

AVALIAÇÃO E MEDIDAS DE MITIGAÇÃO DOS EFEITOS AMBIENTAIS DA SEDIMENTAÇÃO EM ALBUFEIRAS

Reservoir sedimentation environmental effects assessment and mitigation measures

M. N. MIRANDA ⁽¹⁾, A. PERES ⁽²⁾ e R. MAIA ⁽³⁾

⁽¹⁾ Mestre em Engenharia do Ambiente (MIEA), FEUP

Rua Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, mmiranda@fe.up.pt

⁽²⁾ Engenheira do Território, Direção de Sustentabilidade, EDP – Gestão da Produção de Energia S.A.

Rua Ofélia Diogo da Costa, n.º39, 4.º, 4149-022 Porto, anabela.peres@edp.pt

⁽³⁾ Professor Associado, FEUP/CIIMAR,

Rua Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, rmaia@fe.up.pt

Resumo

O estudo da sedimentação em albufeiras tem vindo a ganhar relevância em vários países, procurando-se compreender os processos conducentes à sedimentação e os seus efeitos, que se fazem sentir não só na própria albufeira, mas também a jusante e a montante da mesma. Com vista a desenvolver soluções que possam minimizar os efeitos da sedimentação é necessário, primeiramente, avaliar o atual estado de cada albufeira e explorar de que forma é que a monitorização da sedimentação e dos correspondentes efeitos pode ser efetuada.

Com o presente estudo pretendeu-se, numa primeira fase, efetuar um levantamento dos potenciais efeitos de carácter ambiental, para além de socioeconómicos e de segurança, a que a sedimentação em albufeiras pode conduzir. No seguimento disso e considerando os melhores métodos conhecidos, procurou-se estabelecer uma nova metodologia para avaliar a evolução da sedimentação nas albufeiras portuguesas, em termos quantitativos e qualitativos e respetivos efeitos, uma vez que em Portugal existem poucos estudos neste domínio e que os mesmos, em geral, se restringem a estudos de caso isolados. A metodologia proposta foi aplicada num caso de estudo, na albufeira de Venda Nova, fazendo-se algumas breves considerações sobre a sua utilização.

Adicionalmente, através de uma revisão da literatura analisaram-se as atuais medidas de proteção (ao nível da bacia de drenagem, da barragem e correspondentes órgãos de segurança, da albufeira e dos trechos fluviais a jusante) e também as medidas de carácter operacional, que são comumente sugeridas e aplicadas a nível internacional, e que visam a adaptação e mitigação dos efeitos da sedimentação. O avanço através de trabalhos de investigação neste âmbito constitui uma fonte de informação, de extrema relevância, para o desenvolvimento de planos de gestão de sedimentos para as albufeiras portuguesas.

Palavras-chave: Sedimentos, levantamentos batimétricos, contaminação, qualidade de água, monitorização ambiental.

Abstract

The study of reservoir sedimentation has been gaining prominence in several countries, seeking to understand the processes leading to reservoir sedimentation and the resulting effects, which not only occur in the reservoir but also downstream and upstream of it. In order to develop solutions that can minimize sedimentation effects, it is necessary to first evaluate the current state of each reservoir and explore how to perform the monitorization of sedimentation and related effects.

As a first step, this study aimed to review the potential environmental effects, besides socioeconomic and dam safety impacts, to which reservoir sedimentation can lead. Following that and considering the state of art methodologies applied worldwide, a new methodology was framed to assess the evolution of sedimentation in Portuguese reservoirs, by adopting a quantitative and qualitative approach and analyzing the corresponding effects, since in Portugal there are few studies in this field and that are, in general, restricted to isolated case studies. The proposed methodology was applied to the Venda Nova reservoir case study, for which a brief description and some considerations are presented.

Additionally, based on the state of the art, the protection measures (of the drainage basin, the dam and corresponding safety components, the reservoir and downstream river stretches) and the operational measures, that are commonly suggested and applied worldwide with the aim to adapt and to mitigate the reservoir sedimentation effects, were reviewed. The progress through reservoir sedimentation research in Portugal is an extremely relevant source of information for the development of sediment management plans for Portuguese reservoirs.

Keywords: Sediments, bathymetric surveys, contamination, water quality, environmental monitoring.

1. Introdução

A construção de uma barragem implica a disrupção do normal transporte sedimentar em meio fluvial. Uma porção dos sedimentos fica, por isso, retida a montante da barragem, em transporte (e.g. suspensão) ou depositada no fundo e margens da albufeira. Espacialmente, os sedimentos depositam-se levando, tipicamente, à formação de um delta de material mais grosseiro à entrada da albufeira, enquanto a jusante do delta ocorre a deposição do material mais fino (Figura 1). Possíveis variações dessa distribuição de sedimentos incluem a deposição de um volume sucessivamente decrescente à medida que se diminui a distância à barragem, a acumulação dos sedimentos junto à barragem na zona prevista para o volume morto ou a deposição uniforme. Junto à barragem pode, ainda, formar-se um depósito de lamas, cujo desenvolvimento poderá indicar a existência de correntes de turbidez, ou seja, correntes de água com sedimentos que se desenvolvem ao longo dos depósitos sedimentares da albufeira devido à diferença de densidades entre a mistura de água-sedimentos e a água da albufeira (Annandale et al., 2016). A deposição de sedimentos em diferentes configurações, incluindo combinações das apresentadas, resulta das diferentes características da albufeira e dos sedimentos e, ainda, dos caudais afluentes e modo de operação da barragem, que levam a diferentes processos de transporte e deposição (Morris & Fan, 1998).

Um dos efeitos diretos da sedimentação resulta na perda de capacidade de armazenamento da albufeira, uma vez que o volume desta vai sendo gradualmente perdido com a deposição de sedimentos. Apesar da limitada disponibilidade de dados relativos à evolução do estado de sedimentação das albufeiras, procura-se estimar a tendência global da perda da capacidade de armazenamento, considerando-se que esta estará compreendida entre 0,5 e 1,0%/ano (White, 2001). Segundo o relatório da *International Commission on Large Dams* (ICOLD, 2009), em que foram compilados os dados disponíveis de 28 países, a média da taxa de sedimentação observada situava-se em 0,96%/ano. Apesar da maioria dos países apresentar taxas inferiores a 1%, alguns apresentam taxas bastante mais elevadas, como é o caso da China com uma média de 2,9%/ano, em 29 barragens (com certos casos a apresentarem mesmo perdas superiores a 10% por ano).

Com base nos padrões globais de produção de sedimentos, o mesmo relatório faz ainda estimativas das taxas de sedimentação para vários países em 2006, chegando a uma média global de 0,8%/ano e uma média global ponderada de 0,7%/ano ao considerar as diferentes capacidades de armazenamento de cada país e os dados observados. Em particular para Portugal, a estimativa resultou numa média nacional de 0,68%/ano.

Existindo com maior ou menor magnitude, a sedimentação em albufeiras implica um desafio à sustentabilidade das barragens, adquirindo especial importância quando se considera que muitas não foram projetadas ou geridas com a necessária atenção no que diz respeito à sedimentação. Em muitos casos o volume morto é a única providência prevista no projeto, mas que sendo projetado para o tempo de vida útil da barragem (geralmente 50 ou 100 anos) e considerando que, correntemente, se pretende prolongar este período, se torna frequentemente insuficiente. Em Portugal, metade das barragens com concessão da EDP já apresentam mais de 50 anos de serviço, não considerando açudes e mini-hídricas, pelo que urge realizar estudos neste domínio em território nacional (Miranda, 2016).

Apesar dessa crescente necessidade, em Portugal são ainda escassos os estudos relativos à sedimentação em albufeiras e os dados, quando existentes, encontram-se desatualizados ou incompletos. Deste modo, neste trabalho começa-se por apresentar numa previsão dos potenciais efeitos de carácter ambiental, socioeconómico e de segurança, a que a sedimentação em albufeiras pode conduzir a jusante e a montante da barragem. Com base nessa revisão de literatura e nos melhores métodos conhecidos, procurou-se estabelecer uma nova metodologia de avaliação do estado e extensão dos impactos da sedimentação nas albufeiras portuguesa, mais multidisciplinar relativamente ao que é atualmente feito, uma vez que se identificou uma maior preocupação no passado com a avaliação quantitativa dos sedimentos do que relativamente à qualidade dos mesmos. Não sendo conhecido o atual estado de sedimentação e os efeitos que daí advêm na maioria das albufeiras portuguesas, a adoção de medidas operacionais e de proteção para mitigação desses efeitos em cada albufeira encontra-se limitado. Ainda assim, neste trabalho são analisadas as medidas que têm sido aplicadas ou sugeridas internacionalmente neste domínio, com vista a dar prosseguimento a estudos de viabilidade de implementação das mesmas práticas em Portugal.

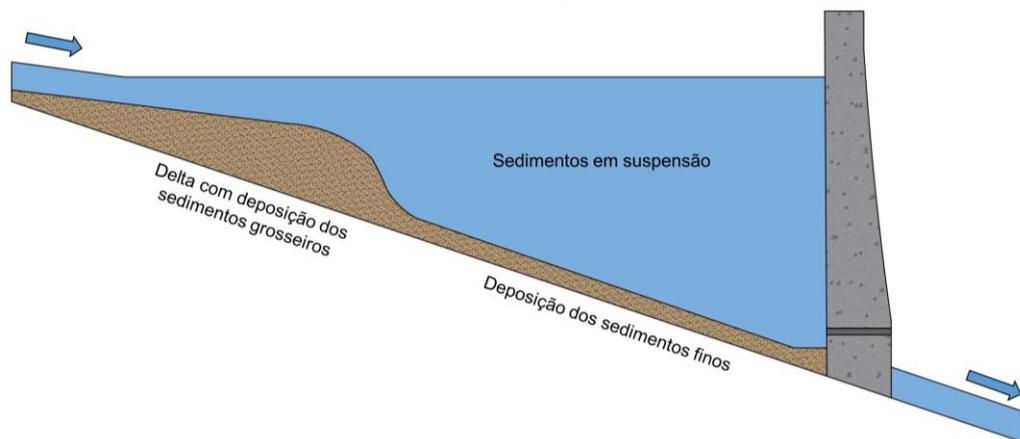


Figura 1. Distribuição típica dos sedimentos numa albufeira com a formação de um delta

2. Efeitos da sedimentação em albufeiras

Os efeitos da retenção de sedimentos a montante de uma barragem estão correlacionados com o estado de sedimentação da albufeira, nomeadamente com a quantidade de sedimentos em transporte e depositados, e com a qualidade desses sedimentos. A quantidade de sedimentos retida relaciona-se com a produção de sedimentos na bacia hidrográfica, a capacidade de transporte do rio e a eficiência de retenção da barragem. A eficiência de retenção é dependente, principalmente, da velocidade terminal de queda dos sedimentos, da dimensão e configuração da albufeira, e ainda dos caudais afluentes à mesma, podendo ser estimada por métodos empíricos (Yang, 1996). Por sua vez, a distribuição dos sedimentos na albufeira depende do modo de operação da barragem, das características dos sedimentos e da própria albufeira, e da quantidade de sedimentos retidos.

Por outro lado, a qualidade dos sedimentos traduz-se não só na natureza geológica e granulometria dos sedimentos, mas igualmente nas substâncias de natureza antropogénica associadas a estes, reflexo da poluição do solo e das massas de água. Continuamente ocorrem trocas químicas das substâncias dissolvidas na água (e.g. metais, nutrientes e matéria orgânica) com as várias frações de sedimentos transportadas ou depositadas em meio fluvial e na albufeira, de modo que se verifica um equilíbrio dinâmico entre os vários compartimentos ambientais (sedimentos, água, ar e biota). A acumulação dessas substâncias nos sedimentos depositados pode ser benéfica quando existem em concentrações nocivas, pois conduz à diminuição da sua concentração na água, apesar de que a remoção de algumas substâncias da água pode levar ao empobrecimento da sua qualidade a jusante e a alterações nos vários ciclos biogeoquímicos. No entanto, mesmo os sedimentos depositados em estratos mais profundos que não se encontram em contacto com a água podem, por re-suspensão ou difusão, conduzir à migração das substâncias imobilizadas novamente para a água, tornando-se assim uma fonte de poluição (Frémion et al., 2016; Estigoni et al., 2017; Pearce et al., 2017). Vários fatores naturais e antropogénicos afetam o equilíbrio entre os vários compartimentos ambientais, tais como a estratificação sazonal da albufeira, eventos de cheias, descargas de contaminantes, a gestão e operação da barragem (incluindo as medidas de gestão de sedimentos), entre outros. O estudo da variação em profundidade (estratificação) da qualidade dos sedimentos depositados numa albufeira reflete, por isso, também a variação cronológica da qualidade da massa de água, demonstrando ser, em vários casos, um indicador de poluição mais relevante do que a análise da qualidade da água (Wojtkowska et al., 2016).

Os efeitos da sedimentação em albufeiras podem ser categorizados como ambientais, socioeconómicos e de segurança de barragens. Refere-se que, embora os impactes da sedimentação que se apresentam tenham sido identificados em várias albufeiras, é premente o contínuo e mais aprofundado estudo desta temática, sendo este um processo crucial para a correta gestão das albufeiras e um suporte à tomada de decisão.

2.1. Impactes ambientais

Nos primeiros anos após a entrada em serviço de um aproveitamento hidráulico, com a passagem de ecossistema lótico para lêntico, não é evidente a distinção entre os efeitos ambientais provocados pela construção da barragem e os que resultam, em particular, da sedimentação. Tal deve-se à ocorrência de alterações na capacidade de transporte dos sedimentos pelo rio, nos caudais descarregados pela barragem para jusante e devido às alterações na morfologia da albufeira e do rio decorrentes da regularização de caudais. No entanto, à medida que a idade da albufeira se aproxima do seu tempo de vida útil, o sistema continua em evolução, ocorrendo o aparecimento e/ou agravamento desses efeitos, de acordo com o grau de sedimentação atingido e se não forem adotadas atempadamente medidas mitigadoras proporcionais. Os efeitos a pequeno e médio prazo (< 50 anos) nas albufeiras e a jusante destas encontram-se documentados em vários casos de estudo, mas os efeitos a longo prazo (> 50 anos) são menos compreendidos (Juracek, 2015).

Os impactes ambientais decorrentes da sedimentação em albufeiras são resultado da retenção dos sedimentos a montante da barragem e da correspondente carência nos troços fluviais a jusante e, ainda, da degradação da qualidade dos sedimentos, o que tem efeitos sobre o equilíbrio e funcionamento dos ecossistemas. Considerando os distintos efeitos ambientais que são passíveis de serem observados na albufeira e nos troços fluviais adjacentes, procedeu-se a uma organização dos mesmos por zona afetada.

2.1.1. Na albufeira

Com a deposição de sedimentos na albufeira ocorrem alterações na morfologia desta e a redução da sua capacidade de armazenamento. Consequentemente, numa albufeira em que não são aplicadas medidas de gestão de sedimentos sucedem-se diferentes etapas de alterações geomorfológicas, durante o seu tempo de vida útil. Genericamente, ocorre a evolução de elevada para baixa eficiência de retenção de sedimentos, até que a capacidade de armazenamento da albufeira é perdida e se estabelece uma situação de equilíbrio em que os sedimentos grosseiros e os finos transpõem a barragem (Morris & Fan, 1998; Juracek, 2015).

Da deposição de sedimentos podem resultar vários impactes negativos, que incluem uma maior frequência de inundação das margens da albufeira devido à perda de capacidade de armazenamento, o aparecimento de zonas pantanosas devido ao aumento do nível freático, e perda de biodiversidade devido à homogeneização do substrato de fundo, efeito tóxico de substâncias que aí se acumulam e como consequência do soterramento de zonas de reprodução (UNESCO, 1985; Popp & Hoagland, 1995; Zimmerman & Breault, 2003). Por outro lado, a acumulação de sedimentos nas margens poderá ter benefícios pois contraria a erosão a que a faixa interníveis da albufeira está sujeita, permitindo o desenvolvimento de vegetação, que acelera a consolidação do solo, e contribuindo para o potencial desenvolvimento de biótopo favorável aos macroinvertebrados e peixes. No entanto, se essa faixa estiver emersa durante largos períodos de tempo a vegetação perece e ocorre erosão (UNESCO, 1985).

Paralelamente, a quantidade de sedimentos em suspensão na coluna de água pode interferir com o funcionamento do ecossistema ao dificultar a penetração da luz solar, com efeitos sobre a atividade do fitoplâncton e macrófitas aquáticas. Para além disso, o aumento da turbidez da água conjugado com as substâncias que os sedimentos e a água transportam para a albufeira, com origem na área de drenagem, afeta o comportamento da biota e a sua diversidade, podendo conduzir à eutrofização da massa de água (UNESCO, 1985; Nikolai & Dzialowski, 2014; Juracek, 2015; Estigoni et al., 2017).

Dzialowski et al. (2008) realizaram bioensaios para determinar o efeito dos sedimentos que sofrem re-suspensão nas concentrações de nutrientes e de biomassa de algas em quatro albufeiras nas Central Plains nos EUA (Clinton, Gardner, Pomona e Pony Creek). Verificaram uma resposta significativa, mesmo para baixos aumentos de turbidez, com um aumento da biomassa devido à combinação de dois mecanismos: o aumento dos nutrientes disponíveis (sobretudo azoto e fósforo) e o arrastamento para a coluna de água de meroplâncton proveniente da interface sedimentos-água. Assim, concluíram que episódios de re-suspensão de sedimentos podem ter efeitos significativos na variação da biomassa nas albufeiras estudadas (profundidades máximas compreendidas entre 10,3 e 16,8 m), embora estejam dependentes de uma série de fatores como o equilíbrio de nutrientes entre a água e os sedimentos, o pH, a capacidade de adsorção-absorção, as espécies residentes e a frequência dos episódios de re-suspensão.

2.1.2.A jusante da barragem

A retenção de sedimentos por uma barragem acarreta vários efeitos a jusante da mesma devido à interrupção do transporte sedimentar no rio (Wohl, 2015), pelo que são vários os estudos que se dedicam à compreensão dessas alterações. Esses estudos podem classificar-se de acordo com o objetivo de investigar 1) a evolução do sistema numa pré-determinada extensão do rio a jusante da barragem quando não são aplicadas medidas de gestão de sedimentos, e 2) o efeito a jusante da barragem decorrente da aplicação de certas medidas de mitigação da sedimentação em albufeiras. Assim, apresentam-se de seguida alguns dos impactes ambientais identificados para ambas as situações.

Após a construção de uma barragem, a jusante desta, o rio sofre transformações geomorfológicas que resultam da alteração do escoamento e, necessariamente, da alteração do trânsito sedimentar. Numa primeira fase, com a carência dos sedimentos transportados de montante, dá-se um aumento da erosão do leito do rio (margens e/ou fundos), sendo esta dependente de vários fatores que incluem e.g. a sua natureza geológica. A erosão do leito, para além de contribuir para debilitar estruturas (e.g. pontes), leva ao abaixamento do nível freático, o que pode resultar na perda de biodiversidade, aumento da dificuldade de acesso a águas subterrâneas e degradação da sua qualidade (UNESCO, 1985; Dai & Liu, 2013).

À medida que a albufeira passa por diferentes estágios de sedimentação, também a secção do rio a jusante se adapta, ocorrendo alterações no canal resultantes da erosão, deposição e/ou mudança de curso do rio (Morris & Fan, 1998; Juracek, 2015). Seria necessária uma elevada extensão de rio, especialmente a jusante de uma grande barragem, para recuperação das condições pré-barragem em termos de transporte sedimentar, o que pode potenciar alguns efeitos na zona costeira (e.g. erosão costeira acelerada nos deltas do Mississípi e Nilo) (Morris & Fan, 1998).

Para além disso, com a redução da frequência de pequenas e médias cheias devido à construção da barragem, os depósitos de sedimentos formados nas confluências com os afluentes torrenciais não são devidamente erodidos pelo rio principal, podendo levar a obstruções do canal com a consequente submersão de terrenos a montante destas. Quando se dá a libertação repentina desse material podem também ocorrer danos a jusante (UNESCO, 1985).

Decorrente da eficiência de retenção da barragem, da operação da mesma e da localização da restituição, ocorre uma alteração das granulometrias dos sedimentos que são transportados pelo rio, sendo que, usualmente, verifica-se a existência de granulometrias mais grosseiras depositadas imediatamente a jusante da barragem, ocorrendo uma diminuição do tamanho médio dos sedimentos depositados para jusante (Grown et al., 2009). Paralelamente, ocorre a alteração da composição do substrato de fundo, com particular significado nas concentrações de nutrientes disponíveis a jusante. Essas alterações têm relevância do ponto de vista do funcionamento do ecossistema, uma vez que há vários organismos aquáticos que têm necessidades específicas quanto ao substrato do rio e porque, globalmente, ocorre um empobrecimento da qualidade da água devido a esses fatores (Juracek, 2015).

Alguns desses efeitos podem ser agravados caso se proceda à extração de inertes a jusante da barragem. Essa extração é indesejada, pelo menos numa determinada extensão do rio, por acentuar a erosão do canal de escoamento e também porque parte das granulometrias desejadas ficam retidas na albufeira. Em alguns rios é mesmo proibida por lei a extração de inertes para fins comerciais, como por exemplo nos rios Cávado e Lima, sendo apenas considerada a possibilidade de mobilização de inertes para correção do leito, por motivos ambientais, técnicos e sociais (INAG IP, 2006).

Em contraste, algumas medidas de mitigação da sedimentação em albufeiras conduzem à libertação de sedimentos para jusante, com vista não só à redução ou remoção de sedimentos depositados na albufeira, mas também para restabelecer a conectividade do trânsito sedimentar, interrompido pela barragem, com o rio a jusante (Annandale et al., 2016). Embora a longo prazo, quando corretamente realizadas, sejam medidas benéficas ao sistema fluvial mitigando os efeitos previamente referidos (tanto na albufeira como no rio), a libertação de sedimentos para jusante em curtos períodos de tempo tem também impactes negativos. Assim, seguidamente é dado enfoque aos efeitos da libertação de sedimentos para jusante, na sequência de operações efetuadas com esse objetivo (e.g. a abertura de descarregadores de fundo).

Com a libertação repentina de sedimentos para jusante através da abertura de descarregadores auxiliares, parte dos sedimentos depositados é erodida e, conseqüentemente, a concentração de sedimentos em suspensão na água descarregada atinge valores muito superiores aos que se verificariam em condições naturais. Para além disso, esse evento poderá ser dessincronizado com a sazonalidade do ecossistema, nomeadamente em termos dos ciclos biológicos e hidrológico (Annandale et al., 2016). A alteração das características físico-químicas da água e do substrato do rio, ainda que dependente das condições em que a descarga de sedimentos é realizada e da qualidade destes, conduz a potenciais efeitos sobre a biocenose que podem ser temporários ou mais duradouros e incluem e.g. alterações de comportamento, alterações no metabolismo e danos fisiológicos e histológicos, no caso dos peixes, e perdas na diversidade das comunidades bentónicas (UNESCO, 1985; Khakzad & Elfimov, 2015; Annandale et al., 2016; Brignoli et al., 2017; Grimardias et al., 2017).

Para além disso, devido à reduzida capacidade de transporte do rio a jusante da barragem, poderá ocorrer a deposição seletiva do material libertado na secção de descarga ou mais a jusante, resultando numa elevação temporária do leito do rio, o que pode dificultar o escoamento, danificar habitats e levar à submersão de terrenos adjacentes (UNESCO, 1985; Annandale et al., 2016).

A libertação de sedimentos para jusante da barragem pode também resultar em alguns impactes negativos na zona costeira. A barragem de Conowingo (entrada em funcionamento em 1929), situada no rio Susquehanna (EUA), tem sido recentemente alvo de estudos ligados à sedimentação em albufeiras, visto que a capacidade de armazenamento da albufeira se encontra comprometida (em 1997 tinha perdido entre 60 e 70% da sua capacidade e em 2011 cerca de 92%) (Cercio, 2016). Cercio & Noel (2016) estudaram os efeitos da libertação de sedimentos sobre a qualidade de água a jusante da barragem de Conowingo, na baía de Chesapeake, recorrendo a modelos hidrodinâmicos, da bacia hidrográfica e de qualidade. Concluíram que, embora o aumento de sólidos suspensos totais não representasse uma ameaça à qualidade da água na baía no que diz respeito à turvação, devido à rápida deposição dos sedimentos, a libertação de matéria orgânica e nutrientes associados aos sedimentos era determinante, podendo contribuir para a eutrofização da baía.

Assim, as medidas de mitigação da sedimentação em albufeiras, em particular as que envolvem a libertação de caudal sólido para jusante, acarretam estudos de avaliação dos impactes que essa descarga, realizada de forma deliberada e controlada, tem no sistema fluvial. Devem ser procuradas as situações e condições em que os impactes negativos decorrentes das operações sejam minimizados, contribuindo para a sustentabilidade dos usos associados à barragem.

2.1.3. A montante da albufeira

Os efeitos da sedimentação na zona a montante da albufeira são geralmente limitados. No entanto, com a perda de capacidade da albufeira, a zona a montante desta é passível de ser mais afetada em situações de cheia, para além de que a elevação do leito do rio na secção inicial da albufeira leva geralmente à formação de bancos de cascalho e conduz a que o rio se divida em canais separados por pequenas ilhas de carácter usualmente temporário (*braided river*) (UNESCO, 1985; Annandale et al., 2016). Esta alteração morfológica pode exercer um efeito benéfico para as populações de peixes, pois cria uma área favorável à desova. Contudo, com a sedimentação, outras áreas de desova, nomeadamente na albufeira, ficam cobertas por sedimentos o que, conjuntamente com a variação do nível de água, leva a que algumas espécies possam migrar para os rios e ribeiras afluentes à albufeira. Essa migração pode implicar a sobrepopulação temporária na zona da foz desses rios, conduzindo a desequilíbrios no funcionamento do ecossistema (UNESCO, 1985).

A barragem de Sanmenxia (China) é um caso de estudo bastante conhecido devido aos severos problemas que resultaram da sedimentação, tendo-se observado impactes a montante da albufeira. Com entrada em funcionamento em 1960, a albufeira de Sanmenxia acumulou 1,8 mil milhões de toneladas de sedimentos nos primeiros 18 meses, o que elevou o leito do rio Amarelo e alterou a área inundável, com efeitos numa extensão de 260 km a montante da barragem. Várias medidas de mitigação foram colocadas em prática para dar resposta à sedimentação desde então, uma vez que estavam também em risco várias zonas do rio Wei (afluente do rio Amarelo) e potencialmente teriam de ser realojadas milhares de pessoas (Morris & Fan, 1998; Zheng et al., 2015).

Por último, importa considerar que, no caso de cascatas de barragens, a secção a montante de uma albufeira corresponde igualmente à secção a jusante da barragem que a precede, acrescentando complexidade ao estudo dos efeitos da sedimentação nas albufeiras desse curso de água.

2.2. Impactes socioeconómicos

Cada barragem pode servir vários objetivos e que, inclusive, podem alterar ao longo do tempo de vida útil da mesma. Disso resulta que os potenciais efeitos negativos da sedimentação de carácter socioeconómico adquirem diferentes dimensões de acordo com as necessidades às quais a albufeira responde.

Considerando que a finalidade primária e comum da construção de uma barragem é o armazenamento de água, a perda dessa capacidade devido à deposição de sedimentos afeta os diversos usos da mesma, sendo particularmente sentida na produção de energia hidroelétrica, captação para abastecimento de água (uso doméstico, industrial e agrícola) e no controlo de cheias (UNESCO, 1985).

No caso particular de aproveitamentos hidroelétricos, a entrada de sedimentos nas tomadas de água pode danificar elementos do circuito hidráulico e da central hidroelétrica, tais como as turbinas, pelo que perante tal ocorrência é necessário parar a produção para manutenção e reparações.

Para além desse possível cenário, há ainda a considerar a situação em que os depósitos de sedimentos atingem a cota dos descarregadores de fundo ou das tomadas de água (constituindo igualmente impactes na segurança da barragem), obrigando não só à paragem da produção de energia como a operações de desassoreamento desses órgãos.

As alterações morfológicas da albufeira decorrentes da sedimentação podem ainda criar dificuldades ao uso da albufeira para atividades recreativas, danificar pontes e outras estruturas, e dificultar o combate a incêndios com meios aéreos. As alterações na qualidade da água, devido à sedimentação, podem também conduzir a problemas de saúde pública e interferir com as atividades recreativas praticadas na albufeira.

A título de exemplo, a barragem de Paonia em Gunnison County, no Colorado (EUA), que entrou em serviço em 1962 para irrigação e, adicionalmente, recreação e controlo de cheias, foi recentemente alvo de estudo e intervenções devido a problemas que decorreram da sedimentação (McWhirter et al., 2016). A albufeira tinha inicialmente, em 1962, uma capacidade de armazenamento de cerca de 22,39 hm³, que se reduziu atualmente para cerca de 19,24 hm³. Dessa acumulação de sedimentos resultou que a torre da tomada de água, com mais de 20 m, se encontrava praticamente enterrada, em 2014 (Figura 2).



Figura 2. Tomada de água da barragem de Paonia (a) durante a construção, em 1961 (U.S. Bureau of Reclamation); (b) em 2014 (Subcommittee on Sedimentation of ACWI)

Para além disso, a sedimentação na albufeira de Paonia estava a afetar o funcionamento dos órgãos de descarga da barragem e a ter efeitos adversos nas operações e usos da mesma. Apesar de já terem ocorrido algumas intervenções no sentido de remover sedimentos desde 1997, estão previstos novos estudos e intervenções, incluindo a reparação da estrutura de tomada de água (prevista para o outono de 2017) e o desenvolvimento e implementação de uma estratégia de gestão de sedimentos.

2.3. Impactes na segurança de barragens

Em termos de segurança de barragens, um dos principais problemas que pode advir da sedimentação em albufeiras decorre da obstrução dos descarregadores de fundo por acumulação de sedimentos junto à barragem, o que pode ainda ser agravado pela acumulação de restos de árvores e outros materiais. Quando o descarregador fica completamente obstruído, impedindo a sua correta abertura, perde em pleno a função de órgão de segurança, pelo que é fundamental a sua frequente inspeção e verificação. Assim, na fase de projeto, deve ser considerado o uso dos descarregadores de fundo para libertação de sedimentos para jusante, sendo que essas descargas devem ser realizadas frequentemente de forma a evitar o seu assoreamento. Na Figura 3 pode observar-se parte do assoreamento do descarregador de fundo da barragem de Venda Nova, no rio Rabagão (afluente do Cávado), que impedia a abertura da comporta de montante, e que conduziu a que fosse efetuado um esvaziamento completo da albufeira para remoção dessa obstrução, por escavação a seco, em 1984.

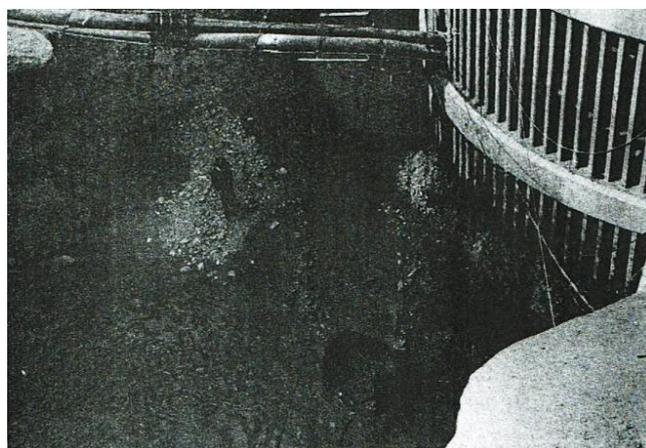


Figura 3. Estado do descarregador de fundo de Venda Nova, aquando da sua desobstrução em 1984 (Cardoso, 1986)

Por outro lado, a ação abrasiva dos sedimentos e a corrosão provocada pela libertação de gás (e.g. sulfureto de hidrogénio) pela mistura de sedimentos e água pode levar, conjuntamente com a cavitação e vibração induzidas pela corrente, a danos nos elementos da barragem, tais como comportas e válvulas. Para além disso, a pressão exercida pelos depósitos de sedimentos sobre a estrutura da barragem deve ser considerada na fase de projeto, devendo-se também prever a necessidade de adotar medidas preventivas para a não ocorrência de deterioração do betão (UNESCO, 1985).

Finalmente, a retenção de sedimentos pela barragem pode dificultar o uso de equipamentos de monitorização e inspeção submersíveis, assim como a análise visual de alguns elementos devido à turvação.

3. Monitorização da sedimentação em albufeiras em Portugal: passado, presente e futuro

A Diretiva Quadro da Água (2000/60/CE), transposta para a ordem jurídica nacional pela Lei da Água (Lei n.º 58/2005, de 29 de Dezembro, cuja alteração mais recente é estabelecida pela Lei n.º 44/2017, de 19 de junho), indica que a continuidade do rio em termos de transporte sedimentar é um dos elementos de classificação do estado ecológico dos rios e estabelece a necessidade de fixar normas de qualidade ambiental que abranjam a concentração de poluentes nos sedimentos. Destaca-se o artigo 54.º da Lei da Água, referente à monitorização do estado das águas de superfície e subterrâneas e zonas protegidas, no qual é instituído que *devem ser definidas para cada região hidrográfica redes de recolha de dados de monitorização de variáveis biológicas, hidrológicas e climatológicas, físico-químicas, de sedimentos e da qualidade química e ecológica da água*. Apesar deste panorama normativo em Portugal, são escassos os estudos e os dados relativos ao transporte sedimentar nos rios e, sobretudo, do estado de sedimentação das albufeiras, quer em termos de quantidade e distribuição de sedimentos como da sua qualidade.

Em 1996, foi dado início a uma reestruturação das redes de monitorização dos recursos hídricos, incluindo a revitalização da rede sedimentológica, que compreende estações em cursos de água para amostragem de caudal sólido (em suspensão e por arrastamento) e de granulometria de fundo, e estações em albufeiras para realização de levantamentos batimétricos (Álvares et al., 2001). Com os registos dessas estações e com recurso a Sistemas de Informação Geográfica (SIG), software para processamento de dados e a análises laboratoriais, pretendia-se caracterizar os regimes de transporte sólido, determinar o estado de sedimentação e caracterizar os sedimentos. A rede existente até 1993/1994 contemplava 112 estações em cursos de água e 10 albufeiras com levantamentos batimétricos, sendo que para a rede reestruturada estavam previstas 66 estações em cursos de água e 45 em albufeiras (Álvares et al., 2001; Rodrigues, 2001).

Consultando o Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH) verificou-se que das 300 estações identificadas que integram a rede sedimentológica, apenas são disponibilizados dados para 131 estações (à data da consulta em abril de 2017). Das 131 estações, 101 apresentam dados recolhidos entre 1979 e 2002 (dessas apenas uma – a estação Ponte Pomar 22G/01S na bacia hidrográfica do Sado – tem dados após 1994) e 30 estações têm dados posteriores, recolhidos entre 2013 e 2014.

Para as estações em funcionamento até 1993/1994, os dados disponíveis são maioritariamente resultado da medição de 5 parâmetros: nível hidrométrico, caudal, caudal sólido em suspensão, concentração média dos sedimentos de superfície e por perfil, sendo que, para várias estações, existiu maior frequência de recolha de dados para o caudal e nível hidrométrico. Acresce o facto de que essas estações estiveram em funcionamento durante períodos distintos, em algumas foi somente realizada uma única campanha de medição e nem sempre foi analisada a totalidade dos parâmetros aconselhados.

Quanto aos dados recolhidos entre 2013 e 2014, constatou-se que, embora o número de parâmetros analisados tenha sido significativamente superior (compreendido entre 99 e 129 parâmetros para cada estação), apenas foram recolhidos dados em 1 ou 2 campanhas, com exceção da estação de Ponte Coruche 20F/02SED, na bacia hidrográfica do Tejo, que apresenta alguns parâmetros com 19 dados. De destacar, ainda, a localização dessas 30 estações: Tejo (8), Douro (5), Ave (4), Vouga/Ribeiras Costeiras (3), Mondego (3), Leça (2), Ribeiras do Algarve (2), Sado (1), Lis/Ribeiras Costeiras (1), Cávado/Ribeiras Costeiras (1).

Paralelamente, identificaram-se estudos de monitorização batimétrica para as albufeiras que se encontram listadas no Quadro 1. Adicionalmente, para as albufeiras de Burgães, Santa Luzia, Idanha, Montargil, Campilhas, Vale Formoso e Arade foram avaliadas taxas de assoreamento específico e a perda anual da capacidade de armazenamento com base em dados recolhidos entre 1960 e 1970 (Veiga da Cunha, 1974). Outros estudos analisaram algumas características dos sedimentos depositados nas albufeiras, tais como o realizado por Costa (2004) nas albufeiras de Venda Nova, Salamonde e Caniçada, e os realizados por Vale et al. (1980) e Cardoso (1986) em Venda Nova, existindo ainda dados recolhidos pela EDP Labelec para as albufeiras de Venda Nova e Crestuma-Lever (Miranda, 2016).

Quadro 1. Lista de albufeiras com levantamentos batimétricos identificados

	BACIA HIDROGRÁFICA	REFERÊNCIA
VENDA NOVA	Cávado	(Miranda, 2016)
TORRÃO	Douro	(Miranda, 2016)
IDANHA	Tejo	(Álvares et al., 2001)
CAMPILHAS	Sado	(Álvares et al., 2001; Mariano et al., 2002)
ROXO	Sado	(Álvares et al., 2001)
MONTE DA ROCHA	Sado	(Álvares et al., 2001)
CAIA	Guadiana	(Álvares et al., 2001)
VIGIA	Guadiana	(Álvares et al., 2000; Álvares et al., 2001)
BRAVURA	Rib. do Algarve	(Álvares et al., 2001)
ARADE	Rib. do Algarve	(Álvares et al., 2001)

Assim, com base nos dados disponíveis e consultados, conclui-se que a rede sedimentológica nacional se encontra praticamente inativa e que os dados existentes foram recolhidos com uma frequência irregular e insuficiente.

Consequentemente, desenvolveu-se uma potencial metodologia a aplicar para avaliar o estado e impactes da sedimentação nas albufeiras nacionais (Miranda, 2016), que se apresenta seguidamente no ponto 3.1. Refere-se que a monitorização proposta é direcionada para albufeiras portuguesas, sendo que não se aborda a monitorização de transporte sedimentar nos rios, para o que se sugere a consulta de e.g. Poletto (2014).

3.1. Potencial metodologia de monitorização da sedimentação em albufeiras a aplicar em Portugal

Sumariamente, a metodologia proposta, que se apresenta esquematicamente na Figura 4, permite avaliar o estado de sedimentação de uma albufeira em termos de quantidade e qualidade dos sedimentos que ficam retidos na albufeira, procurando sistematizar esse processo e definir linhas orientadoras para o trabalho de recolha e tratamento de dados.

Enquanto para a quantificação e estudo da distribuição dos sedimentos depositados na albufeira se recomenda a realização de levantamentos de linhas batimétricas e a sua comparação com levantamentos anteriores, para a avaliação da qualidade dos sedimentos depositados sugerem-se duas metodologias distintas que resultam do objetivo específico do estudo passar pela (1) avaliação histórica das alterações na qualidade dos sedimentos ou (2) monitorização frequente da qualidade dos sedimentos que se depositam. Os resultados obtidos da análise do estado de sedimentação da albufeira devem ser conjugados com os dados de monitorização da qualidade da água e com estudos de avaliação dos efeitos no ecossistema, permitindo avaliar os impactes ambientais da sedimentação na albufeira em termos de qualidade de água e biota, para além das transformações geomorfológicas. A compreensão do estado de sedimentação da albufeira permite ainda identificar alguns possíveis impactes de carácter socioeconómico e de segurança de barragens. Finalmente, os resultados obtidos devem ser a base do trabalho a desenvolver no sentido de avaliar a adequação de medidas de adaptação e mitigação.

Acresce que a metodologia tem potencial aplicação em albufeiras já existentes e em albufeiras de barragens que irão entrar em funcionamento nos próximos anos ou que se venham equacionar construir. Resultam deste aspeto algumas variantes à metodologia que é necessário considerar e que se abordam sucintamente na seguinte exposição.

Para as albufeiras já existentes, que se consideram ser o principal alvo do estudo, é necessário, numa primeira fase de trabalho, proceder a um levantamento de todo o material disponível com relevância para este tipo de estudos. Sugere-se, para tal, consultar o respetivo Plano de Gestão de Região Hidrográfica, os Programas de Albufeiras de Águas Públicas (PAAP), o SNIRH, os arquivos da(s) entidade(s) concessionária(s) da exploração da albufeira e estudos prévios, que se demonstrem relevantes. Esse trabalho de enquadramento e caracterização, da albufeira e área envolvente, deve resultar no conhecimento de: localização e outras características gerais; tipos e características dos aproveitamentos hidroelétricos, captações de água e outros usos associados; clima; hidrologia e gestão de recursos hídricos superficiais; geologia, hidrogeologia e ocupação do solo; erosão hídrica, transporte e acumulação de material sólido; fauna e flora; património arqueológico submerso; e fontes de poluição. Os registos das operações de abertura do descarregador de fundo da barragem são, naturalmente, também de inequívoca importância, assim como quaisquer intervenções com influência na dinâmica sedimentar ou qualidade dos sedimentos.

Para avaliar a quantidade e distribuição de sedimentos é recomendado proceder a levantamentos batimétricos periódicos, uma vez que estes permitem caracterizar o relevo submerso pela albufeira e, consequentemente, quantificar o volume de armazenamento da mesma. Para além disso, por comparação com levantamentos topográficos ou batimétricos anteriores, torna-se possível analisar as transformações da geomorfologia da albufeira nesses períodos, com identificação de zonas preferenciais de erosão e deposição de sedimentos, estimativa de taxas de erosão e sedimentação e efetuando balanços sedimentares. Os levantamentos batimétricos são, igualmente, um importante suporte ao

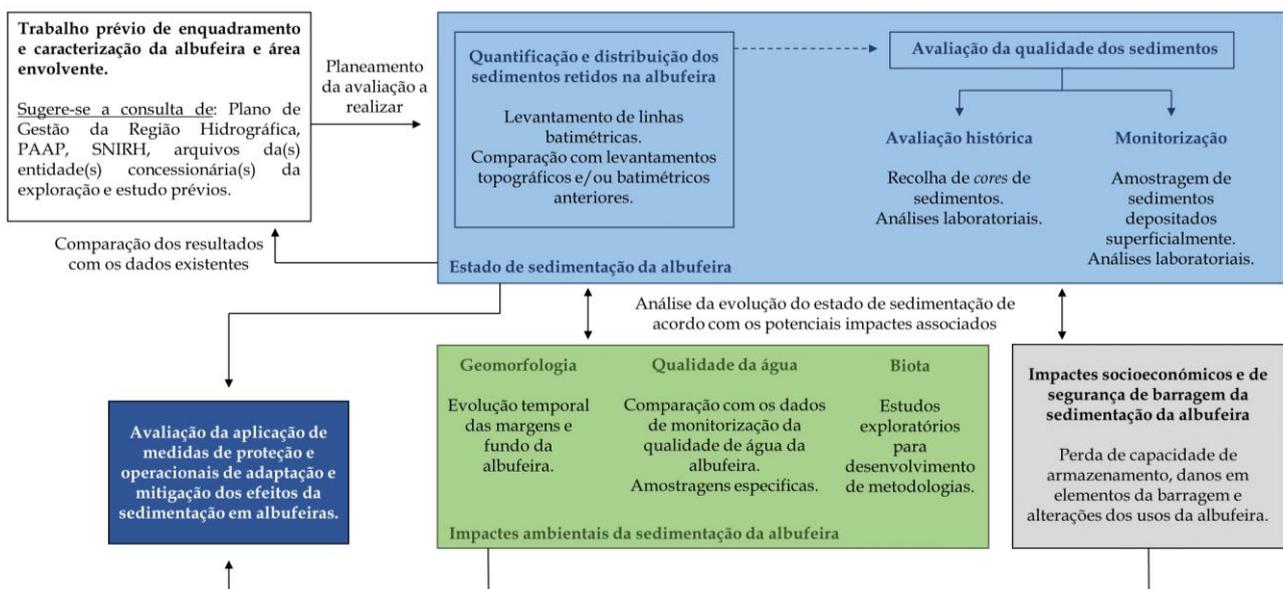


Figura 4. Esquema da metodologia de avaliação do estado e extensão dos impactes da sedimentação em albufeiras

planeamento de amostragens de sedimentos e a projetos com intervenções na barragem e área inundável da albufeira. Adicionalmente, permitem a atualização de séries de dados usados para a gestão e operação da barragem (e.g. atualização das curvas características) e podem ser utilizados em modelos computacionais. Existem diferentes métodos para realização de levantamentos batimétricos, sendo que Mariano et al. (2001) propuseram uma metodologia para monitorização batimétrica de albufeiras portuguesas, no seguimento do processo de reestruturação das redes de monitorização dos recursos hídricos em 1996. Quanto à frequência aconselhável para a realização dos levantamentos batimétricos, esta é naturalmente dependente de vários fatores como a capacidade da albufeira e a carga sólida afluente. Carvalho et al. (2000) sugerem uma frequência de acordo com a capacidade de armazenamento da albufeira, da seguinte forma: a cada 2 anos para pequena capacidade (< 10 hm³), a cada 5 anos para média capacidade (entre 10 e 100 hm³) e a cada 10 anos para grande capacidade (> 100 hm³). Apesar disto, a metodologia proposta prevê uma frequência de partida de 10 anos, com reavaliação da periodicidade para cada albufeira baseada nos resultados obtidos para os primeiros períodos analisados e outros dados relevantes. Essa periodicidade está em linha com o que é habitualmente sugerido na literatura e tem também em consideração a correspondente alocação de recursos necessários para a realização desses trabalhos. A existência de registos com essa periodicidade em território nacional seria um grande avanço. Paralelamente, para monitorização do estado de sedimentação, deve-se proceder à avaliação da qualidade dos sedimentos retidos na albufeira. Para essa avaliação sugere-se a seguinte sequência para preparação do trabalho a realizar: 1) identificação dos objetivos específicos do estudo; 2) programação das amostragens; 3) seleção dos pontos de amostragem; 4) seleção dos métodos de amostragem; 5) seleção da fração de sedimentos a analisar; e 6) seleção dos parâmetros a analisar. Após a concretização do trabalho de amostragem e laboratorial, os resultados devem ser tratados e apresentados sob a forma de relatório (Miranda, 2016).

De acordo com Kasich et al. (2012), existem diferentes tipos de métodos de amostragem para avaliação da qualidade dos sedimentos que podem ser aplicados mediante os objetivos específicos que se pretendem atingir. Para a presente metodologia, a aplicar a qualquer albufeira portuguesa, foram identificados dois objetivos específicos: evolução histórica e monitorização. Para a avaliação histórica da qualidade dos sedimentos, para a qual é essencial a existência de pelo menos dois levantamentos batimétricos, recorre-se a técnicas de *coring* (e.g. *Kullenberg coring*) para extração de amostras verticais de sedimentos acumulados. Dessas amostras (*cores*) de sedimentos resultam várias subamostras, o que permite uma análise da variação de diferentes parâmetros físico-químicos em profundidade através dos vários estratos de sedimentos e, como tal, no período de deposição a que o *core* corresponder. Desta forma, em albufeiras onde nunca foram realizados estudos de sedimentação, torna-se possível avaliar a qualidade dos sedimentos depositados desde que a barragem entrou em serviço. No entanto, as amostragens por *coring* implicam um elevado número de recursos pelo que, após um primeiro

estudo (com exceção de uma situação em que seja detetada uma elevada taxa de assoreamento da albufeira no levantamento batimétrico seguinte), poderá não ser justificável a sua realização periódica. Deste modo, pelo menos no período compreendido entre levantamentos batimétricos, prevê-se que seja suficiente a aplicação da metodologia com o objetivo específico de monitorização, nomeadamente através da amostragem superficial de sedimentos depositados, devendo a periodicidade desses trabalhos ser adequada às características da albufeira. Para amostragem de sedimentos depositados superficialmente podem-se usar diferentes equipamentos tais como as dragas *Eckman*, *Peterson*, *Petite Ponar* e *Van Venn*.

Importa referir que as características físico-químicas dos sedimentos são influenciadas pelo tamanho das partículas, sendo que as partículas mais finas de silte e argila são mais interativas do ponto de vista químico, físico e biológico. Em Portugal, o artigo 5.º do Decreto-lei n.º 103/2010, de 24 de setembro (alterado e republicado pelo DL n.º 218/2015, de 7 de outubro), que estabelece as normas de qualidade ambiental no domínio da política da água, indica que *a análise nos sedimentos de substâncias prioritárias que são contaminantes orgânicos deve ser efetuada na fração do sedimento inferior a 2 mm e a análise dos metais deve ser efetuada na fração inferior a 63 µm*. Ainda que o artigo 5º tenha sido revogado, essa indicação está em linha com a separação de frações descrita na literatura (Kasich et al., 2012; Frémion et al., 2016; Simpson & Batley, 2016) para este tipo de estudos, permitindo minimizar a influência da variabilidade da granulometria nos resultados, sendo ainda benéfica para a comparação com outras albufeiras. Assim, sugere-se que a fração de sedimentos a analisar seja ponderada de acordo com os parâmetros a analisar.

A seleção dos parâmetros físico-químicos e biológicos a analisar nos sedimentos deve ser adaptada de acordo com o propósito do estudo e à albufeira em causa. Apesar disto, segundo Kasich et al. (2012) para cada amostra deve ser sempre analisado o Carbono Orgânico Total e a distribuição do tamanho de partículas, sendo também sugerida uma lista de possíveis parâmetros a analisar. A Portaria n.º 1450/2007, de 12 de novembro, determina as características e composição dos materiais dragados, pelo que se aconselha a análise dos parâmetros descritos no Anexo III do referido documento. Recomenda-se ainda que, na impossibilidade de uma avaliação mais completa, a identificação de possíveis fontes de poluição difusa e tóxica preceda a seleção dos parâmetros a estudar. Posteriormente, sempre que possível, os resultados devem ser comparados com gamas de valores tabelados na legislação nacional ou, na sua ausência, internacional, assim como com estudos semelhantes. As normas de Ontário propostas por Persaud et al. (1993) mantêm-se como uma referência no que diz respeito a diretrizes de qualidade de sedimentos, tendo sido republicadas em 1997 e 2011. Podem ainda ser encontrados outros valores de referência e.g. nas *Canadian sediment quality guidelines for the protection of aquatic life* (CCME, 2002), *Summary of Guidelines for Contaminated Freshwater Sediments* (Washington State Department of Ecology, 1995) ou, ainda, no *Decree 08/09/2006* (NOR: DEVO0650505A).

O estudo da evolução dos efeitos ambientais da sedimentação na albufeira deverá ser efetuado tendo por base a referida monitorização do estado de sedimentação da albufeira e ainda a monitorização da biota e da qualidade da água. Considerando que a qualidade das águas superficiais em Portugal é monitorizada periodicamente, as amostragens de sedimentos podem ser calendarizadas de modo a coincidirem com estas, o que permitirá poupar recursos. Mesmo que tal não aconteça, é aconselhável que sejam sempre recolhidas amostras de água durante a amostragem de sedimentos e para as mesmas estações de amostragem, de forma a estabelecer correspondências entre o estado de sedimentação com variações da qualidade da água e melhor compreender os fenómenos envolvidos na distribuição de contaminantes pela albufeira. Destaca-se que as amostragens de água na interface água-sedimentos são particularmente relevantes, assim como a análise dos sedimentos em suspensão na albufeira. No caso de estudos da evolução histórica da qualidade dos sedimentos, devem-se interpretar os resultados obtidos com apoio de registos históricos da qualidade da água.

A avaliação dos efeitos da sedimentação sobre a biota não foi explorada no trabalho realizado e é uma linha de investigação que carece de mais estudos, devendo ser trabalhada em Portugal de forma a desenvolver-se uma metodologia adaptada ao panorama nacional e em conformidade com a Diretiva Quadro da Água. Alguns investigadores, tais como Simpson & Batley (2016), defendem a utilização de um sistema que se baseia em várias linhas de evidência que são combinadas, quando necessário, para uma completa avaliação. Assim, idealmente a avaliação deveria combinar: química dos sedimentos (incluindo a comparação com normas de qualidade ambiental e testes de biodisponibilidade dos contaminantes), testes de toxicidade, estudo da estrutura e funcionamento da comunidade bentónica e, de acordo com os últimos desenvolvimentos na área, estudos de bioacumulação e bioampliação.

Finalmente, as barragens que entraram recentemente em serviço, ou aquelas que venham a ser construídas, constituem oportunidades para colocar em prática metodologias de trabalho para o estudo da sedimentação nas correspondentes albufeiras e, dessa forma, podem conduzir a uma melhor compreensão dos fenómenos associados. Contudo, deve ter-se em atenção que o estudo da evolução da sedimentação na albufeira deve partir da situação após enchimento da mesma, sendo esta a referência para trabalhos posteriores. Por este motivo, é proposto que seja realizado um primeiro levantamento batimétrico após o enchimento da albufeira, um segundo após 10 anos e um terceiro passados 20 anos desde o enchimento. Com base nos resultados obtidos deve ser reavaliada a periodicidade dos levantamentos seguintes e a necessidade de se proceder à avaliação histórica da qualidade dos sedimentos. Caso não se justifique a avaliação histórica, será suficiente realizar apenas trabalhos de monitorização da qualidade dos sedimentos, cuja frequência deve igualmente ser ajustada de acordo com a evolução do estado de sedimentação da albufeira e com os recursos disponíveis.

3.2. Caso de estudo: Venda Nova

A metodologia de trabalho proposta para avaliar o estado e impactes da sedimentação em albufeiras em Portugal foi aplicada, ainda que parcialmente, à albufeira de Venda Nova no decorrer e prosseguimento do estudo desenvolvido por Miranda (2016). Neste artigo pretende-se descrever brevemente a metodologia aplicada e quais as principais ilações que se puderam extrair quanto à viabilidade da sua aplicação, não sendo explorados os resultados obtidos.

A albufeira de Venda Nova, localizada no rio Rabagão (bacia hidrográfica do Cávado), foi selecionada como caso de estudo uma vez que possui um histórico de estudos com relevância para a compreensão da sedimentação em albufeiras. Esses estudos foram consultados, numa primeira fase, e serviram de base ao trabalho realizado. No decorrer do trabalho de investigação, e como consequência das características da albufeira, esta foi dividida em duas seções: principal – associada ao curso do rio Rabagão – e ribeira de Amiar, um afluente do rio Rabagão com confluência junto à barragem (Figura 5).

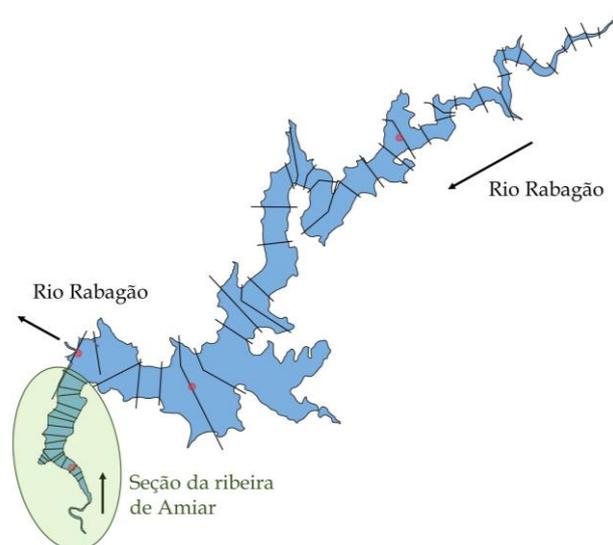


Figura 5. Esquema da albufeira de Venda Nova com identificação da seção da ribeira de Amiar, perfis transversais e pontos (a vermelho) de amostragem de sedimentos e água em 2016

Para avaliação da quantidade e distribuição de sedimentos na albufeira foram identificados levantamentos topográficos ou batimétricos datados de 1946, 1984, 1985, 1990, 2001, 2002 e 2004. Apesar do elevado número de levantamentos existentes constatou-se que estes não abrangiam a totalidade da albufeira, sendo que a maioria apenas permitiu analisar uma seção da mesma, correspondente à ribeira de Amiar. Outras dificuldades encontradas decorreram da maioria do material se encontrar em papel, e de para alguns anos terem sido apenas cedidos os perfis transversais (não se teve acesso aos levantamentos que os originaram), sendo que para alguns desses perfis não havia uma identificação das coordenadas geográficas, mas apenas uma representação da sua localização em desenho. Tal implicou a digitalização de vários documentos e a representação dos perfis em formato digital, assim como a georreferenciação dos perfis transversais existentes num mesmo sistema de coordenadas.

Os levantamentos originais cedidos de 1946 e 2004 foram igualmente georreferenciados e procedeu-se ao desenho de perfis transversais para as mesmas localizações para as quais já existiam perfis de outros anos. No final, todos os perfis transversais existentes para a mesma localização foram sobrepostos para comparação, analisando-se: evolução temporal das margens e fundo da albufeira, perfil longitudinal (um para a ribeira de Amiar e outro para o rio Rabagão), taxas de erosão e de sedimentação específicas para vários períodos, balanços sedimentares e perdas de capacidade de armazenamento em algumas zonas. Admitindo-se insuficiente a qualidade dos dados do levantamento de 1946, e por este ser prévio à construção da barragem, reconstruiu-se a evolução do estado de sedimentação da secção da ribeira de Amiar para os períodos de 1977-1984 (período em que ocorreu um assoreamento da ribeira de Amiar, resultando numa escavação mecânica com esvaziamento total da albufeira para remoção de sedimentos em 1984) e 1985-2004 (complementado com análises dos períodos de 1985-1990, 1990-2001, 2001-2004 e 1985-2001). Deste trabalho resultou ainda a identificação de zonas predominantes de erosão e de sedimentação e zonas de transição entre as mesmas. Para a restante área da albufeira, ou seja, para a secção do rio Rabagão, apenas foi traçado o perfil longitudinal com representação das cotas de talvegue e realizada uma análise qualitativa da evolução da morfologia da albufeira entre 1946 (perante a inexistência de mais dados) e 1984, e ainda para a zona junto da barragem com dados de 2004.

Para avaliar a qualidade dos sedimentos superficiais e correlacionar a mesma com a qualidade da água, foi realizada uma campanha de amostragem a 31 de maio de 2016 em quatro localizações da albufeira (Figura 5), com apoio da EDP Labelec. As estações de amostragem de sedimentos e água selecionadas foram as seguintes: 1) junto à barragem, correspondendo a uma localização de amostragem prévia de sedimentos superficiais que data a 2014; 2) na zona central da albufeira (estação de monitorização periódica de qualidade de água); 3) ribeira de Amiar (estação de monitorização periódica de qualidade de água); e 4) zona de montante, correspondente a uma nova localização de amostragem. A deslocação até às estações de amostragem foi efetuada com recurso a um barco de apoio. Em cada estação foram recolhidas amostras de sedimentos superficiais com uma draga *Petite Ponar* e procedeu-se à leitura direta de valores de temperatura e oxigénio dissolvido na água com uma sonda eletroquímica (para determinar os perfis em profundidade). Foi determinada a profundidade da zona eufótica com um disco de *Secchi* e recolheram-se dois tipos de amostras de água: uma integrada na zona eufótica com um amostrador *Hydro-Bios*, e outra em profundidade (a cerca de 1 m do fundo) com uma garrafa de *Van Dorn*.

Todas as amostras de água foram analisadas para os mesmos parâmetros e de acordo com as práticas recomendadas para monitorização das albufeiras portuguesas nesta matéria. Os parâmetros analisados em laboratório para as amostras de sedimentos foram:

- Na fração < 63 µm: alumínio, arsénio, cádmio, chumbo, cobre, crómio total, estanho, ferro, manganês, mercúrio, níquel e zinco;
- Na fração < 2 mm: carbono orgânico total, fósforo total, azoto Kjeldahl, azoto amoniacal, os 16 PAH prioritários listados pela US-EPA e os ICES-7 PCB.

Os resultados obtidos com a amostragem e análise laboratorial de sedimentos permitiram a sua caracterização e a análise comparativa com a qualidade da água, não se tendo, no entanto, verificado que os locais com maiores concentrações na água, da maioria dos parâmetros analisados, correspondiam às localizações com os sedimentos mais contaminados. Tal poderá ser justificado por fenómenos de transporte dentro da albufeira (tendo em consideração as fontes de contaminação identificadas) e devido às diferentes naturezas geológicas dos sedimentos depositados. Também foi possível comparar os resultados obtidos com estudos anteriores relativos à albufeira de Venda Nova, embora com algumas limitações devido aos poucos parâmetros analisados no passado ou às frações analisadas. Finalmente, procedeu-se à classificação da qualidade dos sedimentos de acordo com as normas de Ontário (Ministry of the Environment, 2011) e canadianas (CCME, 2002).

Globalmente, apesar das dificuldades encontradas na quantificação e análise da distribuição de sedimentos, o trabalho realizado para o estudo da sedimentação na albufeira de Venda Nova permitiu uma caracterização do estado em 2004 da ribeira de Amiar e a análise da evolução temporal da morfologia desta secção da albufeira, com base em dados (levantamentos batimétricos) já existentes. Para a secção principal da albufeira, e considerando que já decorreram mais de 10 anos desde o último levantamento (parcial), seria importante proceder-se a um novo levantamento batimétrico de toda a albufeira e à comparação deste com os dados já tratados, para uma avaliação completa. As metodologias de amostragem e análise da qualidade dos sedimentos demonstraram-se praticáveis e que da sua aplicação resultam dados relevantes para a melhor compreensão dos fenómenos de sedimentação e distribuição de contaminantes na albufeira, particularmente quando analisados conjuntamente com dados de levantamentos batimétricos, dados da qualidade da água e estudos prévios.

4. Medidas de proteção e operacionais de adaptação e mitigação dos efeitos da sedimentação em albufeiras

Com a evolução da investigação sobre os processos de sedimentação em albufeiras, sobretudo a partir da década de 1980 (Schleiss et al., 2016), começaram a ser concebidas medidas de proteção e operacionais de adaptação e mitigação dos efeitos da sedimentação em albufeiras. Essas medidas correspondem a diferentes respostas à retenção de sedimentos pelas barragens, implementadas ou estudadas em vários países.

- Distribuição de tamanho de partículas;

A classificação dessas medidas pode ser baseada em diversas características como, por exemplo, a zona intervencionada, isto é, se é uma medida adotada na área de drenagem, na albufeira, a jusante ou junto à barragem, tal como inventariado por Boillat et al. (2003). Na Figura 6 consta uma organização alternativa, de acordo com os objetivos específicos de 1) reduzir os sedimentos provenientes de montante; 2) favorecer o transporte e minimizar a deposição dos sedimentos; 3) remover ou redistribuir os sedimentos depositados; e 4) implementar estratégias adaptativas (Kondolf et al., 2014; Annandale et al., 2016).

Os dois primeiros grupos de medidas (1.1, 1.2, 2.1 e 2.2 - ver Figura 6) incidem na origem do problema uma vez que: os do primeiro grupo atuam sobre a quantidade de sedimentos provenientes de montante que serão parcialmente retidos pela barragem ou que podem causar danos no circuito hidráulico; e os do segundo grupo promovem o transporte sedimentar de forma a que os sedimentos que dão entrada na albufeira não se depositem. Embora, numa hipotética hierarquia de medidas, estes grupos apresentem consideráveis vantagens na promoção da sustentabilidade da barragem em relação às medidas do grupo 3 (remoção ou redistribuição dos sedimentos depositados) ou do grupo 4 (estratégias adaptativas), também apresentam algumas desvantagens. Isto porque, apesar da redução da produção de sedimentos a montante reduzir a sedimentação numa albufeira, tal não resolve, no entanto, o problema da carência de sedimentos que se poderá verificar a jusante da barragem. Em paralelo, as estruturas de retenção de sedimentos necessitam de manutenção para continuarem a cumprir o seu propósito e não potenciam outros problemas ou, simplesmente, deslocalizarem-nos. Os túneis e canais de *bypass* de sedimentos, que têm sido sobretudo usados no Japão e na Suíça, são economicamente de difícil aplicação apesar de serem alvo de diversos estudos nas duas últimas décadas e de se apresentarem como promissores. Por sua vez, o conceito de albufeiras *offstream* é interessante quando se equaciona uma nova barragem, mas não resolve os problemas de sedimentação das albufeiras já existentes.

A libertação de sedimentos para jusante, por *sluicing*, *flushing* ou através da passagem de correntes de turbidez, tanto com o objetivo de reduzir os sedimentos depositados como para remover ou redistribuir os sedimentos na albufeira, leva à descarga, num curto período de tempo, de caudais sólidos para jusante. Apesar destas medidas terem várias vantagens comparativamente a outras por contribuírem periodicamente para a manutenção da continuidade fluvial de transporte sedimentar, também potenciam diversos impactes negativos (como referido em 2.1.2.). São, por isso, medidas complexas que requerem um estudo profundo e planeamento detalhado para que os correspondentes impactes ambientais e socioeconómicos sejam minimizados.

As medidas de escavação mecânica, nomeadamente as que levam à remoção dos sedimentos já depositados por dragagem ou por escavação a seco, e o *flushing* permitem recuperar a capacidade de armazenamento perdida devido à sedimentação. No entanto, levantam importantes questões relativamente a potenciais impactes ambientais e, no caso da escavação mecânica, à finalidade a dar aos sedimentos. Os sedimentos extraídos podem ser devolvidos ao sistema a jusante da barragem ou serem usados para outros fins (e.g. alimentação artificial de praias). É importante ter em consideração o grau de contaminação antes da extração dos sedimentos e, se necessário, proceder a uma seleção das granulometrias e/ou um tratamento de descontaminação antes de os sedimentos voltarem a ser reintroduzidos. De salientar que, no caso de Portugal, a finalidade dos sedimentos removidos está limitada pelas estipulações legais relativas às características dos materiais dragados, definidas na Portaria n.º 1450/2007, de 12 de novembro.

Finalmente, as estratégias adaptativas consistem em medidas que não envolvem uma gestão dos sedimentos, ao contrário das medidas anteriormente expostas. Em albufeiras de usos múltiplos, uma das medidas adaptativas poderá consistir em adequar a capacidade e o armazenamento alocados aos diferentes usos e melhorar a eficiência de controlo de cheias através da otimização das regras de exploração da albufeira (e.g. incorporando a previsão em tempo real das afluições à albufeira) (Annandale et al., 2016; Mendes, 2017). Por

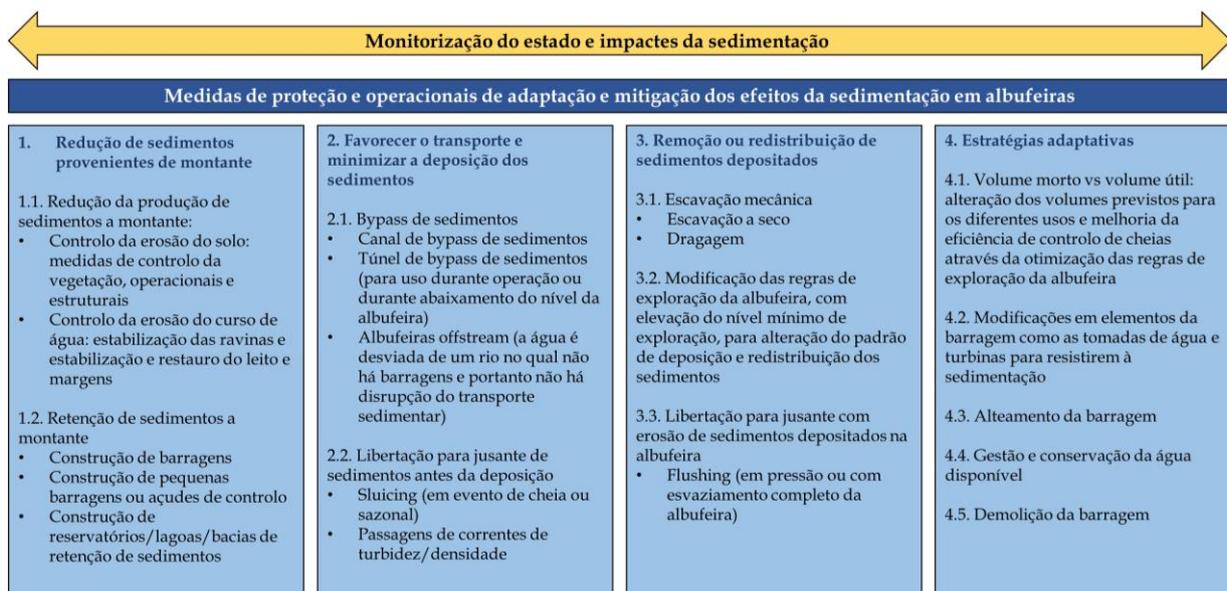


Figura 6. Resposta à sedimentação em albufeiras através de medidas de adaptação e mitigação (adaptado de Annandale et al., 2016)

exemplo, considerando que a sedimentação pode estar a afetar mais intensamente o volume previsto disponível para abastecimento de água, pode recuperar-se o “volume perdido” (ocupado por sedimentos), através da redução do volume de armazenamento reservado para o controlo de cheias. Outras estratégias adaptativas passam por modificações em elementos da barragem, o alteamento da barragem e uma mais eficiente gestão da água armazenada. A demolição de uma barragem devido à sedimentação é uma possibilidade quando não se antevê que seja viável prolongar o seu tempo de vida útil, devido a elevados custos de manutenção ou porque os benefícios que a barragem origina não o justificam. Apesar disso, independentemente do motivo que leve à demolição, esse processo leva à necessidade de analisar os sedimentos que estão acumulados na albufeira e determinar qual deverá ser o seu fim.

Em Portugal, não existindo planos de gestão de sedimentos em vigor para as albufeiras nacionais, o principal mecanismo de defesa contra a sedimentação tem sido a reserva do volume previsto, em fase de projeto, para acumulação de sedimentos durante o tempo de vida útil da barragem - o volume morto. No entanto, a deposição de sedimentos não se dá exclusivamente abaixo do nível mínimo de exploração, afetando frequentemente o volume útil, isto é, o volume destinado a armazenar água para produção de energia elétrica e/ou para abastecimento. Por isso, e considerando os efeitos da disrupção do trânsito sedimentar no rio e a hipótese de prolongar o tempo de vida útil das barragens existentes em Portugal, o volume morto é, em geral, insuficiente para dar resposta à sedimentação em albufeiras. Torna-se, portanto, cada vez mais relevante o desenvolvimento de planos de gestão de sedimentos, para as bacias hidrográficas nacionais, que deverão resultar da conjugação das várias medidas enunciadas, e continuamente estudadas, e ser adaptados de acordo com os resultados da frequente monitorização do estado e impactes da sedimentação nas albufeiras e troços fluviais adjacentes.

Algumas intervenções mais recentes, como é caso dos reforços de potência de Venda Nova: Venda Nova II e III (também denominadas por Frades I e II), já incluem nos respetivos circuitos hidráulicos bacias de desassoreamento (desarenadores). Estas bacias têm como função reduzir o trânsito sedimentar que consegue chegar às máquinas hidráulicas (turbinas-bombas, em Frades) do aproveitamento hidroelétrico, diminuindo assim a sua abrasão e, consequentemente, evitando custos superiores de manutenção. No caso de Venda Nova, e sendo que os túneis dos circuitos hidráulicos têm troços não revestidos, as bacias de desassoreamento destinam-se a reter os sedimentos destacados do circuito hidráulico e material sedimentar com origem nas zonas de captação. O seu funcionamento baseia-se no alargamento da secção transversal do túnel de carga numa determinada extensão antes da central que, em função das características definidas em projeto, leva à diminuição da velocidade da corrente e à deposição de sedimentos de granulometrias pré-estabelecidas. Quando essas estruturas não têm dispositivos específicos de descarga de sedimentos, como é o caso, torna-se necessário o esvaziamento do circuito hidráulico para remover o material acumulado perante uma eventual colmatação da bacia.

Um das medidas que se considera que apresenta elevado potencial para gestão de sedimentos em Portugal é a utilização de descarregadores auxiliares, como os descarregadores de fundo, para a libertação de sedimentos para jusante com o objetivo específico de favorecer o transporte sedimentar e minimizar a deposição. É necessário, no entanto, aprofundar o estudo da aplicação destas operações em barragens portuguesas, nomeadamente as condições em que devem ser realizadas e a adequação dos dispositivos existentes para tal, assim como proceder à minimização dos impactes negativos que potenciam na albufeira e a jusante. Refere-se que, nas regras de exploração incluídas no projeto da barragem de Foz Tua foi preconizada a abertura total da descarga de fundo (com capacidade de vazão de 200 m³/s) sempre que os caudais afluentes sejam superiores a 600 m³/s (valor previsto ser igualado ou excedido, em média, 2 dias por ano). Isto após a análise dos dados das estações hidrológicas e sedimentológicas e recorrendo a estimativas obtidas com a Equação de Fournier, a Equação Universal de Perda de Solo, as curvas de eficiência de retenção de Brune e o método empírico de Borland e Miller (revisto por Lara). Tal estudo foi realizado no âmbito do Relatório de Conformidade Ambiental do Projeto de Execução do Aproveitamento Hidroelétrico de Foz Tua (Chinita et al., 2010) com vista à proposta de medidas de redução das alterações no transporte sedimentar devido à construção da barragem.

5. Conclusões

Com base no levantamento dos possíveis efeitos da sedimentação em albufeiras que têm sido identificados em vários países, é evidenciada a importância do estudo da sedimentação nas albufeiras portuguesas, a necessidade da conjugação de várias áreas do saber e a cooperação entre diversas entidades, devido à complexidade desses estudos.

Perante o desconhecimento do estado de sedimentação e dos efeitos que tal acarreta na maioria das albufeiras em território nacional, desenvolveu-se uma metodologia de monitorização da sedimentação em albufeiras portuguesas que se pretendeu que fosse aplicável a qualquer albufeira e que acompanhasse os desenvolvimentos que têm ocorrido nesse domínio. A sua aplicação, ainda que parcial, à albufeira de Venda Nova, revelou algumas das dificuldades que podem ser encontradas neste tipo de estudos, mas também que é uma metodologia praticável e com resultados pertinentes e necessários para a correta gestão das albufeiras e no suporte à tomada de decisão.

Uma importante linha de trabalho a desenvolver em Portugal passa pelo estudo da viabilidade da aplicação da combinação de algumas medidas de proteção e operacionais de adaptação e mitigação dos efeitos da sedimentação em albufeiras, com vista ao desenvolvimento de planos de gestão de sedimentos. Das várias medidas que têm sido implementadas e estudadas internacionalmente, destaca-se o estudo da viabilidade da utilização de descarregadores auxiliares para libertação de sedimentos para jusante, com o objetivo de favorecer o transporte sedimentar e minimizar a deposição, como uma das investigações mais promissoras a estudar futuramente em Portugal.

Agradecimentos

O presente artigo resulta principalmente do trabalho desenvolvido no âmbito da dissertação de mestrado em Engenharia do Ambiente da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto intitulada de “Sedimentação em albufeiras: efeitos e medidas mitigadoras. O caso de estudo de Venda Nova”, que foi realizada em ambiente empresarial na Direção de Sustentabilidade da EDP Produção em 2016. O prosseguimento desse trabalho foi possível com uma bolsa de investigação na Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente do Departamento de Engenharia Civil da FEUP.

Referências

- Álvares, M. T., Fernandes, S., Mariano, A. C., & Pimenta, M. T. (2000). Monitorização Batimétrica para Gestão de Albufeiras: Estudo Piloto. IX *Silubesa*, (1), 8.
- Álvares, M. T., Fernandes, S., Mariano, A. C., & Veríssimo, M. R. (2001). *Plano de Trabalhos para Execução de Levantamentos Batimétricos nas Albufeiras da Rede Sedimentológica*.
- Annandale, G. W., Morris, G. L., & Karki, P. (2016). *Extending the Life of Reservoirs: Sustainable Sediment Management for Dams and Run-of-River Hydropower*. The World Bank. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-0838-8>
- Boillat, J.-L., Oehy, C., & Schleiss, A. (2003). Reservoir Sedimentation Management in Switzerland. Em *The 3rd World Water Forum, Challenges to the Sedimentation Management for Reservoir Sustainability* (pp. 143–158).
- Brignoli, M. L., Espa, P., & Batalla, R. J. (2017). Sediment transport below a small alpine reservoir desilted by controlled flushing: field assessment and one-dimensional numerical simulation. *Journal of Soils and Sediments*. <https://doi.org/10.1007/s11368-017-1661-0>
- Cardoso, J. C. (1986). *Estudo do assoreamento da albufeira da Venda Nova (Relatório 139/86)*. Lisboa: Ministério das obras públicas, transportes e comunicações/Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Carvalho, N. O., Filizola Júnior, N. P., Santos, P. M. ., & Lima, J. E. F. W. (2000). Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios. Brasília: ANEEL.
- CCME. (2002). *Canadian sediment quality guidelines for the protection of aquatic life: Summary tables. Updated in: Canadian environmental quality guidelines, 1999*. Winnipeg.
- Cerco, C. F. (2016). Conowingo Reservoir Sedimentation and Chesapeake Bay: State of the Science. *Journal of Environment Quality*, 45(3), 882. <https://doi.org/10.2134/jeq2015.05.0230>
- Cerco, C. F., & Noel, M. R. (2016). Impact of Reservoir Sediment Scour on Water Quality in a Downstream Estuary. *Journal of Environment Quality*, 45(3), 894. <https://doi.org/10.2134/jeq2014.10.0425>
- Chinita, A. T., Mendonça, A., Miguel, M. B., & Ramos, A. (2010). *Aproveitamento Hidroelétrico de Foz Tua: Relatório de conformidade ambiental do projeto de execução (RECAPE) (Vol. II-Relat)*.
- Costa, A. L. R. (2004). *O assoreamento das albufeiras das barragens hidroelétricas e a «erosão» das praias*. Universidade do Minho.
- Dai, Z., & Liu, J. T. (2013). Impacts of large dams on downstream fluvial sedimentation: An example of the Three Gorges Dam (TGD) on the Changjiang (Yangtze River). *Journal of Hydrology*, 480, 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.003>
- Decree 08/09/2006, NOR: DEVO0650505A (2006). Paris. Obtido de <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000423497&categorieLien=id>
- Decreto-lei n.º 103/2010. (2010). *Diário da República*, pp. 4289–4296.
- Dzialowski, A. R., Wang, S.-H., Lim, N.-C., Beury, J. H., & Huggins, D. G. (2008). Effects of sediment resuspension on nutrient concentrations and algal biomass in reservoirs of the Central Plains. *Lake and Reservoir Management*, 24(4), 313–320. <https://doi.org/10.1080/07438140809354841>
- Estigoni, M. V., Miranda, R. B., & Mauad, F. F. (2017). Hydropower reservoir sediment and water quality assessment. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 28(1), 43–56. <https://doi.org/10.1108/MEQ-07-2015-0153>
- European Commission. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy, OJ L 327 Official Journal of the European Communities § (2000).
- Frémion, F., Bordas, F., Mourier, B., Lenain, J.-F., Kestens, T., & Courtin-Nomade, A. (2016). Influence of dams on sediment continuity: A study case of a natural metallic contamination. *Science of The Total Environment*, 547, 282–294. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.023>
- Grimardias, D., Guillard, J., & Cattaneo, F. (2017). Drawdown flushing of a hydroelectric reservoir on the Rhône River: Impacts on the fish community and implications for the sediment management. *Journal of Environmental Management*, 197, 239–249. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.096>
- Growns, I., Reinfelds, I., Williams, S., & Coade, G. (2009). Longitudinal effects of a water supply reservoir (Tallowa Dam) on downstream water quality, substrate and riffle macroinvertebrate assemblages in the Shoalhaven River, Australia. *Marine and Freshwater Research*, 60(6), 594. <https://doi.org/10.1071/MF08144>
- ICOLD. (2009). *Sedimentation and Sustainable Use of Reservoirs and River Systems. Draft ICOLD Bulletin*.
- INAG IP. (2006). *Plano Específico de Gestão de Extração de Inertes em Domínio Hídrico para as Bacias do Lima e do Cávado (Relatório final)*. Sintra.
- Juracek, K. E. (2015). The Aging of America’s Reservoirs: In-Reservoir and Downstream Physical Changes and Habitat Implications. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 51(1), 168–184. <https://doi.org/10.1111/jawr.12238>
- Kasich, J., Taylor, M., & Nally, S. J. (2012). *Sediment Sampling Guide and Methodologies*. Ohio.
- Khakzad, H., & Elfimov, V. I. (2015). A Review of Environmental Characteristics and Effects of Dez Dam Flushing Operation on Downstream. *Environmental Practice*, 17(3), 211–232. <https://doi.org/10.1017/S1466046615000198>

- Kondolf, G. M., Gao, Y., Annandale, G. W., Morris, G. L., Jiang, E., Zhang, J., ... Yang, C. T. (2014). Sustainable sediment management in reservoirs and regulated rivers: Experiences from five continents. *Earth's Future*, 2(5), 256–280. <https://doi.org/10.1002/2013EF000184>
- Lei n.º 58/2005 de 29 de Dezembro, Pub. L. No. Diário da República: I série-A, N.º 249 (2005). Portugal. Obtido de http://www.pgdlisboa.pt/leis/lei_mostra_articulado.php?nid=1191&tabela=leis&so_miolo=
- Mariano, A. C., Álvares, M. T., Pimenta, M. T., Fernandes, S., & Veríssimo, R. (2001). *Metodologia para monitorização batimétrica de albufeiras*.
- Mariano, A. C., Álvares, M. T., Pimenta, M. T., Veríssimo, M. R., & Fernandes, S. (2002). *Monitorização batimétrica de albufeiras: albufeira de Campilhas*.
- McWhirter, L., Ward, J., Ewing, A., Sottolare, J., Rheume, E., Ipson, P., ... Dressel, B. (2016). *Environmental Assessment: Paonia Dam Intake Structure Repair*.
- Mendes, J. M. M. (2017). *Previsão e Alerta de Cheias em Bacias Regularizadas. Aplicação ao caso de uma bacia portuguesa*. Universidade do Porto. Obtido de <http://hdl.handle.net/10216/103975>
- Ministry of the Environment. (1997). *Guideline for use at contaminated sites in Ontario*. Ontário.
- Ministry of the Environment. (2011). *Soil, ground water and sediment standards for use under Part XV. 1 of the Ontario Protection Act*. Obtido de <https://www.ontario.ca/page/soil-ground-water-and-sediment-standards-use-under-part-xv1-environmental-protection-act>
- Miranda, M. N. (2016). *Sedimentação em albufeiras: efeitos e medidas mitigadoras. O caso de estudo de Venda Nova*. Universidade do Porto. Obtido de <http://hdl.handle.net/10216/90265>
- Morris, G. L., & Fan, J. (1998). *Reservoir Sedimentation Handbook*. New York: McGraw-Hill Book Co.
- Nikolai, S. J., & Dzialowski, A. R. (2014). Effects of internal phosphorus loading on nutrient limitation in a eutrophic reservoir. *Limnologia - Ecology and Management of Inland Waters*, 49, 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2014.08.005>
- Pearce, A. R., Chambers, L. G., & Hasenmueller, E. A. (2017). Characterizing nutrient distributions and fluxes in a eutrophic reservoir, Midwestern United States. *Science of The Total Environment*, 581–582, 589–600. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.168>
- Persaud, D., Jaagumagi, R., & Hayton, A. (1993). *Guidelines for the Protection and Management of Aquatic Sediment Quality in Ontario*. Ontario.
- Poleto, C. (2014). *Sedimentologia Fluvial: Estudos e Técnicas (Volume 1)*. Porto Alegre: ABRH.
- Popp, A., & Hoagland, K. D. (1995). Changes in benthic community composition in response to reservoir aging. *Hydrobiologia*, 306(2), 159–171. <https://doi.org/10.1007/BF00016832>
- Portaria n.º 1450/2007, Diário da República § (2007). Obtido de <https://dre.pt/application/dir/pdf1sdip/2007/11/21700/0837208382.pdf>
- Rodrigues, R. R. (2001). *Monitorização de Recursos Hídricos no limiar do séc. XXI. INAG/DSRH*.
- Schleiss, A. J., Franca, M. J., Juez, C., & De Cesare, G. (2016). Reservoir sedimentation. *Journal of Hydraulic Research*, 54(6), 595–614. <https://doi.org/10.1080/00221686.2016.1225320>
- Simpson, S. L., & Batley, G. E. (2016). *Sediment quality assessment: a practical guide* (Second edi). CSIRO Publishing. Obtido de <https://publications.csiro.au/rpr/download?pid=csiro:EP165955&dsid=DS1>
- Subcommittee on Sedimentation of ACWI. (consultado em 2017). <https://acwi.gov/sos/index.html>
- UNESCO. (1985). *Methods of Computing Sedimentation in Lakes and Reservoirs*. Paris.
- U. S. Bureau of Reclamation. (consultado em 2017). <https://www.usbr.gov/uc/wca/progact/paonia/index.html>
- Vale, C., Carvalhal, V., Stoker, Z., Oliveira, M. R. L., & Monteiro, M. T. (1980). *Estudos relativos à albufeira de Venda Nova*.
- Veiga da Cunha, L. (1974). *Sedimentos, degradação do ambiente e qualidade da água*. Lisboa.
- Washington State Department of Ecology. (1995). *Summary of Guidelines for Contaminated Freshwater Sediments*. Olympia, Washington.
- White, R. (2001). *Evacuation of Sediments from Reservoirs*. ICE Publishing.
- Wohl, E. (2015). Legacy effects on sediments in river corridors. *Earth-Science Reviews*, 147, 30–53. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.05.001>
- Wojtkowska, M., Bogacki, J., & Witeska, A. (2016). Assessment of the hazard posed by metal forms in water and sediments. *Science of The Total Environment*, 551–552, 387–392. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.073>
- Yang, C. T. (1996). Reservoir Sedimentation. Em *Sediment Transport: Theory and Practice* (pp. 267–314). McGraw-Hill International Editions.
- Zheng, S., Wu, B., Thorne, C. R., & Tan, G. (2015). Case Study of Variation of Sedimentation in the Yellow and Wei Rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(3). <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29HY.1943-7900.0000980>
- Zimmerman, M. J., & Breault, R. F. (2003). *Sediment Quantity and Quality in Three Impoundments in Massachusetts*. Northborough, Massachusetts.