

## XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

### **ANÁLISE DA INCERTEZA DOS MODELOS DE INTERCEPTAÇÃO EM UMA FLORESTA OMBRÓFILA DENSA**

*Pedro Ferreira Arienti<sup>1</sup>; João Henrique Macedo Sá<sup>2</sup>; Debora Yumi de Oliveira<sup>3</sup> & Pedro Luiz  
Borges Chaffe<sup>4</sup>*

**RESUMO** – O processo de interceptação altera a distribuição espacial e temporal da chuva em uma floresta e modifica a quantidade e qualidade da água que chega ao solo. Para testar hipóteses e fazer previsões sobre o processo de interceptação, deve-se calibrar os parâmetros dos modelos considerando as fontes de incertezas. Este trabalho tem como objetivo analisar o desempenho dos modelos de Bouten e *Sparse Rutter* e suas incertezas na simulação do processo de interceptação em uma floresta com vegetação ombrófila densa. A calibração dos modelos foi realizada utilizando-se o algoritmo *differential Evolution adaptive Metropolis* – DREAM. A função de verossimilhança utilizada considera a inflação da distribuição dos resíduos com zeros, assumindo resíduos não gaussianos, heteroscedásticos e independentes. Como dados de entrada e de calibração dos modelos foram usados dados de chuva externa e de chuva interna monitorados em uma floresta na bacia da Lagoa do Peri, em Florianópolis. Os dois modelos apresentaram desempenho similar quanto ao viés volumétrico (em torno de 10%) e à qualidade da faixa de incerteza. Nem todos os parâmetros do modelo *Sparse Rutter* puderam ser identificados a partir da utilização de dados de chuva interna na calibração.

**ABSTRACT**–Rainfall interception by forests alters the spatial and temporal distribution and the quantity and quality of the water that ultimately reaches the soil. In order to test hypotheses and make predictions about the process, one must calibrate the parameters of the models and account for the uncertainty. The aim of this paper is to analyze the Bouten and Sparserrutter models and their uncertainties in the rainfall interception process in a dense ombrophilous forest. The model was calibrated with *Differential Evolution Adaptive Metropolis* – DREAM algorithm. We used the modified generalized likelihood for zero-inflated data series function to separate the observed null and nonzero data, considering the residual model non-Gaussian, heteroscedastic and autocorrelation. As input data we used gross rainfall and throughfall monitored in a forest with dense ombrophilous vegetation in the Peri Lagoon basin in Florianópolis. Both models had similar performance (volumetric bias of 10%) with similar uncertainty bound. Some of the *Sparse Rutter* models converged to the boundary and were not identifiable with the data that we tested.

**Palavras-Chave** – Interceptação, inferência Bayesiana, incerteza

1) Universidade Federal de Santa Catarina, Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. pedropp1995@gmail.com

2) Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. jhmsa88@gmail.com

3) Department of Civil and Environmental Engineering, University of California Irvine, Irvine, California, USA. debora.ydo@gmail.com

4) Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. pedro.chaffe@ufsc.br

## INTRODUÇÃO

Durante um evento de precipitação em uma floresta, a água que passa pelas copas das árvores e chega ao solo é chamada de chuva interna. Parte da precipitação é interceptada pela vegetação e evapora. Dentro do ciclo hidrológico a água que evapora é chamada de perdas por interceptação. O processo de interceptação modifica a distribuição espacial e temporal da chuva e pode alterar a quantidade e qualidade da água que chega no solo, impactando nos demais processos do ciclo hidrológico. Fatores meteorológicos e a vegetação local podem influenciar este processo (David *et al.*, 2005; Brutsaert, 2005).

A realização de monitoramento e modelagem de dados da chuva interna de uma floresta ajuda a compreender o processo de interceptação da chuva sobre uma vegetação. A modelagem ajuda a descrever e simular os processos hidrológicos e, por meio do monitoramento dos dados em uma bacia experimental, é possível calibrar os parâmetros os quais muitas vezes não podem ser estimados diretamente a partir de medições em campo. Modelos de interceptação são estudados desde 1919, sendo o primeiro estudo realizado por Horton aplicando uma regressão linear aos dados de chuva externa e chuva interna. O modelo proposto por Rutter (Rutter *et al.*, 1971 e 1975) é um dos mais usados (Muzylo *et al.*, 2009), tendo várias adaptações, como a proposta por Gash (1979), Valente (1997) e Vrugt (2003).

Por razões como erro de medição, simplificação dos processos e amostragem de parâmetros, os modelos têm um erro associado, causando uma incerteza nas simulações. O uso de um correto modelo para os resíduos entre as simulações e observações pode gerar uma maior confiabilidade e precisão dos resultados. Com o uso da inferência Bayesiana é possível estimar simultaneamente os valores dos parâmetros do modelo e a incerteza associada. Devido as séries de dados de interceptação apresentarem muitos valores iguais a zero, a escolha de uma função de verossimilhança (função que mede em termos probabilísticos a distância entre os resultados do modelo e os observados) que separa os resíduos de simulações iguais a zero e diferente de zero pode ser mais adequada para calcular a incerteza (Oliveira *et al.*, 2018).

Este trabalho tem o objetivo de analisar o desempenho dos modelos de Bouten e *Sparse Rutter* em simular o processo de interceptação em uma vegetação característica de ombrófila densa, levando em consideração as incertezas associadas ao processo de modelagem. Os dados de chuva externa e chuva interna usados foram coletados num período de nove na bacia da Lagoa do Peri, em Florianópolis.

## MATERIAS E MÉTODOS

### Área de estudo

A área de estudo é a bacia da Lagoa do Peri (Figura 1), localizada no sul da ilha de Santa Catarina (27°44' de latitude Sul e 48° 31' de longitude oeste). A bacia possui uma extensão de 20 km<sup>2</sup> de Mata Atlântica, sendo 5 km<sup>2</sup> a área ocupada pela Lagoa, com vegetação característica de Floresta Ombrófila Densa e restinga típica de vegetação litorânea. O clima é do tipo Cfa, segundo a classificação de Köppen, sem secas, verão quente e chuvas mais ou menos regulares. A Lagoa do Peri é a principal manancial de água doce da ilha e caracterizada como uma unidade de conservação (Hennemann e Petrucio, 2014; Silva et al., 2014).

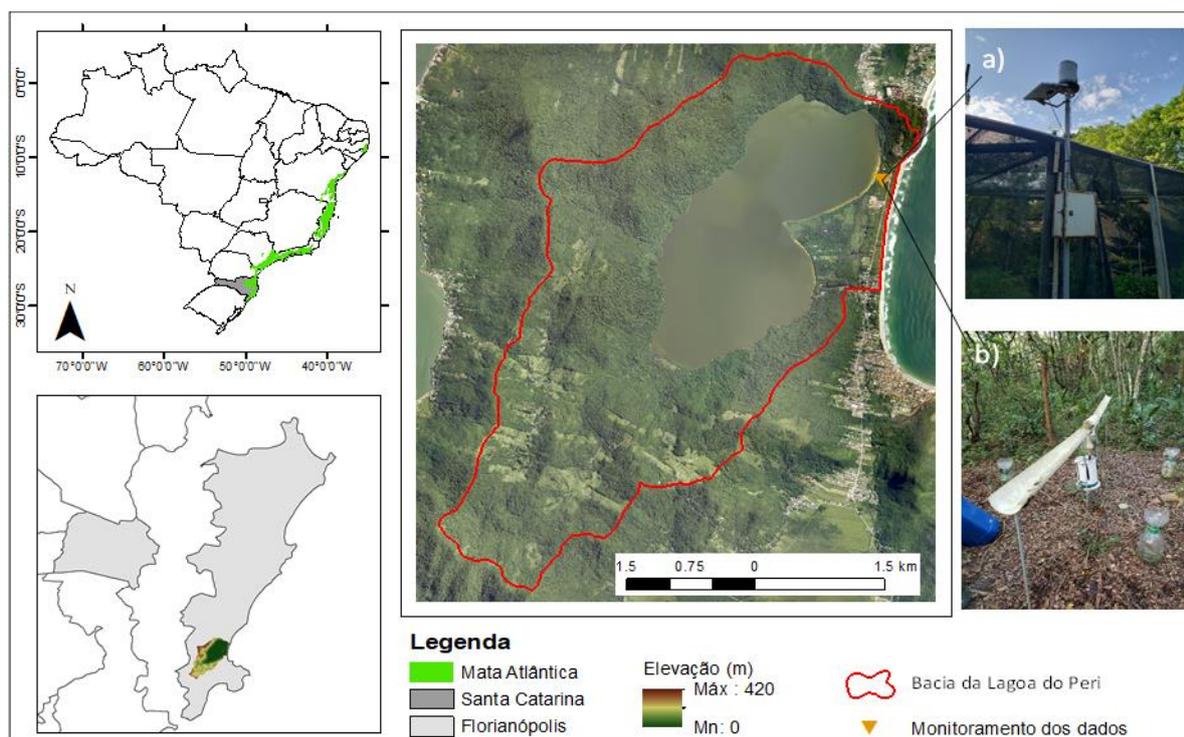


Figura 1 – Localização da bacia experimental da Lagoa do Peri e equipamentos de monitoramento: (a) Pluviógrafo da chuva externa; (b) Calhas para o monitoramento da chuva interna.

O monitoramento foi realizado entre 07/03/2018 e 23/11/2018. Foi usado um pluviógrafo instalado em uma área descoberta para medição da chuva externa ( $P_g$ ) (Figura 1b), e dentro da floresta foi instalado um pluviógrafo conectado a calhas para medir a chuva interna ( $T_f$ ) (Figura 1c). O registro dos dados de chuva externa e chuva interna foi realizado a cada 5 minutos.

Os dados foram acumulados para obtenção de uma série com resolução temporal de 1 hora. A separação dos dados de precipitação foi realizada usando o critério de 12 horas sem chuva entre um evento e outro, tempo considerado para a secagem completa da copa da árvore. Este procedimento resultou em 51 eventos de chuva. Os dados foram segmentados em duas séries, classificando os eventos em ordem crescente de volume de chuva e distribuindo-os em ordem alternada, uma série

para calibração e outra para a validação dos modelos, elegendo 26 e 25 eventos para cada série, respectivamente.

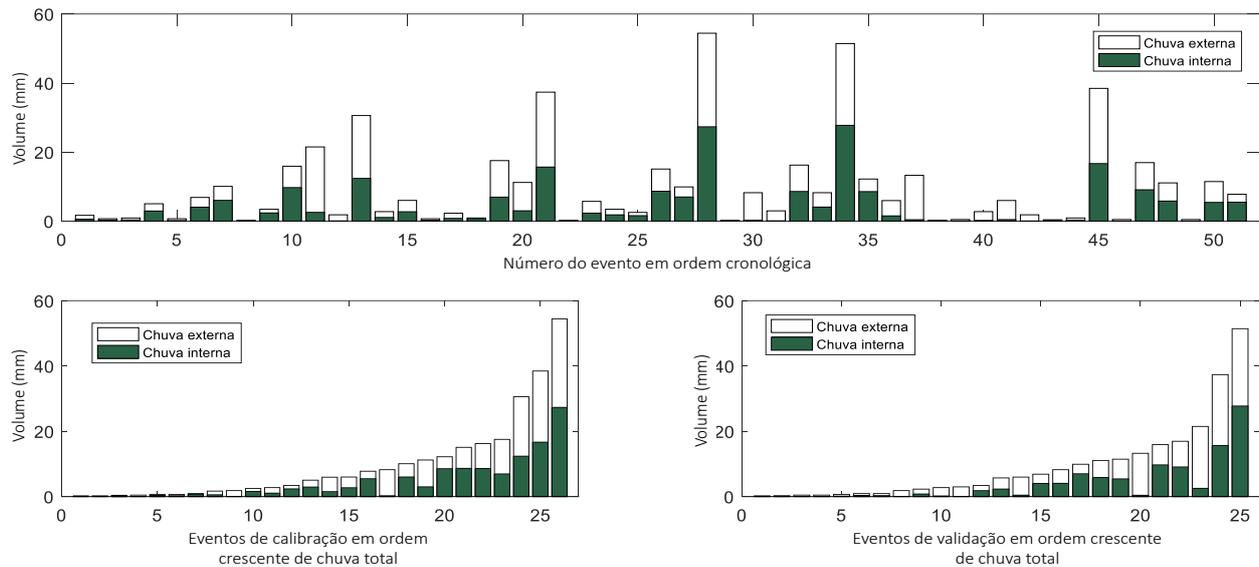


Figura 2 – Separação dos eventos para calibração e validação dos modelos.

## Modelos

O modelo *Sparse Rutter* (Valente *et al.*, 1997) e de Bouten (Vrugt *et al.*, 2003) foram utilizados para a simulação da chuva interna. Os dois modelos são adaptados do modelo proposto por Rutter (Rutter *et al.*, 1971; Rutter *et al.*, 1975), que após estudos realizados em uma floresta de coníferas situadas no sudeste da Inglaterra, propôs um modelo dinâmico (balanço contínuo) que considera a vegetação como um tanque de armazenamento de água. Precipitação e evaporação potencial são entradas do modelo, e as saídas são a chuva interna, o escoamento pelos troncos e as perdas por interceptação. Neste modelo, o balanço hídrico na copa e nos troncos é calculado através das equações 1 e 2, respectivamente:

$$(1 - p - pt) \int R dt = \int D dt + \int E dt + \Delta C \quad (1)$$

$$Pt \int R dt = Sf + \int E t dt + \Delta Ct \quad (2)$$

onde  $p$  é o coeficiente de chuva interna livre (parte da precipitação que chega ao solo sem colidir com nenhum obstáculo),  $pt$  é o coeficiente de água desviada para os troncos,  $R$  é a intensidade da chuva externa,  $D$  é a taxa de drenagem de copa,  $E$  é a taxa de evaporação da água interceptada pela copa,  $C$  é o armazenamento na copa,  $Sf$  é o escoamento pelos troncos,  $E t$  é a taxa de evaporação de tronco e  $C t$  é o armazenamento nos troncos.

O modelo de Rutter foi modificado por Valente *et al.* (1997), chamado de *Sparse Rutter*, e faz uma divisão na bacia em dois compartimentos, a área coberta e a área descoberta, realizando um balanço para cada compartimento. A evaporação é considerada apenas na fração que há cobertura florestal (taxa de evaporação multiplicada por um fator  $c$ ). Os parâmetros referentes à capacidade de

armazenamento da copa e do tronco são alterados para  $S_c$  (capacidade de armazenamento da copa por unidade de cobertura) e  $S_{t,c}$  (capacidade de armazenamento do tronco por unidade de cobertura). Os parâmetros  $p_d$ , que é a proporção de água que é drenada da copa e direcionada para os troncos, e  $\varepsilon$ , que é a proporção de evaporação de tronco em relação à taxa de evaporação da copa, foram introduzidos.

Um modelo mais simples foi sugerido por Vrugt *et al.* (2003), que não considera o escoamento pelos troncos. Este modelo pode ser representado pela seguinte equação:

$$\frac{dS}{dt} = aP - b(S - c) - dE_p \frac{S}{c} \quad (3)$$

que possui como entrada  $aP$  (em que  $a$  é o parâmetro de eficiência de interceptação), e as saídas ocorrem por drenagem da copa e evaporação. A drenagem é a diferença entre o armazenamento ( $S$ ) e a capacidade de armazenamento ( $c$ ) multiplicados pelo parâmetro de drenagem ( $b$ ). A evaporação é uma proporção da evaporação potencial ( $E_p$ ) e depende da relação do armazenamento da copa ( $S/c$ ) e de um parâmetro de eficiência de evaporação ( $d$ ).

Tabela 1 – Descrição e valores de parâmetros usados nos modelos *Sparse Rutter* e de Bouten.

<b>Modelo de Bouten</b>				
Parâmetro	Descrição do parâmetro	Valores		
		mín	máx	Unidade
$a$	Eficiência de interceptação	0	1	-
$b$	Parâmetro de drenagem	0	1000	d <sup>-1</sup>
$c$	Capacidade de armazenamento	0	10	mm
$d$	Eficiência de evaporação	0	5	-
<b>Modelo <i>Sparse Rutter</i></b>				
Parâmetro	Descrição do parâmetro	Valores		
		mín	máx	Unidade
$c$	Fator de cobertura	0	1	-
$S_c$	Capacidade de armazenamento da copa	0	20	mm
$S_{t,c}$	Capacidade de armazenamento dos troncos	0	10	mm
$p_d$	Proporção de água desviada da copa para os troncos	0	1	-
$\varepsilon$	Proporção da taxa de evaporação dos troncos em relação à taxa de evaporação da copa	0	1	-

## Calibração

A calibração dos modelos foi realizada usando o algoritmo de calibração automática *Differential Evolution Adaptive Metropolis* (DREAM) proposto por Vrugt *et al.* (2008; 2009), um amostrador MCMC (*Markov Chain Monte Carlo*) que utiliza a inferência Bayesiana para a estimativa conjunta dos parâmetros do modelo e suas incertezas. Foram utilizadas 5 cadeias de *Markov* e 10.000 gerações em cada cadeia.

A incerteza associada aos parâmetros dos modelos é determinada a partir do teorema de Bayes, no qual uma distribuição a posteriori de um conjunto de parâmetros pode ser obtida a partir

da atualização da distribuição a priori (informação sobre os valores dos parâmetros mostrados na Tabela 1) e da consideração de uma função de verossimilhança, que mede em termos probabilísticos a distância entre as saídas do modelo e as observações.

A função de verossimilhança usada foi a proposta por Schoups e Vrugt (2010) e adaptada por Oliveira *et al.*, (2018), considerando erros não gaussianos, heterocedásticos, independentes e inflados com o zero. A função inflada com zeros considera os resíduos divididos em três categorias: (1) resíduos iguais a zero; (2) resíduos diferentes de zero para valores simulados iguais a zero; e (3) resíduos diferentes de zero o valor simulado é diferente de zero. A heterocedasticidade dos resíduos foi considerada assumindo que o desvio padrão do erro aumenta linearmente com a chuva interna simulada. Para considerar uma distribuição não gaussiana, foram calibrados os valores de curtose (fixando o parâmetro de assimetria igual a 1 para considerar uma distribuição simétrica) para os resíduos da categoria 3. Para os resíduos da categoria 2, o valor de curtose foi fixado em 1 e o parâmetro de assimetria foi fixado como sendo igual a 10.

## RESULTADOS

As simulações para as séries de calibração e validação para os dois modelos, junto com suas faixas de incerteza são apresentados na Figura 3 e 4 (série completa e período de menor duração para facilitar a visualização). Os dois modelos mostram resultados de validação e calibração parecidos. Considerando um intervalo de credibilidade de 95%, nos dois modelos a faixa de incerteza englobou em torno de 97% das observações, valor próximo ao esperado (95%). Considerando o viés volumétrico, o modelo de *Sparse Rutter* apresentou melhores resultados.

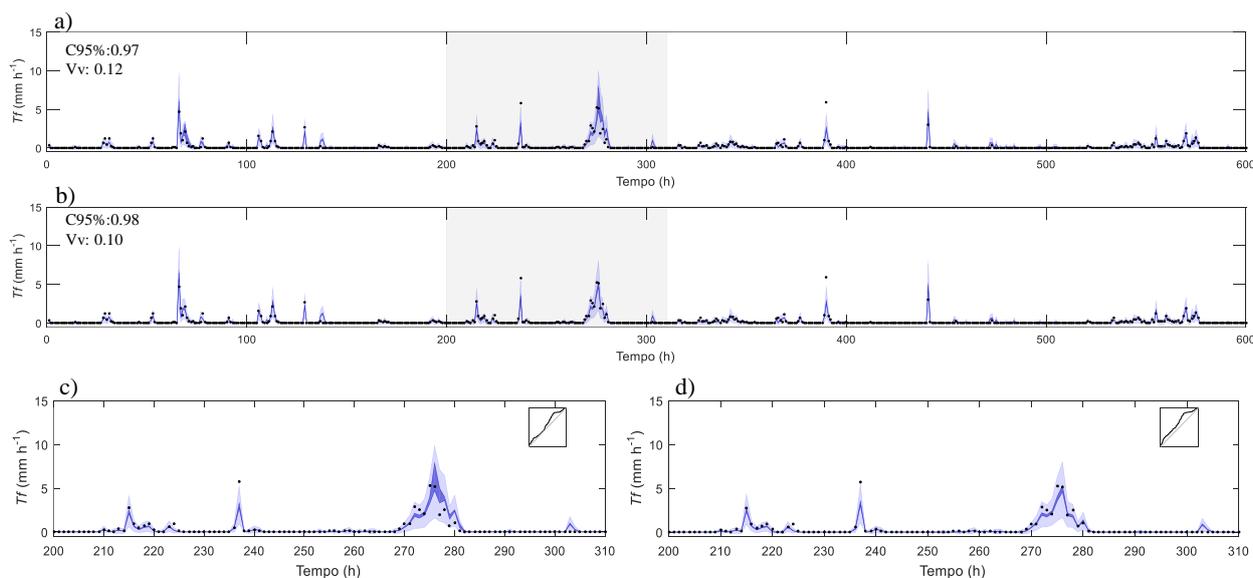


Figura 3 – Resultado das simulações para os períodos de calibração para os modelos de Bouten (a) e *Sparse Rutter* (b). São apresentadas a faixa de incerteza em relação aos parâmetros (azul escuro) e de incerteza total (azul claro), os dados observados (pontos pretos), os valores do intervalo de confiabilidade de 95% (C95%) e viés volumétrico (Vv). Resultados dos modelos de Bouten (c) e *Sparse Rutter* (d) para um período selecionado. No detalhe, gráfico quantil-quantil (QQ) dos quantis observados em função dos quantis teóricos de uma distribuição uniforme.

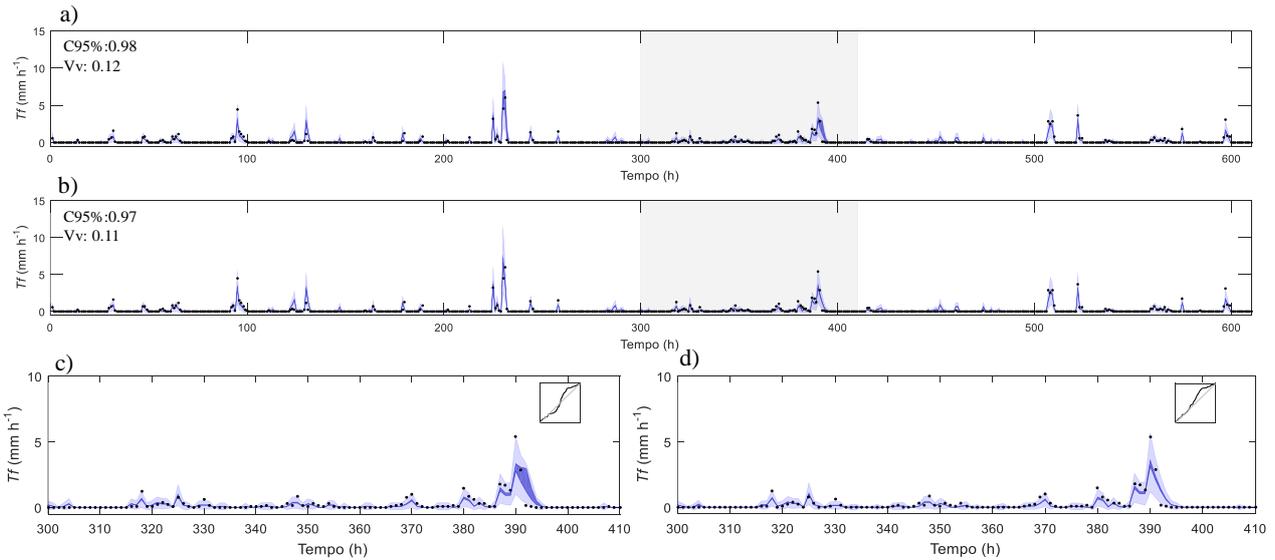


Figura 4 – Resultado das simulações para os períodos de validação para os modelos de Bouten (a) e *Sparse Rutter* (b). São apresentadas a faixa de incerteza em relação aos parâmetros (azul escuro) e de incerteza total (azul claro), os dados observados (pontos pretos), os valores do intervalo de confiabilidade de 95% (C95%) e viés volumétrico (Vv). Resultados dos modelos de Bouten (c) e *Sparse Rutter* (d) para um período selecionado. No detalhe, gráfico quantil-quantil (QQ) dos quantis observados em função dos quantis teóricos de uma distribuição uniforme.

A distribuição dos parâmetros dos dois modelos é apresentada na Figura 5. No modelo de Bouten o parâmetro  $c$  (capacidade de armazenamento) convergiu para o limite máximo estipulado a priori. No modelo de *Sparse Rutter*, o parâmetro  $c$  (fator de cobertura) também convergiu para o limite máximo. A distribuição a posteriori do parâmetro  $S_{t,c}$  (capacidade de armazenamento dos troncos) permaneceu inalterada em relação ao intervalo estabelecido a priori, o que indica que o resultado deste modelo é pouco sensível a esse parâmetro. Este resultado se deve ao fato de ter sido utilizado apenas dados de chuva interna para a calibração dos modelos. Além disso, a inclusão de um compartimento para os troncos no modelo *Sparse Rutter* permite que valores não realistas de escoamento pelos troncos sejam obtidos para possibilitar um melhor ajuste da chuva interna simulada à observada.

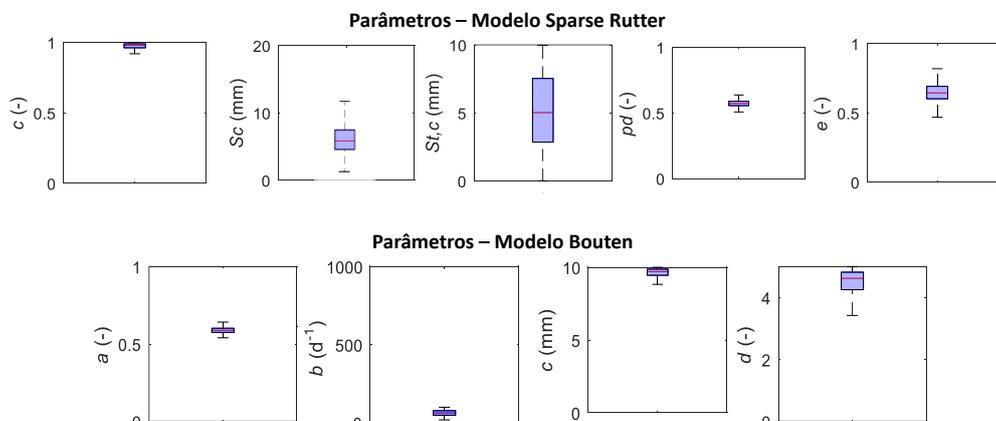


Figura 5 – Boxplot da distribuição dos parâmetros do modelo de *Sparse Rutter* (primeira linha) e de Bouten (segunda linha).

O diagnóstico de resíduos para a calibração e a validação dos dois modelos para o conjunto de parâmetros que maximizou a função de verossimilhança é apresentado na Figura 6. Podemos observar dois histogramas dos resíduos, comparado com uma linha de distribuição teórica (linha vermelha). O primeiro histograma é em relação aos resíduos da categoria 3 (resíduos diferentes de zero para valores simulados diferente de zero) e o segundo histograma para os resíduos da categoria 2 (resíduos diferentes de zero para valores simulados iguais a zero). Na Figura 6 também são apresentados a relação entre os resíduos e o valor simulado de chuva interna e um diagrama de autocorrelação total dos resíduos com um intervalo de confiança de 95% (linha vermelha).

Para o modelo de Bouten e de *Sparse Rutter* a distribuição dos resíduos está próxima da considerada teoricamente (para os resíduos da categoria 2 e 3), com resultados melhores na calibração do que na validação. A partir da análise dos resíduos em função do valor simulado verifica-se que o modelo heteroscedástico promoveu uma estabilização da variância dos resíduos, como desejado. Os dois modelos apresentaram autocorrelação, mas não muito elevada.

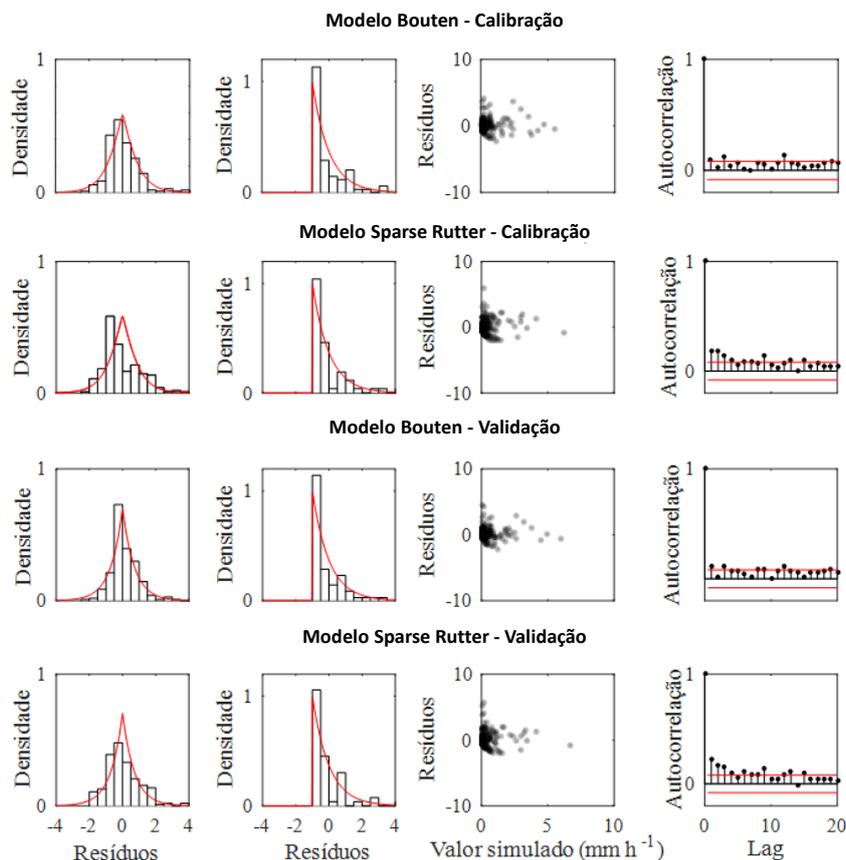


Figura 6 – Diagnóstico dos resíduos nas simulações dos modelos de Bouten e *Sparse Rutter* para calibração e validação. 1ª coluna: histograma dos resíduos de valores simulados diferente de zero. 2ª coluna: histograma dos resíduos de valores simulados iguais a zero. 3ª coluna: relação entre os resíduos e o valor simulado. 4ª coluna: diagrama de autocorrelação.

## CONCLUSÃO

Neste foi analisado o desempenho dos modelos de Bouten e de *Sparse Rutter* e suas incertezas na simulação do processo de interceptação em uma vegetação ombrófila densa. Foi utilizada a função de verossimilhança proposta por Schoups e Vrugt (2010) e modificada por Oliveira *et al.* (2018), considerando resíduos heteroscedásticos, não gaussianos, independentes e inflados com zero.

Os modelos de Bouten e *Sparse Rutter* resultaram em valores de viés volumétrico em torno de 10%, tanto para o período de calibração quanto para o período de validação. Considerando-se um intervalo de credibilidade de 95%, a faixa de incerteza associada aos resultados das simulações dos dois modelos foi adequada. A função verossimilhança utilizada mostrou-se suficiente para capturar a distribuição de resíduos.

Realizando uma análise da distribuição dos parâmetros pode se perceber uma dificuldade na calibração dos dois modelos, com alguns parâmetros tendendo ao limite estipulado a priori. Este resultado indica que deficiências dos modelos em simular o processo de interceptação podem estar sendo compensadas através da alteração dos valores dos parâmetros. No modelo *Sparse Rutter* um dos parâmetros (capacidade de armazenamento nos troncos) não pode ser identificado a partir da calibração com dados de chuva interna. Além disso, a inclusão de um compartimento para os troncos permite que a quantidade de água direcionada para os troncos seja alterada, atingindo mesmo valores não plausíveis, para que sejam obtidos melhores resultados de chuva interna. Desta forma, a utilização do modelo *Sparse Rutter* deve estar aliada a uma verificação dos valores de escoamento pelos troncos simulado pelo modelo, para evitar que bons resultados sejam obtidos pelos motivos errados.

Estudos em florestas ombrófila densa são necessários para entender melhor o papel da vegetação no processo de interceptação. O uso de diferentes modelos se mostra pertinente assim como o uso da função de verossimilhança modificada para se quantificar adequadamente as incertezas das simulações.

## AGRADECIMENTO

Os autores agradecem ao CNPQ pelas bolsas de estudos e pelo financiamento da pesquisa através do projeto MCTI/CNPQ/Universal 14/2014. Também agradecemos aos funcionários da Fundação Municipal do Meio Ambiente de Florianópolis (FLORAM), pelo apoio em campo, pelas contribuições para os desenvolvimentos da pesquisa. A terceira autora agradece à CAPES pela bolsa de Doutorado Pleno no Exterior - processo nº 88881.174456/2018-01.

## REFERÊNCIAS

- BRUTSAERT, W. (2005). *Hydrology: An Introduction*. Cambridge University Press, New York. 605 p.
- DAVID, J.; VALENTE, F.; GASH, J. (2005). *Evaporation of intercepted rainfall*. In: Anderson, M. (Ed.), *Encyclopedia of Hydrological Sciences*. John Wiley and Sons. Ltd., pp. 627–634.
- GASH, J. H. C. (1979). *An analytical model of rainfall interception in forests*. Q. J. R. Meteorol. Soc., v.105, p.43-55.
- HENNEMANN, M.C e PETRUCIO, M.M. (2014). *Seasonal phytoplankton response to increased temperature and phosphorus inputs in a freshwater coastal lagoon, Southern Brazil: a microcosm bioassay*. Acta Limnologica Brasiliensia, v 22, p. 295-305.
- MUZYLO, A.; LLORENS, P.; VALENTE, F.; KEIZER, J.J., DOMINGO, F.; GASH, J.H.C. (2009) A review of interception modelling. J. hydrol., Amsterdam, v370, p191-206.
- RUTTER, A.J.; KERSHAW, K.A.; ROBINS, P.C.; MORTON, A.J. (1971) *A predictive model of rainfall interception in forests, I. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican Pine*. Agric. Meteorol., v.9, p.367-384.
- RUTTER, A.J.; MORTON, A.J.; ROBINS, P.C. (1975). *A predictive model of rainfall interception in forests, II. Generalization of the model and comparison with observations in some coniferous and hardwood stands*. J. Appl. Ecol., v.12, p.367-380.
- OLIVEIRA, D. Y.; CHAFFE, P. L. B.; SÁ, J.H. M. (2018). *Extending the applicability of the Generalized Likelihood function for zero-inflated data series*. Water Resources Research, 54, 2494–2506.
- VALENTE, F.; DAVID, J.S.; GASH, J.H.C. (1997). *Modelling interception loss for two sparse eucalypt and pine forests in central Portugal using reformulated Rutter and Gash analytical models*. J. Hydrol., Amsterdam, v.190, p.141-162.
- SCHOUPS, G.; VRUGT, J. A. (2010). *A formal likelihood function for parameter and predictive inference of hydrologic models with correlated, heteroscedastic, and non-Gaussian errors*. Water Resour. Res. 46(10), pp. 1–17.
- VRUGT, J. A.; DEKKER, S. C.; BOUTEN, W. (2003). *Identification of rainfall interception model parameters from measurements of throughfall and forest canopy storage*. Water Resour. Res. 39(9), pp. 1251.
- VRUGT, J. A.; TER BRAAK, C. J. F.; CLARK, M. P.; HYMAN, J. M.; ROBINSON, B. A. (2008). *Treatment of input uncertainty in hydrologic modeling: Doing hydrology backward with Markov chain Monte Carlo simulation*. Water Resour. Res. 44, pp. 1–52.
- VRUGT, J. A.; TER BRAAK, C. J. F.; DIKS, C. G. H.; ROBINSON, B. A.; HYMAN, J. M.; HIGDON, D. (2009). *Accelerating Markov Chain Monte Carlo Simulation by Differential Evolution with Self-Adaptive Randomized Subspace Sampling*. Int. J. Nonlinear Sci. Numer. Simul. 10(3), pp. 273–290.