

ANÁLISE PROBABILÍSTICA DA VULNERABILIDADE DA ZONA COSTEIRA DA CIDADE DE MAPUTO A TEMPESTADES MARÍTIMAS

Fátima F. ISMAEL¹; Jaime PALALANE²; Tiago C. A. OLIVEIRA³

RESUMO

A costa moçambicana apresenta núcleos de desenvolvimento cada vez mais fortes que demandam o uso de metodologias sólidas para a avaliação da vulnerabilidade a tempestades marítimas de praias e suas infraestruturas, e que sejam ao mesmo tempo úteis para o planeamento e gestão das zonas costeiras. Neste contexto, foi empregue uma metodologia de análise probabilística da vulnerabilidade costeira a tempestades a 4.4 km da costa Este da Cidade de Maputo, dividido em trechos com características similares. Para sua aplicação, gerou-se séries de tempestades para cada trecho, tendo-se escolhido uma série de 183 temporais ao largo da Baía de Maputo identificados em estudos anteriores. Procedeu-se à propagação para o interior da baía com recurso ao modelo SWAN e a teoria de propagação linear, definindo-se as direções de onda que atingem a área de estudo. Com essas séries de temporais, calculou-se, com recurso a formulações empíricas e modelos analíticos os impactos inerentes às tempestades, traduzidos em séries de espraiamento, galgamento e erosão. Procedeu-se posteriormente à análise estatística das séries associando os impactos a diferentes períodos de retorno. Os resultados do estudo para os diversos trechos e períodos de retorno considerados são apresentados em mapas de vulnerabilidade, definindo-se as classes e os valores limite a considerar. Analisando-se a vulnerabilidade resultante, relativamente à inundação, verifica-se que os trechos que apresentavam água no pé da estrutura em maré de projeto estavam sujeitos a vulnerabilidades médias a muito altas. Para os trechos com praia à frente da estrutura, mesmo em maré alta a vulnerabilidade reduz significativamente para muito baixa. No que concerne a erosão de praia, todos os trechos apresentam vulnerabilidades muito altas. A vulnerabilidade não se alterou considerando diferentes períodos de retorno, indicando que para sua redução há necessidade de intervenções na morfologia de praia ou nas estruturas existentes.

Palavras-chave: Costa De Maputo; Erosão; Inundação; Tempestades; Vulnerabilidade.

¹ Licenciada em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia - Universidade Eduardo Mondlane; Av. De Moçambique, km 1.5, Cidade de Maputo, Moçambique; fatimafarukismael@gmail.com, Telefone: +258 823336000.

² Mestre e Assistente, Departamento de Engenharia Civil - Universidade Eduardo Mondlane; Av. De Moçambique, km 1.5, Cidade de Maputo, Moçambique; jaime.palalane@uem.mz, Telefone: +258 21475311.

³ Doutor e Investigador, Laboratório de Engenharia Marítima – Universidade Politécnica da Catalunha; Carrer Jordi Girona 1-3, 080034 Barcelona, Espanha; tiago.oliveira@upc.edu, Telefone: +34 934017393

1. INTRODUÇÃO

Moçambique apresenta uma costa vasta, com aproximadamente 2700 km de extensão. O Censo de 2007 (INE, 2007) indicou que 40% da população moçambicana vive em distritos costeiros. Esta percentagem tende a crescer devido à presença de núcleos de desenvolvimento cada vez mais fortes junto à costa (Palalane *et al.*, 2013). A crescente afluência às zonas costeiras aumenta a necessidade de se dispor de ferramentas que permitam caracterizar as infraestruturas e praias na zona costeira de Moçambique, com o intuito de analisar a vulnerabilidade a estas associada e reduzir assim o risco. Em reconhecimento desta necessidade, foi desenvolvido o presente estudo que testou uma metodologia de análise da vulnerabilidade a tempestades com potencial para oferecer uma boa base para o processo de decisão sobre intervenções de proteção costeira e de alocação de recursos para prevenção de diferentes problemas costeiros. A metodologia define a probabilidade de ocorrência de um determinado perigo resultante de uma tempestade, relacionando-a com a capacidade reativa do sistema costeiro e, assim, a vulnerabilidade associada para a zona de estudo.

O objetivo geral deste estudo é identificar e testar uma metodologia de análise da vulnerabilidade de zonas costeiras à erosão e inundação válida para a seleção e priorização de intervenções de proteção e desenvolvimento de zonas costeiras em Moçambique.

2. METODOLOGIA

Para análise da vulnerabilidade adotou-se a metodologia desenvolvida por Bosom e Jiménez (2011), onde, segundo estes autores, vulnerabilidade à ação de tempestades é a potencialidade de um sistema costeiro de ser prejudicado ou alterado pelo impacto de tempestades. A escolha desta metodologia foi devido a observação dos problemas encontrados na área de estudo, ou seja, os perigos observados. De acordo com Mazzer (2007), perigo pode ser definido como um fenómeno natural ou não, factos sociais ou assemelhados que provocam algum tipo de perda aos componentes do meio ambiente, sendo caracterizados pela sua intensidade.

Para a escolha da área de estudo, analisou-se um conceito inerente a vulnerabilidade, o risco, que é definido como a probabilidade entre um evento e suas consequências negativas (ISDR, 2004). Como área de estudo, foi selecionado um trecho da costa Este da Cidade de Maputo com 4.4 km de extensão que apresenta um alto nível de desenvolvimento costeiro e uma diversidade de estruturas de proteção. Este trecho estende-se do Clube Naval, limite Sul, a 730 m a Norte do Clube Marítimo, como ilustrado na Figura 1. Contribuiu para a escolha desta área, a facilidade de se efetuar levantamentos *in situ*, a existência de dados de clima de ondas e indícios de ocorrência de erosão e galgamentos provocados por eventos extremos. De acordo com os resultados obtidos em Bjornberg e Wahlström (2012), Viola (2013) e Viola *et al.* (2014), a erosão acentuada verificada nesta zona e que é bem notável pela perda de largura de praia não é explicada pelo transporte longitudinal de sedimentos, sugerindo-se que a principal causa modeladora da costa seriam a ação das tempestades marítimas. A área de estudo foi dividida em sete trechos, conforme a Figura 1. A repartição foi baseada essencialmente no tipo de estrutura de proteção existente, tomando-se em consideração também se tratava-se de um troço com praia ou sem praia.

Teve-se ainda em conta as características da agitação local, de acordo com a orientação da costa, o perfil de praia existente e a granulometria dos sedimentos na área.



Figura 1. Localização da área de estudo e dos troços definidos para análise (Modificado de *Google Earth* 2014)

A metodologia proposta, por analisar em separado os fenómenos da erosão e inundação, permite a adoção de medidas corretivas mais direcionadas para cada processo. Ainda, por introduzir o período de retorno associado aos processos induzidos por tempestades, permite a melhor gestão das medidas de redução do risco.

As metodologias adotadas para a obtenção dos dados de agitação marítima junto à costa, vulnerabilidade à erosão e inundação por trechos, análise estatística e especificação dos intervalos de vulnerabilidade são descritas em secções específicas, apresentadas a seguir.

2.1 Agitação marítima

No que concerne ao clima de agitação, Moçambique não dispõe de medições instrumentais contínuas (e de longa duração) de ondas para obtenção de informação referente ao clima de agitação. No entanto, dispunha-se de dados de agitação do clima extremo para um ponto em águas profundas localizado ao largo da Baía de Maputo, a 600 km da costa com coordenadas 38.75° Este de Longitude e 26° Sul de Latitude obtidos através da análise de dados de *hindcast* (Guiloviça *et al.*, 2011). Para se proceder à análise da vulnerabilidade propagou-se, numa primeira fase, com recurso ao modelo SWAN (*Simulating WAVes Nearshore*), os dados de agitação até a batimétrica de 60 m. Prosseguiu-se de seguida com uma propagação linear até ao pé das estruturas devido a ausência de mapas batimétricos digitalizados e com uma boa precisão para a propagação no interior da baía.

Porque a área de estudo localiza-se no interior de uma baía, numa análise separada, gerou-se também ondas a partir de ventos extremos locais. Para a determinação das

características de ondas geradas por ventos extremos locais, recorreu-se a velocidades e direção de vento de reanálise, extraídos do repositório do ECMWF - *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*, ERA-Interim. Deste repositório, foi extraída uma série de dados de vento com 34 anos, de 1979 a 2012, com intervalos de seis horas. Os dados de vento foram extraídos para um ponto no interior da Baía de Maputo, com coordenadas 32.75° Este e 26° Sul. O cálculo das alturas e período de ondas para diferentes direções de incidência do vento e os respetivos *fetchs* foi feito seguindo o procedimento proposto pelo *Shore Protection Manual* (USACE, 1984). Com os dados de ondas gerados dentro da baía por ação de ventos locais, procedeu-se ao cálculo de inundação e erosão nos diferentes trechos e posteriormente analisou-se a vulnerabilidade associada.

2.2 Vulnerabilidade à inundação

Para a análise da vulnerabilidade à inundação considerou-se dois fenómenos físicos associados, o galgamento e o espraimento. Estes fenómenos foram determinados com recurso à formulações empíricas já bem estabelecidas no estado da arte e validadas por em modelos físicos e observações *in situ*. Para a estimativa da vulnerabilidade à inundação em estruturas de proteção costeira, considerou-se apenas o galgamento, pois, é a consequência final do espraimento, galgamento este traduzido em caudais médios galgados. Relativamente aos trechos de praia, determinou-se a vulnerabilidade à inundação pelo cálculo do espraimento. O cálculo dos caudais médios galgados foi feito com recurso às diversas formulações, de acordo com as características específicas de cada trecho, relativamente ao tipo de estrutura de proteção e características do clima de agitação. Foi excluído da análise o Trecho 5, caracterizada por apresentar uma estrutura vertical em dois níveis, por não ter sido possível encontrar uma fórmula empírica que se adapte às características específicas da estrutura deste trecho.

2.2.1 Trecho 1

O Trecho 1 é caracterizado pela ocorrência de um paredão vertical com enrocamento no pé (Figura 2). A extensão do trecho é de 235 m. Foram adotados os extremos das vagas geradas pelos ventos locais, visto que as ondas propagadas apresentavam valores de período de onda muito elevados.

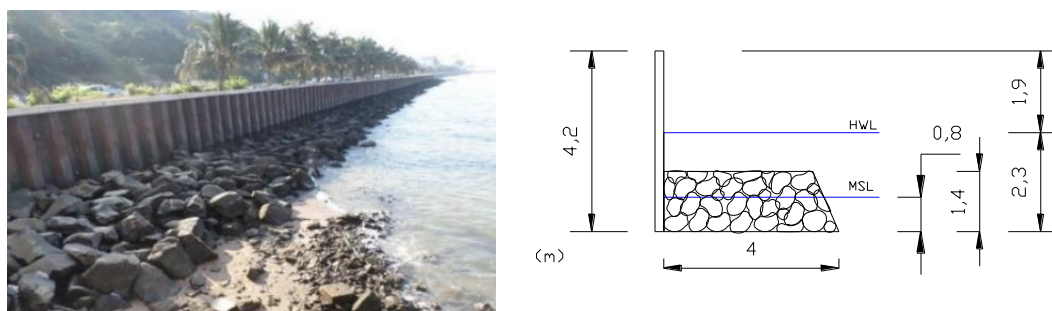


Figura 2. Foto ilustrativa do Trecho 1 e a respetiva secção tipo considerada para o cálculo do galgamento (unidades em metro).

Por não apresentar largura de praia, só foi feita a análise da inundação. Para tal foi empregue a fórmula do EUROTOP (EurOtop, 2008):

$$\frac{q}{d_*^2 \sqrt{gh_s^3}} = 7.8 \times 10^{-4} \left(d_* \frac{R_c}{H_{m0}} \right)^{-2.6} \quad (1)$$

sendo:

- q - caudal médio galgado ($m^3/s/m$ de estrutura);
- d_* - parâmetro impulsivo;
- g - aceleração de gravidade (m/s^2);
- h_s - altura de água no pé da estrutura (m);
- R_c - borda livre - medida do nível de água estático ao coroamento da estrutura (m);
- H_{m0} - altura de onda significativa espectral (m);
- h^* - parâmetro impulsivo para estruturas verticais simples

2.2.2 Trecho 2

O Trecho 2 é caracterizado por apresentar uma estrutura quase vertical protegida com berma de enrocamento com paramento 1:3 (Figura 3). No entanto, para o cálculo do galgamento considerou-se um paramento de 1:5 por ser o mais próximo dos paramentos para os quais fez-se o estudo do galgamento. A extensão do trecho é de 1130 m. Tal como o trecho 1, também foram adotados os extremos das vagas geradas pelos ventos locais.

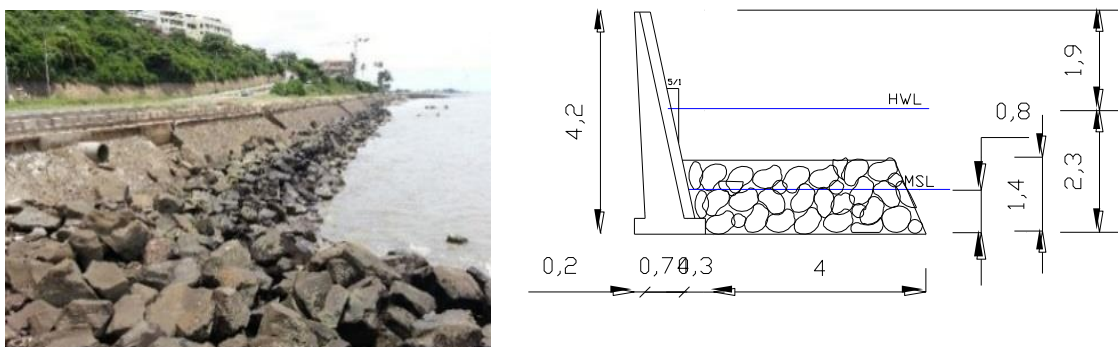


Figura 3. Foto ilustrativa do Trecho 2 e a respetiva secção tipo considerada para o cálculo do galgamento (unidades em metro).

Este trecho não apresenta largura de praia, logo, só foi feita a análise da inundação. Foi empregue a fórmula do EUROTOP (EurOtop, 2008) apresentada pela equação:

$$q_{1:5} = q_{vertical} \times 1.9 \quad (2)$$

sendo:

- $q_{1:5}$ - caudal médio galgado para estrutura quase vertical de paramento 1:5 ($m^3/s/m$);
- $q_{vertical}$ - caudal médio galgado para estrutura vertical calculado pela Equação 1 ($m^3/s/m$);

2.2.3 Trecho 3

O Trecho 3 apresenta uma estrutura vertical com o pé emergente e com o perfil de praia em frente à estrutura de 1:12.5 (Figura 4). A extensão do trecho é de 1455 m. Considerou-se para os cálculos os extremos das vagas geradas pelos ventos locais, visto que os dados propagados resultaram em valores de caudais muito elevados, não plausíveis.

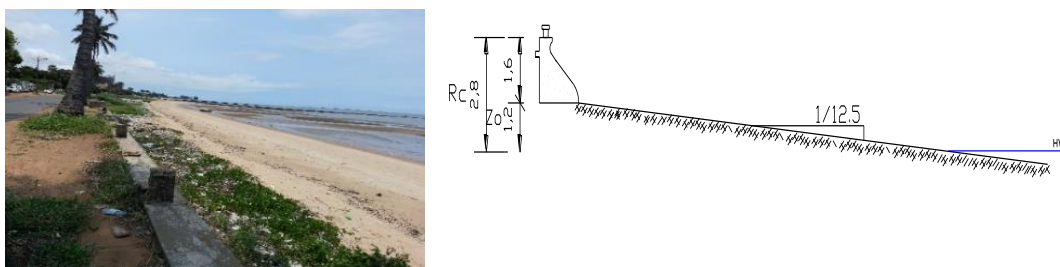


Figura 4. Foto ilustrativa do Trecho 3 e a respetiva secção tipo considerada para o cálculo do galgamento (unidades em metro).

Este trecho já apresentava largura de praia, pela influência dos esporões existentes, assim, foi feita a análise da inundação e da erosão. Relativamente ao galgamento foi empregue a fórmula do EUROTOP (EurOtop, 2008) apresentada pela Equação 3, para a aplicação da fórmula considerou-se perfil de praia em frente à estrutura de 1:10.

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0,deep}^3}} \times \sqrt{mS_{m-1,0}} = 0.043e^{(-1.95mS_{m-1,0}^{0.33} \frac{R_c}{H_{m0,deep}})} \quad (3)$$

Sendo:

- q , g e R_c - parâmetros similares aos definidos para a Equação 1;
- m - perfil de praia em frente a estrutura de proteção;
- $S_{m-1,0}$ - declividade de onda média espectral em águas profundas;
- $L_{m-1,0}$ - comprimento de onda médio espectral (m);
- $H_{m0,deep}$ - altura de onda média espectral em águas profundas (m).

2.2.4 Trecho 4

O Trecho 4 é caracterizado por não apresentar estrutura de proteção sendo a estrada adjacente protegida por dunas de alturas variáveis, entre 1 a 3m (Figura 5). A extensão do trecho é de 545 m. Foram adotados dados de ondas resultantes da propagação ao largo por causa da metodologia proposta para o caso específico deste trecho.

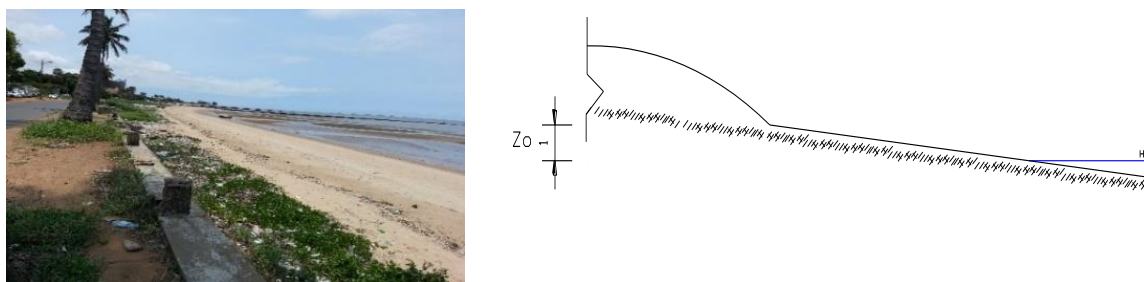


Figura 5. Foto ilustrativa do Trecho 4 e a respetiva secção tipo considerada para o cálculo do galgamento (unidades em metro).

Este trecho, tal como o anterior, apresenta largura de praia, logo, foi feita a análise da inundação e da erosão. Foram empregues as fórmulas de Stockdon *et al.* (2006), apresentadas pelas seguintes equações:

$$\xi < 0.3; R_{2\%} = (0.043H_0L_0)^{1/2} \quad (4)$$

$$\xi > 1.25; R_{2\%} = 1.1 \left\{ 0.35\beta_f(H_0L_0)^{1/2} + \frac{[H_0L_0(0.563\beta_f^2 + 0.004)]^{1/2}}{2} \right\} \quad (5)$$

em que $\xi = \left(\frac{\tan \alpha}{\sqrt{s_0}}\right)^{0.5}$, $s_0 = \frac{H_0}{L_0}$, $L_0 = \frac{gT_p^2}{2\pi}$, sendo:

- ξ - número de Iribaren, define o modo de rebentação de onda;
- s_0 - declividade de onda;
- $R_{2\%}$ - espraioamento representativo de 2% das ondas incidentes (m);
- H_0 - altura de onda significativa ao largo (m);
- L_0 - comprimento de onda (m);
- T_p - período de pico (s);
- β_f - inclinação do perfil da praia.

2.2.5 Trecho 6

O Trecho 6, tal como o 4, é caracterizado por não apresentar estrutura de proteção sendo protegido com formação dunar de aproximadamente 2 m de altura (Figura 6). A extensão do trecho é de 260 m. Pela metodologia proposta, foram adotados dados de ondas resultantes da propagação ao largo.

Este trecho, por apresentar largura de praia, foi feita a análise da inundação e da erosão. Para o cálculo da inundação, considerou-se o espraioamento tendo-se procedido à metodologia descrita para o Trecho 4, Equações 4 e 5.

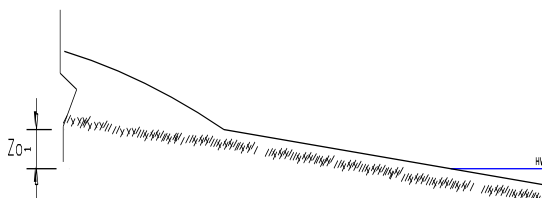


Figura 6. Foto ilustrativa do Trecho 6 e a respetiva secção tipo considerada para o cálculo do galgamento

2.2.6 Trecho 7

O Trecho 7 é caracterizado por apresentar Estrutura em talude impermeável com ondas a incidirem a mesma obliquamente (Figura 7). Devido à localização desta estrutura considera-se a ação sobre esta de ondas geradas fora da baía pouco frequente. Por este facto optou-se pelo estudo recorrendo ondas geradas pelos ventos locais.

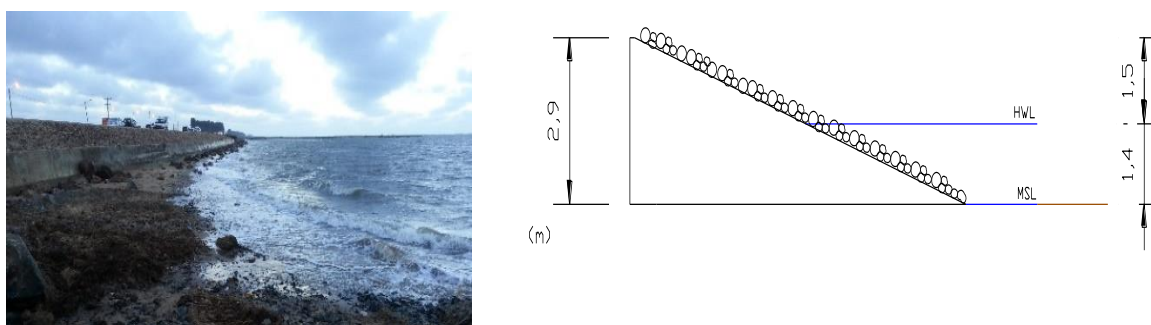


Figura 7. Foto ilustrativa do Trecho 7 e a respetiva secção tipo considerada para o cálculo do galgamento

Para este trecho, por não apresentar largura de praia, só foi feita a análise da inundação. Foi empregue a fórmula do Manual do Delft (van der Meer e Janssen, 1994) apresentada pelas Equações 6 e 7, para a condição de ondas que rebentam e que não rebentam, respetivamente

$$\xi_{op} < 2 \rightarrow Q_b = \frac{q}{\sqrt{gH_s^3}} \times \sqrt{\frac{s_{op}}{tg\alpha}} \quad (6)$$

$$\xi_{op} > 2 \rightarrow Q_n = \frac{q}{\sqrt{gH_s^3}} \quad (7)$$

sendo:

ξ_{op} , q , g , H_s , s_{op} , R_c - parâmetros apresentados pelas Equações 1 a 4;

Q_b e Q_n - valores adimensionais do galgamento para ondas que rebentam e que não rebentam na estrutura;

R_b e R_n - valores adimensionais da altura da crista em condições de ondas que rebentam e que não rebentam na estrutura;

α - ângulo formado entre a estrutura e a horizontal.

2.3 Vulnerabilidade à erosão

No que concerne ao cálculo da erosão, recorreu-se a uma fórmula empírica apresentada em Larson *et al.* (2004), que relaciona o volume erodido com a força resultante do impacto das ondas. Recorreu-se a esta metodologia por ser a menos morosa e por permitir que se faça a análise da erosão da duna que é a última linha de defesa em praias. O volume erodido para um determinado evento é calculado a partir da equação:

$$\Delta V_E = 4C_S(R - z_0)^2 \frac{t}{T} \quad (8)$$

sendo:

ΔV_E - volume erodido durante o evento de tempestade (m^3/m);

C_S - coeficiente de transporte empírico;

R - espriamento da onda que origina a erosão (m);

z_0 - distância vertical entre o pé da duna e o nível de água estático, correspondente ao nível médio das águas do mar;

t e T - duração da tempestade (s) e período de onda (s).

Os dados de onda considerados para o cálculo foram as vagas. A duração da tempestade foi de 1.5 dias. Esta foi determinada como a média das durações das tempestades definidas em Guiloviça (2011) e Guiloviça *et al.* (2011). O coeficiente de transporte empírico foi calculado considerando diâmetros médios dos sedimentos de 0.38 mm para o troço 3 e de 0.55 mm para o troço 4, ambos de acordo com dados obtidos por Björnberg e Wahlström (2012). O diâmetro médio para o troço 6 foi de 0.47 mm, de acordo com levantamentos feitos durante o projeto de Reabilitação e Construção da Proteção Costeira da Cidade de Maputo.

2.4 Análise estatística

A análise estatística foi empregue para determinação das magnitudes do galgamento e erosão associados a determinados períodos de retorno. Antes do ajuste das séries, fez-se a verificação da sua aleatoriedade recorrendo-se aos testes de autocorrelação, ordenação e extremos locais. Os ajustamentos foram feitos às funções de distribuição Log-Normal de 2 parâmetros (LN2), Log-Normal de 3 parâmetros (LN3), Pearson Tipo 3 e Gumbel. A qualidade dos ajustamentos foram verificados com os testes do Qui-Quadrado e Kolmogorov-Smirnov. Por último, determinou-se a função com melhor ajustamento recorrendo-se ao índice de adaptabilidade. Empregando para cada um dos troços as funções de distribuição teóricas que conferiram melhor ajuste, foram calculadas as magnitudes de eventos de galgamento e erosão para períodos de retorno de 5, 10, 20, 30 e 50 anos.

2.5 Limites de vulnerabilidade

Para a determinação dos limites de vulnerabilidade, considerou-se cinco categorias de vulnerabilidade, baseadas na metodologia de análise desenvolvida por Bosom e Jiménez (2011). São elas: (1) muito baixa, (2) baixa; (3) média; (4) alta; (5) muito alta.

Para o perigo de galgamento, foram estabelecidos diferentes limites de inundação, conforme se tenha em conta a ação do galgamento sobre: (1) peões, (2) veículos; ou (3) estruturas. Esta diferenciação dos limites de vulnerabilidade por agentes foi ditada pelo facto de o espraio e galgamento afetar de forma diferente a cada um deles. Na ausência de estudos, guiões de boas práticas ou regulamentação específica para Moçambique, recorreu-se para definição dos limites de vulnerabilidade ao galgamento a combinação e ponderação dos valores propostos pelo EUROTOP (EurOtop, 2008) e pelo CEM - *Coastal Engineering Manual* (USACE, 2011). A Figura 8 apresenta de forma esquemática os valores limites adotados para cada classe de vulnerabilidade, por agente.

Para o perigo espraio, a variável intermédia que permite caracterizar a vulnerabilidade é definida pela Equação 10 proposta por Bosom e Jiménez (2011),

$$IV = R_u / B_{max} \quad (10)$$

sendo:

- IV - variável intermédia para definir a vulnerabilidade ao espraio;
- R_u - espraio de onda (m);
- B_{max} - máximo valor da berma ou da altura da duna (m).

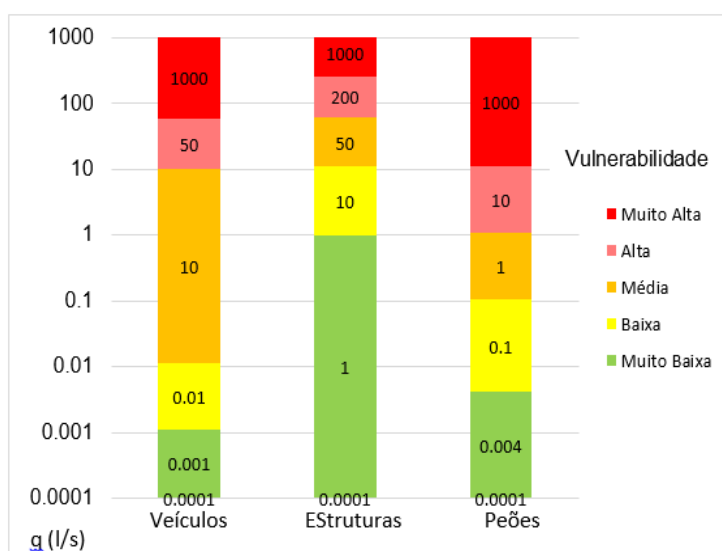


Figura 8. Categorização dos limites da vulnerabilidade ao galgamento por agentes

Para o nível de maré de projeto de 3.5 m, o mar atinge o pé das dunas sendo o valor de espraiamento zero correspondente ao pé da duna. Para a determinação do limite máximo da vulnerabilidade ao espraiamento, considerou-se um valor de espraiamento que excede em 2m a altura da duna (Bosom e Jiménez, 2011). A menor vulnerabilidade correspondente ao espraiamento que atinge o pé da duna, logo espraiamento zero. Fez-se corresponder o espraiamento zero ao limite inferior da vulnerabilidade muito baixa, igual a zero. Fez-se corresponder o valor mais alto de espraiamento ao limite superior da vulnerabilidade muito alta, com valor igual a um. Os restantes limites para as cinco classes de vulnerabilidade foram encontrados aplicando incrementos de vulnerabilidade de 0.2 (ver Figura 9).

Para o perigo erosão, os volumes erodidos determinados a partir da Equação 8, fórmula apresentada por Larson *et al.* (2004), foram transformados em valores de recuo da duna dados pela Equação 11. Esta expressão permite calcular o recuo em função do volume erodido (V_E) e da inclinação da ante praia β_f , como:

$$x = \sqrt{\frac{2V_E}{\tan \beta_f}} \quad (11)$$

O índice de vulnerabilidade será dado pela razão entre o recuo da duna e a sua largura máxima ($IV = x/x_{max}$). Da análise aos perfis de praia levantados, determinou-se a largura da duna até atingir a infraestrutura que é por esta protegida, no caso específico a estrada marginal. Esta largura foi associada ao limite superior de vulnerabilidade muito alta, pois para além da mesma já não existe mais duna nem largura de praia. Este valor foi fixado em 8 m para os troços 4 e 6, e em 5 m para o Troço 3. O gráfico com a categorização da vulnerabilidade foi generalizado para a largura máxima da duna de 8 m, observada em dois troços, correspondendo a vulnerabilidade máxima de 1. Assim sendo, um índice de vulnerabilidade $IV=1$, corresponderá a um valor de taxa de recuo x igual a largura máxima. Fez-se corresponder o valor mínimo de vulnerabilidade zero ao início da erosão da duna. Os

restantes limites para as cinco classes de vulnerabilidade foram encontrados aplicando incrementos de vulnerabilidade de 0.2, conforme ilustra a Figura 9.

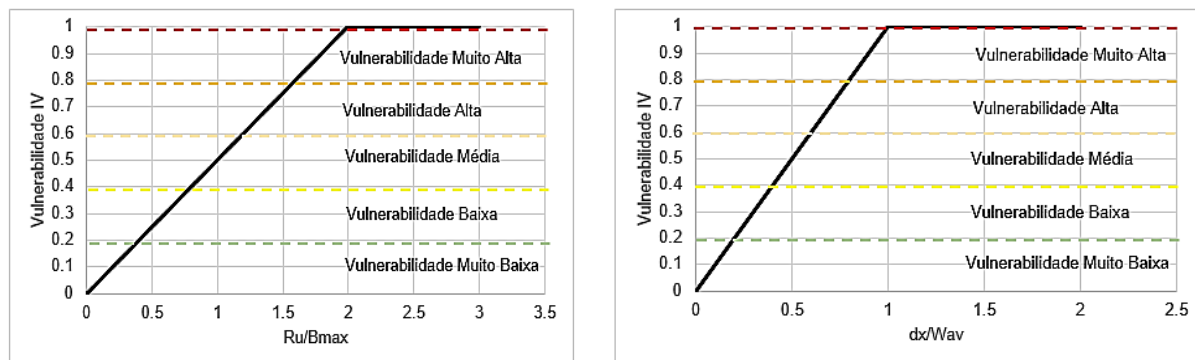


Figura 9. Categorização dos limites da vulnerabilidade para eventos de espraio (R_u/B_{max} , a esquerda) e para erosão (dx/W_{av} , a direita)

3. RESULTADOS

As ondas de tempestade ao largo foram propagadas até a batimétrica 10 m. As alturas das ondas de tempestade propagadas variaram entre um mínimo de 2.59 m e um máximo de 5.04 m, com um valor médio de 3.50 m. Os períodos de pico oscilaram entre 9.1 s e 16.2 s, com um valor médio de 12.3 s. Para os casos em que as fórmulas empregues usam como dados as características das ondas junto a costa, estas foram propagadas procurando-se obter alturas verossímeis considerando a relação altura de onda e profundidade. Notou-se pela propagação que as ondas do III quadrante resultavam em menores valores pelo maior desvio de direção inicial de onda, resultando numa maior perda energética. Notou-se ainda que os coeficientes de propagação aumentavam para menores profundidades, devido a um aumento do coeficiente de empolamento. Para as ondas geradas por ventos locais, obteve-se para a altura e período de onda valores médios de 1.30 m e 4.2 s, valores máximos de 1.64 m e 4.7s, e mínimos de 1.03 m e 3.9 s.

Os valores de caudais médios galgados, espraio e erosão mostraram uma significativa variação de troço para troço, conforme patente na Tabela 1. Relativamente aos caudais médios galgados, verificou-se que o troço com maior valor de caudal médio foi o segundo troço. Das observações *in situ*, nota-se claramente que este é um dos troços mais vulneráveis ao galgamentos. O terceiro troço apresentou os menores valores, pois, é o único em que com o nível de maré alta a água não atinge o pé da estrutura. Relativamente ao espraio, o maior valor encontra-se associado às dunas do troço 4 por apresentar um perfil de praia mais suave. No que concerne à erosão, verificou-se que o troço com maior valor foi o troço 6, pois, a série de alturas de onda que chegam ao mesmo apresentam valores mais altos. O troço com menor valor de volume erodido foi o terceiro, associado a maior borda livre, por ter um perfil de praia mais estável e maior largura de praia devido a influência dos esporões existentes.

As funções de distribuição teórica que conferiram melhor ajuste foram: a LN3 para as séries de galgamento e de erosão, e Pearson Tipo 3 para as séries de espraimento. Para o troço 3, o melhor ajuste foi obtido pela função a LN2, pese embora tenha sido fraco. As distribuições teóricas que conferiram melhor ajuste foram empregues para determinar as magnitudes dos eventos de inundação e erosão para tempestades com períodos de retorno de 5, 10, 20, 30 e 50 anos. Com recurso aos gráficos dos limites de vulnerabilidade (Figuras 8 e 9), foram categorizadas as vulnerabilidades por troço, constando os resultados das Figuras 10 e 11.

4. DISCUSSÃO

Os mapas de vulnerabilidade à inundação demonstram que de um modo geral a vulnerabilidade dos troços sujeitos a este fenómeno não se altera com o período de retorno. Assim, uma intervenção para o caso onde são verificados valores muito altos de vulnerabilidade à inundação teria de estar associada não só à alteração do nível do coroamento da estrutura como também a uma intervenção no perfil de praia, por exemplo recorrendo à alimentação artificial da praia de modo a permitir que se reduza a vulnerabilidade associada.

Tabela 1. Caudais médios galgados, espraimento e erosão associados aos períodos de retorno: 5,10,20,30 e 50 para os diversos troços

Troço Fenómeno	Caudal médio (l/s/m), espraimento (m) erosão (m ³ /m)				
	T _r = 5 anos	T _r = 10 anos	T _r = 20 anos	T _r = 30 anos	T _r = 50 anos
1 - Galgamento	16.55	18.90	21.16	22.46	24.10
2 - Galgamento	31.45	35.91	40.20	42.67	45.78
3 - Galgamento	1.81x10 ⁻⁴	2.88x10 ⁻⁴	4.23x10 ⁻⁴	5.17x10 ⁻⁴	6.52x10 ⁻⁴
4 - Espraimento	0.66	0.72	0.78	0.81	0.84
6 - Espraimento	0.51	0.55	0.60	0.62	0.65
7 - Galgamento	21.90	25.78	29.61	31.87	34.74
3 - Erosão	1.95	2.66	3.38	3.82	4.38
4 ² - Erosão	1.93	2.79	3.68	4.23	4.93
6 ² - Erosão	4.91	6.20	7.44	8.16	9.06

Os troços 1, 2 e 7 são os troços que apresentam as maiores vulnerabilidades à inundação, com vulnerabilidades muito altas a passagem de peões, significando que um sistema de alerta para impedir a passagem dos mesmos em situações de tempestade seria uma boa solução para reduzir o risco associado. A vulnerabilidade destes troços relativa a danos em estruturas é média, mesmo quando se considera os períodos de retorno mais altos de 30 e 50 anos.

Relativamente aos danos em veículos, a vulnerabilidade é alta. Esta constatação é inquietante, considerando o contínuo aumento do tráfego médio diário nas estradas adjacentes aos troços estudados. Assim, para opor-se a este elevado nível de vulnerabilidade, existe a necessidade de intervenções estruturais nestes troços, ou a imposição de limites a circulação de veículos em situações de tempestades. Em oposição as

vulnerabilidades médias à altas dos troços 1, 2 e 7, os troços 3, 4 e 6, e ainda apresentam índices de vulnerabilidade à inundação que variam de baixa a muito baixa. Deste modo, pode-se considerar que não há necessidade de intervenções estruturais nestes troços.

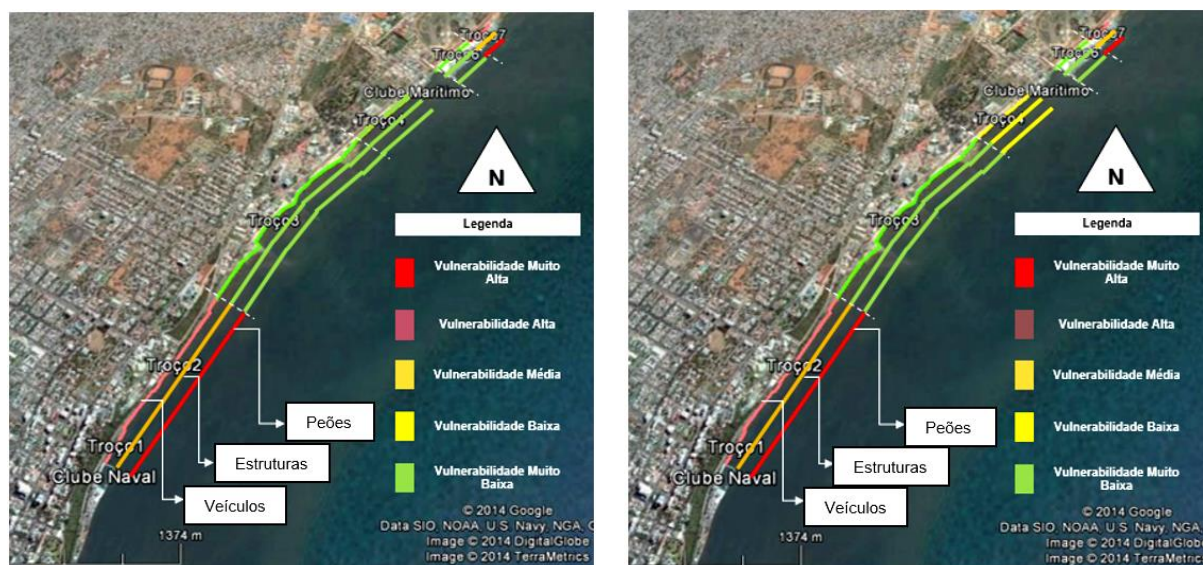


Figura 10. Mapa de vulnerabilidade   inundação (galgamento e períodos de retorno 30 e 50 anos (imagem espreiamento) para os agentes veículos, estruturas e peões, para tempestades com períodos de retorno 5, 10 e 20 anos (imagem   esquerda) e para tempestades com a direita).



Figura 11. Mapa de vulnerabilidade   erosão para tempestades com períodos de retorno 5,10,20,30 e 50 anos.

Para o perigo erosão, obteve-se para todos os troços sujeitos a este fen meno e para todos os períodos de retorno uma vulnerabilidade muito alta às tempestades. Assim, as infraestruturas situadas por detrs das dunas estão numa situação de risco, havendo

igualmente a possibilidade de aumento da vulnerabilidade ao espraiamento e galgamentos com a alteração do perfil de duna.

5. CONCLUSÕES

No presente trabalho analisou-se e classificou-se a vulnerabilidade da zona costeira da cidade de Maputo a tempestades. Os resultados obtidos confirmam os problemas verificados na zona de estudo durante a última década, onde foram muito frequentes os fenómenos de erosão de praia e inundação das vias públicas com consequentes danos para estruturas adjacentes. Neste sentido, conclui-se que a metodologia de análise da vulnerabilidade desenvolvida por Bosom e Jiménez (2011) pode ser usada neste tipo de estudos. Pela sua facilidade de aplicação considera-se que esta metodologia pode ser aplicada a outras partes de Moçambique com problemas similares e onde são inexistentes dados medidos de ondas e os dados batimétricos são de pouca qualidade. Para a zona estudada e tendo em conta os diferentes períodos de retorno analisados, os processos induzidos por tempestades mais relevantes para a vulnerabilidade são a erosão e a inundação.

Na quantificação da erosão e inundação, o uso de fórmulas empíricas mostrou-se uma metodologia fiável e rápida. No entanto devido à grande diversidade de configurações estruturais e morfologia de praia na zona de estudo, o uso de formulações empíricas apresentou limitações em algumas representações de estruturas de proteção e da morfologia de praia.

No cálculo das séries de inundação e erosão, as séries de dados de onda de maior aplicabilidade foram as geradas por ventos locais extremos. Este facto evidencia a necessidade de um estudo mais detalhado e alargado das condições de agitação geradas dentro da Baía de Maputo por ventos locais tendo em conta as características da batimetria e as variações de nível de água por maré astronómica e meteorológica em toda a baía.

A vulnerabilidade à inundação para a área de estudo varia de muito baixa a muito alta sendo os troços mais vulneráveis 1, 2 e 7 e os menos vulneráveis 3, 4 e 6. Vulnerabilidade a erosão com todos os troços apresentando vulnerabilidade alta.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho contou com o apoio da AECID - Agência Espanhola de Cooperação Internacional para o Desenvolvimento, através do financiamento concedido dentro do Programa de Cooperação Interuniversitária e Investigação Científica ao Projecto de Desenvolvimento do Ensino e Investigação em Engenharia Portuária e Costeira na Universidade Eduardo Mondlane (Projecto A1/037998/11).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

EurOtop (2008). Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual. Environmental Agency (UK), Expertise Netwerk Waterkeren (NL), Kuratorium für Forschung im Kiisteningenieurwesen (DE).

- Guiloviça, C.B. (2011). *Caracterização da Agitação Marítima ao largo da Baía de Maputo*. Tese de Licenciatura em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia, Universidade Eduardo Mondlane. Maputo.
- Guiloviça, C. B., Oliveira, T. C. A., Palalane, J., Grifoll, M., Gomez, J. & Spino, M. E. (2011). Caracterização da Agitação Marítima ao largo de Maputo. In: Proc. 7^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, PIANC-Portugal, Porto, Portugal, p. 15.
- INE - Instituto Nacional de Estatística (2014). *Portal de Dados Moçambique*. Maputo. <http://www.ine.gov.mz/en/DataAnalysis> (acedido em Fevereiro de 2014).
- Larson M., Erikson L., Hanson H. (2004). An analytical model to predict dune erosion due to wave impact. *Coastal Engineering* 51, 675-696.
- Mazzer, A., 2007. Proposta Metodológica para análise de vulnerabilidade da orla marítima à erosão costeira: Aplicação em praias arenosas da Costa Sudeste da Ilha de Santa Carolina. Porto Alegre, Brasil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Tese de Doutorado;
- Palalane, J., Grifoll, M., Oliveira, T. C. A. (2013). Monitorização e modelação da evolução costeira em Moçambique. Práticas e desafios. VII Congresso de Planeamento e Gestão de Zonas Costeiras, Maputo, Moçambique, p.11.
- Stockdon H., Holman R., Howd P., Sallenger A (2005). Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal Engineering* 53,573-588.
- USACE - US Army Corps of Engineers (1984). *Shore Protection Manual*. 4^a Edição, US Government Printing Office. Washington DC.
- USACE (2011). *Coastal Engineering Manual*. US Government Printing Office. Washington DC.
- Van der Meer J., Janssen J. (1994). Wave run-up and wave overtopping at dikes and revetments. *Delft Hydraulics*. Delft, Holanda.
- Viola, C. (2012). *Propagação da Agitação Marítima do Largo para à Costa De Maputo*. Tese de Licenciatura em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia, Universidade Eduardo Mondlane. Maputo.
- Viola C. N. A, Grifoll M., Palalane J., Oliveira T. C. A. 2014. Sea wave propagation from offshore to Maputo's coast. Application to longshore sediment transport assessment. *Water Science & Technology*, 69 (12), 2438–2445.