



XVI SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE
15º SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES
DE LÍNGUA PORTUGUESA

**APLICAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO CAWM EM SUB-BACIA DA
BACIA DO RIO MADEIRA**

*Pedro Henrique Leite de Lima¹; Fernanda Maria Bernardino da Silva²; Thamires Carolayne
Cavalcanti Moura¹; Hudson Tiago dos Santos Pedrosa² & José Almir Cirilo¹*

RESUMO – Esse estudo tem como objetivo avaliar a simulação dos processos hidrológicos de uma bacia hidrográfica pertencente à bacia do Madeira. Para a obtenção dos resultados foi aplicado o modelo hidrológico Campus Agreste Watershed Model (CAWM), que é um modelo que utiliza os dados de vazão, precipitação, evapotranspiração e considera o tipo e a cobertura do solo para a simulação do escoamento superficial em bacias. Para tanto, foi gerada sub-bacia a partir de um posto de vazão localizado no Rio Aripuana, da bacia hidrográfica do Madeira para realização da modelagem hidrológica. Como resultado, observou-se bom ajuste do modelo na calibração e validação dos resultados, não obstante se tratar de modelo concentrado espacialmente.

ABSTRACT– This study aims to evaluate the hydrological process of a hydrographic basin belonging to the Madeira basin. To obtain the results, the hydrological model Campus Agreste Watershed Model (CAWM), was applied. which is a model that uses flow, precipitation, evapotranspiration data and considers the type and soil cover for the simulation of surface runoff in basins, where, for that, a sub-basins was generated from a flow station located in the Aripuana River of the Madeira watershed to carry out hydrological modeling. As a result, a good fit of the model was observed in the calibration and validation of the results, despite being a lumped model.

Palavras-Chave – Bacia hidrográfica do rio Madeira; Modelo hidrológico aplicado a grandes bacias; CAWM

INTRODUÇÃO

Conforme Ogassawara e Gass (2018), uma bacia hidrográfica é denominada como uma unidade territorial formada por uma área drenada por um rio principal, que possui nascente em terrenos oblíquos e percorrem com seus respectivos afluentes até o ponto de desaguamento. Uma bacia hidrográfica é delimitada em território através dos relevos que são responsáveis pela divisão

¹) Universidade Federal de Pernambuco: Av Marielle Franco, s/n - KM 59, Caruaru – PE, (81)99161-5566, pedro.leitelima@ufpe.br; thamires.cavalcanti@ufpe.br; jose.cirilo@ufpe.br

²) Universidade Federal de Pernambuco: Av Prof. Moraes Rego, 1235 – Cidade Universitária, Recife – PE, (81)99799-1036, fernanda.mariabernardino@ufpe.br; hudsontsp@gmail.com

das águas advindas das chuvas, que escoam superficialmente e/ou infiltram e lixiviam no solo, favorecendo a recarga hídrica dos lençóis freáticos.

Para conhecer e representar os processos hidrológicos de uma bacia hidrográfica, a fim de realizar simulações e promover o planejamento hídrico, é necessário a aplicação de modelos hidrológicos que representam a parte terrestre do ciclo hidrológico, realizando a transformação da precipitação que incide sobre uma bacia em vazão em uma dada seção de um rio. Estes modelos fornecem conhecimentos associados à dinâmica de funcionamento das bacias em um pequeno intervalo de tempo, proporcionando a realização de atividades preventivas (DA SILVA, 2013)

Segundo Neto (2019) e Neto et al. (2020), para o processo de modelagem hidrológica aplicada a bacias que possuem grandes declives e geram respostas imediatas às precipitações intensas nos escoamentos dos rios, é fundamental uma análise diária ou sub-diária para conhecimento dos picos ao longo do dia e dos valores das vazões máximas.

Para o presente estudo foi utilizado o modelo chuva-vazão Campus Agreste Watershed Model (CAWM) (CIRILO et al., 2020, GOMES et al., 2021) O modelo foi aplicado na bacia hidrográfica do rio Madeira.

O presente trabalho faz parte da oficina de modelagem hidrológica desenvolvida pelos alunos de mestrado e doutorado da disciplina Modelagem Hidrológica e Hidrodinâmica – Programas de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFPE.

METODOLOGIA

Área de estudo

A bacia do rio Madeira (Figura 1) possui uma área transnacional de aproximadamente 1.324.727 quilômetros quadrados estendendo-se pela Bolívia (51%), Brasil (42%) e Peru (7%), o que representa cerca de um terço da área da bacia amazônica, a qual por sua vez ocupa uma área aproximada de 6.000.000 quilômetros quadrados (SOUZA, 2019). Parte considerável da área da bacia está localizada na região denominada de arco do desmatamento, sendo a região que possui o maior índice de desmatamento da região da Amazônia, onde o avanço da produção agropecuária sobre o meio natural segue em direção à floresta, compreendendo uma área de aproximadamente 650.000 quilômetros quadrados, tendo como estados limítrofes o Maranhão, Tocantins, Pará, Mato Grosso, Rondônia, Amazonas e Acre (FERREIRA *et al.*, 2005).

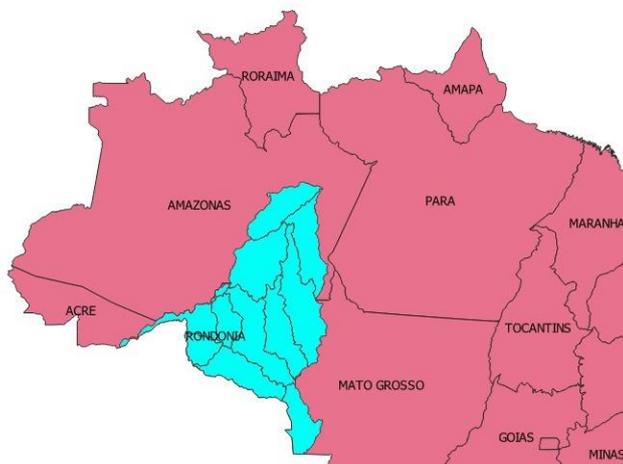


Figura 1 - Localização da bacia Madeira

O desmatamento é um dos fatores que interferem diretamente no funcionamento hidrológico, resultando na perda da biodiversidade, reduzindo a capacidade de captura de carbono e deixando em atonia o ciclo hidrológico regional, elevando as temperaturas do solo e conseqüentemente de maneira gradativa tornando a Amazônia em uma savana (MARENGO E BETTS, 2011).

A bacia do rio Madeira, por estar localizada na região equatorial, com incidência de um clima quente e úmido, está sujeita a eventos de precipitações intensas e grande variabilidade espacial, tornando o rio caudaloso, além de em diferentes divisões da bacia apresentar um regime hidroclimático que contrasta (ESPINOZA et al., 2012).

O principal rio da bacia, considerando sua transnacionalidade, é o rio Madeira, um dos principais rios do Brasil e o mais longo afluente do rio Amazonas, possuindo aproximadamente 3315 quilômetros, com largura variando entre 440 a 9.900 metros, e sua profundidade, em alguns trechos, ultrapassando 13 metros. Sua nascente está situada na Cordilheira dos Andes, na Bolívia. Pela demanda, ele possui uma série diversificada de estações utilizadas em análise geo-espacial para obtenção de resposta do comportamento hidrometeorológico. A nível mundial, é um dos cinco rios mais importantes no quesito socioambiental por possuir uma hidrovia transitável que favorece o fluxo do comércio entre o Norte e o Centro-Oeste brasileiro (ANA, 2019).

Campus Agreste Watershed Model – CAWM

Proposto por Cirilo et al. (2020) e Cirilo (2021), o Campus Agreste Watershed Model (CAWM), consiste em um modelo hidrológico concentrado no espaço que considera as características físicas da bacia hidrográfica em estudo para que o processo hidrológico seja representado.

Inicialmente, o modelo foi criado para aplicações em regiões que tivessem climas semiáridos, no entanto o modelo foi atualizado e adaptado, implantando o cálculo das vazões de base durante as épocas de estiagem, passando a também ser aplicado em climas úmidos.

Quanto às variáveis consideradas nos processos físicos, a Figura 2 ilustra as representadas no CAWM. Durante os processos físicos, quando a precipitação (P) é maior que a evapotranspiração potencial (E), a diferença entre elas ocasiona a geração da precipitação efetiva (P_n). Quando a evapotranspiração é maior que a precipitação, tudo que é precipitado logo é transformado em evapotranspiração direta (E_d), e a parcela não atendida é extraída parcialmente ou integralmente do reservatório do solo, a depender da capacidade de atender a demanda. Logo, a precipitação efetiva é dividida em três componentes, sendo o primeiro referente a recarga do solo (P_s) em decorrência da precipitação efetiva, da quantidade de água acumulada no solo em cada intervalo de tempo (S_t), da capacidade máxima de retenção de água do solo (S) e de um parâmetro que deve ser calibrado e está associado à infiltração (β). Outra componente é a evapotranspiração suplementar (E_s), esta é limitada pela precipitação efetiva e depende de um parâmetro estimado α que está associado as imprecisões dos dados da evapotranspiração e das variações no espaço atreladas ao tipo de solo, clima e cobertura vegetal. Por fim, tem-se o escoamento superficial direto (F_d) que é definido com base na diferença entre a precipitação efetiva e as variáveis de recarga do solo e evapotranspiração suplementar.

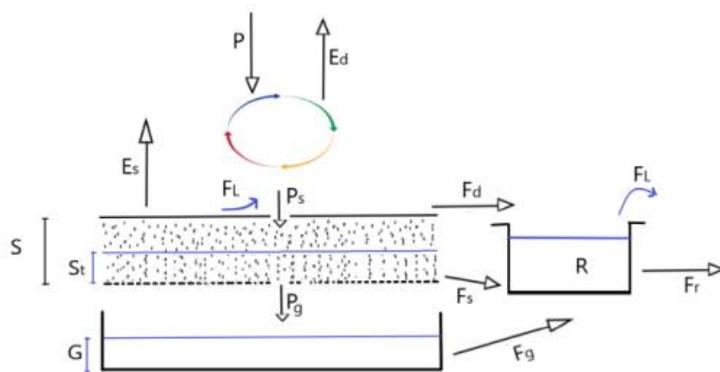


Figura 2 – Esquema ilustrativo das variáveis e processos do modelo hidrológico CAWM

O modelo considera três reservatórios, um sendo o reservatório do solo (S), um reservatório da calha fluvial (R) e um subterrâneo (G). O reservatório do solo alimenta o reservatório da calha fluvial a partir do escoamento subsuperficial (F_s) que depende do acúmulo de água no solo em um dado intervalo de tempo e do parâmetro de permeabilidade do solo (K_s) a ser calibrado. Quando o solo se encontra saturado, atingindo sua capacidade máxima, o que excede gera um novo fluxo (P_g)

que é lançado para o reservatório subterrâneo e a parcela desse novo fluxo que escoar é direcionado para a calha fluvial.

Desta forma, três componentes (F_d , F_s e F_g) alimentam de maneira contínua o reservatório da calha fluvial. Também são consideradas as perdas de água (F_L) que são descontadas diretamente do escoamento fluvial no canal (F_r), e são calculadas com base no volume R , um parâmetro de perdas (K_L) a ser calibrado e um parâmetro de precipitação estimado.

Processo de modelagem

Para aplicação prática do modelo, foi escolhido um posto fluviométrico situado em um dos rios principais da bacia do rio Madeira. O posto selecionado foi o de código 1583, situado no Rio Aripuna, conforme mostra a figura a seguir.

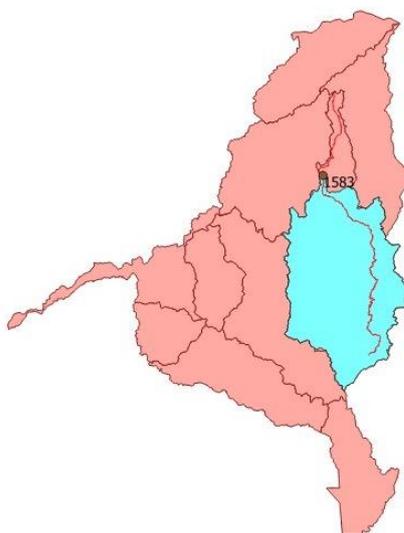


Figura 3 – Sub Bacia do posto Fluviométrico 1583.

A primeira etapa do processo de modelagem consiste no levantamento de informações físicas sobre cada bacia, onde foi utilizado o modelo digital de elevação “Shuttle Radar Topography Mission” – SRTM/NASA para obtenção de dados e confecção da Tabela 1 que apresenta as respectivas características de cada sub-bacia.

Tabela 1 - Características básicas física da sub-bacia

Bacia	1583
Área da bacia	130273 km ²
Comprimento total de drenagem	5355763 m
Declividade média dos rios (m/m)	0,00044 m/m

Dados como a precipitação média na bacia, evapotranspiração e caracterização do solo e a vazão na estação a ser utilizada para calibração do modelo, são necessários para a modelagem

hidrológica. Os dados de precipitação e vazão, apresentados na Tabela 2, foram extraídos do Sistema Nacional de Informações Sobre Recursos Hídricos (SNIRH).

Tabela 2 - Dados cadastrais da estação fluviométrica considerada

Estação fluviométrica	Longitude	Latitude	Cidade estação	Estado do posto
1558	-62,058	-8,927	Machadinho d'Oeste	Roraima

Para os dados referentes a evapotranspiração (Tabela 3), foram realizadas estimativas com base nas Normais Climatológicas de evapotranspiração nas estações climatológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Tabela 3 - Dados de evapotranspiração (mm)

Nome da Estação	MANICORE
UF	AM
Janeiro	173.7
Fevereiro	156.8
Março	176.4
Abril	165.3
Maio	167.3
Junho	157.9
Julho	165.9
Agosto	180.3
Setembro	185.5
Outubro	197.9
Novembro	189.7
Dezembro	183.8

RESULTADOS

Para a sub-bacia localizado na bacia do Madeira, as séries históricas referentes à precipitação e vazão foram divididas em dois períodos, calibração e validação. Após isso, foram ajustados os parâmetros do modelo CAWM de cada sub-bacia no período de calibração, utilizando a maximização da relação NSE/SAE (coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe dividido pela soma do erro absoluto). Após a realização dos ajustes, os modelos foram submetidos a simulação novamente para o período de verificação. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4, onde: CAL - calibração; VER - verificação; Kd - parâmetro de percolação do reservatório profundo; Ks - parâmetro de percolação do fluxo subsuperficial para a calha; parâmetro de perdas na calha - K_L ; β - parâmetro de infiltração; NSE - Coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe; NSEsqrt - NSE considerando a raiz quadrada dos valores; NSElog - NSE considerando os logaritmos dos valores. Segundo os critérios adotados na literatura

para ajuste de modelos hidrológicos, todos os indicadores podem ser classificados como bons a muito bons (Moriassi et al, 2007).

A Figura 4 a seguir apresenta precipitações e vazões com os resultados da calibração do modelo hidrológico CAWM. Na Figura 5 são representadas as vazões médias de cada dia (1, 2, ...365) calculadas e simuladas para todo o período (hidrograma Juliano). Por fim, na Figura 6 é apresentado o hidrograma de validação do modelo.

DISCUSSÃO

Os resultados apresentados para o estudo da bacia do rio Madeira foram bastante satisfatórios, levando em conta todos os indicadores estatísticos utilizados. Assim de forma geral, pode-se considerar que o modelo CAWM, por sua maior simplicidade, é uma ferramenta útil para estudos também adequada à modelagem de grandes bacias, resultado corroborado pelos demais estudos realizados na Oficina de Modelagem Hidrológica da UFPE.

Tabela 4 – Indicadores de eficiência do ajuste CAWM.

Indicador	Sub bacia 1583	
Kd	0,01795	
Ks	0,00098	
KL	0,27906	
Beta	20,00000	
-	Calibração	Verificação
Data inicial	03/06/1974	07/07/2005
Data final	06/07/2005	31/10/2018
NSE	0,76	0,80
NSEsqt	0,80	0,81
NSElog	0,80	0,65
Pbias	-0,63	5,61
RMSE	967,01	961,71
RSR	0,49	0,44
R²	0,76	0,88

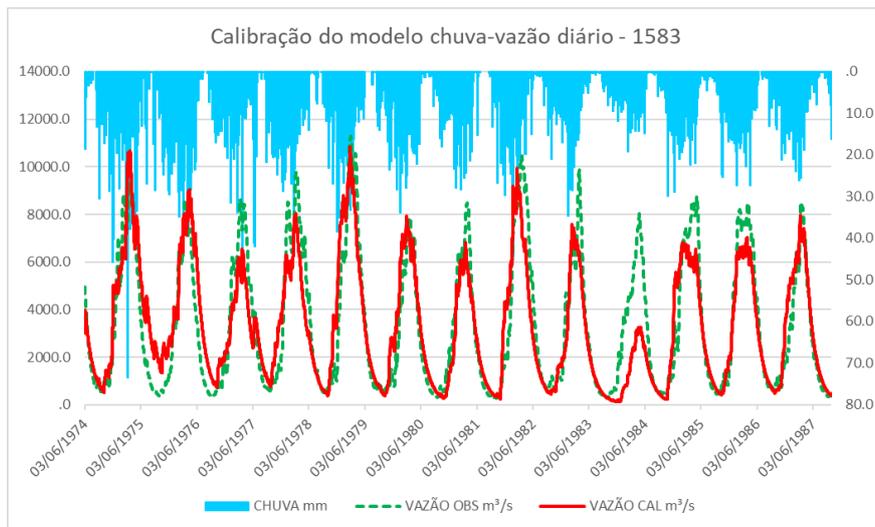


Figura 4 – Resultado da calibração para a sub-bacia 1583.

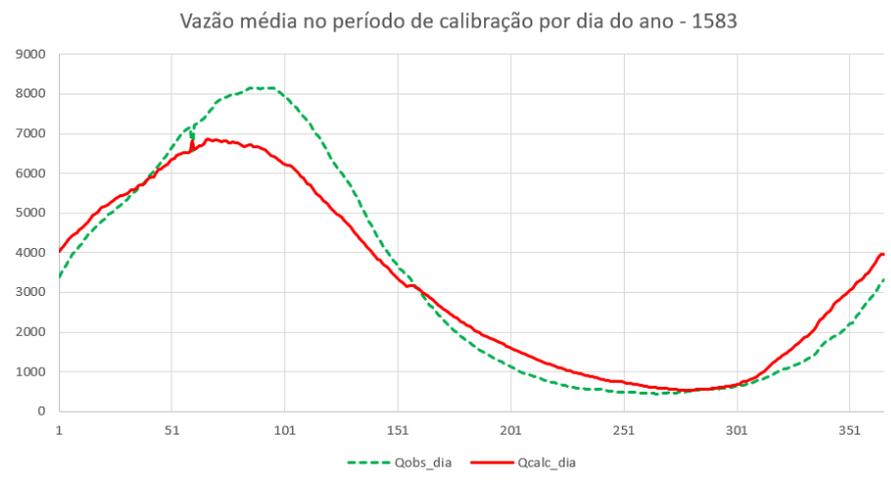


Figura 5 – Médias de cada dia do ano – hidrograma Juliano.

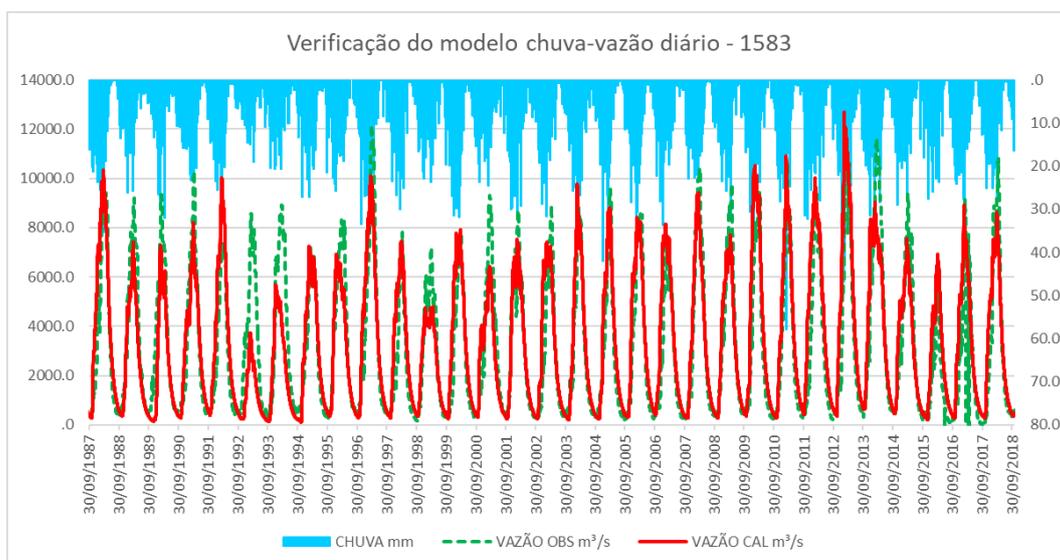


Figura 6 – Resultado da validação do modelo – período 1987 a 2018.

REFERÊNCIAS

- ANA. Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico. Rio Madeira. Disponível em http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/sala_de_situacao. Acesso 22/06/2022.
- CIRILO, J.A. (2021). “Modelos CAWM IV e V – Memorial descritivo”. Disponível em: <https://www.ufpe.br/web/grh>. Acessado em: 18/07/2022.
- CIRILO, J. A. et al. (2020). Development and application of a rainfall-runoff model for semiarid regions. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH)*, v. 25, pp. 1-19.
- ESPINOZA, J. C. et al. (2012). Da seca às inundações: entendendo o ciclo hidrológico anual abrupto de 2010-11 no rio Amazonas e afluentes. *Cartas de Pesquisa Ambiental*, v. 7, n. 2, pp. 024008.
- FERREIRA, L. V.; VENTICINQUE, E.; ALMEIDA, S. (2005). O desmatamento na Amazônia e a importância das áreas protegidas. *Estudos Avançados USP, São Paulo*, v. 19, n. 53, pp. 157- 166.
- GOMES, M.M.A; de Melo Verçosa, L.F.; Cirilo, J.A. (2021). Hydrologic models coupled with 2D hydrodynamic model for high-resolution urban flood simulation. *Nat Hazards* 108, pp. 3121–3157.
- MARENGO, J. A.; BETTS, R. (2011). Riscos das mudanças climáticas no Brasil: análise conjunta Brasil-Reino Unido sobre os impactos das mudanças climáticas e do desmatamento na Amazônia. São Bernardo dos Campos: INPE.
- MORIASI, D.N.; ARNOLD, J.G.; VAN LIEW, M.W.; BINGNER, R.L.; HARMEL, R.D.; VEITH, T.L. (2007). “*Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations*”. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 50(3), pp. 885-900.
- NETO, O. C. L.; RIBEIRO NETO, A.; ALVES, F.H.B.; CIRILO, J A. (2020). Sub-daily hydrological-hydrodynamic simulation in flash flood basins: Una river (Pernambuco/Brazil). *Revista Ambiente e Agua*, v.15, pp.1 – 13.
- NETO, O. C. L. (2019). Modelagem hidrológica e hidrodinâmica com intervalo de tempo sub-diário na bacia do rio Una em Pernambuco. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Pernambuco.
- OGASSAWARA, J. F.; GASS, S. L. B. (2018). Análise morfométrica dos afluentes principais da bacia hidrográfica do rio Uruguai e sua influência nas inundações na cidade de Itaqui, Rio Grande do Sul, Brasil. *Revista Brasileira Geomática*. v. 06, n. 03, pp. 222-240.
- SILVA, M. L.; DA SILVA COSTA, E. B.; DA SILVA, C. L. (2013). Caracterização física de bacias hidrográficas na região de Manaus-AM. *Revista Caminhos de Geografia*. v. 14, n. 46, pp. 93 - 100.
- SOUZA, V. A. S. (2019). Padrões e Tendências Hidroclimáticas de Chuva Identificados por Sensoriamento Remoto na Bacia do Rio Madeira-Amazônia. 2019. Tese de Doutorado. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ (PhD dissertation).



PERRIN, C., MICHEL, C., & ANDRÉASSIAN, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology (Amsterdam)*, 279(1-4), pp. 275-289.