

## AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS NOS RECURSOS HÍDRICOS. CASO DE ESTUDO: BACIA DO RIO LIMPOPO

M.J. Calejo (1), J.L. Teixeira (2), M. Correia (1)

(1) COBA S.A.

(2) Instituto Superior de Agronomia

### INTRODUÇÃO

O grande objetivo do projeto é a avaliação dos impactos das alterações climáticas no ciclo hidrológico, designadamente nas cheias e na disponibilidade dos recursos hídricos, de modo a sustentar tecnicamente a identificação e dimensionamento das medidas de adaptação em regiões vulneráveis a cheias e a secas.

O clima da Terra é resultado de várias interações entre a atmosfera, o oceano, a superfície terrestre e a criosfera. Atualmente, os modelos de circulação geral acoplados oceano-atmosfera, geralmente denominados Modelos Climáticos Globais, são usados para estudar/compreender o clima e projetar as alterações climáticas futuras. Os métodos de regionalização (*downscaling*) são usados para avaliar os impactos das alterações climáticas em resoluções espaciais superiores, nomeadamente em estudos regionais e locais (Garrett, 2008).

Evidências crescentes sugerem que as alterações climáticas afetam os ciclos hidrológicos localmente, bem como globalmente (Arnell, 2004). Os estudos indicam que o aquecimento climático altera a distribuição sazonal do escoamento, com uma maior proporção de escoamento ocorrendo durante os meses húmidos e menos escoamento durante os

meses secos. Tais mudanças na quantidade e na distribuição temporal das afluências resultam em maiores riscos de escassez de água e de cheias.

As áreas semi-áridas e áridas, como a bacia do rio Limpopo, estão particularmente expostas aos impactos adversos das alterações climáticas sobre os recursos de água doce.

### METODOLOGIA

Os impactos das alterações climáticas no ciclo hidrológico podem ser avaliados com recurso a modelos que possam integrar a variabilidade biofísica da bacia e da precipitação. No quadro dos estudos para criar a resiliência climática na bacia do rio Limpopo em Moçambique, a COBA procurou aplicar um novo método de trabalho que tem por base a manipulação dos dados de base em plataforma SIG e o modelo hidrológico MIKE-SHE. O trabalho desenvolvido compreendeu as seguintes etapas de trabalho:

#### - Análise e avaliação dos dados históricos e das tendências climáticas:

- Das variáveis climatológicas: precipitação (P), temperatura máxima (Tmax) e mínima (Tmin) do ar e evapotranspiração de referência (ETo);
- Extremos: precipitação máxima (24 h e 96 h) e

Índice de precipitação normal (SPI).

#### - Modelação e Avaliação dos impactos das alterações climáticas na hidrologia e nos recursos hídricos com recurso ao modelo MIKE-SHE

### ANÁLISE DOS DADOS HISTÓRICOS E PROJEÇÕES

Análise de tendências para o século XXI no referente às variáveis da precipitação, da temperatura máxima e mínima do ar e da evapotranspiração de referência foi realizada através da utilização de seis modelos regionais de circulação (RCM) climáticos para os cenários A2, RCP4.5 e RCP8.5 (Quadro 1) para o período de referência (1979 a 2010) e para os horizontes futuros (2025-2044 e 2045-2064). Neste tipo de estudos deve ser utilizado um leque o mais largo possível em termos de modelos, de forma a ter uma melhor representação da incerteza associada.

O cenário RCP4.5 representa uma história de emissão de gases mediana, onde se considera que algumas medidas de mitigação irão ser tomadas (Thomson *et al.* 2011), enquanto o cenário RCP8.5 é mais gravoso, apresentando uma constante subida ao nível das emissões (Riahi *et al.* 2011). Estes dois cenários são normalmente os mais utilizados neste tipo de análise, o

que poderá facilitar comparações com futuros trabalhos do mesmo género. O cenário A2, com uma trajetória semelhante ao RCP8.5, é um dos cenários propostos no Relatório Especial sobre Cenários de Emissões (SRES - Special Report on Emission Scenarios) e foi usado nos estudos climáticos futuros do Clima Global até 2013.

Todos os RCM têm uma resolução espacial de 0,5° x 0,5°, com séries temporais diárias.

No presente estudo, a validação dos modelos regionais foi feita pelo Council for Scientific and Industrial Research (Engelbrecht *et al.*, 2015) tendo por base os dados mensais históricos do período de 1979-2010 disponibilizados pela Unidade de Pesquisa Climática (CRU TS3.20 - Harris *et al.*, 2014).

A evapotranspiração de referência para o cenário de referência e para os horizontes futuros foi estimada pela equação de Hargreaves-Samani (Shahidian *et al.*, 2013).

Neste estudo foram calculados e analisados três índices de extremos de precipitação. Os índices de precipitação extrema analisados foram a precipitação máxima diária e de 4 dias e o Standardize Precipitation Index (SPI) para a análise de secas (McKee *et al.*, 1993).

Existe consenso na comunidade científica (Hayes *et al.*, 1999 citado em Portela *et al.*, 2012) que as escalas até 6 meses do índice SPI se referem às secas meteorológica e agrícola, associadas a défices de precipitação e de humidade no solo, respetivamente; e que a escala dos 12 meses se refere à seca hidrológica, com escassez de água refletida nos escoamentos e nos reservatórios artificiais (albufeiras). Pelo que, o SPI foi calculado para a escala temporal de 12 meses (SPI12), que reflete os padrões de precipitação de longo prazo e está diretamente associado à falta de água em reservas de água, caudais e níveis de água subterrânea.

Para a análise do SPI foram calculados o número de eventos de seca e a magnitude de cada evento de seca. Um evento de seca foi definido como um período em que o SPI é continuamente negativo e atinge um valor de -1.0 ou inferior. A magnitude de um evento de seca (DM) foi definida de acordo com McKee *et al.* (1993).

#### SET-UP DO MODELO HIDROLÓGICO (MIKE-SHE)

O modelo MIKE-SHE (Graham e Butts, 2005) é um modelo hidrológico que tem uma estrutura modular

> **Quadro 1:** Modelos regionais climáticos usados.

RCM	Cenário	Instituição	Modelo de Circulação Global de Base
CSIRO	A2	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australia	CSIRO-Mk3.5
GFDL2.0		Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, NOAA, USA	GFDL-CM2.0
GFDL2.1			GFDL-CM2.1
MIROC		Center for Climate System Research, Japan	MIROC
MPI		Max Planck Institute for Meteorology, Germany	MPI
UKMO		Hadley Centre for Climate Prediction and Research, Met office, UK	UKMO-HadCM3
ACCESS	RCP4.5 e RCP8.5	Centre for Australian Weather and Climate Research (CAWCR), Australia	ACCESS
CCSM4		National Center for Atmospheric Research, USA	CCSM4
CNRM		Centre National de Recherches Météorologiques, Météo-France	CNRM
GFDL		Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, NOAA, USA	-
MPI		Max Planck Institute for Meteorology, Germany	MPI
NorESM1M		EarthClim Projet, Norwegian Climate Centre (NCC), Norway	NorESM1-M

que compreende as seguintes componentes: interceção, evapotranspiração, infiltração, escoamento subsuperficial na zona não-saturada, escoamento subterrâneo na zona saturada, escoamento superficial e a modelação do escoamento nas linhas de água.

A construção do modelo MIKE-SHE compreendeu as seguintes etapas principais:

#### - Modelo Digital do Terreno (MDT):

Seleção do modelo digital do terreno (MDT), verificação de incoerências e lacunas do MDT de modo a garantir a coerência da matriz na vizinhança de toda a área de estudos.

#### - Derivação da rede fluvial a partir do modelo MDT

A rede fluvial da bacia do rio Limpopo foi definida ao nível das suas principais sub-bacias tendo por base o MDT tratado, assim como fotografia aérea. As secções transversais foram geradas com uma equidistância de 2000 km e tratadas de modo a assegurar a coerência da informação requerida pelo modelo MIKE.

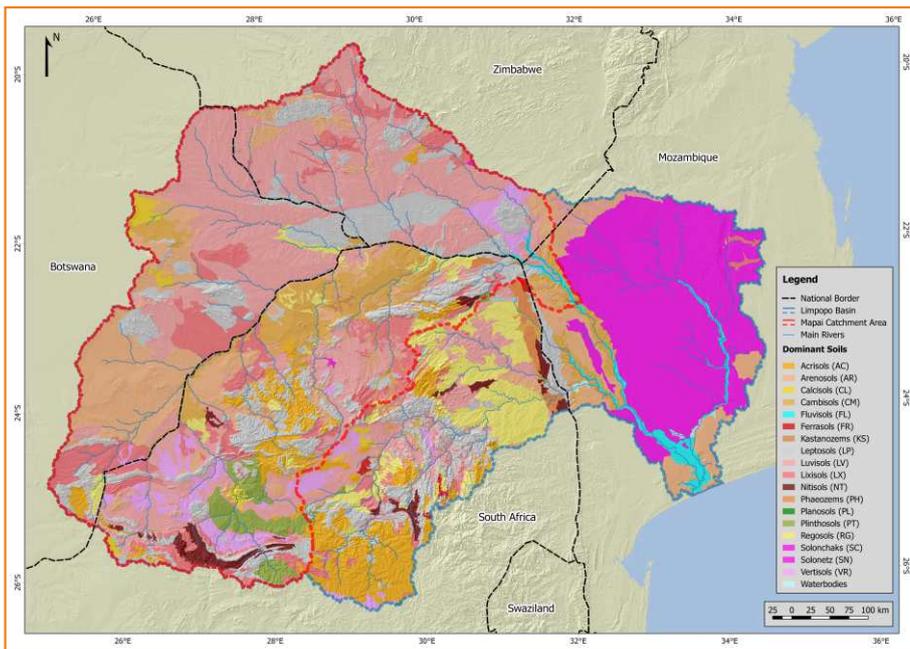
- **Séries de precipitação e de evapotranspiração de referência:** séries temporais de dados diários de precipitação e evapotranspiração de referência para o período de referência (1979-2010) e para os períodos de 2025-2043 e 2045-2063 correspondentes à média

dos seis RCM de cada um dos cenários considerados.

#### - Mapas temáticos necessários para modelação hidrológica e derivação dos parâmetros necessários para a modelação hidrológica:

- A carta de uso e ocupação global da FAO - GLC-SHARE Beta-Release 1.0 Database, com uma resolução de 30 segundos de arco (□ 1 km) foi usada para descrever a ocupação dos solos da bacia. Para cada tipo de uso/coertura foram definidos os parâmetros de índice de área potencial, profundidade radical e coeficiente cultural tendo em conta as suas variações ao longo do tempo.
- Os solos na bacia (Figura 1) foram descritos a partir da base de dados SOTER para a África Austral (SOTERSAF) à escala 1:2 000 000 (Dijkshoorn, 2003) e do relatório sobre os solos da bacia do rio Limpopo (Bangira and Manyevere, 2009). As características hidráulicas do solo foram deduzidas com base nos dados de textura, matéria orgânica e estrutura disponíveis para os solos da Bacia do Rio Limpopo, tendo sido usadas as funções de pedotransferência propostas por Saxton e Rawls (2005).

> Figura 1: Mapa de solos da bacia do rio Limpopo



**RESULTADOS**

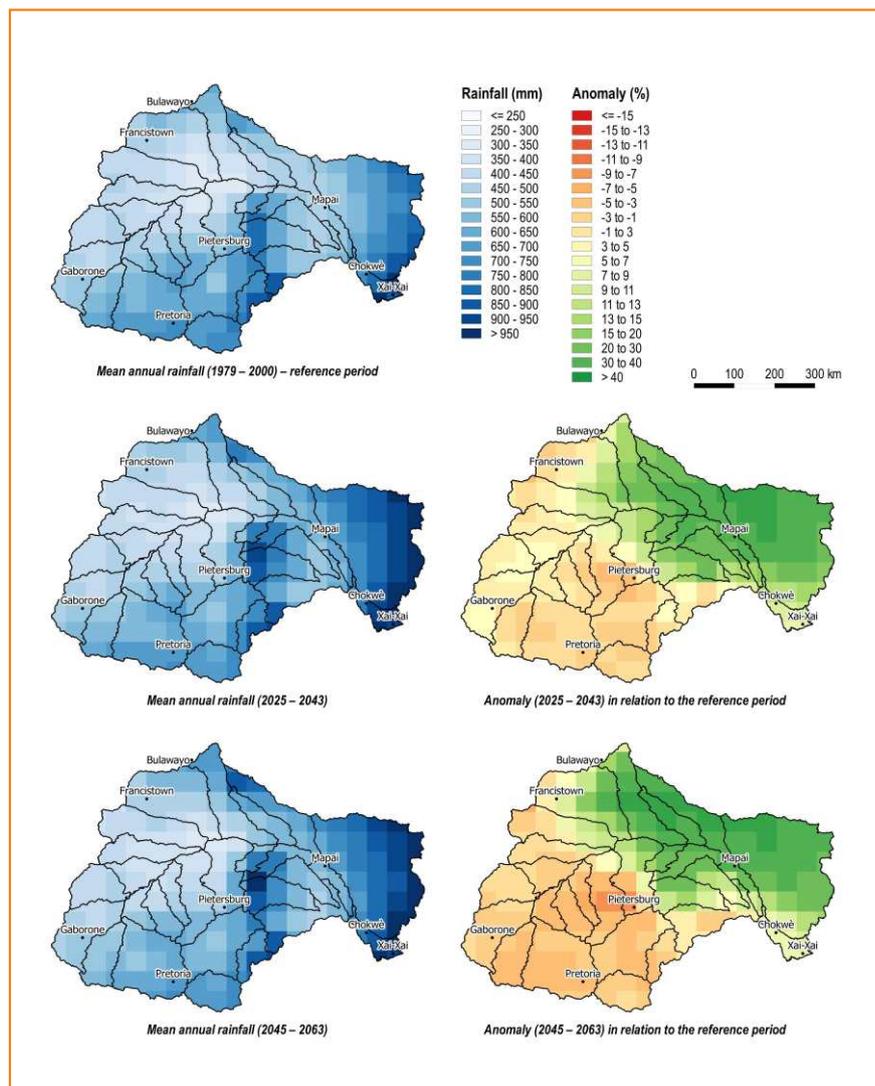
Os modelos regionais analisados para os cenários RCP4.5 e RCP8.5 apontam ao nível da bacia do rio Limpopo para um ligeiro aumento da precipitação média anual que poderá oscilar entre 5,1% (RCP8.5 2025-2043) e 7,2% (RCP4.5 2025-2043), verificando-se ao nível das principais sub-bacias anomalias que variam entre -9,7% e 30,3%. As anomalias negativas concentram-se na zona de montante da bacia (África do Sul e Botswana). Por outro lado, as projeções dos modelos do cenário A2 apontam para uma significativa redução da precipitação, variável entre -12,2% e -2,3%. Em média a diminuição prevista no cenário A2 é de -8,7% no período 2025-2043 e de -11,2% no período 2045-2063.

Em relação aos meses de Jan-Fev-Mar, a anomalia para a bacia do rio Limpopo é em média 1,1% e 7,2%, para os períodos 2025-2043 e 2045-2063, indicando que no futuro poderá existir um deslocamento da quantidade de precipitação entre os períodos trimestrais, chovendo mais em Jan-Fev-Mar do que em Out-Nov-Dez, em comparação com o período de referência (1979-2010).

As projeções dos três cenários apontam também para uma diminuição mais significativa da precipitação no trimestre Out-Nov-Dez, e para uma concentração da precipitação no trimestre Jan-Fev-Mar, em comparação com o período de referência.

Relativamente à temperatura do ar, os resultados médios dos três cenários apontam para um aumento médio da média anual das temperaturas máximas e mínimas do ar para os períodos 2025-2043 e 2045-2063 em análise. No Quadro 2 são resumidos os resultados para os cenários RCP4.5 e RCP8.5.

> Figura 2: Tendências da anomalia da precipitação anual para o cenário climático RCP4.5 para os períodos 2025-2043 e 2045-2063, considerando os dados de todos os modelos.



> **Quadro 2:** Anomalia da temperatura média anual máxima e mínima e da evapotranspiração de referência para os 2 períodos considerando todos os modelos e os cenários RCP4.5 e RCP8.5

Variável	Período de referência (1979 - 2010)	Anomalia média para o cenário RCP4.5		Anomalia média para o cenário RCP8.5	
		2025 - 2043	2045 - 2063	2025 - 2043	2045 - 2063
Tmax do ar	27.9 °C	+1.1	+1.7	+1.3	+2.4
Tmin do ar	14.3 °C	+1.2	+1.8	+1.3	+2.5
ETo	5.9 mm dia <sup>-1</sup>	+2.1%	+2.5%	+2.5%	+4.2%

Esta tendência nas temperaturas do ar reflete-se num aumento da evapotranspiração de referência (Quadro 2), o que irá agravar a situação de défice hídrico nas sub-bacias onde se prevê uma tendência para a diminuição da precipitação.

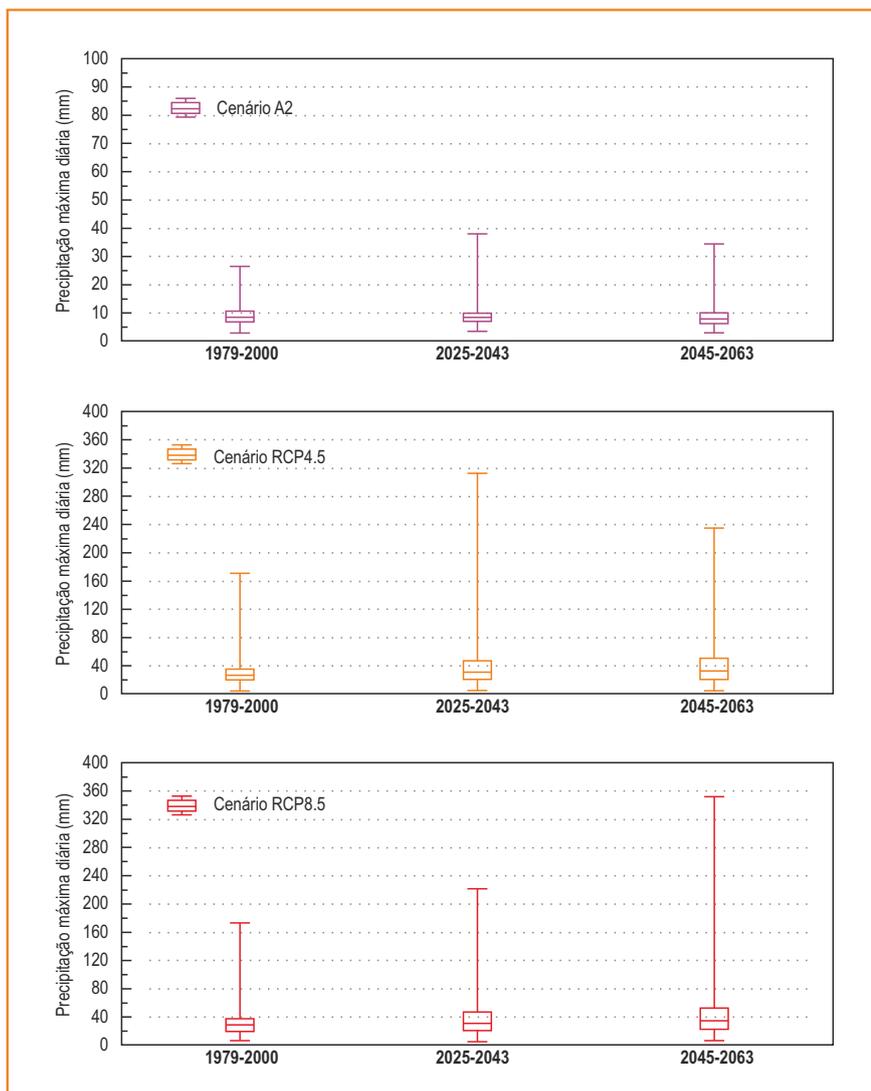
O estudo dos extremos de precipitação teve como base a precipitação máxima de 24 h e 96 h e do índice SPI-12. Em relação à análise da precipitação máxima

de 24 h e 96 h, os modelos para o cenário RCP4.5 e RCP8.5 indiciam um aumento muito significativo da precipitação máxima para os períodos futuros (Figura 3) que poderão ir até 203% (sub-bacia Mogalakwena) no período de 2045-2063) para o conjunto dos modelos para o cenário RCP8.5.

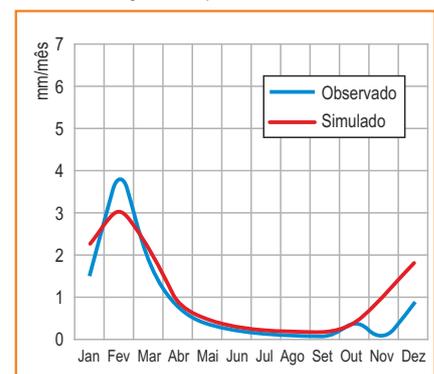
Relativamente ao índice SPI-12, ambos os cenários indicam que o número de eventos por década se manterá praticamente inalterado para ambos os períodos. No entanto, as projeções indicam um aumento da magnitude média das secas, sendo o cenário mais gravoso o RCP8.5.

É importante notar que, neste projeto, não foi possível obter dados diários da precipitação que cobrissem toda a bacia no período de referência. Deste modo, a verificação dos resultados de MIKE-SHE foi realizada usando os dados diários produzidos pelos modelos climáticos para o período de referência 1979-2010. Assim, a verificação dos resultados do modelo foi avaliada comparando os valores médios do escoamento médio anual e mensal simulados com o observado (Figura 4). Os resultados deste estudo também foram comparados com os apresentados por Aich et al. (2014) para o Limpopo usando o modelo SWIM.

> **Figura 3:** Precipitação máxima diária para o período de referência e para os períodos de 2025-2043 e 2045-2063 para os três RCP



> **Figura 4:** Escoamento médio mensal no local da barragem de Mapai



O Quadro 3 resume os escoamentos simulados no local da barragem de Mapai. Pode observar-se que o escoamento em Mapai aumenta para os cenários climáticos RCP4.5 e RCP 8.5 e diminui significativamente no cenário A2. Estes resultados são consistentes com a tendência indicada pelos cenários para a precipitação. Conforme observado por Aich et al. (2014) a bacia do rio Limpopo é muito sensível ao regime de precipitação, pequenas variações na precipitação têm um grande impacto no escoamento.

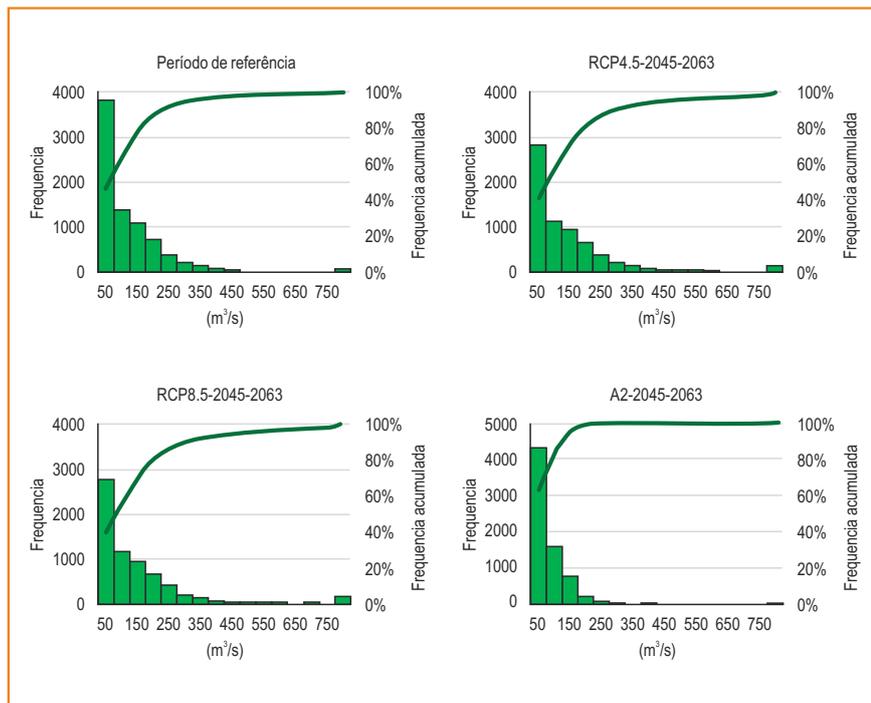
> **Quadro 3:** Tendências no escoamento médio anual no rio Limpopo no local da barragem de Mapai

Período		Escoamento médio anual simulado			
		mm	m <sup>3</sup> /s	hm <sup>3</sup>	Anomalia %
1979-2000 (Período de Referência)		12.8	104	3 296	-
2025-2043	RCP4.5	17.3	141	4 452	35%
	RCP8.5	15.9	130	4 101	24%
	A2	6.5	53	1 683	-49%
2045-2063	RCP4.5	19.9	162	5 113	55%
	RCP8.5	20.5	167	5 273	60%
	A2	6.1	50	1 571	-52%

Em relação aos caudais extremos foi realizada uma análise exploratória. Para os cenários RCP4.5 e 8.5 os histogramas dos caudais diários em Mapai (Figura 5)

mostram que a frequência dos caudais mais baixos diminui e que a frequência dos caudais mais elevados aumenta, verificando-se um aumento substancial dos caudais máximos.

> **Figura 5:** Histograma dos caudais diários em Mapai para o período de referência e para o período de 2045-2063



**CONCLUSÕES**

Este estudo teve como objetivo avaliar o impacto das alterações climáticas na bacia hidrográfica do rio Limpopo, através da análise das projeções das variáveis climáticas da precipitação, da temperatura do ar e dos eventos extremos, para dois períodos 2025-2043 e 2045-2063 de acordo com vários modelos globais de circulação atmosférica (GCM) e respetivos modelos regionais de circulação atmosférica (RCM), sobre três cenários de emissões de gases para a atmosfera (A2, RCP4.5 e RCP8.5).

Os resultados obtidos mostram que a aproximação adotada é adequada para avaliar os impactos das

alterações climáticas no ciclo hidrológico em bacias de grande dimensão como é o caso da bacia em estudo. O modelo hidrológico MIKE-SHE simulou com suficiente exatidão o escoamento no período de referência e permitiu avaliar as anomalias para vários cenários climáticos. Os resultados para os cenários RCP4.5 e RCP 8.5 são similares, prevendo-se um aumento do escoamento médio anual em resposta ao aumento da precipitação, enquanto que no caso do cenário A2 há uma diminuição do escoamento como resposta direta à diminuição da precipitação em toda a bacia e aumento da temperatura.

**REFERÊNCIAS**

“FAO Global Land Cover (GLC-SHARE) Beta-Release 1.0 Database”, Land and Water Division, John Latham, Renato Cumani, Ilaria Rosati and Mario Bloise, 2014.

Aich, V, Liersch, S., Vetter, T., Huang, S., Tecklenburg, J., Hoffmann, P., Koch, H., Fournet, S., Krysanova, V. E., Müller, N. and Hattermann, F. F., 2014. Comparing impacts of climate change on streamflow in four large African river basins. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 1305-1321, <https://doi.org/10.5194/hess-18-1305-2014>.

Arnell N., T. Kram, T.R. Carter, K.L. Ebi, J.A. Edmonds, S. Hallegatte, E. Kriegler, R. Mathur, B. O'Neill, K. Riahi, H. Winkler, D.P. van Vuuren, and T. Zwickel, 2011: A Framework for a New Generation of Socioeconomic Scenarios for Climate Change Impact, Adaptation, Vulnerability and Mitigation Research. Primary background document for the workshop, “The Nature and Use of New Socioeconomic Pathways for Climate Change Research,” Nov. 2-4, 2011, hosted by the Integrated Science Program, National Center for Atmospheric Research (NCAR), Mesa Laboratory, Boulder, CO, USA, 42 pp.

Bangira C. and Manyevere A., 2009. Baseline Report on the Soils of the Limpopo River Basin, a contribution to the challenge Program on Water and Food Project 17 “Integrated Water Resource Management for Improved Rural Livelihoods: Managing risk, mitigating drought and improving water productivity in the water scarce Limpopo Basin”. *WaterNet Working Paper 8*. WaterNet, Harare.

Dijkshoorn J.A., 2003. SOTER database for Southern Africa (SOTERSAF). Technical Report.

Engelbrecht F., J. Adegoke, M.J. Bopape, M. Naidoo, R. Garland, M. Thatcher, J. McGregor, J. Katzfey, Mi. Werner, C. Ichoku (2015). Projections of rapidly rising surface temperatures over Africa under low mitigation. *Environmental Research Letters*, Volume 10, Number 8.

Garrett P., 2008. Assessment of climate change statistical downscaling methods. Application and comparison of two statistical methods to a single site in Lisbon. Master’s dissertation. Universidade Nova de Lisboa, Portugal.

Graham, D.N. and M. B. Butts (2005) Flexible, integrated watershed modelling with MIKE SHE, in *Watershed Models*, Eds. V.P. Singh & D.K. Frevert Pages 245-272, CRC Press.

McKee, T. B., N. J. Doesken, and J. Kleist, 1993. The relationship of drought frequency and duration of time scales. Eighth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society, Jan17-23, 1993, Anaheim CA, pp.179-186.

Portela M.M., Santos J.F.F., Naghettini N., Matos J.P., Silva A.T., 2012. Superfícies de limiares de precipitação para identificação de secas em Portugal continental: uma aplicação complementar do índice de precipitação padronizada, *SPI, Recursos Hídricos* 33(02), 5-23.

Riahi K., Rao S., Krey V. (2011). RCP 8.5-A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Clim Change* 109:33–57. doi: 10.1007/s10584-011-0149-y

Shahidian S., Serralheiro R.P., Serrano J., Teixeira J.L. (2013). Parametric calibration of the Hargreaves–Samani equation for use at new locations. In: *Hydrological Processes*. 27(4): 605-616. DOI: 10.1002/hyp.9277

Thomson A.M., Calvin K.V., Smith S.J. (2011). RCP4.5: A pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. *Clim Change* 109:77–94. doi: 10.1007/s10584-011-0151-4