

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE TRANSPORTE DE ESCALAR: ANÁLISE DE LOCAIS PARA IMPLANTAÇÃO DE EMISSÁRIO NA REGIÃO DE FLORIANÓPOLIS

Vinícios Prestes Morigi

Orientadora: Profa. Dra. Edith Beatriz Camaño Schettini

Trabalho de Diplomação a ser apresentado ao
Departamento de Engenharia Civil da Escola de
Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como parte dos requisitos para obtenção do título de
Engenheiro Civil

Porto Alegre, dezembro de 2018.

Dedico esse trabalho a meus pais, Maisa e Jandir, pelo amor incondicional e por todos os esforços que fizeram por mim.

Resumo

Os efluentes sanitários sempre serão devolvidos à natureza, sendo muitas vezes o corpo receptor um corpo de água. Portanto, é fundamental que se conheça o comportamento hidrodinâmico tanto do efluente como do corpo receptor. O objetivo deste trabalho é simular a dispersão de poluentes causada pela instalação de um emissário submarino no sistema de baías entre a Ilha de Santa Catarina e o continente, estudando a influência da localização de pontos de emissão de efluentes em corpos de água, como lagos, lagoas e região costeira utilizando ferramentas numéricas. Este trabalho estuda a dispersão de um escalar nas proximidades da ilha de Santa Catarina, utilizando o código *SuLi*, tridimensional, em diferenças finitas, que resolve as Equações de Navier-Stokes e da Continuidade para escoamentos com superfície livre. Foi adicionada no código uma equação de Advecção-Difusão para transporte de um escalar passivo com esquema *upwind* de primeira ordem. Para a representação da batimetria foi implementada uma rotina de leitura de dados obtidos a partir de arquivos da Marinha do Brasil. O local estudado está na região das baías da Ilha de Santa Catarina, próximo a uma estação de tratamento de efluentes no centro da cidade de Florianópolis. Foram analisados dois locais em diferentes profundidades de despejo de efluentes próximos de uma estação de tratamento de efluentes. Os resultados mostraram que há influência da profundidade, devido à diferença na velocidade do escoamento, com locais mais distantes do fundo e que, por consequência apresentam uma maior velocidade, apresentando uma melhor diluição do poluente. Da mesma forma, locais mais distantes da costa, por desenvolverem maiores velocidades, apresentam melhor diluição do poluente.

Abstract

Sanitary effluents will always be returned to nature, often a river, a lake or the sea. Therefore, the knowledge of its hydrodynamic behavior is of fundamental importance. The objective of this paper is to simulate the influence of the location of effluent emission points in water bodies, such as lakes, lagoons and the coastal region using numerical tools. This work study the dispersion of a scalar nearby the Santa Catarina Island in Brazil, using first order finite differences 3D code *SuLi*, that solves Navier-Stokes and Continuity equations for free surface flows. An Advection-Difusion equation is agregated to the code with a first order upwind scheme, considering a passive scalar. A routine capable of reading the bathymetry, obtained from the Brazilian Navy was implemented to *SuLi*. The site studied is in the region of the bays of the Island of Santa Catarina, near a effluent treatment plant located in the center of Florianópolis. Two locals with different depths were analyzed for the disposition. The results showed that there is influence of depth due to the difference in flow velocity. Locals away from the bottom, and so, with higher velocity, have better dilution. Sites away from the coast have better dilution, also due to higher velocity.

Agradecimentos

Agradeço a meus pais, Jandir e Maisa, por todo o apoio que me deram nesses anos, trazendo sempre tranquilidade, paz e amor nos momentos difíceis.

Agradeço a minha namorada, Luísa, por todo amor, carinho, compreensão e por estar sempre presente.

Agradeço ao restante da família, aos colegas e aos amigos por todo apoio e bons momentos passados juntos.

Agradeço ao Núcleo de Estudos em Transição e Turbulência (NETT), nas figuras dos colegas de laboratório e da Professora Beatriz pela oportunidade de realizar o trabalho, por todo o apoio dado no aprendizado e na implementação do código e pelas discussões que enriqueceram este trabalho.

Sumário

Lista de Figuras	vi
Lista de Tabelas	viii
Lista de Simbolos	ix
1 Introdução	1
2 Revisão Bibliográfica	3
2.1 Equações Fundamentais	3
2.2 Divisão do Termo da Pressão	4
2.3 Superfície Livre	5
2.4 Equação de Advecção-Difusão	6
2.5 Dinâmica de Fluidos Computacional	7
2.5.1 Particularidades da Malha	7
2.5.2 Abordagem Numérica da Turbulência	8
2.6 Qualidade da Água	11
2.6.1 Aspectos de Legislação	11
2.6.2 Caracterização do Esgoto Doméstico	12
2.6.3 Simulações Numéricas de Qualidade da Água	13
3 Metodologia	16
3.1 Modelo Matemático	16
3.2 Método Numérico	18
3.2.1 Tratamento das variáveis na malha	18
3.2.2 Advecção-Difusão	20
3.3 Dados Batimétricos e sua Agregação ao <i>SuLi</i>	22
4 Aplicação	28
4.1 Validação da Equação de Advecção-Difusão	28
4.2 Análise da Região Central da Cidade	30
4.2.1 Condições de Contorno e Iniciais	30
4.2.2 Definição e Análise dos Locais de Despejo	32

5 Conclusões

40

Referências Bibliográficas

42

Lista de Figuras

2.1	Representação do ponto de cálculo das velocidades u e v e da pressão p para malha a) colocalizada e b) deslocada.	8
2.2	Diagrama do processo de cascada de energia em uma turbulência totalmente desenvolvida. Adaptado por Monteiro (2018) [21] de Puhales et al. (2015)[23].	10
3.1	Sistema cartesiano de grades de arranjo deslocado, onde a) refere-se ao plano xz e b) ao plano yz . (Fonte: Monteiro, 2014 [20])	19
3.2	Representação do domínio computacional. (Fonte: Monteiro, 2014 [20])	19
3.3	A malha euleriana-lagrangeana (Fonte: Casulli, 1990 [1]).	22
3.4	Batimetria nas proximidades da Ilha de Santa Catarina, os valores representam as profundidades nos pontos. Branco representa as regiões mais profundas, azul claro representa as regiões de profundidades intermediárias e azul escuro as regiões mais rasas. Em verde regiões de preservação ambiental, em bege as regiões de terra firme - 1	23
3.5	Batimetria nas proximidades da Ilha de Santa Catarina, os valores representam as profundidades nos pontos. Branco representa as regiões mais profundas, azul claro representa as regiões de profundidades intermediárias e azul escuro as regiões mais rasas. Em verde regiões de preservação ambiental, em bege as regiões de terra firme - 2	24
3.6	Batimetria nas proximidades Ilha de Santa Catarina, os valores representam as profundidades nos pontos. Branco representa as regiões mais profundas, azul claro representa as regiões de profundidades intermediárias e azul escuro as regiões mais rasas. Em verde regiões de preservação ambiental, em bege as regiões de terra firme - 3	25
3.7	Batimetria nas proximidades Ilha de Santa Catarina, os valores representam as profundidades nos pontos. Branco representa as regiões mais profundas, azul claro representa as regiões de profundidades intermediárias e azul escuro as regiões mais rasas. Em verde regiões de preservação ambiental, em bege as regiões de terra firme - 4	26
3.8	Mapa da profundidade da região selecionada nas proximidades da Ilha de Santa Catarina. Latitude de $48^{\circ}34'11''W$ a $48^{\circ}32'56''W$ e longitude de $27^{\circ}36'41''S$ a $27^{\circ}35'45''S$	27

3.9	Profundidade da região selecionada nas proximidades da Ilha de Santa Catarina representada no <i>SuLi</i> . Latitude de $48^{\circ}34'11''W$ a $48^{\circ}32'56''W$ e longitude de $27^{\circ}36'41''S$ a $27^{\circ}35'45''S$	27
4.1	Esquema do domínio de simulação para validação com Shin et al. (2004) [26] .	29
4.2	Comparação do avanço temporal da posição da frente de corrente de densidade no presente trabalho numérico e no trabalho experimental de Shin et al. (2004) [26]. Linha contínua: presente trabalho. Asteriscos: trabalho de Shin et al. (2004) [26]	29
4.3	Domínio selecionado no centro de Florianópolis, delimitado pelos pontos A ($48^{\circ}34'11''W$; $27^{\circ}35'45''S$), B ($48^{\circ}32'56''W$; $27^{\circ}35'45''S$), C ($48^{\circ}34'11''W$; $27^{\circ}36'41''S$) e D ($48^{\circ}32'56''W$; $27^{\circ}36'41''S$). ETE com localização representada pelo ponto verde.	31
4.4	Esquema das condições de contorno utilizadas.	32
4.5	Locais <i>L1</i> e <i>L2</i> selecionados. Região de atitude de $48^{\circ}34'11''W$ a $48^{\circ}32'56''W$ e longitude de $27^{\circ}36'41''S$ a $27^{\circ}35'45''S$	33
4.6	Cenário <i>A</i> , observado nos tempos $t = 0$, $t = 500s$ e $t = 800s$. Em que roxo representa $\phi \geq 0,2kg/m^3$, vermelho representa $\phi \geq 0,1kg/m^3$ e amarelo $\phi \geq 0,05kg/m^3$. A profundidade está representada em tons de cinza.	34
4.7	Cenário <i>B</i> , observado nos tempos $t = 0$, $t = 500s$ e $t = 800s$. Em que roxo representa $\phi \geq 0,2kg/m^3$, vermelho representa $\phi \geq 0,1kg/m^3$ e amarelo $\phi \geq 0,05kg/m^3$. A profundidade está representada em tons de cinza.	35
4.8	Cenário <i>C</i> , observado nos tempos $t = 0$, $t = 500s$ e $t = 800s$. Em que roxo representa $\phi \geq 0,2kg/m^3$, vermelho representa $\phi \geq 0,1kg/m^3$ e amarelo $\phi \geq 0,05kg/m^3$. A profundidade está representada em tons de cinza.	36

Lista de Tabelas

2.1	Alguns parâmetros para água salina por categoria pela Resolução 357 de 2005 do CONAMA e atualizados pela resolução 430 de 2011 do CONAMA	11
2.2	Concentração típica de água residual doméstica não tratada (adaptada de Metcalf e Eddy, 2003, [13])	13
4.1	Velocidade de entrada, locais e profundidades dos cenários analisados	33

Lista de Símbolos

a	Coeficiente dos esquemas compactos centrados	(-)
b	Coeficiente dos esquemas compactos centrados	(-)
Cr	Número de Courant	(-)
d	Coeficiente dos esquemas compactos centrados	(-)
$F_{conv-iner}$	Termos convectivos-inerciais da Equação de Transporte e Difusão	$(kg s^{-1} m^{-3})$
$F_{difusiv}$	Termos difusivos da Equação de Transporte e Difusão	$(kg s^{-1} m^{-3})$
g	Aceleração da gravidade	$(m^1 s^{-2})$
h	Profundidade Batimetria	(m)
K	Coeficiente de difusividade	$(m^2 s^{-1})$
$L_{x,y,z}$	Tamanho do domínio para determinado eixo x , y e z	(m)
$N_{x,y,z}$	Número total de elementos em uma malha para determinado eixo	(-)
p	Pressão total	(Pa)
p_n	Pressão hidrostática	(Pa)
p_{nh}	Pressão não hidrostática	(Pa)
q	Pressão dinâmica (não hidrostática)	$(m^2 s^{-2})$
Re	Número de Reynolds	(-)
t	Tempo	(s)
u	Velocidade referente ao eixo x	$(m^1 s^{-1})$
v	Velocidade referente ao eixo y	$(m^1 s^{-1})$
w	Velocidade referente ao eixo x	$(m^1 s^{-1})$
x	Coordenada horizontal longitudinal	(m)
y	Coordenada horizontal transversal	(m)
z	Coordenada vertical do plano cartesiano	(m)
α	Coeficiente de ajuste da massa específica com a concentração	$(m^3 kg^{-1})$
β	Coeficiente de ajuste da massa específica com a temperatura	$(^{\circ}C^{-1})$
γ	Relação entre massas específicas do fluido	(-)
ϕ	Concentração	$(kg^1 m^{-3})$
μ	Viscosidade dinâmica	$(N^1 s^1 m^{-2})$
η	Desnível da superfície livre	(m)
ρ	Massa específica	$(kg^1 m^{-3})$
ρ_0	Massa específica inicial água	$(kg^1 m^{-3})$
ν	Viscosidade cinemática	$(m^2 s^{-1})$

Índices

i	Referente ao eixo x
j	Referente ao eixo y
k	Referente ao eixo z
n	Referente ao tempo

Siglas

CFD	Computational Fluid Dynamics / Dinâmica dos Fluidos Computacional
CFL	Condição de Courant-Friedrichs-Lewy
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DNS	Direct Numerical Simulation / Simulação Numérica Direta
IBM	Immersed Boundary Method / Método das Fronteiras Imersas
LES	Large Eddy Simulation / Simulação de Grande Escala
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes / Navier-Stokes média de Reynolds

Capítulo 1

Introdução

A água é, de maneira geral, um recurso natural utilizado em larga escala pela humanidade, fato perceptível pela dependência de civilizações antigas a rios próximos, como os Rios Nilo, Tigre e Eufrates, assim, com diversidade de usos, criando-se, dessa forma, uma grande demanda por sua exploração.

Com a formação de aglomerados urbanos, houve um aumento do número de doenças causadas pela falta de higiene, devido à carência de conhecimento da necessidade de separar água de consumo dos dejetos. Então, com a Teoria dos Miasmas (Martins e Martins, 2015 [19]), desenvolvida durante o século *XVII*, segundo a qual os maus odores causariam doenças, começou-se a perceber a importância do saneamento básico. Mais tarde, tal teoria foi refutada pelo descobrimento de microorganismos, reais causadores de patologias, expondo como é necessário ter muito cuidado com águas contaminadas. Atualmente, diversos são os métodos utilizados para o tratamento de águas residuais, com vistas à remoção de agentes patológicos e outros poluentes.

O efluente, tratado ou não, será devolvido à natureza, de maneira que não só os processos de tratamento de esgoto devem ser eficazes, como também o local de disposição precisa ser cuidadosamente selecionado, se harmonizando às peculiaridades do efluente e da região. O esgoto não deve afetar significativamente o equilíbrio do ambiente, nem afetar o uso que se dá à área, como previsto na resolução 430 de maio de 2011 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA)[9].

A interação entre o efluente e o corpo de água onde será despejado pode ser simulada utilizando equações que descrevem a dinâmica do escoamento. Muito desse equacionamento foi

desenvolvido no século *XIX*, causando, dessa maneira, um impacto sobre a engenharia. Tendo em vista a complexidade de tais equações, o desenvolvimento de ciências computacionais nas últimas décadas impulsionou a expansão do conhecimento nessa área, desenvolvendo-se, assim, a Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD - *Computational Fluid Dynamics*).

Simulações numéricas são ferramentas versáteis, que permitem prognosticar situações, determinar locais de interesse e minimizar impactos, entre outras vantagens. Isto possibilita ao gestor tomar decisões baseadas em informações consistentes e com uma noção mais completa da realidade e da extensão dos problemas.

O objetivo do presente trabalho é simular a dispersão de poluentes causada pela instalação de um emissário no sistema de baías entre a ilha de Santa Catarina e o continente. São analisados diferentes locais de despejo com diferentes profundidades por meio de simulações numéricas.

O código utilizado é o SuLi (Monteiro, 2014 [20]), que resolve as equações da Continuidade e de Navier-Stokes para escoamento com superfície livre e com aproximação não-hidrostática para a pressão. Com a finalidade de simular o transporte de poluentes no escoamento, é agregada uma equação do tipo Advecção-Difusão e uma rotina que permite a leitura da batimetria do local escolhido a partir de dados da Marinha do Brasil.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Este capítulo apresenta uma revisão sobre assuntos que são de interesse nesse trabalho, como conceitos de mecânica dos fluidos, simulação numérica e qualidade de água.

2.1 Equações Fundamentais

Do equacionamento de mecânica dos fluidos se destacam a Equação da Continuidade e a Equação de Navier-Stokes. A Equação da Continuidade, assumindo o escoamento como sendo incompressível, em coordenadas cartesianas ortogonais (x,y,z) , tem a forma:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (2.1)$$

em que u , v e w são as componentes da velocidade, paralelas aos eixos x , y e z , respectivamente.

As equações de Navier-Stokes, com a aproximação de Boussinesq válida, estão definidas como:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right), \quad (2.2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right), \quad (2.3)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\rho g - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right), \quad (2.4)$$

onde t é o tempo, ρ a massa específica, p a pressão, μ a viscosidade dinâmica e g a aceleração da gravidade, considerando os eixos não inclinados e atuação da gravidade apenas na direção negativa do eixo z . As equações 2.1, 2.2, 2.3 e 2.4 formam um sistema de quatro equações e quatro incógnitas (u , v , w e p). A grande dificuldade em se resolver esse conjunto de equações consiste no fato de que tais equações diferenciais não possuem solução analítica conhecida, salvo em casos simplificados.

Estas equações e suas variantes são a base da resolução de problemas em CFD e são utilizadas em larga escala para diversos fins, como simulação de rios, estuários, barragens, correntes de densidade entre outros. Assim, para cada situação, se adotam particularidades de interesse e se fazem as aproximações necessárias.

2.2 Divisão do Termo da Pressão

Segundo Çengel e Cimbala (2007) [3] o termo da pressão das equações 2.2 a 2.4 pode ser dividida em *pressão estática*, que é referente a pressão termodinâmica do fluido, *pressão dinâmica*, que se refere ao aumento de pressão causada por uma desaceleração brusca do escoamento e *pressão hidrostática*, que diz respeito a energia potencial gravitacional.

Em códigos de superfície livre, a pressão estática é nula, uma vez que se trabalham com pressões relativas, ou seja, considerando escoamentos não confinados. O termo da pressão hidrostática sempre precisa ser levado em consideração, pois se trata do peso da coluna de fluido. Já, o uso da pressão dinâmica depende da finalidade do estudo em questão. Códigos que levam em consideração este tipo de pressão, como o SuLi, são ditos com *aproximação não-hidrostática*, os que não a levam em consideração são ditos com *aproximação hidrostática*, pois apenas calculam o termo da pressão hidrostática. Os que levam em consideração, mas de maneira parcial, são ditos com *aproximação quasi-hidrostática*.

Segundo Marshall et al. (2007) [18] a pressão não-hidrostática é indispensável nas pequenas escalas, pois a influência da velocidade de movimentação é relevante. Seu uso, de uma maneira geral, em grandes profundidades é válido apenas se envolver situações, como a convecção profunda (objeto de estudo da climatologia). A pressão não-hidrostática é relevante, também, segundo Chen (2003) [6], em escoamentos com forte gradiente de densidade horizontal, ondas

curtas, proximidade com paredes, etc.

2.3 Superfície Livre

Escoamentos com superfície livre são de difícil resolução pois sua fronteira é móvel na interface dos fluidos. Dessa maneira, uma variável adicional representa o desnível da superfície livre. Assim, Monteiro (2014) [20] utiliza a Equação da condição cinemática:

$$w_\eta = \frac{D\eta}{Dt} = \frac{\partial\eta}{\partial t} + \frac{\partial\eta}{\partial x}u_\eta + \frac{\partial\eta}{\partial y}v_\eta, \quad (2.5)$$

$$w_{-h} = -\frac{Dh}{Dt} = -\frac{\partial h}{\partial t} - \frac{\partial h}{\partial x}u_{-h} - \frac{\partial h}{\partial y}v_{-h}, \quad (2.6)$$

onde η representa o desnível da superfície livre e $-h$ o fundo do domínio, bem como $u_\eta, v_\eta, w_\eta, u_{-h}, v_{-h}$ e w_{-h} as velocidades nas direções x, y e z avaliadas no topo e no fundo do domínio, respectivamente. Dessa forma, ao se integrar a Equação da Continuidade 2.1 do fundo do domínio até o topo da superfície livre e adicionando-se a Condição Cinemática imposta pelas equações 2.5 e 2.6, obtém-se:

$$\frac{\partial\eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\int_{-h}^{\eta} u dz \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\int_{-h}^{\eta} v dz \right] = 0. \quad (2.7)$$

A introdução de um escalar passivo não afeta a equação 2.7, pois este não afeta a dinâmica do escoamento, conforme já explicitado.

Para facilitar a resolução do problema, utiliza-se a versão monofásica do código, ou seja, o único fluido simulado é a água e a superfície livre é considerada como o limite superior do domínio de cálculo. Esta aproximação se justifica porque o domínio é grande (consiste nas proximidades da ilha de Santa Catarina) e, dessa maneira, a variação do desnível da superfície livre é pequena, diferentemente de situações onde o interesse é simular uma onda quebrando na praia ou uma gota atingindo um tanque, por exemplo.

2.4 Equação de Advecção-Difusão

A Equação de Advecção-Difusão diz respeito ao transporte de um escalar pelo escoamento, dessa maneira, tal parâmetro pode significar, além da dispersão de poluentes, outros fenômenos, como o transporte de sedimentos e a difusão da temperatura. A equação utilizada por Xiao et al. (2014) [31] é:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \left(u \frac{\partial \phi}{\partial x} + v \frac{\partial \phi}{\partial y} + w \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) = K \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right), \quad (2.8)$$

onde ϕ é a concentração e K parâmetro de difusividade. O primeiro termo da esquerda da equação representa a dependência temporal da concentração, e, numericamente, é através deste termo que se faz o avanço temporal. O segundo termo da esquerda representa a advecção (originado do sentido do escoamento, pois leva em consideração o campo de velocidades), enquanto que o termo da direita representa a difusão (originado do movimento molecular do fluido).

Na equação 2.8 a concentração ϕ , que, por estar diluída no fluido (Schettini, 1991 [25]) afeta a massa específica através da equação:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha\phi)(1 + \beta T), \quad (2.9)$$

onde ρ é a massa específica final, ρ_0 , a massa específica padrão da água, α e β são constantes de ajuste da massa específica (com α de dimensão m^3/kg e β de dimensão $^{\circ}C^{-1}$) e T a temperatura. Segundo Schettini (1991) [25] é comum que não se considere o efeito da temperatura, pois seu efeito na massa específica é muito pequeno, dessa forma a equação fica escrita como:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha\phi). \quad (2.10)$$

Essa massa específica modificada afeta as Equações de Navier-Stokes (2.2, 2.3 e 2.4). No entanto, pelo fato de ser um escalar passivo, com reduzida capacidade de afetar a dinâmica do escoamento ao seu redor, a ação dessa massa específica modificada na equação de Navier-Stokes fica limitada ao termo gravitacional, em que um fluido com uma massa específica maior

tende a se deslocar para baixo.

2.5 Dinâmica de Fluidos Computacional

Segundo Çengel e Cimbala (2007) [3] não é difícil utilizar um código de CFD, contudo, os resultados obtidos podem não representar a realidade, assim, ao se utilizar um código de CFD é preciso ter conhecimento do modelo, das condições iniciais, das condições de contorno, entre outros fatores para que os resultados possam ter significado físico.

Fatores como refinamento da malha, forma de abordagem da turbulência, esquema numérico utilizado, condições iniciais e de contorno adequadas e estabilidade numérica são fundamentais para o bom funcionamento do programa e obtenção de resultados relevantes.

2.5.1 Particularidades da Malha

O refinamento da malha diz respeito a capacidade de se representar não só eventuais objetos, como pilares de pontes, condutos submarinos, entre outros, mas também de se representar o escoamento. Um bom refinamento se traduz em uma boa representação do escoamento, com seus vórtices (ou pelo menos seu efeito) sendo representados satisfatoriamente. Assim, é possível calcular variáveis integrais, como coeficientes de arrasto e sustentação, que são úteis para dimensionamento de peças ou ancoragens, ou ainda variáveis diferenciais como a dispersão de energia e a dispersão de poluentes.

Para o método das diferenças finitas a malha representa, em cada posição da célula uma incógnita. Segundo Fortuna (2000) [11], códigos que calculam as velocidades u , v e w e a pressão p em um mesmo ponto da célula são chamados de colocados. Já, códigos que calculam cada velocidade e a pressão em pontos distintos da mesma unidade de malha são ditos com malha deslocada. A Figura 2.1 ilustra essa diferença para um caso bidimensional.

Existe ainda um outro tipo de malha, chamada de parcialmente deslocada, onde uma parte das incógnitas é calculada em um ponto da célula e o restante em outro. Por exemplo, o código *Incompact3D* (Laizet e Lamballais, 2009 [16]) utiliza o centro da célula para o cálculo somente da pressão e o nó para o cálculo das três componentes ortogonais da velocidade.

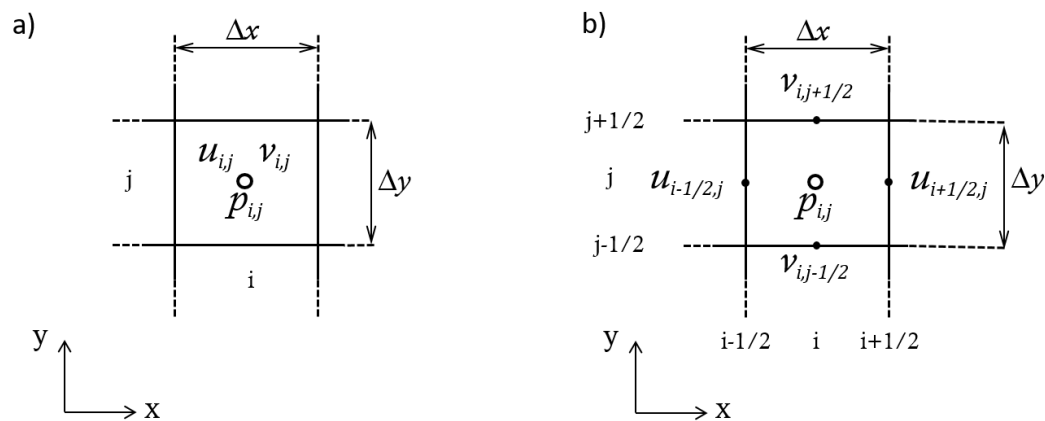


Figura 2.1: Representação do ponto de cálculo das velocidades u e v e da pressão p para malha a) colocalizada e b) deslocada.

2.5.2 Abordagem Numérica da Turbulência

Existem diversas maneiras de se abordar numericamente a turbulência em um código e a maneira escolhida para tanto depende do que se quer abordar, quais são os objetivos e as limitações dos métodos propostos. Se a intenção é analisar toda a turbulência do processo, atentando-se a todas as variáveis diferenciais é necessário utilizar a Simulação Numérica Direta (*Direct Numerical Simulation - DNS*), que, segundo Souza et al. (2011) [27], *consiste em resolver as equações completas de Navier-Stokes para todos os pontos da grade e para todas as escalas temporais e espaciais do movimento*. Assim, usa-se uma malha refinada o suficiente para representar até mesmo as menores escalas do fenômeno e os resultados obtidos tendem a se aproximar dos resultados físicos reais.

Tal refinamento está ligado ao Número de Reynolds, que relaciona forças inerciais com forças viscosas. As forças viscosas criam uma resistência a formação dos vórtices, pois a medida que a viscosidade aumenta, os vórtices de mesmo tamanho demandam uma energia maior para vencer tal viscosidade e se formar. Por outro lado, a medida que aumenta a inércia, aumenta-se o Número de Reynolds, e, dessa forma, a riqueza de escalas turbulentas tende a aumentar, causando uma diminuição do tamanho da menor escala, implicando em um elemento diferencial de malha cada vez menor para se representar totalmente o escoamento.

Esta é a grande limitação das DNS, pois escoamentos de problemas cotidianos tendem a ter um número de Reynolds bastante elevado, implicando em um domínio com uma grande

quantidade de pontos, o que, por sua vez aumenta o custo computacional exigido, muitas vezes inviabilizando este tipo de abordagem.

Outro tipo de abordagem computacional que não exige uma malha tão refinada quanto a DNS é a Simulação de Grandes Escalas (*Large Eddy Simulation* - LES), pois consiste em resolver as Equações de Navier-Stokes somente nas maiores escalas e utilizar um modelo de turbulência para as menores, como define Souza et al. (2011) [27]:

[...] é conduzida tal como a técnica DNS, com discretização espaciais e temporais bastante refinadas, onde são resolvidas as equações instatâneas de Navier-Stokes apenas para as escalas energéticas do escoamento. As pequenas escalas de comprimento e tempo, as quais têm um comportamento mais isotrópico e menos dependente dos contornos físicos, são conhecidas como escalas submalha e são modeladas por um modelo algébrico simples, o qual é denominado modelo submalha.

Existe ainda, dentre várias outras abordagens, uma terceira baseada na decomposição de Reynolds (*Reynolds Avaraged Navier-Stokes* - RANS) onde, segundo Souza et al. (2011) [27], as equações de Navier-Stokes são decompostas em uma parte média e outra flutuante e a variável turbulenta é parametrizada a partir do gradiente do valor médio da variável. Tal parametrização é feita através de equações algébricas ou diferenciais, relacionando-se com propriedades do escoamento médio, empregando conceitos de viscosidade/difusividade turbulenta e conceito de Comprimento de Mistura.

Dessa forma, as abordagens RANS resolvem as equações de Navier-Stokes, estimando seu efeito médio sobre o escoamento, ou seja, utilizam um modelo de turbulência para todas as escalas. Essa abordagem gera simulações mais leves e rápidas, exigindo uma malha muito menos refinada. São amplamente utilizadas para geometrias complexas, além de, no âmbito técnico serem muito utilizadas por engenheiros, por serem simulações rápidas. Um de seus pontos fracos é a precisão, que fica comprometida, se comparada com a DNS, além da dificuldade de se implementar um bom modelo RANS para situações específicas.

Finalmente, as menores escalas estão ligadas com a dissipação de energia, daí vem a importância de representá-las efetivamente (DNS) ou, pelo menos, estimar o seu efeito (LES e RANS), pois se um esquema numérico não as leva em consideração, acumula-se energia no

sistema, levando a grandes possibilidades de divergir ou super-estimar alguns valores como coeficientes de arrasto e de sustentação, frequência de desprendimento de vórtices, velocidades, entre outras. A figura 2.2 demonstra a importância das menores escalas para a dissipação de energia de um escoamento turbulento.

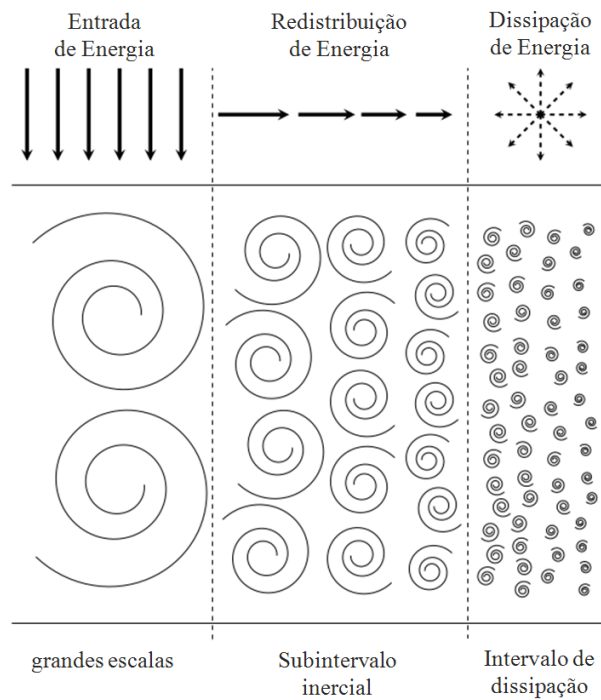


Figura 2.2: Diagrama do processo de cascata de energia em uma turbulência totalmente desenvolvida. Adaptado por Monteiro (2018) [21] de Puhales et al. (2015)[23].

2.6 Qualidade da Água

2.6.1 Aspectos de Legislação

A Resolução 357 de 2005 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) [8] e sua atualização na Resolução 430 de 2011 do CONAMA [9] versam sobre diretrizes ambientais para enquadramento e classificação de corpos d'água, além de estabelecer condições e padrões de lançamentos de efluentes. Dessa forma, tais resoluções definem, para águas salinas, a classe especial, destinada a preservação aquática e do meio ambiente natural, a classe 1 como destinada para recreação de contato primário, proteção de comunidades aquáticas, dentre outros usos, a classe 2 como destinada a recreação de contato secundário e pesca amadora e a classe 3, destinada à navegação.

Para cada classe, a Resolução 357 estabelece parâmetros e seus valores que precisam ser respeitados, de onde obtém-se destaques para os parâmetros presentes na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Alguns parâmetros para água salina por categoria pela Resolução 357 de 2005 do CONAMA e atualizados pela resolução 430 de 2011 do CONAMA

Parâmetro	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Oxigênio Dissolvido	$\geq 6\text{mg/L}$	$\geq 5\text{mg/L}$	$\geq 4\text{mg/L}$
Carbono Orgânico Total	$\leq 3\text{mg/L}$	$\leq 5\text{mg/L}$	$\leq 10\text{mg/L}$
pH	$6,5 \leq \text{pH} \leq 8,5$	$6,5 \leq \text{pH} \leq 8,5$	$6,5 \leq \text{pH} \leq 8,5$
Nitrato	$\leq 0,4\text{mg/L}$	$\leq 0,7\text{mg/L}$	-
Nitrito	$\leq 0,07\text{mg/L}$	$\leq 0,2\text{mg/L}$	-
Nitrogênio Amoniacal Total	$\leq 0,4\text{mg/L}$	$\leq 0,7\text{mg/L}$	-
Fósforo Total	$\leq 0,062\text{mg/L}$	$\leq 0,093\text{mg/L}$	-
Coliformes Totais	$\leq 1000/100\text{mL}^*$	$\leq 2500/100\text{mL}$	$\leq 4000/100\text{mL}$

*Segundo Resolução CONAMA 274 de 2000 [7] áreas consideradas próprias devem ser divididas em: **a) Exce-lentes** quando em 80% ou mais de um conjunto de amostras obtidas em cada uma das cinco semanas anteriores, colhidas no mesmo local, houver, no máximo, 250 coliformes fecais (termotolerantes) ou 200 *Escherichia coli* ou 25 enterococos por 100 mililitros; **b) Muito Boa**, quando em 80% ou mais de um conjunto de amostras obtidas em cada uma das cinco semanas anteriores, colhidas no mesmo local, houver, no máximo, 500 coliformes fecais (termotolerantes) ou 400 *Escherichia coli* ou 50 enterococos por 100 mililitros; **c) Satisfatória** quando em 80% ou mais de um conjunto de amostras obtidas em cada uma das cinco semanas anteriores, colhidas no mesmo local,

2.6.2 Caracterização do Esgoto Doméstico

Segundo Metcalf e Eddy (2003) [13] águas residuais são caracterizadas em termos físicos, químicos e biológicos. Assim, se podem destacar alguns dos constituintes normalmente analisados em águas residuais: amônia, nitrogênio orgânico, nitrito, nitrato, nitrogênio total, fósforo, sulfato, metais, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), carbono orgânico total, coliformes, entre outros.

Outro parâmetro relevante na caracterização de águas residuais é a massa específica, pois, segundo Metcalf e Eddy (2003) [13], no que tange ao esgoto doméstico, essa a massa específica tende a ser a mesma da água. Isso corrobora o uso da aproximação de Boussinesq (que trata de variações de até, aproximadamente 5%), pois se trata de uma pequena variação de massa específica

Determinar as vazões e as concentrações constituintes de água de rejeito também é fundamental, pois a variação desses pode criar grandes diferenças hidráulicas no escoamento final, afetando, dessa maneira, a solução final do problema. Contudo, a determinação de vazões e concentrações também depende de hábitos e da condição sócio-econômica da população, como consumo de água *per capita* e, no caso de esgoto tratado, do sistema de tratamento utilizado, sua eficiência e suas limitações.

A tabela 2.2 (adaptada de Metcalf e Eddy, 2003, [13]) mostra valores típicos para a composição de esgoto doméstico na perspectiva dos autores, de origem norte americana.

houver, no máximo 1.000 coliformes fecais (termotolerantes) ou 800 Escherichia coli ou 100 enterococos por 100 mililitros.

Tabela 2.2: Concentração típica de água residual doméstica não tratada (adaptada de Metcalf e Eddy, 2003, [13])

Contaminante	Unidade	Mínima	Média	Máxima
Sólidos Totais	mg/L	390	720	1230
Sólidos Dissolvidos totais	mg/L	270	500	860
Sólidos Dissolvidos Fixos	mg/L	160	300	520
Sólidos Dissolvidos Voláteis	mg/L	110	200	340
Sólidos Suspensos Totais	mg/L	120	210	400
Sólidos Suspensos Fixos	mg/L	25	50	85
Sólidos Suspensos Voláteis	mg/L	95	160	315
<i>DBO</i> ₅	mg/L	110	190	350
Carbono Orgânico Total	mg/L	80	140	260
DQO	mg/L	250	430	800
Nitrogênio Total	mg/L	20	40	70
Nitrogênio Orgânico	mg/L	8	15	25
Amônia	mg/L	12	25	45
Nitrito	mg/L	0	0	0
Nitrato	mg/L	0	0	0
Fósforo Total	mg/L	4	7	12
Fósforo Orgânico	mg/L	1	2	4
Fósforo Inorgânico	mg/L	3	5	8
Cloretos	mg/L	30	50	90
Sulfato	mg/L	20	30	50
Óleos e Graxas	mg/L	50	90	100
Compostos Orgânicos Voláteis	µg/L	<100	100-400	> 400
Coliformes Totais	Nr./100 mL	10 ⁶ – 10 ⁸	10 ⁷ – 10 ⁹	10 ⁷ – 10 ¹⁰
Coliformes Fecais	Nr./100 mL	10 ³ – 10 ⁵	10 ⁴ – 10 ⁶	10 ⁵ – 10 ⁸
<i>Cryptosporidium oocysts</i>	Nr./100 mL	10 ⁻¹ – 10 ⁰	10 ⁻¹ – 10 ¹	10 ⁻¹ – 10 ²
<i>Giardia lamblia cysts</i>	Nr./100 mL	10 ⁻¹ – 10 ¹	10 ⁻¹ – 10 ²	10 ⁻¹ – 10 ³

2.6.3 Simulações Numéricas de Qualidade da Água

Os códigos de simulação de qualidade da água modelam processos hidrodinâmicos, químicos e biológicos que representam alterações na concentração de poluentes em corpos de água. Assim, existe uma gama de programas, cada um focado em um método de cálculo ou um corpo de água específico, como rios, lagos, estuários, etc. Alguns desses modelos são listados a seguir, mostrando a relevância da área de estudo, contudo, todos esses modelos apresentados apresentam uma abordagem hidrostática para a pressão, diferentemente do *SuLi*, que calcula o termo

de pressão levando-se em conta a pressão dinâmica.

Um desses modelos é o QUAL2K (Chapra et al., 2008 [5]) que resolve equações unidimensionais de qualidade de água em rios e representa a cinética da qualidade de água em um canal bem misturado vertical e horizontalmente no estado permanente. Um segundo exemplo de modelo é o SIMCAT (Warn, 2010 [29]) desenvolvido pela agência britânica de meio ambiente para simular descarga de efluentes, se utiliza de um modelo unidimensional em regime permanente para descargas pontuais e difusas no leito do rio.

Outro exemplo é o IPH-ECO (Cavalcanti et al., 2016 [2]), que é um modelo tridimensional bastante versátil para ecossistemas aquáticos continentais, sendo aplicado em fluxos de marés e de vento, fluxos de estratificação, intrusão salina, transporte de material dissolvido e poluentes, entre outros. Utiliza-se um método semi-implícito de diferenças finitas para resolver as equações diferenciais.

O WASP (Wool et al., 2006 [30]) se constitui um modelo de modos uni, bi ou tridimensional para uma variedade de poluentes, com processos de advecção, dispersão, fluxos de massas pontuais e difusas, podendo ser implementado, também com modelos de transporte hidrodinâmico e de sedimentos, fornecendo perfis de velocidade, temperatura, salinidade e fluxo de sedimentos.

Simulações de dispersão de poluentes já foram aplicadas em diversos trabalhos no Brasil, usando diferentes softwares e diferentes metodologias para abordar diferentes questões, entre eles, simulação hidrodinâmica e dispersão de poluentes aplicada ao Rio Matapi no Amapá (Cunha et al., 2011 [10]), que, utilizando de métodos dos elementos finitos, objetivou avaliar o comportamento do escoamento e de possíveis fontes de poluentes, apresentando campos hidrodinâmicos e campos de concentração como resultados.

Inforzato (2008) [15] estudou a advecção-difusão num sistema tridimensional de ar e água através de um método de elementos finitos de segunda ordem, apresentando simulações de diferentes cenários com resultados numéricos e saídas gráficas. Já Larentis et al. (2008) [28] apresentaram o modelo hidrológico e de qualidade de água IPH-MGBq, voltado a grandes bacias (aplicando-o a bacia do Rio Taquari-Antas, RS), utilizando dados de precipitação, vazão e concentrações de oxigênio dissolvido, DBO, nitrogênio, fósforo e coliformes fecais. Machado

et al. (2008) [17] utilizaram um método de volumes finitos que utiliza o perfil de velocidades e de concentração para prever o impacto causado pela ocorrência de múltiplos pontos de emissão, comparando o modelo numérico com dados experimentais do Rio Atibaia, SP.

Capítulo 3

Metodologia

Neste capítulo, é apresentado o modelo matemático utilizado pelo *SuLi* para resolver as equações de Navier-Stokes (2.2, 2.3 e 2.4) e da continuidade modificada (2.7) que apresenta como vantagem do tratamento do termo da pressão nas equações de Navier-Stokes ao se considerar não apenas a pressão hidrostática. Também é apresentado o modelo agregado no presente trabalho para a resolução da equação de Advecção-Difusão (2.8). Também é apresentada a metodologia numérica utilizada para resolver as equações. Finalmente, o capítulo traz os dados batimétricos das proximidades da Ilha de Santa Catarina e seu tratamento no programa, também adicionado no presente trabalho.

3.1 Modelo Matemático

As equações 2.2 e 2.3 não são modificadas pela existência de um escalar, pois não existe termo gravitacional em tais equações e, como já mencionado, o escalar é passivo, assim, nessas equações, assume-se a influência apenas de ρ_0 . Contudo, na equação 2.4 existe um termo gravitacional que leva em consideração a influência da massa específica modificada pelo escalar. Dessa maneira ficam reescritas como:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right], \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right], \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\rho g}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{\rho_0} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right]. \quad (3.3)$$

Como o *SuLi* utiliza uma aproximação de pressão não-hidrostática, tem-se que a pressão pode ser dividida como:

$$p(x,y,z,t) = \rho_0 g [\eta(x,y,t) - z] + \rho_0 q(x,y,z,t) \quad (3.4)$$

A pressão não-hidrostática é representada por q . Então, as derivadas das pressões nas três direções ficam representadas como:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \rho_0 g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \rho_0 \frac{\partial q}{\partial x}, \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \rho_0 g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \rho_0 \frac{\partial q}{\partial y}, \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho_0 g + \rho_0 \frac{\partial q}{\partial z}. \quad (3.7)$$

Assim, substituindo-se as equações 3.5, 3.6 e 3.7 respectivamente em 3.1, 3.2 e 3.3, tem-se:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right], \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{\partial q}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right], \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\rho - \rho_0}{\rho} g - \frac{\partial q}{\partial z} + \frac{1}{\rho_0} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right]. \quad (3.10)$$

O termo de pressão não-hidrostática é, na verdade, uma correção que se faz da pressão, pois em um primeiro passo o código calcula as equações 3.8, 3.9 e 3.10 levando em consideração o comportamento hidrostático da pressão, criando um sistema de quatro equações (três de Navier-Stokes e uma da Continuidade) e quatro incógnitas (u , v , w e η).

Num segundo passo é feito o cálculo da pressão não-hidrostática, onde se corrigem as velocidades e o desnível da superfície livre. A forma de cálculo desta correção é executada por

meio das expressões:

$$\frac{\partial u^*}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial x}, \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial v^*}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial y}, \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial w^*}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial z}, \quad (3.13)$$

$$\eta = \tilde{\eta} + \frac{q}{g}. \quad (3.14)$$

onde $\tilde{\eta}$ é o desnível da superfície livre calculado na primeira etapa e u^* , v^* e w^* são as correções da velocidade que foram calculadas sem a consideração da pressão não-hidrostática. Já, com a resolução da Equação de Advecção-Difusão (2.8) é adicionada uma nova incógnita, a concentração (ϕ), que é resolvida com a adição de uma equação ao código que resolva a concentração, a ser discutida posteriormente.

3.2 Método Numérico

3.2.1 Tratamento das variáveis na malha

O código SuLi utiliza coordenadas cartesianas em diferenças finitas, onde N_x , N_y e N_z representam o número de células nos eixos x , y e z , respectivamente, bem como L_x , L_y e $L_{z_i,j}$ os comprimentos do domínio (Monteiro, 2014 [20]). O SuLi utiliza uma malha cartesiana retangular e trapezoidal, em que, por se tratar de um código de superfície livre, a altura diferencial dz da última célula é variável, pois dessa maneira é possível se representar a variação da superfície livre. O código utiliza, ainda, uma malha totalmente deslocada, ou seja, todas as variáveis são calculadas em pontos diferentes, conforme mostrado na Figura 3.1.

Uma malha totalmente deslocada é vantajosa para representar algumas características de células, ou seja, valores que são para a célula inteira, como a pressão dinâmica e a concentração. Já a velocidade, com esse tipo de representação é calculada na face da célula.

A figura 3.2 representa todo o domínio simulado no código e seu tratamento computacional.

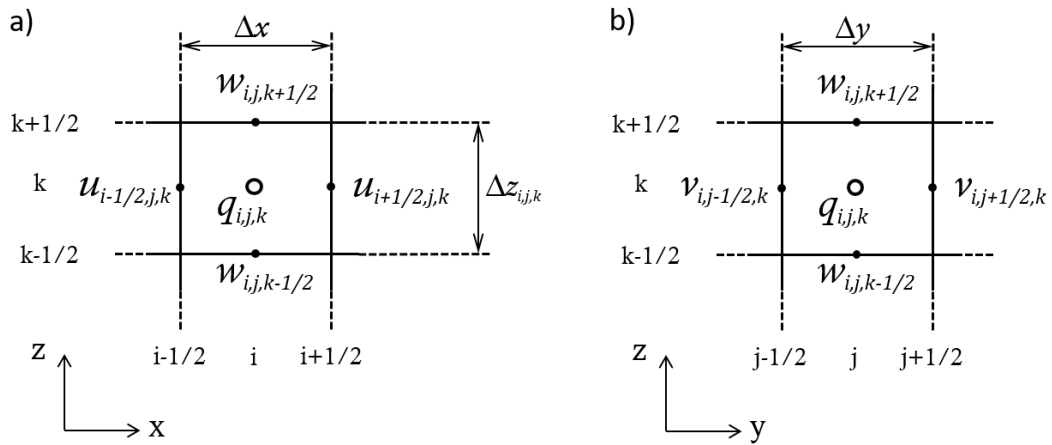


Figura 3.1: Sistema cartesiano de grades de arranjo deslocado, onde a) refere-se ao plano xz e b) ao plano yz . (Fonte: Monteiro, 2014 [20])

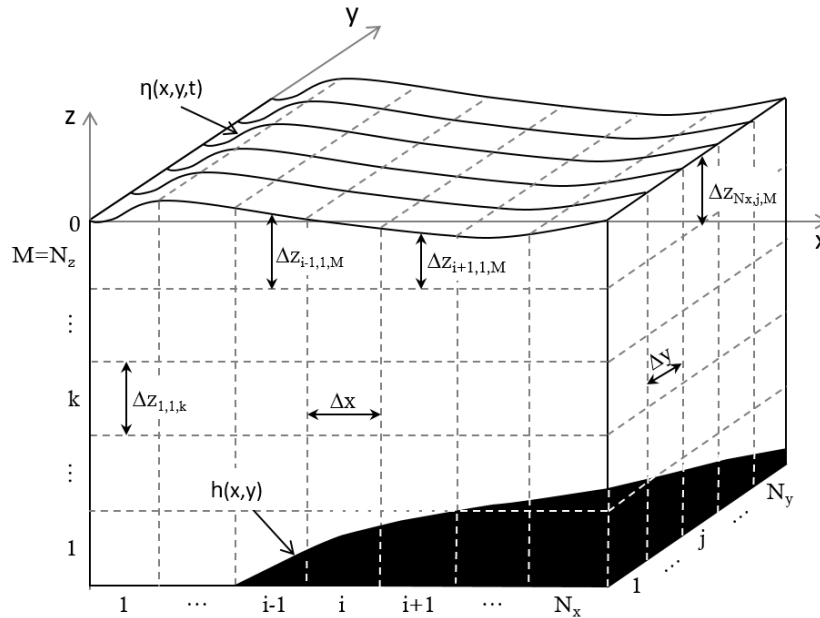


Figura 3.2: Representação do domínio computacional. (Fonte: Monteiro, 2014 [20])

O código utiliza um método semi-implícito de diferenças finitas, o que traz um ganho em termos de estabilidade numérica. Entretanto, como diversas variáveis são calculadas de maneira explícita, ainda existe a necessidade de certo cuidado com a estabilidade.

Esta estabilidade respeita a condição de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL). Essa condição representa uma relação entre a velocidade do escoamento e a máxima velocidade que a malha é capaz de representar. Assim, definindo:

$$a_{max} = \frac{\Delta t}{\Delta x} u_{max}, \tag{3.15}$$

$$b_{max} = \frac{\Delta t}{\Delta y} v_{max}, \quad (3.16)$$

$$d_{max} = \frac{\Delta t}{\Delta z} w_{max}. \quad (3.17)$$

Os números a , b e d são utilizados para interpolar as variáveis e se chegar ao resultado para a incógnita, como será demonstrado posteriormente.

3.2.2 Advecção-Difusão

A equação de advecção-difusão agregada ao código neste estudo representa o transporte convectivo e difusivo de um escalar passivo ϕ em um escoamento tridimensional, dada por:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \left(u \frac{\partial \phi}{\partial x} + v \frac{\partial \phi}{\partial y} + w \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) = K \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right). \quad (3.18)$$

Pode-se definir numericamente o termo da derivada temporal, utilizando um método de Euler explícito, como:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} \approx \frac{\phi_{i,j,k}^{n+1} - \phi_{i,j,k}^n}{\Delta t}, \quad (3.19)$$

em que $\phi_{i,j,k}^n$ representa a concentração, calculada no centro da célula (assim como a pressão não hidrostática q), no ponto de coordenadas (x, y, z) no n ésimo tempo (n) e $\phi_{i,j,k}^{n+1}$ a concentração no mesmo ponto, porém no passo de tempo seguinte. Em seguida, após manipulação algébrica, podem ser definidos dois termos:

$$F_{conv-iner}^n = \left(u \frac{\partial \phi}{\partial x} + v \frac{\partial \phi}{\partial y} + w \frac{\partial \phi}{\partial z} \right)_{i,j,k}^n \Delta t + \phi_{i,j,k}^n, \quad (3.20)$$

$$F_{difusiv}^n = K \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right)_{i,j,k}^n. \quad (3.21)$$

Aproximando numericamente a equação 3.18 e isolando a concentração no passo de tempo seguinte, tem-se:

$$\phi_{i,j,k}^{n+1} = F_{conv-iner}^n + F_{difusiv}^n \Delta t. \quad (3.22)$$

Numericamente, o cálculo do termo da equação 3.21 não representa uma grande complicação, por ser um termo linear. Assim, utiliza-se um esquema numérico de segunda ordem centrada, conforme:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \approx \frac{\phi_{i+1,j,k} - 2\phi_{i,j,k} + \phi_{i-1,j,k}}{\Delta x^2}, \quad (3.23)$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \approx \frac{\phi_{i,j+1,k} - 2\phi_{i,j,k} + \phi_{i,j-1,k}}{\Delta y^2}, \quad (3.24)$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \approx \left(\frac{\phi_{i,j,k+1} - \phi_{i,j,k}}{\Delta z_{i,j,k+1/2}} - \frac{\phi_{i,j,k} - \phi_{i,j,k-1}}{\Delta z_{i,j,k-1/2}} \right) \frac{1}{\Delta z_{i,j,k}}. \quad (3.25)$$

A equação 3.25 necessita de um tratamento numérico diferente, pois o último elemento diferencial na direção z ($\Delta z_{i,j,N_z}$) tem comprimento variável devido à variação da superfície livre (η).

Por outro lado, o termo convectivo-inercial (Eq. 3.20) necessita de uma abordagem mais cuidadosa, pois se trata de um termo não linear. Utiliza-se um esquema semelhante ao *upwind* (Casulli, 1990 [1]) que estima o valor da variável tendo por base seu valor nos pontos próximos. Contudo, tais pontos não necessariamente coincidem com os nós da malha, o que leva a interpolar para obter os valores nos nós. Dessa forma, a concentração pode ser calculada utilizando uma interpolação bilinear dada por (Oliveira e Batista, 1998 [22]):

$$\begin{aligned} \phi_{i-a,j-b,k-d}^n = & (1-d)\{(1-a)[(1-b)\phi_{i,j,k}^n + b\phi_{i,j\mp 1,k}^n] + a[(1-b)\phi_{i\mp 1,j,k}^n + b\phi_{i\mp 1,j\mp 1,k}^n]\} \\ & + d\{(1-a)[(1-b)\phi_{i,j,k\mp 1}^n + b\phi_{i,j\mp 1,k\mp 1}^n] + a[(1-b)\phi_{i\mp 1,j,k\mp 1}^n + b\phi_{i\mp 1,j\mp 1,k\mp 1}^n]\}, \end{aligned} \quad (3.26)$$

em que os parâmetros a , b e d estão definidos por:

$$a_{i,j,k} = \frac{\Delta t}{\Delta x} u_{i,j,k}, \quad (3.27)$$

$$b_{i,j,k} = \frac{\Delta t}{\Delta y} v_{i,j,k}, \quad (3.28)$$

$$d_{i,j,k} = \frac{\Delta t}{\Delta z} w_{i,j,k}. \quad (3.29)$$

Quando os coeficientes a , b e d assumem valores positivos se utilizam os subíndices $i - 1$, $j - 1$ e $k - 1$, respectivamente; caso contrário, se utilizam os subíndices $i + 1$, $j + 1$ e $k + 1$, respectivamente. A Figura 3.3 mostra um esquema da interpolação.

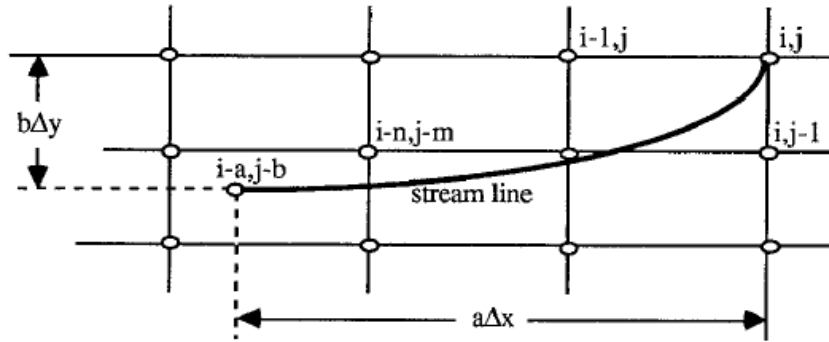


Figura 3.3: A malha euleriana-lagrangeana (Fonte: Casulli, 1990 [1]).

A solução do sistema de equações algébricas fornece os valores da concentração ϕ em cada ponto da malha. Com os valores de ϕ se alteram os valores de massa específica (ρ) conforme:

$$\rho_{i,j,k} = \rho_0 (1 + \alpha \phi_{i,j,k}), \quad (3.30)$$

cujo valor é utilizado na equação 3.10, na resolução das Equações de Navier-Stokes pelo código.

3.3 Dados Batimétricos e sua Agregação ao SuLi

Os dados batimétricos das proximidades da Ilha de Santa Catarina foram obtidos do Centro Hidrográfico da Marinha do Brasil ([4]) (carta 1902). As Figuras 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7 apresentam a batimetria do local, seguindo-se do norte para o sul.

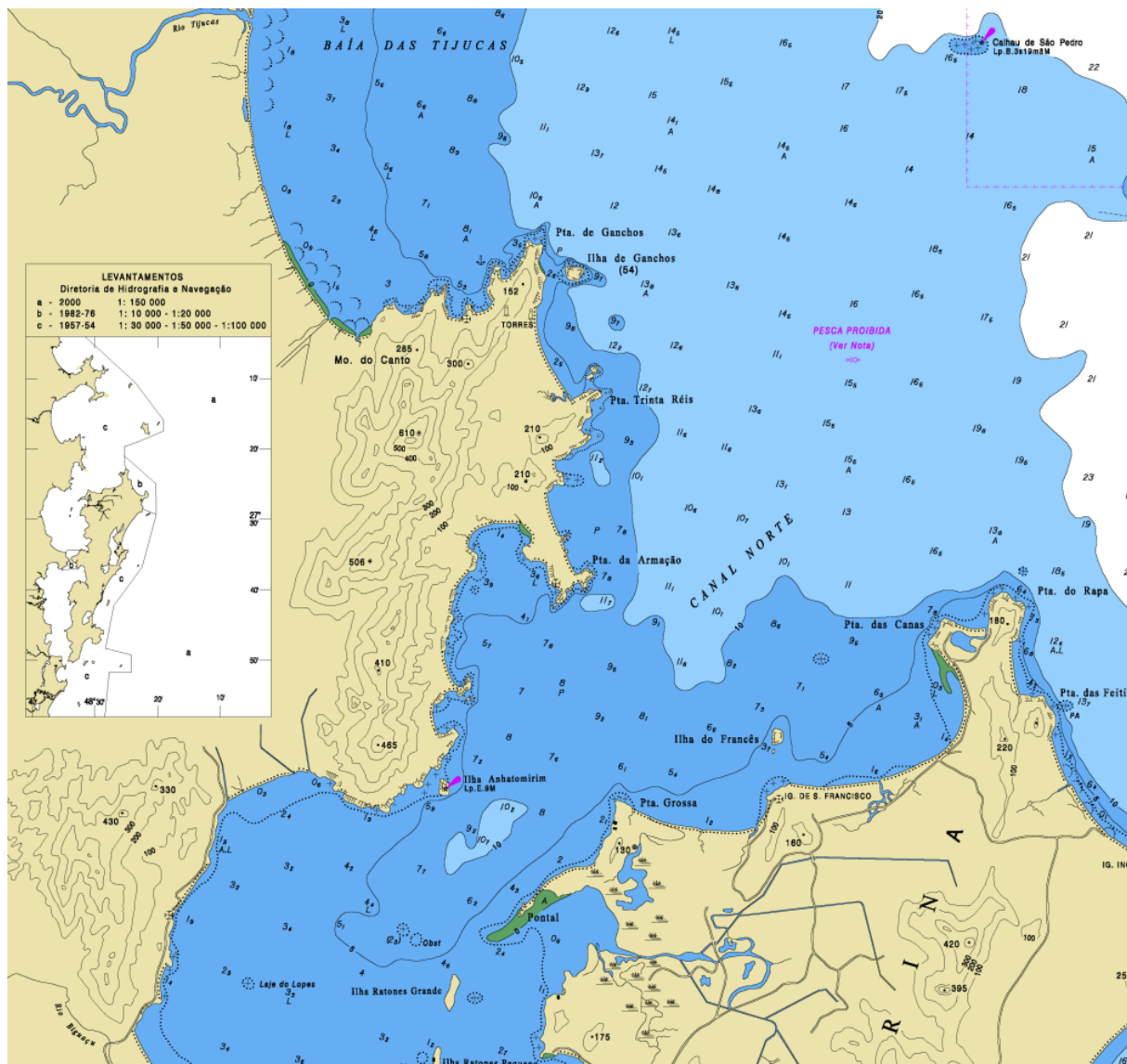


Figura 3.4: Batimetria nas proximidades da Ilha de Santa Catarina, os valores representam as profundidades nos pontos. Branco representa as regiões mais profundas, azul claro representa as regiões de profundidades intermediárias e azul escuro as regiões mais rasas. Em verde regiões de preservação ambiental, em bege as regiões de terra firme - 1

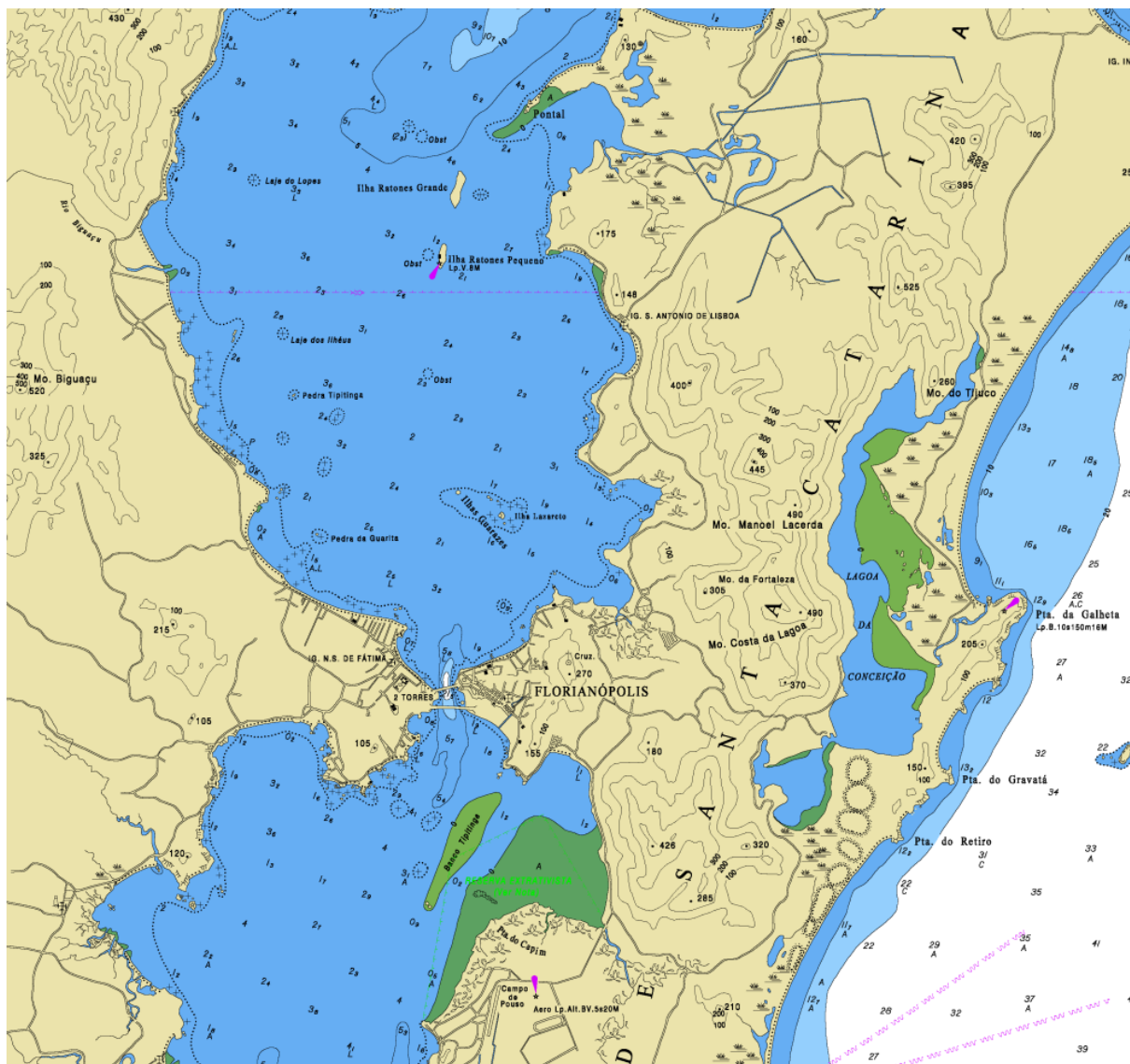


Figura 3.5: Batimetria nas proximidades da Ilha de Santa Catarina, os valores representam as profundidades nos pontos. Branco representa as regiões mais profundas, azul claro representa as regiões de profundidades intermediárias e azul escuro as regiões mais rasas. Em verde regiões de preservação ambiental, em bege as regiões de terra firme - 2

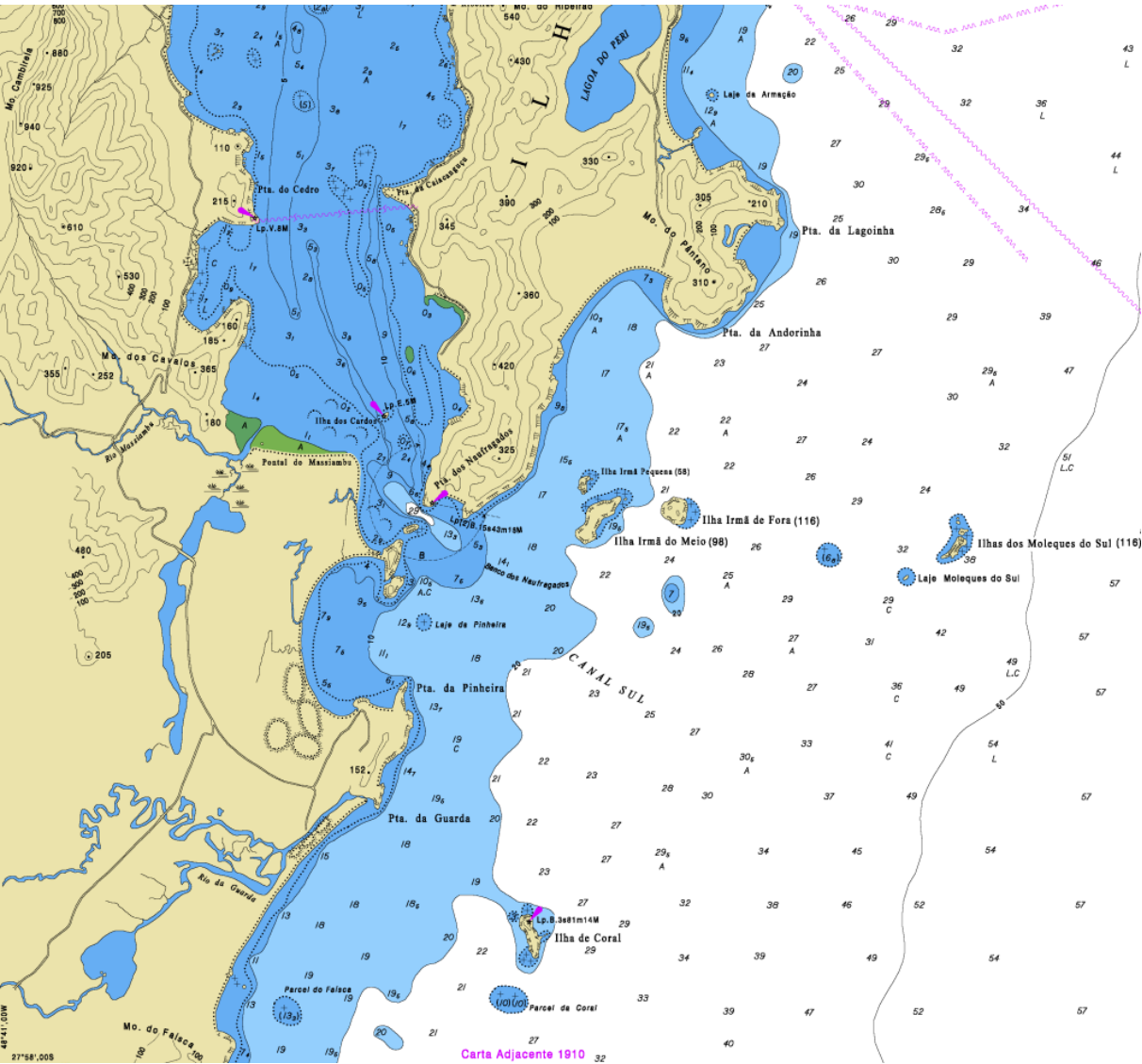


Figura 3.7: Batimetria nas proximidades Ilha de Santa Catarina, os valores representam as profundidades nos pontos. Branco representa as regiões mais profundas, azul claro representa as regiões de profundidades intermediárias e azul escuro as regiões mais rasas. Em verde regiões de preservação ambiental, em bege as regiões de terra firme - 4

Para se fazer a leitura dos dados da batimetria pelo *SuLi*, no ambiente do *software* de geoprocessamento *ArcGIS* (ESRI, 2014 [12]), após a seleção da região de interesse (discutido posteriormente no Capítulo 4), os pontos fora, mas próximos, e todos os pontos dentro da região têm o valor de sua coordenada vertical transferida para ambiente de edição, de onde se interpola, através de ferramenta do *ArcGIS* que utiliza o método proposto por Hutchinson (1989) [14], um mapa (figura 3.8) com as profundidades do leito submarino do local.

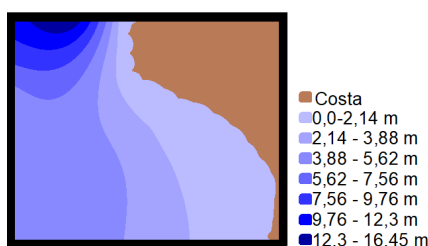


Figura 3.8: Mapa da profundidade da região selecionada nas proximidades da Ilha de Santa Catarina. Latitude de $48^{\circ}34'11''W$ a $48^{\circ}32'56''W$ e longitude de $27^{\circ}36'41''S$ a $27^{\circ}35'45''S$.

O mapa gerado é convertido em uma matriz do domínio com dados de profundidade a cada $73,87m$ em formato *.txt* para o *SuLi*. Se utiliza o Método das Fronteiras Imersas (*Immersed Boundary Method - IBM*) proposto originalmente por Peskin (1972) [24] para representar o fundo. Esse método utiliza elementos de malha dz de um tamanho variável e vale-se dos valores da profundidade. As velocidades e concentrações, dentro dos pontos contidos pelo *IBM* são anuladas e na fronteira com o fluido se utiliza a condição de não deslizamento para a velocidade. A figura 3.9 é o fundo representado no *SuLi*.

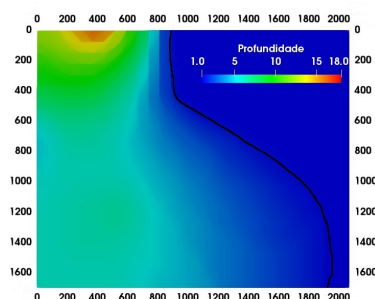


Figura 3.9: Profundidade da região selecionada nas proximidades da Ilha de Santa Catarina representada no *SuLi*. Latitude de $48^{\circ}34'11''W$ a $48^{\circ}32'56''W$ e longitude de $27^{\circ}36'41''S$ a $27^{\circ}35'45''S$.

Capítulo 4

Aplicação

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com as simulações para validação e para casos aplicados à região de Florianópolis. Avaliam-se cenários de interesse, analisando-se locais para a implantação do emissário a diferentes profundidades, bem como a validação do código para as situações simuladas.

4.1 Validação da Equação de Advecção-Difusão

A dinâmica da Equação de Advecção-Difusão (3.18) foi validada simulando uma corrente de densidade experimental produzida por um *lock exchange* (Shin et al., 2004 [26]), em que, dois volumes líquidos com diferentes massas específicas (por exemplo: água pura e água com sedimentos) estão separados e a "comporta" de separação é liberada, criando um gradiente de concentrações (que se traduz em um gradiente de massa específica), causando o movimento. Assim como no trabalho de Shin et al. (2004) [26], a relação entre as massas específicas é ($\gamma = 0,993$) e, levando-se em conta a equação 3.30, tem-se:

$$\gamma = \frac{\rho_0}{\rho} = \frac{\rho_0}{\rho_0(1 + \alpha\phi)} = 0,993 \quad (4.1)$$

Como a variação da concentração ϕ foi estabelecida de $0,0kg/m^3$ a $1,0kg/m^3$, têm-se o coeficiente $\alpha = 1,0018 \cdot 10^{-3}$. O domínio é composto por um tanque com $10,0m$ de comprimento e $1,0m$ de largura e altura. Como condição inicial tem-se metade do domínio preenchido por

$\phi = 1,0 \text{ kg/m}^3$ e outra metade preenchida por $\phi = 0,0 \text{ kg/m}^3$, conforme a figura 4.1.

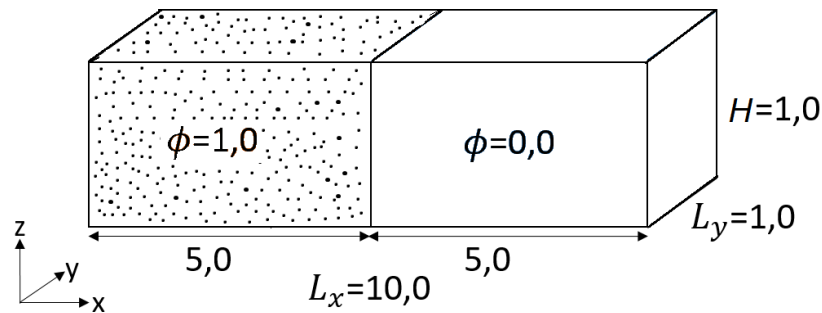


Figura 4.1: Esquema do domínio de simulação para validação com Shin et al. (2004) [26]

Como condição de contorno foi adotado deslizamento livre para a velocidade e fluxo nulo para a concentração em todas as fronteiras. Assim, o avanço temporal da posição da frente da corrente de densidade é dado pela figura 4.2.

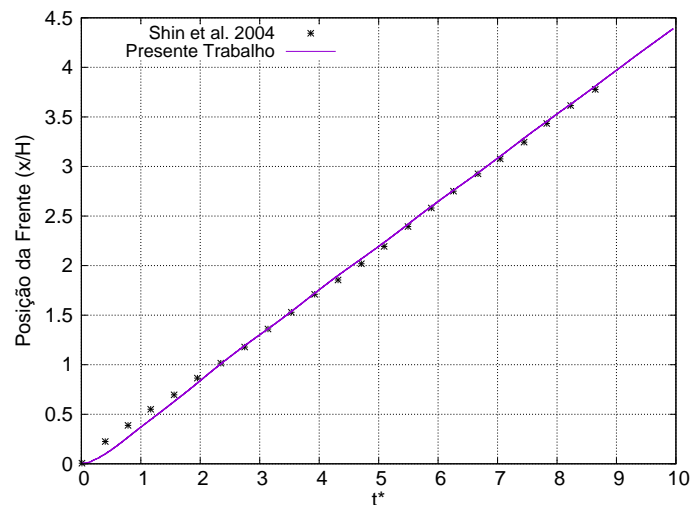


Figura 4.2: Comparação do avanço temporal da posição da frente de corrente de densidade no presente trabalho numérico e no trabalho experimental de Shin et al. (2004) [26]. Linha contínua: presente trabalho. Asteriscos: trabalho de Shin et al. (2004) [26]

Em que na ordenada está a relação x/H , em que x é a posição da frente e H a altura do domínio. Na abcissa está o tempo adimensionalizado t^* , que é definido por:

$$t^* = t \sqrt{\frac{g(1-\gamma)}{H}} \quad (4.2)$$

No qual t representa o tempo em segundos.

Da figura 4.2 é vista uma grande semelhança entre o caso experimental e o resultado numérico, ou seja, o modelo da Equação de Adveção-Difusão é capaz de representar o avanço de uma corrente de densidade com o tempo. A validação foi feita com esse cenário pois a dinâmica da corrente de densidade, principalmente inicialmente, guarda semelhanças dinâmicas com a propagação de efluentes, além de ambos os casos tratarem do transporte de um escalar.

4.2 Análise da Região Central da Cidade

Em primeira análise foi selecionado local próximo a Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), localizada na ilha de Santa Catarina, no centro da cidade, cujas coordenadas geográficas são $48^{\circ}33'22''W$ e $27^{\circ}35'59''S$. Essa escolha se dá por trazer certas vantagens, como um menor custo de implantação, já que o comprimento da tubulação do emissário submarino é muito menor, se comparado com uma disposição do efluente em uma região mais distante.

Assim, a região selecionada, está representada na figura 4.3, delimitada pelos pontos A ($48^{\circ}34'11''W; 27^{\circ}35'45''S$), B ($48^{\circ}32'56''W; 27^{\circ}35'45''S$), C ($48^{\circ}34'11''W; 27^{\circ}36'41''S$) e D ($48^{\circ}32'56''W; 27^{\circ}36'41''S$). Assim, o domínio, representado no *SuLi*, representado na figura 3.9.

4.2.1 Condições de Contorno e Iniciais

Como condições iniciais impõem-se velocidade e concentração zero em todo o domínio. As condições de contorno são definidas para as seis fronteiras do domínio: superior, inferior e as quatro laterais. Na fronteira inferior ($z = 0$) está o leito submarino, que tem uma condição de não deslizamento para a velocidade, definido como:

$$\vec{V} = \vec{0}, \quad (4.3)$$

e para a concentração a condição é de fluxo nulo:

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0. \quad (4.4)$$

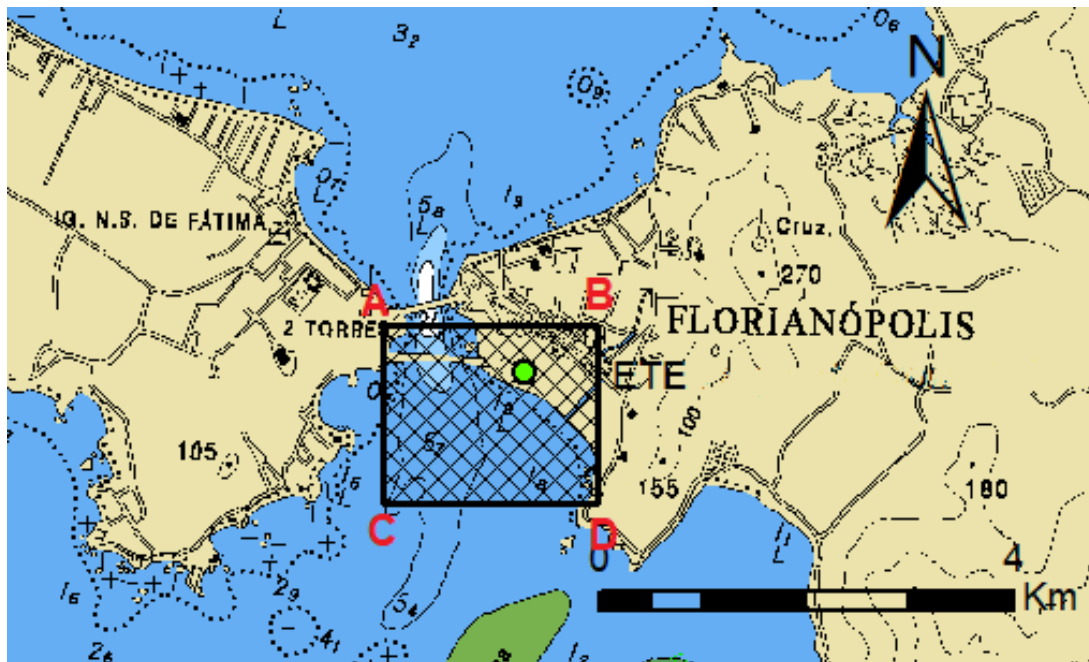


Figura 4.3: Domínio selecionado no centro de Florianópolis, delimitado pelos pontos A ($48^{\circ}34'11''W$; $27^{\circ}35'45''S$), B ($48^{\circ}32'56''W$; $27^{\circ}35'45''S$), C ($48^{\circ}34'11''W$; $27^{\circ}36'41''S$) e D ($48^{\circ}32'56''W$; $27^{\circ}36'41''S$). ETE com localização representada pelo ponto verde.

Na superfície livre ($z = L_z$) tem-se a condição de fluxo nulo para a concentração (equação 4.4) e de deslizamento livre para a velocidade, definida como:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = 0; \quad \frac{\partial v}{\partial z} = 0; \quad \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \text{e} \quad w = 0. \quad (4.5)$$

Nas fronteiras laterais ($x = 0$ e $x = L_x$) a condição de contorno é de fluxo nulo para a concentração:

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = 0, \quad (4.6)$$

e de deslizamento livre para a velocidade, porém definida como:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial v}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \quad \text{e} \quad u = 0. \quad (4.7)$$

Para a entrada do domínio ($y = 0$), dos pontos a cima do leito submarino até a superfície livre, é prescrita uma entrada nula de concentração e uma velocidade em três cenários diferentes, arbitrados em $v_a = 0,25m/s$, $v_b = 0,5m/s$ e $v_c = 1,0m/s$, devido à falta de dados experimentais

para o local, sendo as velocidades nas outras direções zero para os três cenários. Para a saída ($y = L_y$) a condição imposta é de saída livre:

$$\frac{\partial u}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial v}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial w}{\partial y} = 0 \quad \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0. \quad (4.8)$$

Existe, ainda, uma condição de contorno interna para o ponto de disposição do efluente, definindo a concentração ($\phi = 1,0\text{kg}/\text{m}^3$) e a velocidade correspondente a vazão ampliada da ETE de $Q = 612\text{L}/\text{s}$ ($u = 0,17\text{m}/\text{s}$ e $v = w = 0$). A figura 4.4 ilustra as condições de contorno nas fronteiras do domínio.

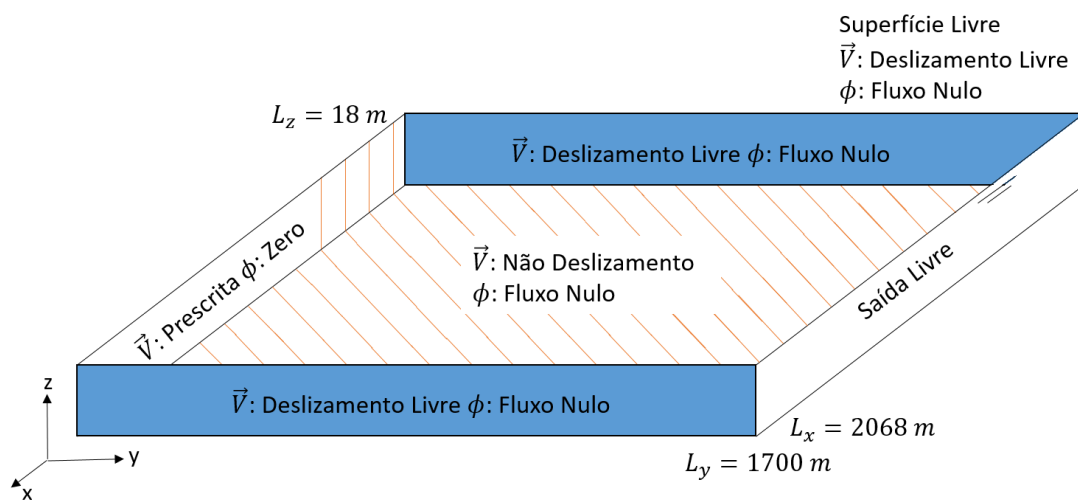


Figura 4.4: Esquema das condições de contorno utilizadas.

4.2.2 Definição e Análise dos Locais de Despejo

Cada simulação possui um local de despejo a uma altura, dessa forma foram selecionados, dois locais para a disposição do efluente, o primeiro, mais próximo a costa (*Local 1 - L1*), foi avaliado em duas possíveis profundidades de disposição $Z = 3,0\text{m}$ (próxima ao fundo) e $Z = 0,5\text{m}$ (próxima à superfície livre). O segundo local de disposição, mais distante da costa (*Local 2 - L2*), foi avaliado para três possíveis profundidades, $Z = 5,25\text{m}$ (próxima ao fundo), $Z = 2,5$ (profundidade intermediária) e $Z = 0,5\text{m}$ (próxima à superfície). Somando, assim, 5 simulações. A figura 4.5 esquematiza os locais selecionados.

Assim, como foram utilizadas três velocidades para a condição de entrada ($v_a = 0,25\text{m}/\text{s}$,

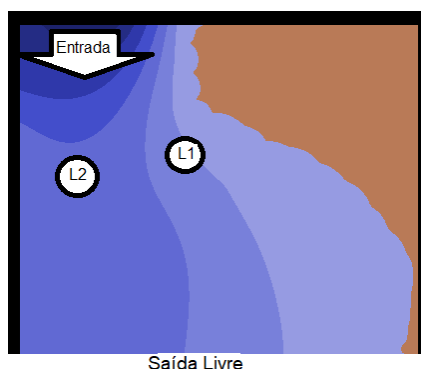


Figura 4.5: Locais $L1$ e $L2$ selecionados. Região de atitude de $48^{\circ}34'11''W$ a $48^{\circ}32'56''W$ e longitude de $27^{\circ}36'41''S$ a $27^{\circ}35'45''S$.

$v_b = 0,5m/s$ e $v_c = 1,0m/s$), totalizaram-se 15 cenários de avaliação, resumidos na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Velocidade de entrada, locais e profundidades dos cenários analisados

Local	Profundidade	$v_a = 0,25m/s$	$v_b = 0,5m/s$	$v_c = 1,0m/s$
$L1$	Fundo	A_1	B_1	C_1
$L1$	Superfície	A_2	B_2	C_2
$L2$	Fundo	A_3	B_3	C_3
$L2$	Intermediária	A_4	B_4	C_4
$L2$	Superfície	A_5	B_5	C_5

Para a comparação dos diferentes locais, foi fixada a velocidade de entrada no domínio. Assim, as figuras 4.6, 4.7 e 4.8 representam a vista superior (de onde se percebe o máximo alcance da concentração) dos diferentes locais de entrada para as velocidades de $0,25m/s$, $0,5m/s$ e $1,0m/s$, respectivamente e em que roxo representa concentrações iguais ou maiores a $0,2kg/m^3$, vermelho representa concentrações iguais ou maiores a $0,1kg/m^3$ e amarelo representa concentrações iguais ou maiores a $0,05kg/m^3$.

A figura 4.6 mostra, no cenário A_1 , uma maior área de concentração $0,2kg/m^3$, em comparação com o cenário A_2 , fruto da menor velocidade existente próximas ao fundo (com uma condição de não deslizamento) e próxima à costa, que tende a não dispersar o poluente, logo atingindo uma área menor, mas mantendo as concentrações em níveis elevados.

Já o cenário A_2 , mais próximo à superfície do que A_1 apresenta uma área maior de dispersão, com uma menor área de concentração $0,2kg/m^3$, mostrando um poluente mais diluído do que o cenário A_1 , fato originado da maior velocidade existente no local. Devido a proximidade com a costa, existe uma facilidade da mesma ser atingida nessa situação (já que em situações reais a

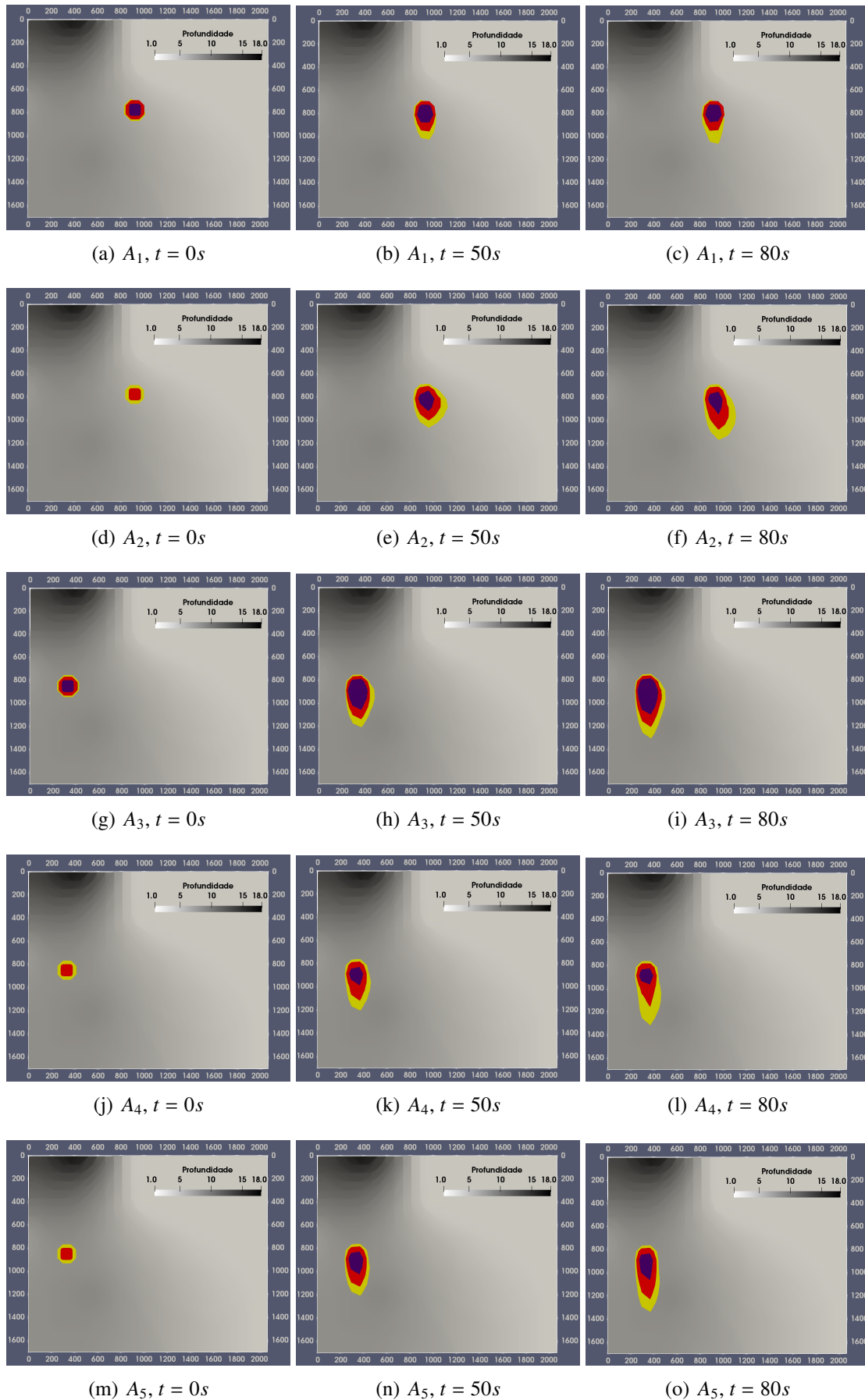


Figura 4.6: Cenário A, observado nos tempos $t = 0$, $t = 500s$ e $t = 800s$. Em que roxo representa $\phi \geq 0,2kg/m^3$, vermelho representa $\phi \geq 0,1kg/m^3$ e amarelo $\phi \geq 0,05kg/m^3$. A profundidade está representada em tons de cinza.

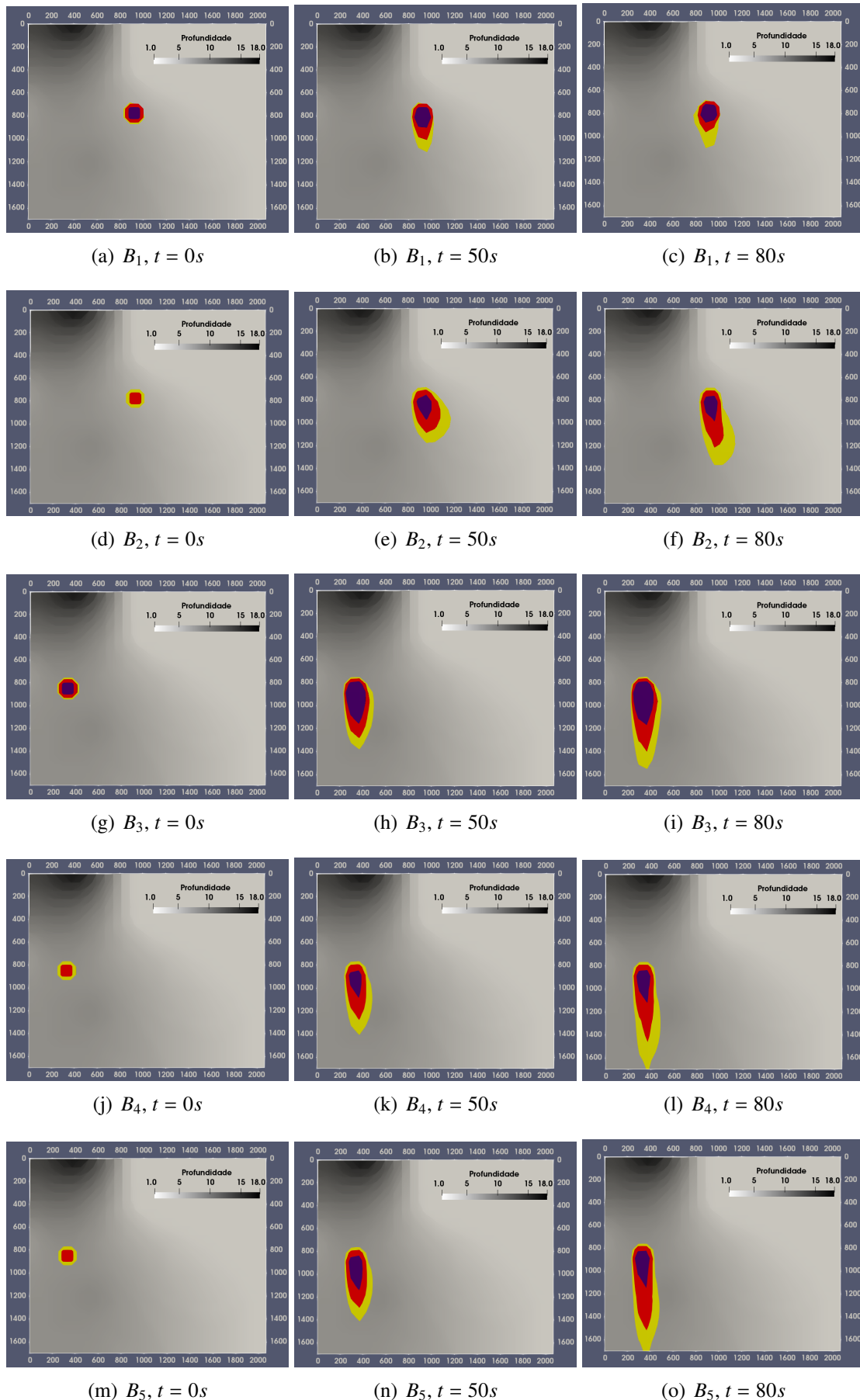


Figura 4.7: Cenário B, observado nos tempos $t = 0$, $t = 500s$ e $t = 800s$. Em que roxo representa $\phi \geq 0,2 \text{ kg/m}^3$, vermelho representa $\phi \geq 0,1 \text{ kg/m}^3$ e amarelo $\phi \geq 0,05 \text{ kg/m}^3$. A profundidade está representada em tons de cinza.

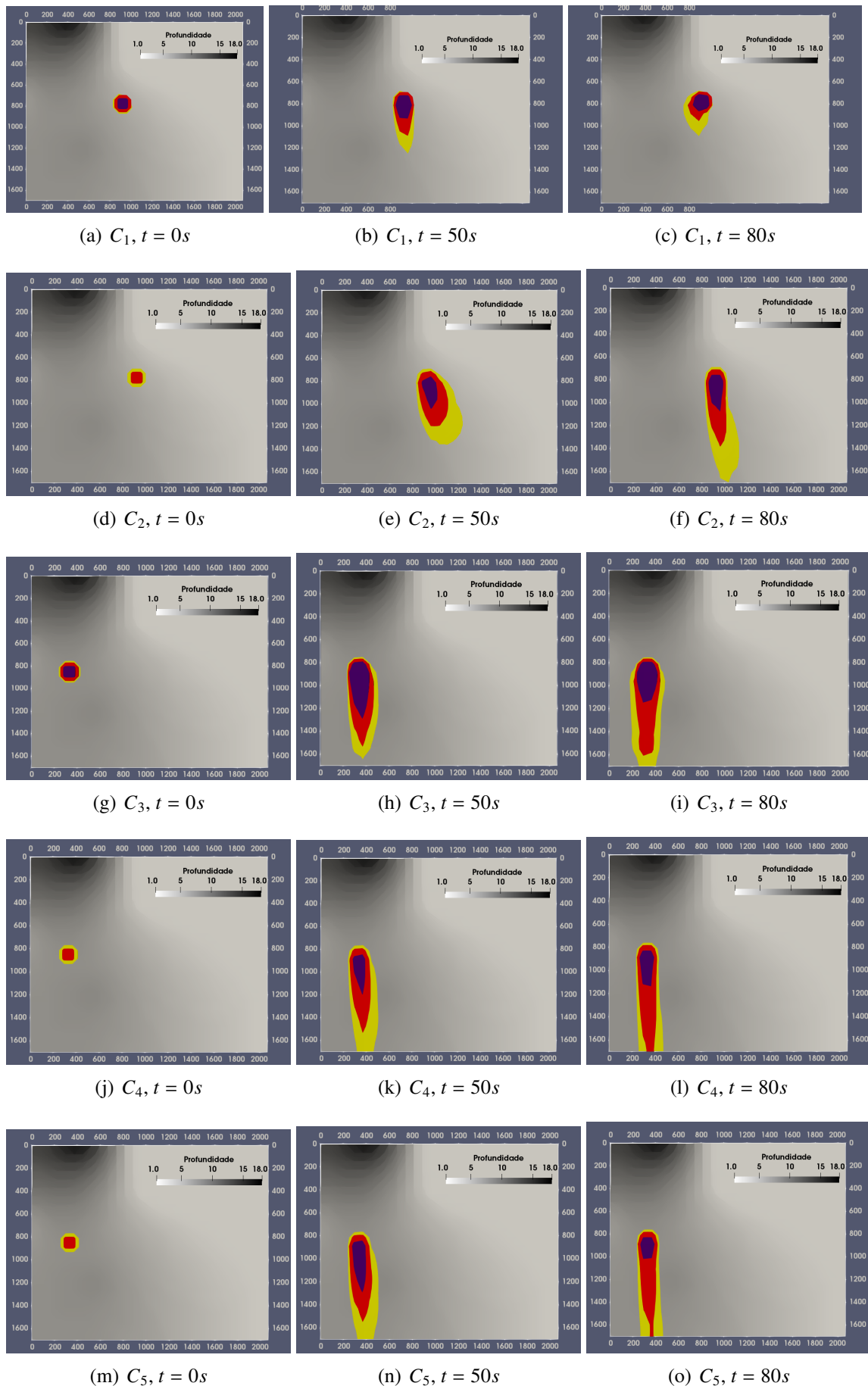


Figura 4.8: Cenário C , observado nos tempos $t = 0$, $t = 50s$ e $t = 80s$. Em que roxo representa $\phi \geq 0,2kg/m^3$, vermelho representa $\phi \geq 0,1kg/m^3$ e amarelo $\phi \geq 0,05kg/m^3$. A profundidade está representada em tons de cinza.

velocidade não é necessariamente unidirecional Norte-Sul). Região de concentração $0,1\text{kg}/\text{m}^3$ é relativamente grande neste cenário.

O cenário A_3 , por estar próximo ao fundo, em uma região de pouca velocidade apresenta uma grande área de concentração $0,2$ (a maior entre os cenários A), mostrando a baixa diluição existente no local, contudo, por estar mais distante da costa, é mais improvável que a mesma seja atingida do que nos cenários A_1 e A_2 . Além disso A_3 apresenta uma área de concentrações elevadas ($\phi = 0,2\text{kg}/\text{m}^3$) maior na direção transversal, se comparado aos cenários A_4 e A_5 ao escoamento, fato relacionado com o termo difusivo da equação 2.8, pois, com as velocidades menores próximas ao fundo, a importância relativa do termo difusivo cresce, como visto neste cenário.

O cenário A_4 , por estar localizado em uma região de profundidade intermediária apresenta velocidades maiores do que o cenário A_3 , o que facilita a dispersão (visível pela menor área de maiores concentrações), além disso, a região predominante é a de concentrações mais baixas ($\phi = 0,05\text{kg}/\text{m}^3$), se comparada com os outros cenários A , indicando a melhor dispersão dos poluentes. A_4 apresenta uma menor variação da velocidade na direção vertical, ou seja, existe uma constância da velocidade acima e abaixo do ponto de despejo.

O cenário A_5 apresenta uma configuração semelhante a A_4 , porém com maiores regiões de concentrações elevadas e medianas ($\phi = 0,1\text{kg}/\text{m}^3$), além de um avanço da região de baixas concentrações um pouco mais adiante e de um formato ligeiramente mais achatado, por localizar-se mais próximo à superfície livre.

A figura 4.7 mostra, no cenário B_1 , a poluição concentrada em uma região próxima ao ponto de disposição, fato devido às baixas velocidades do ponto de disposição no cenário. Contudo, este mesmo cenário apresenta uma dispersão maior do que a simulação A_1 , pois a velocidade v_b é maior do que v_a , facilitando a dispersão da concentração. Novamente, contudo, pelas baixas velocidades no local, a região de altas concentrações é grande, se comparada aos cenários onde a altura de disposição não é no fundo.

O cenário B_2 mostra uma grande área atingida (com o agravante de ser próxima à costa), se comparada com B_1 , com áreas maiores de concentrações intermediárias e baixas do que B_1 , contudo com uma área menor de concentrações mais elevadas, mostrando a maior dispersão

neste cenário.

O cenário B_3 apresenta uma grande região de concentrações elevadas (pouca diluição portanto), pois está localizado numa região próxima ao fundo. B_3 atinge uma área maior do que os cenários B_1 e B_2 , pois está numa região de fluxo mais favorável, no canal central. Além disso, assim como no cenário A_3 , possui uma distribuição maior na direção transversal, pelo mesmo motivo de tal cenário.

O cenário B_4 atinge uma área maior, portanto com uma maior capacidade de diluição, que se traduz numa menor região de concentrações mais elevadas, pois tem uma velocidade maior. O efeito da velocidade em B_4 é visível, pois a área ocupada é consideravelmente maior do que em A_4 , em que a velocidade de entrada no domínio é a metade do que em B_4 .

O cenário B_5 tem um comportamento semelhante ao caso anterior, porém apresenta uma maior região de concentrações intermediárias e uma área de concentrações altas ligeiramente superior a B_4 . Este cenário apresenta concentrações mais diluídas do que B_3 e um formato mais alongado. De uma maneira geral, os cenários B apresentam uma área mais alongados do que os cenários A , fato oriundo da maior velocidade de entrada no domínio.

Os cenários C (figura 4.8), por terem uma maior velocidade de entrada, possuem um formato mais alongado que os demais e apresentam um efeito mais forte da velocidade. O cenário C_1 tem uma área de diluição pequena com formato mais achatado em $t = 500s$ e mais alongado em $t = 800s$, além de apresentar um recuo do tempo $t = 500s$ para o tempo $t = 800s$, oriundo da direção das velocidades desenvolvidas no local ao interagir com a costa.

O cenário C_2 apresenta uma maior área de diluição do que C_1 , predominando uma área de baixas concentrações, mostrando uma maior diluição do que nos outros cenários C , tanto no tempo $t = 500s$ quanto no tempo $t = 800s$, porém o primeiro apresenta um formato mais arredondado, enquanto o segundo um formato mais achatado.

O cenário C_3 apresenta uma grande área para concentrações médias e possui um formato mais arredondado do que C_4 e C_5 no tempo $t = 800s$. Também nesse tempo existe um alcance maior da mancha proporcionado pela velocidade. O cenário C_3 apresenta, ainda, uma maior área de concentrações maiores no tempo $t = 500s$, mostrando a poluição menos diluída neste tempo.

O cenário C_4 , no tempo $t = 800s$ mostra uma região com formato mais achatado, de relativamente pequena área de concentrações maiores (se comparado a C_3 , mas maior se comparado a C_5), mas uma área relevante de concentrações intermediárias (que já saem do domínio).

O cenário C_5 apresenta um comportamento semelhante ao cenário C_4 no tempo $t = 800s$, porém as região de concentrações maiores e intermediárias são menores e mais achatadas, no tempo $t = 500s$ a região de maiores concentrações apresenta uma área maior do que no tempo posterior e a região de menores concentrações já se apresenta na saída do domínio.

Dessa forma, em todas as situações, a direção do escoamento é mais importante do que a direção transversal, ou seja, o termo advectivo é mais importante do que o termo difusivo e com o aumento da velocidade as regiões tendem a ter um formato mais alongado, com maior influência da velocidade.

Os cenários que tem a disposição no fundo (A_1, A_3, B_1, B_3, C_1 e C_3) são os que apresentam menores áreas de diluição, apresentando, em geral, maiores áreas para concentrações mais elevadas, isso se deve pelas baixas velocidades desenvolvidas nos locais pela proximidade com o fundo, além disso as regiões no fundo do local $L1$ (A_1, B_1 e C_1) apresentam influência da região costeira, o que reduz o efeito do campo de velocidades, concentrando ainda mais os poluentes e dificultando sua diluição.

Assim, regiões de profundidade intermediária tem a capacidade de fazer uma melhor diluição, pois a inserção em uma profundidade intermediária se traduz em uma melhor diluição devido à existência de velocidades acima e abaixo para a dispersão do poluente, além de um risco menor de atingir regiões da costa (se o local de disposição for próximo à costa) do que se disposto em regiões superficiais.

Capítulo 5

Conclusões

Muitos efluentes tratados são despejados em corpos de água, afetando sua qualidade e influenciando o bioma. No presente trabalho é estudada a dinâmica do transporte de um contaminante passivo em corpos de água, utilizando simulação numérica tridimensional. Foi utilizado o código hidrodinâmico tridimensional *SuLi* para cálculo de escoamentos com superfície livre e aproximação não hidrostática para o termo de pressão. Para o cálculo do transporte do escalar, neste trabalho foi incorporada uma equação de Advecção-Difusão ao código *SuLi*, com um esquema numérico do tipo *upwind*. A validação foi feita analisando a posição da frente de uma corrente de densidade experimental, obtendo-se uma grande semelhança entre o trabalho experimental e o presente trabalho.

Os dados de batimetria foram obtidos a partir de arquivos disponibilizados pela Marinha do Brasil. Os dados foram interpolados utilizando ferramentas de geoprocessamento e posteriormente exportados para utilização no código por meio de uma rotina de leitura específica, também implementada no *SuLi*.

O termo difusivo da equação de Advecção-Difusão (3.18) tem maior importância onde a velocidade é menor, gerando uma mancha com formato mais arredondada. Tal termo também é mais relevante nas direções transversais ao escoamento principal, em que, novamente, tem um peso maior na equação pelas menores velocidades nessas direções.

Os resultados mostram que existe uma grande dependência do módulo e da direção da velocidade. Como os locais de disposição analisados são confinados pela ilha e o continente o sentido de escoamento é Norte-Sul e Sul-Norte, mas o efeito do fundo e da costa modificam a

direção e o módulo da velocidade do escoamento, trazendo uma mudança nas áreas atingidas pela mancha do efluentes. Desta forma, locais mais próximos à costa estão mais suscetíveis a tais variações devido à geometria do local. Regiões próximas à costa, por terem velocidades menores, possuem um menor poder de diluição do efluente, que tende a atingir concentrações maiores.

Locais próximos ao fundo, por possuírem uma menor velocidade apresentam uma menor região atingida, com concentrações mais elevadas, portanto, menor diluição no meio. Como vantagem, regiões de maior profundidade apresentam facilidades construtivas, como o simples apoio do emissário no leito com o uso de ancoragem, além de, por se tratar de uma região de menor velocidade, uma menor suscetibilidade do emissário a ações de forças de arrasto e sustentação.

Por outro lado, locais de disposição com profundidade próxima à superfície ou profundidades intermediárias tendem a apresentar uma mistura mais bem distribuída, com menores regiões de concentrações mais altas e maiores regiões de concentrações mais baixas, mostrando que existe uma maior diluição. A disposição em regiões mais próximas à superfície pode mais facilmente atingir a costa.

A construção de um emissário em profundidades intermediárias ou superficiais é mais complexa, pois necessita de dispositivos que mantenham sua posição estável e sejam capazes de suportar as cargas existentes no local, além do peso do próprio emissário.

Em suma, de uma maneira geral, além de aspectos hidrodinâmicos, a definição do local passa pelo conhecimento detalhado da região, do regime de correntes, das áreas próximas e atividades nelas desenvolvidas, da existência de populações vulneráveis e das variáveis econômicas, entre outras.

Assim, com base nas simulações realizadas e nos dados disponíveis, regiões de maior velocidade se traduzem em uma maior área atingida pelo poluente, porém com concentrações menores, trazendo uma maior diluição, como o local mais afastado da costa e em profundidade intermediária. Portanto, com base nos dados obtidos, locais mais distantes da costa, em profundidades mais intermediárias trazem uma melhor diluição do esgoto, sendo mais adequado o local *L2* a uma profundidade intermediária.

Referências Bibliográficas

- [1] CASULLI, V. Semi-implicit finite difference methods for two-dimensional shallow water equations. *Journal of Computational Physics* **86** (1990), 56–74.
- [2] CAVALCANTI, J. R., MOTTA MARQUES, D. AND FRAGOSO JR, C. R. Process-based modeling of shallow lake metabolism: Spatio-temporal variability and relative importance of individual processes. *Ecological modelling* 323, 28-40, 2016.
- [3] ÇENGEL, Y. A., AND CIMBALA, J. M. *Mecânica dos Fluidos: fundamentos e aplicações*. McGraw-Hill, São Paulo, 2007.
- [4] CENTRO HIDROGRÁFICO DA MARINHA DO BRASIL, . Cartas náuticas em formato raster, disponível em: <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-segnav/cartas-raster>, acessado em 10 de novembro de 2017.
- [5] CHAPRA, S.C., PELLETIER, G.J. AND TAO, H. QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality, Version 2.11: Documentation and Users Manual. Civil and Environmental Engineering Dept., Tufts University, Medford, MA. 2008. Steven.Chapra@tufts.edu
- [6] CHEN, X. A fully hydrodynamic model for three-dimensional, free-surface flow. *Int. J. Numer. Meth. Fluids* **42** (2003), 929–952.
- [7] CONAMA 274, de 29 de novembro de 2000. *Conselho Nacional do Meio Ambiente. Ministério do Meio Ambiente. Brasil* (2000).
- [8] CONAMA 357, de 17 de março de 2005. *Conselho Nacional do Meio Ambiente. Ministério do Meio Ambiente. Brasil* (2005).

- [9] CONAMA. 430, de 13 de maio de 2011. *Conselho Nacional do Meio Ambiente. Ministério do Meio Ambiente. Brasil* (2011).
- [10] CUNHA, A. C., PINHEIRO, L. A. R., CUNHA, H. F. A., SCHULZ, H. E., BRASIL JR, A. C. P. AND SOUZA, E. B. Simulação da Hidrodinâmica e Dispersão de Poluentes com Monitoramento Virtual no Rio Matapi-AP. REA Revista de estudos ambientais (Online) v.13, n. 2, p. 18-32. 2011
- [11] DE OLIVEIRA FORTUNA, A. *Técnicas computacionais para dinâmica dos fluidos: conceitos básicos e aplicações*. Edusp, 2000.
- [12] Desktop, ESRI ArcGIS Redlands, CA, USA: Environmental Systems Research Institute. Release 10.2.2, 2014
- [13] EDDY, M. ., BURTON, F. L., STENSEL, H. D., AND TCHOBANOGLIOUS, G. *Wastewater engineering: treatment and reuse*. McGraw Hill, 2003.
- [14] Hutchinson, M.F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. *Journal of hydrology*, Elsevier, 106, 211-232, 1989.
- [15] INFORZATO, N. F. Dispersão de poluentes num sistema ar-agua : modelagem matemática, aproximação numérica e simulação computacional. Tese (doutorado). Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica, Universidade Estadual de Campinas, 2008.
- [16] LAIZET, S., AND LAMBALLAIS, E. High-order compact schemes for incompressible flows: A simple and efficient method with quasi-spectral accuracy. *Journal of Computational Physics* 228, 16 (2009), 5989–6015.
- [17] MACHADO, M. B., FURLAN, L. T., FURLAN, M. L., TOMAZ, E. AND NUNHEZ, J. R. Software para modelagem de dispersão de efluentes em rios. *Engenharia Sanitária e Ambiental*. v.13. N. 3. p. 291-297, 2008.
- [18] MARSHALL, J., HILL, C., PERELMAN, L., AND ADCROFT, A. Hydrostatic, quasi-hydrostatic and nonhydrostatic ocean modeling. *Journal of Geophysical Research* **102**, n.C3 (1997), 5733–5752.

- [19] MARTINS, L. A.-C. P., AND MARTINS, R. D. A. Infecção e higiene antes da teoria microbiana: a história dos miasmas, 2015.
- [20] MONTEIRO, L. R. Simulação numérica de escoamentos com superfície livre com aproximação não-hidrostática. Dissertação (mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.
- [21] MONTEIRO, L. R. Simulação numérica direta de alta ordem para escoamentos bifásicos água-ar Tese (doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.
- [22] OLIVEIRA, A., AND BAPTISTA, A. On the role of tracking on eulerian-lagrangian solutions of the transport equation. *Advances in Water Resources* **21** (1998), 539–554.
- [23] PUHALES, F. S., DEMARCO, G., MARTINS, L. G. N., ACEVEDO, O. C., DEGRAZIA, G. A., WELTER, G. S., COSTA, F. D., FISCH, G. F., AND AVELAR, A. C. Estimates of turbulent kinetic energy dissipation rate for a stratified flow in a wind tunnel. *Physica A* **431** (2015), 175–187.
- [24] PESKIN, C. S. *Flow patterns around heart valves: a digital computer method for solving the equations of motion*. Phd thesis, Physiol., Albert Einstein Coll. Med., Univ. Microfilms. Bronx, NY, 1972.
- [25] SCHETTINI, E. *Modelo Matemático Bidimensional de Transporte de Massa em Elementos Finitos com Ênfase em Estuários*. PhD thesis, dissertação (mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.
- [26] SHIN, J. O., DALZIEL, S. B., AND LINDEN, P. F. Gravity currents produced by lock exchange. *J. Fluid Mech.* **521** (2004), 1–34.
- [27] SOUZA, J. F. A. D., OLIVEIRA, L. R. D., AZEVEDO, J. L. L. D., SOARES, I. D., AND MATA, M. M. Uma revisão sobre a turbulência e sua modelagem. *Revista Brasileira de Geofísica* **29**, 1 (2011), 21–41.

- [28] LARENTIS, D. G., COLLISCHONN, W. AND TUCCI, C. E. M. Simulação da Qualidade de Água em Grandes Bacias: Rio Taquari–Antas, RS. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 13, N. 3, p. 5-22, 2008
- [29] WARN, T. SIMCAT 11.5 a guide and reference for users. Environment Agency, Available at: www.environmentagency.gov.uk/static/documents/, 2010.
- [30] WOOL, T. A., AMBROSE, R. B., MARTIN, J. L., COMER, E. A. AND TECH, T. Water quality analysis simulation program (WASP). Users Manual, Version 6, 2006.
- [31] YU, X., HSU, T.-J., AND BALACHANDAR, S. Convective instability in sedimentation: 3-d numerical study. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 119, 11 (2014), 8141–8161.