

An aerial photograph of a beach with waves crashing onto the shore. The water is a vibrant green and blue, with white foam from the waves. The sand is a light tan color.

PLANTA DE DESSALINIZAÇÃO DE FORTALEZA

MODELAGEM PRELIMINAR DA PLUMA SALINA

CONTEÚDO

Apresentação	3
2. Introdução.....	4
2.1. Processos de mistura e diluição	6
2.1.1. Campo próximo	6
2.1.2. Campo distante	8
3. Região avaliada.....	10
3.1. Sazonalidade da região	11
4. Modelagem hidrodinâmica e de transporte.....	14
4.1. Ferramenta de modelagem utilizada	14
4.1.1. SisBaHiA	14
4.1.2. Visual Plumes	14
4.2. Domínio de modelagem.....	15
4.3. Modelagem hidrodinâmica	15
4.3.1. Calibração do modelo hidrodinâmico.....	15
4.3.2. Acoplamento do modelo de propagação de ondas	16
4.4. Modelagem do transporte de concentrado salino	20
4.4.1. Campo Próximo	20
4.4.2. Campo Distante.....	24
5. Conclusões.....	26
6. Referências Bibliográficas.....	27



Apresentação

Este relatório apresenta e discute os resultados de simulações computacionais da dispersão dos concentrados salinos lançados pelo emissário submarino da planta de dessalinização de água marinha a ser implantada em Fortaleza, com capacidade de 1m³/s.

Foram usados dados secundários pré-existent para alimentação dos modelos hidrodinâmicos e de transporte de espécies dissolvidas, além de dados do “Projeto Referencial” elaborado a partir do “Anteprojeto de Engenharia” desenvolvido pela GS Inima Ltda, empresa líder autorizada a desenvolver este e outros 14 estudos elaborados no âmbito do Edital de Chamamento Público para Procedimento de Manifestação de Interesse – PMI 01/2017/CAGECE, cujo objeto foi a Elaboração de Estudos de uma Planta de Dessalinização de Água Marinha para a Região Metropolitana de Fortaleza com capacidade de 1 m³/s.

Com base neste estudo, são apresentadas os resultados de simulações da dispersão dos efluentes salinos lançados pelo emissário, para fins de avaliação preliminar da área impactada, não dispensando um maior aprofundamento destas simulações quando da fase de elaboração futura do EIA/RIMA, como validação do modelo com dados de campo da área onde será implantado o emissário.

2. Introdução

A modelagem ambiental é uma importante ferramenta para projetos e estudos envolvendo a gestão ambiental, devido à complexidade dos sistemas ambientais. Com ela é possível integrar um grande número de variáveis e processos de forma a obter uma visão dinâmica de tais sistemas e avaliar as suas condições presentes e futuras. No caso específico de uma planta de dessalinização de água marinha, o uso de ferramentas de simulação computacional são úteis tanto para a avaliação da melhor locação do ponto de captação de água, quanto para a análise de possíveis impactos que poderiam ser causados pelo descarte de efluentes oriundos da planta.

A opção de destino final adotada pelo “Anteprojeto de Engenharia”, desenvolvido pela empresa Autorizada no âmbito do edital de PMI 01/2017/CAGECE, foi o uso de um emissário submarino com previsão de lançamento de 1,23 m³/s de efluentes.

A Resolução 430/2011 do CONAMA, que trata sobre condições, parâmetros, padrões e diretrizes para gestão do lançamento de efluentes em corpos de água receptores, define emissários submarinos como:

tubulação provida de sistemas difusores destinada ao lançamento de efluentes no mar, na faixa compreendida entre a linha de base e o limite do mar territorial brasileiro.

Cabe destacar que por linha de base subentende-se a definição dada mais recentemente no Decreto 8.400/2015, que adota:

Art. 1º. A Linha de Base do Brasil é formada pela combinação de Linhas de Base Retas (LBR) e Linhas de Base Normais (LBN), de acordo com as definições emanadas pela Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar.

...

Art. 2º. Em todos os trechos do litoral continental e insular brasileiro, não contemplados pelas LBR, devem ser adotadas as LBN, **que correspondem à linha de baixa-mar, tal como indicadas nas cartas náuticas** de grande escala, publicadas pela Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil.

Nesta resolução é exigido, em seu Art. 20, que:

Art. 20. O lançamento de efluentes efetuado por meio de emissários submarinos deve atender, após tratamento, aos padrões e condições de lançamento previstas nesta Resolução, aos padrões da classe do corpo receptor, após o limite da zona de mistura, e ao padrão de balneabilidade, de acordo com normas e legislação vigentes.

Parágrafo único. A disposição de efluentes por emissário submarino em desacordo com as condições e padrões de lançamento estabelecidos nesta Resolução poderá ser autorizada pelo órgão ambiental competente, conforme previsto nos incisos III e IV do art. 6º, sendo que o estudo ambiental definido no inciso III deverá conter no mínimo:

I - As condições e padrões específicos na entrada do emissário;

II - O **estudo de dispersão na zona de mistura**, com dois cenários:

a) primeiro cenário: atendimento aos valores preconizados na Tabela I desta Resolução;

b) segundo cenário: condições e padrões propostos pelo empreendedor; e

III - Programa de monitoramento ambiental.

A Resolução CONAMA No 357 definia zona de mistura como: “região do corpo receptor onde ocorre a diluição inicial de um efluente”, delimitando-a portanto a área de ocorrência da diluição inicial e equiparando-a ao campo próximo (ambos os termos apresentados mais à frente). Já a Resolução 430/2011 alterou o seu significado ao defini-la como:



região do corpo receptor, estimada com base em modelos teóricos aceitos pelo órgão ambiental competente, que se estende do ponto de lançamento do efluente, e delimitada pela superfície em que é atingido o equilíbrio de mistura entre os parâmetros físicos e químicos, bem como o equilíbrio biológico do efluente e os do corpo receptor, sendo específica para cada parâmetro.

Como referência de critérios e normas internacionais sobre descarte de concentrado salino de plantas de dessalinização, em 2012 o *California Water Resources Control Board* (Jenkins et al, 2012) apresentou uma revisão técnica para este tipo descarga, incluindo recomendações e critérios de disposição. A tabela a seguir sumariza o levantamento realizado por eles em diversas regulamentações, padrões e diretrizes.

Tabela 1 Diretrizes, e padrões de salinidade para lançamento, via emissário submarino, de concentrados salinos de plantas de dessalinização.

Região / Autoridade	Limite de Salinidade	Distância de Conformidade	Fonte
US EPA	Incremento ≤ 4 ppt		
Carlsbad, CA	≤ 40 ppt	305 m	San Diego Regional Water Quality Control Board (2006)
Huntington Beach, CA	≤ 40 ppt (expresso como diluição de 7,5:1)	305 m	Santa Ana Regional Water Quality Control Board (2012)
Western Australia guidelines	Incremento $< 5\%$		
Oakajee Port, Western Australia	Incremento ≤ 1 ppt		The Waters of Victoria State Environment Protection Policy
Perth, Australia/ Western Australia EPA	Incremento $\leq 1,2$ ppt	50 m	Wec, 2002
	Incremento $\leq 0,8$ ppt	1.000m	
Sydney, Australia	Incremento ≤ 1 ppt	50-75 m	ANZECC (2000)
Gold Coast, Australia	Incremento ≤ 2 ppt	120 m	GCD Alliance (2006)
Okinawa, Japan	Incremento ≤ 1 ppt	Mixing zone boundary	Okinawa Bureau for Enterprises
Abu Dhabi	Incremento $\leq 5\%$	Mixing zone boundary	Kastner (2008)
Oman	Incremento ≤ 2 ppt	300 m	Sultanate of Oman (2005)

Fonte: Jenkins et al, 2012.

Embora haja uma considerável variação nas especificidades de cada regulamentação, a maioria delas compartilha dois elementos chave: um limite de salinidade e uma distância de conformidade.

A salinidade limite é usualmente adotado como incremento não superior a faixa entre 1 e 4 ppt em relação à salinidade do ambiente, havendo contudo alguns casos de adoção de valores absolutos ou uma diluição mínima aceitável.

Já em relação ao limite de conformidade, este é adotado como sendo o limite da zona de mistura, a qual é usualmente especificada em termos de uma distância fixa do ponto de lançamento que varia entre 50 e 300m.



Tais diretrizes e regulamentações têm consequências na locação de emissário e definição de características dos difusores. Uma vez que o mencionado anteprojeto de engenharia previu uma eficiência de recuperação das membranas de osmose reversa de 45% e que a salinidade local das águas marinhas está em torno de 37psu, a concentração esperada no efluente será de 67,3psu. Neste caso, a diluição mínima requerida para não ultrapassagem do limite de incremento da salinidade local é dada por:

$$S = (c-c_b)/c_b$$

Onde:

S é a diluição requerida,

C_b é a salinidade local

C é a concentração do efluente.

Usando-se os referenciais apontados na tabela anterior e as condições de água marinha e de concentrado mencionadas, chega-se às diluições apresentadas na tabela a seguir.

Tabela 2 Incrementos máximos de salinidade para a condição dada no Anteprojeto (salinidade marinha de 37 psu e do concentrado de 67,3 psu), obedecendo às diretrizes da tabela anterior.

Limite de Salinidade	Incremento máximo	Diluição necessária
Incremento $\leq 0,8$	0.80	37.8
Incremento ≤ 1	1.00	30.3
Incremento $\leq 1,2$	1.20	25.2
Incremento $< 5\%$	1.85	16.4
Incremento ≤ 2	2.00	15.1
≤ 40	3.00	10.1
Incremento ≤ 4	4.00	7.6

Lembrando que as Resoluções 357 e 430 não apresentam limites máximo permitidos de salinidade, tão pouco referenciais de incremento máximo aceitável, aceitando uma zona de mistura sem delimitação pré-estabelecida

2.1. Processos de mistura e diluição

No processo de dispersão de um efluente na massa líquida via emissários submarinos duas fases distintas devem ser consideradas. A primeira ocorre na região chamada de campo próximo (*near-field*) e depende basicamente das condições ambientais (nível de turbulência das águas, velocidade das correntes e estratificação térmica e hialina), características dos difusores e dos efluentes lançados. Nessa região, as características iniciais do jato, impostas pela geometria de saída e pelas condições de lançamento e do ambiente (em especial as diferenças de densidade), tem influência direta na trajetória do jato e do processo de diluição. Conforme o jato se afasta do ponto de lançamento, as características geométricas dos difusores passam a ter menor influência no processo de diluição, iniciando-se uma segunda fase na região chamada de campo distante (*far-field*), na qual a turbulência do ambiente irá controlar a trajetória e a taxa de diluição da pluma agora formada (Ortiz, et al, 2006), a qual se caracteriza pelo seu comportamento de transporte passivo.

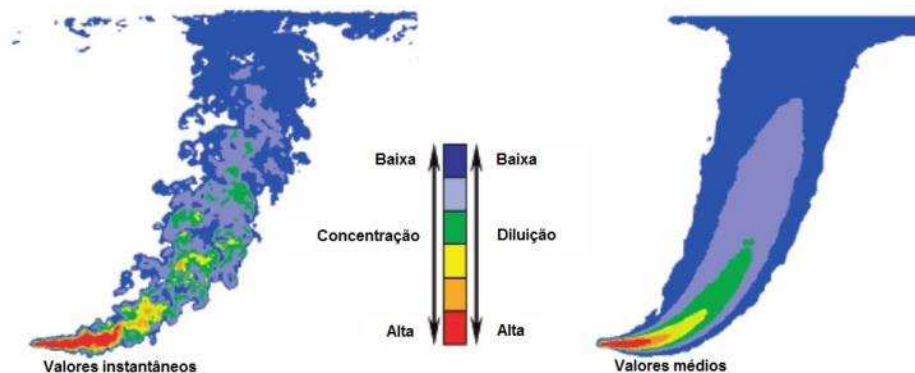
2.1.1. Campo próximo

O efluente lançado pelos difusores passa a se misturar com a massa do corpo d'água receptor pelo fenômeno de carreamento (*entrainment*), que se processa por toda a superfície externa do jato.



Desta forma, a água do mar penetra no interior do jato efluente modificando sua distribuição de concentrações ao longo da seção transversal da pluma, resultando numa rápida diminuição na concentração do efluente. No caso de um efluente com massa específica inferior à água marinha, o jato eleva-se na coluna d'água devido ao empuxo (*buoyancy*) até alcançar um nível de flutuabilidade neutra ou a superfície, conforme ilustrado na figura abaixo obtida a partir da injeção de um traçador fluorescente no fluxo. Neste ponto o mesmo passa a espalhar-se lateralmente criando uma camada de espalhamento horizontal.

Figura 1 – Imagens LIF do jato oriundo de um difusor



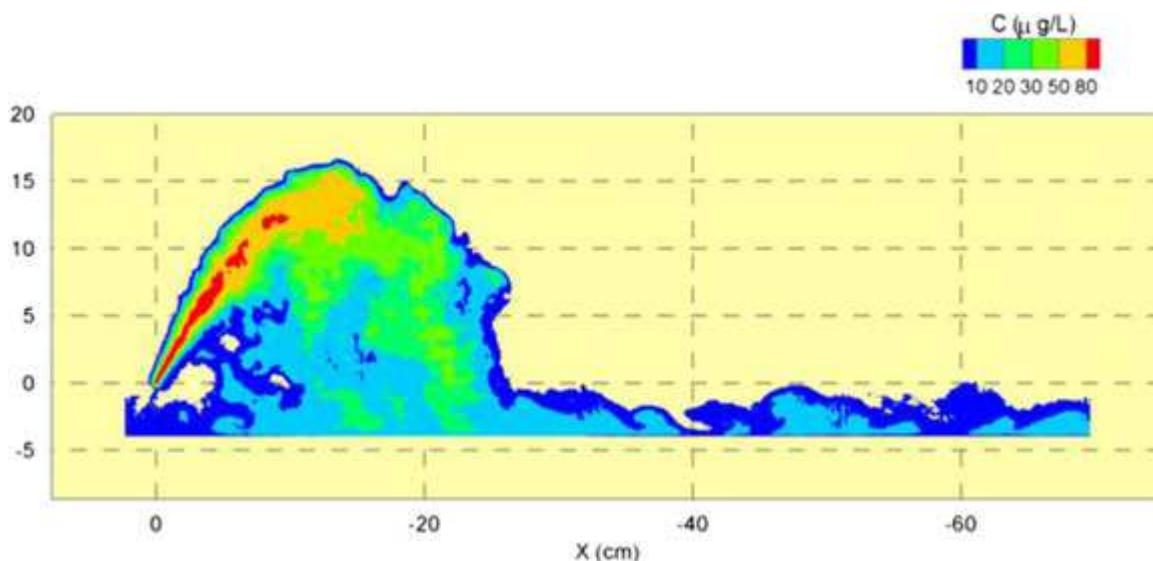
Fonte: Roberts *et al.* (2010).

Já no caso específico de efluentes hipersalinos, como o caso particular, sua densidade é superior à água marinha, provocando a queda do jato logo após alcançar uma altura terminal. Esta última é função da velocidade de ejeção e da inclinação vertical do difusor, razão pela qual estes normalmente tem inclinação entre 45 e 60°. Este comportamento é ilustrado na figura a seguir, onde o jato à medida que ascende carrega a água marinha do entorno, promovendo a diluição do traçador usado e, portanto, da salinidade do efluente. Alcançada a altura limite, o jato começa a decair, continuando o processo de arraste da água e diluição até tocar o solo marinho onde se espalha horizontalmente como uma corrente de densidade, a qual mantém o processo turbulento promovendo ainda mais diluição. Esta turbulência finda colapsando sob influência de sua própria estratificação de densidade, marcando então o fim do campo próximo. A diluição no final do campo próximo pode ser consideravelmente maior do que no ponto inicial de impacto do jato (Roberts, 2015).

Vale salientar que as representações desta figura se referem a descargas em ambiente estacionário, o qual é considerado como o caso menos favorável em termos de diluição, sendo uma condição normalmente usada em projetos. Na prática, o meio marinho raramente apresenta um comportamento estacionário, implicando, com raras exceções, no aumento das diluições devido às correntes marinhas.

Assim, intensa mistura que ocorre nas proximidades dos difusores se deve à turbulência gerada por ela própria, causada pela quantidade de movimento e pelo empuxo ou, mais especificamente, pela diferença de quantidade de movimento entre o jato e o escoamento do ambiente. Nesta região onde se processa a mistura inicial, conhecida como campo próximo ou zona de mistura inicial, a máxima diluição alcançada é denominada de diluição inicial, a qual é bastante influenciada pelas características do difusor (particularmente profundidade, comprimento, diâmetro individual das portas e espaçamento entre elas), velocidade do fluxo ejetado (que, além de outras variáveis, depende das características do difusor) e das condições marinhas locais.

Figura 2 – Gráfico de alterações na concentração nos eixos verticais e horizontais de um concentrado salino ejetado por um difusor.



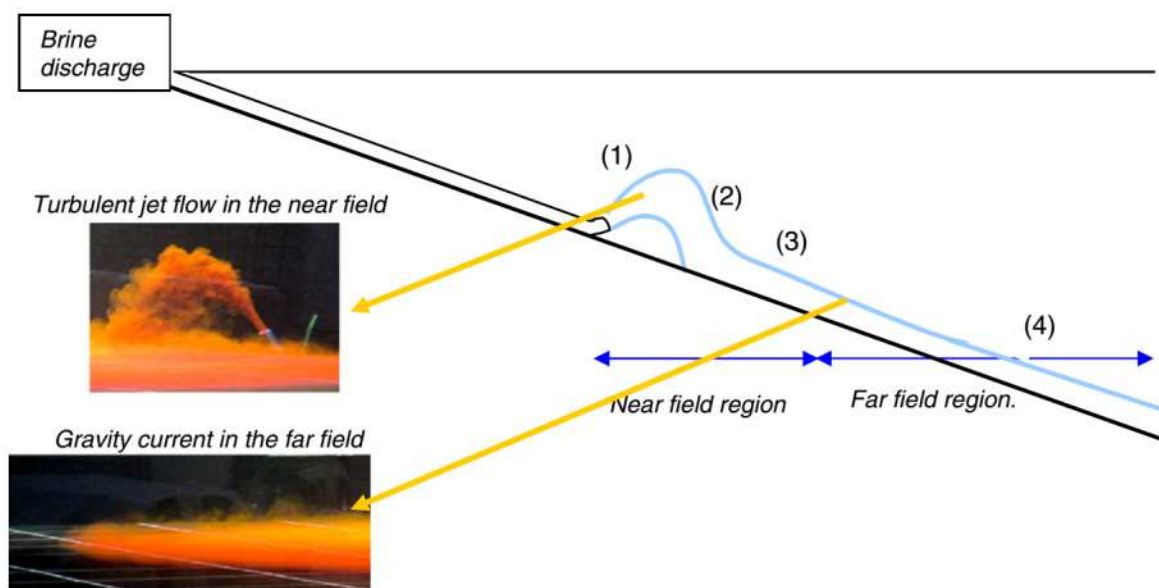
Fonte: Roberts (2015).

De acordo com Carvalho (2003), dentro do campo próximo a diluição aumenta rapidamente com a distância do difusor até ser dissipada a energia cinética gerada pelo empuxo e pela quantidade de movimento que os jatos possuíam. Devido à natureza turbulenta do escoamento, as flutuações na concentração instantânea do efluente, quando comparadas à concentração média, são altas próximas ao difusor e diminuem em direção ao final do campo próximo, onde a diluição ali observada é efetivamente a diluição inicial.

2.1.2. Campo distante

Após o processo de diluição inicial que ocorre no campo próximo, a pluma de dispersão estabelecida é advectada e difundida pelas correntes marinhas. A região onde tal difusão ocorre é denominada campo distante (Figura 3) que, ao contrário do campo próximo, apresenta uma velocidade de mistura bem menor. Enquanto no campo próximo as escalas de tempo de ocorrência dos processos de mistura são da ordem de minutos e com alcance de algumas dezenas de metros, no campo distante seus processos operam na escala de hora a dias e de dezenas de metros a quilômetros (Roberts, 2015).

Figura 3 – Esquema de comportamento do lançamento de um efluente denso submerso e inclinado, onde se observam as regiões de campo próximo e distante.



Fonte: Palomar et al, 2012.

Os processos de diluição e dispersão no campo distante são influenciados pela temperatura, salinidade, correntes e clima de ondas marinhas, sendo estes elementos variáveis sazonalmente pelo clima local e por eventos oceânicos globais (Inman and Jenkins 2004).

À medida que o campo de mistura se afasta do ponto de lançamento, devido às forças horizontais das correntes marinhas, ele se alarga sob efeito da difusividade turbulenta. Esta difusividade faz com que qualquer concentração de substâncias presentes nas águas marinhas tenda a ser difundida horizontal e verticalmente, proporcionando as características em geral homogêneas que tais águas apresentam localmente, embora possam variar de uma área para outra nos oceanos (GONÇALVES; SOUZA, 1997) ou quando sob influência de águas continentais. De uma forma geral, podemos dizer que na dispersão horizontal que prepondera no campo distante, a corrente local transporta a pluma do efluente para além dos limites do campo próximo e, durante o transporte, a turbulência do meio espalha o contaminante em torno do seu centro.

3. Região avaliada

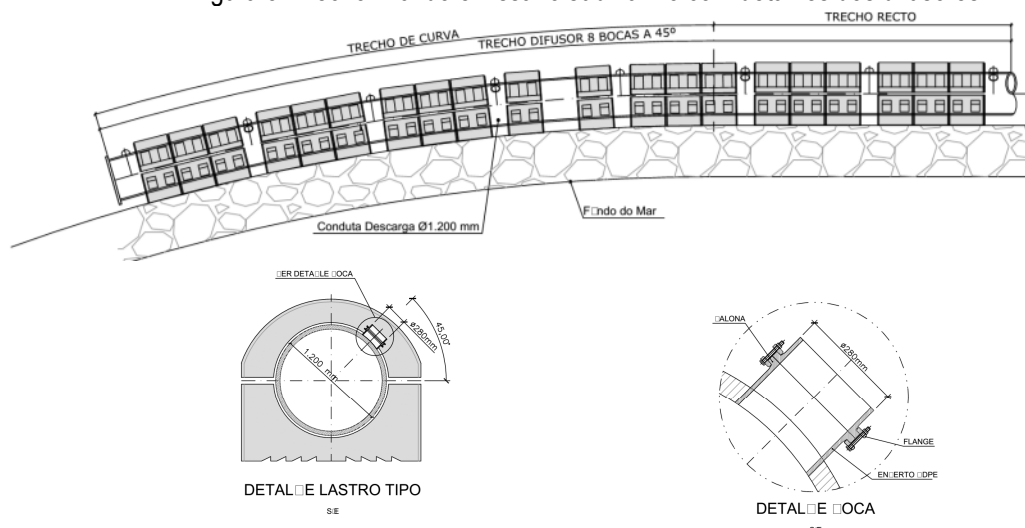
A região avaliada corresponde à área costeira de Fortaleza, abrangendo mais especificamente a região entre a foz do rio Cocó e o porto do Mucuripe. A Figura 4 mostra o local selecionado para instalação da planta de dessalinização e as possíveis áreas de locação das linhas de captação de água marinha e de descarte do concentrado salino via emissário submarino.

Figura 4. Região avaliada com indicação da locação da planta de dessalinização, do emissário submarino e da linha de captação de água marinha.



No mesmo material onde foram disponibilizadas as informações acima, Projeto Referencial, são indicadas as características da tubulação difusora, compreendida por um trecho de 25m com oito difusores de 280 mm de diâmetros e espaçados em cerca de 3m (Figura 5).

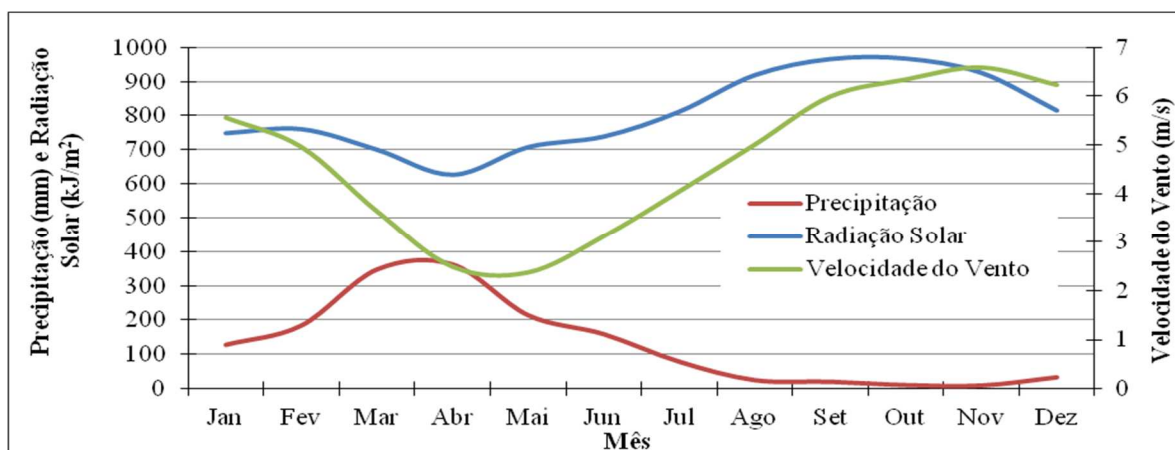
Figura 5. Trecho final do emissário submarino com detalhes dos difusores.



3.1. Sazonalidade da região

A cidade de Fortaleza possui dois períodos estacionais, sendo um chuvoso entre fevereiro e maio e outro seco (Figura 6). Como se observa nesta figura, há uma variação sazonal dos ventos oposta ao período chuvoso, com maiores intensidades nos meses secos.

Figura 6. Média mensal da precipitação (1974 a 2008), intensidade de vento (2008 a 2009) e radiação solar (2008 a 2009). (fonte: www.funceme.br).

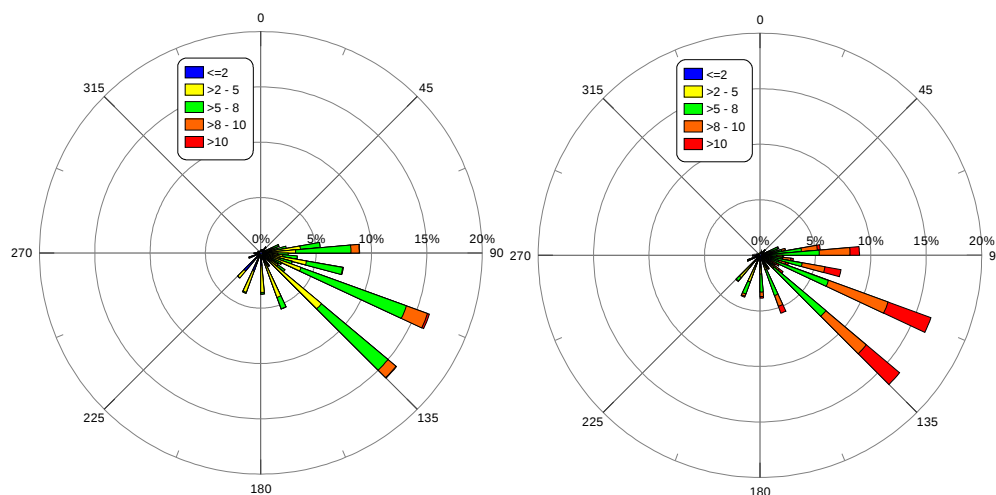


Os ventos transferem energia para as massas de água, influenciando o padrão de circulação e o clima das ondas, podendo inclusive alterar a morfologia de sistemas costeiros. A característica típica dos ventos da região nordeste é a presença de um forte ciclo estacional, definido por um período anual. São controlados pelo movimento da ZCIT, a qual se desloca de norte a sul com as mudanças das estações. A ZCIT é uma grande região onde confluem os ventos alísios de nordeste e sudeste, caracterizada por intensa nebulosidade e baixa pressão atmosférica e que, normalmente, migra de sua posição mais ao norte, no atlântico, até posições mais ao sul durante o verão austral. Os ventos alísios de sudeste são mais intensos quando a ZCIT está ao norte (agosto a outubro), diminuindo progressivamente com a migração da ZCIT para o Equador até alcançar os mínimos valores anuais durante os meses de março e abril, quando os ventos de sudeste são mais fracos (MAIA, 1998).



A Figura 7 ilustra a estatística de ventos observados entre novembro de 2007 e dezembro de 2011, apresentados por Pereira, 2012. Os ventos mais frequentes provieram de SE e SEE, estando associados a elas ventos moderados a fortes nas classes de 5-8, 8-10 e >10, este último no caso dos ventos de rajada.

Figura 7. Diagrama de ventos observados entre novembro de 2007 e dezembro de 2011. Diagrama a direita corresponde a ventos de rajada.



Para representar estes cenários foram selecionados os meses de abril e novembro como representativos de distintas condições locais. Em virtude da existência de dados pretéritos, foram adotados intensidades e direções de vento a cada 10 minutos para os meses de novembro de 2011 e abril de 2012.

Quanto às características sazonais das ondas da região, segundo Silva et al (2017) no período seco, as ondas predominantes que incidem na plataforma continental cearense são geradas pelos ventos alísios, apresentando direção mais frequente de leste. Já no período chuvoso, predominam ondas geradas em função de eventos meteorológicos ocorridos no hemisfério norte e apresentam direção mais frequente de quadrante nordeste. No mês novembro as ondas mais frequentes, ou reinantes, são ondas de leste, que apresentam um percentual de ocorrência de 69,37 % e altura média de 1,80 m (Tabela 3). Essas ondas são geradas pelos ventos alísios no oceano atlântico sul. No mês de abril as ondas reinantes são vindas de leste-nordeste, com um percentual de ocorrência de 39,74 % e altura média de 1,73 m. Pouco mais de 50 % das ondas do mês de abril são vindas ou de leste-nordeste ou de nordeste. Essas ondas, que normalmente são geradas no Oceano Atlântico Norte e se propagam até a costa norte do Brasil, são as mais frequentes no cenário do mês de abril, época pouco depois do final do inverno no hemisfério norte, quando ainda ocorrem tempestades mais severas naquele hemisfério.

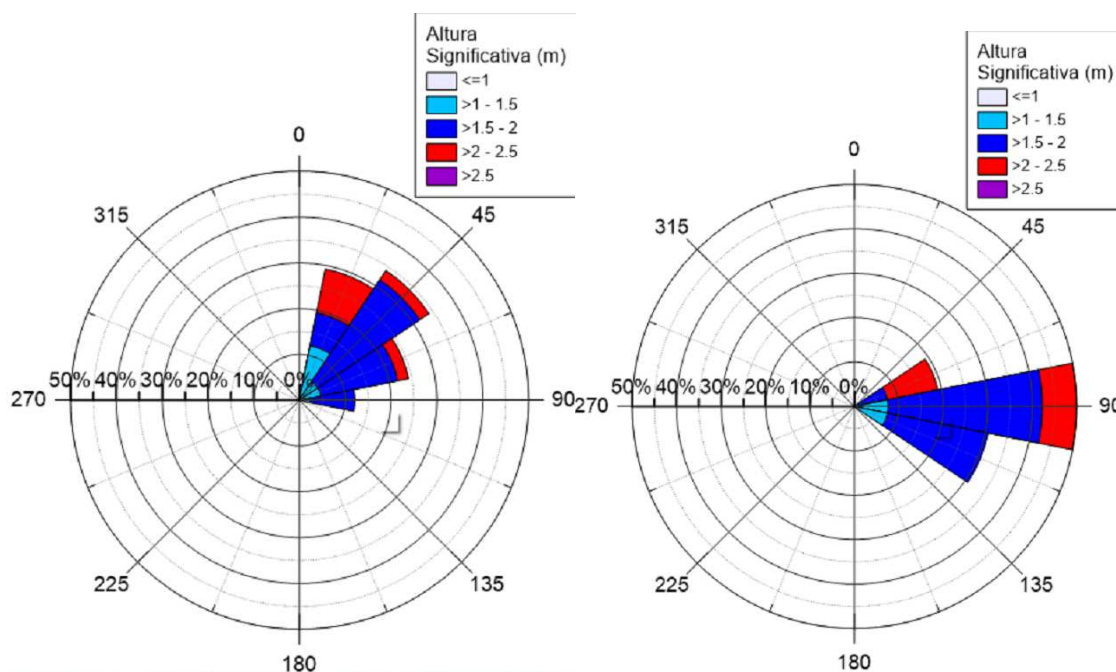


Tabela 3 Caracterização do clima de ondas utilizado pelo modelo para os meses de Abril/2012 e Novembro/2011.

Direção	Abril		Novembro		Direção
	H _{média} (m)	f (%)	H _{média} (m)	f (%)	
N	-	0	-	0	N
NNE	-	0	-	0	NNE
NE	1,63	10,33	1,96	1,85	NE
ENE	1,73	39,74	1,80	13,72	ENE
E	1,64	34,50	1,80	69,37	E
ESE	1,53	15,43	1,73	15,07	ESE
Total	-	100,00	-	100,00	Total

Fonte: Silva et al, 2017.

Figura 8. Direção e frequência de ocorrência de ondas usadas no modelo para Abril/2012 (esquerda) e Novembro de 2011 (direita).



4. Modelagem hidrodinâmica e de transporte

Nesta fase foi considerado um modelo hidrodinâmico, acoplado a um modelo de propagação de onda, previamente desenvolvido para a região e calibrado a partir de medições de corrente em sua porção central. A estes modelos foram agregados modelos de transporte lagrangeano a fim de simular não apenas os processos de diluição do concentrado salino tanto nos campos próximo quanto distante.

4.1. Ferramenta de modelagem utilizada

Para avaliar os efeitos do lançamento do concentrado salino da planta de dessalinização foi necessário, em primeiro lugar, reproduzir as condições hidrodinâmicas que ocorrem na região para, posteriormente, simular o comportamento da pluma salina. Para estes fins, utilizou-se os modelos numéricos hidrodinâmico, de propagação de ondas e de transporte existentes no Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental (SisBaHiA).

Como modelo de diluição de campo próximo, foi utilizado o software gratuito Visual Plumes. Os resultados de diluição inicial foram então considerados na construção de fontes de emissão do modelo de transporte lagrangeano do SisBaHiA.

4.1.1. SisBaHiA

O Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental (SisBaHiA) é um sistema profissional de modelos computacionais registrado pela Fundação COPPETEC da Universidade Federal do Rio de Janeiro, cuja licença é gratuita para uso não-comercial. O software foi desenvolvido na COPPE/UFRJ pelo Programa de Engenharia Oceânica (PENO) para simulação hidrodinâmica, de transporte euleriano ou lagrangeano de soluto e sedimentos em estuários e águas costeiras, qualidade de água, geração e propagação de ondas, além de análise e previsão de marés. Ao longo dos últimos 25 anos, ele tem sido aprimorado, calibrado e validado em diversos estudos de campo. Maiores informações sobre a ferramenta podem se obtidas no endereço www.sisbahia.coppe.ufrj.br.

4.1.2. Visual Plumes

O Visual Plumes é um programa desenvolvido e disponibilizado gratuitamente pela USEPA, consistindo de uma série de subsistemas para análise, previsão e desenho de descargas aquosas em cursos d'água, com ênfase na geometria e nas características de diluição da zona inicial de mistura, aplicando-se em ambientes estratificados ou não e a poluentes conservativos ou não com decaimento de primeira ordem. Os modelos adotados de diluição inicial pelo Visual Plumes são focados principalmente em descargas submersas, incluindo os modelos DKHW, NRFIELD, UM3 e, adicionalmente, o modelo PDS para descargas superficiais, um algoritmo de Brooks para previsão de diluição e largura do campo distante e um modelo estocástico para o campo distante (FRICK, 2004). Porém dentre estes apenas o UM3 é capaz de simular plumas de efluentes com flutuabilidade negativa (*negatively buoyant*)

UM3 é um modelo Lagrangeano que utiliza a hipótese sobre o carreamento da área projetada (Project-Area-Entrainment - PAE), a qual avalia o carreamento forçado, isto é, a taxa de

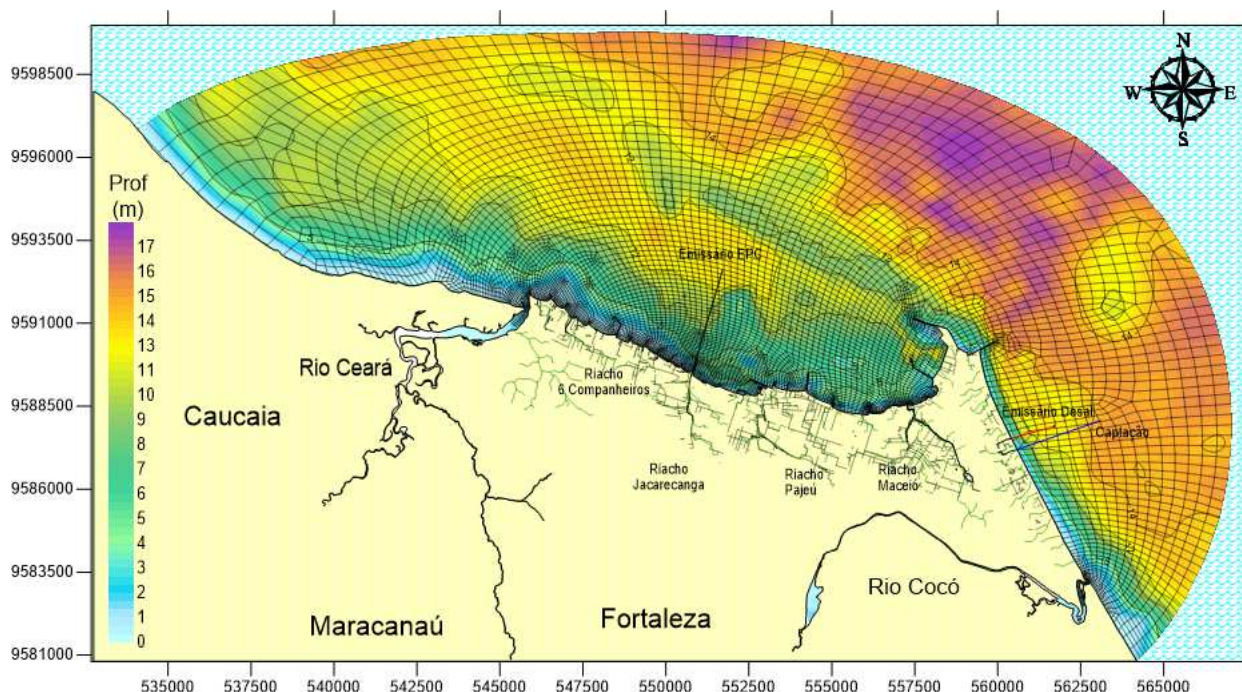


incorporação de massa do meio à pluma por ação da corrente. Neste processo, a pluma incorpora as substâncias do meio ambiente para dentro de seu volume. Pode-se admitir como sendo um processo em que o fluido circundante passa para dentro da pluma, por meio de sua superfície externa. (FRICK, 2004).

4.2. Domínio de modelagem

As simulações foram executadas para o domínio de modelagem mostrado na Figura 9, a qual ilustra a malha e batimetria usadas. Os elementos localizados próximos à fronteira aberta tiveram dimensões de até 600m de lado, enquanto aqueles próximos à costa (fronteira de terra) tiveram dimensões de no mínimo 20m. Dados ambientais locais de vento e maré foram usados de forma a reproduzir os efeitos provocados por estas variáveis sobre o transporte do concentrado salino.

Figura 9 - Domínio de modelagem, incluindo malha e batimetria, além da localização do emissário de concentrado e da captação de água marinha.



4.3. Modelagem hidrodinâmica

A modelagem hidrodinâmica foi realizada em trabalho passado e composta de duas etapas: calibração dos modelos hidrodinâmicos pré-existent, utilizando-se medições de correntes próximas aos difusores do emissário submarino da EPC para os meses de abril de 2012 e novembro de 2011; acoplamento destes modelos aos modelos de propagação de ondas, de modo a considerar os efeitos criados por ondas que se propagam de águas profundas até a linha de costa.

4.3.1. Calibração do modelo hidrodinâmico

Uma vez que no momento inexistem medições de correntes da área alvo, qual seja a região onde será instalado o emissário submarino da planta de dessalinização, partiu-se de uma calibração já

realizada para um outro local, porém dentro do domínio de modelagem aqui usado, para fins de seleção das características de vento que melhor representem o seu efeito sobre as correntes locais. Para uma avaliação mais realística, recomenda-se que sejam levantados dados de correntes da área próxima para calibração e validação do modelo.

Respeitando-se as devidas ressalvas acima, a configuração que melhor representou os dados medidos consistiu no uso de ventos com velocidade de rajada para o mês de abril, enquanto para o mês de novembro foram os ventos com velocidades médias.

Figura 10: Magnitudes de corrente para o mês de Abril de 2012 próximo à saída do emissário submarino.

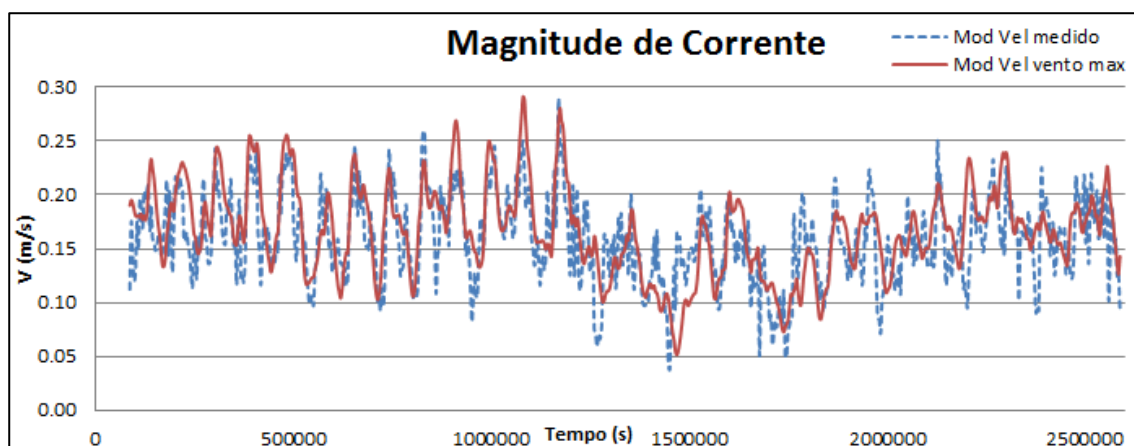
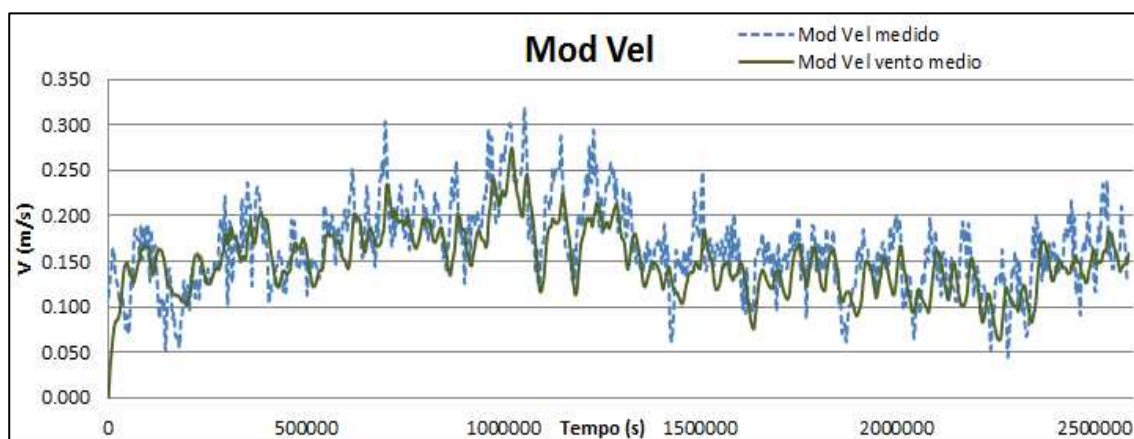


Figura 11: Magnitudes de corrente para o mês de Novembro de 2011 próximo à saída do emissário submarino da EPC.



4.3.2. Acoplamento do modelo de propagação de ondas

Para esta etapa acoplou-se modelos de propagação de ondas (MPO's) aos modelos hidrodinâmicos previamente calibrados. Esta modelagem considerou ondas propagadas desde águas profundas até a região de interesse. Utilizou-se uma série temporal de ondas gerada em águas profundas, característica de meses de abril e novembro de 2008. O objetivo desta simulação é representar o padrão geral de correntes próximo à linha de costa para meses genéricos de abril e novembro sob influência destas ondas, uma vez que o comportamento das correntes litorâneas pode ser bastante sensível à incidência das ondas.

As correntes litorâneas na Praia do Futuro predominam para Norte na maior parte do tempo. Isso ocorre em função da ocorrência de ondas vindas de Leste e Leste-Sudeste, que são mais frequentes ao longo do ano. Este padrão predomina entre os meses de maio a dezembro. Ondas vindas de Norte - Nordeste, Nordeste e Leste-Nordeste são aquelas que costumam gerar correntes litorâneas



para Sul na Praia do Futuro. Estas ondas, que são geradas no Atlântico Norte e propagadas até a costa norte do Brasil, são mais frequentes geralmente entre janeiro e abril, quando é inverno e ocorrem as tempestades mais severas no hemisfério norte.

A direção das correntes litorâneas tende a acompanhar o traçado da costa, sendo intensificadas ou atenuadas a depender da direção das ondas incidentes. Na modelagem do mês abril, as correntes litorâneas na Praia do Futuro tem sentido ora para sudeste, ora para noroeste, variando em função das ondas incidentes em cada instante. As correntes ocorrem com maior frequência para sudeste. Já na modelagem feita para o mês de Novembro, as correntes nesta praia tem sentido para noroeste durante quase todo o tempo. Nos dois modelos as correntes ao largo da praia tem sentido para noroeste durante todo o tempo. As Figuras Figura 12 e Figura 13 ilustram as situações descritas em determinados instantes dos respectivos meses.

Já a Figura 14 ilustra o comportamento das direções e intensidades das correntes atuantes nas proximidades do emissário da planta de dessalinização nos distintos meses.

.Figura 12: Padrão de correntes em abril, em um instante que incidem ondas vindas de norte - nordeste.

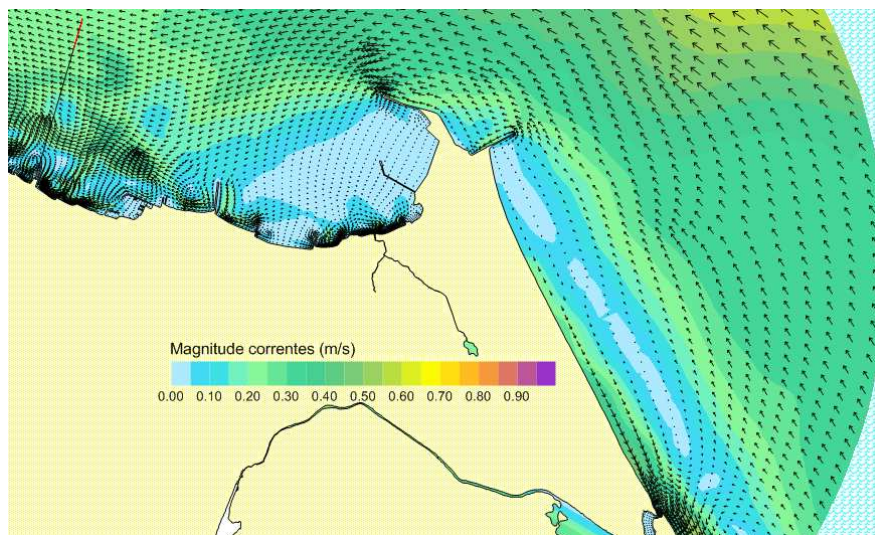


Figura 13: Padrão de correntes em novembro, em um instante em que incidem ondas vindas de leste.

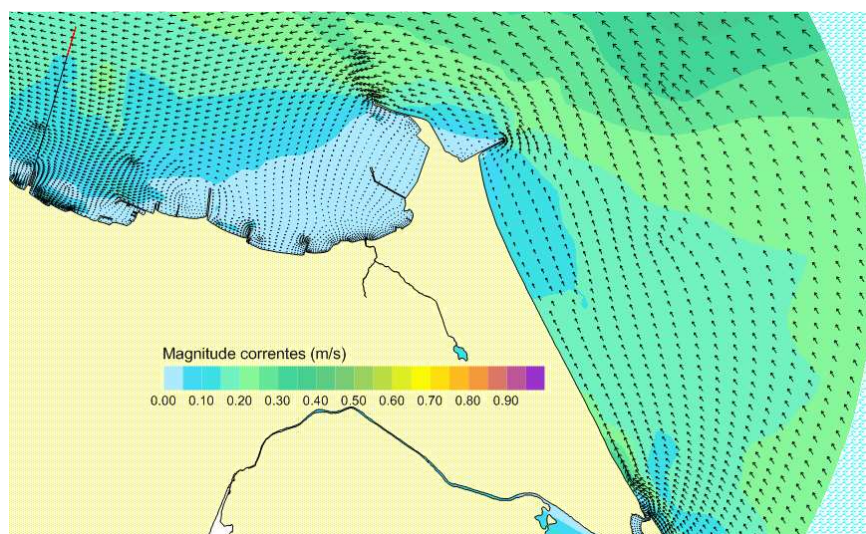
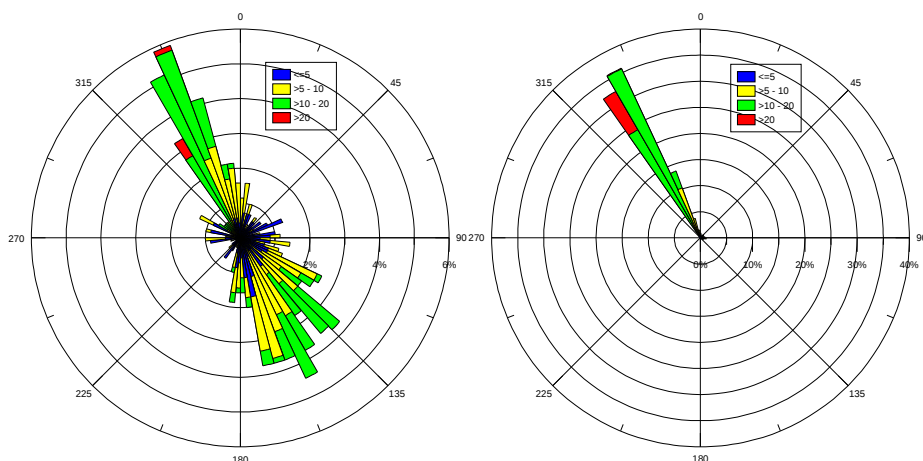


Figura 14: Comportamento das correntes marinhas nas proximidades do emissário da planta de dessalinização para os meses de Abril/2012 (esquerda) e Novembro de 2011 (direita).



Em todo o trecho entre o Porto de Mucuripe e a foz do rio Ceará, a circulação próximo à costa se intensifica em instantes em que ocorrem ondas vindas de Norte - Nordeste, Nordeste e Leste-Nordeste. Nestas situações, observa-se a formação de vórtices em toda essa região. Já para ondas vindas de Leste e Leste-Sudeste, há menor formação de vórtices e correntes menos intensas que na situação anterior. Isto ocorre por conta dos molhes do Porto de Mucuripe, que protegem a região destas ondas. As Figuras Figura 15 a Figura 18 ilustram as situações descritas.

Figura 15: Padrão de correntes na região entre o Porto de Mucuripe e a foz do rio Ceará, em um instante em que incidem ondas vindas de nordeste.

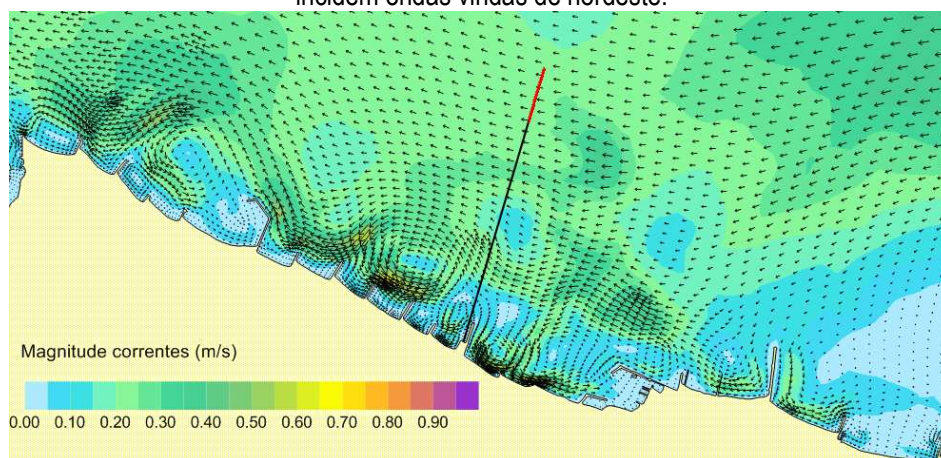


Figura 16: Padrão de correntes na região entre o Porto de Mucuripe e a foz do rio Ceará, em um instante em que incidem ondas vindas de leste.

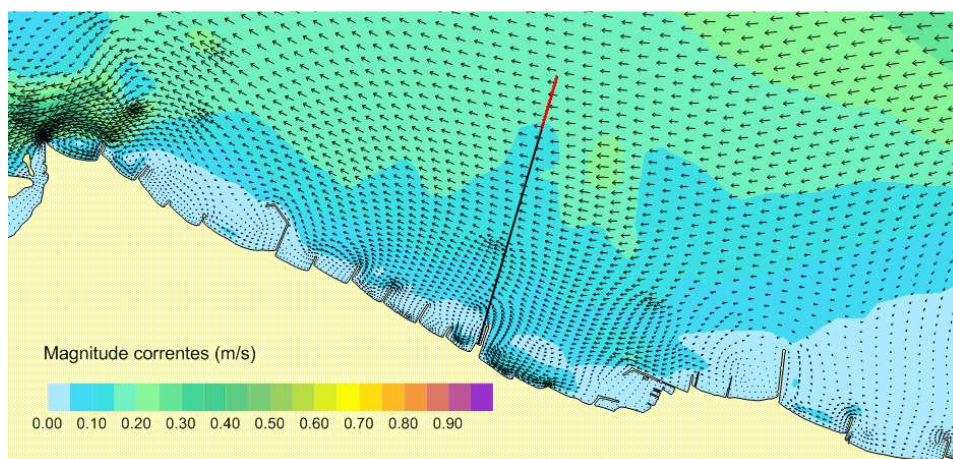


Figura 17: Padrão de correntes na região da foz do rio Ceará, em um instante em que incidem ondas vindas de nordeste.

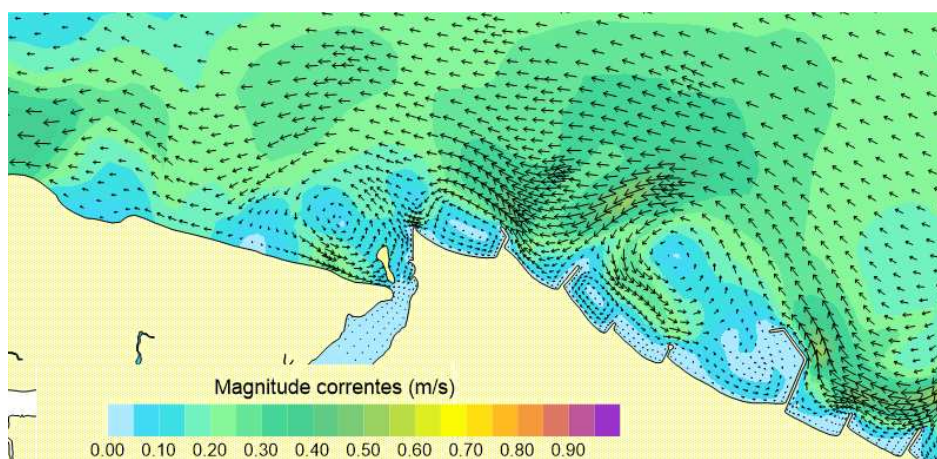
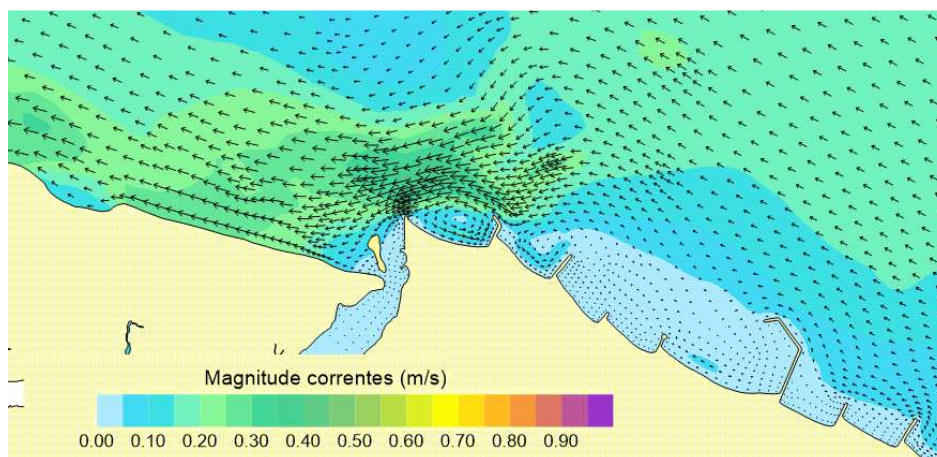


Figura 18: Padrão de correntes na região da foz do rio Ceará, em um instante em que incidem ondas vindas de leste.



4.4. Modelagem do transporte de concentrado salino

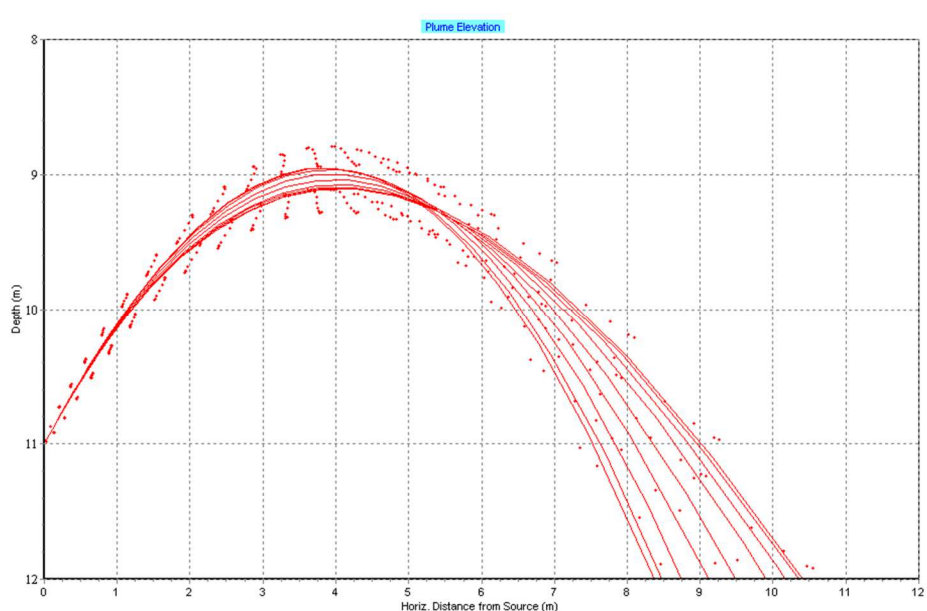
Nos itens a seguir são apresentadas e discutidas as diluições e concentrações estimadas pelos modelos e os possíveis impactos decorrentes dos incrementos salinos encontrados nas águas do entorno do emissário submarino da planta de dessalinização, em decorrência do lançamento do concentrado salino. A extensão da pluma de concentração salina é fortemente influenciada pela quantidade, disposição e geometria dos difusores utilizados, bem como pela diferença de densidade do concentrado e pelas correntes atuantes, as quais foram produzidas pelos modelos hidrodinâmicos previamente apresentados.

4.4.1. Campo Próximo

Foi utilizado o modelo UM3 do Visual Plumes para avaliação das diluições iniciais e extensões do campo próximo, considerando a cada intervalo de uma hora as intensidades e direções das correntes marinhas modeladas no local previsto para implantação do emissário, nas condições dos meses de abril e novembro.

As gráficos a seguiu apresentam os resultados das simulações de campo próximo para as condições marinhas do mês de novembro anteriormente indicadas. Conforme se observa na Figura 19, as alturas máximas alcançadas pelos jatos emitidos pelos difusores, instalados a 1m do solo marinho e à profundidade de 12m, foram entre 1,5 e 2,5m do ponto de lançamento. Quanto ao alcance horizontal, este esteve entre 8 e 11m da origem, sendo diretamente proporcional às correntes atuantes sobre os difusores.

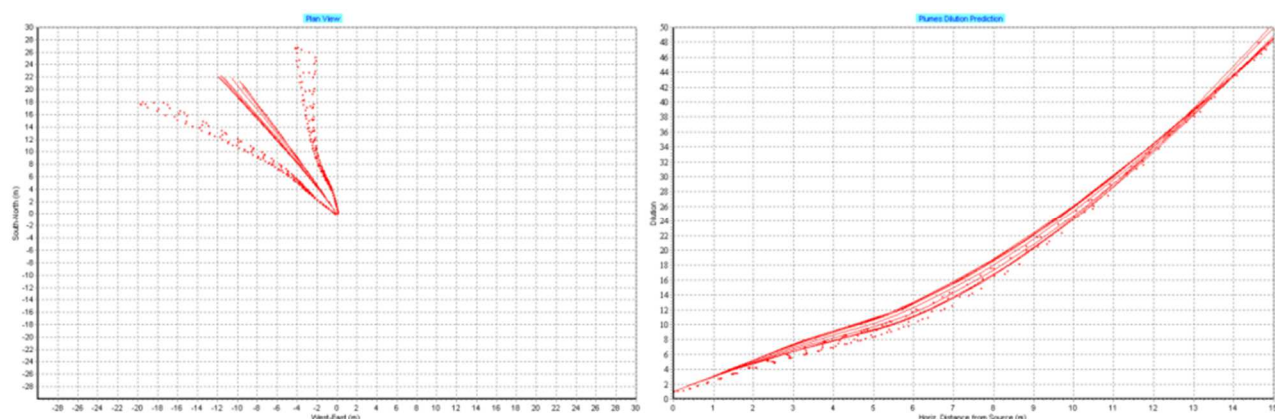
Figura 19: Comportamento da pluma salina no campo próximo para as condições de novembro, com indicação de seu alcance vertical e horizontal.



Já em relação à diluição inicial, esta é sempre superior a 20 há apenas 10m de distância do ponto de lançamento (Figura 20). Considerando uma concentração do efluente salino de 67,27 psu (30,27 acima da salinidade local), neste ponto do campo próximo a concentração excedente ao meio estaria próxima a apenas 1,5 psu, já obedecendo uma boa parte das diretrizes apresentadas na Tabela 2.



Figura 20: Diluições encontradas em função da distância horizontal e direções da pluma salina para as condições marinhas do mês de novembro.



A variação da diluição no ponto onde os jatos tocam o solo no mês de novembro é apresentado na Figura 21, variando entre 13,6 e 38, onde se observa a relação direta entre esta e as correntes atuantes sobre os difusores, enquanto estimativas das concentrações salinas no centro dos jatos no campo próximo podem ser vistas na Figura 22.

Figura 21: Diluições esperadas dos efluentes salinos ao tocar o solo marinho, nas condições do mês de novembro.

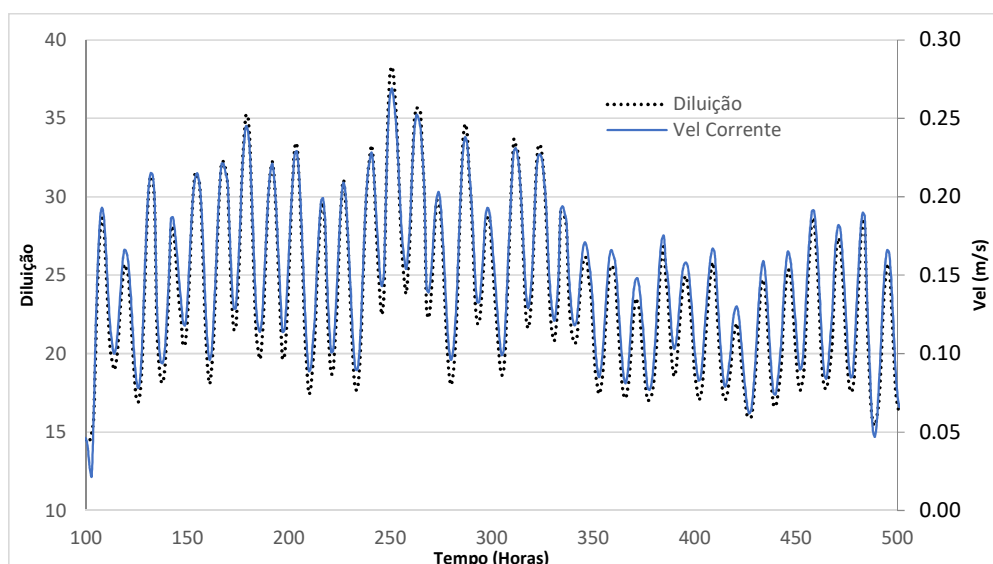
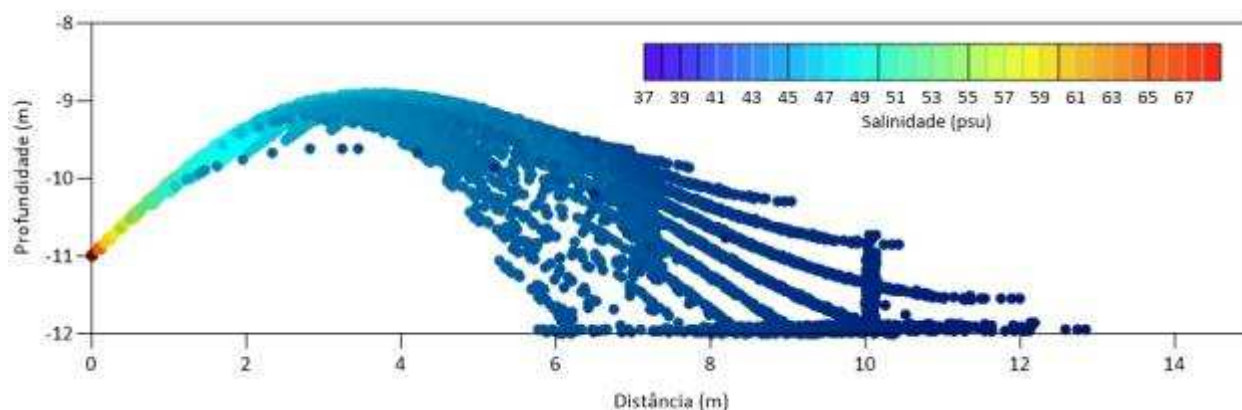


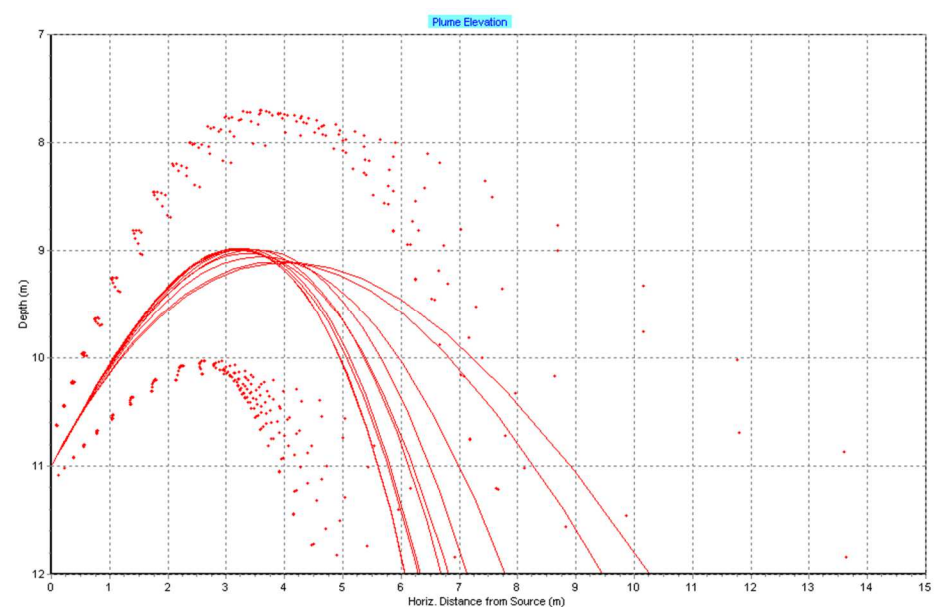
Figura 22: Estimativa das concentrações salinas ao longo da linha central dos jatos efluentes lançados pelos difusores do emissário submarino, nas condições marinhas do mês de novembro.



Passa-se agora a apresentar os resultados das simulações de campo próximo para as condições marinhas do mês de abril anteriormente indicadas. Conforme se observa na Figura 23, os jatos tem

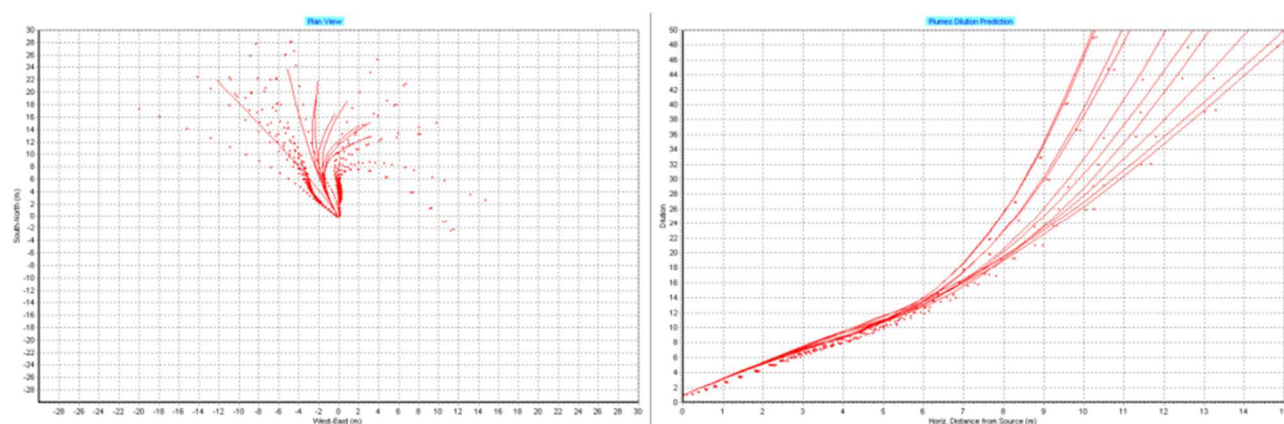
um espalhamento vertical bem mais que o previsto em novembro em função da maior variabilidade das velocidades das correntes deste mês. As alturas máximas alcançadas pelos jatos emitidos pelos difusores, instalados a 1m do solo marinho e à profundidade de 12m, foram entre 1,0 e 3,5m do ponto de lançamento. Quanto ao alcance horizontal, este esteve entre 4 e 15m da origem, sendo diretamente proporcional às correntes atuantes sobre os difusores.

Figura 23: Comportamento da pluma salina no campo próximo para as condições de abril, com indicação de seu alcance vertical e horizontal.



Já em relação à diluição inicial, esta continua sempre superior a 20 há apenas 10m de distância do ponto de lançamento (Figura 24). Considerando uma concentração do efluente salino de 67,27 psu (30,27 acima da salinidade local), neste ponto do campo próximo a concentração excedente ao meio estaria próxima a apenas 1,5 psu, já obedecendo uma boa parte das diretrizes apresentadas na Tabela 2.

Figura 24: Diluições encontradas em função da distância horizontal e direções da pluma salina para as condições marinhas do mês de abril.



A variação da diluição no ponto onde os jatos tocam o solo no mês de abril é apresentado na Figura 25, variando entre 12,6 e 21, menores portanto que no mês anterior em função das correntes serem menos intensas e, em alguns casos, com direção menos favoráveis à diluição. Diferentemente do mês de novembro, em função da mudança de direção das correntes em abril, a relação entre diluição

e as correntes atuantes sobre os difusores nem sempre é direta. Já as estimativas das concentrações salinas no centro dos jatos no campo próximo podem ser vistas na Figura 26.

Figura 25: Diluições esperadas dos efluentes salinos ao tocar o solo marinho, nas condições do mês de abril.

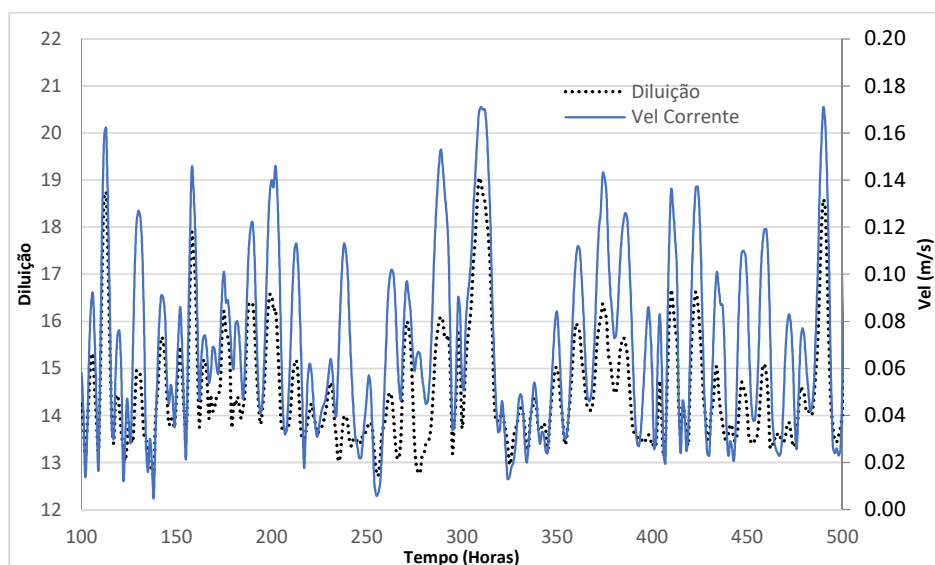
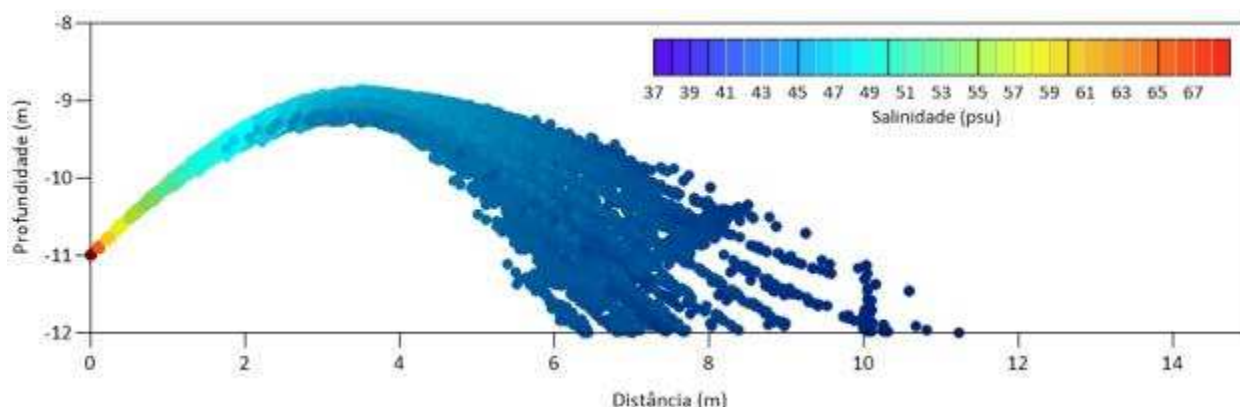


Figura 26: Estimativa das concentrações salinas ao longo da linha central dos jatos efluentes lançados pelos difusores do emissário submarino, nas condições marinhas do mês de abril.



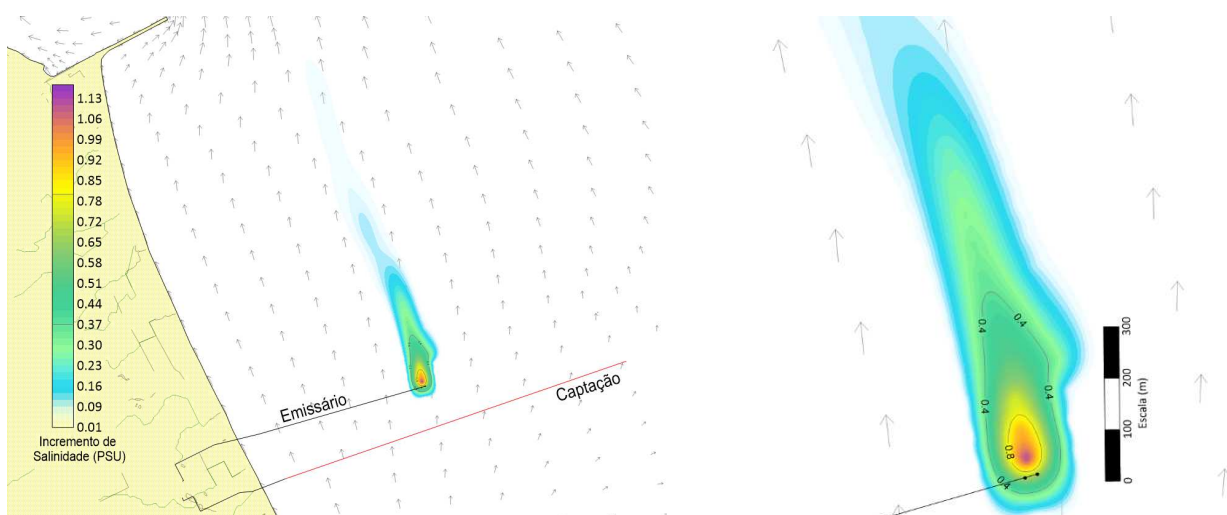
O valores de concentração excedente alcançadas no campo próximo mencionados acima tanto para o mês de abril quanto para o mês de novembro, foram então inserido como fonte no modelo de transporte do SisBaHia para avaliar sua distribuição no entorno do emissário submarino. Adotou-se por segurança porém uma situação bastante conservadora, fixando-se a diluição inicial em apenas 10 vezes, valor seguramente alcançado pelo conjunto de difusores previstos. Com isto a concentração excedente na região fonte foi fixado então para 3,03 psu para fins de alimentação do modelo de transporte lagrangeano do SisBaHia, cujos resultados são apresentados a seguir.

4.4.2. Campo Distante

As Figuras 23 e 30 mostram os incrementos de salinidade mais relevantes nas águas do entorno do emissário, já considerando as diluições iniciais produzidas no campo próximo e a dispersão da pluma inicialmente formada pelas correntes atuantes.

Na Figura 27 é apresentado o resultado de um instante de simulação para o mês de novembro sobre influência de ondas de Leste, tal qual apresentado na Figura 8. Direção e frequência de ocorrência de ondas usadas no modelo para Abril/2012 (esquerda) e Novembro de 2011 (direita). Figura 8, provocando um espalhamento do concentrado conforme direções indicadas nos vetores deste mapa. Nesta situação, a condição mais restritiva apresentada na Tabela 1 (0,80 psu) é alcançada em uma extensão inferior 100 m, bem inferior à distância de conformidade indicado naquela tabela (1.000m).

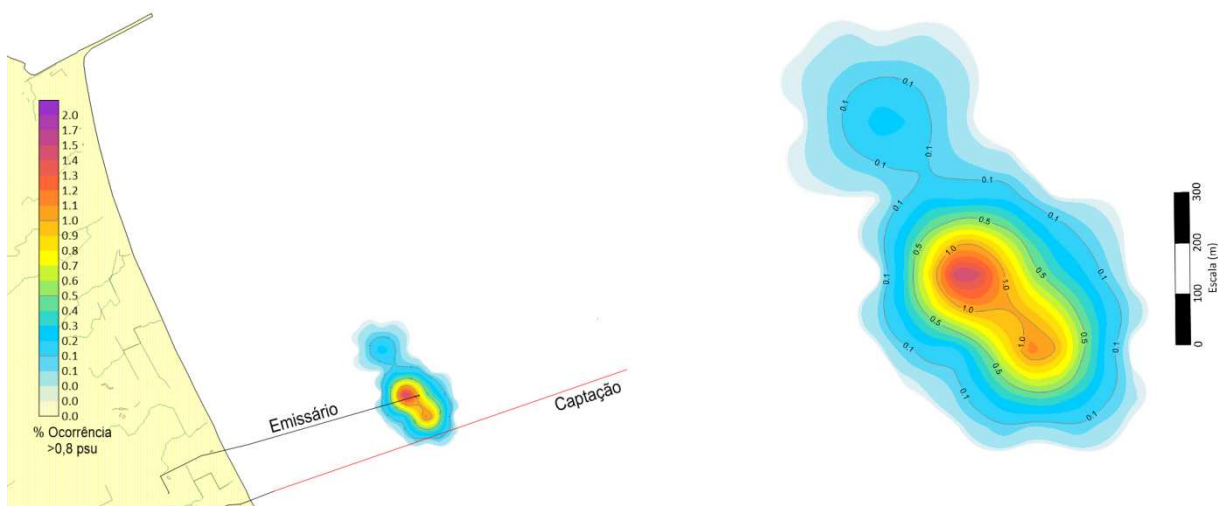
Figura 27 – Incremento de salinidade (psu) em função do descarte do concentrado salino pelo emissário, em um instante do mês de novembro.



Já a Figura 28 integra os resultados horários produzidos para todo o mês de referência (Novembro/2011), comparando-os com o limite anteriormente indicado (0,8 psu) e apresentando os percentuais de ocorrência de ultrapassagem deste valor. Com isto se consegue perceber, por exemplo, que ao longo daquele mês 0,5% do total de resultados que foram maiores que 0,8 psu, estiveram contidos em uma área de cerca de 300m.

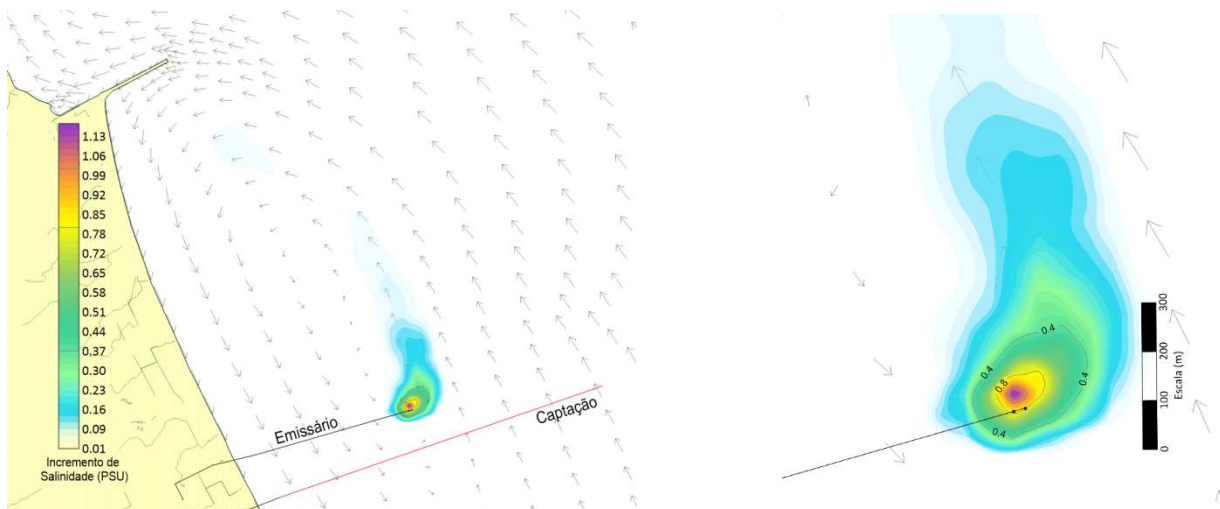
Para o caso dos limites menos restritivos indicados nas diretrizes mencionadas, quais sejam aqueles entre 1,85 e 4 psu, não foi identificado risco de ultrapassagem de nenhum destes para o mês de novembro, enquanto para o limite de 1,2 psu foram encontrados apenas dois eventos com uma extensão de menos de 30m.

Figura 28: Percentual de ultrapassagem do incremento mais restritivo indicado na Tabela 1 (0,8 psu) durante o mês de Novembro.



Na Figura 25 é apresentado o resultado de um instante de simulação para o mês de abril sobre influência de ondas de Este-Nordeste, tal qual apresentado na Figura 8. Direção e frequência de ocorrência de ondas usadas no modelo para Abril/2012 (esquerda) e Novembro de 2011 (direita). Figura 8, provocando um espalhamento do concentrado conforme direções indicadas nos vetores deste mapa. Nesta situação, a condição mais restritiva apresentada na Tabela 1 (0,80 psu) é alcançada em uma extensão novamente inferior 100 m, bem inferior à distância de conformidade indicado naquela tabela (1.000m).

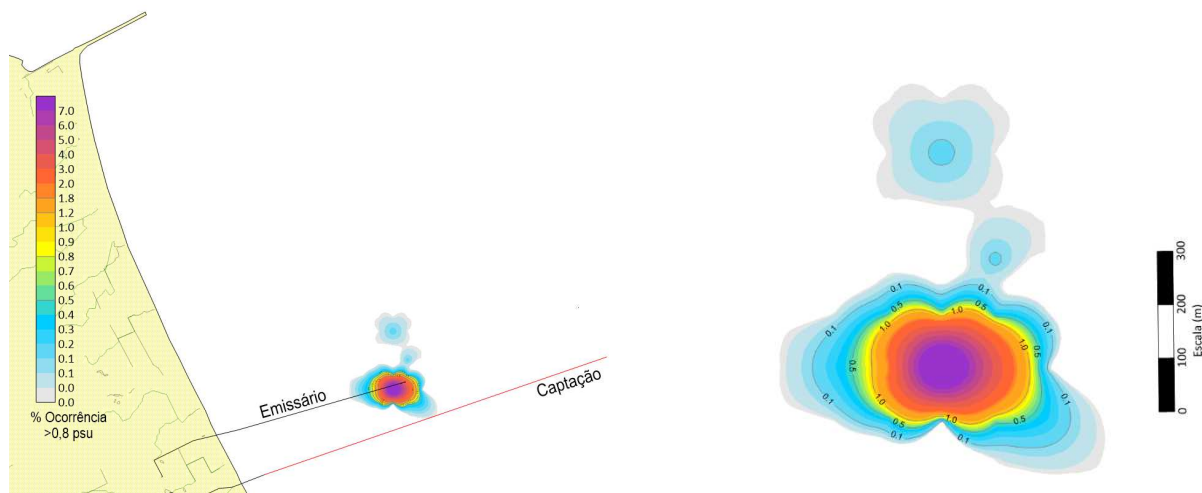
Figura 29 – Incremento de salinidade (psu) em função do descarte do concentrado salino pelo emissário, em um instante do mês de novembro.



Já a Figura 30 integra os resultados horários produzidos para todo o mês de referência (Abril/2012), comparando-os com o limite anteriormente indicado (0,8 psu) e apresentando os percentuais de ocorrência de ultrapassagem deste valor. Com isto se consegue perceber, por exemplo, que ao longo daquele mês 0,5% do total de resultados que foram maiores que 0,8 psu, estiveram contidos em uma área de cerca de 300m ou menos, a exemplo do mês de novembro. Comparando-se com o mês anterior, houve uma maior ocorrência de ultrapassagem deste limite dentro desta mesma região.

Para o caso dos limites menos restritivos indicados nas diretrizes mencionadas, quais sejam aqueles entre 1,85 e 4 psu, novamente não foi identificado risco de ultrapassagem de nenhum destes para o mês de abril, enquanto para o limite de 1,2 psu foi encontrado um percentual de ultrapassagem de 0,5% restrito a uma área de 150m.

Figura 30: Percentual de ultrapassagem do incremento mais restritivo indicado na Tabela 1 (0,8 psu) durante o mês de Abril.



Tanto em novembro quanto em abril, não se constatou risco da pluma dos efluentes salinos tocarem as praias, além disto, as áreas com concentrações acima dos valores atenderam às diretrizes encontradas.

5. Conclusões

A modelagem preliminar da dispersão do concentrado salino do emissário submarino da futura planta de dessalinização de Fortaleza indicou que a área afetada pela pluma salina é bastante reduzida, atendendo a mais restritiva das diretrizes internacionais levantadas pela *California Water Resources Control Board*, correspondendo a praticada pela agência de Proteção Ambiental da Western Australia, aumentando em apenas 0,8 psu a salinidade local em uma área de até 300m do entorno do ponto de lançamento.

Apesar destes resultados, recomenda-se que para a fase de elaboração de EIA/RIMA sejam empregados modelos hidrodinâmicos que considerem o gradiente de velocidade na coluna d'água, uma vez que, por limitação de tempo no presente estudo foi utilizado um modelo hidrodinâmico bidimensional previamente existente. Além disto, é necessário que tais modelos sejam calibrados com medições de correntes realizadas o mais próximo possível do local de descarte, posto que, por ausência de medições na região da Praia do Futuro, o modelo aqui usado foi previamente calibrado com dados de correntes do entorno do emissário submarino de efluentes sanitários de Fortaleza.

Contudo, para uma fase preliminar de análise, onde premissas conservadoras foram adotadas no tocante subestimação das diluições iniciais, os resultados se mostram consistentes com o relatado na literatura quanto ao reduzido impacto causado pelo descarte deste tipo de concentrado.



6. Referências Bibliográficas

CARVALHO, J. L. B. Modelagem e análise do lançamento de efluentes através de emissários submarinos, 2003. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

FRICK, W. E. Visual Plumes mixing zone modeling software. Environmental Modelling & Software, v. 19, n. 7-8, p. 645–654, 2004. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364815203001890>>

GONÇALVES, F. B.; SOUZA, A. DE P. Disposição oceânica de esgotos sanitários: História, teoria e prática. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES), 1997.

IH Cantabria (2011). Desarrollo e implementación de una metodología para la reducción del impacto ambiental de los vertidos de salmuera procedentes de las plantas desaladoras. Disponível em: <<http://www.medvsa.es/guia/Documentacion/GuiaMetodologica.pdf>>

Inman, D.L. and S.A. Jenkins. 2004. Climate patterns in the coastal zone. pp. 301-305 in: M. Schwartz (ed.), Encyclopedia of Coastal Science. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, Netherlands.

Jenkins, S., J. Paduan, P. J. W. Roberts, D. Schlenk, and J. Weis. 2012. Management of brine discharges to coastal waters: Recommendations of a science advisory panel. Technical Rep. No. 694. Costa Mesa, CA: State Water Resources Control Board

MAIA, L. P. Procesos costeros y balance sedimentario a lo largo de Fortaleza (NEBrasil): Implicaciones para una gestión adecuada de la zona litoral, 1998. Universitat de Barcelona.

ORTIZ, J. P.; ARASAKI, E.; MARCELLINO, E. B. Visão geral dos emissários no litoral paulista. In: C. C. Lamparelli; J. P. Ortiz (Eds.); Emissários submarinos: projeto, avaliação de impacto ambiental e monitoramento. p.25–42, 2006. São Paulo: CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Disponível em: <www.cetesb.sp.gov.br>.

Palomar, P., Lara, J.L., Losada, I.J., Rodrigo, M., Álvarez, A. Nearfield brine discharge modelling part 1: Analysis of commercial tools. Desalination, 290 (2012) 14–27.

Roberts, P. J. W. (2015). Near Field Flow Dynamics of Concentrate Discharges and Diffuser Design. Environmental Science and Engineering, 369–396. doi:10.1007/978-3-319-13203-7_17

SILVA, R. A. G., PEREIRA, S. P., ROSMAN, P. C. C. (2017). Modelagem Numérica da Circulação Costeira e das Correntes Litorâneas na Costa de Fortaleza – Ce. XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Florianópolis, SC. Associação Brasileira de Recursos Hídricos.