

## Geociências

# Riscos de inundação em bacias regularizadas: Estudo de caso da cheia do rio Mondego, Portugal

Flood risks in regularized watersheds: Case study of the flood in the Mondego River, Portugal

Marcelle Martins Vargas<sup>I</sup> , Gustavo Willy Nagel<sup>II</sup> , Maíra Martim de Moura<sup>I</sup> 

<sup>I</sup> Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, Brasil

<sup>II</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil

## RESUMO

Estudos hidrológicos de cheias em bacias hidrográficas com históricos alarmantes de inundações são de valiosa importância para aplicar metodologias de prevenção e mitigação. Para a cheia de 2001 no rio Mondego, em Portugal, estimou-se 460,1 mm mensal próximo à cidade de Coimbra, gerando grandes prejuízos econômicos e sociais. Esse estudo propôs calcular o Tempo de Retorno (TR) da cheia ocorrida em 2001, utilizando uma metodologia desenvolvida para a análise de risco à inundação em bacias regularizadas. As informações utilizadas nessa análise foram dados de precipitação e nível médio dos reservatórios. Os resultados indicaram que a cheia no rio Mondego, ocorrida em 2001, possui TR de 439,4 anos. A combinação de dados de chuva e de reservatório se mostrou importante para compreender a dinâmica de inundações em uma bacia regularizada. Nesse sentido, a metodologia utilizada neste trabalho pode ser aplicável a qualquer bacia que sofra grande influência de barramentos a montante e com vazões bem regularizadas.

**Palavras-chave:** Tempo de retorno; Bacias hidrográficas; Reservatórios

## ABSTRACT

Hydrological studies of flooding in watersheds with a high hazard of inundation are important for mitigation and prevention methodologies. The Mondego river flooding, which occurred in Portugal in 2001, with 460.1 mm total month precipitation around the city of Coimbra, generated great economic and social losses. This study proposed to calculate the flood Return Period (RP) that occurred in 2001 using a methodology developed for the analysis of flood risk in regularized basins. The information used in this analysis was data of precipitation and reservoir average level. The results showed that the 2001 Mondego River flood has an RP of 439.4 years. The combination of precipitation and reservoir data proved to be important to understand the dynamics of floods in a regularized basin. In this sense, the proposed methodology can be applied to any basin that is heavily influenced by upstream reservoirs.

**Keywords:** Return period; Watersheds; Reservoirs

## 1 INTRODUÇÃO

Avaliar e quantificar os fenômenos inerentes aos riscos de cheias e inundações são importantes para compreender os processos e as variáveis envolvidas, a fim de aplicar as melhores práticas para a mitigação de consequências e atenuação das causas. Deste modo, estudos de eventos históricos de cheias subsidiam a compreensão do problema.

As cheias fluviais são fenômenos de ocorrência comum na Europa, originando grandes prejuízos econômicos. No entanto, a frequência de inundações vem aumentando, uma vez que mais de 50% das cheias reportadas desde 1980 ocorreram a partir do ano 2000 (SILVA *et al.*, 2017, p. 2).

Nesse sentido, estudos acerca do impacto da regularização de bacias hidrográficas em eventos hidrológicos extremos são importantes para compreender a magnitude das mudanças causadas pela regularização, e.g. os estudos de Battala *et al.* (2004) e Vicente-Serrano *et al.* (2017).

Battala *et al.* (2004) realizaram um estudo no rio Ebro e seus afluentes, localizados no nordeste da Espanha, os quais são regularizados por mais de 187 barragens. Os autores verificaram, por meio de uma análise de registro de medições e séries históricas, que houve redução em cerca de 30% na magnitude de inundações, principalmente as vazões de permanência  $Q_2$  e  $Q_{10}$ . Quanto às vazões anuais, os autores não observaram tendências de diminuição, mas a variação de valores de vazão média diária reduziu em grande parte dos casos, haja vista o armazenamento das vazões de inundações de inverno e aumento do escoamento de base no verão para irrigação.

Vicente-Serrano *et al.* (2017) investigaram se houve mudanças no grau de severidade das inundações e secas hidrológicas considerando as últimas seis décadas na bacia do rio Segre, altamente regularizada e localizada no nordeste da Espanha. Os autores utilizaram um conjunto de índices hidroclimatológicos e verificaram que houve uma redução geral na ocorrência de eventos extremos de precipitação e, conseqüentemente, nas vazões, principalmente devido à

regularização da bacia. No entanto, não foram observadas reduções na frequência de cheias extraordinárias. Além disso, as mudanças na gestão de água da bacia, oriundas da intensa regularização, impactaram significativamente a frequência, a duração e o grau de severidade das secas hidrológicas à jusante das principais barragens.

Em janeiro de 2001, na cidade de Coimbra, Portugal, ocorreram níveis excepcionais de precipitação, os quais resultaram em uma vazão elevada na bacia hidrográfica do rio Mondego (BHRM). “A magnitude da vazão regularizada levou a ruptura de diques a jusante de Coimbra e a necessidade de evacuação de pessoas em inúmeras localidades” (SILVA, 2005, p. 99). “Os barramentos foram projetados para atender as diversas demandas de água na região, porém, a principal função foi a regularização fluvial e o controle das cheias” (MARQUES; MENDES; SANTOS, 2005, p. 3), um problema secular em Coimbra.

Mediante ao exposto, este trabalho objetivou definir o tempo de retorno (TR) de superar ou igualar o evento de inundação que ocorreu em janeiro de 2001 na BHRM. A hipótese adotada foi a de que quanto maior a chuva mensal e mais cheios estiverem os reservatórios, pior será o evento de inundação. Ademais, buscou-se utilizar uma metodologia que possa ser aplicada em bacias que possuam rios regularizados, isto é, bacias que além de estarem expostas a eventos extremos de precipitação, possuam mecanismos artificiais de controle de barramentos, os quais podem atenuar ou mesmo impedir que um evento de inundação ocorra a jusante.

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 Caracterização da área de estudo**

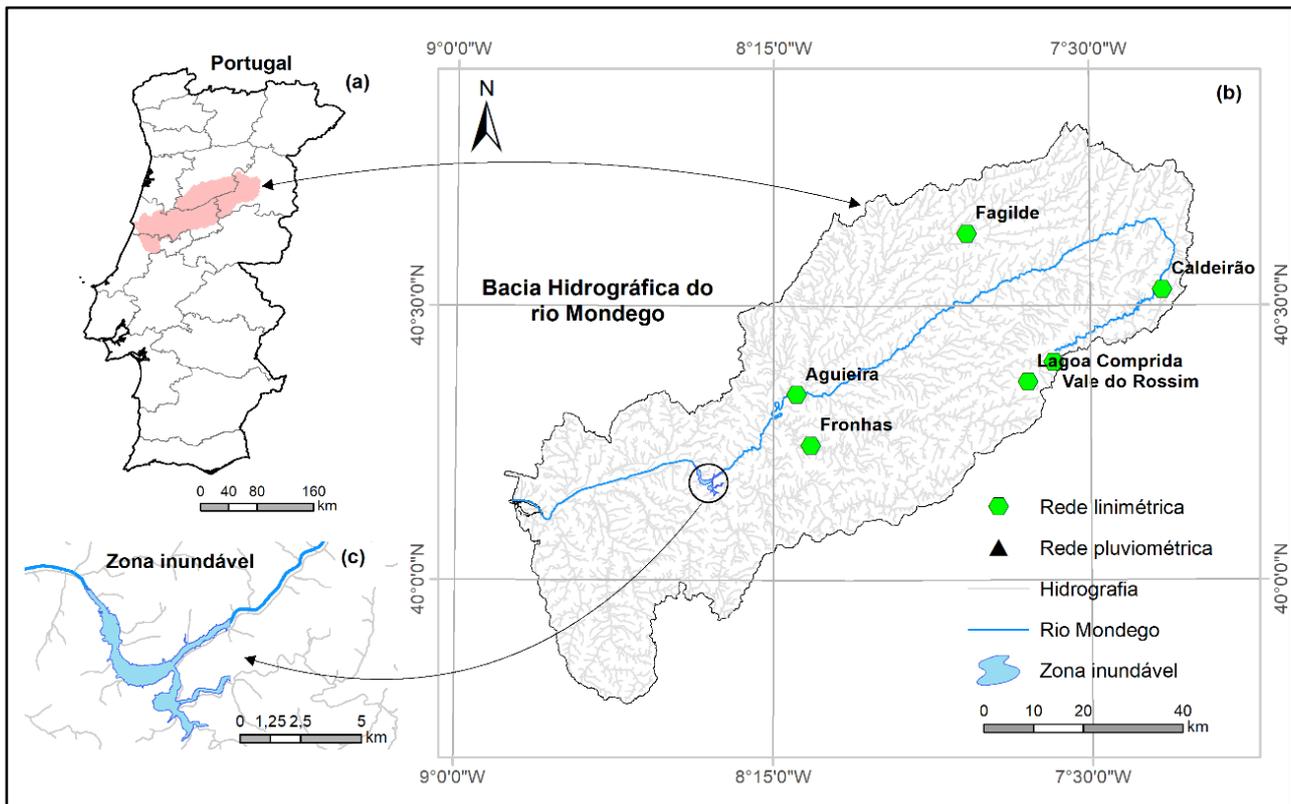
A área de estudo está localizada próximo à cidade de Coimbra, Portugal, a qual possui cerca de 143.396 habitantes (CENSOS, 2011), e está inserida na BHRM, cuja área de drenagem é de cerca de “6.645 km<sup>2</sup>” (SANTOS *et al.*, 2013, p.5). “O rio

Mondego corre, em grande parte do seu curso, num vale muito encaixado, e entra na zona de Coimbra numa bacia aluvionar” (SANTOS *et al.*, 2013, p. 5). Segundo Cunha (2002), o rio Mondego é o maior rio exclusivamente português, desenvolvendo seu curso por cerca de 227 km desde a Serra da Estrela (sua nascente) até a Figueira da Foz, onde deságua no Oceano Atlântico (LOURENÇO *et al.*, 2017). “O clima da BHRM é mesotérmico úmido (Köppen), com estação seca no verão, ao passo que a precipitação anual média varia entre 910 mm, em Coimbra, e 720 mm, em Figueira da Foz” (LOURENÇO *et al.*, 2017, p. 37).

Na figura 1 está apresentada a localização da BHRM, as redes pluviométricas e linimétricas e o trecho inundável, referente ao barramento Açude Ponte Coimbra, definido pelo Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH). A rede de monitoramento, bem como sua espacialização, foram obtidas junto ao SNIRH. Foi considerado o período de 1990 a 2010, por apresentar maior consistência de dados de chuva e de nível.

O tempo de concentração estimado para a BHRM foi de aproximadamente 2,5 horas. Segundo Louro e Lourenço (2005, p. 4), “Bacias pequenas, com baixo tempo de concentração, como a BHRM, estão sujeitas a cheias e inundações rápidas, ocasionadas por chuvas intensas”.

Figura 1 - (a): Localização da bacia hidrográfica do rio Mondego (BHRM) no contexto de Portugal Continental; (b): da rede de monitoramento pluviométrico e linimétrico (reservatórios); e (c): localização da zona inundável próxima à cidade de Coimbra, definida pelo Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH)



Fonte: Autores (2022), elaborado com base em informações do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH) e Sistema Nacional de Informação de Ambiente (SNIAmb)

## 2.2 Contextualização da problemática

“O objetivo da gestão de reservatórios em qualquer bacia é principalmente fornecer água para diversos usos, além de liberar água para os rios” (VICENTE-SERRANO *et al.*, 2017, p. 17).

Neste contexto, o controle de vazões por reservatórios tem se mostrado eficaz para cheias de pequenas dimensões, porém, é pouco eficiente em grandes inundações, haja vista que os reservatórios são capazes de regularizar completamente um valor muito próximo à vazão média do rio (BRAVO, 2006, p. 49).

Além disso, segundo Silva (2005, p. 25), “Um exemplo de prática contra inundações é a manutenção de um nível baixo dos reservatórios em épocas chuvosas com o objetivo de aumentar o amortecimento de cheias a partir da maior capacidade de retenção destes”. No entanto, essa medida pode entrar em conflito com questões socioeconômicas, a partir da diminuição do potencial de produção hidroelétrica e da garantia de disponibilidade de água em possíveis anos secos.

De acordo com Chongxun *et al.* (2008, p. 1), “Cerca de um terço de falhas de barragens no mundo estão relacionadas ao galgamento dessas estruturas”. Em períodos torrenciais, os operadores precisam diminuir o nível d’água artificialmente.

Em decorrência da dificuldade de compreender uma variável tão aleatória e de prever a quantidade de escoamento superficial durante esses eventos chuvosos, os operadores podem liberar uma grande quantidade de água a fim de garantir a segurança dos barramentos (CHONGXUN *et al.*, 2008, p. 1).

“A BHRM registrou a ocorrência de uma série de desastres associados a processos de cheias rápidas e progressivas” (TAVARES *et al.*, 2013, p. 2). “Atualmente, a BHRM é considerada regularizada, principalmente devido às barragens Agueira e de Fronhas, com capacidade total de armazenamento (CTA) de 450 e 89 hm<sup>3</sup>, respectivamente” (SANTOS *et al.*, 2013, p. 5; LOURENÇO *et al.*, 2017, p. 36). “Estas duas barragens foram construídas para regularizar cerca de 80% da vazão a montante” (CUNHA, 2002, p. 5). As barragens de Agueira e Raiva, localizadas no rio Mondego, e Fronhas, localizada no rio Alva, funcionam como um sistema interligado e são as barragens mais a jusante do conjunto de 6 barragens localizadas na BHRM (figura 1). “A gestão dos reservatórios na BHRM é realizada a partir de informações de previsão de chuva para as 24 horas seguintes e em função da vazão média afluente nas 24 horas anteriores”, conforme disposto no site da Ordem dos Engenheiros de Portugal. Essa gestão mitiga ondas de cheias com vazões elevadas. No entanto, em eventos de chuva excepcionais as próprias descargas artificiais realizadas pelas barragens podem ocasionar inundações a jusante.

A principal função da barragem de Aguieira, no controle das cheias em Coimbra e no Baixo Mondego consiste em encaixar os volumes afluentes, de forma a garantir que a vazão de cheia centenária em Coimbra não ultrapasse  $1200 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  (SANTOS *et al.*, 2013, p. 6).

No entanto, no evento de inundação ocorrido em 2001 no rio Mondego, as barragens estavam, em média, com 78,9% de sua capacidade, um nível que limitou o poder de retenção das chuvas.

O pico de cheia mais elevado ocorreu em 26-29 de janeiro de 2001, quando a vazão afluente na barragem de Aguieira, que estava a 75% de sua capacidade, passou de 600 para  $1800 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ , o que resultou em uma descarga fixa de  $1100 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  (CUNHA, 2002, p. 6).

“O escoamento superficial ocorrido no período chegou ao valor de  $1940 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  no barramento Açude de Coimbra” (LOURENÇO *et al.*, 2017, p. 61). De acordo com Alves e Mendes (2014, p. 6), “Se não fosse pelo controle a montante, realizado em particular na barragem da Aguieira, esse valor teria sido de  $2800 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ”. “Porém, mesmo com a atenuação da onda de cheia, além da inundação verificada em Coimbra, os diques do baixo Mondego romperam em 14 localidades, ocasionando alagamento dos campos” (CUNHA, 2002, p. 9).

### **2.3 Modelagem probabilística da precipitação**

Para aumentar a representatividade dos dados de chuva, foi elaborada uma série de precipitação sintética mensal, localizada próxima à zona de inundação (SNIRH) da cidade de Coimbra (figura 1). Essa série foi elaborada a partir da hipótese de que a chuva que ocorreu na zona inundável ou próximo a ela possui maior relevância do que a chuva que ocorreu nas extremidades da bacia. Essa hipótese tem respaldo teórico, pois uma vez no solo, a chuva que chega à bacia pode interagir com a superfície de diferentes formas: infiltrando, permanecendo interceptada na vegetação ou em pequenas depressões do solo, ou escoando sobre a superfície sobre caminhos preferencias, o que pode resultar em inundações.

Para o processamento dos dados de precipitação utilizou-se a chuva total mensal para permitir a interação com os níveis médios dos reservatórios, que também estão em escala mensal. Foi calculada a média da chuva mensal (série sintética) considerando todas as estações pluviométricas na BHRM (figura 2). Para o cálculo, foi adotado o procedimento *Inverse Distance Weight* (IDW) (equação 1), o qual considera que, quanto maior a proximidade de um posto pluviométrico, maior é a sua influência na determinação da variável de interesse, neste caso, a chuva mensal (figura 2a). Para a modelagem probabilística, foi utilizada a série sintética, ou seja, a média ponderada da chuva que ocorreu em janeiro de 2001 na BHRM, cujas lâminas registradas encontram-se na figura 2b.

$$x_p = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^2} \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^2}} \quad (1)$$

Onde:

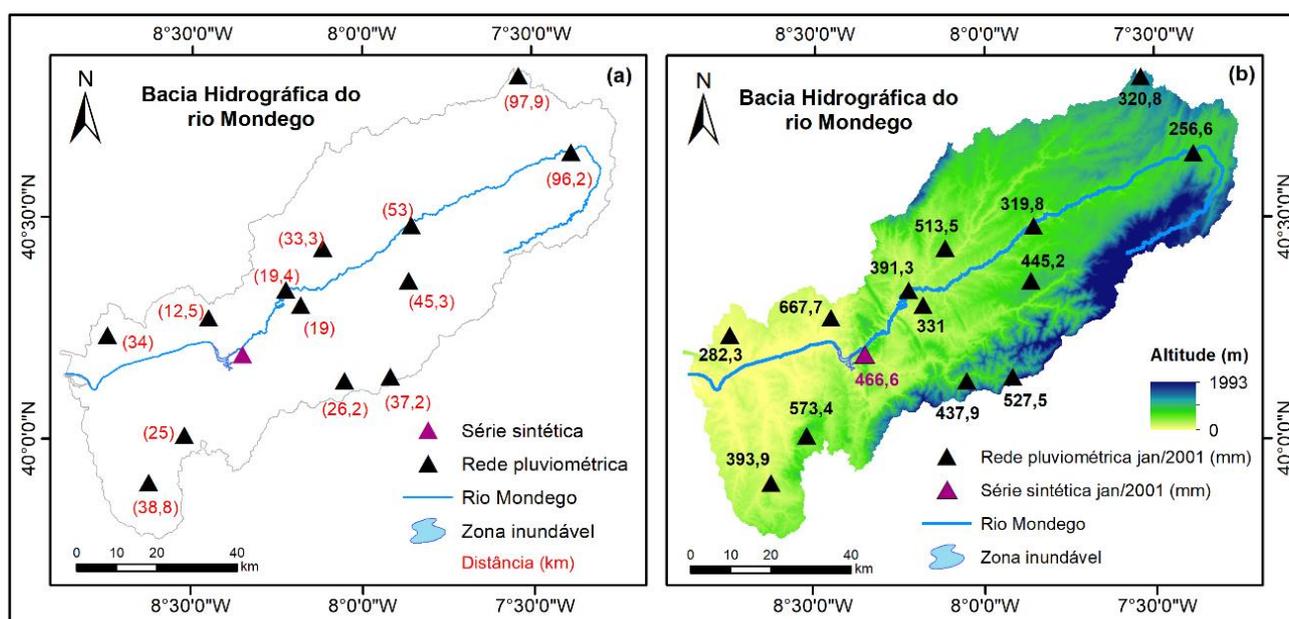
$x_p$  é a variável interpolada;

$x_i$  é o valor da  $i$ -ésima localidade vizinha;

$d_i$  é a distância euclidiana entre o  $i$ -ésimo ponto de vizinhança e o ponto amostrado.

Para o cálculo do IDW, os dados foram considerados de acordo com a disponibilidade mensal de cada ano, ou seja, os pesos de distância de cada posto pluviométrico variaram em concordância com a falta ou presença de dados mensais. Esta consideração culmina em maior consistência para a série sintética calculada.

Figura 2 - Localização dos postos pluviométricos e da série sintética calculada de acordo com a proximidade à zona inundável (SNIRH) na bacia hidrográfica do rio Mondego (BHRM): (a) valores em vermelho correspondem à distância (em km) ao ponto considerado próximo à zona inundável (SNIRH), denominado de série sintética; (b) valores em verde correspondem à precipitação total mensal para janeiro de 2001 (em mm) para os postos pluviométricos considerados neste estudo



Fontes: Autores (2022), elaborado com base nos dados de precipitação mensal (SNIRH, 2021), *shapefiles* das estações pluviométricas e da zona inundável (SNIAMB, 2021) e Modelo Digital de Elevação (UFRGS, 2021)

A partir da série sintética elaborada, foi aplicada a distribuição *Generalized Extreme Value* (GEV). A GEV (equação 2) foi escolhida por se destacar na literatura no âmbito da hidrologia em conjunto com distribuições multiparâmetros (BESKOW *et al.*, 2015; CALDEIRA *et al.*, 2015; CASSALHO *et al.*, 2017). Os parâmetros da GEV foram estimados por meio do Método dos Momentos-L (MM-L) (HOSKING; WALLIS, 1997). O MM-L resulta em estimadores mais robustos, com menor erro quadrado médio e mais fáceis de calcular, quando comparado aos métodos da Máxima Verossimilhança e dos Momentos (ZIN; JEMAIN; IBRAHIM, 2009, p. 3).

$$F = e^{-\exp\left[-\left\{1 - \frac{k(x-\xi)}{\alpha}\right\}^{1/k}\right]} \quad (2)$$

Onde:

$\xi$ ,  $\alpha$  e  $k$  são os parâmetros da função densidade de probabilidades (FDP).

Para verificar a aderência da série à distribuição de probabilidades GEV, recorreu-se ao teste de aderência de Anderson-Darling (AD) (ANDERSON; DARLING, 1954) (equação 3). De forma geral, segundo Beskow *et al.* (2015), “o teste AD é um teste de aderência robusto com ajustes mais satisfatórios, quando comparado a testes qualitativos” (e.g. Kolmogorov–Smirnov). O teste AD foi aplicado ao nível de 5% de significância, isto é, a hipótese de nulidade ( $H_0$ ) a ser testada é de que as frequências observadas poderão ser estimadas pela distribuição de probabilidade.

$$AD = -N - \left(\frac{1}{N}\right) \cdot \sum_{i=1}^N \{[2 \cdot i - 1] \cdot [\text{LN}(P_1) + \text{LN}(P_2)]\} \quad (3)$$

Onde:

$N$  é o número de observações;

$i$  refere-se à posição de plotagem;

$P_1$  é a probabilidade de não excedência do FDP;

$P_2$  é a probabilidade de excedência da FDP.

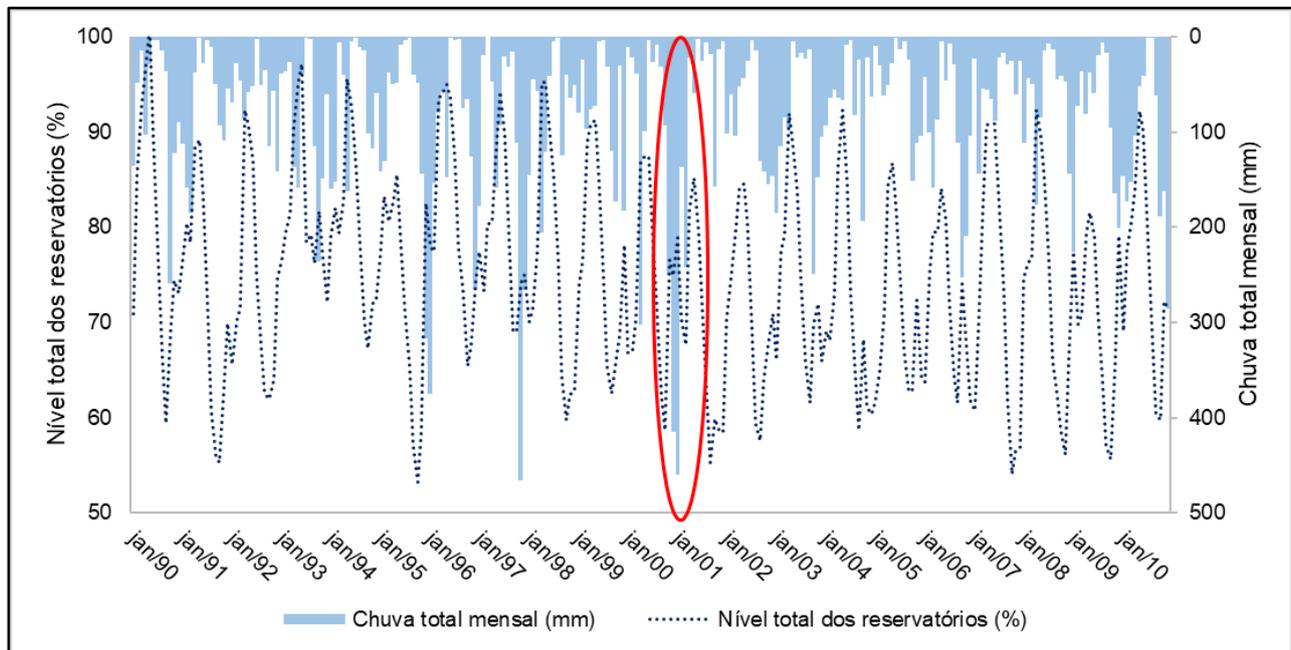
As análises foram realizadas por meio de um *script* implementado em linguagem R utilizando o pacote *Imom* para hidrologia estatística (HOSKING, 2019), e o pacote *gofstest* para o teste AD (FARAWAY *et al.*, 2019). A partir do teste de adequação da GEV à série de precipitação mensal sintética, obteve-se o TR para a precipitação mensal ocorrida em janeiro de 2001 (460,1 mm), especialmente próxima à zona inundável.

## 2.4 Modelagem probabilística dos níveis médios do reservatório

O TR da capacidade média dos reservatórios da BHRM foi calculado para o mês de janeiro de 2001. Utilizaram-se dados mensais, de 1990 a 2010, relativos ao nível médio ponderado pela capacidade total dos reservatórios de Agueira, Fronhas, Fagilde, Caldeirão, Vale do Rossim e Lagoa Comprida (figura 1), adquiridos junto ao SNIRH. A distribuição GEV também foi aplicada para a série de níveis médios e, a partir da confirmação de ajuste por meio do teste de AD, determinou-se o TR para igualar ou superar a capacidade média em que se encontravam os reservatórios em janeiro de 2001 (78,9%).

Pôde-se perceber uma grande dependência entre as variáveis de nível dos reservatórios com as chuvas que ocorreram nos meses anteriores (figura 3). Contudo, para a análise dessas duas variáveis em um mês específico, como o deste estudo, ambas foram consideradas independentes, ou seja, os níveis dos reservatórios, em um primeiro momento, não foram influenciados pela chuva ocorrida no período, mas sim, pelas chuvas que ocorreram anteriormente. Assim, foi possível efetuar a multiplicação de probabilidades de excedência das duas variáveis para se obter um novo TR bivariado que se aproxime da realidade, isto é, aplicar a teoria da distribuição conjunta de probabilidade (equação 4). O TR para um evento de inundação igual ou superior ao que ocorreu em janeiro de 2001 é justamente o resultado da multiplicação das probabilidades das duas variáveis.

Figura 3 – Informações de nível médio dos reservatórios (%), chuva mensal total (mm) de 1990 a 2009 e a cheia histórica de 2001 (marcada em vermelho)



Fontes: Autores (2022), elaborado com base nos dados de precipitação e níveis dos reservatórios (SNIRH, 2021)

$$TR_{\text{bivariado}} = \frac{1}{P_{\text{chuva}} \cdot P_{\text{nível}}} \quad (4)$$

Onde:

$TR_{\text{bivariado}}$  é o TR obtido por meio da aplicação da distribuição bivariada;

$P_{\text{chuva}}$  é a probabilidade associada à chuva de janeiro de 2001;

$P_{\text{nível}}$  é a probabilidade associada aos níveis dos reservatórios de janeiro de 2001.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Mediante o teste de aderência AD, o qual resultou em *p-valor* de 0,059 para a série de chuvas e de 0,746 para a série de níveis dos reservatórios, ao nível de 5% de significância, a GEV se adequou às séries supracitadas. O TR referente à série sintética de precipitação para janeiro de 2001 foi de 151,9 anos. Esse TR corrobora

com Nunes *et al.* (2016, p. 9), os quais indicaram que a “precipitação totalizada em dezembro de 2000 e janeiro de 2001, em Coimbra, corresponde a um período de retorno de cerca de 140 anos”.

O TR obtido, segundo o ajuste da GEV, aos dados de nível médio dos reservatórios foi de 2,9 anos. Apesar dos níveis médios dos reservatórios serem determinados artificialmente, a gestão das barragens é realizada a partir de variáveis hidrológicas que possuem padrões naturais. Isso explica o ajuste da variável de nível médio dos reservatórios a uma distribuição de probabilidades mais robusta.

Quando relacionados os dados dos reservatórios (2,9 anos) com a chuva que ocorreu em janeiro de 2001, 460,1 mm (151,9 anos), o TR da distribuição conjunta de probabilidade resultou em 439,4 anos. Como a hipótese justifica que, tanto a chuva quanto o nível médio dos reservatórios exercem influência sobre as inundações que ocorrem em Coimbra.

A elaboração da série sintética de precipitação em um ponto próximo ao local de inundação, a partir da média ponderada pelo inverso da distância, se mostrou eficiente, e permitiu considerar a chuva de toda a BHRM na análise. A chuva que ocorreu em zonas de montante da BHRM possui forte influência no nível d'água do reservatório e pouca influência em zonas de jusante, neste caso, na zona inundável. Todavia, apesar da baixa influência, pode contribuir para o enchimentos do reservatórios e diminuição do poder de retenção destes. Isso justifica a utilização de todos os dados de chuva presentes na BHRM, porém, com pesos de contribuição diferentes. Os barramentos cumpriram com seu papel mitigador de atenuar as cheias da bacia, pois a precipitação ocorrida em janeiro de 2001, sem as barragens geraria uma inundação de grandes proporções. A construção das barragens, além de atenuar o pico de cheia na data, também aumentou o TR do evento para 439,4 anos, como proposto neste estudo. Para fins de comparação, seria interessante analisar o TR do evento, desconsiderando a influência do barramento, entretanto, essa informação não está disponível.

Ademais, as distribuições de probabilidades e testes de aderência utilizados, confirmaram a acurácia da metodologia. Nesse sentido, com base nos dados apresentados, percebe-se a importância de estudos probabilísticos para inferir sobre TRs para eventos extremos. O estudo da Direcção dos Serviços de Recursos Hídricos, do Instituto da Água, denominado “Hidrologia das Cheias do Mondego de 26 e 27 de janeiro de 2001”, salienta a análise estatística de séries temporais para determinação do seu TR.

Algumas medidas podem ser realizadas para diminuir os impactos negativos de eventos de inundação. “Um exemplo de prática contra inundações é a manutenção de um nível baixo dos reservatórios em épocas chuvosas” (SILVA, 2005, p. 23), com o objetivo de aumentar o amortecimento de cheia a partir da maior capacidade de retenção das barragens. Todavia, essa medida entra em conflito com questões econômicas e sociais, a partir da diminuição do potencial de produção hidroelétrica e da garantia de disponibilidade de água em anos secos. “Outra prática para atenuar as consequências e riscos da inundação é evitar a utilização de áreas em zonas inundáveis, por meio da regulamentação e controle eficaz para impedir o uso dessas áreas” (ANPC, 2016, p. 23). De acordo com APA (2016), o Sistema de Vigilância e Alerta de Recursos Hídricos de Portugal (SVARH) prioriza previsões para pontos críticos, tais como: montante de barragens (vazão), núcleos urbanos (cotas) e estações hidrométricas da rede de vigilância (vazão e cota). Este sistema permite conhecer, em tempo útil, o estado hidrológico dos rios e barragens do país e informações meteorológicas e, assim, realizar previsões de possíveis elevações nas vazões. O SVARH é um excelente exemplo com vistas a diminuir os impactos negativos das inundações.

## **4 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Mediante ao exposto, o TR de 439,4 anos, resultado quantitativo de maior relevância da aplicação de probabilidade conjunta, é de extrema importância para

compreender o comportamento de cheias na região de maior susceptibilidade do rio Mondego (Coimbra, Portugal). De posse deste dado, profissionais da área podem utilizá-lo como embasamento para o cálculo de coeficientes estruturais em projetos hidráulicos na região. Ademais, este trabalho considerou que a precipitação e o nível dos reservatórios possuem igual importância na geração de escoamento superficial, e conseqüentemente, na ocorrência de inundações em eventos extremos. Portanto, para a aplicação da metodologia, primeiramente, as bacias precisam ter suas barragens com propósitos mitigadores de cheias e também possuir seus rios bem regularizados pelos barramentos. Por fim, a consistência dos resultados apresentados pode embasar, metodologicamente, na gestão integrada dos recursos hídricos no que concerne a medidas preventivas ou de mitigação à áreas passíveis de serem afetadas.

## REFERÊNCIAS

- ALVES, E; MENDES, L. Modelação da inundação fluvial do baixo Mondego. **Recursos Hídricos**, v. 35, n. 2, 2014.
- ANDERSON, T. W.; DARLING, D. A. A test of goodness of fit. **Journal of the American statistical association**, v. 49, n. 268, p. 765-769, 1954.
- ANPC - Autoridade Nacional de Proteção Civil. Documento de apoio às boas práticas. Gestão do risco de inundação. Plataforma Nacional para a Reeducação do Risco de Catástrofes. 2016.
- APA - Agência Portuguesa do Ambiente. Programa de Medidas: Região Hidrográfica 4 – Vouga, Modengo e Lis. 2016.
- BATALLA, R. J.; GOMEZ, C. M.; KONDOLF, G. M. Reservoir-induced hydrological changes in the Ebro River basin (NE Spain). **Journal of hydrology**, v. 290, n. 1-2, p. 117-136, 2004.
- BESKOW, S.; CALDEIRA, T. L.; DE MELLO, C. R.; FARIA, L. C.; GUEDES, H. A. S. Multiparameter probability distributions for heavy rainfall modeling in extreme southern Brazil. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 4, p. 123-133, 2015.
- BRAVO, J. M. Otimização da operação de um reservatório para controle de cheias com base na previsão de vazão. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

CALDEIRA, T. L.; BESKOW, S.; DE MELLO, C. R.; VARGAS, M. M.; GUEDES, H. A. S.; FARIA, L. C. Daily rainfall disaggregation: An analysis for the Rio Grande do Sul State. **Scientia agraria**, v. 16, n. 3, p. 1-21, 2015.

CASSALHO, F.; BESKOW, S.; VARGAS, M. M.; MOURA, M. M. D.; ÁVILA, L. F.; MELLO, C. R. D. Hydrological regionalization of maximum stream flows using an approach based on L-moments. **RBRH**, v. 22, 2017

CENSOS. Informação Estatística Sobre a População de Portugal. 2011.

CHONGXUN, M.; FANGGUI, L.; MEI, Y.; RONGYONG, M.E GUIKAI, S. Risk analysis for earth dam overtopping. **Water Science and Engineering**, v. 1, n. 2, p. 76-87, 2008.

CUNHA, P. P. Vulnerabilidade e risco resultante da ocupação de uma planície aluvial-o exemplo das cheias do rio Mondego (Portugal central), no Inverno de 2000/2001. **Territorium**, n. 9, p. 13-35, 2002.

FARAWAY, J.; MARSAGLIA, G.; MARSAGLIA, J.; BADDELEY, A. Package 'gofstest': Classical Goodness-of-Fit Tests for Univariate Distributions. 2019.

HOSKING, J. R. M. Package 'lmom': L-Moments. 2019.

HOSKING, J. R. M.; WALLIS, J. R. Regional frequency analysis: an approach based on L-moments. Cambridge: **Cambridge University Press**, 1997. 224 p.

LOURENÇO, L.; CUNHA, P. P.; LIMA, J. L. M. P. DE; VELEZ, F.; LIMA, I. P. DE;

LOURO, S; LOURENÇO, L. O comportamento hidrológico do rio Mondego perante valores de precipitação intensa, em Coimbra. **Territorium**, n. 12, p. 19-27, 2005.

MARQUES, J. A. S.; MENDES, P. A.; SANTOS, F. J. S. Cheias em áreas urbanas: a zona de intervenção do Programa Polis em Coimbra. **Territorium**, n. 12, p. 29-53, 2005.

NUNES, A.; MOREIRA, C. O.; PAIVA, I. R.; CUNHA, L. S. As cheias na sub-bacia hidrográfica do rio dos Fornos: pontos críticos e medidas de minimização. **Territórios de Água**. Centro de Estudos de Geografia e Ordenamento do Território, Coimbra, 2016.

Ordem dos Engenheiros de Portugal. Disponível em: <http://www.ordemengenheiros.pt/pt/>. Acesso realizado em 10 de novembro de 2021.

SANTOS, F. S., MARQUES, J. A. S., SIMÕES, N. E.; MENDES, P. A. Modelação numérica de cheias fluviais e urbanas na bacia do Mondego. **Riscos naturais, antrópicos e mistos**, p. 463-479, 2013.

SILVA, F. V. Otimização da Gestão Operacional de Albufeiras de Aproveitamento de Fins Múltiplos em Situações de Cheias. Universidade do Porto, Porto, 105 p, 2005.

SILVA, A. P.; COTA, T.; SANTO, F. E.; MOREIRA, N. Fenômenos extremos e precipitação intensa. 7º Seminário APRH-Núcleo Regional Norte. Vila Nova de Gaia, Portugal, 2017.

SNIAmb – Sistema Nacional de Informação de Ambiente. Disponível em: <https://snirh.apambiente.pt>. Acesso realizado em 10 de novembro de 2021.

SNIRH - Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos. Disponível em: <https://snirh.apambiente.pt>. Acesso realizado em 10 de novembro de 2021.

TAVARES, A. O.; BARROS, L.; SANTOS, P. P.; ZÊRERE, J. L. Desastres naturais de origem hidrogeomorfológica no baixo Mondego no período 1961-2010\*. **Territorium**, n. 20, p. 65-76, 2013.

TAVARES, A. Risco de inundação no baixo Mondego. Livro-guia da visita técnica nº3. IV Congresso Internacional de Riscos. Coimbra, 2017.

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Modelos digitais de elevação para países de língua portuguesa. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/labgeo/index.php/dados-espaciais/265-modelos-digitais-de-elevacao-do-srtm-dos-paises-de-lingua-portuguesa-no-formato-geotiff>. Acesso realizado em 10 de novembro de 2021.

USDA – United States Department of Agriculture. Urban hydrology for small watersheds. USDA Natural Resource Conservation Service Conservation Engineering Division Technical Release 55. 1986.

VICENTE-SERRANO, S. M., ZABALZA-MARTÍNEZ, J.; BORRÀS, G.; LÓPEZ-MORENO, J. I.; PLA, E.; PASCUAL, D.; SAVÉ, R.; BIEL, C.; AZORIN-MOLINA, C.; SANCHEZ-LORENZO, A.; MARTÍN-HERNÁNDEZ, N.; PENA-GALLARDO, M.; ALONSO-GONZÁLEZ, E.; TOMAS-BURGUERA, M.; EL KENAWY, A. Extreme hydrological events and the influence of reservoirs in a highly regulated river basin of northeastern Spain. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 12, p. 13-32, 2017.

ZIN, W. Z. W.; JEMAIN, A. A; IBRAHIM, K. The best fitting distribution of annual maximum rainfall in Peninsular Malaysia based on methods of L-moment and LQ-moment. **Theoretical and applied climatology**, v. 96, n. 3-4, p. 337-344, 2009.

## Contribuições de Autoria

### 1 – Marcelle Martins Vargas (Autor correspondente)

Engenheira Hídrica, Doutoranda em Recursos Hídricos

<http://orcid.org/0000-0002-3798-5937> • [marcellevarg@gmail.com](mailto:marcellevarg@gmail.com)

Contribuição: Conceituação | Curadoria de dados | Metodologia | Visualização [de dados (infográfico, fluxograma, tabela, gráfico)] | Escrita – primeira redação | Escrita – revisão e edição

## 2 – Gustavo Willy Nagel

Engenheiro Hídrico, Doutorando em Recursos Hídricos

<https://orcid.org/0000-0002-8060-0772> • [gustavoonagel@gmail.com](mailto:gustavoonagel@gmail.com)

Contribuição: Conceituação | Curadoria de dados | Metodologia | Visualização [de dados (infográfico, fluxograma, tabela, gráfico)] | Escrita – primeira redação | Escrita – revisão e edição

## 3 – Maíra Martim de Moura

Engenheira Civil, Doutoranda em Recursos Hídricos

<https://orcid.org/0000-0001-6618-2327> • [martimdemoura@gmail.com](mailto:martimdemoura@gmail.com)

Contribuição: Conceituação | Curadoria de dados | Metodologia | Escrita – revisão e edição

## Como citar este artigo

VARGAS, M. M.; NAGEL, G. W.; MOURA, M. M. Riscos de inundação em bacias regularizadas: Estudo de caso da cheia do rio Mondego, Portugal. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 44, exx, 2022. DOI 10.5902/2179460X63586. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/2179460X63586>.