

# UMA FORMA ALTERNATIVA DE ENFRENTAR A ESCASSEZ DE DADOS NA BACIA DO RIO ZAMBEZE COM VISTA À CALIBRAÇÃO DE MODELOS HIDROLÓGICOS

## AN ALTERNATIVE APPROACH TO FACE THE SCARCITY OF DATA IN THE ZAMBEZI RIVER BASIN AIMING AT CALIBRATING HYDROLOGICAL MODELS

### J. P. Matos

Doutor em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico /// Doutor em Ciências, École Polytechnique Fédérale de Lausanne /// jose.matos@ist.utl.pt

### M. M. Portela

Doutora em Engenharia Civil, Professora Auxiliar, Instituto Superior Técnico /// maria.manuela.portela@ist.utl.pt

### D. Juízo

Doutor em Engenharia Civil, Universidade Eduardo Mondlane /// juizo@uem.mz

**RESUMO:** No âmbito da estimação de escoamentos à escala diária numa extensa bacia hidrográfica escassamente monitorizada – na bacia hidrográfica do rio Zambeze, em Moçambique, com cerca de 1 400 000 km<sup>2</sup> –, sistematizam-se as etapas fundamentais da modelação, compreendendo, para além do modelo hidrológico propriamente dito, a aquisição dos dados de base, a caracterização espacial da precipitação, a calibração de parâmetros e a validação de resultados. São especificados e brevemente discutidos alguns dos modelos aplicáveis às diferentes etapas. Tendo em conta a relevância da fase de calibração, é explorada a possibilidade de recorrer a superfícies de precipitação interpoladas a partir de dados históricos de acordo com a técnica POM (interpolação por memória orientada por padrões, ou, do Inglês, *Pattern Oriented Memory*) de modo a aumentar o período de calibração sustentando-o em informação compatível, quer decorrente daquela interpolação, quer, após 1998, derivada de dados de satélite. Não obstante o reconhecimento da necessidade de investigação adicional, o artigo evidencia as potencialidades da adopção de períodos de calibração alargados possibilitada pela nova técnica de interpolação espacial POM.

**Palavras-chave:** Rio Zambeze, escoamento, interpolação da precipitação, POM, modelo hidrológico, calibração, validação.

**ABSTRACT:** The main steps of an approach towards the evaluation of flows at a daily time scale in a large ungauged watershed – the Zambezi River basin, in Mozambique, with approx. 1 400 000 km<sup>2</sup> – is presented, comprehending, besides the hydrological model, the data acquisition, the spatial characterization of the rainfall, the parameters' calibration and the results' validation. Due to the relevance of the calibration step, the possibility of using rainfall surfaces interpolated from satellite data, according to the POM technique (*Pattern Oriented Interpolation*), is explored. In this way, the rainfall data obtained either by the POM technique, prior to 1998, or from satellite, after 1998, is made compatible, thus allowing to lengthen the calibration period. Despite the need for additional research, the paper stresses the advantage of larger calibration periods as a result of the POM spatial interpolation technique.

**Keywords:** Zambezi River, surface runoff, rainfall interpolation, POM, hydrological model, calibration, validation.

## 1. INTRODUÇÃO. MODELOS E CASO DE ESTUDO

No decurso das últimas décadas a modelação hidrológica tem assumido um papel da maior relevância na área dos recursos hídricos. Os resultados facultados pelos modelos hidrológicos proporcionam uma base de conhecimento indispensável a muitas das acções relacionadas com os recursos hídricos, incluindo decisões sustentadas relativas à operação de albufeiras, ao dimensionamento de órgãos hidráulicos e infra-estruturas de protecção fluvial, à estimativa de disponibilidades hídricas ou, num sentido mais geral, à gestão integrada de recursos hídricos.

Os modelos hidrológicos apresentam tipologia diversa (Moriassi *et al.* 2012). Podem, assim, distinguir-se os modelos tendo em conta o seu objectivo (simulação ou optimização). Quanto à génese, podem ser empíricos, conceptuais ou de processos físicos. No que diz respeito à discretização espacial, as arquitecturas variam de agregadas a distribuídas. O tempo é também uma dimensão relevante a ter em conta, havendo modelos orientados para simular eventos isolados e outros para a simulação contínua. Finalmente, os resultados produzidos podem ser de natureza determinística ou estocástica (Moradkhani e Sorooshian 2008).

Não obstante o tipo de modelo escolhido, a calibração e a validação são etapas de extrema importância. De facto, a sua execução determina, em primeiro lugar, se o modelo escolhido é adequado e, em segundo lugar, a qualidade e fiabilidade dos resultados que fornece. A opção por um dado modelo considerado fiável e com bom desempenho pressupõe na generalidade dos casos um balanço entre a complexidade do mesmo e a quantidade e qualidade dos dados disponíveis para a sua calibração e validação (CRC Catchment Hydrology 2005).

Os modelos matemáticos para calibração de parâmetros têm atraído a atenção de investigadores desde a generalização do uso de meios informáticos e do aumento da complexidade dos modelos hidrológicos que tais meios proporcionaram. Nas últimas décadas verificaram-se progressos marcados nesse campo. De uma calibração tendencialmente manual evoluiu-se progressivamente para técnicas automáticas pois, embora a calibração manual tenha a vantagem de dar a conhecer o comportamento do modelo ao utilizador e, conseqüentemente, facilitar a interpretação do papel e da relevância de cada parâmetro, as técnicas

de calibração actuais revelam-se eficientes e eficazes, permitindo a consideração simultânea e expedita de números elevados de parâmetros.

Existem três abordagens possíveis na calibração automática: com base (i) numa única medida de erro; (ii) na consideração simultânea de várias medidas de erro; e (iii) em inferência Bayesiana.

Na optimização de um modelo com base numa única medida de erro procura-se a combinação de parâmetros que resulta no melhor valor da medida de desempenho escolhida. Em geral, não se trata de um problema simples uma vez que o domínio das soluções não é linear ou convexo e há o risco de os algoritmos convergirem para soluções locais subóptimas. Muitos algoritmos têm sido aplicados com vista a reduzir esse risco, destacando-se, como exemplos, os seguintes: *genetic algorithms* (algoritmos genéticos) (Goldberg e Holland 1988), *particle swarm optimization* (enxames de partículas) (Kennedy e Eberhart 1995), *shuffled complex evolution* (SCE) (Duan *et al.* 1992) e *Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy* (CMA-ES) (Hansen e Ostermeier 2001).

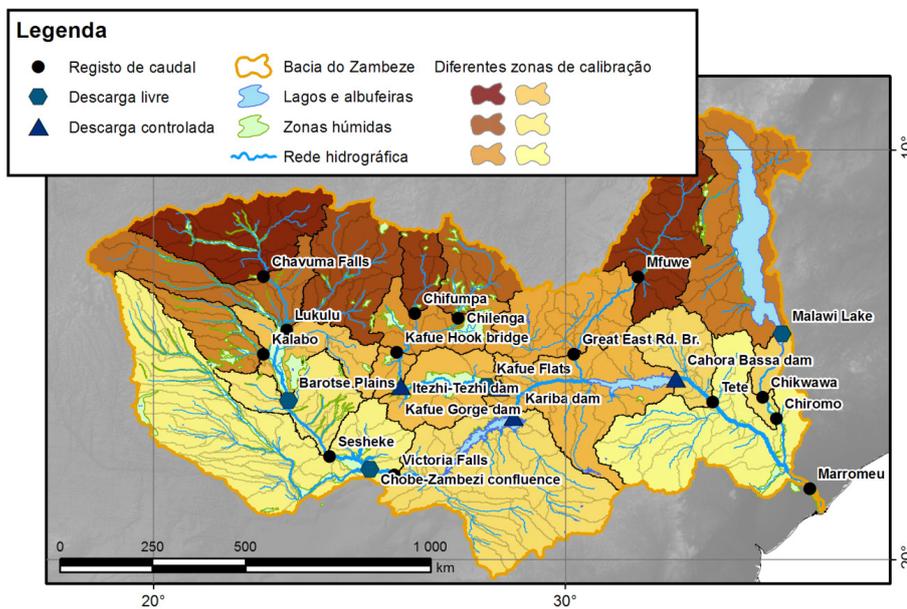
Os erros de um modelo hidrológico podem ser associados à amplitude, fase e forma das simulações (Shamseldin e O'Connor 2001). Sendo que a utilização de uma única medida raramente é suficiente para caracterizar completamente os erros (Diskin e Simon 1977, Sorooshian e Gupta 1983), os algoritmos de optimização multiobjectivo tornam-se interessantes (Efstratiadis e Koutsoyiannis 2010). De forma geral, este tipo de modelo aproxima a superfície de Pareto constituída pelas soluções não-dominadas de acordo com várias medidas de erro escolhidas (e.g. Srinivas e Deb 1994). Assim, em alternativa à pesquisa de uma solução única, tais algoritmos procuram identificar uma superfície que se desenvolve num número de dimensões igual ao número de medidas consideradas (Efstratiadis e Koutsoyiannis 2010). Trata-se, compreensivelmente, de um problema mais complexo que o anterior. São exemplos de algoritmos multiobjectivo os seguintes: *non-dominated sorting genetic algorithm II* (inspirados nos algoritmos genéticos) (Srinivas e Deb 1994, Deb *et al.* 2002), *multi-objective shuffled complex evolution metropolis* (inspirada no algoritmo SCE) (Vrugt *et al.* 2003) e *multi-algorithm genetically adaptive multi-objective method* (um meta-algoritmo que engloba quatro algoritmos distintos) (AMALGAM) (Vrugt e Robinson 2007, Vrugt *et al.* 2009a).

O texto deste artigo foi submetido para revisão e possível publicação em abril de 2014, tendo sido aceite pela Comissão de Editores Científicos Associados em maio de 2014. Este artigo é parte integrante da *Revista Recursos Hídricos*, Vol. 35, Nº 1, 37-52, maio de 2014.  
© APRH, ISSN 0870-1741 | DOI 10.5894/rh35n1-3

Os diferentes conjuntos de parâmetros resultantes de uma optimização multiobjectivo são equiprováveis. Assim, assume-se que o sistema real não pode ser modelado correctamente em toda a sua complexidade por um conjunto único de parâmetros. Tal pressuposto, aliado ao facto de que diferentes conjuntos de parâmetros podem originar simulações equivalentes, leva ao conceito de equifinalidade das soluções (Beven 1993, 2006). Deste ponto de vista, a incerteza assume um papel fulcral na modelação hidrológica (Montanari 2007). Uma forma de caracterizar a incerteza é baseada em técnicas de inferência Bayesiana (IB) (Winkler 2010). Os modelos inspirados na IB combinam noções prévias sobre os valores dos parâmetros a adoptar com observações efectuadas para estimar a probabilidade associada a cada parâmetro e às previsões efectuadas. A sua implementação é, no entanto, complexa, no essencial, devido à necessidade de definir uma função de verosimilhança que quantifique a probabilidade condicionada de erros frequentemente autocorrelacionados, heteroscedáticos e não-normais. Actualmente existem diversos algoritmos que exploram os princípios da IB. Destacam-se a *generalized likelihood uncertainty estimation* (GLUE) (estimativa da incerteza com verosimilhança generalizada) (Beven e Binley 1992, Mantovan e Todini 2006) e o algoritmo *differential evolution adaptive metropolis* (Vrugt *et al.* 2008,

Vrugt *et al.* 2009b), sendo que o primeiro segue uma abordagem informal e o segundo, uma abordagem formal.

Não obstante o procedimento de calibração escolhido, a disponibilidade de dados adequados é essencial para o sucesso do modelo em que ele se insere. No caso de um modelo hidrológico de estimação de escoamentos superficiais numa bacia hidrográfica de grandes dimensões e com numerosas particularidades, quer naturais, quer induzidas pelo Homem – como seja a bacia hidrográfica do rio Zambeze adoptada como caso de estudo – as questões relacionadas com os dados disponíveis tornam-se ainda mais pertinentes. A bacia hidrográfica do rio Zambeze tem um lugar de destaque na África Austral devido, não só à sua grande área (cerca de 1 400 000 km<sup>2</sup>), mas também à sua riqueza ecológica ímpar e ao seu elevado potencial económico. Não obstante essa combinação de valores, mas também em consequência da mesma, a gestão dos recursos hídricos na bacia do rio Zambeze enfrentará inevitavelmente desafios notáveis no decorrer das próximas décadas. A Figura 1 contém a representação esquemática da bacia incluindo as principais barragens, zonas húmidas e lagos naturais, bem como das secções da rede fluvial com dados hidrométricos disponíveis para calibração e validação de modelos.



**Figura 1** – Bacia hidrográfica do rio Zambeze. Indicação das principais barragens, zonas húmidas, lagos, albufeiras e secções de monitorização de informação hidrométrica. Representação das vinte zonas de calibração em cascata.

Embora a bacia tenha vindo a ser dotada de um número crescente de estações hidrométricas, a distribuição geográfica irregular de tais estações e as suas interrupções de funcionamento frequentes, associadas à enorme dimensão da bacia, constituem dificuldades assinaláveis para a calibração e a validação de modelos hidrológicos. Talvez por isto, o número de modelos hidrológicos abrangendo a totalidade da bacia desenvolvidos até à data é escasso. De entre esses modelos mencionam-se Vörösmarty e Moore (1991), que destacam a falta de dados hidrométricos; os balanços hídricos da Denconsult (1998) e de Matondo e Mortensen (1998), conducentes a escoamentos que diferem em cerca de 50% no delta; Gerrits (2005), que aplica um modelo calibrado com base em duas séries de caudal; Michailovsky (2008), que calibrou um modelo manualmente e destacou a desigual distribuição espacial de estações hidrométricas; e Cohen Liechti (2013), que efectuou uma calibração automática multicritério apoiada em mais de uma dezena de séries históricas de caudais e de volumes em albufeiras.

A par com a pertinência de dispor de dados hidrométricos que sustentem os estudos hidrológicos em grandes bacias hidrográficas, importa referir que, actualmente, a maioria desses estudos recorre a estimativas de precipitação obtidas por detecção remota. De entre os vários produtos derivados de medições de satélite que fornecem essas estimativas destacam-se o 3B42 da *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TMPA 3B42) (Huffman *et al.* 1995, Huffman *et al.* 2007, Huffman *et al.* 2010); o RFE 2.0 do *Climate Prediction Center da National Oceanic and Atmospheric Administration* e do *Famine Early Warning System* (NOAA/FEWS RFE 2.0) (Xie e Arkin 1996, Herman *et al.* 1997); o *Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks* (PERSIANN) (Sorooshian *et al.* 2000); a NOAA-CPC *Morphing Technique* (CMORPH) (Joyce *et al.* 2004); e o *Global Satellite Mapping of Precipitation* (GSMaP) (Kubota *et al.* 2007, Aonashi *et al.* 2009). Tendo sido realizados vários trabalhos sobre a qualidade daqueles produtos, as interpretações diferem no que diz respeito à sua adequação à bacia do Zambeze. Meier (2012) comparou os produtos TMPA 3B42 e NOAA/FEWS RFE 2.0 com os registos em dois postos udométricos da bacia do rio Kafue, na região Norte-centro da bacia, tendo concluído que as estimativas NOAA/FEWS RFE 2.0 concordavam melhor com os volumes anuais médios da precipitação registados. No relatório “*Dam synchronization and flood releases in the Zambezi River Basin project*” o product GSMaP é apresentado como uma alternativa sólida (SWRSD Zambezi Basin Joint Venture 2011). Finalmente, Cohen Liechti *et al.*

(2011) testaram o ajustamento dos produtos TMPA 3B42, NOAA/FEWS RFE 2.0 e CMORPH ao registos de uma vasta série de postos udométricos na bacia, tendo verificado um melhor desempenho do primeiro.

Independentemente do produto escolhido e da sua qualidade, a adopção de dados de satélite limita o horizonte temporal das calibrações efectuadas uma vez que só possibilita estimativas da precipitação diária a partir de 1998.

Quanto aos registos hidrométricos, tão necessários à calibração dos modelos hidrológicos, verifica-se, como referido, escassez de dados em consequência dos constrangimentos já antes focados. Concretamente, a calibração em zonas específicas, como as bacias dos rios Chobe (extremo oeste da bacia) e Luangwa (afluente da margem norte do Zambeze, imediatamente a montante de Cahora Bassa), o baixo Zambeze e, ainda, a margem Sul do reservatório de Kariba é extremamente difícil.

Recentemente, tem sido dedicado grande interesse à modelação hidrológica de bacias hidrográficas não monitorizadas (e.g. Sivapalan *et al.* 2003, Winsemius *et al.* 2009, Srinivasan *et al.* 2010), com menção a estratégias que vão desde a aplicação de dados de detecção remota até à transposição regional de parâmetros.

Na bacia do Zambeze foram testadas vários procedimentos de calibração. Winsemius *et al.* (2009) aplicaram o algoritmo GLUE à bacia do Luangwa recorrendo a dados de natureza rigorosa (*hard data*) e difusa (*soft data*). Outra abordagem, baseada em estimativas de altura de água obtidas através de observações de satélite, foi usada para calibrar modelos hidrológicos do Alto Zambeze (a montante de Kariba) e Alto Kafue (a montante de Itezhi-Tezhi) (Michailovsky *et al.* 2012, Michailovsky e Bauer-Gottwein 2013). Meier *et al.* (2011) implementou um algoritmo de assimilação denominado *Ensemble Kalman Filter* (EnKF) para complementar simulações de um modelo hidrológico com estimativas de humidade no solo derivadas de observações de satélite com o objectivo de melhorar previsões em tempo real das bacias do Alto Zambeze, Alto Kafue e Luangwa. Não obstante os progressos efectuados, as anteriores tentativas foram limitadas em termos de horizonte temporal, pois recorreram a estimativas da precipitação derivadas de observações de satélite, só recentemente disponíveis.

Períodos de calibração curtos podem impedir o aproveitamento das totais capacidades de um modelo hidrológico e, conseqüentemente, degradar a potencial qualidade das simulações. No caso do rio Zambeze em particular, tratando-se de uma bacia afectada por variações climáticas involuntariamente severas, a utilização de séries longas, cobrindo várias décadas, é particularmente interessante e desejável.

No contexto brevemente descrito, a investigação que sustentou o presente artigo explorou a possibilidade de recorrer a registos históricos diários de precipitação mais antigos, entendendo-se por tal anteriores a 1998, ou seja, às observações de satélite, por forma a permitir utilizar na calibração e na validação dos modelos hidrológicos séries históricas de caudais médios diários em maior número de estação hidrométricas e com maior dimensão.

A incorporação nos modelos hidrológicos de registos de precipitação anteriores a 1998 depende, obviamente, da informação efectivamente recolhida e, como tal, disponível, e das técnicas de interpolação espacial dessa informação. De entre essas técnicas menciona-se a dos polígonos de Thiessen (Thiessen 1911), a ponderação inversa à distância (do inglês *Inverse Distance Weighting*, IDW) (Shepard 1968), o Kriging (Matheron 1969, Cressie 1988, 1990) e as redes de funções de base radial (do inglês *Radial Basis Function Networks*, RBFN) (Broomhead e Lowe 1988, Lin e Chen 2004).

No caso do Zambeze, a distribuição espacial de postos udométricos com registos históricos é esparsa, o que coloca dificuldades aos métodos de interpolação espacial. Adicionalmente, a natureza da precipitação interpolada difere necessariamente da natureza das estimativas de satélite, o que pode ter implicações relevantes ao nível das respostas dos modelos hidrológicos quando alimentados por um e por outro tipo de dados.

Tendo em vista estas limitações, desenvolveu-se uma nova técnica de interpolação espacial a que se atribuiu a designação de *interpolação por memória orientada por padrões* (do inglês *Pattern Oriented Memory*, POM) (Matos *et al.* 2013, Matos *et al.* 2014). Tal técnica, que é baseada em algoritmos de aprendizagem máquina (Suykens *et al.* 2002), considera explicitamente o tempo como dimensão de interpolação e utiliza padrões de precipitação decorrentes de estimativas de satélite para interpolar registos históricos anteriores a 1998. Desta forma, não só as interpolações espaciais dos registos históricos são de natureza semelhante à das estimativas de satélite e, como tal, compatíveis com estas últimas, como a qualidade do produto final é superior à obtida por outros métodos devido à inclusão de informação adicional. De facto, resultados preliminares indicam que o ajustamento da interpolação POM a precipitações medidas no terreno é comparável às próprias estimativas de satélite (Matos *et al.* 2014). Quando confrontada com métodos tais como IDW ou implementações clássicas de Kriging, são características distintivas da interpolação POM o facto de esta ser não linear e de recorrer a informação espacial assíncrona (no presente caso estimativas de

satélite). Na prática, a interpolação POM faz bom uso de uma maior quantidade de dados do que os métodos alternativos, recorrendo a uma regressão, não só no espaço, mas também no tempo para a obtenção de estimativas.

O trabalho que se apresenta teve por objectivo avaliar qualitativamente os ganhos – em termos do melhor desempenho do modelo hidrológico de estimação de escoamentos diários na bacia hidrográfica do rio Zambeze – decorrentes da extensão do período de calibração desse modelo, de modo a incorporar em tal período precipitações diárias, quer interpoladas a partir de registos históricos de acordo com a técnica POM, quer directamente decorrentes de dados de satélite.

Como exemplo, apresenta-se na Figura 2 a série histórica de caudais médios diários na estação hidrométrica de Mfuwe, no rio Luangwa (ver Figura 1). A comparação dos períodos em que se dispõe de estimativas da precipitação facultadas pela técnica POM e derivadas do produto TMPA 3B42 torna evidente a vantagem de alargar o período de calibração de modo a tirar partido daquelas primeiras estimativas, tanto mais que as mesmas cobrem o período com maior número de registos de caudal médio diário. Verifica-se, assim, que, para além do período passível de ser utilizado para calibração triplicar, são particularmente evidentes os ganhos potenciais associados à quantidade de informação hidrométrica incorporada no modelo.

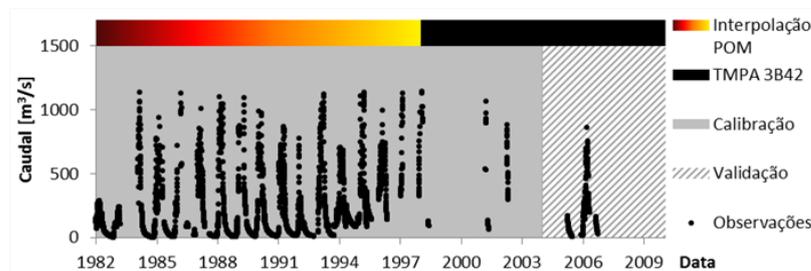
A finalizar este capítulo introdutório menciona-se que a análise em vista utilizou o *Soil & Water Assessment Tool* (SWAT) (Arnold *et al.* 1998, Neitsch *et al.* 2011) como modelo hidrológico aplicado à escala diária. Trata-se de um modelo semi-distribuído, adaptado à simulação contínua e no qual a representação da maioria dos processos hidrológicos que ocorrem na bacia hidrográfica é fisicamente baseada. Acresce que foi objecto de aplicações anteriores na bacia hidrográfica do rio Zambeze (Landert 2008, Michailovsky 2008, Schuol *et al.* 2008, Cohen Liechti 2013, Perrin 2013).

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Interpolação da precipitação

A interpolação da precipitação pela técnica POM é descrita em detalhe em Matos *et al.* (2013, 2014) sendo, neste artigo, apenas objecto de um breve enquadramento.

Na execução da interpolação POM, para cada dia e para cada pixel/quadrícula da malha coberta por dados de satélite não compreendendo no seu interior um posto



**Figura 2** – Vantagens inerentes ao aumento do período de calibração. Ilustração com recurso à série de observações de caudal médio diário disponível em Mfuwe, rio Luangwa.

udométrico, são primeiramente seleccionados os postos udométricos vizinhos desse pixel com registos válidos. Seguidamente, são recolhidas as séries de precipitações estimadas por satélite correspondentes às localizações de cada um desses postos ( $\mathbf{X}_{sat}$ ) e, adicionalmente, do pixel para o qual se pretende obter uma estimativa por interpolação ( $\mathbf{y}_{sat}$ ). Como anteriormente referido, tais séries restringem-se a períodos recentes, posteriores a 1998.

No passo seguinte é treinado um modelo de aprendizagem máquina – as *Least-Squares Support Vector Machines* (LS-SVR) (Suykens *et al.* 2002) – para estimar a série,  $\hat{\mathbf{y}}_{sat}$ , a partir da informação contida nos pixéis correspondentes aos postos vizinhos,  $\mathbf{X}_{sat}$  e de um conjunto de parâmetros de regressão ( $\mathbf{w}$ ) – equação (1):

$$\hat{\mathbf{y}}_{sat} = f(\mathbf{X}_{sat}, \mathbf{w}) \quad (1)$$

Uma vez que os parâmetros de regressão são desconhecidos, a sua estimativa constitui um passo fulcral do método. O processo que conduz a essa estimativa consiste na procura dos valores de  $\mathbf{w}$  que minimizam o erro da regressão, sendo descrito na equação (2):

$$\hat{\mathbf{w}}_{sat} = \arg \min_{\mathbf{w}} \{g[f(\mathbf{X}_{sat}, \mathbf{w}), \mathbf{y}_{sat}] + h(\mathbf{w})\} \quad (2)$$

em que  $\hat{\mathbf{w}}_{sat}$  é a estimativa dos parâmetros óptimos calculada com base em dados de satélite;  $f(\mathbf{X}_{sat}, \mathbf{w})$  é equivalente à estimativa da série,  $\hat{\mathbf{y}}_{sat}$ ;  $\mathbf{y}_{sat}$  são os valores observados;  $g(\cdot)$  é uma medida de erro (normalmente o erro quadrático médio) e  $h(\mathbf{w})$  representa constrangimentos adicionais associados à escolha de  $\mathbf{w}$ .

Findo o processo e devido à natureza específica da função  $f(\cdot)$ , utilizada na regressão,  $\hat{\mathbf{w}}_{sat}$  contém informação sobre os padrões espaciais da precipitação. Para obter as interpolações históricas no dia em questão,  $\hat{\mathbf{y}}_{hist}$ , tudo o que resta fazer é aplicar a equação (1) utilizando os parâmetros de regressão estimados,  $\hat{\mathbf{w}}_{sat}$ , e os dados históricos da precipitação,  $\mathbf{x}_{hist}$ , de acordo com a equação (3):

$$\hat{\mathbf{y}}_{hist} = f(\mathbf{x}_{hist}, \hat{\mathbf{w}}_{sat}) \quad (3)$$

Embora a essência do método seja a descrita, a sua implementação prática deve atender a considerações, discutidas em Matos *et al.* (2014), tais como a definição de  $h(\mathbf{w})$  e a sazonalidade da precipitação.

## 2.2. Calibração do modelo SWAT

A calibração do modelo SWAT teve em conta séries históricas diárias de caudal e, por vezes, de nível nas estações hidrométricas identificadas na Figura 1, bem como nas principais barragens (Cahora Bassa; Itezhi-Tezhi, Kariba e Kafue Gorge), nas Barotse Plains (estação de Senanga, não localizada no mapa)

e no lago Malawi. Para o efeito foram utilizados dois períodos: um período designado por “alargado”, de 1982 a 2003, compreendendo, portanto, estimativas da precipitação facultadas pela técnica POM e derivadas do produto TMPA 3B42, e um período identificado por “reduzido”, de 1998 a 2003, utilizando apenas estas últimas estimativas.

Atendendo à heterogeneidade da bacia – de que resultou a sua representação no modelo hidrológico através de 325 sub-bacias – foram definidas as vinte zonas de calibração delimitadas na Figura 1, nas quais os parâmetros do modelo foram otimizados de modo independente. A calibração seguiu um procedimento em cascata, em que as zonas de montante foram calibradas em primeiro lugar, servindo os resultados das simulações aí efectuadas para “alimentar” as bacias de jusante.

Para definir os parâmetros utilizou-se o algoritmo CMA-ES (Hansen e Ostermeier 2001, Hansen 2006, 2010) aplicado ao coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NE) (Nash e Sutcliffe 1970), calculado de acordo com a equação (4):

$$NE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (4)$$

em que  $N$  representa a dimensão da série observada,  $y_i$  a  $i$ -ésima observação,  $\hat{y}_i$  a correspondente simulação fornecida pelo modelo e  $\bar{y}$  a média da série observada. Valores de NE iguais a 1 indicam um ajustamento perfeito do modelo, enquanto 0 significa que a qualidade da simulação é equivalente à utilização do valor médio. Para ajustamentos piores NE tende para  $-\infty$ .

### 2.3. Comparação de resultados

Por incluir os valores de precipitação POM no modelo hidrológico testaram-se as diferenças entre uma calibração “reduzida”, ou seja, baseada nos anos de 1998 a 2003, e uma calibração “alargada”, apoiada nos anos de 1982 a 2003. Em qualquer dos casos, o período de validação independente decorreu de 2004 a 2009. Anota-se que, a partir de 1982, se dispõe de observações de caudal.

A comparação entre caudais médios diários observados e simulados tendo por base as calibrações “reduzida” e “alargada” utilizou dois períodos de análise: de 1982 a 2003, com o objectivo de verificar a validade da calibração “reduzida” para simular a totalidade

da série histórica, e de 2004 a 2009, numa validação totalmente independente, como antes mencionado.

O ajustamento é ilustrado para as várias localizações na bacia hidrográfica destacadas na Figura 1, tendo sido quantificado pelo coeficiente NE.

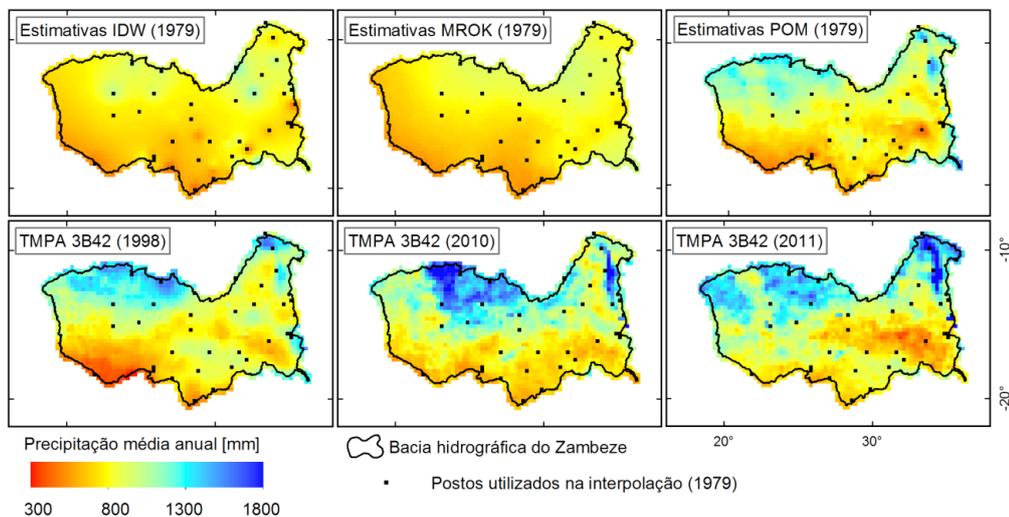
## 3. DADOS

Para derivar o modelo SWAT foi utilizado o modelo digital do terreno HydroSHEDS (Lehner *et al.* 2008, U. S. Geological Survey 2010) com uma resolução espacial de aproximadamente 200 x 200 m<sup>1</sup>.

A caracterização das propriedades do solo foi feita através do *Digital Soil Map of the World and Derived Soil Properties*, versão 3.5 (Food and Agriculture Organization of the United Nations 1995). Já a ocupação do solo foi baseada no produto *Global Land Cover Characterization*, versão 2 (Loveland *et al.* 2000). O dado mais relevante para a execução do modelo SWAT na configuração aplicada é a precipitação. No que se refere ao período entre 1998 e 2009, os dados utilizados foram derivados do produto TMPA 3B42, versão 7 (Huffman *et al.* 1995, Huffman *et al.* 2007, Huffman *et al.* 2010). Para caracterizar a precipitação entre 1979 e 1997 recorreu-se à interpolação POM aplicada às séries de registos udométricos contidas no arquivo do *Global Surface Summary of the Day* (GSOD), produzido pelo *National Climatic Data Center* da NOAA. Como base para essa interpolação utilizaram-se os mesmos dados de satélite (TMPA 3B42, versão 7), embora de 1998 a 2011.

Na Figura 3 ilustra-se o potencial da técnica POM. Tendo como referência o ano de 1979, escolhido arbitrariamente, comparam-se interpolações obtidas pelos métodos IDW, Kriging de realização múltipla (MRK) e POM com os três anos de estimativas TMPA 3B42 que, em termos de precipitação, mais se lhe assemelham àquele outro: anos de 1998, 2010 e 2011. Como pode ser facilmente observado, as interpolações POM conduzem a precipitações aparentemente bastante mais realistas, ou seja, mais conformes com os padrões espaciais das estimativas TMPA 3B42, do que as precipitações decorrentes dos dois métodos alternativos. Na apreciação da figura importa ter presente que os procedimentos de interpolação foram aplicados dia a dia, com cálculo das precipitações anuais por acumulação das correspondentes precipitações diárias.

1 - A versão original do modelo digital do terreno é mais detalhada, com pixéis de aproximadamente 100 x 100 m, mas a computação com tal nível de detalhe revelou-se demasiado exigente e com falhas repetidas.



**Figura 3** – Ilustração da capacidade de a interpolação POM reproduzir superfícies de precipitação. Adaptado de Matos *et al.* (2014).

Tendo-se escolhido o método de Hargreaves para calcular a evapotranspiração potencial, foi necessário fornecer séries de temperaturas diárias ao modelo SWAT. Para as sintetizar recorreu-se aos resultados do modelo de Reanálise 2 (*Reanalysis II*) dos Centros Nacionais para Previsão Ambiental e do Departamento de Energia dos EUA (*National Centers for Environmental Prediction/Department of Energy*) (National Centers for Environmental Prediction/Department of Energy, NCEP/DOE) (Kanamitsu *et al.* 2002, Roads *et al.* 2002) com geração de uma malha de temperaturas em intervalos de 6 h, desde 1979.

Finalmente, os caudais e níveis utilizados na calibração foram fornecidos pelas seguintes entidades: ARA-Zambeze (Administração Regional de Águas do Zambeze), Departamento de Águas da Zâmbia (*Department of Water Affairs of Zambia*), Hidroeléctrica de Cahora Bassa, *Global Runoff Data Centre*, *Zambezi River Authority* e ZESCO.

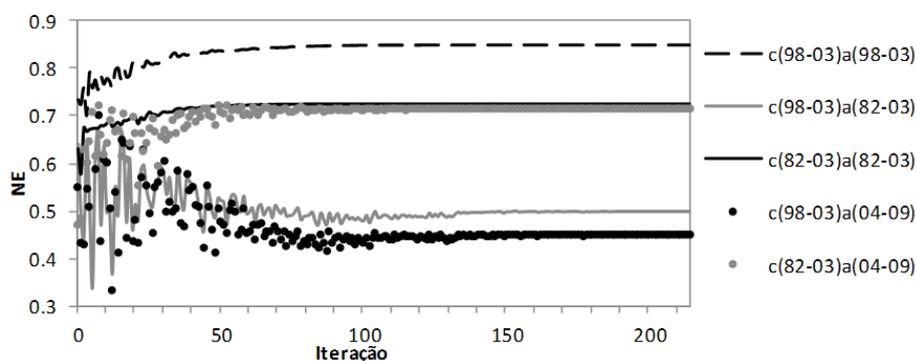
#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Antes de serem apresentados exemplos de simulações resultantes das calibrações “alargada” e “reduzida”, é interessante ver como a consideração destes dois períodos afecta o processo de optimização dos parâmetros do modelo. Em particular, é relevante o facto de que calibrações satisfatórias não garantem

a fiabilidade dos modelos calibrados, em especial quando os períodos de calibração são relativamente reduzidos. Importa ter presente que a aplicação do modelo hidrológico decorreu sempre à escala diária, à qual se referem também os valores dos indicadores de desempenho calculados.

Na Figura 4 apresentam-se, a título de exemplo, os valores do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NE) obtidos em cada iteração do processo de optimização na estação hidrométrica de Chavuma Falls, na zona de montante da bacia (Figura 1). Os resultados são identificados de acordo com o período utilizado na calibração – “alargado”, c[8203], e “reduzido”, c[98-03] – e com o período de análise para o qual foi calculado o coeficiente NE – a[9803], a[82-03] e a[04-09], coincidente com período, respectivamente, de calibração “reduzida”, de calibração “alargada” e de validação independente. A estação hidrométrica em menção foi escolhida precisamente por constituir um bom exemplo de que o melhor desempenho de um modelo na fase de calibração não conduz necessariamente ao melhor desempenho na fase de validação, como evidencia a comparação dos resultados incluídos na figura identificados por c[98-03]a[98-03] e c[98-03]a[04-09].

A primeira série objecto de menção é a identificada por c[98-03]a[98-03], conducente ao melhor ajuste, com o coeficiente NE estabilizando em 0.85. Tal ajuste não é de estranhar, pois os períodos de avaliação e calibração



**Figura 4** – Evolução do processo de calibração e validação do modelo hidrológico. Exemplo relativo à estação hidrométrica de Chavuma Falls. Calibrações efectuadas recorrendo a dois subconjuntos de dados observados: de 1982 a 2003, calibração “alargada”, c(82-03); e de 1998 a 2003, calibração “reduzida”, c(98-03). Avaliação do coeficiente NE em três períodos: 1982 a 2003, a(82-03); 1998 a 2003, a(98-03); e 2004 a 2009, a(04-09).

coincidem. Por outro lado, a série c(98-03)a(04-09), correspondente a calibração reduzida combinada com a validação independente, apresenta os piores resultados (NE de aproximadamente 0.45). Também quando se testa a calibração reduzida no período alargado de 1982 a 2003 – série c(98-03)a(82-03) – se verificam desempenhos relativamente maus (NE de aproximadamente 0.5). É, assim, legítimo considerar que bons desempenhos de calibração não implicam a fiabilidade do modelo em períodos distintos dos utilizados naquela calibração.

A análise das séries relativas à calibração “alargada” – c(82-03)a(82-03) e c(82-03)a(04-09) – demonstra claramente resultados que, mesmo para validação independente, são não só consistentes, como superiores em qualidade (NE de aproximadamente 0.7). Julga-se que o bom ajuste se deve ao facto de, por via da calibração “alargada”, o modelo conter mais informação.

Os hidrogramas obtidos nos períodos de calibração e de validação também para a estação hidrométrica de Chavuma Falls são apresentados nas Figuras 5 e 6, respectivamente.

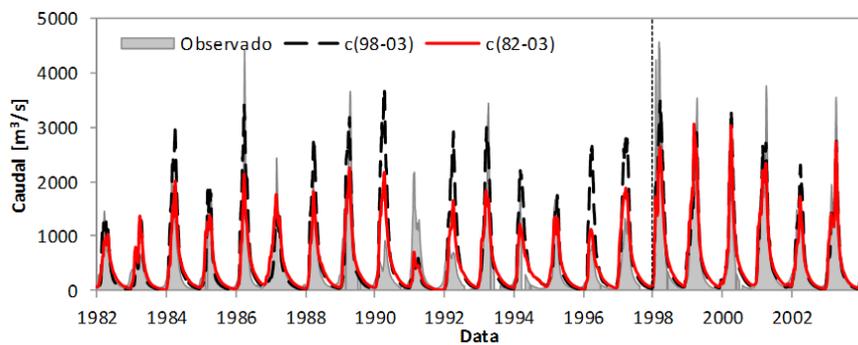
A simulação dos volumes armazenados no lago Malawi apresenta outro caso interessante. Na Figura 7 pode observar-se novamente o ajustamento das simulações resultantes dos dois períodos de calibração considerados. Como seria de esperar, a calibração alargada produz melhores resultados entre 1982 e 1998. Observando os hidrogramas da Figura 8, referentes ao período de validação independente,

pode constatar-se que, embora ocorra um desvio sistemático, os volumes simulados tendo por base a calibração “alargada” aproximam-se mais da série observada.

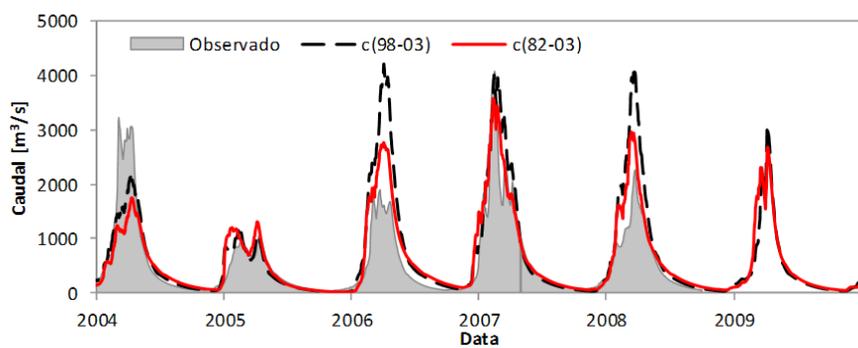
Em alguns casos, no entanto, a adopção da calibração “alargada” não teve efeitos tão evidentes. Um desses casos diz respeito à estação hidrométrica de Great East Rd. Bridge, no rio Luangwa (Figura 1). Devido a falhas nos dados, a calibração “reduzida” pode utilizar apenas quatro anos incompletos de medições. Pelo contrário, a calibração “alargada” conta com aproximadamente vinte anos (Figura 9).

Poder-se-ia pensar que os ganhos da aplicação da calibração alargada seriam ainda mais evidentes neste caso, mas os resultados no período de validação independente (Figura 10) indicam o contrário, com o coeficiente NE de apenas 0.05 para a calibração “alargada” e um valor bastante melhor de 0.55 para a calibração “reduzida”. No entanto, considera-se que a falta de registos entre 2004 a 2009 faz com que tais resultados não sejam significativos.

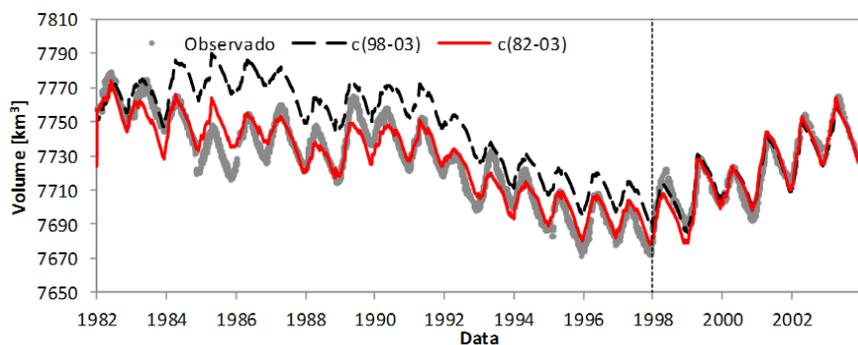
Finalmente, ilustra-se um caso particular em que a utilização da calibração “alargada” pode ter potenciado uma degradação dos resultados: o lago Kariba. De facto, como se observa na Figura 11, os volumes de 1998 em diante, incluindo o período de validação independente, entre 2004 e 2009, são muito bem reproduzidos tendo por base a calibração reduzida c(98-03), designadamente quando comparados com os decorrentes da calibração “alargada” c(82-03), que sobrestimam os volumes observados.



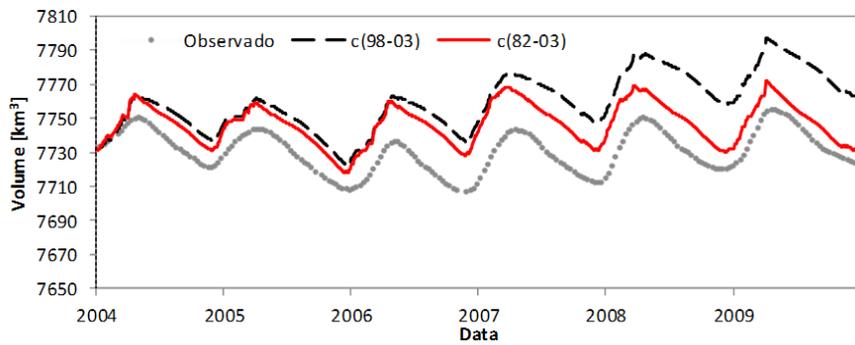
**Figura 5** – Estação hidrométrica de Chavuma Falls. Caudais médios diários observados e simulados entre 1982 e 2003, tendo por base as calibrações “reduzida”, c(98-03), e “alargada”, c(82-03).



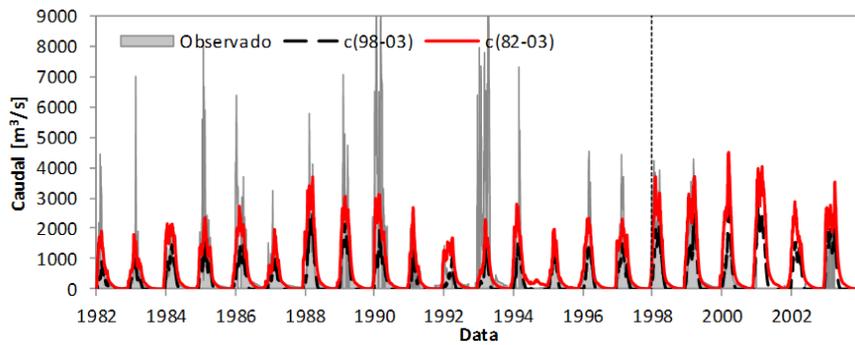
**Figura 6** – Estação hidrométrica de Chavuma Falls. Caudais médios diários observados e simulados entre 2004 e 2009 (período de validação independente), tendo por base as calibrações “reduzida”, c(98-03), e “alargada”, c(82-03).



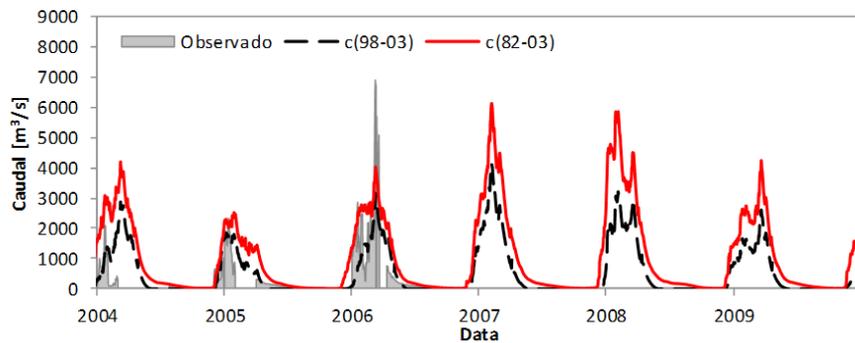
**Figura 7** – Lago Malawi. Volumes diários observados e simulados entre 1982 e 2003, tendo por base as calibrações “reduzida”, c(98-03), e “alargada”, c(82-03).



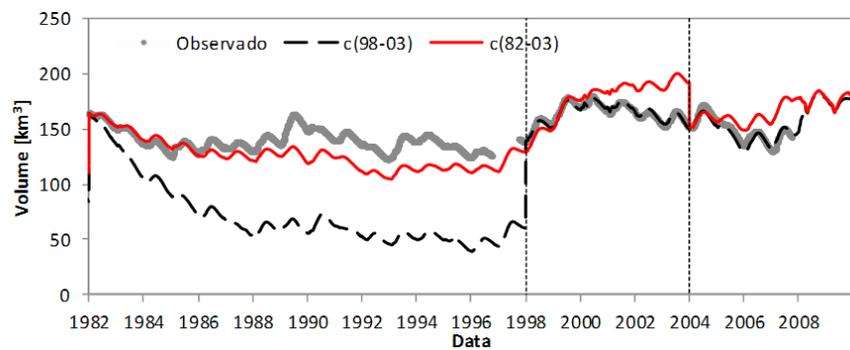
**Figura 8** – Lago Malawi. Volumes diários observados e simulados entre 2004 e 2009 (período de validação independente), tendo por base as calibrações “reduzida”, c(98-03), e “alargada”, c(82-03).



**Figura 9** – Estação hidrométrica de Great East Rd. Bridge. Caudais médios diários observados e simulados entre 1982 e 2003, tendo por base as calibrações “reduzida”, c(98-03), e “alargada”, c(82-03).



**Figura 10** – Estação hidrométrica Great East Rd. Bridge. Caudais médios diários observados e simulados entre 2004 e 2009 (período de validação independente), tendo por base as calibrações “reduzida”, c(98-03), e “alargada”, c(82-03).



**Figura 11** – Lago Kariba. Volumes diários observados e simulados entre 1982 e 2009, tendo por base calibrações “reduzida” reduzida, c(98-03), e “alargada” c(82-03). Observa-se que no início de cada período de referência (início dos anos de 1982, 1998 e 2004) as simulações adoptam os correspondentes volumes observados por forma a facilitar a análise.

No período entre 1982 e 1998 os resultados invertem-se, ocorrendo grande erros por defeito na simulação “reduzida” c(98-03). Claramente, a simulação “alargada” c(82-03) compensa uma tendência histórica para subestimar volumes no lago, com a sobrestimação de resultados mais recentes. Este efeito pode ter várias causas, desde erros nas séries de caudal afluente e efluente, passando por alterações progressivas no uso do solo na bacia própria do lago, até uma pior qualidade da interpolação POM na zona sul da bacia hidrográfica do rio Zambeze e à consequente falha do modelo hidrológico no período de 1982 a 1998. Independentemente das causas dos erros, estas observações indicam que a adopção de períodos de calibração alargados necessita de validação adicional.

Finalmente, apresentam-se na Tabela 1 coeficientes de NE correspondentes a várias estações hidrométricas. Os resultados ilustram o desempenho de simulações baseadas nas calibrações “reduzida”, c(98-03), e “alargada”, c(82-03), tendo por base dois períodos de análise ou de validação: de 1982 a 2003, a(82-03), e de 2004 a 2009, a(04-09).

De acordo com o expectável, verifica-se que a calibração alargada conduz sempre a desempenhos superiores entre 1982 e 2003. No período de avaliação independente, os resultados são mais difíceis de interpretar. Se em Chavuma Falls, Watopa Pontoon e Lukulu (todos na área Noroeste da bacia), as vantagens da calibração alargada são evidentes, para Senanga, Victora Falls e Kafue Hook Bridge a calibração alargada aparenta não trazer vantagens evidentes. Apenas no

caso de Great East Rd. Bridge a calibração alargada aparenta levar a uma degradação dos resultados. No entanto, como já discutido, questiona-se a validade da comparação no período de 2004 a 2009 devido à escassez de observações hidrométricas.

## 5. CONCLUSÕES

Os modelos hidrológicos e, especificamente de entre esses modelos, os de estimação de escoamentos proporcionam informação essencial a muitas das acções relacionadas com o dimensionamento de obras hidráulicas e com a gestão e planeamento de recursos hídricos. Em consequência do desenvolvimento, em décadas próximas, quer de técnicas de aquisição de informação (envolvendo, por exemplo, informação com grande discretização espacial ou ainda derivada de dados de satélite), quer de capacidades acrescidas no processamento matemático (directamente associáveis à generalização dos meios informáticos), resultaram modelos de estimação de escoamentos progressivamente mais complexos, em cuja implementação as etapas de calibração e de validação assumem especial relevância. De facto, só através dessas etapas é possível, em primeiro lugar, concluir se o modelo escolhido é adequado e, em segundo lugar, aferir a qualidade e fiabilidade dos resultados que fornece. A opção por um dado modelo considerado fiável e com bom desempenho pressupõe, na generalidade das aplicações, um balanço entre a complexidade do mesmo e a quantidade e qualidade dos dados disponíveis para a sua calibração e validação.

**Tabela 1** – Comparação das estratégias de calibração “reduzida”, c(98-03), e “alargada”, c(82-03). Desempenho do modelo hidrológico à escala diária quantificado pelos valores do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe relativo aos períodos de calibração (1982 a 2003) e validação (2004 a 2009) para vários pontos na bacia.

Período de validação: Período de calibração:	a(82-03)		a(03-09)	
	c(98-03)	c(82-03)	c(98-03)	c(82-03)
Chavuma Falls	0.50	<b>0.72</b>	0.45	<b>0.71</b>
Watopa Pontoon	0.49	<b>0.61</b>	0.69	<b>0.71</b>
Lukulu	0.07	<b>0.63</b>	0.54	<b>0.77</b>
Senanga	0.62	<b>0.81</b>	<b>0.83</b>	0.83
Victoria Falls	0.65	<b>0.76</b>	<b>0.71</b>	0.71
Kafue Hook Bridge	0.41	<b>0.60</b>	<b>0.60</b>	0.60
Great East Rd. Bridge	0.25	<b>0.43</b>	<b>0.55</b>	0.05

O presente artigo insere-se no âmbito da estimação de escoamentos diários numa extensa bacia hidrográfica muito escassamente monitorizada, em termos do número de pontos de medição e da continuidade temporal dos registos aí adquiridos, e na qual as precipitações decorrentes de dados de satélite, não obstante só disponíveis a partir de 1998, constituem uma fonte de informação incontornável: a bacia hidrográfica do rio Zambeze, com a área de cerca de 1 400 000 km<sup>2</sup>.

Tendo presente a relevância da precipitação, enquanto descritor fundamental do processo de formação do escoamento, o objectivo do estudo focou-se na avaliação quantitativa dos ganhos, em termos do melhor desempenho de modelo hidrológico, da extensão do período de calibração de modo a combinar no mesmo precipitações interpoladas a partir de registos históricos e fornecidas por satélites. Tal combinação só é possível uma vez que a interpolação espacial dos dados históricos tenha “aprendido” e incorporado em si a estrutura espacial das superfícies de precipitação de satélite, para o que foi aplicada aos registos históricos uma técnica de interpolação recentemente desenvolvida, designada por interpolação por memória orientada por padrões, ou, do Inglês, *Pattern Oriented Memory*, POM (Matos *et al.* 2013, Matos *et al.* 2014).

Considerando, para efeitos de calibração, a divisão da bacia hidrográfica do rio Zambeze em vinte zonas e aplicando a essas zonas uma calibração automática em cascata baseada no algoritmo *Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy* (CMA-ES) (Hansen e

Ostermeier 2001) tendo como indicador de desempenho o coeficiente de Nash-Stucliffe, demonstrou-se: (i) que uma boa calibração não implica necessariamente uma boa validação; e (ii) que se podem alcançar ganhos de desempenho significativos através da extensão dos períodos de calibração, de modo a incorporar nos mesmos, registos históricos de precipitação aos quais foi conferida uma estrutura espacial coerente e compatível com a decorrente das estimativas de satélite.

Não obstante a relevância dos resultados obtidos que, de algum modo, reforçam a contribuição positiva dos dados de satélite, também por possibilitarem uma integração e, conseqüentemente, uma mais completa utilização de informação hidrológica convencional no modelo do escoamento superficial, não se pode deixar de registar que se considera fundamental prosseguir com a aquisição desta última informação sob pena de os modelos se tornarem meros exercícios matemáticos, insusceptíveis de validação. Este aspecto poderá ser tanto mais pertinente quanto, em consequência das alterações climáticas, se esperam mudanças no comportamento hidrológico das bacias hidrográficas, sendo fundamental aferir com novos e mais recentes dados de superfície a capacidade de os modelos detectarem e simularem comportamento distintos dos indicados por registos adquiridos no passado, os quais, em consequência dessas mudanças, necessariamente perderam algum do seu conteúdo informativo.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem sobretudo às entidades responsáveis da bacia, ARA-Zambeze, DWA, HCB, ZESCO e ZRA, que contribuíram com dados e comentários e sem o apoio das quais seria impossível compilar os dados necessários à calibração do modelo, a Jasper Vrugt que forneceu o código do algoritmo AMALGAM, a Théodora Cohen e Chetan Maringanti, que ajudaram preparação e calibração do modelo SWAT e, finalmente, à Fundação para a Ciência e a Tecnologia, que proporcionou a maior parte do financiamento para a investigação.

## BIBLIOGRAFIA

- Aonashi, K., J. Awaka, M. Hirose, T. Kozu, T. Kubota, G. LIU, S. Shige, S. Kida, S. Seto e N. Takahashi (2009). GSMaP passive microwave precipitation retrieval algorithm: algorithm description and validation. *87:119-136*.
- Arnold, J. G., R. Srinivasan, R. S. Muttiah e J. Williams (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development. *Journal of the American Water Resources Association 34:73-89*.
- Beven, K. (1993). Prophecy, reality and uncertainty in distributed hydrological modelling. *Advances in Water Resources 16:41-51*.
- Beven, K. (2006). A manifesto for the equifinality thesis. *Journal of Hydrology 320:18-36*.
- Beven, K. e A. Binley (1992). The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes 6:279-298*.
- Broomhead, D. e D. Lowe (1988). Radial basis functions, multi-variable functional interpolation and adaptive networks. *Royal signals and radar establishment Malvern, England*.
- Cohen Liechti, T. (2013). Influence of dam operation on water resources management under different scenarios in the Zambezi River Basin considering environmental objectives and hydropower. Ph.D. thesis. *École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Switzerland*.
- Cohen Liechti, T., J. P. Matos, J.-L. Boillat e A. J. Schleiss (2011). Comparison and evaluation of satellite derived precipitation products for hydrological modeling of the Zambezi River Basin. *Hydrology and Earth System Sciences 8:8173-8201*.
- CRC Catchment Hydrology (2005). Series on Model Choice: 1. General approaches to modelling and practical issues of model choice. *Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology*.
- Cressie, N. (1988). Spatial prediction and ordinary kriging. *Mathematical Geology 20:405-421*.
- Cressie, N. (1990). The origins of kriging. *Mathematical Geology 22:239-252*.
- Deb, K., A. Pratap, S. Agarwal e T. Meyarivan (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on 6:182-197*.
- Denconsult (1998). Sector studies under ZACPLAN.
- Diskin, M. H. e E. Simon (1977). A procedure for the selection of objective functions for hydrologic simulation models. *Journal of Hydrology 34:129-149*.
- Duan, Q., S. Sorooshian e V. Gupta (1992). Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research 28:1015-1031*.
- Efstratiadis, A. e D. Koutsoyiannis. 2010. One decade of multi-objective calibration approaches in hydrological modelling: a review. *Hydrological Sciences Journal-Journal des Sciences Hydrologiques 55:58-78*.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations, F. (1995). Digital soil map of the World and derived soil properties [version 3.5] [CD-ROM]. Rome, Italy.
- Gerrits, A. M. J. (2005). Hydrological modelling of the Zambezi catchment for gravity measurements. Master. *Technical University Delft, Delft, The Netherlands*.
- Global Runoff Data Centre. River discharge time series D-56002 Koblenz, Germany.
- Goldberg, D. e J. Holland (1988). Genetic Algorithms and Machine Learning. *Machine learning 3:95-99*.
- Hansen, N. (2006). The CMA evolution strategy: A comparing review. Pages 75-102 in J. Lozano, P. Larrañaga, I. Inza e E. Bengoetxea, editors. *Towards a new evolutionary computation*. Springer Berlin / Heidelberg.
- Hansen, N. (2010). The CMA evolution strategy: A tutorial.
- Hansen, N. e A. Ostermeier (2001). Completely derandomized self-adaptation in evolution strategies. *Evolutionary computation 9:159-195*.
- Herman, A., V. B. Kumar, P. A. Arkin e J. V. Kousky (1997). Objectively determined 10-day African rainfall estimates created for famine early warning systems. *International Journal of Remote Sensing 18:2147-2159*.
- Huffman, G. J., R. F. Adler, D. T. Bolvin, E. J. Nelkin, F. Hossain e M. Gebremichael (2010). The TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA). Pages 3-22 in M. Gebremichael e F. Hossain, editors. *Satellite rainfall applications for surface hydrology*. Springer.
- Huffman, G. J., R. F. Adler, B. Rudolf, U. Schneider e P. R. Keehn (1995). Global precipitation estimates

- based on a technique for combining satellite-based estimates, rain gauge analysis, and NWP model precipitation information. *Journal of Climate* 8:1284-1295.
- Huffman, G. J., D. T. Bolvin, E. J. Nelkin, D. B. Wolff, R. F. Adler, G. Gu, Y. Hong, K. P. Bowman e E. F. Stocker (2007). The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-Global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scales. *Journal of Hydrometeorology* 8:38-55.
- Joyce, R. J., J. E. Janowiak, P. A. Arkin e P. Xie (2004). CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. *Journal of Hydrometeorology* 5:487-503.
- Kanamitsu, M., W. Ebisuzaki, J. Woollen, S.-K. Yang, J. J. Hnilo, M. Fiorino e G. L. Potter (2002). NCEP-DOE AMIP-II reanalysis (R-2). *Bulletin of the American Meteorological Society* 83:1631-1644.
- Kennedy, J. e R. Eberhart (1995). Particle swarm optimization. Pages 1942-1948 in *Neural Networks, 1995. Proceedings., IEEE International Conference on.* IEEE.
- Kubota, T., S. Shige, H. Hashizume, K. Aonashi, N. Takahashi, S. Seto, Y. Takayabu, T. Ushio, K. Nakagawa e K. Iwanami (2007). Global precipitation map using satellite-borne microwave radiometers by the GSMaP Project: Production and validation. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 45:2259-2275.
- Landert, J. (2008). Modeling Biogeochemistry using the Soil and Water Assessment Tool in the Zambezi River Basin. Swiss Federal Institute of Technology Zurich.
- Lehner, B., K. Verdin e A. Jarvis (2008). New global hydrography derived from spaceborne elevation data. *Eos Trans. AGU* 89:93-94.
- Lin, G.-F. e L.-H. Chen (2004). A spatial interpolation method based on radial basis function networks incorporating a semivariogram model. *Journal of Hydrology* 288:288-298.
- Loveland, T. R., B. C. Reed, J. F. Brown, D. O. Ohlen, Z. Zhu, L. W. M. J. Yang e J. W. Merchant (2000). Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCover from 1 km AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing* 21:1303-1330.
- Mantovan, P. e E. Todini (2006). Hydrological forecasting uncertainty assessment: Incoherence of the GLUE methodology. *Journal of Hydrology* 330:368-381.
- Matheron, G. (1969). *Le krigeage universel*. École nationale supérieure des mines de Paris.
- Matondo, J. e P. Mortensen (1998). Water resource assessment for the Zambezi river basin. *Water International* 23:256-262.
- Matos, J. P., T. Cohen Liechti, D. Juízo, M. M. Portela e A. J. Schleiss (2013). Can satellite based pattern-oriented memory improve the interpolation of sparse historical rainfall records? *Journal of Hydrology* 492:102-116.
- Matos, J. P., T. Cohen Liechti, M. M. Portela e A. J. Schleiss (2014). Pattern-oriented memory interpolation of sparse historical rainfall records, in press. *Journal of Hydrology* Volume 510: 493-503.
- Meier, P. (2012). Real-time hydrologic modelling and floodplain modelling in the Kafue river basin, Zambia Ph.D. Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Switzerland.
- Meier, P., A. Frömel e W. Kinzelbach (2011). Hydrological real-time modelling in the Zambezi river basin using satellite-based soil moisture and rainfall data. *Hydrology and Earth System Sciences* 15:999-1008.
- Michailovsky, C. I. 2008. Comparing GRACE water storage observations and regional-scale hydrological models for Southern Africa. Technical University of Denmark.
- Michailovsky, C. I. e P. Bauer-Gottwein (2013). Operational reservoir inflow forecasting with radar altimetry: the Zambezi case study. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 10:9615-9644.
- Michailovsky, C. I., S. McEnnis, P. A. M. Berry, R. Smith e P. Bauer-Gottwein (2012). River monitoring from satellite radar altimetry in the Zambezi River Basin. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 9:3203-3235.
- Montanari, A. (2007). What do we mean by 'uncertainty'? The need for a consistent wording about uncertainty assessment in hydrology. *Hydrological Processes* 21:841-845.
- Moradkhani, H. e S. Sorooshian (2008). General review of rainfall-runoff modeling: model calibration, data assimilation, and uncertainty analysis. Pages 1-24 in S. Sorooshian, K.-L. Hsu, E. Coppola, B. Tomassetti, M. Verdecchia e G. Visconti, editors. *Hydrological modelling and the water cycle*. Springer Berlin Heidelberg.
- Moriasi, D., B. Wilson, K. Douglas-Mankin, J. Arnold e P. Gowda (2012). Hydrologic and water quality models: use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE* 55:1241-1247.
- Nash, J. e J. Sutcliffe (1970). River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10:282-290.
- Neitsch, S. L., J. G. Arnold, J. R. Kiniry e J. R. Williams (2011). *Soil and water assessment tool theoretical documentation, version 2009*. Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service; Brackland Research Center, Texas

- Agricultural Experiment Station, Temple, Texas, USA.
- Perrin, M. (2013). *Gestion intégrée des ressources en eau du bassin du Zambèze*. Master's thesis. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Switzerland.
- Roads, J., M. Kanamitsu e R. Stewart (2002). CSE water and energy budgets in the NCEP-DOE Reanalysis II. *Journal of Hydrometeorology* 3:227-248.
- Schuol, J., K. C. Abbaspour, H. Yang, R. Srinivasan e A. J. B. Zehnder (2008). Modeling blue and green water availability in Africa. *Water Resour. Res* 44:W07406.
- Shamseldin, A. Y. e K. M. O'Connor (2001). A non-linear neural network technique for updating of river flow forecasts. *Hydrology and Earth System Sciences* 5:577-597.
- Shepard, D. (1968). A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. Pages 517-524 in *Proceedings of the 1968 23rd ACM national conference*
- Sivapalan, M., K. Takeuchi, S. W. Franks, V. K. Gupta, H. Karambiri, V. Lakshmi, X. Liang, J. J. McDonnell, E. M. Mendiondo e P. E. O'connell (2003). IAHS decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003-2012: shaping an exciting future for the hydrological sciences. *Hydrological Sciences Journal* 48:857-880.
- Sorooshian, S. e V. K. Gupta (1983). Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: The question of parameter observability and uniqueness. *Water Resources Research* 19:260-268.
- Sorooshian, S., K. Hsu, X. Gao, H. Gupta, B. Imam e D. Braithwaite (2000). Evaluation of PERSIANN system satellite-based estimates of tropical rainfall. *Bulletin of the American Meteorological Society* 81:2035-2046.
- Srinivas, N. e K. Deb (1994). Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms. *Evolutionary computation* 2:221-248.
- Srinivasan, R., X. Zhang e J. Arnold (2010). SWAT ungauged: hydrological budget and crop yield predictions in the Upper Mississippi River Basin. *Transactions of the ASABE* 53:1533-1546.
- Suykens, J. A. K., T. V. Gestel, J. D. Brabanter, B. D. Moor e J. Vandewalle (2002). *Least squares support vector machines*. World Scientific Pub. Co. Inc., Singapore.
- SWRSD Zambezi Basin Joint Venture (2011). *Dam synchronization and flood releases in the Zambezi River Basin project*, Consultancy report for the German Federal Ministry for Economic Cooperation and Development (GTZ) and the UK Department for International Development (DIFD).
- Thiessen, A. H. (1911). Precipitation averages for large areas. *Monthly weather review* 39:1082-1089.
- U. S. Geological Survey (2010). *HydroSHEDS*.
- Vörösmarty, C. J. e B. Moore (1991). Modelling basin-scale hydrology in support of physical climate and global biogeochemical studies: An example using the Zambezi River. *Surveys in Geophysics* 12:271-311.
- Vrugt, J. A., H. V. Gupta, L. A. Bastidas, W. Bouten e S. Sorooshian (2003). Effective and efficient algorithm for multiobjective optimization of hydrologic models. *Water Resources Research* 39:1214.
- Vrugt, J. A. e B. A. Robinson (2007). Improved evolutionary optimization from genetically adaptive multimethod search. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104:708.
- Vrugt, J. A., B. A. Robinson e J. M. Hyman (2009a). Self-adaptive multimethod search for global optimization in real-parameter spaces. *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on* 13:243-259.
- Vrugt, J. A., C. J. Ter Braak, M. P. Clark, J. M. Hyman e B. A. Robinson (2008). Treatment of input uncertainty in hydrologic modeling: Doing hydrology backward with Markov chain Monte Carlo simulation. *Water Resources Research* 44.
- Vrugt, J. A., C. J. Ter Braak, H. V. Gupta e B. A. Robinson (2009b). Equifinality of formal (DREAM) and informal (GLUE) Bayesian approaches in hydrologic modeling? *Stochastic environmental research and risk assessment* 23:1011-1026.
- Winkler, R. L. (2010). *An introduction to Bayesian inference and decision*, 2nd edition. Probabilistic Publishing, Florida.
- Winsemius, H., B. Schaefli, A. Montanari e H. Savenije (2009). On the calibration of hydrological models in ungauged basins: A framework for integrating hard and soft hydrological information. *Water Resour. Res* 45:W12422.
- Xie, P. e P. Arkin (1996). Analyses of global monthly precipitation using gauge observations, satellite estimates, and numerical model predictions. *Journal of Climate* 9:840-858.