

# Modelagem Ambiental: Perspectivas e Contribuições

Ruth da Silva Brum, Cheron Silveira Neves, Eduardo de Paula Kirinus, Rosana dos Santos, Leonardo Ramos Emmendorfer

**Resumo** – No presente artigo é descrito alguns aspectos de trabalhos sobre a modelagem ambiental aliado a modelagem computacional, em relação a modelos já existentes. Os trabalhos analisados abordam algumas das grandes áreas de interesse atual, como por exemplo, problemas ambientais relacionadas a poluentes, ecossistemas e oceanos. Além disso, será descrito alguns dos principais *softwares* utilizados atualmente para o estudo de tais modelos. Este trabalho visa contribuir e incentivar o desenvolvimento de novas pesquisas na área da modelagem computacional.

**Palavras-chaves** – Modelagem Ambiental, Modelagem Computacional, Atividades interdisciplinares.

## I. INTRODUÇÃO

Em linhas gerais, a modelagem ambiental é qualquer abstração do mundo natural com algum poder de prever eventos com base em princípios gerais. A modelagem computacional é uma grande aliada da modelagem ambiental ao delinear desde a concepção desses princípios na forma de equações matemáticas (etapa de modelagem matemática), passando pela busca de alternativas de solução dessas equações, seja por técnicas analíticas (utilizando diferentes métodos matemáticos), como por técnicas numéricas onde são utilizados métodos como diferenças finitas [1], elementos finitos [2], volumes finitos [3]-[4], ou mesmo analítico-numéricas, como é o caso dos chamados métodos de transformadas integrais generalizadas [5] e, por fim (ou ao mesmo tempo), simulando-se os fenômenos computacionalmente (utilizando diferentes ferramentas, *softwares* e linguagens de programação). Tais técnicas permitem em muitas situações, avaliar até mesmo em tempo real e com boa precisão, os impactos ambientais envolvidos em problemas como: dispersões de poluentes em rios ou atmosfera, dinâmicas hídricas, epidemias, mudanças climáticas, entre outras. Na seção a seguir (seção II), será ilustrada uma breve revisão bibliográfica de aspectos da modelagem computacional, os quais envolvem modelos já existentes, de três grandes áreas de interesse atual como os

modelos de poluição, de modelos de ecossistemas e de modelos oceânicos.

## II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### A. Modelos Ambientais Aplicados a Poluição

Nas engenharias químicas, oceânicas e de recursos hídricos, dentre os diversos sistemas computacionais (*softwares*) de modelagem de dispersão de poluentes, são muito utilizados os *softwares* Delft3D, o TELEMAC e o Mohid.

O sistema Delft3D elaborado pela *WL Delf Hydraulic*, na Holanda, é capaz de simular fluxos não estacionários em duas ou três dimensões, fenômenos de transporte resultantes de marés, descarga de água e efeitos meteorológicos, incluindo o efeito de diferenças de densidade devido a gradientes horizontais dos campos de temperatura e salinidade [6]. Sendo assim, tal *software* pode ser utilizado em problemas envolvendo diferentes ambientes, como por exemplo, em mares, regiões costeiras, estuários, reservatórios e rios [7].

O Delft3D [8] é capaz de resolver as equações de *Navier-Stokes* [1] para um fluido incompressível levando em consideração aproximações para águas rasas [9], ou ainda resolver as equações de *Saint-Venant*, no qual as escalas de comprimento e de tempo são significativamente maiores do que a escala vertical [10]. Neste *software* conjunto de equações diferenciais parciais é discretizado a partir do método de diferenças finitas.

Desenvolvido pelo *Laboratoire d'Hydraulique* (LNH) na França, o sistema TELEMAC [11] é baseado em métodos de elementos finitos e apresenta uma estrutura modular, na qual os resultados podem ser usados em outros módulos do sistema para lidar com qualidade da água, transporte de sedimentos e modelos de ondas [12]. O TELEMAC baseia-se na equação da continuidade da massa e nas duas equações do momento e derivadas das equações tridimensionais de *Navier-Stokes* [13].

Por fim, o sistema Mohid [14], desenvolvido no Instituto Superior Técnico de Lisboa (Portugal), compreende um conjunto de módulos capazes de simular fenômenos de dispersão (com abordagens lagrangeana e euleriana), qualidade da água e transporte de sedimentos (coesivos e não coesivos). Tal *software* utiliza métodos de diferenças finitas e resolve equações para águas rasas usando um algoritmo semi-implícito, além disso, ele permite a simulação de escoamentos produzidos por diferentes agentes como marés, ventos e as ondas produzidas pelos ventos.

Nota-se que as metodologias numéricas como elementos finitos e diferenças finitas destacam-se nestes *softwares*

comerciais. Por outro lado, técnicas híbridas analítico-numéricas como é o caso da GITT (Técnica da Transformada Integral Generalizada) e da GILTT (Técnica da Transformada Integral de Laplace Generalizada) vêm sendo extensivamente pesquisadas e desenvolvidas nos últimos anos, permitindo a simulação de poluentes em diferentes ambientes como cita [15].

Além das equações de *Navier-Stokes* [3]-[16] e de *Saint-Venant*, é importante também resolver equações de transporte como é o caso da chamada equação de advecção-difusão (ou convecção-difusão) que surge, por exemplo, na modelagem da dispersão de poluentes na atmosfera ou em rios e canais.

*B. Modelos Ambientais Aplicados a Ecossistemas*

Os modelos ecossistêmicos servem como ferramentas de manejo do ambiente, em vista disto, muitos modelos vêm sendo desenvolvidos nos últimos anos, visando contribuir com diferentes situações que envolvem o meio ambiente.

Um dos primeiros modelos matemáticos utilizados na ecologia foi o modelo desenvolvido por [17], o qual era utilizado para prever o crescimento da população humana na ausência de restrições ambientais, no qual a população aumenta a uma taxa fixa conforme [18]. Tal modelo pode ser descrito pelo problema de valor inicial, ou seja:

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = rN \\ N(0) = N_0 \end{cases}, \quad (1)$$

cujas solução analítica é dada por:

$$N(t) = N(0)e^{rt}, \quad (2)$$

onde  $N(t)$  representa o número de indivíduos no tempo  $t$  e  $r = (\alpha - \beta)$  representa a taxa de crescimento intrínseca, ou seja, a diferença entre a taxa de natalidade ( $\alpha$ ) e a taxa de mortalidade ( $\beta$ ) da população.

A idéia do modelo de Malthus é muito simples: quanto mais gente existir, mais rapidamente a população vai aumentar. Como uma população não pode crescer indefinidamente, devido ao esgotamento dos recursos disponíveis tornando a expansão limitada. Partindo deste princípio, no ano de 1838, [19] propôs uma modificação na equação de Malthus, considerando que os recursos para a sobrevivência da população fossem limitados, e que a taxa de crescimento da população fosse proporcional a população em cada instante, ou seja, a taxa relativa de crescimento demográfico diminui com o aumento da população, chegando a zero se uma dada população-limite (determinada pelos recursos disponíveis ou outras restrições) for alcançada.

O modelo de Verhulst é descrito pelo seguinte problema de valor inicial:

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = rN(1 - \frac{N}{K}) \\ N(0) = N_0 \end{cases}, \quad (3)$$

cujas solução analítica é dada por:

$$N(t) = \frac{K}{1 + CKe^{-rt}}, \quad (4)$$

$$C = \frac{1}{N(0)} - \frac{1}{K}, \quad (5)$$

onde  $K$  representa o número máximo de indivíduos.

Posterior aos modelos de Malthus e de Verhulst surgiu o modelo de Lotka-Volterra. Neste modelo interagem duas populações distintas (presas e predadores), no qual envolvia um par de equações diferenciais não lineares e de primeira ordem, propostas independentemente por [20] e [21].

O objetivo de Volterra era a análise das variações cíclicas observadas nas populações de tubarões e pequenos peixes no mar Asiático. Com isso, ele descreveu a relação entre presa e predador a partir das equações diferenciais a seguir:

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = \alpha N - k_1 NP \\ \frac{dP}{dt} = k_2 NP - \beta P \end{cases}, \quad (6)$$

$N$  - Número de presas

$P$  - Número de predadores

$\alpha$  - Taxa de natalidade da presa

$\beta$  - Taxa de mortalidade do predador

$k_1, k_2$  - Constantes

O modelo de Lotka e Volterra foi um avanço na história de modelos ecossistêmicos, já que este explicava o comportamento de uma comunidade e não somente de uma população ou espécie, e tem servido de inspiração para muitos trabalhos nesta área.

*C. Ferramentas Utilizadas para Modelos Ecossistêmicos*

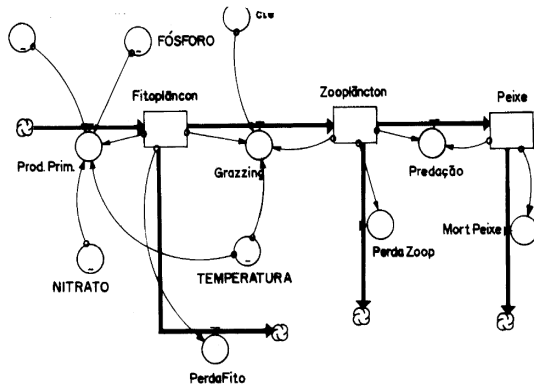
a) **ECOPATH**

O ECOPATH é um programa de computação gratuito, o qual descreve quantitativamente as trocas energéticas entre componentes de um ecossistema aquático [22]. Neste programa o pesquisador deve informar os valores de crescimento e consumo de cada um dos compartimentos do modelo, e deste modo, o programa faz o balanceamento dinâmico entre os compartimentos, permitindo a validação da capacidade do ecossistema em suportar impactos oriundos da pesca e outras atividades humanas [23].

b) **STELLA**

O *Structured Thinking Experimental Learning Laboratory with Animation* (STELLA), desenvolvido em 1987, e é geralmente utilizado para criar modelos dinâmicos em diversas áreas, já que não requer grandes conhecimentos de métodos matemáticos [24].

A construção de um modelo no STELLA consiste em desenhá-lo na tela (Figura 1), com as variáveis de estado (retângulos), que são as variáveis de interesse, e com as variáveis forçantes (círculos), que influenciam as variáveis de estado, para depois escrever as equações para cada inter-relação entre os componentes. Tais equações descreverão toda a dinâmica e o comportamento do modelo, além disso, as mesmas não precisam ser resolvidas analiticamente, já que é possível escolher um método numérico para resolvê-las.



**Figura 1:** Modelo ELLOBO para a Represa do Broa (SP). [18]

#### D. Perspectivas e Contribuições da Modelagem de Ecossistemas

Existe uma preocupação com as constantes ameaças a humanidade devido ao aquecimento global e as mudanças climáticas que tem provocado questionamentos como: Quantas espécies estão ameaçadas de extinção? Que conseqüências as mudanças climáticas terão na biodiversidade? Que impacto terá uma espécie não-nativa em determinada região?

Sabe-se que existe cerca de 11.046 espécies de plantas e animais em risco de extinção, registrado pela União Internacional pela Conservação da Natureza e Recursos Naturais. Tais informações podem ser quantificadas utilizando métodos de modelagem computacional, como por exemplo, o método desenvolvido pelo Centro de Referência em Informação (Cria), do programa Biota da FAPESP, em conjunto com outras 10 instituições brasileiras e estrangeiras.

O biólogo norte-americano Andrew Peterson, do Centro de Pesquisa de Biodiversidade e História Natural da Universidade do Kansas nos Estados Unidos, que integra o programa Biota, revela que a elevação de um grau na temperatura da Terra é essencialmente a mesma coisa que empurrar as zonas climáticas para cima, em direção aos pólos, e as conseqüências deste fato atingem todo o ecossistema [25]. Estimar o tamanho das populações antes e depois do aumento de um grau não é uma tarefa fácil, e por isso se tem a necessidade de utilizar modelagem computacional. Um exemplo deste tipo de abordagem pode ser observado na Amazônia, onde o ecossistema não é homogêneo, mas sim complexo, ou seja, composto por milhões de espécies de plantas, animais e microrganismos, o que vem a tornar difícil a previsão do comportamento de todas as espécies.

O software Garp (*Genetic Algorithm Rule Set Prediction*) é de acesso gratuito e tem ganhado espaço na modelagem ambiental, pois nele é possível criar modelos de nicho ecológico adotando diferentes pontos de localização. Neste software é possível combinar diferentes parâmetros ambientais que influenciam várias espécies na capacidade de sobreviver como, por exemplo, a temperatura, alimentação, pH, e outros.

Os modelos desenvolvidos no GARP [26] também podem prever com uma relativa precisão a distribuição geográfica de espécies e atuar em inúmeras aplicações, como por exemplo,

prever a distribuição espacial de um determinado animal em um habitat e assim, usar esses mapas para priorizar áreas de conservação, ou ainda, comparar espaços geográficos para prever mudanças climáticas em diferentes pontos do mundo, no modelo chamado *General Circulation Models* (GCM) [27], o qual é desenvolvido também no programa Garp.

#### E. Ferramentas Utilizadas para Modelos de Oceanos

Modelos numéricos tem se tornado um componente essencial na maioria das pesquisas relacionadas à oceanografia física. Uma vez dominada pelos especialistas, a interpretação dos resultados torna-se uma prática rotineira dos pesquisadores. Os modelos teóricos idealizados por [28] e [29], por exemplo, tentavam imitar um fenômeno físico observado visualmente, ou através de dados, enquanto que atualmente, os modelos estão tão próximos da realidade, que as coletas de dados tendem a ser seguidas através da modelagem do fenômeno de interesse. Os métodos computacionais disponíveis atualmente permitem que praticamente qualquer cientista seja capaz de criar seus próprios modelos e comparar seus resultados com os dados obtidos em campo [30].

Os estudos dos oceanos foram realizados partindo de diversas vertentes, sempre de acordo com a necessidade e o propósito de cada estudo. O interesse pelo estudo das ondas e de movimentos ondulatórios em fluidos avançou incrivelmente, desde o modelo simplório de [29]. Posteriormente, inúmeros pesquisadores adaptaram seus modelos e equações para estudar fenômenos a parte, como [31] que associou a ação do vento na geração de ondas. Além disso, vários outros autores demonstraram uma grande evolução nas áreas de transporte escalar, refração e espectro de ondas [32]- [33]- [34]- [35]- [36]- [37].

Charney, *et al.* [38] realizaram pela primeira vez com sucesso uma previsão numérica de uma climatologia dinâmica, posteriormente, seu modelo foi aplicado para o estudo de fluidos em função de vórtices e ondas de gravidade. O estudo de modelos oceânicos teve início com [39], que conseguiu simular corretamente um oceano fechado, demonstrando corretamente todas as condições de borda. Em seguida, [40] investigou o comportamento não-linear de um oceano através da escolha de diferentes parâmetros de Rossby, número adimensional que define a importância da aceleração de Coriolis no estudo de um fluxo, e o número de Reynolds, que define a estabilidade de um fluxo variante entre laminar e turbulento [41]. Pedlosky, J. [42] estudou as correntes de contorno oeste com aplicação das ondas de rossby.

#### F. Modelos Oceânicos de Ondas

A evolução dos modelos de onda envolve desde modelos simplificados sem nenhuma interação não-linear, até modelos parametrizados e outros discretos com todo o espectro de frequência [43]-[44]. Segundo [36], alguns modeladores se agruparam para analisar as feições das ondas, o que originou posteriormente o modelo WAM (*Wave model*) criado pelo grupo WAMDI (*Wave Model Development and Implementation Group*, [45]).

Em 1964, desenvolveu-se o modelo de terceira geração, em que não se assume qualquer tipo de restrição à forma do espectro, sendo baseado na equação de balanço da energia, e

que foi o pioneiro a resolver por completo a equação da ação de onda, incluindo a interação não-linear entre elas. Este modelo tem capacidade de simular regiões costeiras até a zona de rebentação, levando em consideração o deslocamento, a variação de profundidade, as correntes e a geração de ondas pelo vento.

Booij, *et al.* [46] comentam que a utilização do modelo WAM foi possível por três motivos: primeiro porque os modelos até então existentes não possuíam uma boa precisão, funcionando para algumas regiões, e falhando para outras; porque ocorreu um significativo desenvolvimento tecnológico dos computadores, o que tornou possível a resolução completa da equação do balanço de energia, o que requer um grande processamento de dados, e terceiro porque ocorreu um significativo desenvolvimento do sensoriamento remoto e de novos aparelhos que calculam os parâmetros de onda *in situ*, o que possibilita a calibração dos modelos até a obtenção de valores aceitáveis.

Os modelos de onda de terceira geração que são mais utilizados pelos pesquisadores são o SWAN (*Simulating Waves Nearshore*, ([37]-[43]-[46]), o WAVEWATCH III ([47]-[48]) e o TOMAWAC (*Telemac Based Operational Model Addressing Wave Action Computation*, [49]), dentre outros.

Booij, *et al.* [46] desenvolveram na *Delft University of Technology* o modelo SWAN, que baseia-se na resolução da equação de conservação da energia de onda, considerando o comportamento físico das ondas em águas rasas. Os autores desenvolveram o modelo para estimar condições de onda de pequenas escalas em regiões costeiras com águas rasas, ilhas, com regimes de maré, ventos locais e correntes ambientais, além de um módulo de dissipação de energia para fundos lamosos [50]-[51] tornando possível a análise da interação da climatologia das ondas com a morfodinâmica costeira.

O WAVEWATCH III [47] é um modelo de terceira geração desenvolvido pela *National Centers for Environmental Prediction (NOAA/NCEP)*, o qual gera dados de altura significativa, período de pico e direção de pico. Este foi criado a partir dos modelos WAVEWATCH I e II, sendo o primeiro desenvolvido pela *Delft University of Technology* [47] e o segundo pela NASA (*Goddard Space Flight Center*). Os cálculos resolvidos neste modelo fazem a discretização da energia em componentes espectrais.

Outro modelo numérico que vem sendo utilizado em regiões costeiras para alimentar modelos locais e estudar a hidrodinâmica é o TOMAWAC, um módulo de processos ondulatórios do modelo TELEMAC [15], que utiliza-se da resolução da equação de evolução da energia de onda.

Em uma comparação [52], mostraram que o modelo TOMAWAC possui capacidade para reproduzir a convergência de energia de onda, e apresenta mais uniformidade entre as direções de onda do que o observado. Os cálculos resolvidos nesse modelo fazem a discretização da energia em componentes espectrais. Um estudo do potencial energético das ondas na Plataforma Continental do Sul do Brasil [49] foi realizado utilizando o modelo TOMAWAC [15].

Atualmente, o sistema TELEMAC é um dos sistemas de simulação oceânico mais completo e amplamente utilizado para estudos da dinâmica da plataforma continental do sul do

Brasil, que baseia-se na técnica de discretização espacial em elementos finitos. Através de estudos pioneiros da hidrodinâmica da Lagoa dos Patos [53], utilizando simulações bidimensionais e tridimensionais, foram descritas as principais forças da circulação estuarina.

Monteiro [54], analisando a dinâmica da pluma, utilizou simulações bidimensionais para estudar os efeitos da descarga, maré e ventos sobre a pluma. Processos morfodinâmicos foram estudados através de simulações bidimensionais acopladas a um módulo de dispersão de sedimentos ([55]-[56]).

Recentemente, [57]-[58]-[59] realizaram estudos de simulação tridimensional descrevendo a ação das principais forças que atuam na pluma da Lagoa dos Patos.

Por fim, tem-se o modelo numérico denominado *Princeton Ocean Model (POM)*, desenvolvido por [60], que baseia-se na técnica de elementos finitos e que é utilizado para o estudo da circulação oceânica tridimensional, bem como a dinâmica de regiões costeiras, lagoas, baías e estuários. O POM já foi implementado com sucesso em várias regiões do mundo, como por exemplo, os estudos realizados na Baía de Chesapeake [61] e no estuário Hudson-Raritan [62]-[63]. No Brasil, pode-se citar os estudos na região costeira de Santo [64] e na Lagoa dos Patos [65]. Uma descrição completa e detalhada do modelo pode ser encontrada em [60].

### III. CONCLUSÃO

O presente artigo apresentou uma diversidade de aspectos do estado da arte da modelagem computacional aliado a modelos ambientais. Além disso, foram descritos alguns dos principais *softwares* utilizados atualmente para o estudo de modelos ambientais aplicados à poluição, assim como também realizou-se uma abordagem dos diferentes modelos de ecossistemas. Finalmente, traçou-se um panorama geral dos trabalhos desenvolvidos na modelagem da oceanografia.

Espera-se com este artigo, a partir do levantamento dos diversos referenciais teóricos os quais envolvem a utilização de modelagem ambiental, vir a contribuir e incentivar o desenvolvimento de novas pesquisas na área de modelagem computacional, não somente em modelos ambientais, mas também em outras áreas do conhecimento.

### IV. REFERENCIAS

- [1] SHU, CHI-WANG. 2001. *High Order Finite Difference and Finite Volume WENO Schemes and Discontinuous Galerkin Methods for CFD*. Brown University, Providence, Rhode Island. NASA Langley Research Center. NASA/CR-2001-210865. ICASE Report No. 2001-11.
- [2] BROOKS, A. N. & HUGHES, T. J. R. 1982. *Streamline Upwind/Petrov-Galerkin formulations for convection dominated flows with particular emphasis on the incompressible Navier-Stokes Equations*. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 32, 199-259.
- [3] MALISKA, C. R., "Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional", 2 ed, Rio de Janeiro: LTC, 2004.
- [4] EYMARD, R.; GALLOUËT, T.; HERBIN, R. 2001. *The finite volume method*. Update of the article published in Handbook of Numerical Analysis.
- [5] BUSKE, D., 2008. "Solução GILTT Bidimensional em Geometria Cartesiana: Simulação de Dispersão de Poluentes na Atmosfera", Tese de

Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFRGS, Porto Alegre, RS.

[6] STELLING, G.S., 1984, *On the construction of computational methods of shallow water flow problems*, Rijkswaterstaat communications, No. 35

[7] LUIJENDIJK, A. 2001. *Validation, calibration and evaluation of a Delft3D-FLOW model with ferry Measurements*. Netherlands Msc. Thesis.

[8] GARCIA, G. E., 2008. "Implementação de Modelo Numérico para Avaliação do Transporte de Sedimentos no Reservatório de Itaipu – PR", Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.

[9] STELLING, G.S., BOOIJ, N., 1997, *Computational modelling in open channel hydraulics, Lecture notes, Ctw4340, Delft University of Technology*

[10] HOSSEINI, S. M., & COONROD, J. (2011). *Coupling Numerical and Physical Modeling for Analysis of Flow in a Diversion Structure with Coanda-effect Screens*. *Water*, 3(3), 764-786. doi:10.3390/w3030764

[11] HERVOUET, J. M. & JANIN, J. M. 1994. Finite element algorithms for modelling flood propagation. In: *Modelling Flood Propagation over Initially Dry Areas*. Eds. P. Molinaro and L. Natale. pp. 102-113.

[12] BENOIT, M. 2003. *Logiciel TOMAWAC de modélisation des états de mer em éléments finis. Notice théorique de La version 5.5*. Departament Laboratoire National D'Hydraulique et Environnement (EDF).

[13] HERVOUET, J. M. & JANKOWSKI, J. 2000. Comparing numerical simulations of free surface flows using non-hydrostatic Navier-Stokes and Boussinesq equations. *Hydroinformatics*, Iowa Institute of Hydraulic Research, Iowa, 23-27 July 2000.

[14] LEITÃO, J. C., SILVA, A., FERREIRA, P., 2008. "Modelação Matemática da Deposição de Dragados no Zona Costeira do Estado de São Paulo – Brasil", Oeiras, Portugal.

[15] MOREIRA, D. M., VILHENA, M. T., BUSKE, D. AND TIRABASSI, T., 2009. *The state-of-art of the GILTT method to simulate pollutant dispersion in the atmosphere*. *Atmospheric Research* 92, 1-17.

[16] DYKE, P. 1996. *Modelling Marine Processes*. Prentice Hall, 158 pp.

[17] MALTHUS, T. R. 1798. *An essay on the principle of population, as it affects the future improvement of society, with remarks on the speculations of Mrs. Godwin, M Condorcet and Others Writers*. J. Johnson, V IX, London, U.K.

[18] POMPÊO, M.L.M. 1999 (ed.) *Perspectivas da Limnologia no Brasil*, São Luís: Gráfica e Editora União, 198 pg.

[19] VERHULST, P.F. 1838. *Notice sur la loi que la population suit dans son accroissement*. *Correspondences Mathématiques et Physiques*, 10: 113-121.

[20] LOTKA, A.J. 1925. *Elements of physical biology*. Baltimore: Williams and Wilkins. Reprinted with corrections and bibliography as *Elements of Mathematical Biology*. NY 1956.

[21] VOLTERRA, V. 1926. *Fluctuations in the abundance of a species considered mathematically*. *Nature*, 118: 558-60.

[22] CHRISTENSEN, V. & PAULY, D., 1991 *A Guide to the ECOPATH II software system (version 2.0)*. International Center for Living Aquatic resources Management. Manila, Philippines.

[23] POLOVINA, J.J. 1984. *Model of a coral reef ecosystem*. Part I. The ECOPATH model and its application to French Frigate Shoals. *Coral Reefs*, 3:1-11.

[24] KURTZ, A.C.S. 1989. *STELLA no modelamento de equações diferenciais*. Caderno de Ensino de Física. Florianópolis.

[25] PETERSON A. T. *Simuladores de futuro*. Edição Impressa 80 - Outubro de 2002. Disponível em: <http://revistaspesquisa.fapesp.br/?art=1946&bd=1&pg=2&lg=>. Acesso em maio de 2011.

[26] CAPORAL, F. J. M., GUGLIERI-CAPORAL, A., SCIAMARELLI, A., *Prediction for expansion of two invasive grasses in mato grosso do sul, brazil, using climatic data and ndvi/modis*. GEOGRAFIA, Rio Claro, v. 36, Número Especial, p. 97-106, jun. 2011.

[27] LIANG, X., LETTENMAIER, D. P., WOOD, E. F., BURGESS, S. J., *A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models*. *Journal of geophysical research*, vol.99, NO.97, pages 14.415-14.428, 1994.

[28] RICHARDSON, L. F. (1965). *Weather Prediction by Numerical Process*. New York: Dover.

[29] SVERDRUP, H.U., MUNK, W. H. 1947. *Wind, sea and swell: Theory of relations for forecasting*. Publication 601, Hydrographic Office, U.S. Navy, 50 pp.

[30] MILLER, R. N. 2007. *Numerical modeling of ocean circulation*. New York. Cambridge University Press. 242p.

[31] BRETSCHEIDER, C.L. 1973. *Prediction of waves and currents*. Look Lab Hawaii, 3:1-17. 72.

[32] PIERSON W. J., NEUMANN, G., JAMES, R. 1955. "Practical methods for observing and forecasting ocean waves by means of wave spectra and statistics." H.O. Publ. 603, U. S. Navy Hydrographic Office, 284 p.

[33] HASSELMANN, K. (1962). *On the non-linear energy transfer in a gravity-wave spectrum Part I. General theory*. *Journal of Fluid Mechanics*, 12, pp 481-500.

[34] WILSON, B.W. 1965. "Numerical prediction of ocean waves in the North Atlantic for December 1959." *Dtsch. Hydrogr. Z.*, 18(3):114-130.

[35] KHANDEKAR, M. L. 1989. "Operational Analysis and Prediction of Ocean Wind Waves." New York, Springer - Verlag. 214p.

[36] KOMEN, G. J., L. CAVALERI, M. DONELAN, K. HASSELMANN, S. HASSELMANN, AND P. A. E. M. JANSSEN. 1994; "Dynamics and Modelling of Ocean Waves", 532 pp., Cambridge Univ. Press, New York.

[37] CUCHIARA, D. C., FERNANDES, E. H., STRAUCH, J. C., WINTERWERP, J. C., & CALLIARI, L. J. (2009). *Determination of the wave climate for the southern Brazilian shelf*. *Continental Shelf Research*, 29(3), 545-555. doi:10.1016/j.csr.2008.09.025

[38] CHARNEY, J. G., FJORTOFT, R. AND VON NEUMANN, J. (1950). *Numerical integration of the barotropic vorticity equation*. *Tellus*, 2, 237-54.

[39] STOMMEL, H. M. (1966). *The Gulf Stream*, 2nd edn. Berkeley, Los Angeles: University of California Press.

[40] GATES, W. L. (1968). *A numerical study of transient Rossby waves in a winddriven homogeneous ocean*. *J. Atmos. Sci.*, 25, 3-22.

[41] REYNOLDS, O. (1883). "An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of resistance in parallel channels". *Philosophical Transactions of the Royal Society* 174: 935-982. DOI:10.1098/rstl.1883.0029. JSTOR.

[42] PEDLOSKY, J. (1979). *Geophysical Fluid Dynamics*. New York: Springer-Verlag.

[43] SWAMP GROUP. 1985. *Ocean Wave Modeling*, New York, Plenum Press.

[44] CANDELLA, R., N. 1997. *Estudo de casos de ondas no atlântico sul através de modelagem numérica*. Dissertação de mestrado - UFRJ. 80 p.

- [45] WAMDI GROUP. 1988. The WAM model - a third generation ocean wave prediction model. *Journal Physical Oceanography*, 18(12):1775-1810.
- [46] BOOIJ, N., RIS, R. C., HOLTHUIJSEN L. H. 1999. *A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation*. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 104, No. C4, Pages 7649-7666, April 15.
- [47] TOLMAN, H.L. 1991. *A third-generation model for wind waves on slowly varying, unsteady and inhomogeneous depths and currents*. *Journal of Physical Oceanography*, (21), 6, 782- 797.
- [48] CAVALERI, L., ALVES, J.-H.G.M., ARDHUIN, F., BABANIN, A., BANNER M., BELIBASSAKIS, K., BENOIT, M., DONELAN, M., GROENEWEG, J., HERBERS, T.H.C., HWANG, P., JANSSEN, P.A.E.M., JANSSEN, T., LAVRENOV, L.V., MAGNE, R., MONBALIU, J., ONORATO, M., POLNIKOV, V., RESIO, D., ROGERS, W.E., SHEREMET, A., MCKEE SMITH, J., TOLMAN, H.L., VAN VLEDDER, G., WOLF, J., YOUNG, L. 2007. *Wave modelling – The state of the art*. *Progress in Oceanography*, 75 (4):603-674.
- [49] BIZUTTI, R.; MARQUES, W. C.; MONTEIRO, I. O. ; FERNANDES, E. H. L. *Estudo do potencial energético de ondas geradas pelo vento para a plataforma continental sul do Brasil*. In: VIII Simpósio sobre ondas, mares, engenharia oceânica e oceanografia por satellite, 2009, Arraial do Cabo.
- [50] RIS, R. C., HOLTHUIJSEN, L. H., BOOIJ, N. 1999. *A third-generation wave model for coastal regions: 2. Verification*. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 104, No. C4, Pages 7667-7681, April 15, 1999.
- [51] CUCHIARA, D.C., FERNANDES, E. H., STRAUCH, J.C., WINTERWERP, J.C., CALLIARI, L.J. 2007; *Determination of the Wave Climate for the Southern Brazilian Shelf*. Special Issue Continental Shelf Research – Proceedings mud deposit in coastal areas, 13-17 November 2006, Porto Alegre, Brazil.
- [52] BEYENE, A., WILSON, J. H. 2006. *Comparasion of wave energy flux for northern, central, and southern coast of California based on long-term statistical wave data*. *Energy* 31, 1856-1869
- [53] FERNANDES, E. H. L., 2001. *Modelling the Hydrodynamics of the Patos Lagoon, Brazil*. Tese (Doutorado), University of Plymouth, Inglaterra. 198 pp.
- [54] MONTEIRO, I.O. 2006. *Modelagem barotrópica da pluma da Lagoa dos Patos*. Trabalho de Conclusão de Curso- FURG.
- [55] GONÇALVES, R. C. 2007. *Modelagem numérica da morfodinâmica da Lagoa dos Patos*. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande.
- [56] COLLARES, L. L. 2007. *Comportamento da pluma de dispersão de sedimentos nas áreas de descarte do Porto de Rio Grande*. Trabalho de Conclusão de Curso - FURG.
- [57] MARQUES, W. C.; FERNANDES, E. H. L.; MONTEIRO, I. O.; MÖLLER JR, O. O. 2009. *Numerical modeling of the Patos Lagoon coastal plume, Brazil*. *Continental Shelf Research*, v. 29, p. 556-571, 2009.
- [58] MARQUES, W. C., FERNANDES, E. H., MÖLLER JR, O. O.; MORAES, B. C. MALCHEREK, A. 2010a. Dynamics of the Patos Lagoon coastal plume and its contribution to the deposition pattern of the southern Brazilian inner shelf. *Journal of Geophysical Research*, v. 115, p.
- [59] MARQUES, W. C., FERNANDES, E. H., MÖLLER JR, O. O. 2010b. *Straining and advection contributions to the mixing process of the Patos Lagoon coastal plume, Brazil*. *Journal of Geophysical Research*, v. 115.
- [60] BLUMBERG, A. F. & G. L. MELLOR, 1987. *A description of three-dimensional ocean circulation model*. In: HEAPS, NS (ed.) *Three-dimensional coastal ocean models*. Washington, American Geophysical Union, 1-16.
- [61] BLUMBERG, A. F. 1997. *Numerical tidal modelo f Chesapeake Bay*. *J. Hydraul. Div.*, 103: 1-10.
- [62] OEY, L. Y., G. L. MELLOR & R. I. HIRES. 1985a. *A three-dimensional simulation of the Hudson-Raritan Estuary. Part I: description of the model and models simulations*. *J. Phys. Oceanogr.*, 15: 1676-1692.
- [63] OEY, L. Y. , G. L. MELLOR & R. I. HIRES. 1985b. *Tidal modeling of the Hudson-Raritan Estuary*. *Estuarine Coastal Shelf Sci.* 20: 511-527.
- [64] HARARI, J. & R. CAMARGO. 1998. *Modelagem numérica da região costeira de Santos (SP): Circulação de maré*. *Ver. Brás. Oceanogr.* 46(2):135-156.
- [65] CASTELÃO, R. M. & O. O. MÖLLER JR. 2003. *Sobre a circulação tridimensional forçada por ventos na Lagoa dos Patos*. *Atlântica*, 25(2): 91-106.

Cheron Silveira Neves é graduada em licenciatura em Matemática pela Universidade Federal de Pelotas (UFPel) e mestranda do curso de Pós-Graduação em Modelagem Computacional na Universidade Federal do Rio Grande (FURG). [cheronneves@gmail.com](mailto:cheronneves@gmail.com).

Eduardo Kirinus é graduado em Oceanologia pela Universidade Federal de Rio Grande (FURG) e mestrando em Modelagem Computacional na Universidade Federal do Rio Grande (FURG). [ekirinus@gmail.com](mailto:ekirinus@gmail.com)

Leonardo Ramos Emmendorfer é Doutor em Métodos Numéricos em Engenharia pela Universidade Federal do Paraná (UFPR), possui mestrado em Modelagem Matemática pela Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJUI). Atualmente atua como Professor e Coordenador do curso de Pós-Graduação em Modelagem Computacional da Universidade Federal do Rio Grande (FURG). [leonardo.emmendorfer@gmail.com](mailto:leonardo.emmendorfer@gmail.com).

Rosana dos Santos é graduada em licenciatura em Matemática pela Universidade Federal de Pelotas (UFPel) e mestranda do curso de Pós-Graduação em Modelagem Computacional na Universidade Federal do Rio Grande (FURG). [profrosanasantos@gmail.com](mailto:profrosanasantos@gmail.com).

Ruth da Silva Brum é graduada em licenciatura em Matemática pelo Centro Universitário Franciscano (UNIFRA), especialista em educação em ciência e tecnologia pela Universidade Federal do pampa (UNIPAMPA) e mestranda do curso de Pós-Graduação em Modelagem Computacional na Universidade Federal do Rio Grande (FURG). [ruthdasilvabrum@gmail.com](mailto:ruthdasilvabrum@gmail.com)