

# FERRAMENTA DE PLANEAMENTO DE RESILIÊNCIA CLIMÁTICA PARA ESTRADAS

Luís Fernandes<sup>1</sup>, Rubina Normahomed<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Administração Nacional de Estradas, Instituto Público (ANE, IP), Gabinete de Emergência, Avenida de Moçambique, N° 1225, Caixa Postal 1405, e-mail: dakotafernandes@yahoo.com, Maputo-Moçambique

<sup>2</sup>Administração Nacional de Estradas, Instituto Público (ANE, IP), Delegação Provincial da ANE, IP- Maputo, Avenida de Moçambique, N°. 1225, Caixa Postal 1405, e-mail: rubnormah@yahoo.com, Maputo-Moçambique.

---

## Sumário (Estilo: Sumário – 10, Bold)

*A metodologia utiliza uma abordagem baseada em dados geoespaciais e, em seguida, propõe uma análise económica inovadora.*

*As duas principais etapas envolvem (i) priorização de intervenções rodoviárias com base em um conjunto de critérios económicos, sociais e de redução de riscos; e (ii) avaliação de custos monetários e não monetários e benefícios das intervenções rodoviárias em muitos cenários que cobrem a incerteza sobre os riscos futuros e outros fatores. A análise prioriza as regiões ao longo da costa fazendo uma combinação com aspectos de agricultura, pesca, pobreza, criticidade da rede e critérios de risco devido a incertezas.*

---

**Palavras-chave:** Planeamento de transportes; mudanças climáticas; tomada de decisão robusta; análise geoespacial; priorização de estradas rurais.

## 1 INTRODUÇÃO

Moçambique é afectado por cheias anormais, depressões tropicais, ciclones e tempestades que repetidamente danificam as infraestruturas de transporte e criam interrupções na rede rodoviária. Desde tempos atrás a rede rodoviária moçambicana é caracterizada por uma redundância muito baixa, sendo que essas contínuas interrupções isolam as comunidades rurais por tempos indeterminados, tendo um impacto negativo significativo na economia local.

Incorporando componentes de adaptação ao clima e redução do risco de desastres naturais nos investimentos em transporte é, portanto, fundamental para garantir a confiabilidade do transporte de pessoas e bens, principalmente em áreas com baixa redundância rodoviária e alta exposição a eventos climáticos.

Além disso, em um cenário de orçamento bastante limitado e com muitas infraestruturas rodoviárias necessitando de reabilitação imediata, é importante priorizar as intervenções nas estradas rurais que irão desencadear os maiores benefícios sócio económicos, e garantir a confiabilidade da rede de transporte em eventos climáticos disruptivos.

A Ferramenta pretende igualmente, dente outras, responder às seguintes questões que muitos técnicos e gestores da ANE, IP têm colocado:

1. Quais são as mudanças climáticas esperadas em Moçambique?
2. Qual é o seu impacto esperado na rede rodoviária em Moçambique?
3. O que a ANE deve fazer diferente e quando? Quem exatamente deve fazer o quê?
4. Como fazer a priorização tendo em consideração os factores climáticos e a construção de infraestruturas resilientes?

Este artigo aborda os desafios para uma priorização de infraestruturas rodoviárias rurais (segmentos de estradas e dispositivos de drenagem) e propõe um método para: (i) identificar estradas vulneráveis, e (ii) auxiliar os tomadores de decisão na seleção de intervenções que podem garantir a confiabilidade da rede rodoviária para comunidades rurais. A metodologia é aplicada a um projeto de estradas vicinais nas zonas rurais. O documento está dividido em duas secções.

A primeira secção define a metodologia para identificar estradas críticas e vulneráveis. Nesta secção, analisa-se a criticidade das estradas, com base em métodos de desempenho da rede e atributos sócio económicos.

Em seguida, avalia-se a exposição e a vulnerabilidade da rede rodoviária às inundações dos rios e tempestades e calcula-se o risco de interrupção em cada distrito/localidade em vários cenários futuros. Por fim, combina-se a criticidade e risco para identificar quais distritos devem ser prioritários para o investimento. A metodologia permite selecionar os três melhores distritos em cada província em análise. O método proposto nesta primeira secção apoia a priorização de investimentos de forma quantitativa e transparente.

Na segunda secção, apresenta-se o método para selecionar intervenções de resiliência climática. Começa-se por identificar vários conjuntos de investimentos com base em consultas às partes interessadas em cada um dos distritos selecionados na secção anterior. Em seguida, avalia-se a robustez dessas intervenções rodoviárias usando uma relação custo-benefício sob milhares de cenários futuros possíveis.

Os benefícios incluem a redução de risco expressa em termos de danos esperados a nível das infraestruturas e perdas aos usuários esperados ou imprevistas devido a interrupções na rede de estradas em análise

Este método pode ser usado para a análise económica de projetos de transporte necessários durante a avaliação do projeto.

O trabalho termina com uma discussão sobre os benefícios do uso desse método nas operações de transporte e outros investimentos em infraestruturas rodoviárias.

## Secção I: Priorização de estradas e distritos

O objetivo desta primeira secção é apresentar uma metodologia abrangente para priorização de distritos para intervenções rodoviárias com base em dados geoespaciais, análise de rede e avaliação de risco.

A priorização é baseada em dois pilares; (i) criticidade socioeconómica e (ii) risco de perigo atual e futuro para as estradas em análise.

A criticidade socioeconómica é um indicador composto baseado em (1) falta de redundância de rede, (2) proximidade com potenciais aglomerados agrícolas, (3) proximidade com potenciais aglomerados pesqueiros, (4) produção agrícola atual e (5) nível de pobreza no distrito.

O segundo pilar, risco de perigo, é calculado usando mapas de inundação, para inundações e sob cenários de mudança climática, e funções de danos para as diferentes peças de infraestrutura no sistema viário. O risco de perigo é calculado como dano anual esperado à infraestrutura usando 10 períodos de retorno, em quatro cenários climáticos (clima atual, baixa, média e alta mudança climática).

As secções a seguir descrevem em detalhes cada um dos dois pilares e seus componentes.

## Secção II: Análise de custo-benefício sob profundas incertezas

Nesta segunda secção apresenta-se uma metodologia para calcular os custos e benefícios das intervenções rodoviárias sob profunda incerteza, usando uma estrutura robusta de tomada de decisão (Lempert et al. 2006). A metodologia é testada em cinco cenários de investimento diferentes em cada um dos distritos a ser selecionado. Cada cenário de investimento está limitado a um total de aproximadamente US\$ 15 milhões. Cada investimento tem uma combinação de cinco soluções de engenharia que levam a quatro tipos de economia de custos: (i) redução do risco de inundação para os utentes, (ii) custos de reparação e reabilitação, (iii) custos de manutenção e (iv) custos diários incorridos pelos utentes das estradas

## 2 CRITICIDADE

Os pressupostos para avaliar o desempenho são:

- Custo acumulado do usuário da estrada, definido como \$-veículo e com base na condição da estrada (IRI) e dados do modelo HDM4.
- Total de quilômetros percorridos pelo utente.
- Tempo total de viagem, com base na velocidade média do HDM4 com base na condição da estrada (IRI) (assumindo-se velocidade de fluxo livre em toda a rede – o congestionamento de tráfego não é considerado, pois os volumes de tráfego são muito baixos na área de estudo rural, abaixo de 2.000 TMDA).

Primeiro, calcula-se essas três variáveis em uma linha de base com a rede completa existente. Em seguida, remove-se cada uma das ligações uma por uma e recalcula-se o desempenho da rede em relação a esses três indicadores baseados na suposição de que os utentes usarão a melhor rota alternativa quando a rota ótima é interrompida. As melhores e segundas melhores rotas são as rotas que minimizam o custo total do utente da estrada entre a origem e o destino.

O custo adicional, tempo e duração da viagem devido à interrupção de uma ligação são agregados em todos os pares de origem-destino e atribuídos a ligação interrompida de modo a determinar sua criticidade.

A falta de redundância é apenas uma forma de medir a criticidade de uma ligação, e outros atributos podem ser relevantes para os tomadores de decisão. No estudo, considera-se ainda a proximidade de locais de extrema pobreza, o potencial da agricultura atual e futura e o potencial de pesca como factores preponderantes para determinar onde intervir na rede. Criam-se assim, cinco categorias de criticidade para cada um desses atributos, combinando-se usando pesos iguais e produzindo um mapa de criticidade. A suposição de igual peso entre os atributos de criticidade pode ser alterado para responder a certas prioridades do tomador de decisão. Por exemplo, para um decisor que pretenda investir em estradas para promover a pesca, podemos dar um maior peso para esse atributo.

Os valores de criticidade no nível da estrada são então agregados no nível do distrito. O novo índice de criticidade é agora usado para classificar distritos dentro de uma província. Para agregar criticidade ao nível distrital, somamos índices de criticidade ponderados pela extensão total da rede de estradas.

## 3 EXPOSIÇÃO

O segundo passo da análise é identificar a exposição das ligações da rede de estradas aos eventos climáticos. Focaliza-se assim a análise no risco de inundação e combina-se cenários de inundações provenientes de rios, marés e/ou tempestades e ciclones. A modelagem permite produzir mapas de profundidade da água para as mudanças atuais, climáticas e de uso da terra condições para 10 diferentes intervalos de recorrência de cheias (de 5 a 1.000 anos).

## 4 VULNERABILIDADE

O próximo passo da análise é calcular a vulnerabilidade da infraestrutura rodoviária a diferentes níveis. Esta vulnerabilidade é expressa como o custo de reparação ou reconstrução de pontes, aquedutos e secções de estradas quando ocorre uma inundação.

O inventário de pontes utilizado vem diretamente do banco de dados GIS e utiliza as condições pesquisadas em anteriores ao da análise. Nas condições actuais existente não há inventário para aquedutos. No entanto, há necessidade de incluir aquedutos na análise, pois podem ser facilmente danificados por inundações e criar

disrupções na rede de estradas. Para estimar a localização de aquedutos, o mapa do rio pode ser cruzado com a rede rodoviária.

A estimativa é calibrada com dados coletadas no campo para algumas estradas previamente identificadas.

Para pontes e aquedutos, o dano é modelado como uma % do custo total de reposição com base na diferença entre o nível de água observado e o nível de água para o qual a estrutura foi projetada. A seguinte equação de dano é usada:

$$Dl = \left( \frac{Wlcci - WLd + Dc}{WLd} \right) * 1 / Cr * Rc \quad (1)$$

Onde:

- WLd = o projeto do nível da água vem do padrão de projeto de 20 anos para aquedutos e 100 anos para pontes em estradas primárias e secundárias (a probabilidade é baseada em eventos passados)
- WLcci = nível de água para projeção de mudanças climáticas para o período de retorno *i*
- Dc = taxa de capacidade de drenagem
- Cr = taxa de condição
- Rc = custo de reposição

Adiciona-se dois fatores, (i) taxa de capacidade de drenagem (dc) e (ii) taxa de condição a ser aplicada ao dano. A taxa de capacidade é definida em 0,7 (como padrão) e reduz a quantidade total de água que a estrutura pode realmente suportar. A taxa de condição é aplicada diretamente ao dano como um factor multiplicador, para explicar o facto de que estruturas em mau estado sofrerão mais danos do que estruturas em bom. As taxas de condição são definidas para 0,7, 0,5 e 0,3 para condição boa, razoável e má.

O custo dos danos na superfície da estrada é baseado em 3 limites: 0,2, 0,5 e 1,5 metros de água acima da superfície da estrada.

Assume-se que as estradas são construídas ao nível do solo (sem aterros). Para cada um dos três níveis de água, os limites que atribuídos constituem uma % do custo total de substituição se ultrapassado, diferente para estradas revestidas ou não revestidas: [1, 2,20%] para revestidas e [20,50,100%] para não revestida (boa, razoável e má).

## 5 RISCO PARA A INFRAESTRUTURA (DANOS ANUAIS ESPERADOS)

O passo final é combinar os perigos, vulnerabilidade e exposição para estimar o risco de inundação que cada distrito enfrenta anualmente, expresso em termos de danos nas infraestruturas.

Os danos são calculados para eventos de inundação com 10 intensidades diferentes (5, 10, 20, 50, 75, 100, 200, 250, 500, período de retorno de 1.000), e para quatro cenários climáticos diferentes (um baseado no clima passado e 3 projecções de mudança climática), em cada uma das bacias hidrográficas existentes. Eventos individuais são então agregados, para cada cenário climático, em perdas anuais esperadas (EAD). Para calcular as EAD a regra trapezoidal é utilizada, considerando as perdas associadas a cada evento e sua probabilidade de ocorrência como o inverso do período de retorno. A seguinte equação é utilizada:

$$EAD = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^n \left( \frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_{i+1}} \right) (D_i + D_{i+1}) \quad (2)$$

Onde *i* é um número inteiro entre 1 e 10, **T<sub>i</sub>** é o *i*-ésimo período de retorno e **D<sub>i</sub>** é o dano à infraestrutura correspondente a **T<sub>i</sub>**.

Para o processo de priorização utilizamos apenas o risco expresso em termos de danos à infraestrutura e não calculamos o risco para os utentes. O risco em termos de custos do utente será usado para avaliar os benefícios de intervenções. Isso ocorre porque o risco em termos de danos à infraestrutura pode ser facilmente calculado no nível das ligações e, em seguida, agregado no nível do distrito, enquanto o risco para os utentes deve ser calculado no nível de país – uma vez que as viagens que cruzam a área inundada podem vir de todo o país – e não é relevante a nível distrital.

## 6 PRIORIZAÇÃO

A priorização é uma combinação da criticidade identificada anteriormente e o risco para a infraestrutura. A matriz de priorização é construída para combinar criticidade e risco, e exibida abaixo na Tabela 1, dando o valor 1 a estrada de risco muito baixo e uma estrada com o valor 5 a risco elevado.

Por exemplo, um distrito identificado como de baixa prioridade tem um baixo risco e será de baixa prioridade para investimento, não importa o nível de risco. Do outro lado do espectro uma estrada identificada como altamente crítica irá variar de prioridade média a muito alta e, portanto, terá uma prioridade alta para o investimento, pois qualquer interrupção causará um enorme constrangimento para os utentes e a economia local.

Quadro 1. Risco para infraestrutura vs Criticidade

	Risco para a infraestrutura					
	1	2	3	4	5	
Criticidade	1	1	1	1	1	2
	2	1	2	2	2	3
	3	2	2	3	3	4
	4	3	3	4	4	5
	5	3	4	4	5	5

## 7 CONCLUSÕES

A Secção I do estudo fornece uma abordagem geoespacial para priorizar os investimentos rodoviários. A metodologia prova ser bem-sucedida na identificação quantitativa e transparente de investimentos prioritários para estradas rurais. Essa metodologia poderá ser implementada para outros tipos de infraestrutura em rede, como ferrovias, rede de abastecimento de água, linhas de distribuição de energia, dentre outras. Este estudo pode fornecer aos gestores o suporte orientado a dados necessários para estabelecer uma discussão objetiva sobre quais áreas e quais infraestruturas devem ser priorizadas sob um orçamento limitado.

A Secção II fornece dois componentes adicionais para a análise económica exigida e necessária para uma avaliação criteriosa dos projetos. Primeiro, fornece uma perspectiva mais ampla dos benefícios do investimento, pois incorpora benefícios de adaptação ao clima, em termos de redução de danos à infraestrutura e redução do custo devido interrupção das vias.

Para reduzidos custos de interrupção de viagens, apresenta um novo método para quantificar os benefícios de todo o sistema incluindo uma componente de resiliência da rede de estradas. Usando uma abordagem de rede, ele quantifica os benefícios de custo do utente da estrada, atualizando as segundas melhores rotas alternativas. Quantifica igualmente benefícios não monetários em termos de redução de viagens. Em segundo lugar, apresenta um método inovador, incorporado na tomada de decisão sob incerteza técnica, de modo a lidar com a profunda incerteza em muitos fatores económicos. Este método identifica combinações de variáveis que ajudam os gestores de decisão a selecionar intervenções que sejam robustas para uma série de condições futuras.

Esta nova metodologia é aplicada às intervenções rodoviárias em Moçambique, principalmente na rede de estradas rurais. Cinco conjuntos diferentes de intervenções são propostas para cada um dos distritos selecionados para a análise. Entre as diferentes intervenções na área de estudo, e dado o orçamento limitado por distrito, investir em pontes e aquedutos é sempre a opção mais robusta. Em alguns casos, a pavimentação localizada pode ser a melhor opção (mas neste caso o custo é superior ao orçamento disponível).

Quando incorporar benefícios em todo o sistema, pavimentar vias alternativas para aumentar a redundância não é sempre lucrativo, pois os volumes de tráfego são baixos e as vias alternativas podem ficar inundadas. Em algumas situações o NPV- Net Present Value das intervenções é positivo apenas sob algumas condições (por exemplo, altas

mudanças climáticas), no entanto, demonstraram que poderiam ser justificados por meio de benefícios não monetários, como redução de viagens.

A incorporação de benefícios da rede tem-se mostrado muito eficaz para identificar intervenções que melhorem o desempenho geral da rede sob condições adversas, como intervenções que aumentam a redundância da rede. Essas intervenções aumentam a resiliência da rede porque melhoram as vias alternativas quando a principal é interrompida. Este tipo de benefício não costuma ser levado em consideração numa análise económica tradicional a nível de projeto.

A tomada de decisão sob técnicas de incerteza é particularmente útil no contexto de investimento em transporte rural.

A mudança climática não é o único fator na análise económica do transporte que é uma profunda incerteza: o tráfego, a previsão de demanda e o crescimento do tráfego desempenham um papel importante na análise e são incertezas e flutuam durante o ciclo de vida da intervenção. As técnicas de DMDU (Tomada de decisão num ambiente de grande incerteza), como demonstrado neste artigo, ajudam a identificar as intervenções mais robustas.

## 8 AGRADECIMENTOS

Reconhecemos a assistência recebida pelos Delegados Provinciais da ANE (Administração Nacional de Estradas) e do Fundo de Estradas que fizeram um excelente trabalho na preparação e coleta de dados para a modelagem da ferramenta.

Igualmente desejamos agradecer o apoio do Banco Mundial pelo financiamento e apoio técnico durante todas as fases da elaboração da ferramenta.

## 9 REFERÊNCIAS

1. B. Dellink, *Adapting to climate change in The Netherlands: an inventory of climate adaptation options and ranking of alternatives*, *Climatic Change Policy*, Netherland, 2009.
2. E. Jane Olga, *Moving toward climate-resilient transport*, the World Bank's experience from building adaptation into programs, Washington, D.C, 2015.
3. E. Xavier, A. Schweikert, Nicola van den Heever, and P. Chinowsky, *Planning resilient roads for the future environment and climate change: Quantifying the vulnerability of the primary transport infrastructure system in Mexico*, *Transport Policy*, Mexico, 2016.
4. K. Berdica, *an introduction to road vulnerability: what has been done, is done and should be done*. *Transport policy*, Washington, DC, 2002.
5. V. Keener, *Climate Change and Pacific Islands: Indicators and Impacts*: Report for the Pacific Islands Regional Climate Assessment, Island Press, 2013.