



XII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE

EVOLUÇÃO DA MODELAGEM ECOLÓGICA COM FOCO EM QUALIDADE DA ÁGUA DE LAGOS E RESERVATÓRIOS

Carolina Cerqueira Barbosa¹; Lenora Nunes Ludolf Gomes²; Sérgio Koide³

RESUMO

A modelagem ecológica surgiu nos anos 20 voltada para o entendimento de questões ligadas a poluição dos ecossistemas e dinâmica entre diferentes comunidades. Os modelos ecológicos analisam os ecossistemas quanto a dinâmica e comportamento dos organismos vivos. Em ambientes lacustres, a utilização desses vem aumentando devido a maiores precisões nos resultados, o que auxilia a tomada de decisão, e ainda, possuem a capacidade de retratar a dinâmica do ecossistema aquático e observar as relações dos organismos ali presentes com a variação sazonal da qualidade da água. Dessa forma, é possível avaliar a qualidade do ambiente aquático para diferentes períodos e condições e como estas afetam a produtividade primária do meio. Foi realizado um levantamento bibliográfico no portal de periódicos CAPES com enfoque na evolução da modelagem ecológica com foco em qualidade da água para lagos e reservatórios. Priorizaram-se estudos que contemplassem linhas de tendência abordadas nas últimas conferências da Sociedade Internacional de Modelagem Ecológica, modelagem ecológica para lagos e reservatórios com foco na comunidade fitoplanctônica e estudos com os modelos ecológicos mais citados atualmente. Observou-se propensão para integrar modelos hidrodinâmicos e modelos ecológicos, maior utilização de modelos estruturalmente dinâmicos e preocupação em modelar o impacto das mudanças globais.

ABSTRACT

Environmental modeling emerged in the 20s focused on the understanding of issues related to ecosystem pollution and dynamics between different communities. The ecological models analyze the ecosystems regarding its dynamics and the behavior of living organisms. In lacustrine

1) Mestranda em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos. Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Prédio SG12, PTARH, Sala 21, Asa Norte, Brasília-DF. E-mail: carollbarbosa@gmail.com.

2) Professora do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos. Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Prédio SG12, PTARH, Asa Norte, Brasília-DF. E-mail: lenora@unb.br

3) Professor do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos. Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Prédio SG12, PTARH, Asa Norte, Brasília-DF. E-mail: skoide@unb.br

environments, the use of these models is increasing due to higher accuracies in the results, which assists decision making, and also have the ability to portray the dynamics of the aquatic ecosystem and observe the relationships of organisms with the seasonal variation of water quality. Thus, it is possible to evaluate the quality of the aquatic environment for different periods and how they affect the primary productivity of the environment. A bibliographic survey was conducted on the website of CAPES journals focusing on the evolution of ecological modeling with a focus on water quality of lakes and reservoirs. Studies that addressed trendlines dealt in recent conferences of the International Society for Ecological Modeling, ecological modeling for lakes and reservoirs with a focus on phytoplankton communities and studies with the most mentioned ecological models nowadays, were prioritized. A tendency for integrating hydrodynamic models and ecological models, higher utilization of structurally dynamic models and concern in modeling the impact of global changes, were observed.

Palavras-Chave – Modelagem ecológica; Qualidade da água; Ecossistema lacustre.

1. INTRODUÇÃO

Lagos e reservatórios garantem o uso múltiplo das águas de acordo com as necessidades da população, seja essas de usos consuntivos ou não. Segundo Tucci (2005), o gerenciamento de tais corpos d'água é, por característica, um campo de ação multidisciplinar, onde existe um grande número de alternativas no planejamento, considerando seus usos, disponibilidades e preservação.

A importância de se avaliar a qualidade da água desses ambientes é assegurar a manutenção do ecossistema aquático, a saúde dos seres vivos que dela usufruem e os requisitos de qualidade da água, que são função de seus usos previstos.

De acordo com Pires (2004), os modelos são componentes essenciais dos sistemas de suporte à decisão. Dessa maneira a modelagem tem se firmado como ferramenta para compreensão dos fenômenos que atuam sobre determinados sistemas e como esses reagem e se comportam.

Diferentemente dos modelos matemáticos simples que propõem a representação matemática dos processos ambientais (físicos, químicos e biológicos) em sistemas hídricos, os modelos ecológicos incorporam a dinâmica dos organismos vivos na análise proposta. A aplicação desse tipo de modelagem para ambientes lacustres vêm sendo preferencialmente utilizada por conta da capacidade de retratar toda a dinâmica do ecossistema aquático, detalhando os processos que englobam os organismos vivos e as relações desses com a variação sazonal da qualidade da água.. Torna-se importante conhecer as atuais tendências nos modelos que estão sendo empregados e suas principais aplicações.

O presente artigo busca fazer um levantamento bibliográfico acerca da evolução da modelagem ecológica com foco em ambientes lacustres, as atuais tendências em estudos e os modelos ecológicos de qualidade da água mais citados e empregados.

2. METODOLOGIA

Esse é um estudo de revisão sistemática descritiva, com levantamento bibliográfico no portal de periódicos CAPES. As palavras-chave para a busca foram: *ecological modelling*, *water quality*, *lakes/reservoirs* e *phytoplankton* e o período de pesquisa compreendeu o ano 2000 até o momento. Foram priorizados os estudos que contemplassem as linhas de tendência abordadas nas últimas conferências da Sociedade Internacional de Modelagem Ecológica, as quais foram voltadas para o contexto das mudanças globais e integração da sociedade com os sistemas naturais, modelagem ecológica para lagos e reservatórios com foco na comunidade fitoplanctônica e estudos com os modelos ecológicos mais citados e utilizados nos últimos anos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A modelagem ecológica surgiu nos anos 20 com os modelos de Streeter-Phelps, reconhecido modelo de oxigênio dissolvido e demanda bioquímica de oxigênio em rios, e de Lotka-Volterra, modelo presa-predador (Jorgensen *et al.*, 2009). Desde então com o avanço da informática e tecnologia, os modelos foram se estabelecendo conforme as necessidades e objetivos propostos para um maior conhecimento dos ecossistemas de maneira geral.

Larocque *et al.* (2011) fizeram uma síntese das discussões ocorridas na XVII Conferência da Sociedade Internacional de Modelagem Ecológica realizada em Quebec, no Canadá, no ano de 2009. Nos simpósios discutiram-se diversos temas, os quais foram então classificados em três grandes categorias: desenvolvimento teórico, população dinâmica e processos de ecossistemas, a fim de incentivar todos os participantes a proporem soluções e compartilhar ideias.

O autor coloca ainda que o tema “Modelagem de ecossistema como apoio à decisão na gestão da água”, inserido na categoria “Desenvolvimento teórico” foi debatido e dos pontos discutidos salientou-se a necessidade de pesquisa multidisciplinar para gerar e compartilhar novas ideias, mas também para integrar modelos ecológicos com hidrológicos, ambientais, e outros. E, por fim, dos desafios de lidar com as incertezas e validação dos modelos, e que a colaboração interdisciplinar é cada vez mais vista de maneira vital para o avanço da modelagem, bem como a matemática e as ciências computacionais para dar apoio.

De acordo com Fragoso Júnior (2008), o progresso recente na área de hidrologia, no sentido de avaliar e prognosticar com mais precisão os processos quantitativos, impulsionou a construção de modelos matemáticos eco-hidrológicos complexos, os quais integram a hidrodinâmica com os parâmetros de qualidade da água, melhorando, assim, a capacidade preditiva de constituintes químicos da água e de processos biológicos.

De maneira geral, somente nos últimos anos houve um avanço no entendimento da importância de modelos ecológicos, principalmente com foco em ambientes lacustres. Não se pode desassociar os parâmetros de qualidade da água dos organismos vivos que indicam alterações de curto a longo prazo e permitem melhor compreensão da dinâmica do ecossistema.

Jorgensen (2010) revisou os mais recentes modelos de lagos publicados nos últimos cinco anos - anteriores a sua publicação – compreendendo o período de 2005 a 2010, e suas aplicações em estudos de caso. O autor coloca que esses novos modelos têm-se centrado, principalmente, na integração de modelos hidrodinâmicos e modelos ecológicos e que, além disso, os modelos estruturalmente dinâmicos que estão sendo publicados confirmam que este tipo de modelo oferece uma boa solução para os casos em que a adaptação e as mudanças na composição de espécies são importantes. E por fim, um interesse crescente em modelar o impacto das mudanças climáticas nos ecossistemas lacustres.

O estudo de Hongping e Jianyi (2002) é um exemplo dessa tendência em utilizar modelos dinâmicos para obter respostas mais próximas à realidade do ambiente natural. Os autores modelaram o ecossistema do Lago Oeste, Hangzhou - China, como um exemplo de lagos rasos naturais, com base na mudança da dinâmica de quatro tipos principais de algas e, ainda, simularam mudanças do ecossistema depois de algumas manipulações com foco na redução da carga de fósforo advinda de outros tributários utilizando um modelo dinâmico, com foco em algas, proposto no estudo.

O objetivo do modelo era avaliar o benefício das manipulações na melhoria da qualidade da água sabendo que o excesso de algas é o grande motivo para a deterioração de sua qualidade por causa da eutrofização observada no Lago desde 1970. Em razão disto, o modelo buscou estudar a relação de fatores físico-químicos e o crescimento das algas, e explorar os efeitos de medidas sobre as comunidades de algas e sua biomassa.

O estudo de Hamidian e Hasanzadeh (2013) é outro exemplo do seguimento no uso de modelos dinâmicos. Eles avaliaram se o PAMOLARE, modelo de gestão e controle da eutrofização em lagos, poderia prever eutrofização em lagos hipereutróficos. PAMOLARE é um modelo de bacia hidrográfica, que trabalha em conjunto com um modelo simples ou estruturalmente dinâmico de lago a fim de gerar resultados com base em diferentes medidas de restauração.

O estudo de Zhang *et al.* (2008) segue a linha de tendência em aliar abordagem hidrodinâmica com ecologia. Os autores publicaram um modelo 2D, baseado no modelo CE-QUAL-W2, com foco em eutrofização para o Lago Erie, na América do Norte, denominado EcoLE, com 18 variáveis de estado e caracterizado por acoplar hidrodinâmica e processos ecológicos, detalhar submodelos do zooplâncton e incluir o impactos de mexilhões que é uma problemática desde o final de 1980 quando o mexilhão zebra (*Dreissena polymorpha*) invadiu o Lago Erie, seguido por outra espécie exótica, mexilhões quagga (*D. bugensis*), no início de 1990 e que está substituindo o mexilhão zebra e tornando-se dominante nas bacias adjacentes. Apesar de serem espécies diferentes, elas promovem impactos ecológicos semelhantes no Lago Erie.

Hense e Beckmann (2006) elaboraram um modelo numérico que contempla as fases de vida das cianobactérias consideraram que estas possuem quatro fases distintas. O foco do estudo foi entender o comportamento das cianobactérias frente as mudanças ambientais. O conceito base do modelo é o EQN (energia-cota-nutriente) proposto por Beckmann e Hense (2004) para descrever processos de diferenciação que provavelmente dependem do estado de energia e nitrogênio interna das células. O estudo indica que a previsão de florações de cianobactérias tem de ser baseado em um conhecimento detalhado de todas as fases de seu ciclo de vida.

O estudo de Zhang *et al.* (2013) segue o propósito de acoplar modelos com diferentes enfoques na busca do objetivo proposto. Os autores construíram e avaliaram uma abordagem multi-modelo e práticas de pesquisa simples, para serem usadas como ferramenta de gestão para prever a qualidade da água (níveis de nutrientes e fitoplâncton) e aplicabilidade para outros sistemas que fossem grandes, com pouca disponibilidade de dados e complexos, semelhantes ao Lago dos Bosques, Canadá.

A abordagem multi-modelo acoplou em sequência um modelo físico, modelo de balanço de massa e modelos empíricos para incorporar a complexidade do lago (morfometria, processos hidrológicos e meteorológicos, química da água e aportes de nutrientes) e prever os níveis de nutrientes e biomassa de algas em vários segmentos do lago para o período compreendido entre 2000 e 2010. O modelo hidrodinâmico foi usado para simular a circulação do lago, o modelo de balanço de massa foi usado para prever as concentrações de fósforo total, com base na carga de fósforo interno e externo e no ambiente hidrológico do lago. Por fim, estes valores de fósforo total previstos, foram usados para preencher os modelos empíricos para obtenção de medidas de biomassa total de fitoplâncton.

Trolle *et al.* (2012) selecionaram quatro modelos que têm demonstrado crescente uso através do aumento de publicações e citações por ano, após suas primeiras publicações (Figura 1). As citações foram baseadas em pesquisa na base de dados do ISI Web of Science usando acrônimos de

modelo como palavras-chave (citações próprias foram inclusas). Os modelos são: DYRESM/ELCOM/CAEDYM, onde o DYRESM é um modelo unidimensional capaz de simular a dinâmica de estratificação vertical e outros processos de mistura, acoplado ao ELCOM, modelo tridimensional que contempla hidrostática, equações de transporte escalar e turbulência horizontal e, por último, o CAEDYM, modelo dinâmico unidimensional de ecossistema aquático; PCLake, modelo dinâmico bidimensional de ciclagem de nutrientes e biota (incluindo fitoplâncton, macrófitas e uma teia alimentar simplificada) em lagos rasos; CE-QUAL-W2, modelo bidimensional (longitudinal/vertical) de qualidade da água e hidrodinâmica e PROTECH, modelo unidimensional de simulação da dinâmica *in situ* do fitoplâncton em lagos e reservatórios, especializando-se na previsão da ocorrência de espécies do fitoplâncton, principalmente cianobactérias.

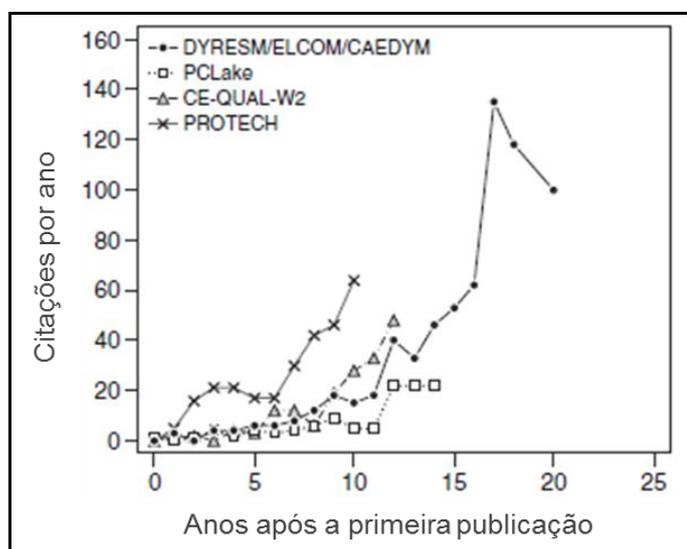


Figura 1-Citações científicas de modelos de ecossistema lacustre: DYRESM/ELCOM/CAEDYM (1º publicação em 1991), PCLake (1º publicação em 1995), CE-QUAL-W2 (1º publicação em 1997) e PROTECH (1º publicação em 1999). Adaptado de Trolle *et al.* (2012).

Em relação a esses, vários estudos abordam suas aplicações em diferentes estudos de caso. No estudo de Janse *et al.* (2010), efetua-se a calibração e estimativa de incerteza nas previsões devido a variações de parâmetros do modelo PCLake, com base em um conjunto de dados multi-lago. A calibração foi baseada em dados de 43 lagos, onde eram conhecidos os fatores de entrada e havia banco de dados de observações. A abordagem proposta pelo modelo também representa busca por estratégias de gestão de lagos.

Fragoso *et al.* (2008) desenvolveram um modelo baseado no PCLake que acopla componente da hidrodinâmica com os processos ecológicos, chamado IPH-TRIM3D-PCLake, que foi capaz de descrever a heterogeneidade espacial no Lago Mangueira/RS, Brasil, um grande lago raso

subtropical. O modelo representa as vantagens que são alcançadas através de uma melhor integração dos componentes hidrodinâmicos e ecológicos na modelagem de lagos e foi capaz de identificar as zonas com maior potencial de eutrofização.

Afshar *et al.* (2011) pretendiam desenvolver e apresentar uma abordagem computacionalmente viável para calibração de modelos de simulação complexos, como o CE - QUAL - W2. O modelo de calibração automática implementado baseia-se numa técnica de otimização de busca heurística global, o chamado modelo de otimização por enxame de partículas (PSO). Este foi acoplado ao CE-QUAL-W2 de maneira on-line pelas disponibilizações existentes que permitiram a parametrização do modelo hidrodinâmico do reservatório Karkheh, no Irã. O processo de calibração foi pra um período de 7 meses com base diária para dois pontos de verificação, que é o exigido pelo modelo.

Elliott *et al.* (2007) ampliaram o alcance mundial do modelo ecológico PROTECH aplicando-o pela primeira vez a um lago de alta latitude, o Lago Erken, um corpo d'água mesotrófico no sudeste da Suécia. Várias características desse lago o tornavam um desafio para o PROTECH: seu longo tempo de retenção, a formação de gelo e a presença de uma distinta espécie de fitoplâncton regularmente dominante no final do verão.

Sabendo que o PROTECH não possui sub-rotinas para simular formação de gelo, acoplou-se a ele um modelo hidro-físico para lagos chamado PROBE que permitia que a formação de gelo e seus efeitos pudessem ser adequadamente capturados, e ainda, simular a dinâmica térmica diária para o PROTECH, a fim de que este conseguisse simular a dinâmica populacional do fitoplâncton. Ambos foram executados para 11 anos de dados e as saídas foram comparadas com os dados observados.

Gal *et al.* (2009) aplicaram e validaram o modelo DYRESM/CAEDYM para um conjunto de dados históricos do Lago Kinneret (Mar da Galiléia, Israel), e em seguida estimaram o impacto de potenciais mudanças na carga de nutrientes sobre o ecossistema do lago. A estimativa foi realizada através da variação das cargas de fósforo, nitrogênio e os dois em conjunto, por um período de 10 anos. Além disso, os resultados de cenários estavam ligados a índices de qualidade da água desenvolvidos para o Lago Kinneret, os quais serviram como ferramenta para avaliar medidas de gestão.

4. CONCLUSÕES

A cada ano surgem novos modelos ecológicos com foco em lagos e reservatórios, devido aos bons resultados e aumento da capacidade de previsão desses tipos de modelos. A aplicação dos modelos ecológicos auxilia o entendimento das variações sazonais de qualidade da água e em

ambientes impactados permitem testar medidas de restauração que visem fomentar a tomada de decisão. Observa-se uma tendência em integrar modelos com diferentes abordagens no alcance de determinados objetivos específicos.

Os modelos apresentados demonstram a eficiência no uso da modelagem ecológica para avaliação de qualidade da água e como ferramenta para gerenciamento e controle de poluição, sendo que a maioria dos modelos segue as linhas de tendência em integração de modelos hidrodinâmicos e modelos ecológicos, maior utilização de modelos estruturalmente dinâmicos e preocupação com o impacto das mudanças climáticas nesses ambientes. A modelagem ecológica pode ainda ser utilizada para simular o manejo e recuperação do ambiente como forma de prever as respostas do meio e auxiliar na tomada de decisão em lagos eutrofizados.

BIBLIOGRAFIA

AFSHAR, A.; KAZEMI, H.; SAADATPOUR, M. (2011). “*Particle Swarm Optimization for Automatic Calibration of Large Scale Water Quality Model (CE-QUAL-W2): Application to Karkheh Reservoir, Iran*” *Water Resources Management*, 25, 2613–2632.

BECKMANN, A., HENSE, I. (2004). “*Torn between extremes: the ups and downs of phytoplankton*”. *Ocean Dyn*, 54, 581–592.

ELLIOTT, J.A.; PERSSON, I.; THACKERAY, S.J. E BLENCKNER, T. (2007). “*Phytoplankton modelling of Lake Erken, Sweden by linking the models PROBE and PROTECH*.” *Ecological Modelling*, 202, 421–426.

FRAGOSO JR, C.R. (2008). “*Modelagem de Reservatórios em Zonas Tropicais: Parâmetros Brasileiros*”. In *Anais do I Encontro Nacional de Hidroinformática*, Vol. 1, Fortaleza: UNIFOR, Brasil.

FRAGOSO JR, C.R.; MOTTA MARQUES, D.M.L.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E.M.; VAN NES, E.H. (2008). “*Modelling spatial heterogeneity of phytoplankton in Lake Mangueira, a large shallow subtropical lake in South Brazil*.” *Ecological Modelling*, 219, 125–137.

GAL, G.; HIPSEY, M.R.; PARPAROV, A.; WAGNER, U.; MAKLER, V.; ZOHARY, T. (2009). “*Implementation of ecological modeling as an effective management and investigation tool: Lake Kinneret as a case study*.” *Ecological Modelling*, 220, 1697–1718.

HAMIDIAN, A.H.; HASANZADEH, M. (2013). “*Can the PAMOLARE 1-layer model predict eutrophication in hypertrophic lakes? A Case study: the Zaribar Lake, Iran*” *International Journal of Aquatic Biology*, 1(3), 100-108.

- HENSE, I.; BECKMANN, A. (2006). "Towards a model of cyanobacteria life cycle—effects of growing and resting stages on bloom formation of N₂-fixing species." *Ecological Modelling*, 195, 205–218.
- HONGPING, P.; JIANYI, M. (2002). "Study on the algal dynamic model for West Lake, Hangzhou." *Ecological Modelling*, 148, 67–77.
- JANSE, J.H.; SCHEFFER, M.; LIJKLEMA, L.; LIERE, L.V.; SLOOT, J.S.; MOOIJ, W.M. (2010). "Estimating the critical phosphorus loading of shallow lakes with the ecosystem model PCLake: Sensitivity, calibration and uncertainty." *Ecological Modelling*, 221, 654–665.
- JORGENSEN, S.E.; CHON, T.S.; RECKNAGEL, F. (2009). *Handbook of Ecological Modelling and Informatics*. Southampton: WIT Press, 431 p.
- JORGENSEN, S.E. (2010). "A review of recent developments in lake modelling." *Ecological Modelling*, 221, 689–692.
- LAROCQUE, G.R.; MAILLY, D.; YUE, T-X.; ANAND, M.; PENG, C.; KAZANCI, C.; ETTERSON, M.; GOETHALS, P.; JORGENSEN, S.E.; SCHRAMSKI, E.J.B. MCINTIRE, E.J.B.; MARCEAU, D.J.; CHEN, B.; CHEN, G.Q.; YANG, Z.F.; NOVOTNA, B.; LUCKAI, N.; BHATTI, J.S.; LIU, J.; MUNSON, A.; GORDON, A.M.; ASCOUGH II, J.C. (2011). "Common challenges for ecological modelling: Synthesis of facilitated discussions held at the symposia organized for the 2009 conference of the International Society for Ecological Modelling in Quebec City, Canada, (October 6–9, 2009)." *Ecological Modelling*, 222, 2456–2468.
- PIRES, V.A.C. (2004). *Metodologia para apoio à gestão estratégica de reservatórios de usos múltiplos: o caso do lago Paranoá, no Distrito Federal*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, 203p.
- TROLLE, D.; HAMILTON, D.P.; HIPSEY, M.R.; BOLDING, K.; BRUGGEMAN, J.; MOOIJ, W.M.; JANSE, J.H.; NIELSEN, A. JEPPESEN, E. ELLIOTT, J.A. MAKLER-PICK, V. PETZOLDT, T. RINKE, K. FLINDT, M.R. ARHONDITSIS, G.B. GAL, G. BJERRING, R. TOMINAGA, K. HOEN, J. DOWNING, A.S. MARQUES, D.M. FRAGOSO JR, C.R. SONDERGAARD, M. HANSON, P.C. (2012). "A community-based framework for aquatic ecosystem models." *Hydrobiologia*, 683, 25–34.
- TUCCI, C. M. (2005). *Modelos hidrológicos*. 2ª edição, Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 678p.
- ZHANG, H.; CULVER, D.A.; BOEGMAN, L. (2008). "A two-dimensional ecological model of Lake Erie: Application to estimate dreissenid impacts on large lake plankton populations." *Ecological Modelling*, 214, 219–241.

ZHANG, W.; WATSON, S.B.; RAO, Y.R.; KLING, H.J. (2013). “*A linked hydrodynamic, water quality and algal biomass model for a large, multi-basin lake: A working management tool.*” *Ecological Modelling*, 269, 37– 50.