Universidade Fernando Pessoa

Modelação Ecológica

Relatório pedagógico apresentado como parte dos requisitos para prestação de Provas de Agregação, ao abrigo do Artigo 5º do Decreto-Lei nº 239/2007, de 19 de Junho, na especialidade de Ecologia e Saúde Ambiental

Pedro Manuel da Silva Duarte

2010

“A maioria das ideias fundamentais em ciência é essencialmente sensível e, regra geral, pode ser expressa em linguagem compreensível para todos”

Albert Einstein

Prefácio

Este documento é parte do processo de instrução da candidatura de Pedro Manuel da Silva Duarte à realização das provas de agregação, ao abrigo do Decreto-Lei nº 239/2007 de 19 de Junho, do Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior. O presente documento, que constitui o relatório pedagógico de uma unidade curricular (UC) de Modelação Ecológica, é acompanhado por um anexo denominado "**Manual de Modelação Ecológica",** que contem os conteúdos do programa apresentados de forma detalhada e que serve de base às aulas da unidade curricular proposta. Este documento será doravante referido como o **Manual de Estudo**. Importa salientar que há uma correspondência total entre o programa da UC e os capítulos e subcapítulos do Manual de Estudo. Além deste anexo, há um conjunto de folhas de cálculo e de software de modelação que acompanha este processo em formato digital. Estes ficheiros são referidos no Manual de Estudo sempre que a sua consulta for requerida para ilustrar as matérias apresentadas. Todos os conteúdos relativos à UC encontram-se organizados na plataforma de ensino à distância da Universidade Fernando Pessoa.

A decisão de elaborar um Manual de Estudo justificou-se pela necessidade de organizar um número importante de exemplos que o autor foi acumulando ao longo da sua actividade docente e pela vontade de articular os conteúdos desta UC segundo uma lógica baseada em "níveis de organização". Ou seja, os conteúdos e o respectivo Manual de Estudo estão organizados numa sequência que começa por abordar conceitos gerais de modelação, para passar de seguida a analisar modelos fisiológicos, modelos de populações, de comunidades e de ecossistemas. Ao longo desta "viagem", a integração dos níveis de organização no mundo real e nos modelos é um tema recorrente, pois é através dessa integração que a natureza vai "ganhando" novas propriedades. O programa termina com a integração dos modelos em Sistemas de Apoio à Decisão, procurando valorizar a aplicação prática destas ferramentas.

Conteúdo

1 Introdução 1

2 Breve história da modelação ecológica 2

3 Justificação da unidade curricular (UC) – uma proposta 4

4 Descrição do programa e das competências a adquirir 5

5 Metodologia didáctica 10

6 Planificação das aulas 15

7 Metodologia de avaliação 17

8 Bibliografia 19

1 Introdução

A matemática é empregue na Ecologia há várias décadas, a nível da análise de resultados obtidos através de experiências ou amostragens (ex: estatística descritiva e inferência estatística), a nível da descrição de padrões espaciais e temporais (ex: análise multivariada e análise cronológica de dados), a nível da previsão do comportamento de espécies, populações, comunidades e ecossistemas (modelação matemática). Ao longo dos últimos anos, a modelação matemática tem vindo a ganhar popularidade, quer pela maior facilidade na implementação dos modelos, resultante da melhoria contínua dos meios informáticos e da facilidade de acesso aos mesmos, quer pela necessidade de integrar o conhecimento acumulado, quer pela necessidade de dispor de ferramentas de previsão que possam ser utilizadas para apoiar a tomada de decisões sobre a gestão dos recursos naturais (Jorgensen, 1995; Jorgensen & Bendoricchio, 2001). Muitos dos modelos utilizados nas ciências do ambiente são baseados em teorias que ainda não têm aceitação geral, em hipóteses controversas, em simplificações e pressupostos questionáveis, decorrentes de um conhecimento limitado sobre a dinâmica dos sistemas reais (Scholten & Van der Tol, 1998). Ainda assim, são a "ferramenta" quantitativa disponível para sintetizar o conhecimento existente.

A implementação de um modelo matemático obriga a um exercício de síntese e de análise do conhecimento existente sobre o sistema em estudo. Este exercício permite perceber com rigor o que não se sabe sobre o objecto de estudo e, assim, ajudar a definir as lacunas do conhecimento que devem ser preenchidas pelo trabalho experimental. Deste modo, um modelo pode ser mais útil pelas perguntas que gera do que pelas respostas que permite obter. A dialéctica entre o trabalho experimental e o trabalho de modelação ajuda a um progresso mais objectivo do conhecimento. Quando o modelo atinge o nível de qualidade adequado, tendo sido validado com dados reais, pode ser utilizado como uma ferramenta de previsão.

O grande número de modelos ecológicos desenvolvidos ao longo das últimas décadas justifica a existência de uma revista científica especializada nesta área – Ecological Modelling – que começou a ser publicada em 1975. Actualmente, publica várias centenas de artigos por ano. Considerando o grande número de artigos sobre modelos que são publicados em muitas outras revistas mais especializadas em determinadas áreas da Biologia ou da Ecologia (Otto & Day, 2007), a variedade de software disponível para implementar diversos tipos de modelos (Pereira et al., 2007) e o emprego de modelos ecológicos em diversos projectos nacionais e internacionais, fica clara a importância actual desta área da ciência.

Importa salientar que no contexto do presente relatório o termo "Modelo Ecológico" se emprega num sentido lato, ou seja, emprega-se para qualquer modelo que seja concebido com a finalidade de descrever a autoecologia de uma espécie, ou a dinâmica de populações, ou interacções entre espécies/dinâmica de comunidades, ou processos biogeoquímicos ou um ecossistema.

Para construir um modelo é necessário definir compartimentos e especificar as equações que descrevem as transferências de matéria ou energia entre eles (Taylor, 1993). A escolha dos compartimentos é guiada pelas perguntas a que se quer responder com o modelo, pelo conhecimento existente e pela subjectividade do modelador a respeito da importância de diferentes variáveis e processos. Seguindo a classificação proposta por Gertsev & Gertseva (2004), os modelos ecológicos podem classificar-se como homomorfos, dado que agrupam entidades biológicas e fazem diversas simplificações sobre os sistemas reais; estacionários ou dependentes do tempo; zero-, uni, bi ou tridimensionais, quanto à forma como representam o espaço; contínuos ou discretos, em função do modo como o tempo e o espaço são representados; determinísticos ou estocásticos, em função das relações matemáticas utilizadas; analíticos ou numéricos, dependendo do método de resolução das respectivas equações.

2 Breve história da modelação ecológica

O primeiro modelo matemático utilizado para descrever o crescimento de uma população foi, provavelmente, o modelo exponencial, associado a Thomas Malthus (1766-1834). Este modelo resultou da constatação de que uma população tem capacidade para crescer geometricamente e simula o referido crescimento sem recorrer a factores ecológicos. O modelo logístico, desenvolvido pelo matemático belga Pierre Verhulst, no século XIX, foi uma evolução natural do modelo anterior, resultante da constatação de que nenhuma população pode crescer indefinidamente. Este modelo conduziu ainda à noção de capacidade de carga do meio, amplamente usada nos dias de hoje e nos mais diversos contextos. O modelo predador-presa de Lotka-Volterra, desenvolvido nos anos 20 do século passado, foi o primeiro a descrever a relação entre duas espécies. Tal como o modelo de competição dos mesmos autores, integra conceitos do modelo exponencial e do modelo logístico. Nos anos 40 do século XX surgiram modelos de dinâmica de populações estruturadas (Leslie, 1945, 1948). Foram empregues até ao presente, para simular populações de árvores, de algas, de mamíferos, etc. A grande diferença para os modelos anteriores foi a possibilidade de representar populações divididas em classes de idade, tamanho ou peso e a utilização da álgebra linear em lugar do cálculo diferencial.

As equações mais antigas utilizadas para descrever a relação entre a fotossíntese e a intensidade luminosa remontam à primeira década do século XX. Desde então, continuaram a surgir na bibliografia modelos matemáticos para descrever a referida relação (Duarte, 2005). Estes terão sido, porventura, os primeiros modelos ecofisiológicos, em que se procurou prever a evolução de uma variável biológica a partir de um factor ecológico externo, como a intensidade luminosa. Não é demais salientar a importância destes avanços para a modelação dos ecossistemas, pois têm um papel fundamental no cálculo da produção primária e do crescimento dos autotróficos.

Os modelos ecofisiológicos foram sendo desenvolvidos para os mais diversos grupos taxonómicos ao longo do tempo. A abordagem mais antiga e, porventura, a mais comum, é a simulação do crescimento dos organismos a partir do seu balanço energético, sendo conhecidos por "Scope for Growth Models" (SFG). A teoria "Dynamic Energy Budget" (DEB) (Koijman, 2003) veio estimular algumas inovações nos modelos ecofisiológicos, que resultaram num aumento da sua complexidade, no sentido de simular diversas variáveis internas dos organismos e não só a sua massa total.

Nos anos 20 do século passado, foi desenvolvido o primeiro modelo sobre o balanço de oxigénio num rio – o modelo de Streeter-Phelps. Este terá sido o primeiro modelo biogeoquímico a ser criado. Nos anos setenta, começaram a surgir os modelos de eutrofização (Jorgensen, 1995; Jorgensen & Bendoricchio, 2001), com ênfase nos ciclos biogeoquímicos do fósforo e do azoto. Durante as décadas de 70 e 80 foram desenvolvidos inúmeros modelos de rios, lagos, estuários, zonas costeiras e mares. Alguns destes modelos são de uma enorme complexidade no que respeita à descrição dos processos biogeoquímicos e às interacções biológicas (ex: Baretta & Ruardij, 1988). Importa salientar que estes modelos integram conhecimentos ao nível da ecofisiologia, da dinâmica de populações e de comunidades e da biogeoquímica. Assim, alguns dos modelos referidos nos parágrafos anteriores são tratados como sub-modelos num todo complexo. Apesar da sua enorme complexidade, muitos dos modelos de ecossistemas desenvolvidos ao longo das décadas de 80 e 90 representavam de forma muito simplificada os processos físicos de transporte. O final da década de 90 trouxe uma nova geração de modelos que, além dos processos anteriores, passaram a integrar também a hidrodinâmica (ex: MOHID homepage; Luyten et al., 1999).

Na mesma década surgiram os "structurally dynamic models" (Jorgensen & Bendoricchio, 2001) com o propósito de aumentar o realismo dos modelos ecológicos, através da introdução de funções-objectivo, tais como a exergia, que são maximizadas através do ajuste dos parâmetros do modelo. A ideia geral é que os organismos são capazes de se ajustar às condições ambientais através de diversos tipos de aclimatação, tal como as comunidades se podem ajustar através de alterações na sua composição específica. Estes "ajustamentos" só podem ser reflectidos no modelo se os parâmetros que descrevem o comportamento das espécies ou grupos funcionais puderem ser alterados ao longo da simulação num sentido determinado por uma função-objectivo.

Outra tendência recente na modelação ecológica é a tentativa de incorporar alguma "inteligência" nos modelos, recorrendo à inteligência artificial e, por exemplo, aos agentes inteligentes, com capacidade para a aprendizagem (Jorgensen & Bendoricchio, 2001). As vantagens que tais modelos podem ter são múltiplas, destacando-se, como exemplo, a calibração automática e a análise de cenários de gestão de um ecossistema, com o objectivo de maximizar algum(ns) objectivo(s), tais como a produção, a qualidade da água, etc. Na maioria dos casos, a calibração é um processo iterativo, feita através da repetição das simulações e comparação entre os valores previstos e observados. Em cada nova simulação, o modelador

procura variar o valor de diferentes parâmetros de modo a aproximar as previsões das observações. De um modo análogo, a análise de cenários com um modelo que já foi calibrado e validado, com algum objectivo concreto, conforme exemplificado acima, é um processo iterativo que, em muitos casos, não tem uma solução óptima, mas sim um conjunto de soluções "boas". Os agentes inteligentes podem ser utilizados com bastante eficácia neste processo iterativo, pois uma vez definidas funções-objectivo e recorrendo a métodos heurísticos tais como o "Simulated Annealing", algoritmos genéticos, "Reinforcment learning", etc., pode substituir-se o modelador nas referidas tarefas iterativas e obter soluções melhores (Cruz et al., 2007; Pereira et al., 2006).

3 Justificação da unidade curricular (UC) – uma proposta

O conhecimento dos princípios da modelação pode ser útil a vários níveis: (i) Para um decisor, importa ter alguma capacidade crítica relativamente aos resultados dos modelos, de modo a ser capaz de ajuizar sobre a sua qualidade e limitações e a não fazer um emprego abusivo dos mesmos na tomada de decisão; (ii) Para um investigador, importa ter a capacidade de interpretar com alguma profundidade a estrutura, a lógica interna e os resultados dos modelos, de forma a poder desenvolver uma visão crítica dos mesmos e poder colaborar no seu aperfeiçoamento, interagindo com quem os desenvolve. Deste modo, é importante formar futuros profissionais da Biologia e das Ciências e Engenharia do Ambiente, no sentido de adquirirem as competências gerais referidas em (i) e (ii). A frequência de um curso de Modelação Ecológica pode ainda servir para estimular alunos do 2º e do 3º ciclo a desenvolverem teses nesta área ou a incorporar nas suas teses uma componente de modelação que permita sintetizar os seus resultados de forma mais objectiva.

Para além das justificações descritas no parágrafo anterior, importa ainda referir que o autor deste texto teve oportunidade de trabalhar numa grande variedade de modelos ecológicos ao longo da sua carreira profissional e de leccionar modelação em vários cursos de licenciatura e mestrado de diversas universidades. Este percurso profissional levou ao desenvolvimento de uma visão algo crítica sobre a forma como estas matérias são apresentadas nos livros existentes e sobre a forma como as mesmas são apreendidas pelos alunos. É convicção do autor de que falta um texto integrador do "estado da arte" da modelação ecológica, havendo muitos textos que, privilegiando diversas áreas desta disciplina, tornam algo difícil a tarefa de apreender conceitos fundamentais que permitam aos discentes adaptar-se facilmente a diferentes tipos de modelos. Neste sentido, os materiais didácticos preparados para leccionar esta UC - textos, software e diversos estudos de caso - destinam-se a permitir uma aprendizagem da modelação "passo" a "passo", com base na "descoberta" por parte dos discentes, através da exploração dos inúmeros exemplos preparados, procurando atingir competências concretas no final de cada capítulo.

As justificações apresentadas acima são de natureza transversal ao ensino da modelação. No entanto, há motivos de natureza mais particular que podem justificar a inclusão desta UC em cursos da Universidade Fernando Pessoa (UFP). Nesta universidade existe uma UC de Modelação Ambiental que é leccionada ao 2º ciclo de Engenharia e Gestão Ambiental. Como o próprio nome indica, trata-se de uma UC de espectro largo que não permite aprofundar muito os temas da modelação ecológica ou de outros tipos de modelação ambiental. É convicção do autor deste texto de que pode e deve haver na UFP uma oferta mais diversificada nesta área. Na verdade, as universidades devem tirar partido daquilo em que podem ter uma oferta diferenciada. Neste sentido, Modelação Ecológica pode ser oferecida como uma UC de opção a ser frequentada pelos mestrandos e pelos alunos do doutoramento em Ecologia e Saúde Ambiental da especialidade em Sistemas de Apoio à Decisão em Ambiente. Além disso, pode ser uma disciplina de opção para alunos de outras universidades, podendo ser frequentada na totalidade ou em parte, dada a forma modular que foi utilizada na organização dos diferentes capítulos.

4 Descrição do programa e das competências a adquirir

O programa desta unidade curricular (UC) está organizado em 6 ECTS (
A Tabela 4-2 sintetiza o tipo de competências que se espera sejam atingidas pelos discentes em cada capítulo do programa. Importa salientar que as competências a nível da implementação de modelos baseiam-se na utilização de software específico para a criação de modelos, a partir de linguagens simbólicas relativamente simples, e não implicam o domínio de nenhuma linguagem de programação que requer formação específica.

Tabela 4-1) e é adequado para ser leccionado ao nível de um 2º ou 3º ciclo nas áreas do conhecimento “Ciências Biológicas” e “Ciências da Terra e do Ambiente”. Estão previstas 30 horas de contacto e 126 horas de trabalho autónomo. As horas de contacto são teórico-práticas e baseiam-se em períodos expositivos de um máximo de 45 minutos, seguidos de exercícios práticos no computador. Estes exercícios são baseados em aplicações computacionais de diversos modelos disponibilizadas aos discentes, para que possam analisar o seu funcionamento e construir as suas próprias aplicações a partir das que são fornecidas pelo docente.

O programa divide-se em sete capítulos, sendo que os primeiros dois apresentam noções de carácter geral, os capítulos 3 a 5 abordam a modelação desde o nível fisiológico ao nível da comunidade, o sexto capítulo integra as noções dos capítulos anteriores e o sétimo estabelece a ligação da modelação aos Sistemas de Apoio à Decisão. O conteúdo dos capítulos apresenta-se no Manual de Estudo que serve de base às apresentações a efectuar pelo docente durante a parte expositiva das aulas.

No primeiro capítulo são tratadas algumas noções básicas de modelação, de forma a familiarizar os discentes com a linguagem da disciplina. Assim, são definidos e exemplificados conceitos como: modelo, variáveis de estado, funções forçadoras, fluxos, parâmetros, domínio, passo de cálculo, discretização espacial e discretização temporal, dimensões espaciais dos modelos, etc. No final do primeiro capítulo os discentes deverão ter uma noção clara do que é um modelo matemático e para que serve, bem como conhecer as suas partes constituintes. Devem ser capazes de identificar variáveis, funções forçadoras, etc., em exemplos apresentados durante as aulas. Devem entender o que é um modelo zero, uni-, bi- e tridimensional de um ecossistema e em que situações se deve optar por cada um destes tipos de modelos. Devem ainda ter a noção do que é um modelo analítico e um modelo numérico, bem como da forma de resolver o segundo. No final deste capítulo, os alunos devem ter um domínio da "linguagem" técnica que lhes permita interagir com especialistas em modelação, no âmbito de qualquer trabalho de equipa em que se procure desenvolver/utilizar um modelo.

No segundo capítulo, apresenta-se a metodologia geral de desenvolvimento de um modelo, desde a fase de concepção à fase de implementação, dando ênfase às interacções entre o trabalho de modelação e o trabalho experimental. Descrevem-se as diferentes abordagens disponíveis para a implementação dos modelos em computador tais como programação simbólica, estruturada e orientada por objectos. Apresentam-se graficamente modelos muito simples, constituídos por uma só variável de estado. Nesta fase, o significado do grafismo utilizado na construção dos diagramas dos modelos é explicado, recorrendo-se à simbologia do software Stella (http://www.iseesystems.com/softwares/education/stellasoftware.aspx). São exemplificados diversos modelos que ilustram algumas das relações entre variáveis e fluxos mais comuns a todos os modelos ecológicos tais como, retroacções positivas e negativas, para representar processos de aumento exponencial e processos de decaimento de primeira ordem. Estes exemplos são utilizados para ilustrar a sequência de passos de implementação de um modelo descrita no início do capítulo. No final deste capítulo, os alunos devem ter as competências necessárias para elaborar um projecto de investigação em que a modelação seja uma das componentes. Não é de esperar que sejam capazes de desenvolver modelos de forma autónoma, mas devem ser capazes de perceber o que é necessário para implementar um modelo de um ecossistema.

O terceiro capítulo é dedicado aos modelos fisiológicos. O conteúdo inclui os conceitos fundamentais na modelação do crescimento dos produtores primários e dos produtores secundários, com alguma ênfase na teoria "Dynamic Energy Budget" (DEB). No final do capítulo, os discentes devem ser capazes de utilizar de forma crítica diversos modelos fisiológicos. Devem ainda ter competências para conceber, analisar e implementar este tipo de modelos com software de simulação baseado em símbolos como o Stella ou o Powersim (http://www.powersim.com).

O quarto capítulo é sobre a modelação da dinâmica de populações. Apresentam-se modelos de crescimento sem e com regulação, para populações uniformes e para populações estruturadas.

São explicadas diversas abordagens para implementar estes modelos, recorrendo à Álgebra Linear e ao Cálculo Diferencial. São explicadas as formas de integrar sub-modelos fisiológicos nos modelos populacionais e de integrar estes em modelos de comunidades e de ecossistemas. No final do capítulo, os discentes devem ser capazes de utilizar de forma crítica diversos modelos de populações. Devem ainda ter competências para conceber, analisar e implementar este tipo de modelos com auxílio de uma folha de cálculo e com software de simulação como o Excel, o Stella e o Powersim.

O quinto capítulo é dedicado aos modelos de comunidades, com ênfase nos modelos predador-presa e nos modelos de competição. É explicada a importância destes modelos na simulação de ecossistemas e a forma como podem ser ligados aos modelos fisiológicos e aos modelos de dinâmica de populações. No final do capítulo, os discentes devem ser capazes de utilizar de forma crítica diversos modelos de comunidades. Devem ainda ter competências para conceber, analisar e implementar este tipo de modelos com auxílio de software de simulação como o Stella ou o PowerSim.

O sexto capítulo compreende a modelação de ecossistemas. Neste capítulo apresentam-se formas de representar matematicamente os diversos ciclos biogeoquímicos, incluindo as interacções dos mesmos com o biota, através de alguns dos modelos descritos nos capítulos anteriores. Além disso, é dada alguma ênfase às interações entre os modelos físicos e os modelos biogeoquímicos. No final do capítulo, os discentes devem ser capazes de utilizar de forma crítica diversos modelos de ecossistemas. Devem ainda ser capazes de conceber, analisar e implementar modelos biogeoquímicos com software de simulação como o Stella ou o Powersim.

O sétimo capítulo relaciona os modelos com os Sistemas de Apoio à Decisão, mostrando de que modo podem os primeiros ser utilizados para analisar cenários de gestão de um ecosssistema e de que modo os resultados obtidos podem ser classificados com algoritmos de decisão multicritério.

O programa desta UC (Tabela 4-1) foi concebido de forma modular, de modo a possibilitar a frequência da sua totalidade ou somente de uma parte. Os discentes deverão adquirir os ECTS correspondentes aos capítulos 1 e 2, de modo a dominarem os conceitos básicos, podendo depois frequentar parte ou a totalidade dos capítulos restantes. Assim, se um discente tiver somente interesse nos modelos fisiológicos, pode limitar-se a frequentar os capítulos 1, 2 e 3. Importa salientar que, apesar da sua natureza modular, os diferentes capítulos têm importantes interligações que serão exploradas ao longo da leccionação. No entanto, o detalhe com que estas interligações serão aproveitadas pelos discentes dependerá dos módulos concluídos e dos seus interesses de investigação.

A Tabela 4-2 sintetiza o tipo de competências que se espera sejam atingidas pelos discentes em cada capítulo do programa. Importa salientar que as competências a nível da implementação de

modelos baseiam-se na utilização de software específico para a criação de modelos, a partir de linguagens simbólicas relativamente simples, e não implicam o domínio de nenhuma linguagem de programação que requer formação específica.

Tabela 4-1 - Programa da unidade curricular com indicação das horas de contacto, de estudo autónomo e da distribuição dos ECTS pelos capítulos. A bibliografia encontra-se no final de cada capítulo do Manual de Estudo.

Conteúdos	Horas Contacto (Teórico-Práticas)	Estudo Autónomo	ECTS
1. Introdução			
1.1 Conceitos básicos	4	9	0,5
1.2 Domínios e fronteiras dos modelos			
1.3 Elementos dos modelos			
1.4 Dimensões espaciais dos modelos e malhas computacionais			
1.5 Níveis de organização			
2. Desenvolvimento de um modelo			
2.1 Construindo um modelo passo a passo	4	22	1
2.1.1 Conceptualização do modelo			
2.1.2 Implementação do modelo			
2.1.3 Verificação da lógica do modelo e respectivas propriedades			
2.1.4 Análise de sensibilidade			
2.1.5 Calibração			
2.1.6 Validação			
2.2 Exemplos de modelos			
2.2.1 Sistema sem retroações			
2.2.2 Sistema com retroações			
2.2.3 Sistema com retroações e controle externo			
2.2.4 Reator bem misturado			
3. Modelos fisiológicos			
3.1 Produtores primários	4	22	1
3.1.1 Fotossíntese			
3.1.2 Respiração			
3.1.3 Exudação			

3.1.4 Mortalidade e erosão das frondes			
3.1.5 Sedimentação			
3.2 Decompositores			
3.2 Consumidores			
3.3.1 Modelos “Scope for Growth (SFG)”			
3.3.2 Modelos “Dynamic Energy Budget (DEB)”			
4. Modelos aplicados ao estudo da dinâmica de populações			
4.1 Modelos de crescimento sem regulação para populações uniformes	4	22	1
4.2 Modelos de crescimento com regulação para populações uniformes			
4.3 Modelos de crescimento para populações estruturadas			
4.3.1 Modelos baseados em matrizes de transição			
4.3.2 Modelos baseados em equações diferenciais			
5. Modelos aplicados ao estudo das comunidades			
5.1 Modelos predador-presa	4	22	1
5.1.1 Modelo predador-presa de Lotka-Volterra			
5.1.2 Modelo predador-presa com dependência da densidade			
5.1.3 Modelo predador-presa com dependência da densidade e com “saciedade”			
5.2 Modelos de competição			
6. Modelos aplicados ao estudo dos ecossistemas			
6.1 Sub-modelos para os ciclos biogeoquímicos do azoto, do fósforo, do carbono e do oxigénio	6	20	1
6.1.1 Espécies químicas da coluna de água			
6.1.2 Espécies químicas dos sedimentos e da água intersticial			
6.1.3 Mineralização, nitrificação, desnitrificação, adsorção/desorção do fósforo			

6.2 Integração dos ciclos biogeoquímicos com os processos biológicos			
6.3 Integração da biogeoquímica com a hidrodinâmica			
7. Modelos e Sistemas de Apoio à Decisão			
7.1 Análise DPSIR	4	9	0,5
7.2 Análise de cenários			
7.3 Conceptualização de um Sistema de Apoio à Decisão			
Totais	**30**	**126**	**6**

Tabela 4-2 - Competências a desenvolver em cada um dos capítulos.

Capítulos	Comunicar com especialistas	Elaborar projectos de modelação	Conceber modelos	Analisar modelos	Utilizar modelos	Implementar modelos
1	X					
2		X	X	X		
3			X	X	X	X
4			X	X	X	X
5			X	X	X	X
6			X	X	X	X
7	X		X	X	X	

5 Metodologia didáctica

Uma das primeiras questões a explorar nesta, bem como noutras UCs, respeita às expectativas dos discentes em torno da disciplina. Importa desde logo procurar estabelecer sinergias entre interesses científicos, profissionais e outros, manifestados pelos discentes, e parte dos conteúdos da disciplina. Assim, o ensino dos diversos conteúdos pode ser algo personalizado na medida que tal for possível em função do número de alunos. Considerando que esta disciplina é leccionada em regime teórico-prático e que requer a utilização quase permanente de um computador pelos discentes, dificilmente pode ser leccionada a mais do que 15 alunos em

simultâneo, de modo a que o docente possa atender a todas as dúvidas que vão surgindo na utilização do software disponibilizado.

A natureza multidisciplinar de Modelação Ecológica torna fácil o estabelecimento de sinergias com outras UCs. Porém, o recurso à linguagem matemática cria, por vezes, algumas resistências nos alunos com maior dificuldade nesta área. Normalmente, estas dificuldades são menores nos alunos com formação em Engenharia do que nos alunos com formação noutras áreas científicas em que a Matemática tem um peso menor. Uma forma de contornar este "obstáculo cognitivo" é familiarizar os alunos com software que permite multiplicar as suas capacidades matemáticas, procurando que percebam que o essencial é saber equacionar os problemas, sendo que a resolução pode ser facilitada por diversas ferramentas informáticas.

A apresentação dos conteúdos descritos no capítulo anterior será efectuada com recurso a diversos paradigmas didácticos. De acordo com Santos & Praia (1992), no ensino das ciências podem considerar-se os seguintes paradigmas: Aprendizagem por transmissão (APT), Aprendizagem por descoberta (APD), Aprendizagem por mudança conceptual (AMC) e Aprendizagem por pesquisa (APP). A APT radica no pressuposto epistemológico de que os conhecimentos existem fora de nós e que para aprender é suficiente "ouvir" com atenção. O professor é o centro da acção e transmite aos alunos conteúdos que eles armazenam sequencialmente no cérebro**.** Na APT valoriza-se a reprodução pelo aluno dos conteúdos transmitidos pelo professor. Por outro lado, na APD valoriza-se a obtenção de conhecimentos a partir da observação de factos e os comportamentos adquiridos pelo aluno (receitas) para atingir o conhecimento. Porém, não se tem em conta que a construção do conhecimento depende também da construção de ideias a partir de outras ideias. Ao contrário, na AMC considera-se que formar conceitos novos corresponde a deformar conceitos antigos e que o erro é um factor de progresso do conhecimento científico. Assume-se que o conhecimento segue um percurso incerto, sinuoso, dialéctico e que toda a observação está carregada de teoria. Finalmente, na APP valoriza-se uma perspectiva global da ciência e a transdisciplinaridade, bem como o contexto sócio-cultural de produção do conhecimento e a importância dos erros em ciência (Cachapuz et al., 2002).

A Figura 5-1, adaptada de Santos e Praia (1992) resume o que foi exposto sobre os diferentes paradigmas didácticos em ligação com perspectivas epistemológicas e psicológicas desenvolvidas ao longo dos séculos XIX e XX, associando o Behaviorismo e o Empirismo à APT e à APD (compreendidas no paradigma mais lato de Aprendizagem por Aquisição Conceptual (AAC)) e o Cognitivismo e o Racionalismo aos paradigmas mais recentes de AMC e APP.

Será porventura difícil leccionar uma disciplina com base somente num dos paradigmas apresentados, pois há situações em que é necessário transmitir algumas bases para que os alunos possam partir à descoberta. No entanto, a AMC e a APP parecem ser os paradigmas a privilegiar numa disciplina de modelação. O ensino-aprendizagem dos diferentes conceitos deve apoiar-se nos conhecimentos que os discentes dominam. Além disso, os modelos possibilitam

realizar um sem número de experiências virtuais que permitem compreender as suas propriedades. Estas experiências podem constituir um simulacro de aplicação do método hipotético-dedutivo. As diferenças entre os resultados esperados e os observados com os modelos podem servir para alimentar discussões bastante produtivas, quer sobre o funcionamento dos sistemas representados, quer sobre a forma como os mesmos foram simulados.

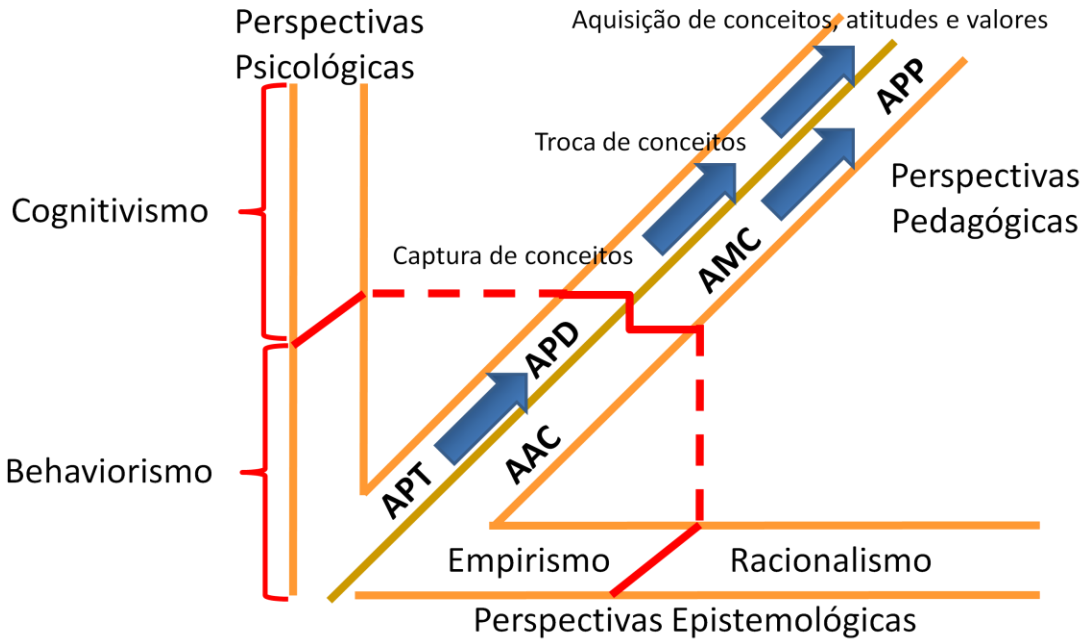

Figura 5-1- Evolução dos paradigmas didácticos e a sua relação com diferentes perspectivas epistemológicas e psicológicas (AAC – Aprendizagem por aquisição conceptual; APT – Aprendizagem por transmissão; APD – Aprendizagem por descoberta; AMC – Aprendizagem por mudança conceptual; APP – Aprendizagem por pesquisa) (Adaptado de Santos & Praia, 1992).

Em função do exposto, durante as aulas há períodos de exposição por parte do docente alternados com momentos de reflexão por parte dos alunos e discussão em grupo, apoiados em software fornecido pelo docente. Importa referir que os períodos de exposição devem ser acompanhados de perguntas e respostas de modo a que o docente possa apreender o que os alunos sabem ou julgam saber sobre os temas tratados. Este tipo de interacção deve ocorrer durante a leccionação de todos os capítulos do programa. As aulas devem ser organizadas em módulos de duas horas, sendo pelo menos uma hora ocupada com trabalho no computador. É razoável organizar os alunos em grupos de dois para facilitar a interacção com o docente e a resolução de problemas durante a utilização do software. Numa disciplina como a que aqui se propõe é muito provável que alguns dos alunos dominem conceitos facilmente aplicáveis a alguns dos capítulos, facto que deve ser potenciado no processo de ensino-aprendizagem. O trabalho autónomo dos alunos caminha no sentido de procurarem sinergias entre os temas dados pelo docente e outras actividades de ensino/investigação em que estejam envolvidos. Este trabalho autónomo conta ainda com o apoio presencial do docente durante as horas de

atendimento (cerca de 4 horas semanais) e com o apoio remoto facultado através da plataforma de ensino à distância. Esta plataforma contém o software utilizado na leccionação da disciplina, o Manual de Estudo e diversos artigos científicos para consulta. Além disso, dispõe de uma ferramenta que permite trocar mensagens em tempo real com os alunos para esclarecimento de dúvidas.

O Mecanicismo e o Reducionismo têm influenciado a ciência e a educação ao longo dos últimos 300 anos. A visão Sistémica da natureza emergiu como uma alternativa no início do século XX. A Teoria de Sistemas (Von Bertalanffy, 1969) e a Teoria da Complexidade (Morin, 1990, 1999) são exemplos relativamente recentes de visões diferentes da realidade. A modelação ecológica é uma área do conhecimento que reflecte bem a visão Sistémica da natureza. Além disso, torna fácil (quase obrigatório) integrar elementos da Teoria de Sistemas e da Teoria da Complexidade. As múltiplas interacções e retroacções que são necessárias para representar os processos fisiológicos, a dinâmica de populações e comunidades e o funcionamento dos ecossistemas são um bom exemplo da visão Sistémica da natureza. A importância das interacções e retroacções reflectem os conceitos da Teoria de Sistemas. Na verdade, os modelos matemáticos utilizam-se para representar sistemas, ou seja, entidades com propriedades distintas da soma das propriedades das partes que os constituem e com algum nível de regulação. Por outro lado, a necessidade de aplicar dialecticamente o reducionismo e o holismo no desenvolvimento e na implementação de modelos está de acordo com a Teoria da Complexidade. A visão holística salienta-se na fase inicial do trabalho de modelação, quando se definem os objectivos gerais a perseguir com determinado modelo. De seguida, quando se procura conceptualizar o modelo, o raciocínio analítico ganha peso, pois é necessário perceber quais os elementos funcionais do sistema a ser representado e de que modo interagem entre si. Sempre que o modelador implementa algo de novo ou altera parte de um modelo tem que alternar entre o reducionismo e o holismo para conseguir resolver problemas particulares e ter presente o seu efeito no todo. Esta dialéctica entre o todo e as partes proporciona um excelente exercício de organização do pensamento que ajuda a conhecer melhor as dimensões do nosso desconhecimento. Ou seja, a implementação de modelos pode ser mais útil pelas perguntas que os mesmos suscitam do que pelas respostas que ajudam a obter. A tentativa de sintetizar num modelo tudo o que sabemos sobre um sistema leva-nos a perceber os limites do nosso conhecimento e evidencia as áreas em que é necessário investir mais no trabalho experimental.

Na situação actual do ensino superior é difícil encetar qualquer discussão relacionada com as metodologias didácticas a aplicar numa qualquer disciplina ou ciclo de estudos, bem como com o seu conteúdo programático, sem reflectir sobre os objectivos do Processo de Bolonha. Considerando os “Descritores de Dublin” e o projecto “Tunning” (JQI, 2004; Tuning Educational Structures in Europe, 2007), algumas das capacidades que se pretende desenvolver nos alunos através das reformas relacionadas com o Processo de Bolonha são: capacidade para obter e interpretar dados e reflectir sobre questões científicas, sociais e éticas; capacidades cognitivas e de análise e síntese e; competências “sistémicas”. Relativamente às capacidades de análise, de síntese e às competências sistémicas, já se disse o suficiente. A reflexão sobre questões

científicas é um aspecto quase obrigatório quando se procura trabalhar em modelação. As questões sociais e éticas são transversais e, embora não fazendo explicitamente parte do programa da disciplina, podem ser introduzidas em vários tópicos no sentido de sensibilizar os discentes para a contribuição que a modelação pode dar para a conservação da natureza e para a gestão sustentável dos ecossistemas naturais.

A modelação ecológica pode ser uma disciplina útil para promover a interdisciplinaridade e mesmo a transdisciplinaridade, pois envolve conceitos de Matemática, de Física, de Química, de Biologia e de Ecologia. Assim, é fácil criar sinergias com outras disciplinas e promover a realização de trabalhos conjuntos numa lógica de Aprendizagem Baseada em Projecto (ABP) (Duarte et al., 2009). Há diversos tipos de ABP, conforme demonstrado na Figura 5-2: (i) há UCs de projecto em diversos ciclos universitários, como algumas licenciaturas em engenharia e arquitectura; (ii) há projectos integrados em certas UCs que fazem parte do sistema de avaliação das mesmas; (iii) há projectos que envolvem várias UCs. A natureza interdisciplinar da Modelação Ecológica torna fácil a sua integração com outras UCs em projectos do último tipo. A APB tem sido referida como uma abordagem útil para treinar os alunos a trabalhar em equipa na resolução de problemas, para desenvolver a sua capacidade de comunicar, de lidar com sistemas complexos e de aplicar conhecimentos a situações reais (Harrison et al., 2007; Spinks et al., 2006). Estudos recentes revelaram que os estudantes de engenharia identificam os trabalhos de projecto como o elemento mais importante na sua educação para ganhar experiência profissional (Nair et al., 2009; Spinks et al., 2006).

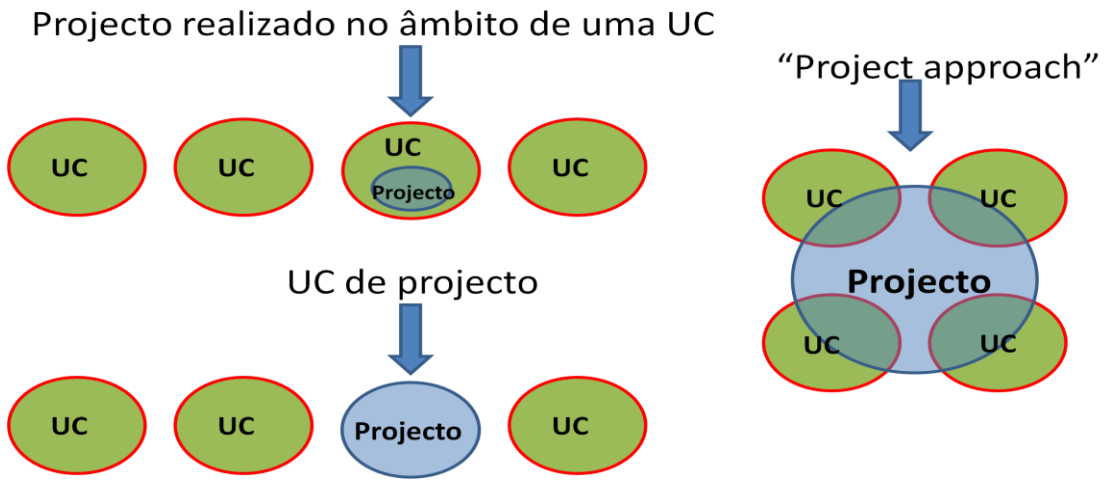

Figura 5-2 – Diversos tipos de Aprendizagem Baseada em Projecto (ABP) ("Project Based Learning"). Os projectos podem ser realizados no âmbito de uma UC, ser uma UC, ou ser partilhados por várias UCs (ver texto).

6 Planificação das aulas

A planificação das aulas segue a estrutura do programa (Tabela 4-1) dividindo-se em 15 sessões de duas horas. A disciplina deve funcionar ao longo de um semestre com 4 horas de aulas por semana.

Tabela 6-1 – Planificação das aulas. Cada sessão tem a duração de duas horas. Cada capítulo do programa corresponde a duas sessões, excepto o capítulo 6 que compreende três sessões.

Sessão	Tópicos
1	Introdução aos objectivos da disciplina, seguida da descrição da metodologia didáctica a empregar e do sistema de avaliação. Segue-se um debate com os alunos no sentido de apurar os seus conhecimentos sobre os tópicos tratados na UC.
2	Apresentação sobre conceitos básicos de modelação e sobre os termos técnicos da disciplina (pontos 1.1 – 1.5 do programa (cf. – Tabela 4-1)). Conclui-se a aula com a definição do tema do primeiro trabalho a realizar dentro da temática geral referida na Tabela 7-1.
3	Descrição do processo de desenvolvimento de um modelo (ponto 2.1 do programa), com ênfase na dialéctica entre o trabalho experimental e a modelação. Na segunda metade da aula os alunos são confrontados com diversos esquemas de modelos sendo-lhes pedido que, a partir dos mesmos, escrevam as equações gerais de balanço para cada variável. São realizados exercícios com auxílio de uma folha de cálculo de modo a comparar soluções analíticas com soluções numéricas de alguns modelos com uma só variável de estado.
4	Esta sessão é dedicada à apresentação de diversos exemplos de modelos (ponto 2.2 do programa), na primeira parte da aula e à utilização de software fornecido pelo docente para fazer simulações com alguns dos exemplos descritos, na segunda parte da aula. Nesta altura, os discentes são familiarizados com software de simulação de fácil utilização através dos referidos exemplos. No final da aula o tema do segundo trabalho a realizar é definido dentro da temática geral referida na Tabela 7-1.
5	Esta aula é dedicada ao ponto 3.1 do programa, relativo à modelação fisiológica dos produtores primários. A sessão alterna entre a apresentação pelo docente de conceitos relativos a cada dos subcapítulos, e a utilização de modelos exemplificativos pelos alunos. Nesta sessão os alunos são encorajados a alterar os modelos fornecidos

	de modo a incorporarem funcionalidades novas nos mesmos e ganharem mais familiaridade com o processo de implementação.
6	Nesta sessão são tratados os pontos 3.2 e 3.3 do programa, referentes à modelação fisiológica dos decompositores e dos consumidores. Mais uma vez, alterna-se entre a apresentação pelo docente de conceitos relativos a cada dos subcapítulos e a utilização de modelos exemplificativos pelos alunos. No final da aula é definido o terceiro trabalho a realizar dentro da temática geral referida na Tabela 7-1.
7	Apresentação de conceitos relativos à modelação de populações uniformes (pontos 4.1 – 4.2 do programa), seguida da utilização de folhas de cálculo preparadas pelo docente para os alunos realizarem experiências com a parametrização de diversos modelos.
8	Esta sessão é dedicada ao ponto 4.3 do programa e trata de modelos de populações estruturadas, ou seja, divididas em classes etárias, de tamanho ou de peso. Após uma apresentação efectuada pelo docente, os alunos têm oportunidade de usar e implementar modelos para populações estruturadas em folha de cálculo e em software específico de modelação. A aula é concluída com a definição do quarto trabalho prático a realizar dentro da temática geral referida na Tabela 7-1.
9	Esta aula trata de modelos predador-presa e corresponde ao ponto 5.1 do programa. A abordagem a seguir é a habitual: o docente introduz o tema seguindo-se actividades práticas em que os alunos usam software fornecido com diversos modelos predador-presa. Nesta fase, os alunos são cada vez mais encorajados a implementar os seus próprios modelos ou a tentar alterar os modelos fornecidos.
10	Nesta sessão são tratados os modelos de competição (ponto 5.2 do programa). Após a habitual actividade “hands on modelling” define-se o tema do quinto trabalho prático.
11	A primeira sessão dedicada ao capítulo 6 trata da análise de alguns ciclos biogeoquímicos (ponto 6.1 do programa). Nesta fase, os alunos são desafiados a implementarem os seus próprios modelos para representar, pelo menos, um ciclo biogeoquímico.
12	A segunda sessão referente ao capítulo 6 trata da integração dos ciclos biogeoquímicos com os processos biológicos (ponto 6.2 do programa). Os alunos continuam a trabalhar com os modelos implementados na sessão anterior.
13	Na última sessão respeitante ao capítulo 6, após a apresentação de alguns conceitos teóricos relativos ao ponto 6.3 do programa, são apresentados e discutidos exemplos de simulações realizadas com modelos acoplados hidrodinâmicos-biogeoquímicos. No final da sessão é definido o tema do sexto trabalho.

14	Esta sessão é dedicada aos aspectos relacionados com a análise de cenários gerados com modelos ecológicos (pontos 7.1 e 7.2 do programa). A maior parte do tempo da aula é utilizado num debate sobre a aplicação da metodologia DPSIR a um ecossistema.
15	A última sessão do programa é preenchida com a apresentação de uma metodologia para integrar modelos de ecossistemas em Sistemas de Apoio à Decisão (ponto 7.3 do programa). É fornecida uma folha de cálculo aos alunos parta que possam experimentar uma análise multicritério para classificar cenários gerados por um modelo ecológico. A aula é concluída com a definição do sétimo trabalho prático a realizar dentro da temática geral referida na Tabela 7-1.

7 Metodologia de avaliação

A metodologia de avaliação é coerente com a metodologia didáctica, privilegiando a APP. Assim, a avaliação é baseada na realização de trabalhos relativos a cada capítulo. Estes trabalhos devem ser baseados no conteúdo (Tabela 4-1) de cada capítulo e nas competências a adquirir (Tabela 4-2).

Na Tabela 7-1 apresentam-se temas gerais dos trabalhos a desenvolver. Importa aqui referir que os alunos são encorajados a adaptar os temas dos trabalhos aos seus interesses de ensino, investigação e outros. Os trabalhos devem conter um texto explicativo, com um máximo de 5-6 páginas e, caso impliquem a utilização de modelos, devem incluir um diagrama explicativo dos mesmos, os resultados obtidos e a respectiva interpretação.

Todos os trabalhos devem ser baseados numa pesquisa bibliográfica efectuada pelos alunos, a partir das referências indicadas para cada capítulo no Manual de Estudo. Devem ser realizados no número de horas previsto para trabalho autónomo e contarão com o apoio do docente da disciplina no horário de atendimento (4 horas semanais) e através da plataforma de ensino à distância. De modo a ajudar a sua realização, são fornecidos aos alunos diversos modelos que podem servir de base à elaboração de grande parte dos trabalhos. Os alunos podem trabalhar em grupo para potenciar sinergias e desenvolver a capacidade de trabalhar em equipa.

A nota final será a média das notas obtidas nos diversos trabalhos, ponderada pelos ECTS correspondentes a cada capítulo do programa. No caso de não aprovação, haverá lugar a um exame de recurso sobre toda a matéria que envolverá exercícios práticos.

No caso desta disciplina ser integrada com outras, numa lógica de ABP (cf. - 5), pode reduzir-se o número de trabalhos aumentando um pouco a sua complexidade. Neste caso, os alunos podem ter nota creditada a várias disciplinas com um mesmo trabalho interdisciplinar (Duarte et al.,

2009). Um trabalho desta natureza pode ser desenvolvido ao longo de todo um semestre com o apoio de vários docentes e culminar na elaboração de um artigo científico.

Tabela 7-1 - Temas gerais dos trabalhos a realizar por capítulo.

Capítulo	Temas gerais dos trabalhos
1	Análise crítica de um artigo científico que descreva um modelo de um ecossistema de modo a identificar as respectivas componentes (variáveis de estado, funções forçadoras, etc.), dimensões (0D, 2D e 3D), domínio e objectivos.
2	Conceptualização de um modelo com identificação das respectivas componentes (variáveis de estado, funções forçadoras, etc.), relações entre elas, dimensões espaciais (0D, 2D e 3D), domínio espacial e objectivos do mesmo.
3	Implementação de um modelo fisiológico 0D relativamente a determinada espécie.
4	Implementação de um modelo de dinâmica populacional para uma população estruturada de determinada espécie.
5	Implementação de um modelo para descrever as interacções biológicas entre duas ou mais espécies.
6	Implementação de um modelo para descrever um ciclo biogeoquímico.
7	Utilização de um modelo de um ecossistema fornecido pelo docente ou conseguido pelos discentes, para realizar análises de cenários de gestão e avaliação desses cenários segundo uma metodologia de análise multicritério.

8 Bibliografia

Baretta, J., Ruardij, P., 1988. Tidal flat estuaries. Simulation and analysis of the Ems estuary. Springer-Verlag.

Cachapuz, A., Praia, J., Jorge, M., 2002. Ciência, Educação em Ciência e Ensino das Ciências. Ministério da Educação/Instituto de Inovação Educacional, Colecção Temas de Investigação nº 26.

Cruz, F., Pereira, A., Valente, P., Duarte, P., Reis, L.P., 2007. Intelligent Farmer Agent for Multi-agent - Ecological Simulations Optimization. In: J. Neves, M. Santos, and J. Machado (Eds.): EPIA 2007, LNAI 4874, pp. 593–604.

Duarte, P., 2005. Photosynthesis-Irradiance Relationships in Marine Microalgae. Vol 2. In: D.V. Subba Rao (Ed.), Algal Cultures Analogues of Blooms and Applications. Science Publishers Enfield (NH), USA, Plymouth,UK. Chapter 17: pp 639-670.

Duarte, P, Fonseca, A, Monteiro, A, Guerreiro, MJ, Barros, N, Jesus, T., 2009. An Holistic Project Experience in Environmental Engineering Education. In: Proceedings of the First Ibero-American Symposium on Project Approaches in Engineering Education, (D. Carvalho, N. van Hattum-Janssen, R.M. Lima Eds.): pp 235-240.

Gertsev, V.I., Gertseva, V.V., 2004. Classification of mathematical models in ecology. Ecological Modelling 178: 329–334.

Harrison, G.P., Macpherson, D.E., Williams, D.A., 2007. Promoting interdisciplinarity in engineering teaching. European Journal of Engineering Education, 32: 285-293.

JQI - Joint Quality Initiative, 2004. Shared 'Dublin' descriptors for Short Cycle, First Cycle, Second Cycle and Third Cycle Awards. Available on the JQI site (www.jointquality.org).

Jorgensen, S.E., 1995. State of the art of ecological modelling in limnology. Ecological Modelling 78: 101-115.

Jorgensen, S.E., Bendoricchio, G., 2001. Fundamentals of ecological modelling. Elsevier Science, 3rd Edition.

Koijman, S.A.L.M., 2003. Dynamic energy and mass budgets in biological systems. Cambridge, 2nd edition.

Leslie, P.H., 1945. On the use of matrices in certain population mathematics. Biometrica 33: 183-212.

Leslie, P.H., 1948. Some further notes on the use of matrices in population mathematics. Biometrica 35: 213-245.

Luyten, P.J., Jones, J.E., Proctor, R., Tabor, A., Tette, P., Wild-Allen, K.(Eds.), 1999. COHERENS – A Coupled Hydrodynamic–Ecological Model for Regional and Shelf Seas. Users Documentation. Mumm Report, Management Unit of the Mathematical Models of the North Sea, p. 914.

MOHID homepage. Available at http://www.mohid.com/. [Visited at October 7th, 2008].

Morin, E., 1990. Introdução ao pensamento complexo. Instituto Piaget.

Morin, E., 1999. Seven Complex Lessons in Education for the Future. Paris: UNESCO.

Nair, C.S:, Patil, A., Mertova, P., 2009. Re-engineering graduate skills – a case study. European Journal of Engineering Education 34: 131–139.

Otto, S.P., Day, T., 2007. A biologist's guide to mathematical modelling in Ecology and Evolution. Princeton University Press.

Pereira, A., Duarte, A., Norro, A., 2006. Different modelling tools of aquatic ecosystems: A proposal for a unified approach. Ecological Informatics 1: 407-421.

Pereira, A., Duarte, P., Reis, L.P., 2007. An Integrated Ecological Modelling and Decision Support Methodology. Proceedings of the 21st European Conference on Modelling and Simulation – ECMS 2007, Prague, 4-6 Jun 2007, pp. 497-502.

Santos, E.M., Praia, J-F., 1992. Ensino das ciências e formação de professores, Número 1. Projecto Mutare, Universidade de Aveiro (coord. de Francisco Cachapuz).

Scholten H., Van der Tol, M.W.M., 1998. Quantitative validation of deterministic models: when is a model acceptable? The proceedings of the Summer Computer Simulation Conference, SCS, San Diego, CA, USA: 404-409.

Spinks, N., Silburn, N., Birchall, D., 2006. Educating Engineers for the 21st Century: The Industry View. London: Royal Academy of Engineering.

Taylor, A.H., 1993. Modelling climatic interactions of the marine biota. In: Willebrand, J., Anderson, D.L.T. (Eds.), Modelling Oceanic Climate Interactions. NATO ASI Series, Series I: Global Environmental Change, Vol. I, Springer-Verlag: pp 373-413.

Tuning Educational Structures in Europe, 2007. Tuning General Brochure, available at http://tuning.unideusto.org/tuningeu.

Von Bertalanffy, L., 1969. General system theory: foundations, development, applications (14th edition). NewYork: George Braziller