. Praias arenosas e erosão costeira. In: SOUZA, C.R.G.; SUGUIO, K. ; OLIVEIRA, A.M.S.; OLIVEIRA, P.E. (eds.). *Quaternario do Brasil*. Ribeirão Preto, Holos, 2005. p. 130-152.

SANTOS, V.F. *Ambientes costeiros amazônicos: avaliação de modificações por sensoriamento remoto*. 2006. 306f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2006.

SUGUIO, K. *Geologia sedimentar*. São Paulo: Edgard Blücher/EDUSP, 2003. 400p.

SZLAFSZTEIN, C. Indefinições e obstáculos no gerenciamento da zona costeira do estado do Pará, Brasil. *Gerenciamento Costeiro Integrado* v. 9, p. 47-58, 2009.

TANAKA, H.; SHUTO, Function coefficient for a wave-current coexistent system. *Coastal Engrg.*, in Japan, v. 24, p. 105-128, 1981.

THORNTON, E.B. Variation of longshore current across the surf zone. In: COASTAL ENGINEERING CONFERENCE, 12th., 1970, [S.I.]. *Proceeding*. [S.I.]: ASCE, 1970. p. 291-308. doi: 10.1061/9780872620285.018

VAN RIJN, L.C. *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas*. Amsterdam, the Netherlands: Aqua Publications; University of Utrecht, Delft Hydraulics, 1993.

VRIEND, H.J. Two- and three-dimensional mathematical modelling of coastal morphology. *Report n. H284-2*, 1987. (Delft Hydraulics Communications, n. 377)