

Uma análise hidrológica para avaliação da resiliência de infraestruturas de drenagem rodoviárias

Paulo Ramísio^{a,}, Clara Vieira^a, Adriana Santos^b*

^a Universidade do Minho, Campus de Azurém. Alameda da Universidade 4800-058 Guimarães, Portugal

^b Ascendi, Edifício Litografia Lusitana, Praça de Mouzinho de Albuquerque 197, 4100-360 Porto, Portugal

RESUMO

As alterações climáticas estão a aumentar a incidência e a severidade dos fenómenos meteorológicos extremos e dos eventos de cheia associados, o que pode representar um risco crescente para o bom desempenho das infraestruturas de drenagem rodoviárias. Torna-se, assim, pertinente estudar os fenómenos e processos hidrológicos associados à formação de escoamento superficial, de modo a avaliar a resiliência das infraestruturas rodoviárias. As cheias são um dos principais fatores de risco associados aos sistemas de drenagem destas infraestruturas, pelo que é importante analisar as abordagens e metodologias utilizadas na conceção das infraestruturas existentes, por forma a avaliar a sua resiliência a alterações da ocupação do solo e às alterações climáticas. A modelação hidrológica das bacias hidrográficas associadas às passagens hidráulicas das autoestradas A4 e A41, ambas na concessão do Grande Porto da rede Ascendi, visa estabelecer uma relação entre as alterações dos padrões de precipitação e de uso e ocupação do solo e os correspondentes hidrogramas de cheia das bacias hidrográficas. Com este estudo, pretende-se estimar as alterações das variáveis que estiveram na origem da conceção destes sistemas, bem como contribuir para a melhoria do seu desempenho e para a redução dos custos operacionais e da gestão destes ativos.

Palavras-Chave: Alterações climáticas, Cheias, Infraestruturas de drenagem rodoviárias, Modelos hidrológicos, Precipitação-Escoamento-Transporte.

doi: 10.22181/aer.2025.0402

* Autor para correspondência
E-mail: pramisio@civil.uminho.pt

A hydrological-based analysis to assess the resilience of road drainage infrastructures

Paulo Ramísio^{a,*}, *Clara Vieira*^a, *Adriana Santos*^b

^a Universidade do Minho, Campus de Azurém. Alameda da Universidade 4800-058 Guimarães, Portugal

^b Ascendi, Edifício Litografia Lusitana, Praça de Mouzinho de Albuquerque 197, 4100-360 Porto, Portugal

ABSTRACT

Climate change is increasing the incidence and severity of extreme meteorological phenomena and associated flooding events, which may pose an increasing risk to the good performance of road drainage infrastructure. It is therefore pertinent to study the hydrological phenomena and processes associated with the generation of surface runoff in order to assess the resilience of road infrastructure to extreme events. Flooding is one of the main risk factors associated with the drainage of these infrastructures, so it is important to analyse the approaches and methodologies used in their design to face climate challenges. The hydrological modelling of the catchment areas associated with the culverts of the A4 and A41 motorways, both in the Greater Porto concession of the Ascendi network, aims to establish a relationship between changes in rainfall patterns and land use and occupation and the corresponding flood hydrographs of the catchment areas. The objective of this study is to estimate the changes in the variables that led to the design of these systems, as well as to contribute to improving their performance and reducing operating and asset management costs.

Keywords: Climate change, Flooding, Hydrological-based model, Rainfall-Runoff-Routing, Road drainage infrastructure.

doi: 10.22181/aer.2025.0402

* Corresponding author
E-mail: pramisio@civil.uminho.pt

1 Introdução

As alterações climáticas e a ocorrência de fenómenos meteorológicos extremos nas últimas décadas tem motivado grande preocupação na comunidade internacional, não só pelos seus possíveis impactos na sociedade, na economia e no ambiente, mas também pelas suas potenciais consequências em infraestruturas importantes associadas à drenagem de águas pluviais, como barragens, pontes ou sistemas de drenagem.

Os órgãos e sistemas de drenagem de águas pluviais foram concebidos para o escoamento e drenagem de eventos de precipitação intensa; no entanto, a maioria das normas de conceção destes sistemas baseia-se em registos históricos da precipitação e não tem em conta as incertezas climáticas futuras (Potter e Frevert 2011).

A intensidade e a frequência dos eventos de precipitação têm vindo a aumentar nas últimas décadas à escala regional e continental e é muito provável que se verifique ainda o seu agravamento com a tendência progressiva de aquecimento global. As cheias repentinas e de maior magnitude são também mais frequentes, embora com grandes variações geográficas e sazonais (IPCC 2007, IPCC 2021).

É, pois, necessário determinar a escala dos efeitos destas alterações para adaptar os sistemas de drenagem de águas pluviais aos desafios climáticos futuros. É importante avaliar as alterações previstas nos padrões de precipitação nos próximos 50 a 100 anos e determinar de que forma as atuais normas de conceção dos sistemas de drenagem de águas pluviais devem ser adaptadas para atenuar as incertezas climáticas futuras (Karl et al. 2008). Os impactos associados a uma mudança climática exigem uma análise minuciosa dos efeitos da temperatura e da precipitação intensa sobre os fenómenos de cheia (Potter e Frevert 2011, Plante e Ramirez-Avila 2020).

As cheias são um dos principais fatores de risco associados aos sistemas de drenagem transversal das infraestruturas rodoviárias, nomeadamente as passagens hidráulicas, que constituem o cerne deste estudo, pelo que é importante analisar as abordagens e metodologias utilizadas na sua conceção para fazer face aos desafios climáticos.

Como os eventos de precipitação intensa são mais frequentes e originam, com maior frequência, cheias de maior magnitude, é inegável que o período de retorno destes eventos está a diminuir (Arnell e Gosling 2013). Em Portugal, as passagens hidráulicas são geralmente dimensionadas para um período de retorno de 100 anos.

A cobertura permanente da superfície do solo com materiais artificiais impermeáveis, como o betão, o asfalto e o cimento, pode também exercer grandes pressões sobre os recursos hídricos e conduzir a alterações significativas do estado ambiental das bacias hidrográficas. A impermeabilização reduz a quantidade de precipitação que pode ser absorvida pelo solo, podendo, em casos extremos, impedir totalmente a sua absorção (EU 2012, Miranda et al. 2023).

Em zonas pouco urbanizadas uma parte da água é absorvida pelo solo, ficando disponível para o coberto vegetal. A água no solo migra ainda por forma a contribuir para a recarga de aquíferos. Este processo pode aumentar significativamente o tempo que a água demora a alcançar os canais naturais e/ou artificiais (ou seja, a translação da ponta de cheia), reduzindo o volume de escoamento superficial e a magnitude dos eventos de cheia nas bacias hidrográficas (ou seja, a atenuação da ponta de cheia) (ASCE 1996).

Pelo contrário, nas zonas urbanas com um elevado índice de impermeabilização da superfície, a infiltração de água no solo é reduzida e o escoamento processa-se de uma forma mais rápida, podendo por em causa a capacidade dos sistemas de drenagem, levando à ocorrência de cheias de maior magnitude e frequência (Messerli et al. 2019, EC 2021).

Os efeitos das alterações climáticas nos padrões de precipitação à escala local e da bacia hidrográfica, bem como as constantes alterações nas características de impermeabilização do solo, têm assim um impacto direto nos processos hidrológicos associados à formação de escoamento superficial. Consta-se, por conseguinte, que são gerados maiores volumes de escoamento superficial, mesmo para as mesmas intensidades de precipitação, e os sistemas apresentam menor capacidade ou tempo de resposta (Ramísio et al., 2022).

Estas alterações contribuem para aumentar a vulnerabilidade dos sistemas de drenagem das infraestruturas rodoviárias, razão pela qual devem ser estabelecidos mecanismos de gestão de risco para minimizar o impacto potencial nos utentes da rede rodoviária e no espaço envolvente.

É objetivo do presente trabalho efetuar uma análise da resiliência das infraestruturas de drenagem rodoviárias da rede Ascendi, em situações de precipitação intensa, tendo em conta os efeitos das alterações climáticas, face aos critérios de conceção, estabelecendo uma relação entre as alterações espaciais e temporais dos padrões de precipitação e os coeficientes de escoamento superficial e a ocorrência de cheia. Este estudo é desenvolvido ao longo de seis fases de investigação, cada uma com os seus objetivos específicos.

Na primeira fase, são definidas as bases metodológicas e efetuada uma análise crítica dos métodos simplificados de estimativa de caudais de cheia utilizados no projeto das passagens hidráulicas e na definição da secção hidráulica dos órgãos de drenagem (Vieira, 2022). Na segunda fase, é analisada a vulnerabilidade das infraestruturas de drenagem rodoviárias com base no histórico de incidentes nas concessões e em eventos de precipitação intensa. A terceira fase consiste na análise estatística da distribuição probabilística dos dados de precipitação registados nas estações meteorológicas disponíveis e na representação das respetivas curvas de intensidade-duração-frequência (IDF). A quarta fase é dedicada ao geoprocessamento das áreas e dos usos e ocupação do solo das bacias hidrográficas associadas às passagens hidráulicas em estudo e à análise das características geomorfológicas mais suscetíveis de alteração ao longo do tempo. A quinta fase consiste na modelação hidrológica das bacias hidrográficas em estudo, com o objetivo de estimar os respetivos hidrogramas de cheia a partir de diferentes hietogramas de precipitação, bem como na validação do modelo com dados complementares. A sexta e última fase é dedicada à análise dos resultados obtidos e à apresentação dos resultados finais, a partir dos quais serão definidas medidas que possam contribuir para aumentar a resiliência das infraestruturas rodoviárias a eventos extremos e prevenir eventuais danos nos ativos.

Com este estudo, pretende-se avaliar o desempenho das passagens hidráulicas ao longo da vida útil das autoestradas, respondendo a duas questões fundamentais: i) as curvas de intensidade-duração-frequência utilizadas para estimar a precipitação de projeto continuam a ser adequadas, considerando os dados registados nas estações meteorológicas nas últimas décadas?; ii) os usos e ocupação do solo das bacias hidrográficas sofreram alterações ao longo do tempo e, em caso afirmativo, são coerentes com o coeficiente de escoamento superficial previsto no projeto de execução?

2 Enquadramento

A relação entre os eventos de precipitação e os processos associados à formação de escoamento superficial assume uma grande importância na conceção e desempenho funcional dos sistemas de drenagem. Do ponto de vista científico, é essencial compreender os mecanismos de resposta das bacias hidrográficas.

A precipitação sobre a superfície de uma bacia hidrográfica pode ser convertida em escoamento superficial de diferentes formas, que dependem da taxa de infiltração e da

saturação do solo (Figura 1). Os processos hidrológicos que conduzem à formação de escoamento superficial direto podem estar relacionados com o escoamento por excesso de infiltração no solo, o escoamento por excesso de saturação do solo, o escoamento subsuperficial da precipitação e o escoamento em superfícies impermeáveis. Em geral, apenas uma parte da precipitação se torna escoamento, sendo a restante evaporada, provavelmente depois de ser interceptada pela vegetação, armazenada em depressões superficiais ou infiltrada para se tornar humidade no solo ou águas subterrâneas. Com menor expressão, as águas subterrâneas podem também contribuir para os eventos de cheia através do escoamento de base (Ball et al. 2019a, 2019b).

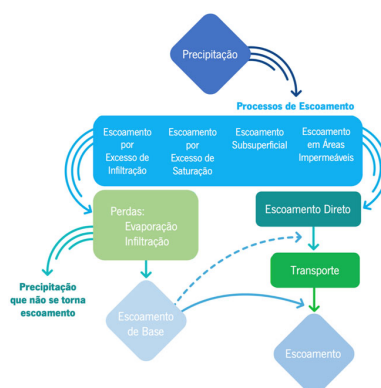


Figura 1. Processos de formação de escoamento (Adaptado de Ball et al. 2019b)

Há condições particulares que podem conduzir a caudais elevados e à ocorrência de cheias. Numa bacia hidrográfica com reduzidas perdas quase a totalidade da precipitação é convertida em escoamento, potenciando a ocorrência de cheias (Ball et al. 2019b).

A natureza estocástica das condições atuais e antecedentes, e a variação espacial e temporal da precipitação e dos processos hidrológicos associados, como a interceção do escoamento e o seu armazenamento, dificulta o estudo das cheias (Wasko e Nathan, 2019). A consideração de séries de duração parcial é já manifestação da probabilidade conjunta destes processos aleatórios.

O escoamento é geralmente dividido em escoamento direto e escoamento de base. O primeiro resulta de uma resposta à precipitação desse evento, enquanto o escoamento de base representa o contributo da lenta libertação da água armazenada (ASCE 1996). Durante um evento de cheia, o escoamento direto é a forma de escoamento mais relevante, embora, particularmente para a modelação, o escoamento de base deva ser considerado se representar uma contribuição significativa para o hidrograma de cheia da bacia hidrográfica (Nathan et al. 2019).

O projeto de sistemas de drenagem de águas pluviais baseia-se em estudos hidrológicos e hidráulicos. Nos estudos hidrológicos, analisam-se os fenómenos de precipitação e os processos associados à formação do escoamento superficial, enquanto nos estudos hidráulicos se caracterizam os caudais e as velocidades de escoamento e se definem as seções dos órgãos de drenagem.

É importante salientar que os estudos hidrológicos são fundamentais, pois constituem a base para quase todas as decisões relacionadas com a conceção de estruturas e infraestruturas associadas a alterações do regime hidrológico natural, como passagens hidráulicas e estruturas de contenção e mitigação de cheias, e de controlo da energia. Estes estudos incluem ainda a definição de soluções de controlo de cheias, prevendo as suas consequências, de modo a garantir a segurança das obras e a evitar colocar em risco vidas humanas ou causar danos materiais significativos.

No caso das passagens hidráulicas, começa-se por estimar os hidrogramas de cheia das bacias hidrográficas a partir dos hietogramas de precipitação, seguindo-se a definição da secção hidráulica dos órgãos de drenagem, necessários para restabelecer as linhas de água naturais intercetadas pela autoestrada.

3 Metodologia

3.1 Análise estatística de séries de precipitação

A análise estatística da distribuição probabilística dos dados de precipitação registados nas estações meteorológicas da rede Ascendi e a representação das respetivas curvas de intensidade-duração-frequência foram realizadas em linguagem de programação R.

Após a análise estatística sumária das amostras de dados das estações meteorológicas e a sua validação, com análise de valores atípicos e correção dos erros de registo, foram processadas séries de precipitação através da agregação das intensidades de precipitação em intervalos de tempo distintos. Desta forma, foram extraídas séries de máximos diários (SMD), séries de máximos mensais (SMM) e séries de máximos anuais (SMA), bem como séries de duração parcial (SDP).

A análise estatística das séries de precipitação foi efetuada com funções de distribuição de probabilidade apropriadas para ajustar os dados das amostras, selecionadas entre as mais utilizadas em Hidrologia, como é o caso da distribuição de Pearson III (PE3), a distribuição generalizada de Pareto (GPA), a distribuição de Gumbel (valor extremo I) (GUM), a distribuição generalizada de valor extremo (GEV), a distribuição exponencial (EXP), a distribuição logarítmica (GLO), a distribuição normal (GNO), a distribuição log-normal de três parâmetros (LN3) e a distribuição Log-Pearson III (LP3) (Naghetini 2017).

As curvas de intensidade-duração-frequência para as séries de máximos anuais das estações meteorológicas foram representadas com as funções de distribuição que melhor se ajustaram aos dados das amostras, nomeadamente, a distribuição de GUM, a de GPA, a de GEV e a EXP. Estas curvas foram ainda comparadas entre si e com as curvas de intensidade-duração-frequência da respetiva região pluviométrica, obtidas pelo método descrito no anexo IX do Decreto Regulamentar n.º 23/95, de 23 de agosto.

3.2 Geoprocessamento de bacias hidrográficas

O geoprocessamento das áreas e dos usos e ocupação do solo das bacias hidrográficas associadas às passagens hidráulicas das autoestradas A4 e A41, ambas na concessão do Grande Porto, foi realizado no programa informático QGIS, um software de sistema de informação geográfica (SIG).

A representação da altimetria e a delimitação da área das bacias hidrográficas foram realizadas com dados geoespaciais recolhidos pelo observatório Copernicus Sentinel-2, nomeadamente o Modelo Digital de Terreno (DTM), versão de 2018, com 25 metros de resolução, disponibilizado pela Agência Espacial Europeia (ESA). As coordenadas foram reportadas ao Sistema de Referência de Coordenadas (CRS) oficial para Portugal continental, ou seja, PT-TM06/ETRS89.

O DTM é um modelo topográfico altimétrico que representa a superfície ao nível do terreno, não considerando valores altimétricos inerentes a edifícios, vegetação e outros acidentes artificiais. Tipicamente, o DTM aumenta o Modelo Digital de Elevação (DEM), que representa apenas a superfície terrestre, incluindo as características vetoriais do terreno natural, como rios e cumeadas.

Foram ainda analisados os diferentes usos e a ocupação do solo das bacias hidrográficas nas diferentes classes temáticas de nível 1 da cartografia de referência nacional do Sistema de Monitorização da Ocupação do Solo (SMOS) com base nas edições de 2007

e de 2018 da Carta de Uso e Ocupação do Solo (COS), ambas disponibilizadas pela Direção-Geral do Território (DGT).

Esta cartografia é materializada em vetores de polígonos que representam o uso do solo com um elevado nível de detalhe temático, através de 83 classes, com uma unidade mínima cartográfica de um hectare, com base na interpretação visual de ortofotomapas de elevada resolução espacial. As nove classes do nível 1 incluem territórios artificializados, agricultura, pastagens, superfícies agroflorestais, florestas, matos, espaços descobertos ou com pouca vegetação, zonas húmidas e massas de água superficiais.

3.3 Modelação hidrológica de bacias hidrográficas

A modelação hidrológica das bacias hidrográficas associadas às passagens hidráulicas das autoestradas A4 e A41 foi realizada com base no *Hydrological Engineering Centre - Hydrological Modelling System* (HEC-HMS) da *US Army Corps of Engineers*. Este sistema de modelação foi concebido para simular processos hidrológicos completos em sistemas de bacias hidrográficas dendríticas. O software inclui vários procedimentos convencionais de análise hidrológica, nomeadamente infiltração, hidrogramas unitários e o transporte hidrológico.

O objetivo desta fase é analisar o desempenho das passagens hidráulicas em situações de precipitação intensa, com base na simulação de eventos nos modelos hidrológicos das bacias hidrográficas. Inicialmente, será considerado um modelo mais simples, ou seja, um modelo agregado, e posteriormente a complexidade será aumentada para modelos semi-distribuídos e distribuídos. A simulação de eventos terá em conta os dados de precipitação registados nas estações meteorológicas da rede Ascendi, bem como os dados de precipitação e de caudais registados in situ com sensores complementares.

Os resultados da modelação hidrológica das bacias hidrográficas servirão de base para definir possíveis medidas de mitigação dos efeitos negativos das cheias e de aumento da resiliência das infraestruturas de drenagem rodoviárias a eventos extremos.

4 Resultados e discussão

Os problemas operacionais registados nas infraestruturas de drenagem rodoviárias exigem diferentes estratégias de resolução. A estimativa da intensidade de precipitação deve ser efetuada com dados de curto prazo, e atualizados, de modo a incluir os efeitos das alterações climáticas nos padrões de precipitação. Além disso, devem ser consideradas subáreas das bacias hidrográficas e determinados os respetivos coeficientes de escoamento superficial médios (um por subárea e não apenas um valor médio para a área total da bacia). Por último, a modelação hidrológica permite a simulação de eventos em modelos agregados, semi-distribuídos e distribuídos das bacias hidrográficas e dos fenómenos e processos hidrológicos.

Ao analisar os métodos normalmente utilizados na conceção de sistemas de drenagem, constata-se que a intensidade de precipitação é estimada com base nas curvas de intensidade-duração-frequência obtidas pelo método descrito no anexo IX do Decreto Regulamentar n.º 23/95 (Figura 2).

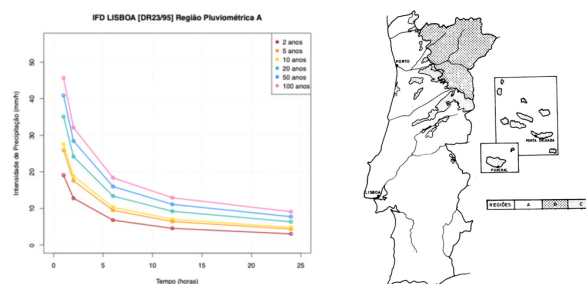


Figura 2. Curvas IDF Lisboa para a região pluviométrica A (pelo Decreto Regulamentar n.º 23/95)

Este método foi publicado por Matos e Silva (1986), definindo três regiões pluviométricas em Portugal continental (as regiões A, B e C), e apresentando curvas de intensidade-duração-frequência (Lisboa, Lisboa -20% e Lisboa +20%, respetivamente) para períodos de retorno até 100 anos. As curvas foram estimadas com base nos registos de precipitação de 20 postos udométricos, compilados por Faria e Machado em 1978 (Brandão et al. 2001). Por conseguinte, quando se utilizam estas curvas, não se têm em consideração os efeitos das alterações climáticas nos padrões de precipitação das últimas quatro décadas.

A Figura 3 apresenta as curvas de intensidade-duração-frequência desenvolvidas no presente estudo para as séries de máximos anuais (SMA) da estação meteorológica do Grande Porto foram representadas com a distribuição de Gumbel (valor extremo I) (GUM), a distribuição generalizada de valor extremo (GEV), a distribuição generalizada de Pareto (GPA) e a distribuição exponencial (EXP).

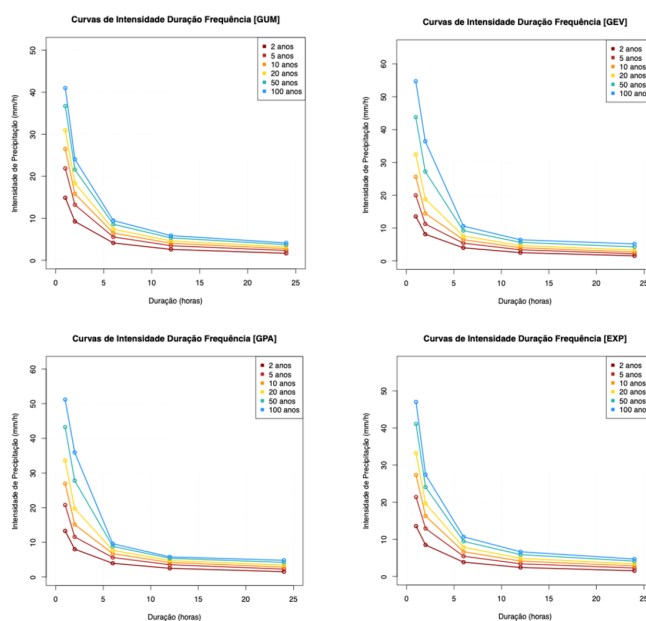


Figura 3. Curvas IDF (SMA) da estação meteorológica da concessão do Grande Porto

É possível observar que a distribuição de GEV apresenta o valor mais alto da intensidade de precipitação horária (55 mm/h) para o período de retorno de 100 anos, enquanto a distribuição de GUM apresenta o valor mais baixo (42 mm/h). Sabendo que a intensidade de precipitação estimada pelo método do Decreto Regulamentar n.º 23/95 para a região pluviométrica A (Curva IDF Lisboa) e para o período de retorno de 100 anos é aproximadamente 45 mm/h (Figura 2), verifica-se que todas as distribuições apresentam valores superiores, exceto a distribuição de GUM.

De seguida, foi analisado o coeficiente de escoamento superficial das bacias hidrográficas associadas às passagens hidráulicas das autoestradas A4 e A41 (Figura 4), representadas com base no MDT. Verificou-se que estas são, respetivamente, 18% e 12% superiores às áreas estimadas em projeto com recurso a cartas militares à escala 1:25 000, o que pode resultar do maior rigor dos métodos considerados.

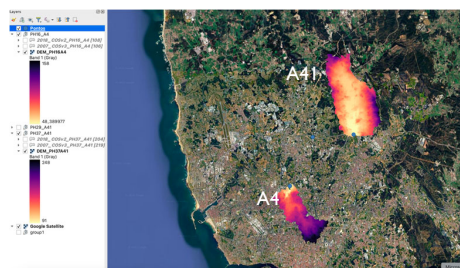


Figura 4. Áreas das bacias hidrográficas associadas às passagens hidráulicas da A4 e A41

Quanto às classes temáticas dos usos e ocupação do solo das bacias hidrográficas associadas às passagens hidráulicas das autoestradas A4 e A41, representadas na Figura 5, com base na cartografia de referência nacional, respetivamente a COS de 2007 e a COS de 2018, verificou-se que, entre 2007 e 2018, as variações nas áreas totais de cada classe temática de nível 1 são residuais (Figura 5).

Na Figuras 5, observa-se ainda que a bacia hidrográfica associada à passagem hidráulica da A4 se situa numa zona bastante urbanizada, com cerca de 80% do seu território artificializado (Figura 6). Portanto, as superfícies da bacia hidrográfica são caracterizadas por elevados coeficientes de escoamento superficial. Por outro lado, a bacia hidrográfica associada à passagem hidráulica da A41 localiza-se numa zona pouco urbanizada, com apenas cerca de 30% do seu território artificializado. Neste caso, as superfícies da bacia hidrográfica são maioritariamente permeáveis, ou seja, apresentam coeficientes de escoamento superficial mais baixos.

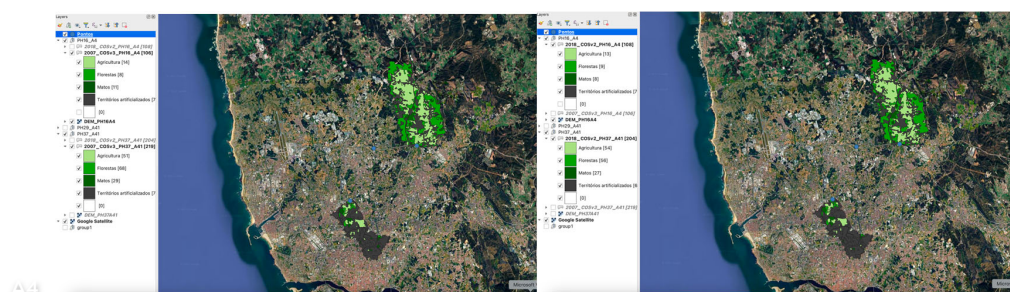


Figura 5. Usos e ocupação do solo em 2007 (esquerda) e 2018 (direita) das bacias hidrográficas

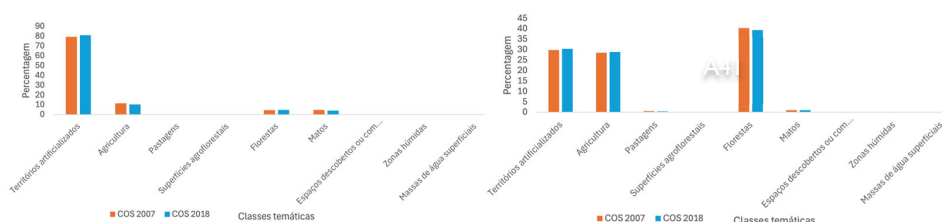


Figura 6. Usos e ocupação do solo das bacias hidrográficas da A4 (esquerda) e A41 (direita)

5 Conclusões

As alterações climáticas aumentam a incerteza sobre os fenómenos meteorológicos extremos e os eventos de cheia associados, impondo maiores desafios à resiliência das infraestruturas de drenagem rodoviárias.

Os métodos simplificados normalmente utilizados para estimar caudais de cheia negligenciam a variabilidade espacial e temporal dos padrões de precipitação e do coeficiente de escoamento superficial. No entanto, o coeficiente de escoamento superficial varia com o tempo, por exemplo, devido à reflorestação, à urbanização, à sazonalidade das culturas ou a diferentes práticas agrícolas, entre outros fatores. A sazonalidade da precipitação também influencia o coeficiente de escoamento superficial, uma vez que as perdas são menores em solos saturados durante a estação húmida do que em solos insaturados durante a estação seca. A humidade no solo antes de um evento de precipitação influencia o coeficiente de escoamento superficial, uma vez que um solo saturado atua como uma superfície impermeável, aumentando a área efetiva de impermeabilização. Além disso, nestes métodos, a intensidade de precipitação corresponde à precipitação efetiva, o que significa que a intensidade de precipitação não é desagregada em precipitação efetiva e em perdas por evaporação e infiltração.

A modelação hidrológica do sistema da bacia hidrográfica permite simular a variabilidade espacial e temporal dos padrões de precipitação e do coeficiente de escoamento superficial, ao contrário dos métodos simplificados de estimativa de caudais de cheia.

Referências

- ASCE (1996). *Hydrology Handbook*. American Society of Civil Engineers, USA.
- Arnell N. e Gosling S (2013). *The impacts of climate change on river flow regimes at the global scale*. Journal of Hydrology, 486, 351–364.
- Ball J., Babister M., Nathan R., Weeks W., Weinmann E., Retallick M., Testoni I. (2019a). *A Guide to Flood Estimation: Rainfall Estimation*. Commonwealth of Australia, Canberra, Australia.
- Ball J., Babister M., Nathan R., Weeks W., Weinmann E., Retallick M., Testoni I. (2019b). *A Guide to Flood Estimation: Catchment Simulation for Design Flood Estimation*. Commonwealth of Australia, Canberra, Australia.
- Brandão C., Rodrigues R., Costa J. (2001). *Análise de Fenómenos Extremos: Precipitações Intensas em Portugal Continental*. Direção dos Serviços de Recursos Hídricos, Instituto da Água, Lisboa.
- Decreto Regulamentar n.º 23/95. D.R. Série I-B (1995-08-23) 5284-5319. <https://files.diariodarepublica.pt/1s/1995/08/194b00/52845319.pdf>, acedido a 1 de setembro de 2024.
- EU (2012). *Guidelines on best practice to limit, mitigate or compensate soil sealing*. Technical report, Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- EC (2021). *Special Eurobarometer 513: Climate Change Report Summary March–April 2021*. Technical report, European Commission of the European Union, Brussels.
- IPCC (2007). *Climate Change: The Physical Science Basis*. 4th assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC (2021). *Climate Change: The Physical Science Basis*. 6th assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, UK.

- Karl T., Melillo J., Peterson T., Hassol, S. (2008). *Global Climate Change Impacts in the United States*. Cambridge University Press.
- Matos M., Silva M. (1986). *Estudos de precipitação com aplicação no projecto de sistemas de drenagem pluvial. Curvas intensidade-duração-frequência da precipitação em Portugal*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Messerli P., Muminingtyas E., Eloundou-Enyegue P., Foli E., Furman E., Glassman A., Hernández G., Kim, E., Lutz W., Moatti J., Richardson K. (2019). *The Future is Now: Science for Achieving Sustainable Development*. United Nations, New York.
- Miranda J., Scholz I., Agard J., Al-Ghanim K., Bobylev S., Dube O., Hathie I., Kanie N., Madise N., Malekpour S., Montoya J. (2023). *Times of Crisis, Times of Change: Science for Accelerating Transformations for Sustainable Development*. United Nations, New York.
- Naggettini M. (2017). *Fundamentals of Statistical Hydrology*. Springer, Switzerland.
- Plante R. e Ramirez-Avila J. (2020). *Watershed Management 2020: A Clear Vision of Watershed Management*. Environmental and Water Resources, Institute of the American Society of Civil Engineers, Henderson, Nevada.
- Potter K. e Frevert D. (2011). *Watershed Management 2010: Innovations in Watershed Management under Land Use and Climate Change*. Environmental and Water Resources, Institute of the American Society of Civil Engineers, Madison, Wisconsin.
- Ramísio, P. J., Brito, R. S., & Beceiro, P. (2022). Accessing Synergies and Opportunities between Nature-Based Solutions and Urban Drainage Systems. *Sustainability*, 14(24), 16906. <https://doi.org/10.3390/su142416906>
- Vieira C. (2022) *Resiliência das infraestruturas de drenagem rodoviárias face às alterações climáticas: Análise dos fatores condicionantes na estimação de caudais de cheia*. Tese de Mestrado, Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Guimarães.
- Wasko, C., & Nathan, R. (2019). Influence of changes in rainfall and soil moisture on trends in flooding. *Journal of Hydrology*, 575, 432-441.