

Adaptação das obras hidráulicas às alterações climáticas

Maria Madalena Moreira e João Corte-Real
Universidade de Évora

Abstract

Resumo

O aumento da temperatura média, a variação da precipitação média e o aumento da frequência de eventos extremos de precipitação são as projecções mais importantes das alterações climáticas (AC) globais. Na região do Mediterrâneo projecta-se um decréscimo significativo da precipitação. As previsões dos impactes das AC nas massas de água são de redução da água disponível e aumento da frequência e intensidade de eventos (de situações extremas (secas e cheias), com importantes impactes ao nível ambiental. Do ponto de vista da Engenharia Hidráulica é importante ter consciência dos potenciais impactes das AC nos recursos hídricos, tendo em conta que no dimensionamento e gestão das obras hidráulicas, quer à escala da bacia hidrográfica quer à escala dos sistemas urbanos de água, não têm sido tomadas em consideração as previsões das alterações dos caudais de dimensionamento e a variação dos consumos ou condições de funcionamento, consequência dos projecções das AC. Este artigo pretende apresentar um conjunto de medidas de adaptação, que é necessário implementar no dimensionamento, exploração e gestão dos sistemas de água. É justificada a necessidade de introdução de um coeficiente de segurança para o dimensionamento de sistemas resistentes às alterações climáticas e a necessidade de rever as regras de exploração e índices de desempenho usados na avaliação dos sistemas de água, assim como na legislação e regulamentação existente. Esta avaliação foi desenvolvida com base nas projecções disponíveis para o sul de Portugal.

Palavras-chave: alterações climáticas, bacia hidrográfica, impactes nos recursos hídricos, medidas de adaptação, obras hidráulicas, sistemas urbanos de água

1. INTRODUÇÃO

De acordo com o Painel Inter-governamental para as Alterações Climáticas (IPCC, 2007a), a temperatura média global à superfície da terra aumentou 0,74°C [0,56°C a 0,92°C] nos últimos 100 anos (1906-2005). Este aumento é superior ao verificado no período de 1901 a 2000 com o valor de 0,6°C [0,4°C a 0,8°C] (IPCC, 2001). A região do Mediterrâneo tem sido identificada como uma das regiões mais afectadas pelas AC devido à magnitude das variações observadas e projectadas para os padrões de temperatura e precipitação (Giorgi, 2006). Para os diferentes cenários de emissões considerados pelo IPCC Special Report on Emission Scenarios (SRES), projecta-se para as próximas duas décadas um aumento de cerca de 0,2°C por década. A temperatura global na última década do séc XXI, relativamente à temperatura média no período 1980-1999 poderá sofrer um aumento de 0,6°C [0,4°C a 0,8°C] para um cenário de emissões constantes e iguais às emissões em 2000; um aumento de 1,8 [1,1°C a 2,9°C] para o cenário B1 e um aumento de 4°C [2,4°C a 6,4°C] para o cenário A1F1, sendo os maiores aumentos esperados nas latitudes elevadas sobre terra e os nas latitudes baixas, sobre o mar. Vários autores projectaram o aumento da temperatura e decréscimo de precipitação para a região do Mediterrâneo (Gibelin and Déqué, 2003; Giorgi *et al.*, 2004; Raisanen *et al.*, 2004). O clima em Portugal também tem mudado. A temperatura no Alentejo, localizado no sul de Portugal, aumentou nas últimas quatro décadas do século passado tendo-se verificado que a década mais quente também foi a década de 90. Os Verões têm vindo a ficar mais secos e os Invernos menos frios. Relativamente ao padrão de precipitação projectado, calcula-se uma diminuição da precipitação no Mediterrâneo que pode ser superior a 20% e, um aumento da variabilidade temporal e espacial (IPCC, 2007a), o que contribui para uma maior frequência de eventos de precipitação de elevada intensidade, que se têm verificado no Sul de Portugal. Foram analisados eventos meteorológicos extremos, com base em índices obtidos de séries de valores observados. Índices para a temperatura: número de dias em cada ano para os quais a temperatura foi superior a 32°C; número de dias consecutivos em cada ano, para os quais a temperatura foi superior a 32°C (ondas de calor). Índices para a precipitação: período mais longo em cada ano sem precipitação (condições de seca), número de dias em cada ano com precipitação superior a 20mm (condições de cheia). Índices para o vento: número de dias com intensidades de vento superiores a 25m/s (frequência de ventos fortes). Considerando os índices anuais de extremos determinados com base em séries temporais fornecidas por modelos de clima, conclui-se que, até ao fim do século a temperatura média anual aumentará em Portugal continental, com Verões mais quentes e mais secos, Invernos com episódios de precipitação forte e concentrada em períodos curtos.

O ciclo natural da água, com alterações introduzidas pelo ciclo urbano da água, é componente do sistema climático e as projecções indicam que as AC terão um efeito negativo nos recursos hídricos, tal como a redução temporal da estação húmida, secas com maior intensidade e duração, aumento da área afectada pela seca e o aumento do risco de ocorrência de cheias (IPCC, 2007b). O aumento da temperatura média provoca um acréscimo da evapotranspiração, interferindo no ciclo da água. O efeito das AC na variação do escoamento será um reflexo do projectado para a variação da precipitação (Arnell, 1999; Pal *et al.*, 2004). Chiew and McMahon (2002) demonstraram que as alterações das precipitações podem ser ampliadas no escoamento dos rios, calculando a projecção da percentagem de alteração do escoamento relativamente à percentagem de alteração da precipitação e obtendo valores cerca de duas vezes superiores, para bacias hidrográficas em climas húmidos e temperados e cerca de quatro vezes superiores no caso de linhas de água efémeras. Kundzewicz and Parry (2002) destacaram a probabilidade da redução do escoamento, especialmente dos caudais baixos na região Mediterrânea, devido à redução da precipitação e aumento da evapotranspiração de referência.

Os potenciais impactes das AC na disponibilidade de água e no regime dos extremos hidrológicos têm sido muito estudados nos últimos anos, existindo um forte consenso na comunidade científica internacional de que o aquecimento global aumentará a frequência dos eventos meteorológicos e hidrológicos extremos (Boorman and Sefton, 1997; Panagoulia and Dimou, 1997; Gellens and Roulin, 1998; Prudhomme *et al.*, 2003). Destacam-se, ainda, projecções que indicam alteração do período do ano em que ocorrem os extremos hidrológicos. A alteração da frequência e da época do ano em que têm lugar os eventos hidrológicos extremos pode ser uma das mais importantes consequências das AC (Beven, 1993; Jones, 1999). Relativamente às massas de água subterrânea, as projecções indicam alterações dos níveis freáticos (Chen *et al.*, 2004) e do volume e qualidade dos recursos hídricos subterrâneos (Sherif and Singh, 1999; Brouyère *et al.*, 2004; Bloomfield *et al.* 2006; Ranjan *et al.* 2006; Herrera-Pantoja *et al.* 2008).

As ferramentas que existem, actualmente, para o estudo dos impactes das AC nos processos hidrológicos e hidráulicos, ainda envolvem uma certa incerteza. À escala global, os diferentes modelos de circulação global (GCM) produzem diferentes projecções para um dado cenário de AC, levando a resultados muito diferentes dos impactes estimados (Arnell and Reynard, 1996). À escala local, as propriedades físicas das bacias hidrográficas (topografia, características do solo, uso do solo, padrão de precipitação, etc), assim como as alterações a que está sujeita (alteração do uso do solo, construção de barragens, captações e descargas em massas de água, etc.) também contribuem para a variabilidade dos impactes, gerando grandes diferenças regionais da resposta dos sistemas às AC. Por outro lado, existe incompatibilidade entre as escala de tempo dos modelos globais de clima e dos modelos hidrológicos. Os modelos globais de clima não podem simular eventos de precipitação de curta duração e elevada intensidade com a aproximação adequada, pois existe elevada incerteza nas previsões de modelos globais para escalas de tempo inferiores a um mês. Para a modelação de eventos de precipitação-escoamento pode ser interessante aplicar a escala diária e para o estudo de

situações de cheia pode ser necessário o estudo com escala de tempo inferior. Aos resultados mensais dos GCM é feita a aplicação de esquemas de *downscaling* no tempo até chegar a escalas de tempo menores, assumindo que a alteração no valor de precipitação médio mensal é representativo da alteração de precipitação média relativa a intervalos de tempo inferiores (Schreider *et al.*, 1996; Reynard *et al.*, 1998). Alguns autores demonstraram que, no entanto, o resultado da distribuição dos eventos extremos obtida é amortecida, mostrando (como é de esperar) uma variabilidade nos eventos de precipitação extrema inferior à verificada dos valores observados (Prudhomme *et al.*, 2002). A diferença entre as escalas espaciais dos modelos de clima e dos modelos hidrológicos é outra fonte de incerteza. A resolução espacial dos modelos globais é da ordem de 3° na latitude e de 4° na longitude. Os processos hidrológicos têm uma escala que depende do objecto de estudo, mas à escala da BH ou zona urbana, não é compatível com a escala dos modelos. Sendo assim, os GCM não conseguem representar adequadamente o clima histórico à escala local. Nos estudos dos impactes das AC, os resultados dos modelos de clima globais são estatisticamente ou dinamicamente reduzidos à escala local. O *downscaling* dinâmico é feito através de modelos de circulação regionais (RCM) com uma resolução espacial da ordem de 50km x 50 km. Com os resultados dos RCM é possível aplicar *downscaling* estatístico, obtendo factores de escala que permitem determinar as séries de precipitação e temperatura no futuro com base nas séries históricas a nível local (Arnell and Reynard, 1996). No entanto, na aplicação desta metodologia os eventos extremos ficam restringidos às frequências das séries históricas, o que pode ser ultrapassado pela aplicação de geradores estocásticos de tempo, para construir séries diárias locais, consistentes com as históricas num período de referência e, relativas ao futuro (Oelschlagel, 1995; Wilks, 1999; Fowler *et al.*, 2005; Elshamy *et al.*, 2006). Havendo uma passagem da escala global espacio-temporal para uma escala local, as incertezas do modelo vão propagar-se em cada passo do processo. A incerteza dos resultados obtidos pode ser diminuída quando se exploram para os modelos disponíveis todos os cenários de clima alternativos, usando, assim um “ensemble” de simulações. Para o estudo do impacte das AC à escala da bacia hidrográfica, os resultados locais de clima são introduzidos num modelo hidrológico para avaliar as consequências directas na BH ou no sistema urbano de água.

Surgiram alguns trabalhos em que é feita uma aproximação inversa para a modelação das condições de alteração climática e seus impactes, como o exemplo do estudo realizado por Cunderlik *et al.* (2007) que introduziu uma aproximação inversa (“bottom-up”) na modelação do risco de inundação e da vulnerabilidade sob condições de AC. Existindo elevada incerteza das alterações dos parâmetros climáticos, alguns estudos fizeram uma aproximação da incerteza das projecções climáticas através de estudos de sensibilidade da BH à alteração gradual dos parâmetros (Xu and Singh, 2004). Nunes *et al.* (2007) apresentaram uma análise de sensibilidade dos impactes nos recursos hídricos para uma dada amplitude de aumento da temperatura, redução da precipitação e concentração de CO₂, aplicada a bacias hidrográficas localizadas em Portugal.

A resposta às AC pode ter duas vertentes: mitigação e adaptação. Mitigação refere-se a acções que reduzem exposição às alterações, como por exemplo através da regulação ou alterações tecnológicas. Adaptação refere-se ao ajustamento que as populações farão em resposta às alterações verificadas ou projectadas. A mitigação não é suficiente para proteger completamente as populações das alterações mais drásticas e algumas irreversíveis. Com o aumento do conhecimento das alterações têm vindo a aumentar os esforços para diminuir o risco através de medidas de adaptação (Adger *et al.* 2005; Adger *et al.* 2007).

Este estudo tem como primeiro objectivo a identificação da vulnerabilidade às AC através da análise dos resultados dos impactes das AC e a apresentação de medidas de adaptação a introduzir nos sistemas de água de modo a reduzir os efeitos desses impactes. A adaptação é uma prática da Natureza que se ajusta às novas situações. No entanto, a adaptação pode ser imposta às sociedades e infra-estruturas por alterações externas indesejáveis. Os esforços para responder a estas alterações envolve a redução da vulnerabilidade e intensifica a capacidade de adaptação, aumentando a resiliência das pessoas e estruturas (Nelson *et al.* 2007). Neste trabalho pretende-se analisar as adaptações que naturalmente decorrem das alterações verificadas ou projectadas para o futuro e as necessárias medidas de adaptação a implementar.

Na próxima secção faz-se uma análise dos impactes projectados para diferentes obras hidráulicas, seguida de uma reflexão sobre a necessidade de medidas de adaptação e apresentação dessas medidas. Na última secção são resumidos os resultados e apresentadas as necessidades de investigação neste domínio.

2. IMPACTES DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS NAS OBRAS HIDRÁULICAS

Para a definição das medidas de adaptação às AC é necessário conhecer a vulnerabilidade dos sistemas, ou seja a susceptibilidade dos sistemas às perturbações determinada pela sua exposição, a sua sensibilidade e capacidade de adaptar. O conceito de vulnerabilidade está fortemente associado ao conceito de resiliência dos sistemas que representa a capacidade do sistema, sujeito a uma dada acção, manter as mesmas funções e estrutura.

As medidas de adaptação a propor dependem da localização dos sistemas em estudo, para o que devem ser previstos resultados de modelos de clima à escala local, que integrados nos modelos fisicamente baseados da modelação dos sistemas de água permite concluir sobre os impactes das AC em sistemas de água.

Neste trabalho são apresentadas os efeitos das AC nas obras hidráulicas, a duas escalas diferentes: a escala da bacia hidrográfica e a escala urbana. São também estudados os efeitos das AC no comportamento humano como

utilizador das obras hidráulicas. O aumento de temperatura, projectado para o futuro, implicará o aumento de consumo doméstico de água (capitação). O efeito conjunto do aumento de temperatura média e diminuição de precipitação média, projectado para o futuro, aumenta o deficit hídrico das culturas, aumentando a dotação de rega necessária. Para maiores temperaturas é mais premente a instalação e utilização de aparelhos de arrefecimento do ar, aumentando o consumo de energia. Por outro lado as indústrias que dependem de sistemas de refrigeração com utilização de água exigirão maior consumo de energia. Este aumento de energia pode corresponder a um aumento indirecto de consumo de água para uma fonte hidroeléctrica. Do ponto de vista do sector turístico, em Portugal ao aumento de temperatura no Verão pode corresponder uma diminuição de turistas, mas compensado pelo aumento do número de turistas nas outras estações do ano, correspondendo a uma maior distribuição do turismo ao longo do ano. As actividades ligadas ao turismo como: os campos de golf exigem elevado consumo de água para a sua manutenção; desportos aquáticos em albufeiras que obrigam a manutenção do nível de água entre dados limites, obrigando a uma gestão integrada dos vários usos da água disponível na albufeira; entre outras.

A análise dos efeitos das AC à escala da bacia hidrográfica, permite concluir que o aumento de temperatura tem como consequência o aumento da evapotranspiração de referência, que em conjunto com a diminuição da precipitação média e com uma análise conceptual do balanço hidrológico permite concluir sobre o aumento da perda potencial da água do solo e por isso a diminuição do teor de água no solo. Nos períodos húmidos do ano a evapotranspiração real mantém-se, mas nos períodos secos que serão mais prolongados a evapotranspiração real diminui. Podemos, então, concluir que o superávit de água diminui e o déficite aumenta. Com a diminuição do superávit diminui também o escoamento superficial e a recarga dos aquíferos. Verifica-se, assim, uma diminuição da disponibilidade de água para abastecimento do consumo urbano, industrial ou irrigação e geração de energia em centrais hidroeléctricas. Por outro lado, o volume útil de albufeiras dimensionado para um hidrograma de água afluente, evaporação a partir do espelho de água e um hidrograma de necessidade de água, estará sub-dimensionado para o ano horizonte de projecto, tendo em conta que o caudal afluente diminui, a evaporação do espelho de água aumenta e o consumo aumenta. O aumento da temperatura também poderá diminuir a qualidade da água nos reservatórios e rios obrigando a maior custo do tratamento, por outro lado reduz o oxigénio dissolvido apresentando menor capacidade de recuperação. A análise combinada de diferentes cenários de AC aplicados à região do Alentejo em Portugal, permitiu concluir que o aumento da temperatura e diminuição da precipitação média apontam para a redução do escoamento com a provável consequência do aumento da irregularidade no regime de escoamento (Nunes *et al.*, 2007).

Do ponto de vista de situações meteorológicas extremas, a projecção do aumento da frequência de precipitações mais intensas implica a diminuição do período de retorno do caudal de dimensionamento das obras hidráulicas construídas na linha de água com consequências na diminuição do ano horizonte para o qual essas obras foram dimensionadas. Como exemplo de elevada importância e com consequências na segurança de pessoas e bens, menciona-se o descarregador de cheia de uma barragem. No caso de obras de regularização de um troço de uma linha de água, aumenta a probabilidade de ocorrência de situações em que o leito do rio não tem capacidade de transporte suficiente, provocando a inundações dos terrenos adjacentes. Aumentando os períodos de seca, aumentará a probabilidade de situações de ocorrência de precipitações de elevada intensidade, após um período de seca, além de aumentar a poluição das massas de água pelo arrastamento e lavagem dos terrenos adjacentes às linhas de água, aumenta o caudal de ponta de cheia pela diminuição da capacidade de infiltração do solo e diminui a capacidade de transporte das linhas de água aumentando a probabilidade de situações de extravasamento do leito normal. A ocorrência de maiores períodos sem precipitação também tem consequência a nível da recarga dos aquíferos; se não existir superávit não existirá recarga e por outro lado continua a haver descarga dos aquíferos no caso de rios perenes para satisfação do escoamento de base (Beven, 2000).

À escala urbana, com interesse na análise dos efeitos das AC no ciclo urbano da água, se aumenta o consumo urbano de água é necessário captar maior volume de água que no caso de se tratar de uma captação por bombagem implica um aumento de energia consumida. Ao transporte de maior caudal captado corresponde maior velocidade na conduta adutora, menor eficiência na estação de tratamento de água, maior consumo de reagentes necessários ao tratamento da água e maior velocidade nas condutas do sistema de distribuição. O aumento da velocidade na adutora aumentará as sobrepensões e subpensões verificadas aquando da manobra de uma válvula ou paragem e arranque da bomba, tornando-se mais frequente as roturas por golpe de aríete. Também as condutas que constituem a rede de distribuição sofrerão os mesmos inconvenientes quando ocorre o escoamento transitório. Será reduzido o ano horizonte dos sistemas de abastecimento de água, que são dimensionados para 40 anos. Os sistemas de drenagem das águas usadas podem ser separativos ou unitários. Normalmente os sistemas separativos comportam-se como pseudo-separativos por existirem ligações ilícitas de águas pluviais ao coletor de águas residuais. Os sistemas de drenagem de águas residuais domésticas com caudais de dimensionamento dependentes dos caudais abastecidos são dimensionados para escoamento em superfície livre. Para maiores caudais drenados, aumenta a altura da veia líquida e a probabilidade de entrada em pressão com a consequente ocorrência de inundações com risco para a saúde pública. Os colectores separativos de águas pluviais, tornam-se mais vulneráveis à ocorrência de inundações por aumento das precipitações intensas. Relativamente aos sistemas de drenagem unitários ou pseudo-separativos, o aumento dos caudais pluviais reflecte-se no aumento da frequência de situações de descargas de excedentes, com risco de saúde pública que daí pode resultar. Este é um dos problemas mais importantes do ponto de vista de qualidade dos meios receptores. O aumento dos caudais

afluentes à estação de tratamento de águas residuais (ETAR) implica redução da eficiência de tratamento, com consequência para a qualidade das massas de água que são os meios receptores dos efluentes das ETARs. O fenómeno de *flash flooding* que se caracteriza pela ocorrência de uma precipitação muito intensa após um período prolongado de seca, provoca o aumento da concentração de sólidos totais e de matéria orgânica por lavagem de ruas e condutas, aumentando a carga afluente à ETAR e por isso redução da qualidade do seu efluente. Em períodos de seca prolongados verifica-se deposição de material que será arrastado no primeiro evento de precipitação intensa.

3. MEDIDAS DE ADAPTAÇÃO ÀS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS DAS OBRAS HIDRÁULICAS

Adaptação é o processo de alteração deliberado em antecipação a, ou em reacção a, estímulos ou pressões externas (Nelson *et al.* 2007). É, assim, um processo de tomada de decisão e o conjunto de medidas para manter a capacidade de resposta às alterações verificadas ou projectadas. Adaptação às alterações ambientais é um ajustamento nos sistemas ecológicos, sociais ou económicos em resposta às alterações observadas e projectadas nos parâmetros ambientais e seus impactes, de modo a diminuir os impactes adversos das alterações (Smit *et al.* 2001; Berkhout *et al.* 2006; Smit *et al.* 2006). A adaptação às AC é imperativa pela consciência que existe, actualmente, dos riscos ambientais observados e projectados para o futuro; porque, embora exista incerteza quanto à quantificação das alterações, é conhecida a tendência das alterações e dos seus impactes e porque é reconhecido que as alterações têm causas humanas sejam elas quantificáveis ou não. A urgência da adaptação depende da vulnerabilidade das comunidades. Portugal é um dos países mais exposto ao risco, por se tratar de uma região que já sofre escassez de água. Para identificar as necessárias medidas de adaptação das obras hidráulicas associadas aos meios hídricos é necessário considerar duas aproximações: a análise de medidas de adaptação para redução, a níveis aceitáveis, da vulnerabilidade dos sistemas a riscos específicos e a análise da resiliência dos sistemas, ou seja a sua capacidade de adaptação às alterações mantendo a flexibilidade necessária para responder a alterações futuras. Em Nelson *et al.* (2007) é apresentada uma análise da relação entre as duas aproximações, identificando as suas características de complementaridade. Toda a análise de adaptação reflecte sobre a relação entre características dos sistemas, processos de adaptação e resultados. As características do sistema estão directamente relacionadas com a resiliência do sistema, os processos de adaptação podem ser de dois tipos; transformação (processo que cria um novo sistema) e ajustamento (processo que pretende melhorar os sistemas), os resultados são a medida do nível efectivo de adaptação do sistema.

Há vários tipos de adaptação categorizados pelo seu objectivo, modo de implementação ou pela forma institucional que tomam. As medidas de adaptação a propor devem passar pela aplicação de soluções técnicas alternativas e tomar em consideração as ferramentas disponíveis no sector da água, como seja a existência de instrumentos de económicos previstos na Directiva Quadro da Água. Para que as medidas de adaptação propostas no âmbito das obras hidráulicas tenham sucesso é necessário que sejam integradas com medidas aplicadas a outros sectores relacionados com o uso da água, tais como: o sector agrícola, o sector de produção eléctrica, o sector da navegação, o sector do turismo, assim como tomar em consideração a evolução demográfica e o desenvolvimento tecnológico.

Neste trabalho são identificadas medidas de adaptação que deverão ser implementadas no dimensionamento de sistemas resistentes às AC e medidas de adaptação a integrar na operação e gestão dos sistemas já em serviço.

É necessário que os consumos para os diferentes usos sejam avaliados com base nos cenários de AC. Esta análise pode permitir introduzir um coeficiente local que represente a alteração das captações relativamente às verificadas ou previstas com base nos consumos históricos. Relativamente à dotação de rega das culturas deve ser realizado o balanço hídrico de acordo com as projecções para o futuro dos parâmetros meteorológicos que vão alterar a evapotranspiração de referência. Deve ser definido um coeficiente que represente o aumento da evapotranspiração de referência e a diminuição da precipitação a afectar o valor da dotação de rega de cada uma das culturas. Estes coeficientes, que entram no dimensionamento de sistemas de abastecimento de água para consumo urbano e para rega, devem tomar em consideração as características locais de clima, capacidade de adaptação às novas situações através de comparação com zonas em que já se verificam as condições projectadas para o futuro, em Portugal.

O cálculo do caudal de ponta para dimensionamento do descarregador de cheia de uma barragem ou açude, sistemas de drenagem de águas pluviais, entre outros, recorre às curvas IDF (intensidade, duração, frequência) disponíveis para Portugal e determinadas com base em registos históricos (Brandão *et al.*, 2001). No dimensionamento de novas obras ou na verificação de funcionamento para gestão dos sistemas é necessário que estas curvas sejam afectadas de um coeficiente de AC de modo a considerar o aumento projectado para as situações meteorológicas extremas. Os caudais de ponta devem ser determinados com base em curvas IDF projectadas para o futuro. Com base nas séries de valores diários de precipitação, é possível determinar as I-D-F para duração da chuva da ordem de dias. Para casos de duração da chuva inferiores terá de ser determinado um coeficiente que permita afectar o resultado obtido com as IDF determinadas para as séries históricas. Na gestão de sistemas em serviço é necessário prever o período de retorno para o qual a obra foi dimensionada, com base num cenário de AC, de modo a se prever o risco associado. O período de retorno para o qual foi dimensionado a obra hidráulica será afectado de um factor de redução de período de retorno. O traçado das regiões inundáveis preconizada pela Directiva relativa à Avaliação e Gestão dos Riscos de Inundação, deve tomar em consideração o aumento do caudal de ponta para um dado período de retorno devido aos efeitos das AC. As obras de regularização das linhas de água com definição do leito de cheia devem ser

dimensionadas para o caudal de ponta calculado com base nas curvas IDF projectadas para o futuro e deve ser revisto o período de retorno para a qual a sua capacidade de transporte dá resposta.

Prevedendo-se uma diminuição da disponibilidade de água, à escala da bacia hidrográfica, é necessário implementar medidas que contribuam para a redução da procura de água, como sejam: a implementação do custo real da água, conforme a Directiva Quadro da Água preconiza, a implementação do programa para o uso eficiente da água com relevo para as medidas de redução e controlo de perdas reais de água nos sistemas de abastecimento de água com base em detecção e resolução de problemas de roturas na rede de distribuição e garantia de bom funcionamento dos órgãos de controlo nos reservatórios, assim como o controlo de perdas de água na rega, o maior consumidor de água em Portugal. O nível económico das perdas dos sistemas de abastecimento de água devem, inevitavelmente, mudar e o modelo económico usado para determinar o nível mínimo de perdas de incluir um factor de risco das AC. Devem ser, ainda, implementadas novas soluções de sistemas de distribuição de água em paralelo que prevejam dois sistemas independentes um para água potável e outro para lavagens e rega. O aumento do consumo de água devido ao aumento da temperatura pode ser compensado pela redução de perdas de água nas infra-estruturas de abastecimento.

No balanço da água aplicado à albufeira, em dimensionamento de um sistema resistente às AC ou para definição de regras de operação com base num cenário de AC, todas as parcelas são afectadas por um coeficiente de redução da disponibilidade: diminuição do volume de água afluente, aumento dos consumos, aumento da evaporação, diminuição da precipitação sobre o espelho de água. No caso de uma albufeira multi-utilizações, é necessário definir regras de operação da albufeira com identificação de prioridades no abastecimento, com base na avaliação das consequências de abastecimento parcial ou paragem de abastecimento para um dado uso. Para definição destas regras de operação devem ser estudados os diferentes cenários de AC para as duas situações extremas de secas e cheias.

À escala do ciclo urbano da água é necessário que sejam definidos planos estratégicos para combate à escassez de água, considerando os cenários de AC, definindo as alternativas de origem de água em situação de escassez, devendo ser estudadas alternativas como a reutilização da água e a dessalinização da água do mar. Numa situação intermédia a reutilização pode responder a necessidades como a rega de jardins ou campos de golf, tão frequentes no nosso País. Nos sistemas de drenagem de águas é necessário implementar maior controlo das ligações ilícitas e dimensionamento de tanques de tratamento primário para as descargas de excedentes. A limpeza frequente das ruas pode reduzir a quantidade de sedimentos que se depositam nos colectores. A implementação de regulamentação municipal pode diminuir os efeitos das AC, como seja a obrigatoriedade em zonas urbanas de manter o coeficiente de escoamento, no caso de novas urbanizações ou a obrigatoriedade de estudo integrado das águas pluviais em meio urbano através de soluções de controlo na origem para as águas pluviais. Estas regulamentação diminuirá o caudal afluente ao colector reduzindo a vulnerabilidade do sistema.

Em alguns países, as companhias de seguros estão a começar a considerar explicitamente as AC (e.g. Dlugolecki, 2004).

4. CONCLUSÕES E NECESSIDADE DE INVESTIGAÇÃO

Este estudo mostrou como as massas de água são altamente vulneráveis às alterações da precipitação e da temperatura. Apresentam-se os efeitos das AC em sistemas de água quer à escala da bacia hidrográfica, quer à escala do ciclo urbano da água. São apresentadas medidas de adaptação que permitam reduzir a vulnerabilidade dos sistemas ou aumentar a sua resiliência às AC. Esta análise permitiu concluir sobre a necessidade de investigação em diferentes áreas. É necessário integrar os resultados obtidos com os modelos de clima associados aos modelos hidrológicos fisicamente baseados, à escala da bacia hidrográfica, e aos modelos dos sistemas urbanos de água com a reacção do homem às alterações ao longo do tempo, ou seja a introdução nos modelos dos processos socio-económicos, (ex: Adger, 2006). É provável que a diminuição de produtividade leve os agricultores a substituir as culturas por outras mais sustentáveis, sendo importante a investigação sobre culturas alternativas e a avaliação do efeito da alteração do uso do solo em Portugal. As alterações dos eventos hidrológicos extremos terão implicações importantes no dimensionamento e operação das futuras estruturas hidráulicas devendo ser introduzidos coeficientes de AC a afectar as IDF. A aplicação dos modelos fisicamente baseados na escala de tempo diária subdimensiona o escoamento relativo a elevadas intensidade de precipitação, pelo que é necessário determinar uma relação entre as IDF para duração da precipitação à escala diária para as IDF com duração inferior. As AC desafiarão os planos de gestão dos recursos hídricos existentes afectando-os de incerteza adicional, pelo que devem ser previstas metodologias de avaliação da capacidade de resposta dos sistemas hídricos com o efeito das AC. Muitas das medidas de adaptação propostas exigem legislação e regulamentação para a sua implementação, pelo que será necessário que legislação em vigor seja revista de modo a introduzir os efeitos das AC. É exemplo a recente Directiva relativa à Avaliação e Gestão dos Riscos de Inundação. Relativamente aos planos de gestão dos riscos de inundação defende que devem ter em consideração os efeitos prováveis das AC na ocorrência de inundações. Não faz, no entanto, referência ao modo como devem ser tomadas em consideração as AC. É necessário desenvolver uma metodologia a aplicar nos planos de gestão dos riscos de inundação e nos planos de gestão das regiões hidrográficas previstos na Directiva Quadro da Água.

Bibliografia

- Adger WN, Arnell NW, Tompkins EL. 2005. Successful adaptation to climate change across scales. *Glob. Environ. Change* 15:77–86
- Adger WN. 2006. Vulnerability. *Global Environmental Change — Human and Policy Dimensions* 16(3): 268 – 281.
- Adger WN, Agrawala S, Mirza M, Conde C, O'Brien K, et al. 2007. Assessment of adaptation practices, options, constraints and capacity. pp. 717–43 Parry ML, Canziani OF, Palutikof JP, van der Linden PJ, Hanson CE, eds. 2007. *Climate Change 2007: Impacts Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press
- Arnell NW, Reynard NS. 1996. The effects of climate change due to global warming on river flows in Great Britain. *Journal of Hydrology* 183: 397 – 424.
- Arnell NW. 1999. Climate change and global water resources. *Global Environmental Change* 9: S31 – S49.
- Berkhout F, Hertin J, Gann DM. 2006. Learning to adapt: organisational adaptation to climate change impacts. *Clim. Change* 78:135–56
- Beven K. 1993. Riverine flooding in a warmer Britain. *Geographical Journal* 159(2): 157 – 161. 9(2): 71 – 78.
- Beven K. 2000. *Rainfall-Runoff Modelling — The Primer*. John Wiley & Sons: Chichester.
- Bloomfield JP, Williams RJ, Gooddy DC, Cape JN, Guha P. 2006. Impacts of climate change on the fate and behaviour of pesticides in surface and groundwater — a UK perspective. *Science of the Total Environment* 369: 163 – 177.
- Boorman DB, Sefton CEM. 1997. Recognizing the uncertainty in the quantification of the effects of climate change on hydrological response. *Climatic Change* 35: 415 – 434.
- Brandão C, Rodrigues R, Costa JP. 2001. Análise de fenómenos extremos. Precipitações extremas em Portugal Continental, INAG.
- Chen Z, Grasby SE, Osadetz KG. 2004. Relation between climate variability and groundwater levels in the upper carbonate aquifer, southern Manitoba, Canada. *Journal of Hydrology*, 290: 43 – 62.
- Chiew FHS, McMahon TA. 2002. Modelling the impacts of climate change on Australian streamflow. *Hydrological Processes* 16: 1235-1245
- Gellens D, Roulin E. 1998. Streamflow response of Belgian catchments to IPCC climate change scenarios. *Journal of Hydrology* 210: 242 – 258.
- Cunderlik JM, Simonovic SP. 2007. Inverse flood risk modelling under changing climatic conditions. *Hydrological Processes* 21: 563 – 557.
- Dlugolecki A. 2004. *A changing climate for insurance. A summary report for chief executives and policymakers*. Associations of British Insurers.
- Elshamy ME, Wheeler HS, Gedney N, Huntingford C. 2006. Evaluation of the rainfall component of a weather generator for climate impact studies. *Journal of Hydrology* 326: 1 – 24.
- Fowler HJ, Kilsby CG, O'Connell PE, Burton A. 2005. A weather-type conditioned multi-site stochastic rainfall model for the generation of scenarios of climatic variability and change. *Journal of Hydrology* 308: 50 – 66.
- Gibelin AL, Déqué M. 2003. Anthropogenic climate change over the Mediterranean region simulated by a global variable resolution model. *Climate Dynamics* 20(4): 327 – 339.
- Giorgi F, Bi XQ, Pal J. 2004. Mean, interannual variability and trends in a regional climate change experiment over Europe. II: climate change scenarios (2071 – 2100). *Climate Dynamics* 23(7 – 8): 839 – 858.
- Herrera-Pantoja M, Hiscock KM. 2008. The effects of climate change on potential groundwater recharge in Great Britain. *Hydrological Processes* 22: 73 – 86.
- IPCC, 2007a. *Climate Change: The Physical Science Basis - Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Available at <http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/wg1-report.html>
- IPCC, 2007b. *Climate Change: Impacts, Adaptation and Vulnerability (Summary for Policymakers) - Working Group II Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report*. Available at http://reports.eea.europa.eu/technical_report_2005_1207_144937/en
- Jones JAA. 1999. Climate change and sustainable water resources: placing the threat of global warming in perspective. *Hydrological Sciences Journal* 44(4): 541 – 557.
- Kundzewicz ZW, Parry ML. 2002. Europe. In *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*, McCarthy J, Canziani O, Leary N, Dokken D, White K (eds). Cambridge University Press: Cambridge; 641 – 692.
- Nelson DR, Adger WN, Brown K. 2007. Adaptation to environmental change: contribution of a resilience framework. *Annual Review of Environment and Resources* 32: 395 – 419.
- Nunes JP, Seixas J, Pacheco NR. 2007. Vulnerability of water resources, vegetation productivity and soil erosion to climate change in Mediterranean watersheds. *Hydrological Processes* DOI 10.1002/hyp.6897:.
- Pal JS, Giorgi F, Bi X. 2004. Consistency of recent European summer projection trends and extremes with future regional climate projections. *Geophysical Research Letters* 31: L13202. DOI: 10.1029/GL019836.
- Panagoulia D, Dimou G. 1997. Sensitivity of flood events to global climate change. *Journal of Hydrology* 191: 208 – 222.

- Prudhomme C, Reynard N, Crooks S. 2002. Downscaling of global climate models for flood frequency analysis: where are we now? *Hydrological Processes* **16**: 1137 – 1150.
- Prudhomme C, Jakob D, Svensson C. 2003. Uncertainty and climate change impact on the flood regime of small UK catchments. *Journal of Hydrology* **277**: 1 – 23.
- Raisanen J, Hansson U, Ullerstig A, Doscher R, Graham LP, Jones C, Meier HEM, Samuelsson P, Willen U. 2004. European climate in the late twenty-first century: regional simulations with two driving global models and two forcing scenarios. *Climate Dynamics* **22**: 13 – 31.
- Ranjan SP, Kazama S, Sawamoto M. 2006. Effects of climate and land use changes on groundwater resources in coastal aquifers. *Journal of Environmental Management* **80**: 25 – 35.
- Reynard NS, Prudhomme C, Crooks SM. 1998. The potential impacts of climate change on the flood characteristics of a large catchment in the UK. In *Proceedings of the Second International Conference on Climate and Water, Espoo, Finland, August 1988*. Helsinki University of Technology: Helsinki, Finland; 320 – 332.
- Schreider SY, Jakeman AJ, Pittock AB, Whetton PH. 1996. Estimation of the possible climate change impacts on water availability, extreme flow events and soil moisture in the Goulburn and Ovens basins, Victoria. *Climatic Change* **34**: 513 – 546.
- Sherif MM, Singh, VP. 1999. Effect of climate change on sea water intrusion in coastal aquifers. *Hydrological Processes* **13**: 1277 – 1287.
- Smit B, Pilifosova O. 2001. Adaptation to climate change in the context of sustainable development and equity. In *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. IPCC Working Group II, ed. JJ McCarthy, pp. 877–912. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press
- Smit B, Wandel J. 2006. Adaptation, adaptive capacity and vulnerability. *Glob. Environ. Change* **16**:282–92
- Xu C-Y, Singh VP. 2004. Review on Regional Water Resources Assessment Models under Stationary and Changing Climate. *Water Resources Management* **18**: 591 – 612.