



PROJETO FISHMOVE - DESENVOLVIMENTO DE MEDIDAS DE MITIGAÇÃO PARA PEQUENAS BARREIRAS À MIGRAÇÃO DE PEIXES DULÇAQUÍCOLAS EM RIOS PORTUGUESES

José M. SANTOS¹; Paulo BRANCO²; Susana D. AMARAL³, Ana T. SILVA⁴; Christos KATOPODIS⁵, Teresa FERREIRA⁶; António N. PINHEIRO⁷; Teresa VISEU⁸

- 1 - Doutor em Engenharia Florestal, CEF, Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa, 1349-017 Lisboa, jmsantos@isa.ulisoa.pt, +351 213653489
- 2 - Doutor em Engenharia Florestal e dos Recursos Naturais, CEF, Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa, 1349-017 Lisboa, pjbranco@isa.ulisoa.pt, +351 213653489
- 3 - Mestre em Gestão e Conservação dos Recursos Naturais, CEF, Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa, 1349-017 Lisboa, samaral@isa.ulisoa.pt, +351 213653492
- 4 - Doutora em Engenharia Florestal, NINA- Norwegian Institute for Nature Research, Trondheim, Norway, ana.silva@nina.no, +47 455 03 711
- 5 – Professional Engineer, Katopodis Ecohydraulics Ltd, 122 Valence Avenue, Winnipeg, MB R3T 3W7, Canada, KatopodisEcohydraulics@live.ca, +1 (204) 261 1482
- 6 - Professora Catedrática, CEF, Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa, 1349-017 Lisboa, terferreira@isa.ulisoa.pt, +351 213653487
- 7 - Professor Catedrático, CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 1049-001 Lisboa, antonio.pinheiro@tecnico.ulisoa.pt, +351 218418150
- 8 - Chefe de Núcleo de Recursos Hídricos e Estruturas Hidráulicas, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1700-066 Lisboa, tviseu@lnec.pt, +351 218443771

Resumo

O projeto FISHMOVE – Desenvolvimento de Medidas de Mitigação para Pequenas Barreiras à Migração de Peixes Dulçaquícola em Rios Portugueses, teve como principais objetivos avaliar os efeitos de pequenos obstáculos fluviais nos movimentos migratórios de espécies ciprinícolas nativas, em particular a sua capacidade de transposição através de açudes de diferentes configurações, bem como determinar o desempenho dos respetivos movimentos através de dispositivos de transposição por bacias sucessivas com diferentes regimes de escoamento e arranjos de substratos (blocos) artificiais.

Foi desenvolvido por uma equipa de investigadores do Instituto Superior de Agronomia (ISA, coordenação), Instituto Superior Técnico (IST), Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e por uma empresa canadiana Katopodis Ecohydraulics Ltd. (KE), integrando desta forma um conhecimento multidisciplinar na área de migrações e comportamento de peixes e de hidráulica fluvial.

13.º Congresso da Água

O presente trabalho tem como objetivo divulgar as diferentes ações levadas a cabo durante o projeto, os principais resultados atingidos e as respetivas implicações para a melhoria da conectividade longitudinal dos rios.

Palavras-chave: Migrações piscícolas, obstáculos fluviais, protótipo experimental, ecohidráulica.

Tema: Estratégias para a proteção e melhoria do estado das massas de água, incluindo proteção e valorização de ecossistemas

1. INTRODUÇÃO

Em todo o mundo, vários estudos têm reportado alterações drásticas na estrutura, diversidade e manutenção de populações piscícolas, em resultado da fragmentação da conectividade longitudinal de rios através da construção de grandes aproveitamentos hídricos, tais como barragens (Aarts et al., 2003; Nilsson et al., 2005). No entanto, ao contrário da vasta literatura que existe sobre barragens, os efeitos de pequenos obstáculos fluviais, tais como pequenos açudes e barreiras, nas populações piscícolas são praticamente desconhecidos (Ovidio e Philippart, 2002; Poulet, 2007; Ordeix et al., 2011). Estes obstáculos, que representam de longe o maior número de estruturas fluviais, alteram os padrões de velocidade e profundidade da água e modificam o regime de escoamentos, impedindo a livre circulação dos peixes (Kondratieff e Myrick, 2006; Baudoin et al., 2014). A implementação da Diretiva Quadro da Água (Diretiva 2000/60/CE; Comissão Europeia, 2000) veio reforçar a necessidade de se avaliar o efeito de pequenos obstáculos fluviais na movimentação de espécies piscícolas, dando especial ênfase à criação e melhoria dos dispositivos de transposição para peixes existentes que facilitem a passagem por parte de todas as espécies. As passagens para peixes convencionais do tipo bacias sucessivas constituem o dispositivo de transposição para peixes mais comum em Portugal (Santos et al., 2012). Estes dispositivos encontram-se sobretudo instalados em açudes, consistindo num canal retangular dividido por septos transversais, com aberturas, em lados alternados, no topo (descarregadores) e/ou no fundo (orifícios submersos), dividindo a altura total a ser transposta em várias quedas mais pequenas, formando uma série de bacias sucessivas (Katopodis et al., 2001). Estas oferecem áreas de descanso para os peixes e asseguram também uma adequada dissipação da energia da água. Apesar da sua popularidade, a eficácia destes dispositivos é relativamente baixa uma vez que a sua conceção foi originalmente influenciada por diretrizes baseadas na ictiofauna salmonícola do norte da Europa, enquanto que ictiofauna Ibérica é composta sobretudo por espécies ciprinícolas, de menor capacidade natatória (Branco et al., 2013). A incorporação de substratos artificiais no canal destes dispositivos, que possam contribuir para a melhoria do respetivo desempenho para os movimentos das espécies ciprinícolas, constitui deste modo uma alternativa a considerar (FAO/DVWK, 2002).

O projeto FISHMOVE – Desenvolvimento de Medidas de Mitigação para Pequenas Barreiras à Migração de Peixes Dulçaquícola em Rios Portugueses (PTDC/AGR-CFL/117761/2010), desenvolvido por uma equipa multidisciplinar de investigadores de diferentes instituições (Instituto Superior de Agronomia (ISA, coordenação); Instituto Superior Técnico (IST), Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e Katopodis Ecohydraulics (KE)), pretendeu responder às lacunas de conhecimento acima mencionada tendo como principais objetivos: i) avaliação experimental do desempenho natatório de espécies potamódromas através de açudes de faces verticais; ii) avaliação experimental dos movimentos de espécies catádromas e potamódromas através de descarregadores de cheias com diferentes geometrias; iii) avaliação da eficácia de passagens para peixes de bacias sucessivas sob diferentes regimes de escoamento e iv) avaliação da eficácia de passagens para peixes de bacias sucessivas com colocação de substratos (blocos) artificiais. O presente trabalho descreve seguidamente as metodologias e os principais resultados das ações levadas a cabo durante o projeto e as respetivas implicações para a melhoria da conectividade longitudinal dos rios.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Avaliação experimental do desempenho natatório de espécies potamódromas através de açudes de faces verticais

As experiências foram realizadas num canal experimental existente no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), em Lisboa. O canal consistiu (Fig. 1-A) numa estrutura retangular de aço com dimensões 10,00 m (comprimento) x 1,00 m (largura) x 1,20 m (altura), com paredes laterais em vidro temperado que permitem a observação dos movimentos dos peixes no seu interior. O declive do canal é ajustável, tendo-se utilizado um declive de 3%, considerado representativo do declive da maioria dos rios ibéricos.

Para avaliar o desempenho do barbo-comum (*Luciobarbus bocagei*, doravante barbo) aquando da transposição de pequenas barreiras, construiu-se um açude experimental de faces verticais (Fig. 1-B), com uma soleira de 20 cm de largura, composto por módulos de PVC para possibilitar a manipulação da sua altura de acordo com as configurações a testar. Assim, para criar a queda a transpor (Δh), correspondente ao desnível entre a superfície livre da água a jusante do açude e o topo da soleira, adicionaram-se ou removeram-se módulos do açude (dois módulos de 5 cm, dois módulos de 10 cm, dois módulos de 20 cm, e uma base fixa de 10 cm) tendo em conta a sua altura total, correspondente a $D + \Delta h$. A profundidade de água a jusante do açude (D) foi mantida controlando, com o sistema de válvulas, o nível de água no tanque de jusante. Imediatamente a jusante do açude foi estabelecida uma área de 0,65 m² (0,65 m x 1,00 m) denominada de área de aproximação, na qual os movimentos dos peixes foram monitorizados por vídeo-gravação (GoPro HERO3) e por observação direta.

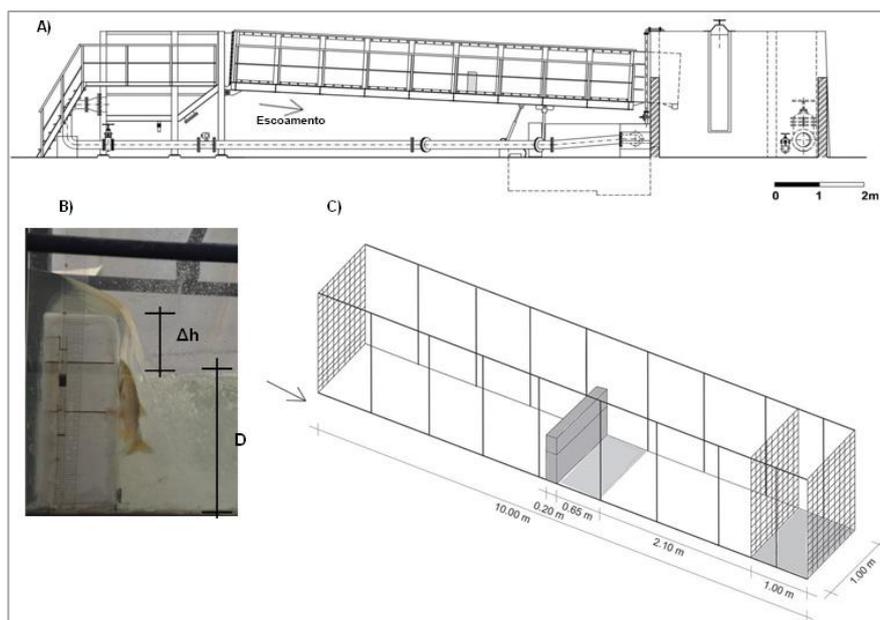


Figura 1. Esquema representativo das instalações experimentais: **A)** Vista lateral do canal experimental com um declive de 3%; **B)** Ilustração das variáveis a testar considerando D como a profundidade de água a jusante do açude, e Δh a queda a transpor; e **C)** Localização do açude, da área de aproximação, e da área de aclimatação no canal.

Mantendo um caudal constante de 50 l/s, foram inicialmente testadas 16 configurações (Tabela 1) considerando todas as combinações de D (10, 20, 30 e 50cm) e Δh (5, 10, 15 e 25cm). Posteriormente, selecionando a configuração que apresentou maior sucesso de passagem, foram testados os caudais de 25, 75 e 100 l/s. Para cada configuração foram realizadas 4 réplicas, usando em cada réplica um cardume de 5 peixes ($n = 20$ peixes por configuração). Antes do início de cada ensaio, os peixes foram mantidos durante 15 minutos na área de aclimatação. Após esse período, o painel de rede foi removido e os peixes puderam movimentar-se livremente ao longo do canal experimental durante um período máximo de 60 minutos. Como foi permitida tanto a passagem para montante como para jusante, os peixes puderam transpor o açude várias vezes.

Tabela 1. Designação das 16 configurações testadas (com $Q = 50$ l/s) considerando as combinações das variáveis profundidade de água a jusante do açude (D) e queda de água a transpor (Δh).

		Queda de água a transpor (cm) – Δh			
		$\Delta h05$	$\Delta h10$	$\Delta h15$	$\Delta h25$
Profundidade de água (cm) (D)	D10	D10 $\Delta h05$	D10 $\Delta h10$	D10 $\Delta h15$	D10 $\Delta h25$
	D20	D20 $\Delta h05$	D20 $\Delta h10$	D20 $\Delta h15$	D20 $\Delta h25$
	D30	D30 $\Delta h05$	D30 $\Delta h10$	D30 $\Delta h15$	D30 $\Delta h25$
	D50	D50 $\Delta h05$	D50 $\Delta h10$	D50 $\Delta h15$	D50 $\Delta h25$

Durante a monitorização foi registada a seguinte informação: número de aproximações (i.e., o número de peixes que entraram na área de aproximação, número de tentativas de passagem (i.e., o número de peixes que tentaram ativamente transpor o açude dentro da área de aproximação), número de sucessos de passagem para montante (NP) e tempo de ensaio decorrido a cada passagem para montante. Com base nesta informação calculou-se a eficiência de atracção (EA), correspondente ao quociente entre o número de tentativas e o número de aproximações registadas, e também a eficiência de passagem (EP), dada pelo quociente entre o número de passagens para montante e o número de tentativas.

2.2. Avaliação experimental dos movimentos de espécies catádromas e potamódromas através de descarregadores de cheias com diferentes geometrias

Os ensaios com peixes – barbo-comum (espécie potamódroma) e enguia-europeia (espécie catádroma) - foram conduzidos no canal experimental do LNEC com declive nulo (0%). Os respetivos ensaios hidráulicos tiveram lugar num modelo de escala reduzida (1:5) na Universidade de Manitoba (Winnipeg, Canada).

Os ensaios foram conduzidas para as seguintes condições: descarregador de cheia com face de montante com angulo (θ) de 90° (*standard*), 45° e 30° (modificados) com um caudal (Q) de 150 L/s e profundidade a montante de (H) 0,42 m. A configuração *standard* foi ainda testada para um caudal de Q=45,5L/s e H=0,32m para analisar o comportamento dos peixes perante a mesma configuração mas mudando a profundidade de água acima da crista do descarregador. A velocidade de aproximação (V_e) nas configurações *standard* foram de 0,36 m/s (H= 0,42 m) e de 0,14m/s (H= 0,32 m). Informação mais detalhada sobre o protótipo, modelo, ensaios e análise estatística podem ser encontrados em Silva et al. (2015).

2.3. Avaliação da eficácia de passagens para peixes de bacias sucessivas sob diferentes regimes de escoamento

As experiências foram conduzidas num modelo à escala real (1:1) de uma passagem para peixes de bacias sucessivas localizada no LNEC. O modelo é constituído por um canal com painéis laterais de acrílico transparente, possibilitando uma visualização de todos os processos que ocorrem no seu interior. O canal compreende seis bacias (1,9 m de comprimento X 1,0 m de largura X 1,2 m de altura) separadas por septos de polipropileno compacto com orifícios de fundo e com descarregadores de superfície. Cada septo incorpora um orifício de fundo num dos lados e um descarregador de superfície no outro; a localização dos orifícios e descarregadores alterna entre septos. O declive do canal é de 8,5% sendo a queda entre bacias de 16,2 cm. Detalhes adicionais sobre o modelo e um desenho da estrutura estão incluídos em Branco et al. (2013) e Santos et al. (2012).

Foram testados dois regimes de escoamento distintos – livre e afogado (Rajaratnam et al., 1988; Clay, 1995). Cada experiência teve 3 réplicas, sendo cada uma constituída por um cardume de 5 peixes de uma espécie. Tentou-se que cada cardume fosse constituído por peixes com comprimentos semelhantes para evitar fenómenos de dominância. Nestas experiências foram estudadas duas espécies de peixes: barbo-comum (doravante barbo) como espécie representante de peixes bênticos e escalo do Sul (*Squalius pyrenaicus*,

doravante escalo) como representante de peixes de superfície. Os peixes foram aclimatados durante 30 minutos e cada experiência teve uma duração de 90 minutos e foi realizada entre o crepúsculo e o início da noite (17 h – 01 h) de modo a refletir o período natural de migração (Santos et al., 2002, 2005). Os movimentos piscícolas foram monitorizados por dois observadores independentes.

2.4. Avaliação da eficácia de passagens para peixes de bacias sucessivas com colocação de substratos (blocos) artificiais

2.4.1. Efeito da densidade

As experiências foram conduzidas num modelo à escala real (1:1) de uma passagem para peixes de bacias sucessivas localizada no LNEC. A secção longitudinal do canal foi dividida em 6 bacias através de septos de polipropileno, cada um com um orifício de fundo. O declive do canal foi de 8,5%, estando dentro dos limites referidos na bibliografia para este tipo de estruturas (Larinier, 2008).

Foram ensaiadas 4 configurações (Tabela 2) em função do caudal, Q (baixo, 38,5 l/s ou elevado, 62,7 l/s) (Silva et al., 2011); e da densidade de blocos (baixa, 8 blocos/bacia ou elevada, 12 blocos/bacia) - colocados no fundo do canal. Os blocos são paralelepípedicos, moldados em argamassa, com arestas laterais arredondadas (15 cm x 15 cm x 10 cm de altura), tendo sido posicionados ao longo de cinco linhas igualmente espaçadas em arranjos simétricos.

Tabela 2. Descrição das quatro configurações baseadas em diferentes combinações de caudal (Q) e densidade de blocos (DB). d – profundidade média da água; A_o – área do orifício; h_{m1} – profundidade da água no plano 1; h_{m2} – profundidade da água no plano 2. É também mostrada a proporção de sucessos e o tempo de transposição.

Configuração	Q	DB	d (cm)	A_o (cm ²)	h_{m1} (cm)	h_{m2} (cm)	Proporção sucessos (%)	Tempo transp. (min.)
E1	Elevado	Elevada	84	529	5	21	50	5.3 ± 4.2
E2	Elevado	Baixa	84	529	5	21	50	12.1 ± 6.5
E3	Baixo	Elevada	88	324	5	21	20	9.6 ± 6.7
E4	Baixo	Baixa	88	324	5	21	30	9.4 ± 8.9

Foram caracterizadas para cada configuração, as condições de velocidade da água. Para o efeito foram efetuadas medições de velocidade instantânea segundo diferentes eixos (x, y e z) em dois planos horizontais paralelos ao fundo do canal – a meia altura dos blocos (ou seja, a 5 cm de altura; plano 1) e a 25 % da profundidade média da bacia (ou seja a 11 -12 cm de altura acima dos blocos; plano 2). Ao todo, foi amostrada uma malha de 46-57 pontos no plano 1 e de 83-88 no plano 2, com recurso a um *Vectrino Acoustic Doppler Velocimeter* (Nortek AS) orientado verticalmente para baixo e com uma frequência de 25 Hz para um período de 90 s. As medições foram efetuadas na segunda bacia a contar de jusante, que é representativa das condições hidrodinâmicas da passagem, já que o escoamento tem características semelhantes em todas as bacias, à exceção das bacias das extremidades de montante e jusante. O desnível entre bacias foi de 0,162 m.

Com o objetivo de avaliar a eficiência de passagem dos peixes, em função do caudal e da densidade de blocos, foram realizados 20 ensaios para cada uma das 4 configurações (E1 a E4; Tabela 2), consistindo cada ensaio (90 minutos cada) na monitorização (observação direta e câmaras de filmar) dos movimentos para montante de um exemplar de barbo ao longo do dispositivo. A proporção de transposições (i.e. movimentos com sucesso) e o tempo de passagem constituíram os 2 parâmetros-chave avaliados no presente estudo.

2.4.2. Efeito da altura

Para testar o efeito de blocos de diferentes alturas no desempenho dos movimentos piscícolas, consideraram-se para o efeito, dois regimes de caudal com base na profundidade relativa do escoamento (d/h), em que d representa a profundidade da água e h , a altura dos blocos. Duas configurações foram então ensaiadas: i) $d/h > 4$ (regime 1), em que $d = 84$ cm e $h = 10$ cm e ii) $1.3 < d/h < 4$ (regime 2), em que $d = 53$ cm e $h = 15$ cm, cada uma com 20 réplicas, consistindo cada réplica na monitorização dos movimentos (sucesso e tempo de transposição) de um indivíduo adulto.

3. RESULTADOS

3.1. Desempenho natatório de espécies potamódromas através de açudes experimentais

Os resultados obtidos nas 16 configurações inicialmente testadas (influência de D e Δh na transposição de pequenas barreiras; Fig. 2) revelaram que tanto D ($F = 5.46$; $p = 0.004$) como Δh ($F = 4.68$; $p = 0.006$), bem como a interação de D e Δh ($F = 3.02$; $p = 0.005$) estão significativamente correlacionadas com o número de sucessos de passagem do barbo-comum (PerMANOVA, $p < 0.01$). Os melhores resultados foram alcançados na configuração D20 Δ h10, com o registo de 50 passagens para montante e elevadas percentagens de EA (53%) e EP (17%). Por outro lado, os piores resultados ocorreram na configuração D10 Δ h25 que, muito embora tenha conseguido um satisfatório valor de EA (25%), registou apenas uma passagem para montante (com EP de 1%). Estes registos corroboram os resultados obtidos na comparação de pares realizada para cada variável D e Δh , destacando as diferenças significativas do número de sucessos de passagem registados em $D = 20$ cm, que apresenta maior número de passagens relativamente às outras profundidades testadas, bem como com $\Delta h = 25$ cm, que foi a queda de água a transpor com menor sucesso de passagem.

13.º Congresso da Água

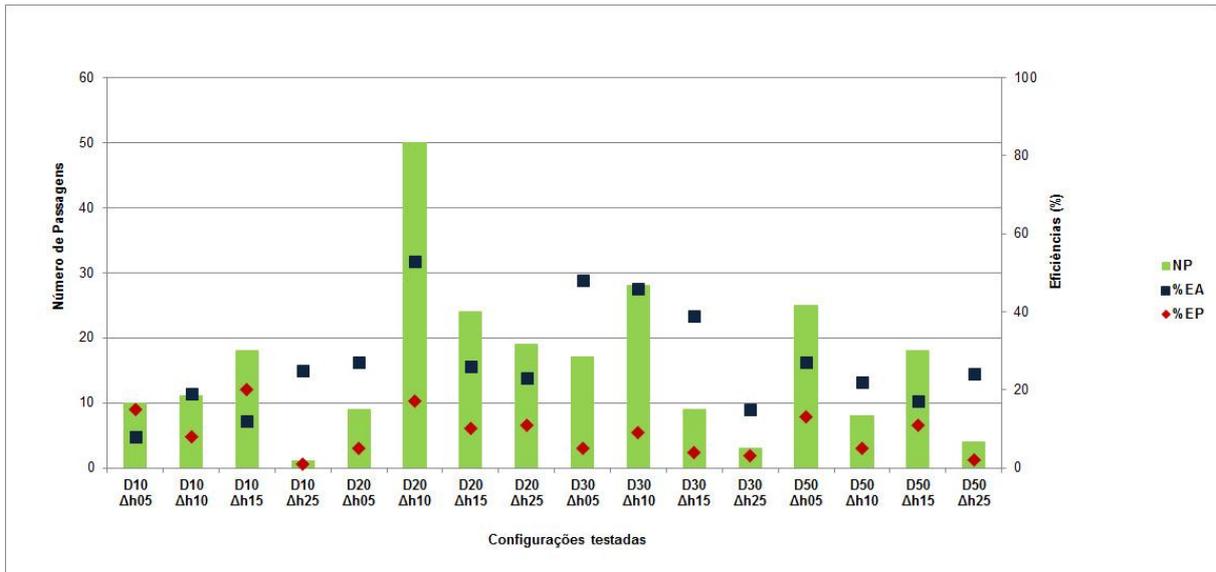


Figura 2. Resultados totais das 16 configurações testadas considerando as combinações de D e Δh, e mantendo Q = 50 l/s. NP é o número de passagens para montante; %EA eficiência de atracção (n.º tentativas/n.º aproximações ×100); %EP eficiência de passagem (n.º passagens/n.º tentativas ×100).

Quanto ao efeito do caudal (Fig. 3), os resultados do teste de *Kruskal–Wallis* evidenciaram que esta variável também afeta significativamente o número de sucessos de passagem ($\chi^2 = 10.95$; 3 d.f.; $p = 0.01$). O maior número de passagens para montante registou-se para Q = 50 l/s, que alcançou igualmente maiores percentagens de EA e EP. O caudal testado com piores resultados foi Q = 100 l/s, com apenas uma passagem.

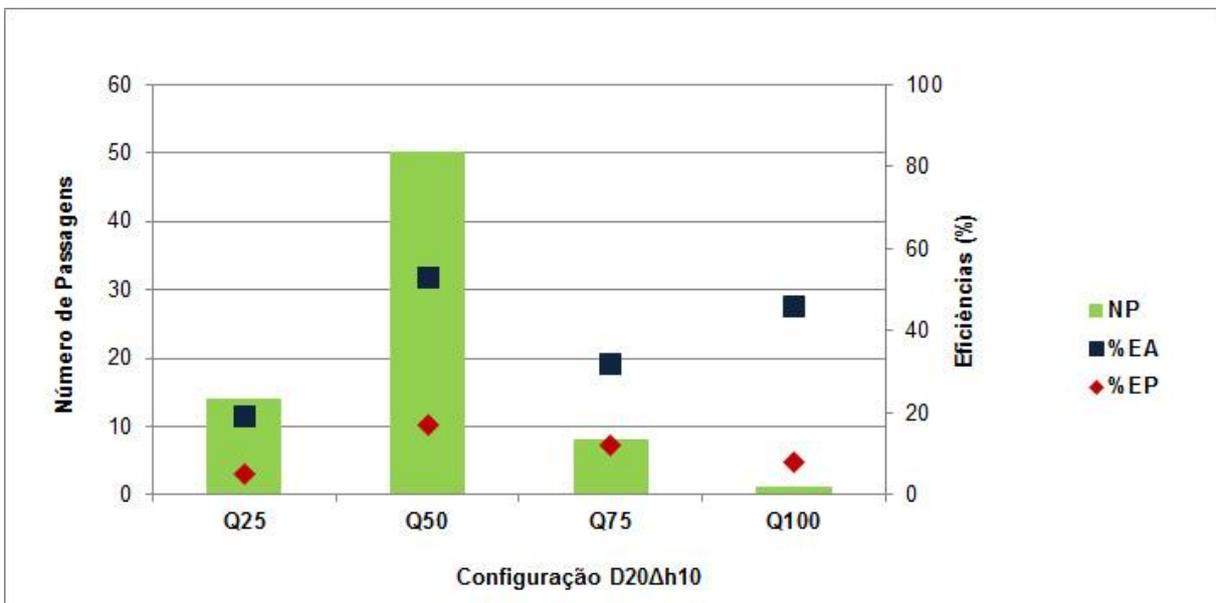


Figura 3. Resultados totais dos quatro caudais testados na configuração D20Δh10. NP é o número de passagens para montante; %EA eficiência de atracção (n.º tentativas/n.º aproximações ×100); %EP eficiência de passagem (n.º passagens/n.º tentativas ×100).

3.2. Avaliação experimental dos movimentos de espécies catádromas e potamódromas através de descarregadores de cheias com diferentes geometrias

Os resultados demonstraram que um maior número de enguias passaram para jusante (80%) quando comparado com os barbos (32%) (Fig. 4-A). A eficiência de passagem para jusante das enguias foi fortemente influenciada pelas configurações testadas. As enguias demonstraram maiores dificuldades em passar a configuração *standard* particularmente quando associada com menor caudal e altura de água acima da crista do descarregador. Contrariamente a influência das condições testadas parece não ter tido fortes implicações no movimento para jusante do barbo.

De forma semelhante o tempo total de passagem para jusante das enguias variou com o desenho experimental testado sendo fortemente relacionado com a geometria da estrutura (Fig. 4-B). A configuração A30H42 foi a mais favorável a passagem para jusante das enguias, uma vez que as passagens nesta configuração foram feitas em menor tempo quando comparado com o tempo requerido nas restantes condições testadas. O oposto ocorreu para a configuração A90H32 para a qual os maiores tempos de passagem foram registados.

O tempo de passagem para os barbos foi igualmente diferente de acordo com o desenho experimental. Apesar de os barbos terem demorado menos tempo a passar para jusante na configuração A30H42, não se observou diferenças significativas entre os tempos de passagem entre as várias configurações. No caso dos barbos, tanto a geometria da estrutura bem como nível de água acima do descarregador parecem não ter influenciado o tempo de passagem desta espécie, contrariamente ao observado para as enguias.

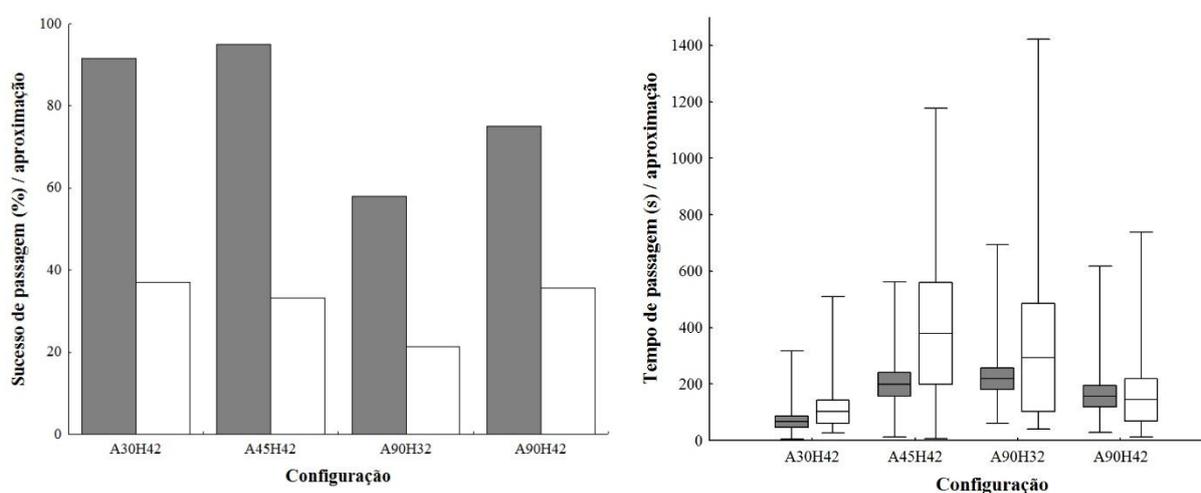


Figura 4. Sucesso de passagem (esq.) de tempo de passagem (dir.) de enguia (barras solidas) e barbo para as várias configurações testadas. Os dados estão representados como médias.

3.3. Avaliação da eficácia de passagens para peixes de bacias sucessivas sob diferentes regimes de escoamento

13.º Congresso da Água

Durante o escoamento com jato livre, 94% de todos os movimentos para montante foram realizados através do orifício de fundo ($\chi^2 = 136,189$; $p < 0,0001$). Verificou-se que, quando analisados os movimentos para montante realizados durante o escoamento afogado, os peixes preferiram utilizar o descarregador de superfície (57%) em vez do orifício de fundo (43%) ($\chi^2 = 10,208$; $p < 0,0014$). Quando foram testadas as diferenças relativas ao total de movimentos para montante, verificou-se que também há diferenças em relação ao regime de escoamento, tendo a maioria dos movimentos (74%) ocorrido durante o escoamento afogado ($\chi^2 = 180,599$; $p < 0,0001$). Esta diferença no número de movimentos também se refletiu no número de sucessos, sendo que 74% de todos os sucessos foram atingidos no regime de escoamento afogado.

A análise dos dados de movimentos de cada espécie revelou também diferenças (Tabela 3). Nos barbos o regime de escoamento teve um efeito significativo (PERMANOVA - $p = 0,01$), tendo 80% dos movimentos desta espécie sido efetuados durante o escoamento afogado. Nos ensaios realizados com jato livre os barbos mostraram preferência pelo orifício de fundo ($\chi^2 = 64,474$; $p < 0,0001$) através do qual foram realizados 97% dos movimentos. No entanto, durante o escoamento afogado estes peixes dividiram quase igualmente os seus movimentos pelos dois tipos de abertura ($\chi^2 = 1,571$; $p = 0,21$), tendo realizado 54% dos movimentos através do orifício e 46% através do descarregador. O descarregador foi utilizado pelo barbo para os seus movimentos para montante quase exclusivamente durante o escoamento afogado ($\chi^2 = 132,250$; $p < 0,0001$) uma vez que 99% de todos os movimentos através do descarregador foram efetuados neste regime. De facto, quando testadas as diferenças no número de vezes que um barbo atingiu o final do dispositivo (sucesso) verificou-se que o escoamento afogado potencia uma maior taxa de sucesso (76%) em relação ao regime livre ($\chi^2 = 32,508$; $p < 0,0001$). Nos escalos o padrão de movimentos foi ligeiramente diferente. Quando se analisa apenas o escoamento com jato livre verificou-se uma preferência destes pelo orifício de fundo (93%) ($\chi^2 = 95,559$; $p < 0,0001$), mas durante o regime de escoamento afogado preferiram o descarregador de superfície (68%) ($\chi^2 = 36,126$; $p < 0,0001$). A maioria dos movimentos do escalo através do descarregador de superfície foram efetuados durante o regime de escoamento afogado (95%) ($\chi^2 = 164,349$; $p < 0,0001$), traduzindo-se numa maior taxa de sucesso no escoamento afogado (78%) do que no escoamento com jato livre (22%) ($\chi^2 = 27,174$; $p < 0,0001$).

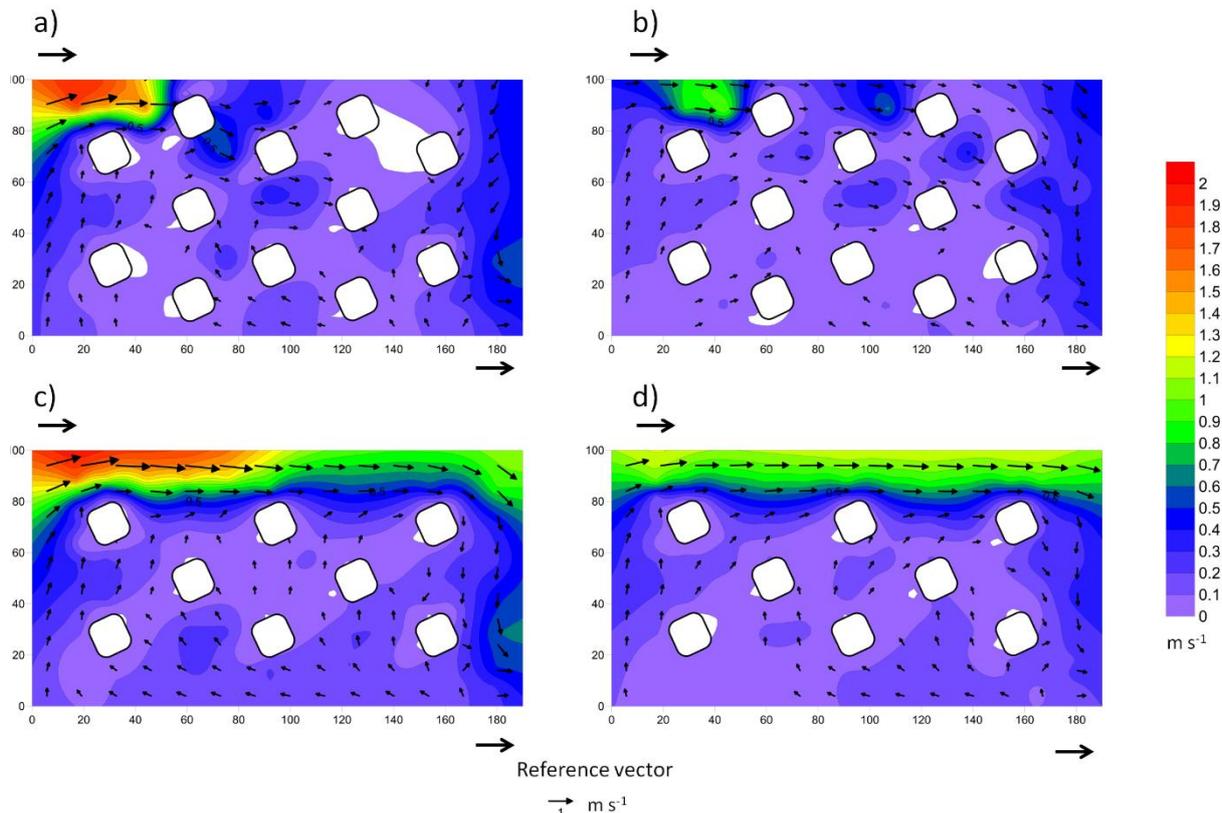
Tabela 3. Número de movimentos para montante efetuados por cada espécie através do orifício de fundo e do descarregador de superfície e número de sucessos (número de vezes que um peixe atingiu o topo da passagem para peixes) nos dois regimes de escoamento testados.

Espécies	Regime de escoamento	Orifício de Fundo	Descarregador de superfície	Total	Sucessos
Barbo	Livre	37	1	38	15
	Afogado	71	83	154	48
Escalo	Livre	63	5	68	10
	Afogado	46	98	144	36

3.4. Avaliação da eficácia de passagens para peixes de bacias sucessivas com colocação de substratos (blocos) artificiais

3.4.1. Efeito da densidade

Não foram encontradas diferenças significativas nos padrões de V_{xy} entre configurações com diferentes densidades de blocos (elevada e baixa), quer com caudal elevado (E1 vs E2) ou baixo (E3 vs E4) (testes emparelhados de Wilcoxon, $p > 0,05$) (Fig. 5). Foram no entanto detetadas diferenças significativas quando se considerou o efeito do caudal escoado no dispositivo, ou seja, para uma dada densidade de blocos, os padrões de V_{xy} obtidos foram significativamente diferentes entre a situação de elevado e de baixo caudal (E1 vs E3 e E2 vs E4) (testes emparelhados de Wilcoxon, $p < 0,01$). Os mapas correspondentes de V_{xy} , evidenciando a magnitude e direção dos vetores de velocidade mostram estas diferenças (Fig. 5): nas configurações com elevada densidade de blocos (E1 e E3), notou-se um gradiente de velocidade muito mais pronunciado nos orifícios de entrada e saída, sobretudo no primeiro, durante a ocorrência do caudal elevado (gama de velocidades: 0,19-1,77 m/s) (Fig. 5-A), relativamente à situação de caudal baixo (0,12-0,28 m/s) (Fig. 5-B). Na configuração de baixa densidade, caudal elevado (E2) (Fig. 5-C), foi notória a presença de um jato heterogéneo, que se estendeu ao longo da parede lateral em direção ao orifício de saída. Este jato apresentou um elevado gradiente de velocidade (0,78-1,68 m/s), diminuindo desde a zona do orifício de entrada até ao septo oposto onde ocorre a saída. Inversamente, nas condições de caudal baixo foi detetada a presença de um jato homogéneo (0,73-1,01 m/s) (E4) (Fig. 5-D).



13.º Congresso da Água

Figura 5. Resultante da velocidade horizontal (V_{xy} , magnitude e direção) nas bacias de acordo com as diferentes configurações no plano 1: a) E1; b) E3; c) E2 e d) E4. Setas fora do diagrama indicam a entrada (canto superior esquerdo) e saída (canto inferior direito) do caudal pelos orifícios.

A proporção de movimentos com sucesso foi maior (50%) nas configurações com caudal elevado no dispositivo (E1 e E2), independentemente da densidade de blocos. Já nas configurações de caudal baixo (E3 e E4), a taxa de sucesso foi inferior a 30%. O tempo de transposição do dispositivo foi menor na configuração com caudal elevado e densidade de blocos (E1, média \pm DP: 5,3 \pm 4,2 min) e maior na configuração com caudal elevado e menor densidade de blocos (E2, média \pm DP: 12,1 \pm 6,5 min.).

O teste PerMANOVA evidenciou um efeito significativo do caudal no número de indivíduos que transpôs com sucesso o dispositivo. Com efeito, o maior caudal conduziu a uma maior proporção ($p < 0,05$) de movimentos com sucesso (50%), relativamente ao caudal mais baixo (25%). Contrariamente, não foi detetado um efeito significativo da densidade de blocos no sucesso de transposição (elevada densidade: 35%; baixa densidade: 40%), nem uma possível interação entre os dois fatores. No entanto, quando se considera o tempo de transposição do dispositivo, verificou-se que sob condições de caudal mais elevado, os peixes demoraram significativamente menos tempo para a respetiva ascensão na situação de elevada densidade de blocos (5,3 \pm 4,2 min), relativamente ao cenário de baixa densidade destes (12,1 \pm 6,5 min.) ($p < 0,05$, teste de *Mann–Whitney*).

3.4.2. Efeito da altura

Não foram detetadas diferenças significativas no padrão de velocidades entre os dois regimes de escoamento (teste emparelhado de *Wilcoxon*; $N = 49$, $Z = 1.06$; $p > 0,05$) no plano horizontal a meia altura dos blocos. Relativamente ao plano horizontal acima dos blocos, o padrão de velocidades diferiu entre os dois regimes (teste emparelhado de *Wilcoxon*; $N = 88$, $Z = 2.37$; $p < 0,05$), com a existência de numerosas pequenas zonas de recirculação (0,1-0,3 m/s) no regime 2.

A proporção de peixes que ascendeu com sucesso a passagem foi superior durante o regime 2 (60%), relativamente ao regime 1 (55%), embora esta diferença não tenha sido significativa ($p > 0,05$, teste de Chi-quadrado). Todavia foram encontradas diferenças significativas relativamente ao tempo necessário para a transposição dos peixes entre os dois regimes. Com efeito, este foi significativamente menor no regime 2 (média \pm DP: 2.6 \pm 1.6 min.) do que no regime 1 (7.1 \pm 5.8 min.) (teste de *Mann–Whitney*, $Z = 1.89$, $p < 0.05$).

4. CONCLUSÃO

O projeto FISHMOVE contribuiu para o aumento do conhecimento sobre o comportamento e movimentos migratórios das espécies piscícolas Ibéricas face à presença de obstáculos (açudes e descarregadores de cheias) nos cursos de água que impedem a livre circulação dos peixes. Por outro lado, centrou-se igualmente na procura de soluções para melhorar o desempenho dos referidos movimentos migratórios através de dispositivos de transposição para peixes, nomeadamente de passagens de bacias sucessivas, maioritariamente o tipo de dispositivos mais comuns encontrados em rios Ibéricos. Destacam-se as principais conclusões:

13.º Congresso da Água

- A transposição de pequenos açudes de faces verticais é um fenómeno bastante complexo, que está largamente dependente do ambiente hidráulico que se forma pela interação das variáveis profundidade de água a jusante do açude, queda de água a transpor, e caudal, não sendo afinal exclusivamente função de menores quedas de água e maiores profundidades como inicialmente se pensava;

- As geometrias modificadas dos descarregadores de cheia ($\theta = 30^\circ$ e $\theta = 45^\circ$) facilitaram os movimentos para jusante e reduziram o atraso dos tempos de transposição para a enguia-europeia. Ao invés, a geometria *standard* ($\theta = 90^\circ$), originou áreas de recirculação e de forte turbulência que dificultaram os movimentos descendentes das espécies. Estes resultados demonstram que as geometrias modificadas podem aumentar a sobrevivência de passagem para jusante de espécies catádromas e potamódromas, diminuindo a taxa de mortalidade associada à passagem pelas turbinas. A informação obtida neste estudo pode ainda ser considerada em futuras alterações estruturais de descarregadores de cheias, de modo a garantir condições hidráulicas que se adequem às capacidades biomecânicas das espécies piscícolas;

- A quase totalidade dos movimentos das duas espécies, durante o regime de escoamento livre através de passagens de bacias sucessivas, foi efetuada pelo orifício de fundo, o que demonstra que durante estas condições, o descarregador de superfície é uma abertura que não está disponível para ser usada por espécies não saltadoras. Os resultados dos movimentos efetuados durante o regime de escoamento afogado mostram que este torna o descarregador de superfície numa abertura útil para a transposição dos septos. Verificou-se também que a ecologia afeta o modo como os peixes optaram por transpor os septos: os barbos, mais orientados para o fundo, durante o escoamento afogado, e tendo por isso o descarregador disponível, dividiram os seus movimentos pelos dois tipos de abertura (o que não se verificou no escoamento com jato livre). Por outro lado, os escalos, mais orientados para a superfície, preferiram claramente utilizar durante o escoamento afogado, o descarregador de superfície (não se verificando o mesmo durante o escoamento com jato livre). Deste modo, sempre que possível, os escoamentos afogados devem ser preferíveis em passagens de bacias sucessivas.

- O sucesso de transposição de espécies potamódromos através de passagens de bacias sucessivas revelou-se independente da colocação de substratos artificiais (blocos paralelepípedos regulares), se bem que a colocação de blocos em densidades elevadas e sob maior caudal na passagem para peixes, se tenha revelado benéfica uma vez que reduziu o tempo necessário para a transposição. Tal resultado pode ter implicações ao nível da melhoria deste tipo de dispositivos, sobretudo dos que apresentem maior comprimento, já que é nestes onde os gastos energéticos dos peixes serão expectavelmente maiores. Ao invés, se o valor do caudal for um fator limitante, deve ser utilizada uma baixa densidade de blocos, já que nestas condições a taxa de sucesso foi superior. Relativamente à altura, verificou-se que substratos mais altos (menor profundidade relativa do escoamento) permitiram reduzir o tempo de transposição do dispositivo. Deve ser contudo mencionado, que a colocação de substratos no fundo das bacias pode tornar estes dispositivos mais suscetíveis a obstrução por detritos, ramos ou outro material flutuante, podendo causar atrasos nos movimentos piscícolas para montante. As conclusões deste estudo poderão ser amplamente aplicáveis, sendo desejável contudo que estudos futuros tenham a possibilidade de confrontar estes resultados com os obtidos para outros grupos funcionais (e.g., espécies de coluna de água ou de superfície).

AGRADECIMENTOS

O projeto FISHMOVE (PTDC/AGR-CFL/117761/2010) foi financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT). Susana D. Amaral auferiu de uma bolsa da Universidade de Lisboa/Santander Totta (SantTotta/BD/RG2/SA/2011) e é atualmente financiada por uma bolsa de Doutoramento da FCT (SFRH/BD/110562/2015). Paulo Branco foi financiado por uma bolsa de Pós-Doutoramento da FCT (SFRH/BPD/94686/2013). Os autores agradecem a todos os que participaram no trabalho de campo e laboratorial, nomeadamente André Fabião, João Oliveira, Rui Rivaes, Gonçalo Duarte e Ana Sofia Alves. Os autores gostariam ainda de agradecer à equipa do Núcleo de Recursos Hídricos e Estruturas Hidráulicas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) por todo o apoio prestado durante os ensaios experimentais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aarts B.G., Van Den Brink F.W., Nienhuis, P.H. (2003). Habitat loss as the main cause of the slow recovery of fish faunas of regulated large rivers in Europe: the transversal floodplain gradient. *Regulated Rivers: Research and Management*, 20: 3–23.

Baudoin J.M., Burgun V., Chanseau M., Larinier M., Ovidio M., Sremski W., Steinbach P., Voegtle B. (2014). Assessing the passage of obstacles by fish. Concepts, design and application. Onema, France.

Branco P., Santos J.M., Katopodis C., Pinheiro A., Ferreira M.T. (2013). Pool-type fishways: two different morpho-ecological cyprinid species facing plunging and streaming flows. *PLoS One* 8: e65089.

Branco, P., Segurado, P., Santos, J.M., Pinheiro, P., Ferreira, M.T. (2012). Does longitudinal connectivity loss affect the distribution of freshwater fish? *Ecological Engineering*, 48: 70–78.

FAO/DVWK. (2002). *Fish Passes - Design, Dimensions and Monitoring*. FAO, Rome.

Katopodis C., Kells J.A., Acharya M. (2001). Nature-like and conventional fishways: alternative concepts? *Canadian Water Resources Journal* 26: 211-232.

Kondratieff M.C., Myrick C.A. (2006). How high can Brook Trout jump? A laboratory evaluation of Brook Trout jumping performance. *Transactions of the American Fisheries Society*, 135: 361–370.

Larinier M. (2008). Fish passage experience at small-scale hydro-electric power plants in France. *Hydrobiologia* 609: 97-108.

Nilsson C., Reidy C.A., Dynesius M., Revenga C. (2005). Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems. *Science*, 308: 405–408.

Ordeix M., Pou-Rovira Q., Sellarès N., Bardina M., Casamitjana A., Solà C., Munné A. (2011). Fish pass assessment in the rivers of Catalonia (NE Iberian Peninsula). A case study of weirs associated with hydropower plants and gauging stations. *Limnetica*, 30: 405–426.

13.º Congresso da Água

Ovidio M., Philippart J.C. (2002). The impact of small physical obstacles on upstream movements of six species of fish - synthesis of a 5-year telemetry study in the River Meuse basin. *Hydrobiologia*, 483: 55–69.

Poulet N. (2007). Impact of weirs on fish communities in a piedmont stream. *River Research and Applications*, 23: 1038–1047.

Santos J.M., Ferreira M.T., Godinho F.N., Bochechas J. (2005). Efficacy of a nature-like bypass channel in a Portuguese lowland river. *Journal of Applied Ichthyology* 21: 381– 388.

Santos J.M., Silva A.T., Katopodis C., Pinheiro P., Pinheiro A., Bochechas J., Ferreira M.T. (2012). Ecohydraulics of pool-type fishways: getting past the barriers. *Ecological Engineering* 48: 38– 50.

Silva A.T., Katopodis C., Tachie M.F., Santos J.M., Ferreira M.T. (2015). Downstream swimming behaviour of catadromous and potamodromous fish over spillways. *River Research and Applications*. doi: 10.1002/rra.2904.

Silva A.T., Santos J.M., Ferreira M.T., Pinheiro A.N., Katopodis C. (2011). Effects of water velocity and turbulence on the behavior of Iberian barbel (*Luciobarbus bocagei*, Steindachner 1864) in an experimental pool-type fishway. *River Research and Applications* 27, 360–373.