

MODELAÇÃO DE ESCOAMENTOS NO ÂMBITO DA DETERMINAÇÃO DO REGIME DE CAUDAIS ECOLÓGICOS. APLICAÇÃO DO PROGRAMA RIVER 2D

Flow Modelling in Order to Obtain Ecological Flow Regime. Application of RIVER 2D Software

JOANA FONSECA ⁽¹⁾, RODRIGO MAIA ⁽²⁾ e JOÃO OLIVEIRA ⁽³⁾

⁽¹⁾ Mestre em Engenharia Civil, FEUP
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, joanafilipafonseca@gmail.com

⁽²⁾ Professor Associado, FEUP
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, rmaia@fe.up.pt

⁽³⁾ Engenheiro Civil, EDP,
Rua Ofélia Diogo Costa, 39, 4050 - 009 Porto, joamiguel.oliveira@edp.pt

Resumo

Nas últimas décadas tem-se observado uma crescente preocupação ambiental associada à degradação dos ecossistemas, consequente das modificações verificadas a jusante de barragens, devida, essencialmente, à ausência de um regime natural de caudais. Como resposta a esta problemática, surge o conceito de Regime de Caudais Ecológicos (RCE), integrando um plano de mitigação e requalificação associado à construção ou existência de uma barragem. No entanto, a determinação deste regime não é consensual, não existindo nenhum método globalmente aceite para este fim.

Neste contexto, o estudo apresentado iniciou-se com uma extensa pesquisa relativa aos vários métodos existentes, abordando-se as principais vantagens e inconvenientes associadas a cada um. Dos métodos para determinação do RCE, destacam-se os de simulação de habitat por atenderem às respostas bióticas das espécies ao habitat físico. Inserido nesta tipologia o método mais utilizado é o IFIM, que é apresentado com detalhe, nomeadamente ao nível dos princípios ecológicos em que se baseia, as fases inerentes e os programas necessários à sua implementação. Posteriormente, foi definida uma metodologia que permitisse otimizar, com base no IFIM e utilizando o River 2D, a modelação hidrodinâmica bidimensional. A proposta final de metodologia reflete, não só os conhecimentos adquiridos no decorrer da profunda pesquisa bibliográfica, mas também o conhecimento empírico obtido com a sua aplicação a dois casos práticos – o Aproveitamento Hidroelétrico de Touvedo e o Aproveitamento Hidroelétrico de Ribeiradio-Ermida. Nesta aplicação prática, que permitiu o aperfeiçoamento da abordagem inicialmente proposta, recorreu-se a um processo sistematizado assente nas seguintes etapas: identificação do problema e dos objetivos da modelação; planeamento da abordagem e respetiva calendarização; realização das campanhas de recolha de dados, e posterior tratamento dos mesmos; modelação hidrodinâmica e simulação do habitat; e, por fim, interpretação de resultados.

Palavras-chave: Caudais ecológicos, IFIM, River2D, modelação bidimensional, habitat.

Abstract

In the past decades, a growing concern with environmental problems has appeared, related to the degradation of ecosystems caused by modifications occurring downstream of dams due to the absence of a natural flow regime. As a response to this problem, the concept of Environmental Flow Regime (EFR) appeared as part of a mitigation and requalification plan to be considered for any new or already existing dam. However, the determination of this regime is not consensual, and a globally adopted method to achieve this goal is lacking.

In this context, the study began with an extensive research on the already existing methods, addressing the main advantages and disadvantages of each one. From all the methods to determine the EFR, the ones framed on habitat simulation stand out as addressing the biotic answers of the species to the physical habitat. Of these methodologies the most commonly used is the IFIM. This paper's goal was to define a methodology that allows the optimization of the bi-dimensional hydrodynamic modelling, based on IFIM. The final proposed methodology reflects, not only the knowledge achieved due to the exhaustive bibliographic research developed, but also the empirical knowledge achieved with its practical application to two study cases – Touvedo Hydroelectric Power Plant and Ribeiradio-Ermida Hydroelectric Power Plant. In that practical application, that allowed the improvement of the initially proposed approach, a systematized process was used, based on the following stages: problem identification and objectives; approach planning and respective scheduling; data collection campaigns and data analysis; hydrodynamic modelling and habitat simulation; and finally, results analysis.

Keywords: Environmental Flow, IFIM, River2D, bi-dimensional modelling, habitat.

1. Enquadramento Geral

A crescente utilização e diversificação de usos associada aos recursos hídricos motivou, nas últimas décadas em Portugal, a construção de um número significativo de barragens, a maioria delas criando albufeiras de regularização. De entre os vários tipos de alterações ecológicas provocadas pelas albufeiras artificiais, destaca-se a alteração profunda do regime de caudais a jusante, nomeadamente a redução em frequência e magnitude dos caudais de cheia, a manutenção de caudais estivais superiores aos naturais e, de uma forma geral, a desvirtuação do regime natural de caudais anteriormente existentes (Petts *et al.*, 2005). Estas alterações interferem com o equilíbrio do ecossistema, podendo levar à sua extinção. No sentido de minorar estes impactes, procura-se estabelecer a jusante das barragens um regime de caudais ecológicos, capaz de responder positivamente às necessidades das espécies e ecossistemas ribeirinhos.

A complexidade associada à determinação deste regime reside, principalmente, no número elevado de variáveis de decisão. Partindo do pressuposto de que o habitat aquático é a variável mais importante do ecossistema, torna-se imprescindível compreender a relação existente entre o habitat disponível e o caudal. A Metodologia Incremental (IFIM) é a abordagem mais utilizada para combinar dados do habitat com dados hidráulicos. A implementação desta metodologia passa pela utilização de um modelo que permita simular, para diferentes caudais, as alturas de escoamento e as velocidades associadas. Estes parâmetros hidráulicos são os que mais influenciam o habitat disponível para as espécies (Carter *et al.*, 2004)

É neste contexto, e à luz da Diretiva Quadro da Água, que a EDP – Gestão da Produção de Energia, tem vindo a promover estudos com o objetivo de definir os regimes de caudais ecológicos a implementar nos seus aproveitamentos hidroelétricos, os quais incluíram, pela primeira vez, no ano de 2000, a utilização da metodologia do IFIM no rio Lima. Complementarmente, a empresa efetua a monitorização ecológica da eficácia destes regimes, tendo em vista a sua eventual redefinição. Deste modo, pretende contribuir para a preservação e mimetização dos ecossistemas naturais dos cursos de água de Portugal.

2. Objetivo

O objetivo primordial deste estudo era obter uma metodologia que visasse todo o processo inerente à modelação hidrodinâmica bidimensional necessária à aplicação do método IFIM, desde a obtenção e tratamento de dados até à interpretação dos resultados obtidos.

Deste modo, pretende-se identificar as principais limitações e vantagens do programa River2D, software de referência utilizado na definição de regimes de caudais ecológicos. Tendo em vista este objetivo, definiu-se, à partida, que a melhor forma de o atingir seria através da realização de estudos aplicados a situações concretas reais, que permitissem percorrer todos os passos habitualmente efetuados quando se recorre ao método do IFIM na definição do Regime de Caudais Ecológicos (RCE).

3. Metodologia Incremental (IFIM)

3.1. Considerações gerais

O Instream Flow Incremental Methodology (IFIM) é uma técnica da autoria do Cooperative Instream Flow Service Group do United States Fish and Wildlife (USFWS), desenvolvida no final dos anos 70 do século XX. O aparecimento desta metodologia surge da necessidade do governo norte-americano avaliar os impactes de pequenas centrais hidroelétricas na manutenção das atividades piscatórias, na altura em que era requerida a renovação das licenças de centenas de projetos.

A aplicação deste método é usualmente direcionada para as necessidades de caudal ecológico (Ecological Flow Requirements – EFR), de espécies-alvo piscícolas e, numa escala menor, de espécies invertebradas (Stalnaker *et al.*, 1995). No entanto, o IFIM tem sido adaptado para uma variedade de outras componentes dos sistemas aquáticos e situações associadas, como é o caso da determinação dos caudais que permitam a manutenção do ecossistema ao nível do substrato, ou seja, do transporte de sedimentos (Milhous, 1983).

A determinação do caudal ecológico pelo método IFIM envolve geralmente as seguintes etapas:

1. Identificação do problema;
2. Planeamento do estudo;
3. Implementação do estudo;
4. Análise de alternativas;
5. Resolução do problema;
6. Verificação e validação.

O estudo apresentado focou-se nas primeiras quatro fases da metodologia, e, mais concretamente, na fase de implementação do estudo.

3.2. Identificação do problema

Esta etapa engloba duas componentes – análise física e análise institucional. Na primeira, procura-se determinar a localização e a extensão geográfica das mudanças físicas e químicas do sistema, o respetivo grau de alteração, assim como a identificação dos recursos aquáticos de maior significado, sendo efetuada uma caracterização ambiental preliminar. Por outro lado, na análise institucional, procura-se identificar todas as partes interessadas ou afetadas no projeto, as suas preocupações, a informação que é necessário recolher e como será tomada a decisão (Sanz *et al.*, 2002).

3.3. Planeamento

Na segunda fase de aplicação da metodologia IFIM, o foco principal é a identificação das informações necessárias que permitam atender as preocupações dos intervenientes, sendo efetuado um levantamento das informações existentes e do que será necessário obter. Esta fase resulta na elaboração de um documento que define como será implementado o estudo, ou seja, quem fará o quê, quando, onde, como e com que custo. É de mencionar que é nesta fase que são escolhidas as espécies-alvo para o estudo em questão e obtidas as respetivas curvas de preferência de habitat.

3.4. Implementação do estudo

A fase de implementação é considerada a mais interessante e cientificamente desafiadora. Consiste em atividades executadas sequencialmente, de acordo com um plano de trabalho elaborado na fase anterior. Inclui a recolha e tratamento de dados, simulação e análise de resultados.

Após a recolha dos dados exigidos pelo modelo, procede-se à modelação computacional do microhabitat. O objetivo passa por desenvolver relações funcionais entre diferentes caudais e microhabitats para vários recursos aquáticos (Bovee, 1997). Os modelos permitem, por isso, avaliar a adequação do habitat com base em variáveis físicas quantificáveis, tais como a profundidade, a velocidade e o substrato.

Os modelos dividem-se em unidimensionais (1D) e bidimensionais (2D). Apesar de ambos permitirem o cálculo do habitat disponível em função do caudal, os modelos 2D, como o River2D, apresentam um maior rigor e capacidade de simulação, sendo por isso o adaptado por este estudo.

3.5. River2D

O River2D é um programa de modelação bidimensional de escoamentos, freeware e open-source desenvolvido na Universidade de Alberta, Canadá. A sua utilização requer o conhecimento da topografia do leito do rio, a atribuição de coeficiente(s) representativo(s) da sua rugosidade, informação sobre as condições fronteira (dados hidráulicos referentes ao valor do caudal na secção de entrada e altura de água correspondente na secção de saída) e dados sobre as condições de escoamento inicial (altura do escoamento na secção de entrada). A qualidade dos dados é determinante para a fiabilidade e qualidade da solução obtida (Steffler *et al.*, 2002).

São também de referir algumas das características específicas do River 2D, nomeadamente, a utilização do MEF (Método dos elementos finitos), que confere flexibilidade na forma e exigências de criação da malha, permitindo uma simulação mais detalhada do escoamento em zonas topograficamente complexas.

Por outro lado, este modelo apresenta a possibilidade de incorporar a temperatura, as características do substrato e da cobertura, através da utilização do parâmetro “índice de canal”.

Adicionalmente permite visualizar, durante a simulação, a evolução do nível da água e a sua influência sobre a profundidade e velocidade do escoamento em cada um dos elementos estabelecidos pelo modelo.

A componente de modelação de habitat do River2D baseia-se no conceito de superfície ponderada útil (SPU), conhecido na terminologia anglo-saxónica como Weight Usable Area (WUA) utilizado no PHABSIM.

O SPU é obtido através de um índice de adequação, que varia entre 0 e 1, avaliado para cada ponto do domínio e da área associada a esse ponto. O índice de adequação para cada parâmetro é avaliado através de uma interpolação linear da curva de preferência específica para cada espécie.

4. Metodologia

Pretende-se propor uma metodologia para a modelação de escoamentos aplicando o River2D. A proposta contém os procedimentos a realizar, assim como os dados a recolher e o tipo de equipamentos a utilizar.

Procurou-se integrar a metodologia no contexto de aplicação da IFIM, sendo que este contém fases que não estão diretamente relacionadas com a modelação de escoamentos, mas que se enquadram na perspetiva da determinação do regime de caudais ecológicos. São exemplo destas fases a análise prévia, identificação do problema e planeamento.

Esta proposta preliminar foi efetuada tendo por base a realização de um conjunto de exercícios disponibilizados pela Universidade de Alberta para teste do programa. Estes permitiram adquirir alguma sensibilidade ao modelo e ao tipo de dados necessários.

O conhecimento adquirido nesta experiência, em conjunto com a pesquisa bibliográfica anteriormente descrita, esteve na base da elaboração da metodologia seguidamente proposta. Posteriormente, esta será aplicada a dois casos de estudo, de forma a validá-la e otimizá-la.

4.1. Análise prévia

Nesta fase deve procurar-se recolher toda a informação disponível sobre a zona em estudo, de forma a facilitar o processo de planeamento e de implementação da metodologia.

Numa fase inicial, deve-se enquadrar a temática e a zona. Relativamente à problemática dos caudais ecológicos, é imperativo recolher informação que a contextualize no panorama legislativo, principalmente no âmbito da DQA. Por fim, é necessário caracterizar o local em estudo, a diversos níveis.

Os aspetos a ter em conta são os usos e ocupação do solo, as atividades piscatórias, no âmbito da tipologia DQA e a identificação de áreas protegidas. Caso existam estudos ambientais da zona, estes deverão ser recolhidos e analisados de modo a verificar-se a sua aplicabilidade.

Em suma, nesta fase é imprescindível atingir os objetivos seguidamente enumerados:

- Caracterização da bacia hidrográfica;
- Caracterização da componente ictiofaunística;
- Identificação de potenciais limitações à eficácia do RCE.

4.2. Planeamento

Nesta fase deve planear-se todo o trabalho de campo, a duração da implementação do estudo, os métodos a usar e os equipamentos mais apropriados.

Sintetizando, o processo de planeamento deverá apresentar as seguintes etapas:

1. Pesquisa bibliográfica tendo em vista a recolha de informações ambientais;
2. Delimitação e/ou identificação da massa de água fortemente modificada;

3. Delimitação da extensão do curso de água para visita de reconhecimento, com base no critério de existência de obstáculos intransponíveis às espécies migradoras;
4. Escolha de troços para a visita de reconhecimento, com base nos seguintes critérios:
 - Particularidades morfológicas;
 - Particularidades naturais;
 - Avistamento de espécies.
5. Visita de reconhecimento;
6. Planeamento das ações de levantamento topográfico e medição de caudais no troço selecionado;
7. Trabalho de campo;
8. Tratamento de dados;
9. Modelação do escoamento;
10. Análise de resultados.

A elaboração de um calendário de atividades, especificando a duração de cada tarefa permite que o tempo disponível para o estudo seja rentabilizado e organizado.

4.3. Recolha de dados e equipamentos utilizados

Os equipamentos a utilizar na recolha de dados são definidos na fase de planeamento. Neste caso revelou-se-pertinente a utilização de um sistema GPS com medição de profundidade e um medidor de caudais.

O *Trimble R8 GPS system* é um recetor projetado para aplicações relacionadas com levantamentos topográficos por GPS eficaz e eficiente. Incorpora uma antena GPS, um recetor de rádio interno e baterias, sendo que a tecnologia *bluetooth* permite comunicações sem cabos entre o recetor e o controlador. O *Trimble R8* está disponível como sonda autónoma, estação base ou como parte da estação total GPS, oferecendo por isso o máximo de versatilidade (Figuras 1a) e 1b)).

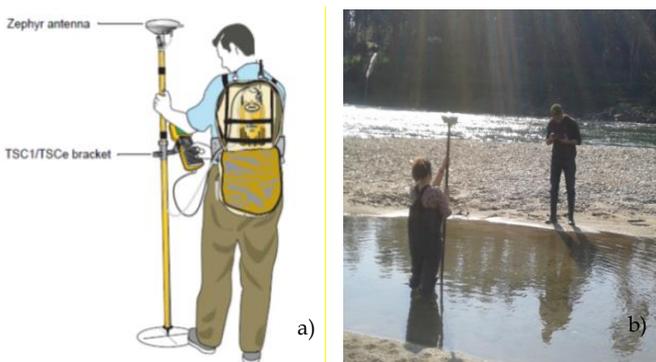


Figura 1. a) Exemplo de funcionamento do Trimble R8; b) teste do equipamento na visita de reconhecimento.

A medição de caudal de um curso de água pode ser efetuada pela integração das velocidades numa secção transversal, normal ao escoamento.

Para este efeito, foram utilizados dois equipamentos: o *OTT MF pro* e o *RiverRay* (Figuras 2a) e 2b)). O *OTT MF Pro* é constituído por um sensor eletromagnético de pequenas dimensões colocado numa haste e por um aparelho de mão robusto.



Figura 2. a) Medição de caudais com o OTT MF Pro, no Rio Vouga; b) Medição de caudais no Rio Vouga, utilizando o River RAY.

Este equipamento é adequado para medições em águas rasas uma vez que o operador terá de ser capaz de transportar e operar o equipamento. Não é, por isso, indicado para velocidades elevadas e/ou profundidades elevadas.

A secção de medição deverá ser escolhida de modo a apresentar o menor número possível de obstáculos e irregularidades que induzam variações na velocidade do escoamento.

Nos casos de maiores profundidades (superiores a 40 cm), aconselha-se a utilização do *RiverRay*, que opera autonomamente, sendo necessário um operador em cada uma das margens. Este equipamento é capaz de medir velocidades, batimetria do canal e ainda caudais através do efeito Doppler, de acordo com o método secção-velocidade.

4.4. Modelação hidrodinâmica e simulação de habitat

Após a recolha de dados e respetivo tratamento procede-se à modelação computacional. Em primeiro lugar procede-se à criação do ficheiro relativo à topografia da zona em estudo; de seguida, e com base nesse ficheiro, deve-se: definir os limites exteriores da modelação no trecho levantado (e limites interiores caso existam ilhas, por exemplo); especificar a rugosidade absoluta, e; caso necessário, adicionar pontos e linhas de quebra.

Posteriormente é necessário definir a malha computacional. A definição da malha deve ser realizada recorrendo ao editor gráfico *R2D_Mesh*.

Em primeiro lugar, definem-se os nós nos limites exteriores anteriormente estabelecidos; seguidamente, gera-se um preenchimento uniforme de nós e um preenchimento específico em zonas de topografia mais complexa; por fim, define-se a secção de entrada e saída de escoamento no trecho a modelar.

Uma vez concluídos os passos anteriormente descritos, procede-se à simulação hidrodinâmica propriamente dita.

O processo inicia-se definindo as condições fronteiras, ou seja, a gama de caudais a analisar e as alturas de água associadas.

Para cada caudal que se pretenda analisar, é necessário fornecer a cota da superfície livre a jusante e uma estimativa da cota de superfície livre a montante. No final, obtém-se um mapeamento que permite extrapolar informações relativas à distribuição da velocidade e altura de escoamento, em cada ponto da área simulada.

Relativamente à simulação de habitat, esta é realizada com base em três elementos: o ficheiro referente ao caudal a simular, previamente obtido da modelação hidrodinâmica; dados referentes à preferência do habitat e ao índice de canal.

Com estas informações, o programa é então capaz de calcular a superfície ponderada útil, apresentando mapas da adequação do troço relativamente à velocidade e a profundidade de escoamento, ao substrato e a um coeficiente que combina os três parâmetros anteriores.

5. Aplicação da Metodologia ao Aproveitamento Hidroelétrico de Touvedo

O Aproveitamento Hidroelétrico de Touvedo encontra-se localizado no rio Lima, distrito de Viana do Castelo. Destina-se essencialmente a regularizar os elevados caudais turbinados pela central do Alto Lindoso, armazenando-os temporariamente e restituindo-os ao rio imediatamente a jusante da barragem de Touvedo. Esta está equipada com um dispositivo de passagem para peixes do tipo ascensor vertical, pelo que se torna pertinente a realização de estudos que permitam avaliar a eficácia da passagem existente, em particular se a gama de caudais ecológicos estabelecida e em vigor é capaz de originar boas condições de acesso das espécies ao dispositivo, quer pela criação de um habitat favorável na zona imediatamente a jusante da barragem, quer pelo estabelecimento de caminhos preferenciais contínuos, ao longo dos quais sejam mantidas condições que permitam a progressão dos peixes até ao ascensor.

Considerando-se a finalidade de avaliar a eficácia do dispositivo, o local mais adequado a modelar é imediatamente a jusante do aproveitamento.

A gama de caudais modelada encontrava-se compreendida entre 1,5 m³/s e 5,5 m³/s, sendo que o valor mínimo corresponde ao caudal de atração do sensor de peixes, implementado em permanência; quanto ao valor máximo, dado que o caudal ecológico definido para este aproveitamento (que deve ser implementado quando os grupos não estão em funcionamento) é de 4 m³/s, deve corresponder ao valor da combinação desses caudais, o que perfaz o máximo de 5,5 m³/s, a ser restituído a jusante da barragem.

As espécies alvo foram selecionadas de acordo com o Plano de Ação para a otimização do ascensor de peixes do Aproveitamento Hidroelétrico de Touvedo, sendo: a Boga comum, o Escalo do Norte e a Panjorca.

As curvas de preferência apresentadas neste caso de estudo foram elaboradas por especialistas e podem ser consultadas no Estudo Experimental para a determinação do Caudal Ecológico do Rio Lima.

Na recolha de dados foram levantados cerca de 300 pontos, com recurso ao Trimble R8, caracterizando uma área do leito correspondente a uma extensão aproximada de 60 m.

Adicionalmente foram realizadas duas medições de caudais, por forma a conhecer a relação entre esses caudais e as correspondentes alturas de água, para definição de condições de fronteira (Figura 3).



Figura 3. Localização dos pontos levantados e das medições efetuadas no trabalho de campo.

Efetivamente, para que seja efetuada a modelação de escoamento, é requerida a definição prévia das condições de fronteira. Deve ser indicado o caudal a montante e, a jusante, a cota da superfície livre correspondente.

Deve ainda ser fornecida uma estimativa da cota da superfície livre a montante. Para tal, recorreu-se à fórmula de Manning-Strickler e a parâmetros medidos no local (caudais e alturas de água correspondentes) para estimar a curva de vazão da secção de jusante. Para tal, considerou-se uma largura média do trecho de 20 m e uma inclinação longitudinal de 1%.

Após a simulação hidrodinâmica e de habitat, anteriormente descritas no ponto 4.4., concluiu-se, que seria necessário completar os dados anteriormente recolhidos com informação adicional referente aos campos de velocidades, para a calibração do modelo de forma mais adequada.

A gama de caudais escolhida para a modelação permitiu uma boa perceção da relação entre a adequação do habitat e o incremento de caudal. Deste modo, e ainda que tal dependa logicamente da extensão da gama a analisar, pôde concluir-se que a discretização de valores da análise terá de permitir caracterizar detalhadamente a variação dos vários parâmetros analisados com o incremento do caudal. A simulação hidrodinâmica apresentou resultados bastante satisfatórios, sendo a máxima diferença verificada entre o valor dos caudais à entrada e à saída do trecho em análise de $\pm 0,025\%$ para o caudal de 1,5 m³/s (Quadro 1).

Quadro 1. Resultados finais obtidos com a modelação hidrodinâmica.

Q _{entrada} (m ³ /s)	H _{entrada} (m)	H _{saída} (m)	t _{final} (s)	Q _{saída} (m ³ /s)	ΔQ (%)
5,5	23,33	23,69	1099,06	5,50	0,004
5	23,31	23,69	1000,55	5,00	0,001
4	23,26	23,63	1096,46	4,00	0,020
3	23,21	23,58	1082,12	3,00	0,013
2	23,15	23,52	1004,03	2,00	0,017
1,5	23,12	23,49	1048,09	1,50	0,025

Após a simulação hidrodinâmica, para cada um dos caudais, foram inseridas as informações relativas à preferência das espécies piscícolas relativamente à velocidade e a profundidade do escoamento e ao substrato.

Foi também inserido um ficheiro relativo ao índice de canal que caracteriza o substrato tendo-se considerado que o mesmo era, na sua totalidade, da classe 5 (pedras).

Os resultados obtidos na simulação de habitat presentes na Figura 4, vão ao encontro do referido no relatório do plano de monitoração do ascensor de peixes, que apresenta a Boga como a espécie que mais utilizou este dispositivo.

No modelo esta espécie apresenta-se como a que possui um índice de adequação de habitat mais elevado, estando em concordância com a realidade. Do lado oposto encontra-se a Panjorca, que apresenta os piores coeficientes de adequação de habitat.

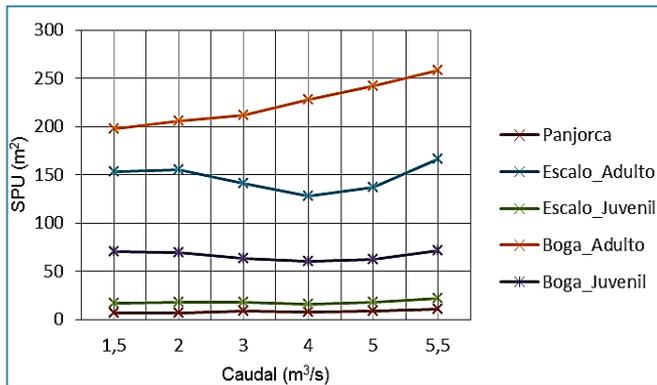


Figura 4. Resultados da simulação de habitat para as espécies alvo no caso de estudo de Touvedo.

6. Aplicação da metodologia ao Aproveitamento Hidroelétrico de Ribeiradio-Ermida

O aproveitamento hidroelétrico de Ribeiradio-Ermida localiza-se no rio Vouga, distrito de Viseu e encontra-se em fase de conclusão, estando previsto que a entrada em funcionamento ocorra no final do ano de 2014, pelo que se procurou testar e aperfeiçoar a metodologia definida anteriormente. Para tal, percorreram-se todos os passos que permitem realizar a modelação hidrodinâmica do rio, orientada para a aplicação do IFIM, na ótica da proposta de um RCE. Deste modo e com o intuito de exemplificar a aplicação metodologia incremental, as fases de planeamento e análise prévia assumem um peso fundamental concretizando-se principalmente na realização de reconhecimentos prévios e campanhas que traduzam um planeamento do trabalho de campo o mais detalhado e rigoroso possível.

A escolha do trecho a modelar baseou-se em dois aspetos: em primeiro lugar, e segundo estudos promovidos pela EDP, na delimitação proposta para o troço de água fortemente modificado na zona em análise e, em segundo lugar, nas visitas de reconhecimento efetuadas. Assim, e para efeitos do estudo considerou-se um trecho localizado entre o Açude da Sernada, a jusante, e o aproveitamento hidroelétrico da Grela, a montante – e que, de acordo com o antes referido, se encontra inserido em massa de água definida pela EDP como fortemente modificada.

Tendo em consideração estudos ambientais também realizados previamente pela EDP, as espécies alvo consideradas para o presente trabalho são a Truta de rio, a Boga-Comum e o Escalo do Norte.

Para cada uma das espécies, consideraram-se dois estágios de vida: juvenil e adulto.

No presente caso de estudo, a escolha da gama de caudais a modelar procurou ser mais abrangente que no caso de estudo de Touvedo, em que apenas foi modelada a gama de caudais já implementados. Assim, e visto que a proposta de Regime de Caudais Ecológicos apresentada na Declaração de Impacte Ambiental (DIA) corresponde à gama entre 0,3 m³/s e 11,6 m³/s, na presente dissertação optou-se por analisar um intervalo mais amplo, entre 0,1 m³/s e 17 m³/s.

A recolha de dados corresponde essencialmente ao levantamento topográfico e à medição de caudais, de níveis de água e de velocidades. Os procedimentos correspondentes para essa recolha foram realizados num único dia, e tiveram início com a colocação de escalas, no momento de chegada ao local, de forma a controlar a variação do nível de água que pudesse ocorrer ao longo do dia. O levantamento topográfico consistiu no levantamento de um total de 382 pontos.

Adicionalmente ao levantamento efetuado, anotaram-se diversos pormenores relativos às características do local, principalmente referentes à classificação do substrato. O trabalho de campo também teve em vista a obtenção de perfis de velocidades e de cotas de superfície livre que, numa fase posterior, foram comparados com os valores obtidos através do modelo computacional, de forma a calibrar este.

As zonas nas quais foram efetuadas as medições de velocidades foram devidamente georreferenciadas de modo a facilitar a sua localização no River2D, para extração de pontos.

O primeiro perfil de velocidades ao longo de uma secção transversal do escoamento, assim como as medições isoladas foram realizadas com recurso ao OTT MF Pro, enquanto que para o 2º perfil de velocidades na secção transversal se utilizou o RiverRay (Figura 5).

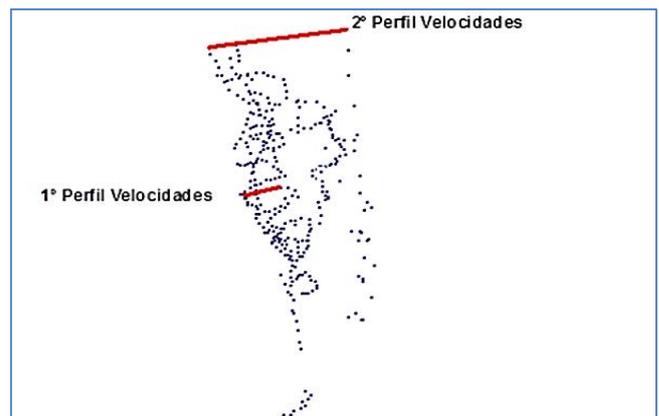


Figura 5. Medições efetuadas no troço em estudo.

O leito do rio foi caracterizado tendo por base os pontos originalmente levantados e os pontos adicionados ao modelo com base nos dados resultantes da obtenção do 2º perfil de velocidades. Foram, naturalmente, também definidos os limites exteriores da zona modelada. Como anteriormente mencionado, foram também definidas as condições fronteira para toda a gama de caudais a analisar.

Com essa finalidade recorreu-se à fórmula de Manning-Strickler e aos parâmetros medidos para estimar a curva de vazão da secção de jusante, para o que se considerou uma largura da secção constante de 17 m e uma inclinação de 1,5%, obtida de acordo com os dados topohidrográficos.

Devido à inconstância na largura do trecho, determinou-se também a curva de vazão na secção de montante, para a qual se considerou uma largura de 35 m e uma inclinação de 1,5%. Numa primeira aproximação atribuiu-se uma rugosidade uniforme (n) de 0,05 s/m^{1/3} aplicada a toda a área de modelação.

A modelação hidrodinâmica foi realizada conforme a metodologia estabelecida no ponto 4. As soluções convergiram quase todas na segunda iteração, com exceção da solução para um caudal de 12 m³/s, que convergiu logo na primeira iteração.

O Quadro 2 apresenta os resultados finais obtidos na modelação hidrodinâmica efetuada, assim como a diferença percentual entre o caudal de entrada e o caudal de saída para o trecho em estudo.

Quadro 2. Resultados finais obtidos com a modelação hidrodinâmica.

Q _{entrada} (m ³ /s)	H _{entrada} (m)	H _{saída} (m)	t _{final} (s)	Q _{saída} (m ³ /s)	ΔQ (%)
0,1	15,956	16,537	25070,40	0,10	0,0000
1	16,035	16,588	25032,65	1,00	0,2000
3	16,134	16,651	25027,13	3,00	0,0071
6	16,240	16,719	25029,97	6,00	0,0833
9	16,327	16,774	25010,20	9,00	0,0247
12	16,404	16,823	1033,74	12,00	0,0084
15	16,473	16,866	25389,90	15,00	0,0100
17	16,517	16,894	25035,50	17,00	0,0046

Após a modelação hidrodinâmica procedeu-se à simulação de habitat. Com este fim, inseriram-se os ficheiros correspondentes às curvas de preferência para cada espécie alvo e um ficheiro correspondente ao índice de canal, que caracteriza o substrato do trecho.

Dada a variação significativa de substrato observada no local, optou-se por, através do editor gráfico R2D_Bed definir polígonos que limitaram diferentes zonas de substrato. A classificação do substrato variou entre cascalho e areia, ou seja entre as classes 4 e 2.

Após a inserção dos ficheiros necessários à simulação pretendida, determinou-se através do modelo computacional, a superfície ponderada útil para a gama de caudais definida, para cada uma das espécies consideradas. Os resultados relativos à superfície ponderada útil (SPU) obtidos estão resumidos na Figura 6.

A análise do gráfico permite concluir que a espécie que melhor se adequa ao habitat simulado é a Boga comum, que apresenta valores de SPU muito superiores às restantes espécies.

Por outro lado, a espécie que revela piores condições de adaptação é o Escalo, em ambos os estágios da sua vida.

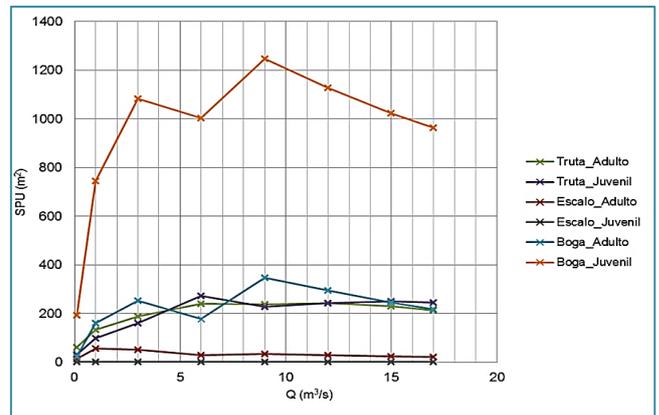


Figura 6. Resultados da simulação de habitat para as espécies alvo no caso de estudo de Ribeiradio-Ermida.

7. Conclusões

As medidas de conservação e restauro dos ecossistemas dulciaquícola são uma consequência da crescente consciencialização mundial para a preservação do meio ambiente. A implementação de um Regime de Caudais Ecológicos a jusante de uma barragem é, hoje em dia, uma medida indiscutível na promoção da sustentabilidade da utilização de recursos hídricos. No entanto, a determinação deste regime ainda apresenta dificuldades e limitações. Não existe, na verdade, nenhum método mundialmente aceite e consensual para este efeito. O estudo e aperfeiçoamento dos métodos conhecidos contribui significativamente para a compreensão dos resultados obtidos e para o conhecimento do nível de incerteza associado a estes.

Os modelos hidrodinâmicos bidimensionais constituem uma ferramenta indispensável quando se pretende relacionar dados hidráulicos com a área de habitat disponível para uma determinada espécie. Estes permitem prever com rigor a alteração da superfície ponderada útil (SPU) derivada das variações no caudal e morfologia do leito, mesmo para diferenças de caudais muito baixas.

No presente trabalho procurou-se definir uma metodologia que permite otimizar a aplicação da modelação hidrodinâmica bidimensional à definição de regimes de caudais ecológicos com base no método IFIM (Instream Flow Incremental Methodology). Foi, assim, desenvolvida uma abordagem que combinou a pesquisa bibliográfica teórica com a realização de casos práticos, aplicados a situações reais atuais, relacionadas com a atividade empresarial da EDP na área da hidroeletricidade.

Assim, numa primeira fase tornou-se necessário conhecer os princípios inerentes à formulação deste tipo de modelos, pois só assim foi possível compreender a grandeza dos erros associados aos mesmos e identificar quais os dados com maior importância para o funcionamento do modelo de modelação, assim como as potencialidades e limitações das ferramentas auxiliares que envolvem o processo de modelação.

Em paralelo com a componente “hidráulica”, apostou-se igualmente no estudo e caracterização da componente “ecológica”, pois o sucesso do método IFIM resulta da interligação destas duas componentes.

Da pesquisa bibliográfica efetuada e da experiência obtida no desenvolvimento dos dois casos de estudo realizados conclui-se que a recolha de dados é a atividade que mais condiciona os resultados obtidos na modelação dos escoamentos, com destaque para os dados relativos ao levantamento topográfico.

Por outro lado, considera-se que a extensão do trecho a modelar deverá, idealmente, englobar uma variação de regime hidráulico (por exemplo, a passagem de um escoamento lento para rápido), o que se verificou no caso de estudo de Ribeiradio-Ermida.

Quanto à distância entre pontos levantados, não é possível fixar à partida um valor de referência. O levantamento deve ser realizado com alguma sensibilidade para o fim a que se destinam os dados, o que, neste caso, é a criação de uma malha que deverá ser representativa das variações ao nível do leito. Por exemplo, não é de todo errado, no mesmo trecho, ter pontos que distam 3 m entre si, por se encontrarem numa zona plana, e pontos que distam 0,5 m, por corresponderem a uma zona com bastantes rochas de diferentes dimensões, capaz de provocar um regime de escoamento complexo. O levantamento deve tentar caracterizar o leito do rio, nomeadamente ao nível das particularidades que este apresenta e que provocam alterações no escoamento. Por outro lado, há também que ter em consideração as limitações dos equipamentos escolhidos para os trabalhos de campo, assim como a precisão (na vertical e na horizontal) dos pontos levantados.

Tendo por base a experiência adquirida no trabalho efetuado, num estudo a nível profissional e não académico seria necessário, para rios com leitos de dimensão semelhantes às dos rios Lima e Vouga, nos locais estudados, realizar o levantamento topohidrográfico numa extensão de 200 a 300 m, superior à extensão de 60 ou 80 m realizada. Esta tarefa, que poderá demorar vários dias, permitirá uma melhor caracterização dos mesohabitats existentes na área em estudo.

Ainda na temática da recolha de dados, a obtenção de vários perfis de velocidades, para caudais e zonas diferentes, é absolutamente indispensável para a calibração do modelo, em termos da rugosidade do leito. Esta conclusão foi obtida após a realização do caso de estudo de Touvedo, no qual não foi possível obter perfis de velocidades, devido a problemas técnicos e logísticos. Apesar disso, a análise de sensibilidade do modelo à rugosidade permitiu constatar que, ainda que o coeficiente de rugosidade fosse metade ou o dobro do estimado, não haveria diferenças significativas a nível da cota da superfície livre e do perfil das velocidades, situação que se revelou, assim, pouco significativa, também pela constância de substrato no trecho modelado. Por outro lado, no caso de estudo de Ribeiradio-Ermida, os perfis de velocidades foram bastante úteis para estabelecer a variação da rugosidade no trecho modelado, conforme observado no local e comprovado no modelo. Por fim salienta-se a importância da recolha de dados referentes a alturas de escoamento e caudais associados, realizada recorrendo à colocação de escalas. Estes dados são úteis para o estabelecimento das condições fronteira e para o controlo de todo o processo de modelação.

Considera-se, ainda, importante ter em conta as condições atmosféricas e a época do ano em que o trabalho de campo é realizado. Este deverá ser devidamente planeado, particularmente nos casos em que não exista a possibilidade de regulação de caudais, por exemplo onde as barragens se encontram em fase de projeto ou execução. Uma das maiores dificuldades sentidas no segundo caso de estudo foi a impossibilidade de realizar o trabalho de campo até inícios de Junho, devido às fortes precipitações verificadas nos primeiros trimestres do ano.

Do ponto de vista hidráulico, este tipo de trabalhos deveria idealmente ser realizado nas épocas mais secas do ano (Julho/Agosto); porém, deverá ter-se em atenção a articulação com a componente ecológica (épocas de migração de ictiofauna, por exemplo). O ideal será separar cronologicamente o levantamento topohidrográfico das restantes tarefas do trabalho de campo. Deste modo, pode-se realizar a medição de caudais, de níveis de água e de velocidades em diferentes alturas do ano, representativas das condições a instalar com o RCE.

A escolha do trecho a modelar, e consequentemente dos sítios onde se vão recolher os dados, é igualmente importante. Devido aos objetivos distintos dos dois casos de estudo, esta tarefa apenas ocorreu no segundo caso de estudo.

Como foi anteriormente mencionado, a extensão a levantar deve ser representativa dos mesohabitats existentes, além disso deve permitir a recolha de um número elevado de pontos. Ou seja, deve ter em conta as limitações inerentes ao equipamento escolhido; por exemplo, no caso do TrimbleR8 em que a sua utilização implica alturas de escoamento e velocidades relativamente baixas, não se poderá escolher uma secção com uma altura de escoamento de, por exemplo, dois metros.

A realização de visitas de reconhecimento revelam-se de utilidade indiscutível no momento de escolher um trecho para modelar. Como foi possível verificar, é impossível prever com exatidão qual o grau de adequabilidade do trecho para este fim através de representações cartográficas, mapas, ou fotografias.

Terminada a fase de recolha de dados, inicia-se a exploração do modelo hidrodinâmico. A modelação hidrodinâmica bidimensional, realizada com recurso ao River2D, constitui um processo bastante intuitivo, que não revelou dificuldades maiores. No entanto, para que tal se verifique, há que estabelecer as condições fronteiras corretamente, caso contrário o programa não consegue solucionar o problema e acaba por bloquear e fechar.

Outro aspeto identificado é que quanto mais a estimativa da cota da superfície livre na secção de entrada (montante) se aproximar da situação real, mais rápida é a convergência das soluções. A convergência dos caudais é particularmente mais demorada para valores mais baixos, na ordem de 1 m³/s, segundo o que se verificou nos casos de estudo. Por fim, é de mencionar que a máxima diferença verificada entre o valor do caudal nas secções de entrada e de saída do trecho em estudo foi de $\pm 0,2\%$, um valor bastante baixo e por isso muito satisfatório.

Os objetivos iniciais do trabalho eram a construção e validação de um modelo de simulação hidrodinâmica bidimensional; no entanto, considerou-se pertinente alargar os objetivos numa tentativa de integrar a Metodologia IFIM. Deste modo procedeu-se à simulação de habitat para os dois casos de estudo e à determinação de um regime de caudais ecológicos. Ambas as atividades foram desenvolvidas a título exemplificativo e procuravam também validar as soluções obtidas através da modelação hidrodinâmica.

A simulação de habitat requereu a escolha de espécies alvo e a elaboração das curvas de preferência das espécies com o fim de criar os ficheiros de entrada para o River2D. Requereu ainda que, aquando da recolha de dados, se tivesse em especial atenção o substrato do leito de maneira a elaborar o ficheiro referente ao índice de canal.

O processo de simulação de habitat, após se conseguirem obter os ficheiros referentes à gama de caudais a analisar, é bastante rápido e simples. Fornece mapas referentes à aptidão da espécie, em determinado estágio da sua vida, às características do escoamento mediante o caudal. Deste modo, relaciona-se a variação da superfície ponderada útil com a variação do caudal.

Os resultados obtidos foram bastantes satisfatórios. No caso de Touvedo, a espécie que revelou os valores mais elevados de SPU é a mesma que utiliza com maior frequência o ascensor de peixes. Por outro lado, identificou-se uma combinação de caudais libertados pelos órgãos de descarga a evitar, por originar condições de escoamento desfavoráveis. Propõe-se ainda uma medida que poderá potenciar o funcionamento do ascensor de peixes, relacionada com a substituição do substrato do leito do rio.

No caso de Ribeiradio-Ermida, a análise das curvas SPU, seguida da escolha do caudal correspondente a um ponto de inflexão evidente, conduziu à obtenção de um Regime de Caudais Ecológicos da mesma ordem de valores do regime apresentado pela DIA, o que constitui um indicativo interessante.

É de destacar que o valor obtido de SPU não deve ser analisado isoladamente, pois corresponde à combinação de três fatores: profundidade, velocidade e substrato. Várias vezes se verificou que o baixo valor de SPU se devia unicamente à inaptidão ao índice de canal, que corresponde ao substrato, enquanto os coeficientes relativos à velocidade e profundidade até se demonstravam mediamente elevados. Nestes casos, uma proposta de melhoria ou requalificação a nível do substrato poderá fazer toda a diferença para as espécies e para os resultados obtidos nestas simulações. Em suma, é importante compreender a que se devem os valores de SPU obtidos.

De salientar que o exercício de simulação de habitat e determinação de RCE no caso de estudo de Ribeiradio foi meramente académico, tendo como objetivos validar a metodologia e permitir compreender o funcionamento da metodologia IFIM, não constituindo, por isso, qualquer solução ou proposta de solução. Outros aspetos teriam de ser detalhadamente analisados para se obter uma solução definitiva na determinação do RCE.

É nesse contexto que se propõe que em trabalhos futuros se modele um trecho com uma extensão de 200 a 300 m e se faça uma análise comparativa com os resultados obtidos para este caso de estudo. Propõe-se, também, a modelação de outro trecho, situado a uma distância considerável do trecho modelado, de maneira a analisar a influência da distância à barragem nos resultados obtidos.

Para concluir, considera-se que seria de extrema importância a realização de um trabalho que estudasse a possibilidade de transposição de curvas de preferência das espécies para os rios Portugueses.

Sendo a simulação de habitat um método cada vez mais presente na determinação dos RCE em Portugal e tendo em atenção os recursos necessários para a realização de campanhas de caracterização da ictiofauna, em termos de custo e de tempo, é imperativa a sistematização de toda a informação referente à preferência das espécies mais comuns nos rios Portugueses.

Referências

- Bovee, K. D. (1997). *Data collection procedures for the physical habitat simulation system*. Biological Resources Division, United States Geological Survey, Fort Collins.
- Carter, M. G., Copp, G.H. e Szomlai, V. (2004). *Seasonal abundance and microhabitat use of bullhead *Cottus gobio* and accompanying fish species in the River Avon (Hampshire), and implications for conservation*. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 14(4): p. 395-412.
- Milhous, R. (1983) *Instream flow values as a factor in water management*. Regional and state water resources planning and management. Bethesda, MD: American Water Resources Association. 231-2
- Petts, G.E. e Gurnell, A.M. (2005) *Dams and geomorphology: research progress and future directions*. *Geomorphology*, 71(1): p. 27-47.
- Sanz, D.B. e Jalón, D.G. (2002) *Avances y aspectos no resueltos en la estimación de regímenes de caudales ecológicos in III Congreso Ibérico sobre Gestión y Planificación del Agua*, Sevilla.
- Stalnaker, C., Lamb, B., Henriksen, J., Bovee, K. e Bartholow, John. (1995) *The instream flow incremental methodology: a primer for IFIM*. DTIC Document.
- Steffler, P. e J. Blackburn. (2002). *Two-dimensional depth averaged model of river hydrodynamics and fish habitat*. River2D user's manual, University of Alberta, Canada.