

RISCOS COMPOSTOS DE INUNDAÇÕES EM CIDADES COSTEIRAS – O CASO DA CIDADE DE MAPUTO, EM MOÇAMBIQUE

Filipa Ferreira ^{a,b} *, José Pedro Matos ^a, Diogo Mendes ^a,
Sílvia Cabrita ^c, José Saldanha Matos ^{a,b}

* Autor correspondente: filipamferreira@tecnico.ulisboa.pt

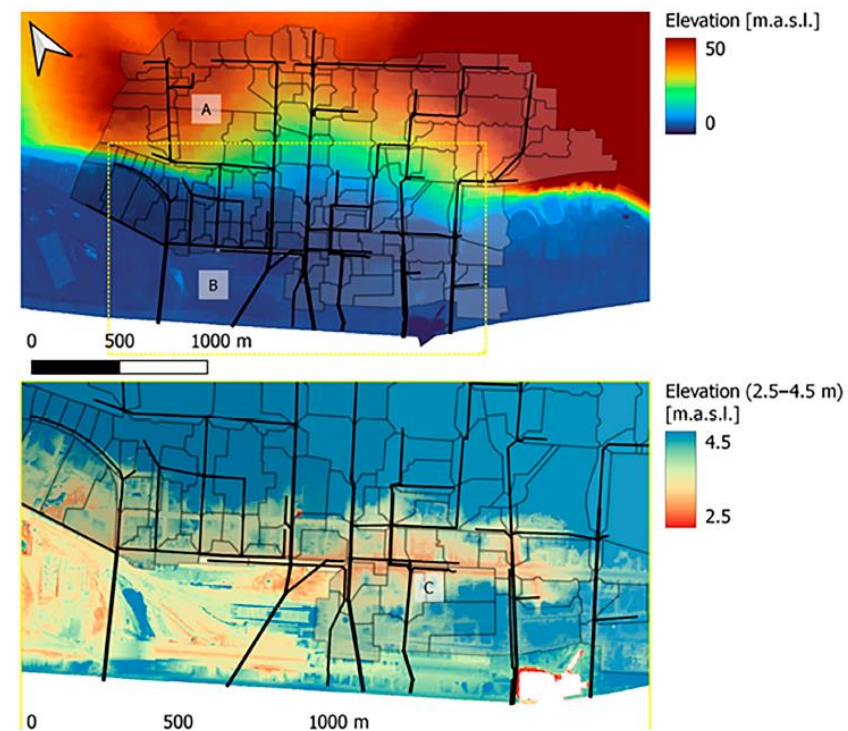
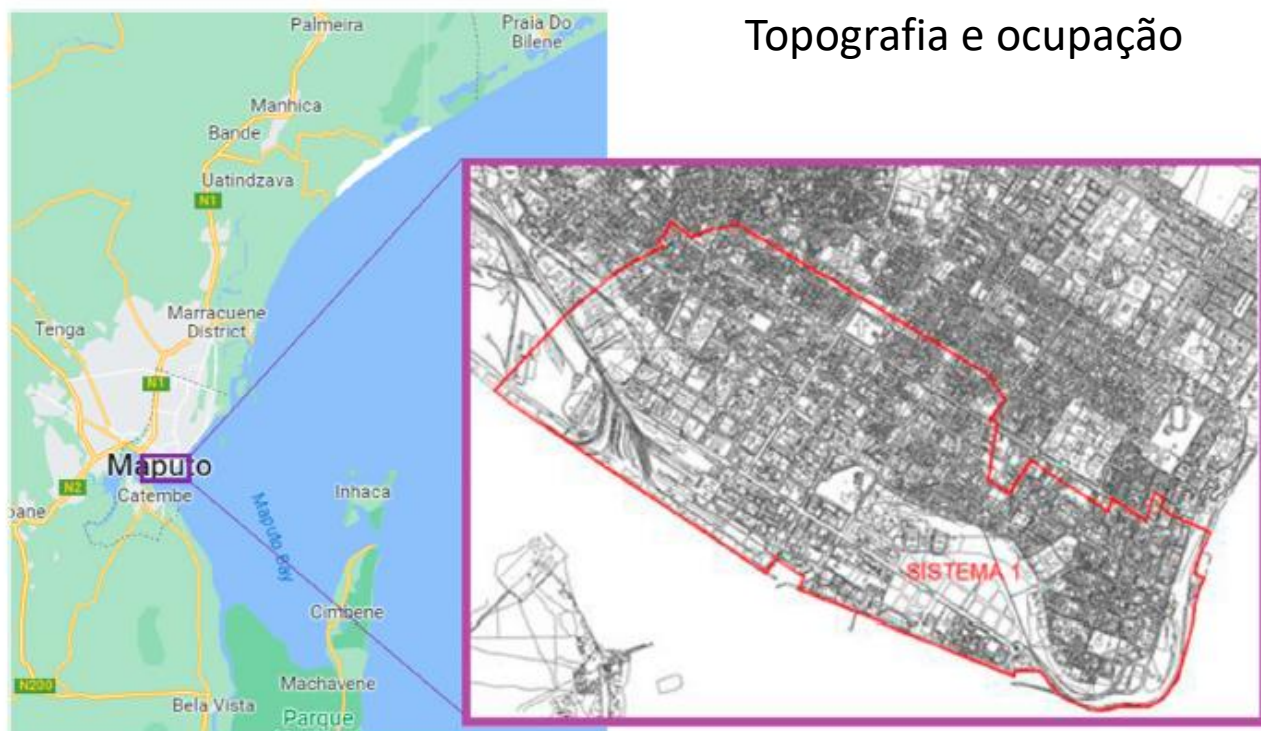
^a CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais 1, Lisboa, Portugal

^b Hidra, Hidráulica e Ambiente, Lda, Av. Defensores de Chaves 31, 1ºE, Lisboa, Portugal

^c Estudante de Programa Doutoral em Alterações Climáticas e Políticas de Desenvolvimento Sustentável

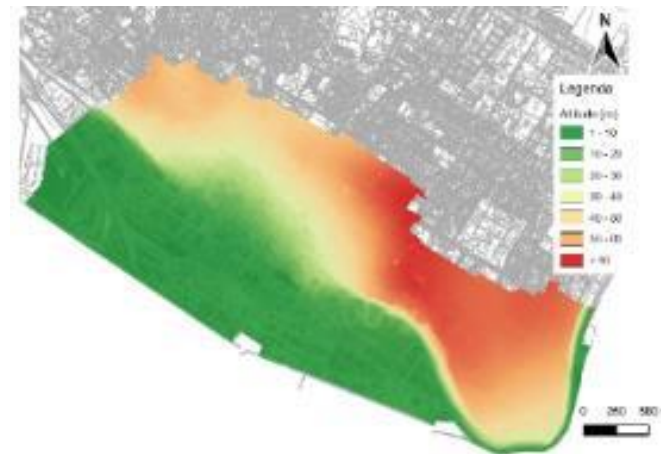
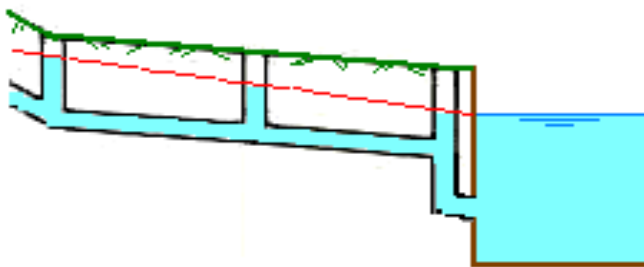


Topografia e ocupação



Características críticas (Sistema I)

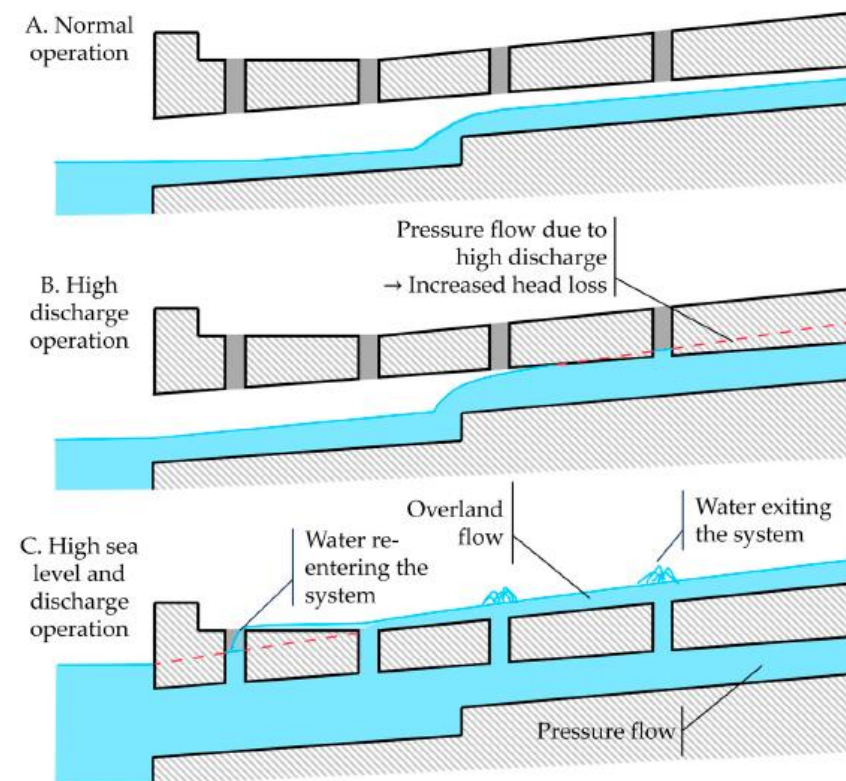
- Bacias urbanas de média dimensão e **elevada ocupação**
- Zona alta, com vias com médios e **elevados declives no sentido norte-Sul**
- **Zona baixas, planas**, com grande ocupação
- Potencial condicionamento de descargas por maré alta



Inundação composta: chuva e maré

A inundação composta é um fenómeno complexo e multidisciplinar. Para modelar este fenómeno de forma abrangente, é necessário simular:

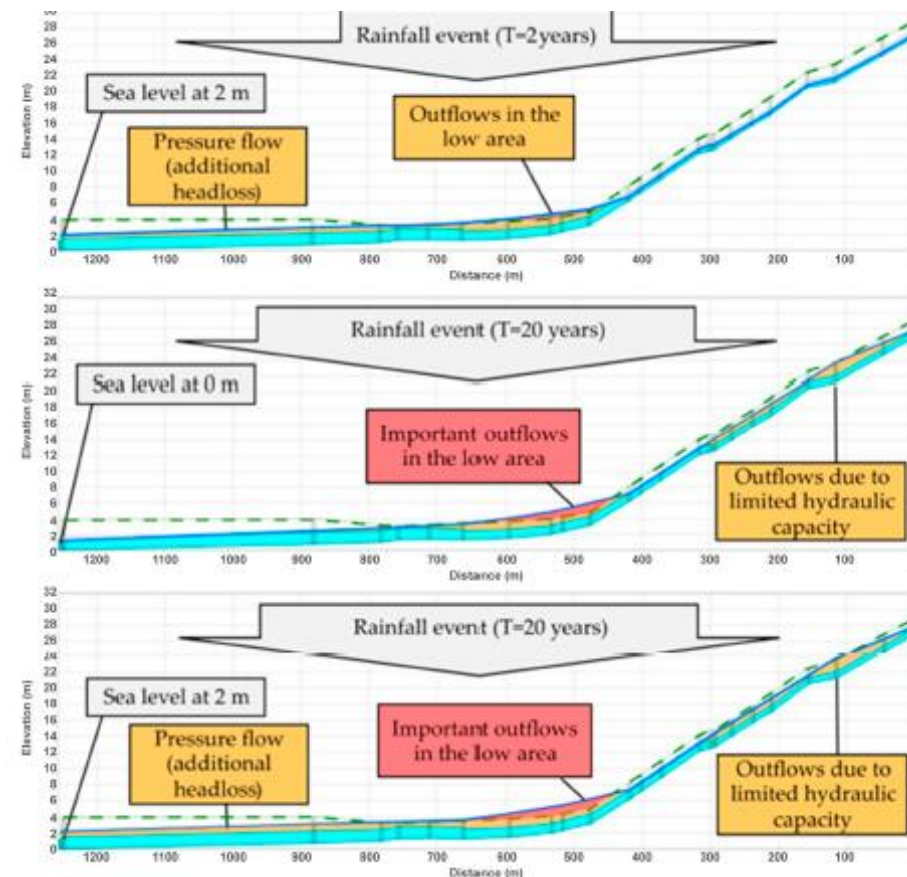
- As condições meteorológicas (**precipitação**, ventos e pressão atmosférica);
- Os processos costeiros (**níveis de maré**, a subida do NMM e storm surges);
- Os processos de precipitação–escoamento (**infiltração**, **evaporação e escoamento superficial**);
- O comportamento hidráulico **dinâmico do escoamento no sistema de drenagem pluvial (coletores)**;
- A interação entre o escoamento nos coletores e o escoamento superficial (ETH Basement- modelos 1D-2D)



Inundação-composta: chuva e maré

No caso de inundações compostas, os níveis elevados da água do mar podem contribuir para a inundação de várias formas, nomeadamente:

- **Inundação direta** de áreas situadas abaixo do nível de maré (galgamento);
- **Redução da seção útil (disponível)** do sistema de drenagem nas zonas baixas, por entrada de maré, originando extravasamentos;
- **Elevação do nível da linha piezométrica**, com escoamento sob pressão em alguns trechos, agravamento de perdas de carga e inundações por saída de água pelas tampas e sarjetas.



A metodologia seguida considerou:

- I. projeções de alterações climáticas
- II. desenvolvimento urbano expectável
- III. análise hidrológica-hidráulica através de modelação 1D (EPA SWMM)
- IV. cenários de adaptação (Condição atual e com medidas de reforço e substituição)
- V. avaliação do risco de inundação para cada combinação
 - O fator ou intensidade da inundação é estimada como o volume total extravasado no tempo.



Foram considerados dois cenários:

- I. **cenário de referência** que reproduz as condições atuais dos eventos de precipitação e de maré
- II. **cenário futuro** que incorpora efeitos das alterações climáticas.

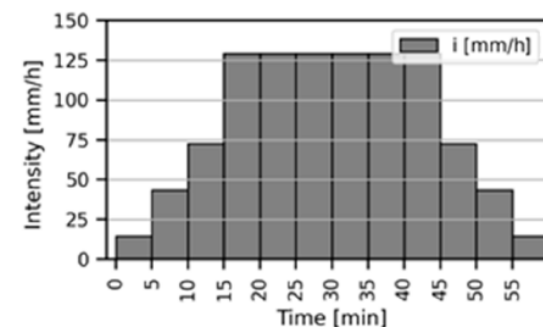
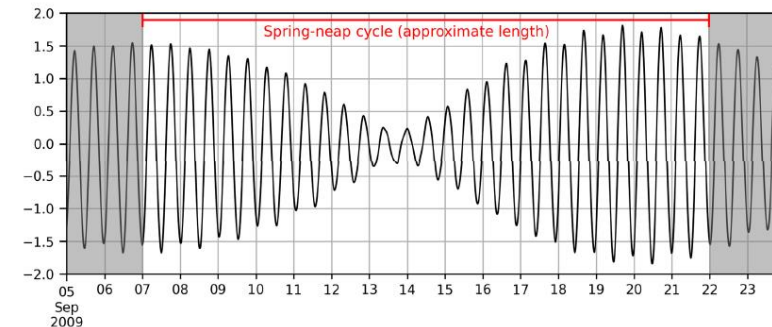


Figure 6. Design storm hyetograph adapted to the Maputo region.

- a. Hietograma de projeto (duração de 1 hora) com base nas IDF de Maputo
- b. Níveis de marés astronómicas (estáticos)
- c. Modelo calibrado com alturas de inundação reportadas em inquéritos sistemáticos realizados em 2022 na baixa de Maputo.

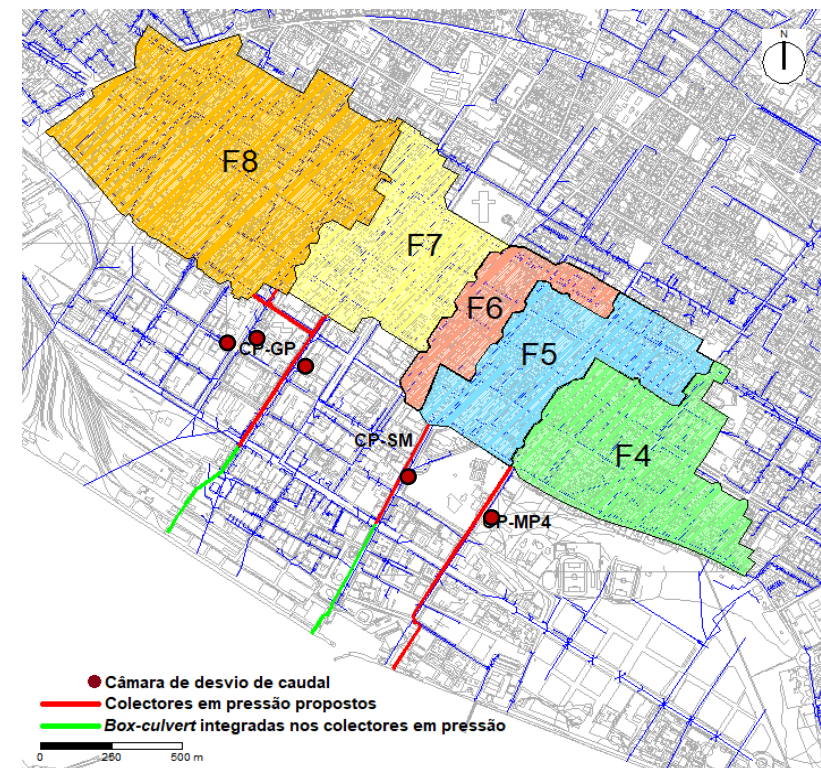
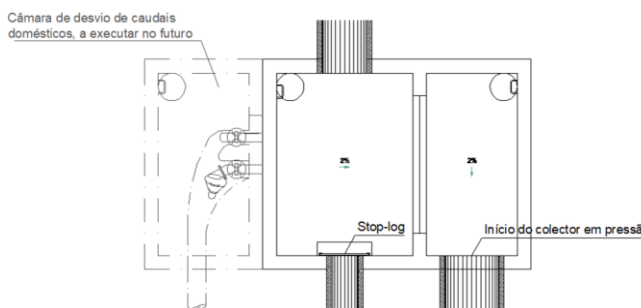


Solução Recomendada

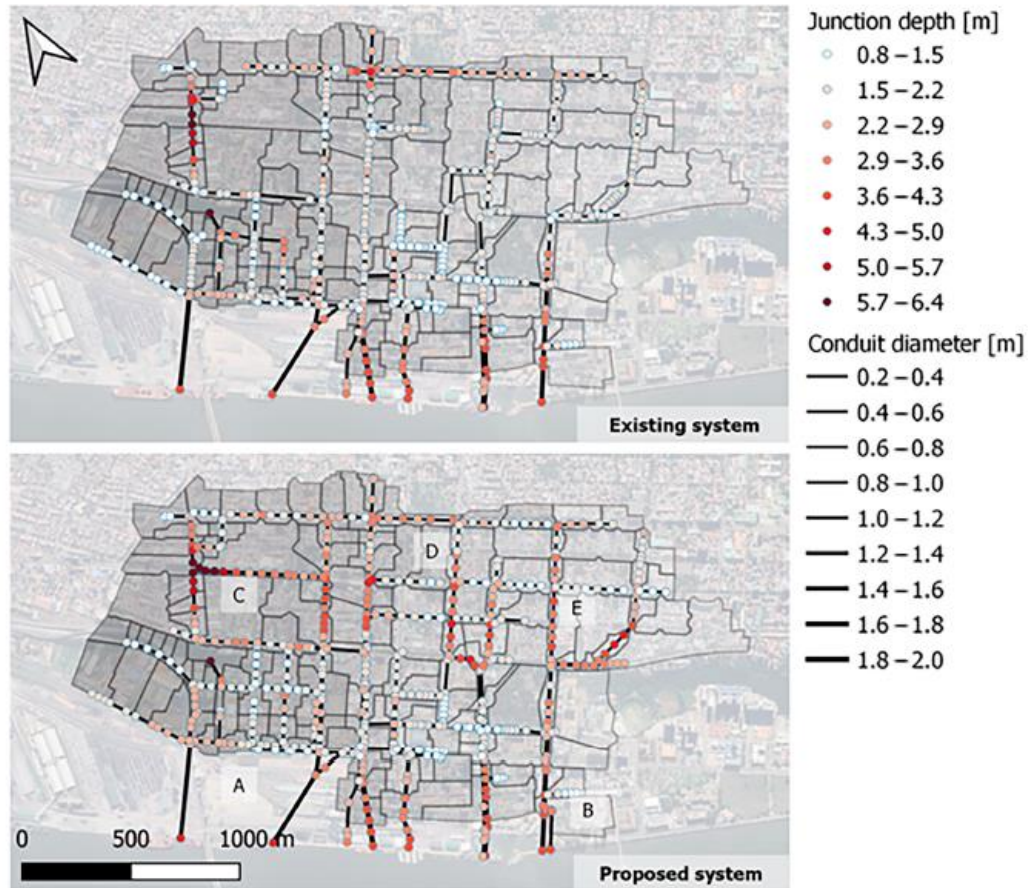
Uma das Medidas: Desvio de caudais pluviais (transvaze) da zona alta diretamente para o estuário

- Execução de três sistemas com captação a meia encosta, sem serviço de percurso para jusante, com recolha de água de 5 bacias, e os seguintes emissários finais (a vermelho):
 - CP-GP (Guerra Popular- sob pressão);
 - CP-SM (Samora Machel- parte sob pressão);
 - CP-MP4 (Vladimir Lenine novo, sob pressão).

CP-CP e CP-SM descarregam a jusante para 2 box Cover existentes (a verde)

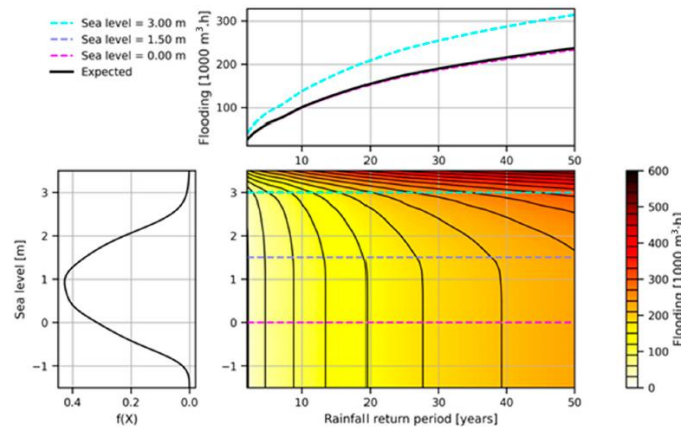


Introdução



Faz sentido avaliar as inundações não apenas em termos de quantidade de água extravasada, mas também o tempo durante o qual essa água permanece à superfície.

O estudo modela a intensidade da inundação como o integral do volume inundado ao longo do tempo.



Volumes de inundação (x 1000 m³.h), em função do nível da mare e da frequência do evento (T=10 a 50 anos)



Conclusões

Da análise realizada, é possível concluir que:

- Embora a baixa de Maputo não esteja particularmente exposta a inundações compostas, pois as descargas não são, em regra, afogadas, **a consideração de eventos combinados de precipitação e maré é essencial sobretudo para zonas urbanas costeiras em que a amplitude da maré é comparativamente alta** (caso de Lisboa, por exemplo, > 3 m);
- Por subida do nível médio da água do mar e por frequência de eventos extremos, as **alterações climáticas irão agravar tendencialmente o risco de inundações em cidades**, tornando a análise de inundações compostas mais relevante no futuro- Nesses casos, pode justificar-se o recurso a bombagem das águas pluviais (EE Torrão, Costa da Caparica, e EE nos Países Baixos, por exemplo)

RISCOS COMPOSTOS DE INUNDAÇÕES EM CIDADES COSTEIRAS – O CASO DA CIDADE DE MAPUTO, EM MOÇAMBIQUE

José Saldanha Matos

OBRIGADO

José Saldanha Matos
(jsm.hidra@gmail.com)





Conclusões

Da análise realizada, é possível concluir que:

- As intervenções de reabilitação propostas para o Sistema 1 terão um efeito extremamente benéfico para a cidade, reduzindo significativamente a ocorrência de inundações mesmo em cenários climáticos futuros pessimistas (reduções na ordem dos 90% para o sistema proposto, em condições projetadas para 2100, para eventos com um período de retorno de 10 anos);
- A correlação entre precipitação e efeitos de *storm surge* (fenómeno provável na região) pode afetar o perfil de risco. No futuro, poderá ser interessante analisar o comportamento estatístico conjunto dos eventos de precipitação e *storm surge*, com o uso de modelo acoplado 1D-2D, incorporando o escoamento superficial, o comportamento dos órgãos de entrada e os riscos de obstrução parcial no desempenho global do sistema.

Article

Evaluating Compound Flooding Risks in Coastal Cities under Climate Change—The Maputo Case Study, in Mozambique

João Pedro Matos ¹, Filipa Ferreira ^{1,2,*} , Diogo Mendes ¹  and José Saldanha Matos ^{1,2} 

¹ CERIS—Civil Engineering Research and Innovation for Sustainability, Instituto Superior Técnico, University of Lisbon, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001 Lisboa, Portugal; jose.matos@tecnico.ulisboa.pt (J.P.M.); diogo.silva.mendes@tecnico.ulisboa.pt (D.M.); jose.saldanha.matos@tecnico.ulisboa.pt (J.S.M.)

² HIDRA, Hidráulica e Ambiente Lda, Av. Defensores de Chaves, 31, 1.º Esq., 1000-111 Lisboa, Portugal

* Correspondence: filipaferreira@tecnico.ulisboa.pt

Abstract: Flooding is a truly ubiquitous problem. Today, it puts an estimated 1.81 billion people at risk. Floods particularly affect coastal cities, where it is expected that the damage associated with inundations exceed the staggering value of USD 50 billion by 2050. Indeed, the risk associated with flooding in coastal cities is increasing due to three unequivocal trends: growing population in large urban centres, sea level rise, and increased intensity of extreme weather events. Planning and implementation of storm drainage systems in large cities is a complex, long, and expensive process. Typically, the effective lifespan of storm drainage systems may extend to nearly a century. Accordingly, such systems should be designed for the future, not the present. Addressing these important challenges, the paper evaluates flood risks in the coastal city of Maputo, in Mozambique. Results show that, although downtown Maputo is not particularly exposed to compound flooding, accounting for rainfall-tide events is essential to understand flooding in the area and evaluating the performance of the storm drainage system.

Keywords: climate change; combined flooding; drainage systems; flood risk; resiliency; stormwater; sea level rise



Citation: Matos, J.P.; Ferreira, F.; Mendes, D.; Matos, J.S. Evaluating Compound Flooding Risks in Coastal Cities under Climate Change—The Maputo Case Study, in Mozambique. *Sustainability* **2023**, *15*, 14497. <https://doi.org/10.3390/su151914497>

Academic Editors: Andrija Wajda and Andrija G. Capodaglio

Received: 31 July 2023

Revised: 26 September 2023

Accepted: 29 September 2023

Published: 5 October 2023



Copyright: © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

As inundações são um problema verdadeiramente ubíquo. Atualmente, estima-se que coloquem em risco cerca de 1,81 mil milhões de pessoas. As inundações afetam particularmente as cidades costeiras, onde se prevê que os danos associados às inundações ultrapassem o valor de 50 mil milhões de US\$ até 2050. De facto, o risco associado às inundações em cidades costeiras está a aumentar devido a três tendências inequívocas: crescimento populacional nos grandes centros urbanos, subida do nível médio do mar e intensificação dos eventos meteorológicos extremos.

O planeamento e implementação de sistemas de drenagem pluvial em grandes cidades é um processo complexo, moroso e dispendioso. Tipicamente, a vida útil efetiva destes sistemas pode estender-se por quase um século.

Neste contexto, os sistemas devem ser dimensionados tendo em vista o futuro, e não apenas as condições atuais. Com vista a responder a estes desafios relevantes, o presente artigo avalia os riscos de inundação na cidade costeira de Maputo, em Moçambique.

Os resultados demonstram que, embora o centro da cidade de Maputo não esteja particularmente exposto a inundações compostas, a consideração simultânea de eventos de precipitação e maré é essencial para compreender as inundações na área e avaliar o desempenho do sistema de drenagem pluvial.

Em determinados casos, precipitações intensas e níveis elevados do mar combinam-se, originando inundações extremas. Nestas condições, as inundações associadas aos sistemas de drenagem pluvial podem resultar de contributos individuais ou da combinação de diferentes mecanismos hidrológicos e marinhos, como a precipitação e os níveis de maré. Quando os fenómenos ocorrem em simultâneo, o evento de inundação pode ser definido como uma inundação composta. Nestes casos, a capacidade de drenagem do sistema pluvial depende não só da intensidade, distribuição e duração do evento de precipitação, mas também do intervalo temporal entre este e os níveis de maré alta (i.e., inundação por precipitação-maré).

A inundação composta é um fenómeno complexo e multidisciplinar, exigindo a integração de conceitos provenientes de áreas como a meteorologia, a hidrologia, a engenharia costeira, a drenagem urbana, a hidráulica e a estatística — não se tratando, contudo, de uma lista exhaustiva.

Para modelar este fenómeno de forma abrangente, é necessário simular:

- As condições meteorológicas, incluindo precipitação, ventos e pressão atmosférica;
- Os processos costeiros que afetam as variações do nível do mar, como os níveis de maré, a subida do nível médio do mar e as vagas de tempestade;
- Os processos de precipitação—escoamento, caracterizando fenómenos importantes como a infiltração, evaporação e escoamento superficial, fundamentais para estimar quando e quanto caudal pluvial atinge os sistemas de drenagem;
- O comportamento hidráulico dinâmico do escoamento no interior do sistema de drenagem pluvial, o qual adquire particular importância devido à ocorrência ou amplificação de efeitos de regolho provocados por níveis elevados do mar;
- A interação entre o escoamento subterrâneo no sistema de drenagem pluvial e o escoamento superficial após o início da inundação.

Neste estudo, será realizada uma avaliação do efeito do risco de inundação por precipitação-maré sobre o sistema de drenagem pluvial da cidade costeira de Maputo, tanto nas condições atuais como em cenários futuros de alterações climáticas, recorrendo a uma abordagem de incerteza total. Que se saiba, este é o primeiro estudo que avalia o risco de inundação por precipitação-maré nesta cidade.

O Município de Maputo, com o apoio do Banco Mundial, está a implementar desde 2021 o “Projeto de Transformação Urbana de Maputo” (PTUM) [15]. O principal objetivo do PTUM é melhorar as infraestruturas urbanas e reforçar a capacidade institucional para promover um desenvolvimento urbano sustentável na cidade. No âmbito do PTUM, foi desenvolvido um projeto de execução para a reabilitação do sistema de drenagem da zona baixa da cidade de Maputo (o denominado Sistema 1), com o objetivo de reduzir significativamente os problemas de inundação para precipitações de projeto com um período de retorno mínimo de 10 anos. Assim, a análise de inundações compostas reveste-se de especial relevância em zonas planas e de baixa cota, expostas a variações significativas do nível do mar.

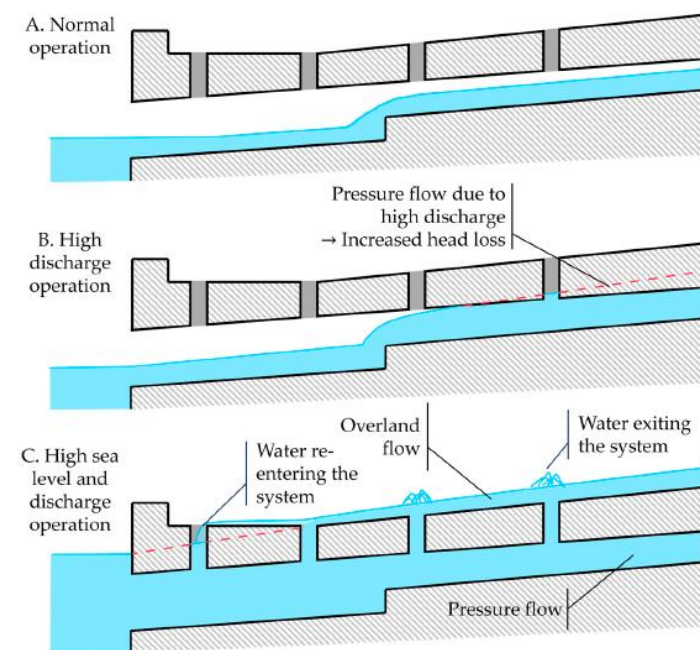


Figure 1. Scheme of flooding due to combined effects in coastal storm drainage systems.

Para estudar as causas das inundações na baixa de Maputo, incluindo os efeitos combinados da precipitação e do nível do mar, bem como o potencial impacto das alterações climáticas, foram testados modelos numéricos dos sistemas de drenagem pluvial existentes e propostos, sob uma ampla gama de combinações de intensidades de precipitação e níveis de água do mar.

A metodologia seguida está alinhada com a abordagem integrada de adaptação urbana às alterações climáticas proposta por Kourtis e Tsihrintzis [11], uma vez que considera projeções de alterações climáticas, desenvolvimento urbano expectável, análise hidrológica-hidráulica, cenários de adaptação e avaliação do risco de inundação.

Através da simulação dinâmica dos sistemas para cada combinação, foi determinado o perfil de risco de inundação da área em estudo. A intensidade da inundação foi representada como o integral do volume de água ao longo do tempo.

Na ausência de dados de monitorização, o modelo foi validado por comparação dos resultados da simulação com observações registadas de eventos passados, nomeadamente com as alturas de inundação reportadas em inquéritos realizados em 2022 a entidades sediadas na baixa de Maputo.

Uma abordagem unidimensional (1D) foi considerada adequada para a análise realizada, pelo que o escoamento superficial (overland flow) não foi incluído.

Os modelos numéricos dos sistemas de drenagem pluvial existente e futuro, após intervenções de beneficiação, em Maputo, foram testados em dois cenários: um cenário de referência que reproduz as condições atuais dos eventos de precipitação e variabilidade do nível do mar, e um cenário futuro que incorpora possíveis efeitos das alterações climáticas. Os eventos de precipitação foram caracterizados com base em curvas intensidade–duração–frequência (IDF) publicadas para Maputo. Para a caracterização da precipitação, a duração do evento e a forma do hietograma correspondente são parâmetros relevantes. Numa simplificação adotada, considerou-se uma duração de 60 minutos e um hidrograma de projeto genérico.

A distribuição probabilística dos níveis do mar baseou-se nas marés astronómicas, tendo sido negligenciados os efeitos de storm surge. Adicionalmente, as variações do nível do mar durante o evento não foram consideradas, assumindo-se nível do mar estático em cada simulação.

No caso de inundações compostas, os níveis elevados da água do mar podem contribuir para a inundação de várias formas, nomeadamente:

- Inundação direta de áreas situadas abaixo do nível de maré;
- Redução da secção útil do sistema de drenagem nas zonas baixas, originando extravasamentos de águas pluviais;
- Elevação do nível da linha piezométrica no sistema, resultando na redução do raio hidráulico, no estabelecimento de escoamento sob pressão em algumas secções e no aumento das perdas de carga.

Na análise deste tipo de sistema, faz sentido avaliar as inundações não apenas sob a perspectiva da quantidade de água que sai do sistema, mas também considerando o tempo durante o qual essa água permanece à superfície. Assim, e conforme referido anteriormente, este estudo modela a intensidade da inundação como o integral do volume inundado ao longo do tempo.

A análise foi realizada recorrendo a uma abordagem de incerteza total, que combina a distribuição estatística dos níveis de maré com uma distribuição estatística ajustada às alterações do nível médio do mar modeladas.

Conforme detalhado na Secção 4.4, a topografia de Maputo confere à cidade uma resiliência relativa às inundações compostas. Em cidades com topografias mais baixas e planas, espera-se que as inundações compostas assumam um papel significativamente mais relevante.

Da análise realizada, é possível concluir que:

- Embora a baixa de Maputo não esteja particularmente exposta a inundações compostas, a consideração de eventos combinados de precipitação e maré é essencial para compreender os fenómenos de inundação na área e avaliar o desempenho do sistema de drenagem pluvial;
- As alterações climáticas irão agravar o risco de inundação na cidade, tornando a análise de inundações compostas cada vez mais relevante no futuro;
- As intervenções de reabilitação propostas para o Sistema 1 terão um efeito extremamente benéfico para a cidade, reduzindo significativamente a ocorrência de inundações mesmo em cenários climáticos futuros pessimistas (reduções na ordem dos 90% para o sistema proposto, em condições projetadas para 2100, para eventos com um período de retorno de 10 anos);
- A correlação entre precipitação e efeitos de vagas de tempestade (fenómeno provável na região) pode afetar o perfil de risco. No futuro, poderá ser interessante analisar o comportamento estatístico conjunto dos eventos de precipitação e vagas de tempestade em Maputo, eventualmente complementando essa análise com o uso de um modelo acoplado 1D-2D, incorporando o escoamento superficial, o comportamento dos órgãos de entrada (inlets) e os riscos de obstrução parcial (por exemplo, por sedimentação) no desempenho global do sistema.