

MÉTODOS E MODELOS APLICÁVEIS PARA DESENVOLVIMENTO DE ESTUDOS NA ECOLOGIA AQUÁTICA

*Só quem lê com objectivo
de colher as frutas da literatura,
sentirá o sabor delas.*

*A ecologia é uma maquina natural,
onde a falta de um dos acessórios,
compromete o seu bom funcionamento*

Lázio Boaventura Chihanhe

lazio.chihanhe@ispg.ac.mz

Zavala, agosto de 2025

RESUMO

Os métodos e modelos matemáticos desenvolvidos para estudos da ecologia aquática são diversos, que chegam a ser diferentes métodos mas aplicáveis para alcançar um único objectivo, outrossim, divergem pela sua eficiência, intervalo de confiança fidedigna e custos de sua implementação. E alguns desses já foram reformados e outros reformulados e actualizados. No entanto, para aplicação desses métodos e os referentes modelos requer conduzir uma busca teórica sobre a sua aplicação através da revisão cruzada, analítica e cuidadosa da literatura que aborda sobre a aplicação e eficiência de uso desses métodos. Desta feita a presente pesquisa tem como objectivo descrever de forma analítica os métodos e modelos computacionais e matemáticos aplicáveis e eficientes para estudos ecológicos nos ecossistemas aquáticos. A pesquisa serve como banco de métodos e modelos computacionais e matemáticos actualizados e eficientes, aplicados nos estudos da ecologia aquática, facilitando as pesquisas futuras com enfoque na ecologia aquática.

Palavras-chaves: *Hidrodinâmica ambiental; cadeias tróficas; relações ecológicas; capacidade de suporte.*

ABSTRACT

The methods and mathematical models developed for aquatic ecology studies are diverse, and some are different but applicable to achieve a single objective. They also differ in their efficiency, confidence intervals, and implementation costs. Some of these have already been reformed, while others have been reformulated and updated. However, applying these methods and related models requires a theoretical search for their application through a careful, analytical, and cross-review of the literature addressing their application and efficiency. Therefore, this research aims to analytically describe the computational and mathematical methods and models applicable and efficient for ecological studies in aquatic ecosystems. The research serves as a database of updated and efficient computational and mathematical methods and models applied to aquatic ecology studies, facilitating future research focusing on aquatic ecology.

Keywords: *Environmental hydrodynamics; trophic chains; ecological relationships; carrying capacity.*

INTRODUÇÃO GERAL

A Ecologia é uma área da biologia que aborda as relações entre os seres vivos e do ambiente em que vivem. Abrange o organismo estudado, a sua relação com outros organismos, com o meio ambiente e a sua interferência e colaboração com os ecossistemas (VIANA, 2020).

A ecológica inicialmente era um contexto de abordagem dentro das ciências da vida, ele era mais abordado nas obras filosóficas, geográficas e das culturas gregas. Podemos citar o Aristóteles e Hipócrates como filósofos que faziam uma descrição teórica da ecologia. Outrossim o Aristóteles era um verdadeiro naturalista, mas foi seu sucessor, Theophrastus, quem começou o estudo sistemático e formal do ambiente (Hanazaki, Petrucio, Zank, & Mayer, 2013).

A ecologia como ciência foi influenciada pela tradição dos historiadores naturais dos séculos XVIII e XIX, como Buffon, Lineu, Darwin, Wallace, Humboldt, entre outros (Hanazaki, Petrucio, Zank, & Mayer, 2013).

O período da influência ecológica foi consagrado pelo surgimento das obras que tiveram grande impacto na formação da Ecologia, como os trabalhos de Malthus sobre crescimento populacional e demografia.

A Ecologia se torna oficialmente uma ciência em 1900, e carrega consigo ramificações na história natural, que é tão antiga quanto a própria humanidade. O interesse dos seres humanos pelo ambiente está arraigado desde os primeiros tempos da nossa existência. Uma das condições fundamentais para a sobrevivência da espécie humana desde os seus primórdios era o conhecimento sobre o seu ambiente. Embora tal conhecimento não fosse um estudo acadêmico, ele era útil para fazer associações entre o clima e as plantas ou sobre os locais de ocorrência dos animais (Hanazaki, Petrucio, Zank, & Mayer, 2013).

A ecologia é dividida em 14 ramos, denominados: Auto-ecologia: Estuda as relações de uma única espécie com seu ambiente, incluindo suas interações com outros seres vivos e factores abióticos. Sinecologia: Analisa as relações entre diferentes espécies dentro de uma comunidade, incluindo interações como competição, predação e mutualismo. Ecologia de populações: Foca no estudo de grupos de indivíduos da mesma espécie, incluindo tamanho, densidade, taxas de natalidade e mortalidade. Ecologia de ecossistemas: Investiga as

relações entre todos os componentes bióticos e abióticos de um ecossistema, incluindo fluxos de energia e ciclos biogeoquímicos. Ecologia da paisagem: Estuda padrões espaciais e processos ecológicos em paisagens, considerando a influência de diferentes tipos de habitat e seus mosaicos. Ecológica humana: dedicada a estudos da vida do ser humano. Ecologia dos seres vivos terrestres: que se aplica no estudo das relações da diversidade de espécies terrestres, sejam elas animais e plantas; Ecologia da restauração: Busca recuperar ecossistemas degradados. Ecologia da paisagem: Estuda a estrutura, função e dinâmica de paisagens. Ecologia numérica: Aplica métodos matemáticos e estatísticos para analisar dados ecológicos. Agro-ecologia: Estuda sistemas agrícolas sustentáveis. Ecologia teórica: Desenvolve modelos teóricos para entender processos ecológicos e ecologia de organismos aquáticos que é dedicada para estudar relações e mecanismos de vida dos organismos aquáticos, a ciência que foi baptizada de ecológica aquática.

A ecologia aquática foi desenvolvida como um campo científico no final do século XIX e início do século XX, com as primeiras expedições científicas e estudos sistemáticos sobre lagos, rios, oceanos e outros corpos de água.

Um marco importante foi o trabalho do cientista François-Alphonse Forel (1841–1912), que é considerado o “pai da limnologia”, a ciência que estuda os ambientes de água doce, especialmente lagos. Ele estudou o Lago Léman (Lago de Genebra), na Suíça, e publicou entre 1892 e 1904 a obra *"Le Léman: Monographie Limnologique"*, na qual descreveu aspectos físicos, químicos e biológicos do lago (FOREL, 1904).

A partir do século XX, com o avanço da ecologia geral, a ecologia aquática passou a integrar conhecimentos de hidrobiologia, química da água, climatologia e biologia de populações. Obras como as de Evelyn Hutchinson na década de 1940 e 1950 foram fundamentais para introduzir conceitos modernos de ecologia em sistemas aquáticos, incluindo ciclos biogeoquímicos, nicho ecológico e dinâmica de ecossistemas.

Para estudo e elaboração das teorias gerais da natureza, os ecólogos procuraram construir modelos da realidade que geram previsões sobre o que acontece na natureza. A grande complexidade dos sistemas ecológicos requer o uso de modelos gráficos e matemáticos, de modo que os ecólogos geralmente necessitam tanto da Matemática quanto da Biologia (Hanazaki, Petrucio, Zank, & Mayer, 2013).

Os métodos e modelos matemáticos desenvolvidos para estudos da ecologia aquática são diversos, que até chegam a ser diferentes métodos aplicáveis para alcançar um único objectivo, outrossim, divergem pela sua eficiência, intervalo de confiança fidedigna e custos de sua implementação. Alguns modelos são apenas divididos em tipo do sistema ecológico que esta ser estudada e objectivo de estudo. Outrossim esses métodos e modelos computacionais e matemáticos são abordados em diferentes artigos e livros desenvolvidos ao logo da história das ciências naturais desde a antiguidade até a idade moderna, e alguns desses já foram reformados e outros reformulados e actualizados, no entanto, para aplicação desses métodos e os referentes modelos requer conduzir uma busca teórica sobre a sua aplicação através da revisão cruzada, analítica e cuidadosa da literatura que aborda sobre a aplicação e eficiência de uso desses métodos. No entanto a presente pesquisa tem como objectivo descrever de forma analítica os métodos e modelos computacionais e matemáticos aplicáveis e eficientes para estudos ecológicos nos ecossistemas aquáticos. A pesquisa serve como banco de métodos e modelos computacionais e matemáticos actualizados e eficientes, aplicados nos estudos da ecologia aquática, facilitando as pesquisas futuras com enfoque na ecologia aquática.

Objectivos

Geral

- Descrever de forma analítica os métodos e modelos aplicáveis para desenvolvimento de estudos na ecologia aquático.

Específicos

- Fazer uma descrição geral dos métodos e modelos aplicados nos estudos da ecologia aquática em diferentes ambientes aquáticos (lóticos, lênticos e marinhos).
- Analisar e filtrar os métodos e modelos mais aplicáveis e eficientes para estudar a ecológica aquática em diferentes ambientes aquáticos (lóticos, lênticos e marinhos).

Metodologia

A pesquisa foi desenvolvida com base na revisão cruzada, analítica e cuidadosa da literatura. Leu-se os livros e artigos que abordam sobre a ecologia aquática, ecossistemas aquáticos, biodiversidade aquática, buscando os métodos e modelos matemáticos que os cientistas ao longo do tempo vêm usando para desenvolver estudos na ecologia aquática. Fez-se uma análise da aplicabilidade e eficiência dos métodos e modelos matemáticos usados na ecologia aquática, seleccionando os mais eficientes e com intervalo de confiança elevada na obtenção de resultados fidedignas, outrossim considerou-se também os custos de implementação de cada método para destacar os métodos mais recomendados para estudos ecológicos. Além disso os métodos e modelos foram descritos ligados com o respectivo ambiente que se aplicam, assim como a área de estudo dentro da ecológica aquática.

MÉTODOS E MODELOS APLICÁVEIS PARA ESTUDOS DA ECOLOGIA MARINHA

INTRODUÇÃO

Oceanos correspondem a uma vasta extensão de água salgada que cobre quase três quartos da superfície da Terra. Cada uma das divisões maiores do oceano constitui-se em áreas geográficas isoladas em regiões diferentes, sendo divididas pelos continentes e grandes arquipélagos em cinco grandes oceanos (Pereira, 2001)

É do conhecimento geral que cerca de 71% da superfície terrestre se encontra coberta por água, abrangendo uma área de 361 milhões de quilômetros quadrados. Essas áreas submersas são cobertas por oceanos, mares e lagos, mas destes, são os primeiros os mais extensos. É, aliás, esta vastidão das superfícies cobertas por água que confere ao nosso planeta o tom azul, quando observado do espaço (Pereira, 2001).

Nos ambientes marinhos, existem múltiplos ecossistemas, cada um com suas características particulares. Entre os mais conhecidos estão os recifes de corais, florestas de algas, manguezais, planícies abissais e estuários. Esses ecossistemas variam em suas condições de luz, profundidade e temperatura, moldando o tipo de vida que prospera em cada um. Além disso, muitos deles atuam como berçários para uma série de espécies marinhas, especialmente em suas fases iniciais de desenvolvimento (Ré, 2000).

A biodiversidade marinha é vasta, abrangendo uma enorme variedade de organismos que habitam os diferentes ambientes oceânicos. Esses organismos são classificados de acordo com características biológicas, como estrutura corporal, modo de nutrição e capacidade de

locomoção. A classificação básica dos seres vivos no ambiente marinho segue a taxonomia tradicional, dividindo-os em reinos, filos, classes e assim por diante (Ré, 2000).

Os principais reinos presentes no oceano incluem o reino Animália (animais), Plantae (plantas), Fungi (fungos), Protista (protistas, que incluem muitos tipos de algas) e Monera (bactérias). No entanto, no ambiente marinho, a maior parte da biodiversidade está concentrada no reino Animália, com uma vasta gama de filos, como os Cnidários (que incluem corais e águas-vivas), os Moluscos (polvos, lulas, mariscos) e os Cordados (peixes e mamíferos marinhos) (Ré, 2000).

A ecologia marinha integra estudo das espécies marinhas, de suas populações como a oceanografia biológica, estudo das cadeias tróficas, da população orgânica, das inter-relações entre a dinâmica dos oceanos e a ecologia das populações e a pesca (Tommasi, 1983).

No entanto neste capítulo fez-se a descrição dos métodos e modelos usados para diversos tipos de estudos na ecologia marinha

Métodos e modelos de estudos hidrodinâmicos dos ecossistemas marinhos

Estudos hidrodinâmicos dos ecossistemas marinhos são fundamentais para entender como as massas de água se movimentam, como transportam nutrientes, sedimentos e poluentes, além de como influenciam a distribuição de organismos marinhos. Esses estudos combinam observações directas, modelagem numérica e técnicas de sensoriamento remoto.

A modelação dos ambientes marinhos pode ser feita com aplicação de diferentes modelos dependendo do objectivo central da pesquisa. O Pinho, et al (2020) modelaram a hidrodinâmica e morfodinâmica da costa do nordeste de Portugal tendo em conta o cenário de mudanças climáticas, no entanto para a materialização do estudo, os autores na primeira fase optaram pelo desenvolvimento de modelos regionais de simulação da propagação da agitação marítima. Estes modelos regionais são recorridos para casos da necessidade de estabelecer condições de fronteira para os modelos locais, e são adequados para simulação dos processos relevantes para a avaliação dos riscos costeiros, incluindo propagação da agitação, acção da maré e vento (Santos, Gomes, Vieira, Pinho, & Carmo, 2018). Outrossim para criar modelos regionais, os autores recorreram o uso do *software* “SWAN”. Um programa que permite implementar modelos para simular a propagação da agitação marítima registada ou estimada por outros modelos até localizações próximas da costa (águas profundas a intermédias), tendo em conta os processos físicos de refacção, difracção e empolamento causados por diversos factores, nomeadamente: variações batimétricas, correntes, acção do vento, rebentação e dissipação de energia devido ao atrito do fundo (SWAN, 2018). Por conseguinte os autores para executar a simulação integrada da propagação da agitação e correntes costeiras resultantes da acção do vento e maré, usaram o *software Delft3D* da autoria do Deltares, (2018). Este programa permite simular processos que envolvem correntes, agitação (com recurso ao modelo SWAN) e transporte sedimentar (Deltares, 2018).

Após a modelagem de modelos regionais o Pinho, et al (2020) colocaram como segunda etapa, a modelagem de modelos costeiros locais, estes foram implementados com aplicação do modelo numérico *XBeach*. Este modelo é eficiente para modelos costeiros locais, por incluir processos hidrodinâmicos de propagação e transformação da agitação (refracção, empolamento e rebentação) e de propagação e transformação de ondas infra gravíticas (geração, propagação e dissipação), bem como o galgamento e a inundação em praias.

Inclui também processos morfodinâmicos que permitem simular a configuração do fundo induzida pelas ondas e pelas correntes, através da simulação do transporte de sedimentos por arrastamento e em suspensão, e da eventual erosão da duna frontal, e também permite incluir os efeitos da vegetação e de estruturas não erodíveis (Roelvink, Reniers, Dongeren, Vries, McCall, & Lescinski, 2009).

Metodologicamente para a construção dos modelos acima citados é necessário executar um trabalho de campo, constituído pela recolha de dados topográficos das praias emersas, colecta de dados batimétricos da área de estudo, assim como a recolha e análise granulométrica de amostras de sedimentos para a caracterização da dimensão dos sedimentos nos locais em estudo (Pinho, et al., 2020). Outrossim esses modelos carecem de calibração para a sua materialização eficiente e fidedigna, no entanto o Pinho, et al. (2020) calibraram os modelos realizando uma estimação dos valores dos parâmetros de calibração considerando como base análises de sensibilidade das diferentes variáveis do modelo seguindo o método do Nikishova et al. (2017). No modelo espectral de terceira geração *SWAN*, levou-se em consideração o coeficiente “*JONSWAP*” de 0,067 m² s³, e a definição dos coeficientes de atrito associados à actuação do vento, foi com base nos valores propostos por defeito no programa. No modelo hidrodinâmico *Delft3D* adoptou-se um valor de 65 m^{1/2}s⁻¹ para o coeficiente de Chezy e o valor de 1 m² s⁻¹ para o coeficiente de difusão turbulenta (Pinho, et al., 2020).

O Nikishova et al. (2017) fazem uma análise crítica do modelo *SWAN*. Os autores estimaram a incerteza na resposta dos cálculos do modelo e detectaram que há entradas incertas neste modelo, que podem influenciar significativamente a saída de resultados com um nível de confiança significativa. O modelo necessita que os usuários insiram parâmetros do modelo, como velocidade do vento, profundidade do fundo, etc., bem como definir coeficientes do modelo, cujo valor geralmente não é conhecido com precisão e calibrado com base em medições de estações meteorológicas e bóias. No entanto devido a entradas incertas, a resposta do modelo também contém alguma incerteza, o que representa um risco ao usar os resultados do modelo.

O Roelvink, et al. (2009) também fazem uma descrição do modelo “*XBeach*”, e relatam que o modelo resolve equações horizontais bidimensionais acopladas para propagação de ondas, fluxo, transporte de sedimentos e mudanças no fundo, para condições de contorno de ondas

e fluxo (espectrais) variáveis. O modelo leva em consideração a variação da altura das ondas ao longo do tempo, ele resolve os movimentos de ondas longas criados por essa variação. Essa chamada "batida de surfe" é responsável pela maioria das ondas de rebentação que atingem a frente da duna ou a ultrapassam. Segundo os autores o modelo *XBeach* consegue modelar melhor o desenvolvimento do perfil de erosão das dunas, prever quando uma duna ou ilha-barreira começará a transbordar e romper, e modelar os desenvolvimentos ao longo dessas fases.

O Haidvogel, et al. (2007) apontam o modelo ROMS (*Regional Ocean Modeling System*) como um modelo eficiente para estudos hidrostáticos marinhos. O Sistema ROMS aplica modelos numéricos tridimensionais, de superfície livre e acompanham o terreno, resolve as equações de *Navier-Stokes* com média de *Reynolds* usando as suposições hidrostáticas e de *Boussinesq*. As equações dinâmicas integradas no sistema apresentam-se em forma de fluxo, coordenadas horizontais cartesianas e sigma coordenadas verticais e assumem a forma tradicional. Outrossim o conjunto de equações do ROMS é resolvido em uma grade computacional cujo espaçamento é muito grande para resolver adequadamente processos turbulentos de pequena escala, no nível de dissipação (Haidvogel, et al., 2007), no entanto não importa muito trazer ou dominar as equações, pois este modelo já possui uma especialização computacional. Outrossim O ROMS fornece cinco métodos para fechamento de turbulência: (i) por expressões analíticas definidas pelo usuário para KH e KM; (ii) mistura de frequência de *Brunt-Vaisala*, na qual o nível de mistura é determinado com base na frequência de estabilidade; e por (iii) a parametrização do perfil K, (iv) o nível 2.5 de *Mellor-Yamada* e (v) os métodos da Escala de Comprimento Genérica (Haidvogel, et al., 2007). Segundo os mesmos autores, a parametrização do perfil K (KPP) é baseada na teoria de similaridade de *Monin-Obukov* e fornece uma estimativa da mistura vertical com fontes locais e não locais.

O outro modelo usado com frequência para modelação da hidrodinâmica marinha é “*MIKE 21 / MIKE 3 (DHI)*” descrito pelo DHI, (2004), O *Flow Model FM* é um novo sistema abrangente de modelagem de águas bidimensionais e tridimensionais desenvolvido pela *DHI Water & Environment*. Os novos modelos 2D e 3D têm os mesmos nomes das versões clássicas do modelo *DHI*, *MIKE 21* e *MIKE 3*, com a adição de "FM", que se refere ao tipo de grade do modelo. Outrossim é um sistema de modelagem geral para escoamentos superficiais livres

bidimensionais e tridimensionais, também pode ser aplicado em estudos de águas superficiais interiores, como inundações e lagos ou reservatórios (DHI, 2004).

Um sistema também sofisticado foi desenvolvido pelo DESOMBRE, (2013), ele desenvolveu um *software* com o código *TELEMAC-3D* que resolve equações tridimensionais como as equações de escoamento em superfície livre (com ou sem a hipótese de pressão hidrostática) e as equações de transporte-difusão de grandezas intrínsecas (temperatura, salinidade, concentração). Seus principais resultados, em cada ponto da malha de resolução em 3D, são a velocidade em todas as três direções e as concentrações das grandezas transportadas. A profundidade da água, é o principal resultado em relação à malha de superfície 2D. As principais aplicações do *TELEMAC-3D* podem ser encontradas em escoamento em superfície livre, tanto em mares quanto em rios, o *software* leva em consideração os processos de Influência da temperatura e/ou salinidade na densidade; Atrito inferior; Influência da força de *Coriolis*; Influência dos elementos climáticos: pressão do ar, chuva ou evaporação e vento; Consideração das trocas térmicas com a atmosfera; Fontes e sumidouros para o momento do fluido dentro do domínio do fluxo; Modelos de turbulência simples ou complexos ($k-\epsilon$) que tomam os efeitos da força arquimediana (flutuabilidade) em consideração; Áreas secas no domínio computacional: planícies de maré; Deriva e difusão de corrente de um traçador, com termos de geração ou desaparecimento; Modelagem de derramamento de óleo (DESOMBRE, 2013).

O outro sistema alternativo para estudos de dinâmica estuarina e costeira; Avaliação de impacto de obras hidráulicas e dragagens; Simulação de marés, correntes e salinidade; Modelagem de derrames de petróleo e dispersão de contaminantes; Estudos de interação entre rios e zonas costeiras; Acoplamento com modelos ecológicos e de pesca é *FVCOM* (*Finite Volume Coastal Ocean Model*), destacado pela sua alta flexibilidade espacial com malhas não estruturadas; Representação fiel de fronteiras irregulares e estreitos; Boa conservação de massa e energia; Capacidade de simular fenômenos em múltiplas escalas, do local ao regional (LIU & BEARDSLEY, 2002).

Tabela resumo dos modelos simuladores da hidrodinâmica e morfodinâmica de ambientes marinhos

Denominação do modelo	Representação actual do modelo	Aplicação do modelo	Necessidades do modelo	Eficiência do modelo
SWAN	<i>Software</i>	Simula a propagação da agitação marítima registada ou estimada por outros modelos até localizações próximas da costa (águas profundas a intermédias), tendo em conta os processos físicos de refacção, difracção e empolamento causados por diversos factores como variações batimétricas, correntes, acção do vento, rebentação e dissipação de energia devido ao atrito do fundo.	O modelo necessita que os usuários insiram parâmetros do modelo, como velocidade do vento, profundidade do fundo, leitura batimétrica etc., bem como definir coeficientes do modelo para a sua calibração.	Devido a entradas incertas, a resposta do modelo também contém alguma incerteza, o que representa um risco ao usar os resultados do modelo
Delft3D	<i>Software</i>	Este programa permite simular processos que envolvem correntes,	Necessita todos dados usados no modelo SWAN, outrossim neste modelo	Este modelo é dependente do modelo SWAN, no entanto também não é

		<p>agitação (com recurso ao modelo SWAN) e transporte sedimentar</p> <p>acrescenta se análise muito recomendado a sua aplicação.</p> <p>granulométrica dos sedimentos do local de estudo</p>
XBeach	<i>Software</i>	<p>Resolve equações horizontais bidimensionais acopladas para propagação de ondas, fluxo, transporte de sedimentos e mudanças no fundo, para condições de contorno de ondas e fluxo (espectrais) variáveis.</p> <p>O <i>XBeach</i> utiliza um sistema de coordenadas em que o eixo x computacional está sempre orientado em direcção à costa, aproximadamente perpendicular à linha costeira, e o eixo y está ao longo da costa. Este sistema de coordenadas é definido em relação às coordenadas mundiais (xw,yw) através da origem (xori,yori) e da orientação alfa, definida no sentido anti-horário em relação ao eixo xw (Leste)</p> <p>Este modelo é eficiente para modelos costeiros locais por incluir processos hidrodinâmicos de propagação e transformação da agitação (refracção, empolamento e rebentação) e de propagação e transformação de ondas infra gravíticas (geração, propagação e dissipação), bem como o galgamento e a inundação em praias.</p>

ROMS (Regional Ocean Modeling System)	<i>Software</i> , mas também disponível em fórmulas e equações matemáticas	Resolve as equações de <i>Navier-Stokes</i> com média de <i>Reynolds</i> usando as suposições hidrostáticas e de <i>Boussines</i>	Necessita ter dados de componentes da velocidade nas direcções horizontal e vertical (coordenada sigma escalonada,); a elevação da superfície livre com média de onda; a profundidade do fundo do mar abaixo do nível médio do mar; factor de alongamento vertical; o parâmetro de <i>Coriolis</i> . Densidade total e de referência do fluido; a aceleração devido à gravidade; viscosidade e difusividade molecular; grandeza traçadora (por exemplo, sal, temperatura e sedimento em suspensão).	O <i>ROMS</i> oferece três sub-rotinas alternativas que implementam combinações em diferentes algoritmos para as interacções onda-corrente e rugosidade do leito móvel. Além disso o <i>RAMOS</i> tem submodelos com ordem crescente de complexidade ecológica, estes incluem um modelo do tipo NPZD, um modelo do tipo <i>Fasham</i> , um modelo de duas classes de fitoplâncton e um modelo de múltiplas classes de fitoplâncton. O modelo do tipo NPZD possui quatro variáveis de estado que representam um nutriente limitante (mais comumente nitrogénio
--	--	---	---	---

inorgânico), fitoplâncton, zooplâncton e detritos.

MIKE 21 / Software MIKE 3 (DHI)	O Modelo fornece a base para cálculos realizados em muitos outros modelos, mas também pode ser usado isoladamente. Ele simula as variações do nível da água e os fluxos em resposta a uma variedade de funções de força em planícies de inundação, lagos, estuários e áreas costeiras.	Coordenadas cartesianas e esféricas; Componentes de velocidade de fluxo; Temperatura e salinidade; Coeficiente de difusão turbulenta vertical (turbulência); Termo de fonte devido à troca de calor com a atmosfera;	Todas aplicações são no sistema suportados por novas interfaces de usuário avançadas, incluindo ferramentas eficientes e sofisticadas para geração de malhas, gerenciamento de dados, visualização 2D/3D, etc. Em combinação com documentação e suporte
--	--	--	---

		<p>Simula fluxo instável levando em consideração variações de densidade, batimetria e forças externas.</p>	<p>Magnitude da descarga devido a fontes pontuais;</p> <p>Temperatura e salinidade da fonte;</p> <p>Termos de difusão horizontal;</p> <p>Coeficiente de difusão horizontal;</p> <p>Profundidade;</p> <p>Tempo.</p>	<p>abrangentes, a nova série FM forma uma ferramenta de <i>software</i> profissional exclusiva para serviços de consultoria relacionados a tarefas de projecto, operação e manutenção no ambiente marinho.</p>
TELEMAC	<i>Software</i>	<p>O software é aplicável em campos relacionados ao ambiente marinho, por meio da investigação de correntes induzidas por marés ou gradientes de densidade, com ou sem a influência de uma força externa como o vento ou a pressão atmosférica. Pode ser aplicado tanto em áreas de grande extensão (em</p>	<p>Todas as estruturas de dados são reunidas em arquivos <i>FORTTRAN</i></p>	<p>Muito eficiente, flexível e vantajosa por ter todos imputes dentro dos arquivos do <i>software</i>. Outrossim havendo exceções para alguns casos de estudo que requer resultados de um determinado intervalo de tempo.</p>

escala marinha) quanto em domínios menores (litorais e estuários) para o impacto de efluentes de esgoto, o estudo de plumas térmicas ou mesmo o transporte sedimentar. Nas águas continentais, também podem ser mencionados o estudo de plumas térmicas em rios, o comportamento hidrodinâmico ou lagos naturais ou artificiais.

FVCOM (Finite Volume Coastal Ocean Model)	<i>Software</i> , e o modelo também esta disponível em forma de formulas e equações matemáticas	Estudos de dinâmica estuarina e costeira; Avaliação de impacto de obras hidráulicas e dragagens; Simulação de marés, correntes e salinidade; Modelagem de derrames de petróleo e dispersão de contaminantes; Estudos de	Todas as estruturas de dados são reunidas em arquivos acessados automaticamente por <i>software</i> .	Alta flexibilidade espacial com malhas não estruturadas. Representação fiel de fronteiras irregulares e estreitos. Boa conservação de massa e energia. Capacidade de simular fenómenos em múltiplas
--	---	---	---	--

		interacção entre rios e zonas costeiras; Acoplamento com modelos ecológicos e de pesca.		escalas, do local ao regional.
POM (Princeton Ocean Model)	Pacotes de <i>Softwares</i> , e o modelo também esta disponível em forma de formulas e equações matemáticas	Circulação estuarina e costeira; Marés e correntes oceânicas; Transporte de calor, sal e sedimentos; Estratificação térmica e salina; Previsão operacional oceânica;	Grade horizontal estruturada (tipo Arakawa C-grid) Perfil batimétrico Condicionantes de fronteira aberta (maré, corrente) Temperatura e salinidade iniciais Forçantes atmosféricas (vento, calor, radiação) Vazão fluvial Arquivo de configuração do modelo (<i>pom.h</i> , <i>pom.input</i>)	Simples e robusto: ideal para simulações académicas e de engenharia. Código open-source, altamente documentado. Versões modificadas amplamente usadas (ex: ECOM, SCRUM, COHE

Tabela elaborada com base na revisão cruzada, analítica e cuidadosa da literatura.

Fonte: autor

Métodos e modelos de estudos de fluxo da energia nas cadeias tróficas dos ecossistemas marinhos

O conhecimento das cadeias tróficas, abre o caminho para a compreensão das causas da variação nas propriedades dos ecossistemas, como o comprimento da cadeia alimentar, a distribuição da biomassa entre os níveis tróficos, a estabilidade da comunidade e a quantidade de energia que se move de um nível trófico para outro (Mooney, 2024).

Nas teias tróficas participam diferentes grupos de organismos classificados em Produtores primários e bactérias, que representam a fonte total de energia basal para as teias alimentares aquáticas (Pomeroy, Williams, zam, & Hobbie, 2007). Os Autotróficos, que incluem plantas e algas, esses realizam fotossíntese e dependem do dióxido de carbono como fonte de carbono, enquanto bactérias heterotróficas dependem de moléculas orgânicas oxidantes como fonte de carbono (Johansson, Vrede, Lebrecht, & Johnson, 2013). À medida que os consumidores se alimentam do nível trófico basal (mobilizadores de energia), parte de energia, é transferida para o nível trófico consecutivo. A energia restante é perdida por meio da respiração, morte, excreção ou alimentação desordenada (Eddy, Bernhardt, Blanchard, Stock, Wabnitz, & Watson, 2021). A proporção de energia passada de um nível trófico para outro é quantificada como eficiência de transferência trófica, fornecendo uma medida de quão eficientemente a energia é transferida de um nível trófico para o próximo, dos produtores para os consumidores. Toda a vida depende da utilização de uma fonte externa de energia (Lindeman, 1942). Também pode ser útil estimar a eficiência da transferência de energia dos produtores para o nível trófico superior, conhecida como eficiência da teia alimentar. A ETA é uma medida da eficiência energética geral do sistema e ajuda a compreender as restrições à produção no nível trófico superior. Uma ETA alta significa que uma proporção maior da energia produzida no nível trófico basal é transferida para o nível trófico superior. Isso pode influenciar o número de níveis tróficos (comprimento da cadeia alimentar; (Dickman, Newell, González, & Vanni, 2008) e a abundância e biomassa dos principais predadores (Stock, et al., 2017). Os principais predadores são importantes não apenas para o funcionamento do ecossistema (Lennox, et al., 2022), mas frequentemente servem de alimento para humanos. Portanto, é fundamental determinar e compreender as causas e consequências da variação no fluxo de energia para utilizar os recursos aquáticos de forma sustentável.

Metodologicamente a ecologia trófica da biocenose aquática pode ser estudada através de diversos métodos como, Análise Estática das Redes Tróficas aplicando do modelo (*Ecopath*); Experimentos de Medição de Produção Primária; Análise de Isótopos Estáveis ($\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$); Modelos Bioenergéticas; e Análise de Conteúdo Estomacal (Esteves, Aranha, & Albrecht, 2021).

A análise estática das redes tróficas por meio do modelo *Ecopath* é uma abordagem amplamente utilizada em ecologia de ecossistemas para entender a estrutura, os fluxos de energia/matéria e o papel funcional das diferentes espécies (ou grupos funcionais) dentro de um ecossistema aquático, especialmente marinho ou dulcícola. Outrossim O *ECOPATH* foi desenvolvido com finalidade de, comparar a complexidade das pirâmides tróficas (de fluxo e de biomassa) de ecossistemas aquáticos pelo ângulo de seus cumes (Betito, 2019). Trata-se de um *software* ou modelo desenvolvido inicialmente na década de 1980, que permite a construção de modelos de balanço de massa de ecossistemas aquáticos (Angelini, 1999). Outrossim a parte estatística da *Ecopath* fornece uma "foto" do ecossistema em equilíbrio ou seja, todos os fluxos (produção, consumo, mortalidade, pesca etc.) balanceados em um período de tempo. A outra parte que compõe o *Ecopath* é a parte dinâmica, designada "*Ecosim*" que permite simulações temporais das cadeias tróficas. E outro componente designado "*Ecospace*" adiciona uma dimensão espacial, fluxos de energia entre grupos, eficiência trófica e níveis tróficos médios.

O *Ecopath* gera índices ecológicos como: Índice de ascendência (*ascendancy*) que mede a organização e eficiência do sistema; *Overhead* referente a capacidade de resiliência do sistema; Índice de onipresença da pesca (*Mixed Trophic Impact*) que mostra o impacto directo e indirecto de cada grupo no restante do sistema; Gau de transferência de biomassa ao longo dos níveis tróficos; Diagrama trófico que permite a visualização das relações entre grupos, Tabela de fluxos que mostra as entradas, saídas e consumos para cada grupo; Rede de impactos tróficos que são relativos a matriz MTP (*Mixed Trophic Impacts*); índice de eficiência global que determina o quão eficiente é o ecossistema na conversão de energia.

Outro método usado para estudos de fluxo de energia nas cadeias tróficas é método de experimentos de medição de produção primária, inicialmente descrito por GAARDER e GRAN, (1927). Este método é fundamental para casos de estudos que visam entender a produtividade dos ecossistemas aquáticos marinhos e interiores. Ele consiste na incubação

de amostras de água com fitoplâncton em duas garrafas: uma transparente (garrafa clara), que permite a entrada de luz, permitindo a realização da fotossíntese; e outra opaca (garrafa escura), que impede a entrada de luz, restringindo os processos à respiração. No entanto a garrafa clara regista o balanço entre fotossíntese (produção de oxigénio) e respiração (consumo de oxigénio), ou seja, a produção primária líquida. A garrafa escura regista apenas a respiração, pois a ausência de luz impede a fotossíntese. E no final calcula-se a produção primária bruta somando a respiração à produção líquida. Outrossim a determinação da produtividade primária de ambientes aquáticos também pode ser feito por meio do método da incorporação de carbono-14 (^{14}C), que é considerado um dos mais precisos para medir a produção primária em ambientes aquáticos. Este foi introduzido por Steemann Nielsen (1952) e baseia-se na adição de bicarbonato marcado com carbono radioactivo (^{14}C) em amostras de água contendo fitoplâncton (Steemann-Nielsen, 1952), no entanto segundo o mesmo autor, neste método, durante a fotossíntese, o ^{14}C é incorporado à matéria orgânica, permitindo a quantificação directa da taxa de produção de biomassa ao se medir a radioactividade incorporada nos organismos. De outro lado o ultimo método integrado nestes casos de estudos é a quantificação da *clorofila-a*, que é o principal pigmento fotossintético, que se destaca como um indicador indirecto da biomassa fitoplanctônica e paralelamente da produção primária. A *clorofila-a* é extraída quimicamente e medida por espectrofotometria ou fluorometria (PARSONS, MAITA, & LALLI, 1984).

De outro lado Fry (2006) cita o método de Análise de Isótopos Estáveis de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) e nitrogénio ($\delta^{15}\text{N}$), como uma ferramenta essencial em estudos ecológicos e ambientais, particularmente na investigação das cadeias tróficas e no rastreamento de fontes de nutrientes em ecossistemas aquáticos e terrestres. Outrossim o valor de $\delta^{13}\text{C}$ é utilizado principalmente para rastrear as fontes primárias de carbono em um ecossistema. Diferentes grupos de produtores primários (como fitoplâncton, macroalgas e plantas terrestres) possuem assinaturas isotópicas distintas, permitindo identificar a base da cadeia alimentar (Fry, 2006), segundo o mesmo autor o $\delta^{13}\text{C}$ muda pouco ao longo da cadeia trófica (cerca de 0–1‰ por nível trófico), o que o torna útil para determinar a origem dos recursos alimentares. Já os Isótopos de Nitrogénio $\delta^{15}\text{N}$ são amplamente utilizados para estimar a posição trófica dos organismos. Isso ocorre porque, ao contrário do $\delta^{13}\text{C}$, o valor de $\delta^{15}\text{N}$ aumenta significativamente (geralmente de 2 a 4‰) com cada nível trófico, devido à excreção preferencial de isótopos leves (^{14}N) (Post, 2002). Assim, organismos em níveis

tróficos mais altos apresentam valores mais enriquecidos em $\delta^{15}\text{N}$. Além disso, os valores de $\delta^{15}\text{N}$ também podem reflectir fontes de poluição por nitrogénio, como efluentes urbanos ou agrícolas, que tendem a apresentar valores isotópicos elevados (CABANA & RASMUSSEN, 1996). No entanto o método de análise de isótopos estáveis é aplicada em estudos sobre dieta de organismos, conectividade de habitats, impacto antrópico, e funcionamento de redes tróficas (Parnell, Inger, Bearhop, & Jackson, 2010). Por exemplo, em estudos de ambientes marinhos tropicais, como recifes de coral, $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ são usados para identificar contribuições relativas de fitoplâncton, macroalgas e detritos como fontes alimentares.

Na mesma linha de pesquisa um método também aplicável é o método de Modelos Bioenergéticas. Este modelo é amplamente descrito e usado, destacando o Chihanhe, (2025) como um autor que retratou e descreveu a composição e materialização deste modelo. Outrossim o modelo bioenergética descreve o fluxo de energia dos nutrientes dentro de um sistema biológico (Bueno, Bureau, Skipper-Horton, Roubach, Mattos, & Bernal, 2017). Os modelos bioenergéticos são ferramentas quantitativas utilizadas para estimar como os organismos assimilam, alocam e utilizam energia em seus processos vitais, como crescimento, reprodução, respiração e excreção. Eles permitem descrever o balanço energético de um indivíduo ou população com base em princípios termodinâmicos e fisiológicos, sendo fundamentais para compreender a ecologia trófica de espécies aquáticas, o impacto de mudanças ambientais e a gestão de estoques pesqueiros (Hanson & Johnson, 1997).

E a ultima via até aqui disponível para estudar o fluxo de energia nas cadeias tróficas dos organismos aquáticos é método de Análise de Conteúdo Estomacal. Este método é usado para o estudo da ecologia alimentar de peixes e outros organismos aquáticos. Essa abordagem permite identificar os itens ingeridos directamente do trato digestivo e, assim, compreender os hábitos alimentares, preferências tróficas, estratégias de forrageamento e até mesmo as relações ecológicas em uma comunidade aquática (Hyslop, 1980). Os índices deste modelo são os listados abaixo (Pinkas, Oliphant, & Iverson, 1970):

a) Frequência de Ocorrência (FO%)

Indica a percentagem de estômagos em que determinado item alimentar aparece.

$$\text{FO\%} = (\text{número de estômagos com o item} / \text{total de estômagos analisados}) \times 100$$

b) Índice de Volumetria ou Gravimetria (V% ou W%)

Representa a proporção volumétrica ou em massa de cada item alimentar em relação ao conteúdo total do estômago.

c) Índice de Número (N%)

Conta o número de indivíduos de cada item alimentar no conteúdo total analisado.

d) Índice de Importância Relativa (IIR ou IRI)

Combina frequência de ocorrência, volume e número, fornecendo um valor composto para avaliar a importância relativa dos itens alimentares:

$$IRI = (\%N + \%V) \times \%FO$$

Tradicionalmente têm-se usado análises de conteúdo estomacal ou intestinal (ACE), que resultam em dados qualitativos e quantitativos dos recursos consumidos.

Tabela resumo dos modelos de estudos de fluxo da energia nas cadeias tróficas dos ecossistemas marinhos

Modelos	Formas da disponibilidade do modelo	Componentes do modelo	Aplicação do modelo	Necessidades do modelo
Ecopath with Ecosim (EwE)	<i>Software</i>	1. <i>Ecopath</i> (modelo estático, de balanço de massa) <ul style="list-style-type: none"> ➤ Fornece um instantâneo do estado de um ecossistema em equilíbrio. ➤ Usa dados como biomassa, razão P/B (produção/biomassa), razão Q/B (consumo/biomassa) e captura pesqueira. ➤ Estabelece o balanço de energia entre grupos funcionais (espécies ou conjuntos de espécies). ➤ Permite avaliar a estrutura trófica e o impacto da pesca em diferentes níveis da cadeia alimentar. 2. <i>Ecosim</i> (modelo dinâmico)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Avaliação de sustentabilidade pesqueira. ➤ Identificação de espécies-chave e sensíveis. ➤ Previsão de impactos de mudanças climáticas e ambientais. ➤ Apoio à gestão ecossistémica da pesca. ➤ Simulação de cenários alternativos de manejo pesqueiro. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Biomassa (B) ➤ Produção por biomassa (P/B) ➤ Consumo por biomassa (Q/B) ➤ Fracção da dieta de cada predador ➤ Captura pesqueira ➤ Eficiência ecológica

-
- Permite simulações temporais (curto e longo prazo).
 - Analisa o comportamento ao longo do tempo da biomassa dos grupos funcionais sob cenários de manejo, mudanças ambientais, políticas pesqueiras, etc.
 - Integra dinâmica populacional com interacções predador-presa.

3. *Ecospace* (modelo espacial)

- Adiciona uma dimensão espacial à simulação dinâmica do *Ecosim*.
 - Considera distribuição geográfica, habitats preferenciais, migração e áreas de protecção.
 - Permite avaliar os efeitos espaciais de políticas de
-

manejo (como áreas
marinhas protegidas -
MPAs).

Atlantis	<i>Software</i>	<p>1. Biologia e Ecologia</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Representa populações por coortes etárias. ➤ Modela explicitamente interações predador-presa, reprodução, mortalidade natural, e competição. ➤ Pode incluir até centenas de espécies ou grupos funcionais. <p>2. Oceanografia / Hidrodinâmica</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Usa dados de modelos hidrodinâmicos externos (como <i>ROMS</i>, <i>MOM</i>, <i>FVCOM</i>). ➤ Considera temperatura, salinidade, correntes e 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Avaliação da sustentabilidade ecológica de políticas pesqueiras. ➤ Suporte à gestão integrada de zonas costeiras. ➤ Simulação de efeitos de mudanças climáticas sobre ecossistemas. ➤ Análise de resiliência ecológica a pressões múltiplas. ➤ Implementação de abordagens ecossistêmicas à pesca (<i>EAFM</i>) 	<p>As necessidades deste sistema dependem dos resultados desejados, por isso este sistema é muito complexo requer muita atenção. Outrossim aceita imputes de dados da Estrutura Espacial e Hidrodinâmica; Ecologia e Biologia dos Grupos Funcionais; Rede Trófica / Dieta; Dados de Pesca; Processos</p>
-----------------	-----------------	--	---	--

nutrientes.

3. Socioeconomia

- Modela respostas humanas (por exemplo, mudanças no esforço pesqueiro com base no lucro).
- Suporta análises de cenários de governança (MPAs, TACs, subsídios, etc.).

4. Pesca

- Permite a modelagem de diferentes frotas pesqueiras, com características próprias (tipo de embarcação, alvo, selectividade).
- Avalia os impactos ecológicos e económicos da exploração pesqueira.

Biofísicos e Químicos; Aspectos Socioeconómicos. E tecnicamente este modelo necessita do Conhecimento em modelagem matemática e ecológica; Dados espaciais e temporais de alta resolução e boa qualidade; Familiaridade com programação em *Fortran* (onde o *Atlantis* é codificado); Capacidade computacional razoável, já que o

modelo é intensivo em cálculos; *Softwares* auxiliares para preparar os dados, como: R ou *Python* (análise); *GIS* (mapeamento espacial); Modelos acoplados (*ROMS*, *MOM*)

Modelos de Ecossistemas Planctónicos (NPZ Models)	Equações matemáticas	$\frac{dN}{dt} = -\mu \times f(N) \times P + r \times Z + mp \times P + mz \times Z$	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Estimar produção primária e crescimento de fitoplâncton. ➤ Simular blooms algais (inclusive nocivos). ➤ Avaliar efeitos da limitação nutricional (N, P, Fe). ➤ Estudar interacções tróficas inferiores e seu efeito em cadeias superiores. ➤ Acoplar com modelos
		$\frac{dP}{dt} = \mu \times f(N) \times P - g(P) \times Z - mp \times P$	
		$\frac{dZ}{dt} = \gamma \times g(P) \times Z - mz \times Z$	
	Onde:	μ = taxa máxima de crescimento	

do fitoplâncton

maiores (*Atlantis*,
ROMS, etc.).

$f(N) = \frac{N}{k+N}$ = Função de limitação
por nutrientes (Lei de Monod)

$g(P) = \frac{P^2}{h^2+P^2}$ = Função de
predação (tipo Holling II ou III)

γ = Eficiência de assimilação do
zooplâncton

m_P, m_Z = taxas de mortalidade de
P e Z

r = reciclagem de nutrientes pela
excreção

Tabela elaborada com base na revisão cruzada, analítica e cuidadosa da literatura.

Fonte: autor

Métodos e modelos de estudos das relações ecológicas da biocenose nos ecossistemas marinhos

As relações ecológicas são interacções que ocorrem entre os seres vivos dentro de um ecossistema (Rodolfo, 1959). Essas relações podem ocorrer entre indivíduos de uma mesma espécie, sendo classificadas como relações intra-específicas, ou de espécies diferentes, como relações interespecíficas. Além dessa classificação, as relações ecológicas podem ser tidas como harmónicas, quando traz benefícios a todos os envolvidos, ou traz benefício a um, mas sem causar prejuízo ao outro organismo envolvido na relação; é também conhecida como positiva, ou desarmónicas, quando causa prejuízo para algum dos envolvidos; é também conhecida como negativa (Rodolfo, 1959).

O estudo das relações ecológicas da biocenose (comunidade de organismos vivos) em ecossistemas marinhos é fundamental para entender a estrutura, dinâmica e funcionamento desses ambientes. As relações ecológicas incluem interacções como predação, competição, mutualismo, comensalismo, entre outras.

Metodologicamente para estudar relações ecológicas da biocenose marinha aplica-se diferentes métodos e modelos, que alguns se alinham com métodos e modelos aplicados para estudar teias tróficas nos mesmos ambientes. O uso do *Ecopath with Ecosim* (EwE) é amplamente aplicável para estudos das cadeias tróficas, assim como para estudar as relações ecológicas, igualmente como métodos de Análise de Conteúdo Estomacal, Estudos de Isótopos Estáveis ($\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$), e Modelos Bioenergéticos. Outrossim, pode se usar método de Observação Directa e Amostragem em Campo. Este método permite registar comportamentos, abundância e distribuição dos organismos em diferentes habitats marinhos (Dayton, 1971). Neste método aplica-se técnicas de Transectos e quadrantes: usados para quantificar a densidade e diversidade de espécies bentônicos. E técnicas de Plataformas subaquáticas e *ROVs* (*Remotely Operated Vehicles*): utilizados em ambientes de difícil acesso (Dayton, 1971). Investigadores referenciam os Modelos Baseados em Agentes (*Agent-Based Models* - *ABMs*), como modelos que também podem ser usados para simular as acções e interacções de agentes autónomos com o objectivo de avaliar seus efeitos dentro de todo sistema ecológico (Angelis & Mooij, 2005). Este modelo trata-se de ferramentas computacionais que simulam comportamentos individuais de organismos e suas interacções no ambiente, permitindo estudar relações ecológicas complexas, como

competição e cooperação (Ioan, Emilia, & Adina, 2021). Outros modelos amplamente usados são Modelos Dinâmicos de Populações e Comunidades, que incluem equações diferenciais para modelar crescimento populacional e interações ecológicas (ex: predação de Lotka-Volterra), descrevem como as populações de organismos e as comunidades ecológicas evoluem ao longo do tempo, sob a influência de factores bióticos e abióticos (Collie, et al., 2014). Outrossim os correspondentes modelos, são os mencionados abaixo, com ilustração das suas devidas equações matemáticas.

Modelo Exponencial

Assume que a população cresce sem restrições

$$\frac{dN}{dt} = rN$$

Onde:

N= tamanho da população

r= taxa intrínseca de crescimento

Modelo Logístico

Inclui a capacidade de suporte do ambiente (K)

$$\frac{dN}{dt} = rN \left(1 - \frac{N}{K}\right)$$

Modelo Predador-Presa (*Lotka-Volterra*)

Descreve a interacção entre predadores e suas presas:

$$\frac{dN}{dt} = rN - aNP \quad \frac{dP}{dt} = baNP - mP$$

Onde:

N= população da presa

P = população do predador

a = taxa de predação

b = eficiência na conversão de presas em predadores

m = taxa de mortalidade dos predadores

Modelos de Competição Interspecífica

$$\frac{dN_1}{dt} = r_1 N_1 \left(1 - \frac{N_1 + \alpha N_2}{K_1}\right) \quad \frac{dN_2}{dt} = r_2 N_2 \left(1 - \frac{N_2 + \beta N_1}{K_2}\right)$$

Onde:

α, β = são coeficientes de competição interspecífica

Métodos e modelos para modelagem da capacidade de suporte de ambientes marinhos para inserção de empreendimentos aquícolas.

Os ecossistemas marinhos pela sua extensão, aparentam não ser susceptíveis a poluição ambiental pela prática de aquacultura, mas pelo contrário esses ecossistemas requerem muita atenção para sua gestão sustentável alinhados a produção aquícola. A modelagem da capacidade de suporte de ambientes marinhos para inserção de empreendimentos aquícolas é fundamental para garantir a sustentabilidade ecológica, económica e social da aquacultura. Essa modelagem visa determinar quanto e onde é possível instalar sistemas de produção aquícola sem comprometer o equilíbrio do ecossistema (FERREIRA, CORNER, MOORE, SERVICE, BRICKER, & RHEAULT, 2018).

Pela dimensão dos ecossistemas marinhos, existem dimensões e tipos de prática de aquacultura que pouco interessa serem modelados e avaliados ecologicamente para sua inserção nos ecossistemas marinhos. No contexto global se destaca mais o cultivo de moluscos como práticas aquícolas que mais precisam de modelagem e avaliação da capacidade de suporte para a sua implementação nos ecossistemas marinhos, por estas serem organicamente extractivas: espécies nativas "selvagens" e moluscos cultivados competem pelo fitoplâncton e pela matéria orgânica detritica disponível na coluna de água. Além disso o cultivo de bivalves em alta densidade populacional em estruturas suspensas, como jangadas ou espinhel, pode impactar localmente o fundo de forma semelhante ao cultivo em gaiolas para peixes ósseos (Christensen & Pauly, 1992). Em situações extremas, o cultivo de bivalves (ou mesmo grandes populações de moluscos selvagens) pode resultar em um aumento líquido de matéria orgânica no ecossistema, aumentando o acoplamento bento pelágico e acelerando a deposição de matéria orgânica particulada (MOP) (Cranford, Strain, Dowd, Hargrave, Grant, & Archambaul, 2007), embora, em termos orçamentários totais, a aquacultura organicamente extractiva deve levar a uma remoção líquida de MOP, A cultura de bivalves no fundo, incluindo a cultura com engrenagens em gaiolas ou cavaletes, pode privar espécies que ocorrem naturalmente de habitat e, portanto, impactar a conservação de biótopos naturais (Haidvogel, et al., 2007). Outrossim Métodos mecânicos de colheita, como a dragagem, podem agravar o problema, embora essa perturbação seja transitória (Stock, et al., 2017) A cultura de bivalves é uma fonte líquida de nutrientes dissolvidos e pode potencialmente levar à eutrofização em campo distante (ou seja, em escala de ecossistema).

Em termos metodológicos a modelagem da capacidade de suporte para instalação das infra-estruturas aquícolas, por se tratar de uma actividade que além de deposição de resíduos sólidos orgânicos e inorgânicos no meio, também pode adicionar outras espécies no ecossistema, enquanto a introdução de espécies exóticas no meio aquático cria cenários de pressão para alterações ecológicas. No entanto requiere observação de todas medidas ecológicas incluindo a hidrodinâmica ambiental, cadeias tróficas, e relações ecológicas. Outrossim o procedimento metodológico e modelagem da capacidade de suporte de ecossistemas marinhos requiere a aplicação de métodos e modelos descritos nos capítulos anteriores deste artigo, e no final avaliar as condições ambientais e dimensão do projecto e analisar a sustentabilidade ecológica do projecto no ecossistema.

MÉTODOS E MODELOS APLICÁVEIS PARA ESTUDOS DA ECOLOGIA DOS AMBIENTES LÊNTICOS E LÓTICOS

INTRODUÇÃO

Ambientes Lóticos e Lênticos são dois principais tipos de ecossistemas aquáticos continentais, classificados com base nas características do movimento da água.

Ambientes lóticos são corpos de água caracterizados por escoamento contínuo da água, como rios, riachos e córregos. A dinâmica da correnteza exerce influência directa na estrutura física, química e biológica desses ecossistemas (Esteves, 1998). Esses apresentam como características o Fluxo constante de água em uma direcção; Alta taxa de oxigenação devido à constante movimentação da água; Presença de substratos variados (cascalho, areia, lama) e Adaptações morfológicas específicas dos organismos (como formas hidrodinâmicas ou estruturas de fixação). Ecossistemas lóticos apresentam uma estrutura ecológica altamente dependente do regime de fluxo, o qual determina a distribuição de habitats e organismos (Allan & Castillo, 2007). A heterogeneidade espacial nos ecossistemas lóticos é responsável por uma diversidade ecológica elevada, principalmente em riachos com gradientes ambientais acentuados (VANNOTE, MINSHALL, CUMMINS, SEDELL, & CUSHING, 1980).

Ambientes lênticos correspondem a corpos de água com águas paradas ou de movimentação muito lenta, como lagos, lagoas, pântanos e represas. São Características principais desses corpos a Ausência ou baixa velocidade de correnteza; Estratificação térmica e química da água (particularmente em lagos profundos); Acúmulo de sedimentos

finos no fundo; Organismos adaptados a condições estáveis, com menos necessidade de resistir a fluxos intensos. Ambientes lênticos têm como característica a estratificação vertical de parâmetros físico-químicos, o que influencia fortemente a distribuição das comunidades aquáticas (WETZEL, 2001). A produtividade primária em ecossistemas lênticos está intimamente relacionada à disponibilidade de nutrientes e à penetração da luz, especialmente nas zonas litorâneas (Kalf, 2002).

Nos ambiente lóticos e lênticos, assim como nos ecossistemas marinhos, os estudos ecológicos englobam estudos hidrodinâmicos ambientais, qualidade de água, interações ecológicas das espécies e teias tróficas. Outrossim esses estudos nos ambientes aquáticos continentais exigem alguns métodos e modelos que são específicos para estes ecossistemas, dadas as suas características físicas, químicas e biológicas. No entanto este capítulo aborda os procedimentos metodológicos e modelos que são aplicados e eficientes para estudos ecológicos nos ambientes lênticos e lóticos.

Métodos e modelos aplicáveis para estudos hidrodinâmicos dos ambientes lóticos e lênticos

A circulação hidrodinâmica é o fenómeno associado ao deslocamento da água nos corpos hídricos (Junior, 2011). Com objectivo de estudar os movimentos de água em ambientes aquáticos, desenvolveu-se modelos matemáticos, para simulação da hidrodinâmica ambiental (Chihanhe, 2024) A importância dos modelos hidrodinâmicos está na possibilidade de simular, com bastante realismo, o padrão de circulação hidrodinâmica em corpos de água, e quando acoplados a modelos de transporte de contaminantes, analisarem os impactos causados por lançamento de efluentes na qualidade das águas de uma determinada região (Junior, 2011).

Metodologicamente estes estudos integram análise da estratificação térmica, quando for nos ambientes lênticos; levantamento e leitura batimétrica e taxa de renovação da água. Outrossim a modelagem hidrodinâmica de ambientes aquáticos continentais, pode ser feita com recurso a *SisBaHiA*, que é um sistema computacional com modelos matemáticos já programados e calibrados para simulação de diferentes cenários de movimento de água nos corpos hidrológicos. Os modelos e equações matemáticas programados neste sistema são descritos pelo Júnior, (2011) e Chihanhe, (2024), os autores buscaram os modelos com objectivo de fazer simulação em ambientes aquáticos continentais (reservatório e lagoa, respectivamente) tendo estes se mostrado eficientes a sua aplicação para estes estudos. Além da *SisBaHiA* outro modelo amplamente aplicado nos estudos hidrodinâmicos é Modelo Euleriano de Transporte Advectivo-Difusivo (MTAD), este modelo é mais aplicável para escoamento integrado na vertical, para escalares passivos e não conservativos (Cunha & Rosman, 2005), que representam à maioria das substâncias existentes na água, que sofrem modificação de concentração através de processos físicos, biológicos e químicos. Os processos biológicos e químicos, chamados de reacções cinéticas, são definidos para cada substância, sendo, portanto o diferencial deste modelo (Cunha & Rosman, 2005). Segundo o mesmo autor o entendimento e a formulação destes processos são fundamentais para a construção do modelo de qualidade de água. Outrossim os modelos eulerianos resolvem à equação de transporte sobre uma malha fixa, no entanto a integração na direcção vertical sugere que este modelo deve ser aplicado em corpos de água rasos, que possuem dimensões horizontais preponderantes sobre a dimensão vertical, com a coluna de água bem misturada, onde a estratificação vertical é pouco relevante (Cunha & Rosman, 2005). As

equações matemáticas deste modelo podem ser encontrados no artigo da (Cunha & Rosman, 2005) e (Ferreira, Ferreira, & Fernandes, 2021).

Métodos e modelos aplicáveis para estudos das cadeias tróficas e relações ecológicas nos ambientes lóticos e lênticos

Os métodos e modelos aplicáveis para estudos das cadeias tróficas e relações ecológicas em ambientes lóticos (águas correntes) e lênticos (águas paradas) variam conforme as características hidrodinâmicas, bióticas e abióticas desses ecossistemas. Outrossim para condução das pesquisas nesta área aplica-se os métodos e modelos em função do objectivo do pesquisador. Dentre os diferentes recorridos para estes estudos, está o método de Análise de Conteúdo Estomacal, que é um método que permite identificar directamente os itens alimentares consumidos pelos organismos, permitindo saber o regime alimentar dos organismos (Hyslop, 1980). Este é frequentemente usado para estudos das relações ecológicas, onde relaciona-se o regime alimentar e comportamento ecológico das espécies. O segundo é o método de análise de Isótopos Estáveis ($\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$) que também pode ser usado nos estudos das cadeias tróficas marinhas. Este método fornece informações sobre a posição trófica e origem da matéria orgânica, e nos ajuda a Traçar o fluxo de energia na cadeia trófica de sistemas lóticos e lênticos (Post, 2002). Outrossim este modelo é amplamente usado nos Experimentos de Exclusão/Manipulação Trófica. Na mesma linha também há Modelos de Teia Trófica Baseados em Redes que aplica ferramentas como *Network3D*, *Pajek*, *Ucinet*. Este Medelo representa espécies ou grupos funcionais como nós conectados por interacções tróficas (fluxos de biomassa ou energia) e permitem analisar estabilidade, conectividade e resiliência do sistema (Dunne, Williams, & Martinez, 2002). O quarto modelo é de Produção Primária Secundária (*NPZ Models*) que este Integra nutrientes (N), fitoplâncton (P) e zooplâncton (Z) em equações diferenciais (Railsback & Grimm, 2012). O quinto é Modelo *Ecopat* com *Ecosim* (EwE), o modelo *Ecopat* é muito usado em ambientes lênticos maiores, mas adaptável a sistemas fluviais com dados adequados, outrossim este é um modelo em estado estacionário que quantifica biomassa, consumo e fluxo energético nos ecossistemas, já o seu componente *Ecosim* permite fazer simulações temporais das interacções tróficas (Christensen & Pauly, 1992). O sexto Modelo aplicável é Modelo Baseados em Agentes (ABM) que simula o comportamento individual de agentes (espécies, consumidores) e suas interacções no ambiente, é um modelo muito recomendado para representar mobilidade e estratégias alimentares em ambientes lóticos, com forte heterogeneidade espacial (Railsback & Grimm, 2012). O sétimo modelo é Modelo Acoplado Hidrodinâmico-Trófico que Integra modelo de fluxo de água (como *TELEMAC*, *MIKE 21*) com

modelos ecológicos para prever distribuição de biomassa e nutrientes. Este é muito essencial para ambientes lóticos, onde o fluxo influencia fortemente a estrutura trófica. E o ultimo método que é menos usado nestes estudos, mas também é aplicável, é SIG (Sistemas de Informação Geográfica) e Modelos Espaciais, que são usados para fazer mapeamento e análise espacial de habitats e distribuição trófica, é muito útil para identificar zonas críticas de produção primária ou pressão de predação em lagos e rios.

Métodos e modelos aplicáveis para modelagem da capacidade de suporte dos ambientes lóticos e lênticos

Nos ambiente aquáticos continentais, os modelos utilizados para dimensionar a capacidade de suporte, são aplicados com base na concentração de fósforo admissível e a ser adicionada no ambiente pelo empreendimento aquícola (Pa) (Chihanhe, 2024). Para tal, admite-se uma concentração máxima admissível para o corpo de água, $P_{máx}$, que pode ser, o valor prescrito na RC 357 para águas classe 2 (Junior, 2011). Os modelos usados para estimar a capacidade de suporte com base no fósforo são: Modelo de DILLON e RIGLER, Modelo de ONNO e KUBITZA e Modelo de BEVERIDGE (Junior, 2011). O Modelo de DILLON e RIGLER (1974), considera que a concentração de fósforo adicionada (Pa) em um dado corpo hídrico é determinada pela carga de fósforo (P), tamanho do corpo de água (área e profundidade média), taxa de renovação da água (fracção da coluna da água perdida anualmente para jusante e a fracção de fósforo (P) permanentemente perdida para o sedimento). O Modelo de ONNO e KUBITZA (2003) determina à quantidade de gaiolas flutuantes que podem ser instalados, tomando como base o volume do epilimínio, sua profundidade, as concentrações de fósforo total permitido pela RC - 357 para a classe 2 de enquadramento desejado para as águas do manancial, a concentração desse parâmetro presente nas excretas dos peixes além da área de influência do reservatório que pode ser disponibilizada para essa actividade. O Modelo de BEVERIDGE é o método mais utilizado para estimar o aporte de fósforo em reservatórios onde são instalados ou avaliados empreendimentos aquícolas. O modelo de BEVERIDGE (2004) baseia-se nas características morfológicas do corpo de água (área total, profundidade média, capacidade de renovação de água) e nas características do cultivo (quantidade de ração fornecida e biomassa produzida), e faz matematicamente, uma junção entre tais características. Estes modelos também podem ser usados para avaliação de impacto ambiental Chihanhe, (2024), o mesmo autor retrata esses modelos e faz descrição das fórmulas e procedimentos matemáticos aplicados, assim com o Júnior, (2011) fez quando modelava a capacidade de suporte de um reservatório.

Constatações

Constatou-se que existem vários modelos aplicáveis e eficientes para estudos ecológicos nos Ambientes aquáticos marinhos assim como continentais, e estes métodos e modelos são distribuídos em casos de estudos que compõe estudos ecológicos. Para simulações hidrodinâmicas nos ecossistemas marinhos pode se usar modelos como *SWAN*; *Delft3D*; *XBeach*; *ROMS (Regional Ocean Modeling System)*; *MIKE 21 / MIKE 3 (DHI)*; *TELEMAC*; *FVCOM (Finite Volume Coastal Ocean Model)* e *POM (Princeton Ocean Model)*, sendo que alguns pela dependência do outro, são mais eficientes quando são aplicados em simultâneo num único estudo hidrodinâmico. Outrossim a hidrodinâmica nos ambientes lóticos e lênticos pode ser simulada usando *SisBaHiA* ou Modelo Euleriano de Transporte Advectivo-Difusivo (MTAD).

O estudo das cadeias tróficas, fluxo de energia e relações ecológicas das espécies aquáticas podem ser estudados com aplicação dos modelos como *Ecopath with Ecosim (EwE)*; *Atlantis*; Modelos de Ecossistemas; Planctónicos (*NPZ Models*); Modelos Dinâmicos de Populações e Comunidades; Análise Estática das Redes Tróficas aplicando do modelo (*Ecopath*); Experimentos de Medição de Produção Primária; Análise de Isótopos Estáveis ($\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$); Modelos Bioenergéticas; e Análise de Conteúdo Estomacal, em qualquer tipo de ambiente aquático.

A modelagem da capacidade de suporte para produção aquícola, nos ambientes marinhos é feita na dimensão regional, tendo em conta o tipo de espécie que se pretende cultivar no ambiente e sistemas de cultivo, e é feita tendo como base a matéria orgânica existente no local, aplicando métodos de amostragem e avaliação do impacto de inserção de uma instalação aquícola no local. Outrossim nos ambientes lóticos e lênticos a modelagem da capacidade de suporte é feita tendo como base o nível máximo de fósforo admissível para água classe 2, usando modelos de DILLON e RIGLER, Modelo de ONNO e KUBITZA e Modelo de BEVERIDGE.

Recomendações

Recomenda-se:

Avaliar a capacidade de conservação de energia dos ecossistemas aquáticos moçambicanos com base no modelo MTP (*Mixed Trophic Impacts*).

Estudar as estruturas ecológicas dos ecossistemas aquáticos marinhos e continentais com base na modelagem estrutural do modelo *Ecopath*.

Identificar a base da cadeia alimentar e estimar a posição trófica dos organismos, com base no rastreamento das fontes primárias de carbono nos ecossistemas aquáticos, aplicando Análise de Isótopos Estáveis de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) e nitrogénio ($\delta^{15}\text{N}$).

Fazer modelagem da capacidade de suporte das lagoas usando modelos de DILLON e RIGLER; ONNO e KUBITZA; e BEVERIDGE para prática de aquacultura ecologicamente sustentável.

Referências bibliográficas

- Allan, D. J., & Castillo, M. M. (2007). Structure and function of running waters. *Stream Ecology*.
- Angelini, R. (1999). ECOSISTEMAS E MODELAGEM ECOLÓGICA .
- Angelis, D. L., & Mooij, W. M. (2005). INDIVIDUAL-BASED MODELING OF ECOLOGICAL AND EVOLUTIONARY PROCESSES.
- Betito, R. (2019). Comparações funcionais entre ecossistemas aquáticos: aplicação da geometria fractal em atributos termodinâmicos de redes tróficas analisadas via ECOPATH.
- Beveridge, M. (2004). Cage Aquaculture.
- Bueno, G. W., Bureau, D., Skipper-Horton, J. O., Roubach, R., Mattos, F. T., & Bernal, F. E. (2017). Modelagem matemática para gestão da capacidade de suporte de empreendimentos aquícolas em lagos e reservatórios.
- CABANA, G., & RASMUSSEN, A. J. (1996). Comparison of aquatic food chains using nitrogen isotopes.
- Chihanhe, L. B. (2024). PRODUÇÃO E OPTIMIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE AVALIAÇÃO DE IMPACTO AMBIENTAL DE EMPREENDIMENTOS AQUÍCOLAS INSERIDOS EM AMBIENTES AQUÁTICOS NATURAIS.
- Chihanhe, L. B. (2025). PRODUÇÃO DE SOFTWARE DETERMINADOR DE ÍNDICES DE DESEMPENHO PRODUTIVO E BIOENERGIA NUTRICIONAL DE ORGANISMOS AQUÁTICOS.
- Christensen, V., & Pauly, D. (1992). ECOPATH II — a software for balancing steady-state ecosystem models and calculating network characteristics. *Ecological Modelling*.
- Collie, J. S., Botsford, L. W., Hastings, A., Kaplan, I. C., Largier, J. L., Livingston, P. A., et al. (2014). Ecosystem models for fisheries management: finding the sweet spot.
- Cranford, P. J., Strain, P. M., Dowd, M., Hargrave, B. T., Grant, J., & Archambaul, M.-C. (2007). Influence of mussel aquaculture on nitrogen dynamics in a nutrient enriched coastal embayment .
- Cunha, C. d., & Rosman, P. C. (2005). Referência Técnica do Modelo de Qualidade de Água do SisBAHIA.
- Dayton, P. K. (1971). Competition, Disturbance, and Community Organization: The Provision and Subsequent Utilization of Space in a Rocky Intertidal Community.
- Deltares. (2018). <http://oss.deltares.nl/web/delft3d/manuals>. *Delft3D*.

- DESOMBRE, J. (2013). TELEMAT MODELLING SYSTEM.
- DHI, M. B. (2004). MIKE 21 E MIKE 3 MODELO FLOW FM Módulo Hidrodinâmico Descrição curta.
- Dickman, E. M., Newell, J. M., González, M. J., & Vanni, M. J. (2008). Light, nutrients, and food-chain length constrain planktonic energy transfer efficiency across multiple trophic levels.
- Dillon, P. J., & Rigler, F. H. (1974). A Test of a Simple Nutrient Budget Model Predicting the Phosphorus Concentration in Lake Water .
- Dunne, J. A., Williams, R. J., & Martinez, N. D. (2002). Food-web structure and network theory: The role of connectance and size.
- Eddy, T. D., Bernhardt, J. R., Blanchard, J. L., Stock, C. A., Wabnitz, C. C., & Watson, R. A. (2021). Energy Flow Through Marine Ecosystems: Confronting Transfer Efficiency .
- Esteves, F. d. (1998). Fundamentos de Limnologia.
- Esteves, K. E., Aranha, J. M., & Albrecht, M. P. (2021). ECOLOGIA TRÓFICA DE PEIXES DE RIACHO: UMA RELEITURA 20 ANOS DEPOIS.
- Ferreira, A. H., Ferreira, D. M., & Fernandes, C. V. (2021). Modelagem hidrodinâmica e de qualidade da água como ferramenta para avaliação de enquadramento de corpos de água .
- FERREIRA, J. G., CORNER, R. A., MOORE, H., SERVICE, M., BRICKER, S. B., & RHEAULT, A. R. (2018). ECOLOGICAL CARRYING CAPACITY FOR SHELLFISH AQUACULTURE SUSTAINABILITY OF NATURALLY OCCURRING FILTER-FEEDERS AND CULTIVATED BIVALVES.
- FOREL, F. A. (1904). *MONOGRAPHIE LIMNOLOGIQUE*. LAUSANNE.
- Fry, B. (2006). Stable Isotope Ecology .
- Fulton, E. A. (2010). Approaches to end-to-end ecosystem models. *Journal of Marine Systems* 81(1-2):171-183.
- Fulton, E. A., Smith, A. D., & Punt, A. E. (2004). Which Ecological Indicators Can Robustly Detect Effects of Fishing .
- GAARDER, T., & GRAN, H. H. (1927). Investigations of the Production of Phytoplankton in the Oslo Fjord. *Rapports et procès-verbaux des réunions/Conseil international pour l'exploration de la mer*.
- Grimm, V., & Railsback, S. F. (s.d.). Individual-based Modeling and Ecology.

- Haidvogel, D., Arango, H., Budgell, W., Cornuelle, B., Curchitser, E., Lorenzo, E. D., et al. (2007). Ocean forecasting in terrain-following coordinates: Formulation and skill assessment of the Regional Ocean Modeling System. *Journal of computational physics*.
- Hanazaki, N., Petrucio, M., Zank, S., & Mayer, F. P. (2013). *Introdução à Ecologia* (2ª ed.). Florianópolis.
- Hanson, P. C., & Johnson, T. B. (1997). Fish Bioenergetics 3.0 For Windows .
- Hyslop, E. J. (1980). Stomach contents analysis a review of methods and their application.
- Ioan, S., Emilia, P., & Adina, C. (2021). Agent-based modeling and simulation in the research of environmental sustainability. A bibliography .
- Johansson, K. S., Vrede, T., Lebrecht, K., & Johnson, R. K. (2013). Zooplankton Feeding on the Nuisance Flagellate *Gonyostomum semen*.
- Jordán, F., Liu, W.-c., & Davis, A. J. (2006). Topological keystone species: measures of positional importance in food webs.
- Junior, M. G. (2011). USO DE MODELAGEM NA AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE SUPORTE DE RESERVATÓRIOS COM PROJETOS DE AQUICULTURA, TENDO O FÓSFORO COMO FATOR LIMITANTE .
- Kalff, J. (2002). Limnology. *Inland Water Ecosystems*.
- Kubitza, F. (2003). Cultivo de peixes em tanques-rede.
- Lennox, R. J., Brownscombe, J. W., Darimont, C., Horodysky, A., Levi, T., Raby, G. D., et al. (2022). The roles of humans and apex predators in sustaining ecosystem structure and function: Contrast, complementarity and coexistence .
- Lindeman, R. L. (1942). The Trophic-Dynamic Aspect of Ecology. *Ecological Society of America*.
- LIU, C. C., & BEARDSLEY, R. C. (2002). An Unstructured Grid, Finite-Volume, Three-Dimensional, Primitive Equations Ocean Model: Application to Coastal Ocean and Estuaries.
- Montoya, J. M., Pimm, S. L., & Sole, R. V. (2006). Ecological networks and their fragility .
- Mooney, B. (2024). Understanding the Efficiency of Energy Flow Through Aquatic Food Webs. *Department of Aquatic Resources*.
- Nikishova, A., Kalyuzhnaya, A., Boukhanovsky, A., & Hoekstra, A. (2017). Uncertainty quantification and sensitivity analysis applied to the wind wave model SWAN. *Environmental Modelling & Software*.

- Parnell, A. C., Inger, R., Bearhop, S., & Jackson, A. L. (2010). Source Partitioning Using Stable Isotopes: Coping with Too Much Variation .
- PARSONS, T. R., MAITA, Y., & LALLI, C. M. (1984). A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis. *PERGAMON PRESS* .
- Pereira, A. R. (2001). *O(S) OCEANO(S) E AS SUAS MARGENS*.
- Pinho, J., Vieira, L., Vieira, J., Smirnov, G., Gomes, A., Bio, A., et al. (2020). *Modelação da hidrodinâmica e da morfodinâmica na costa Noroeste de Portugal em cenários de alterações climáticas*.
- Pinkas, L., Oliphant, M. S., & Iverson, I. L. (1970). Fish Bulletin 152. Food Habits of Albacore, Bluefin Tuna, and Bonito In California Waters.
- Pomeroy, B. L., Williams, P. J., zam, F. A., & Hobbie, a. J. (2007). The Microbial Loop. *A sea of Microbes*.
- Post, D. M. (2002). USING STABLE ISOTOPES TO ESTIMATE TROPHIC POSITION: MODELS, METHODS, AND ASSUMPTIONS.
- Railsback, S. F., & Grimm, V. (2012). Agent-Based and Individual-Based Modeling.
- Ré, P. M. (2000). *INTRODUÇÃO À BIOLOGIA MARINHA*. Lisboa.
- Rodolfo. (1959). *RELAÇÕES ECOLÓGICAS*.
- Roelvink, D., Reniers, A., Dongeren, A. v., Vries, J. v., McCall, R., & Lescinski, J. (2009). Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Engineering*.
- Roversi, F., Rosman, P. C., & Harari, J. (2016). Análise da renovação das águas do Sistema Estuarino de Santos usando modelagem computacional .
- Santos, L., Gomes, M., Vieira, L., Pinho, J., & Carmo, J. A. (2018). Storm surge assessment methodology based on numerical modelling. *In 13th International Conference on Hydroinformatics* .
- Steemann-Nielsen, E. (1952). The Use of Radioactive Carbon (¹⁴C) for Measuring Organic Production in the Sea. *Journal du Conseil, Perm International pour l'Exploration de la Mer*.
- Stock, C. A., John, J. G., Rykaczewski, R. R., Asch, R. G., Cheung, W. W., Dunne, J. P., et al. (2017). Reconciling fisheries catch and ocean productivity .
- SWAN. (2018). <http://www.tudelft.nl/en/ceg/about-faculty/departments/hydraulic-engineering/sections/environmental-fluid-mechanics/research/swan/> . *Delft University of Technology*.

Tommasi, L. R. (1983). Ecologia marinha.

VANNOTE, R. L., MINSHALL, G. W., CUMMINS, K. W., SEDELL, J. R., & CUSHING, A. C. (1980). The River Continuum Concept.

VIANA, C. C. (2020). METODOLOGIAS ATIVAS PARA O ENSINO DE ECOLOGIA.

WALTERS, C., CHRISTENSEN, V., & PAULY, D. (1997). Structuring dynamic models of exploited ecosystems from trophic mass-balance assessments.

WETZEL, R. G. (2001). Limnology. *Lake and River Ecosystems*.