

5.1 Metodologia

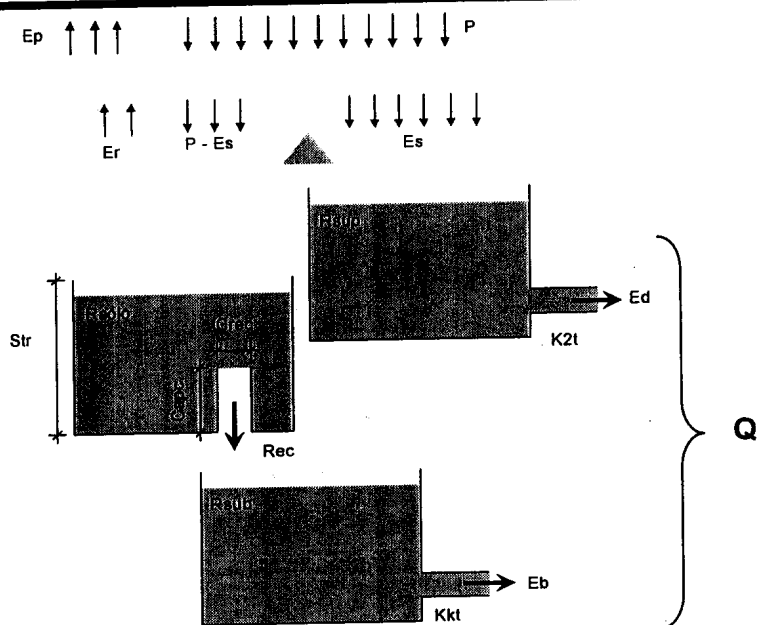
O modelo SMAP (*Soil Moisture Accounting Procedure*) é um modelo determinístico de simulação hidrológica, do tipo transformação chuva-vazão. Foi desenvolvido em 1981 por Lopes, J.E.G., Braga, B.P.F. e Conejo, J.G.L., apresentado no *International Symposium on Rainfall-Runoff Modeling* realizado em Mississipi, U.S.A. e publicado pela *Water Resources Publications* [LOPES ET AL., 1982].

O modelo foi aplicado com sucesso em diversas bacias brasileiras e vem sendo utilizado pelo ONS, desde janeiro de 2008, em combinação com o modelo estocástico multivariado "MEL", para a previsão de vazões uma semana à frente da bacia incremental da UHE Itaipu, no rio Paraná [ONS/FCTH, 2005]. Além do bom desempenho nesta bacia, tanto na fase de testes como na fase de operacionalização, a escolha desse modelo para aplicação à bacia do alto/médio rio Grande deve-se também aos seguintes aspectos:

- Facilidade de entendimento da metodologia e do funcionamento do modelo e de seus parâmetros, o que permite a realização de alguns ajustes/aprimoramentos, quando necessário.
- Facilidade na obtenção dos dados de entrada necessários e na aplicação para a grande maioria das bacias do SIN.

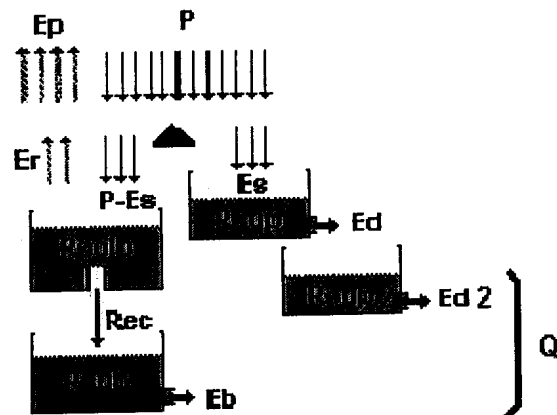
O modelo SMAP, em sua versão original (figura 5.1), é constituído por três reservatórios lineares hipotéticos representando: o reservatório do solo (R_{solo}); o reservatório da superfície (R_{sup}), correspondente ao escoamento superficial da bacia; e o reservatório subterrâneo (R_{sub}), correspondente ao escoamento subterrâneo da bacia (escoamento de base).

Figura 5.1 – Esquema do modelo SMAP original (3 reservatórios)



Para bacias com significativas planícies de inundação, onde, em eventos de fortes chuvas, são verificados importantes extravasamentos pelas margens, amortecimentos e atrasos nos picos das cheias, torna-se conveniente a inclusão de um quarto reservatório linear para representar o armazenamento e o escoamento de água nessas planícies. Na aplicação do modelo SMAP à bacia incremental de Itaipu, na sub-bacia do rio Ivinhema (afluente da margem direita do rio Paraná), foi necessária a consideração deste quarto reservatório, conforme ilustrado na figura 5.2. Para as demais sub-bacias daquele estudo, foi utilizado o esquema original do modelo SMAP, apresentado na figura 5.1.

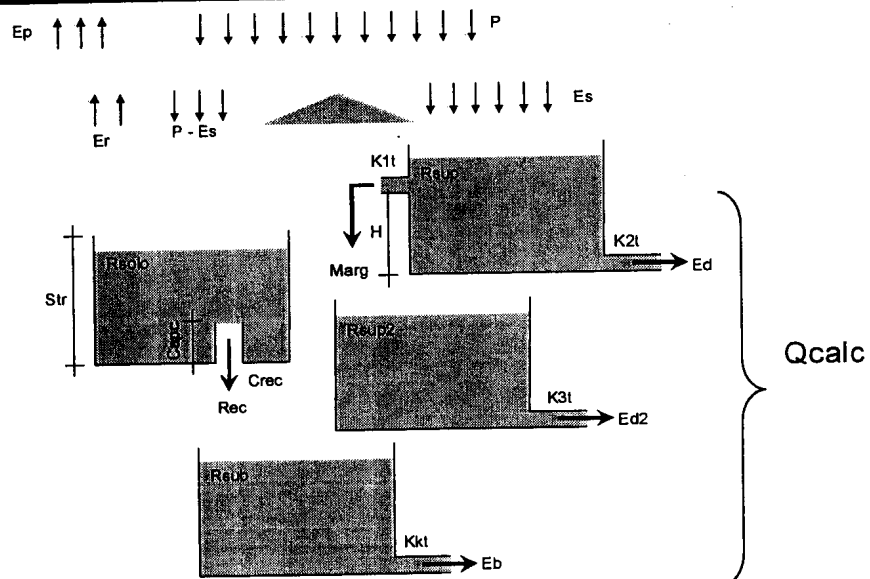
Figura 5.2 – Esquema do modelo SMAP aplicado à sub-bacia do rio Ivinhema – Inc. Itaipu (4 reservatórios)



Para a aplicação do modelo SMAP à bacia do alto/médio rio Grande, constatou-se a necessidade de inclusão do quarto reservatório nas sub-bacias dos rios Verde em Porto dos Buenos e Sapucaí em Paraguaçu, afluentes da margem esquerda, a montante da UHE Furnas.

Nestes estudos, foram realizadas algumas alterações em relação à utilização tradicional do modelo SMAP. Uma destas alterações refere-se ao ajuste na configuração do modelo para operação com quatro reservatórios, conforme pode ser visto na figura 5.3.

Figura 5.3 – Esquema do modelo SMAP aplicado à bacia do rio Grande (4 reservatórios)



A opção por esse ajuste justifica-se pelo fato que, para vazões relativamente baixas, não há extravasamentos pelas margens e escoamento pelas planícies. Outra vantagem da utilização deste esquema de quatro reservatórios é que, caso queira-se inibir o funcionamento do quarto reservatório, basta fixar um valor relativamente elevado para o parâmetro H. Dessa forma, pode-se utilizar o esquema do modelo SMAP apresentado na figura 5.3 para qualquer sub-bacia.

As variáveis de estado de cada um dos quatro reservatórios são atualizadas a cada dia, de acordo com o seguinte procedimento:

$$R_{solo(t)} = R_{solo(t-1)} + P_{(t)} - E_{s(t)} - E_{r(t)} - Rec_{(t)} \quad (5.1)$$

$$R_{sub(t)} = R_{sub(t-1)} + Rec_{(t)} - E_{b(t)} \quad (5.2)$$

$$R_{sup(t)} = R_{sup(t-1)} + E_{s(t)} - Marg_{(t)} - Ed_{(t)} \quad (5.3)$$

$$R_{sup2(t)} = R_{sup2(t-1)} + Marg_{(t)} - Ed2_{(t)} \quad (5.4)$$

onde:

$R_{solo(t)}$: reservatório do solo no instante de tempo t (mm).

$R_{sub(t)}$: reservatório subterrâneo no instante de tempo t (mm).

$R_{sup(t)}$: reservatório da superfície no instante de tempo t (mm).

$R_{sup2(t)}$: reservatório da superfície/planície no instante de tempo t (mm).

$P_{(t)}$: precipitação média na bacia, a ser considerada pelo modelo no instante de tempo t (mm).

$E_{s(t)}$: escoamento para o reservatório de superfície no instante de tempo t (mm).

$E_{r(t)}$: evapotranspiração real no instante de tempo t (mm).

$Rec_{(t)}$: recarga subterrânea no instante de tempo t (mm).

$E_{b(t)}$: escoamento básico, proveniente do reservatório subterrâneo, no instante de tempo t (mm).

$Marg_{(t)}$: extravasamento pelas margens no instante de tempo t (mm).

$Ed_{(t)}$: escoamento superficial, proveniente do reservatório da superfície, no instante de tempo t (mm).

$Ed2_{(t)}$: escoamento superficial, proveniente do reservatório da superfície/planície, no instante de tempo t (mm).

t: instante de tempo (no atual estudo: 1 dia).

O modelo SMAP com quatro reservatórios é composto de sete funções de transferência, sendo que a separação do escoamento superficial é baseada no método do SCS (Soil Conservation Service do United States Department of Agriculture) [Soil Conservation Service, 1972]. Essas funções são as seguintes:

$$1. \text{ Se } P_{(t)} > A_i \Rightarrow S = \text{Str} - \text{Rsolo}_{(t-1)}$$

$$\text{Es}_{(t)} = \frac{(P_{(t)} - A_i)^2}{P_{(t)} - A_i + S} \quad (5.5)$$

$$\text{Se } P_{(t)} \leq A_i \Rightarrow \text{Es}_{(t)} = 0$$

$$2. \text{ Se } (P_{(t)} - \text{Es}_{(t)}) > \text{Ep}_{(t)} \Rightarrow \text{Er}_{(t)} = \text{Ep}_{(t)} \quad (5.6)$$

$$\text{Se } (P_{(t)} - \text{Es}_{(t)}) \leq \text{Ep}_{(t)} \Rightarrow \text{Er}_{(t)} = (P_{(t)} - \text{Es}_{(t)}) + (\text{Ep}_{(t)} - (P_{(t)} - \text{Es}_{(t)})) \times \text{Tu}_{(t)}$$

$$3. \text{ Se } \text{Rsolo}_{(t-1)} > \frac{\text{Capc}}{100} \times \text{Str} \Rightarrow \text{Rec}_{(t)} = \frac{\text{Crec}}{100} \times \text{Tu}_{(t)} \times \left(\text{Rsolo}_{(t-1)} - \frac{\text{Capc}}{100} \times \text{Str} \right) \quad (5.7)$$

$$\text{Se } \text{Rsolo}_{(t-1)} \leq \frac{\text{Capc}}{100} \times \text{Str} \Rightarrow \text{Rec}_{(t)} = 0$$

$$4. \text{ Se } \text{Rsup}_{(t-1)} > H \Rightarrow \text{Marg}_{(t)} = (\text{Rsup}_{(t-1)} - H) \times (1 - 0.5^{1/K1t}) \quad (5.8)$$

$$\text{Se } \text{Rsup}_{(t-1)} \leq H \Rightarrow \text{Marg}_{(t)} = 0$$

$$5. \text{ Ed}_{(t)} = \text{Rsup}_{(t-1)} \times (1 - 0.5^{1/K2t}) \quad (5.9)$$

$$6. \text{ Ed2}_{(t)} = \text{Rsup2}_{(t-1)} \times (1 - 0.5^{1/K3t}) \quad (5.10)$$

$$7. Eb_{(t)} = Rsub_{(t-1)} \times (1 - 0.5^{1/Kkt}) \quad (5.11)$$

onde:

$$Tu_{(t)} = \frac{Rsolo_{(t-1)}}{Str} \quad (5.12)$$

Ai : abstração inicial (mm).

Str : capacidade de saturação do solo (mm).

$Ep_{(t)}$: evapotranspiração potencial (mm).

$Tu_{(t)}$: teor de umidade do solo (adimensional).

$Capc$: capacidade de campo (%).

$Crec$: parâmetro de recarga subterrânea (%).

H : altura representativa para início de escoamento em planícies (mm).

$K1t$: constante de recessão do escoamento para planícies (dia).

$K2t$: constante de recessão do escoamento superficial (dia).

$K3t$: constante de recessão do escoamento da superfície/planícies (dia).

Kkt : constante de recessão do escoamento básico (dia).

O cálculo da vazão é dado pela equação:

$$Qcalc_{(t)} = \frac{(Ed_{(t)} + Ed2_{(t)} + Eb_{(t)}) \times Ad}{86.4} \quad (5.13)$$

onde:

$Qcalc_{(t)}$: vazão total calculada pelo modelo no instante de tempo t (m^3/s).

Ad : área de drenagem da bacia considerada (km^2).

As constantes de recessão, $K1t$, $K2t$, $K3t$ e Kkt são associadas à duração do intervalo, medido em dias, no qual a vazão do correspondente reservatório cai à

metade de seu valor (não considerando nova recarga nesse período). O eventual transbordo do reservatório do solo é transformado em escoamento superficial.

Os dados de entrada do modelo são os totais diários de chuva - $P_{(t)}$, os totais diários de evapotranspiração potencial - $Ep_{(t)}$, e as vazões médias diárias observadas em cada bacia considerada no estudo - $Q_{obs(t)}$.

O total diário de chuva - $P_{(t)}$, a ser considerado pelo modelo no instante de tempo t , em cada bacia, é calculado a partir das seguintes expressões:

$$Pb_{(t)} = P1_{(t)} \times ke_1 + P2_{(t)} \times ke_2 + P3_{(t)} \times ke_3 + \dots + Pn_{(t)} \times ke_n \quad (5.14)$$

$$P_{(t)} = Pb_{(t-3)} \times kt_{(-3)} + Pb_{(t-2)} \times kt_{(-2)} + Pb_{(t-1)} \times kt_{(-1)} + Pb_{(t)} \times kt_{(0)} + Pb_{(t+1)} \times kt_{(+1)} \quad (5.15)$$

onde:

$$ke_1 + ke_2 + ke_3 + \dots + ke_n = 1 \quad (5.16)$$

$$kt_{(-3)} + kt_{(-2)} + kt_{(-1)} + kt_{(0)} + kt_{(+1)} = 1 \quad (5.17)$$

$Pb_{(t)}$: precipitação média observada na bacia, no instante de tempo t (mm).

$P1_{(t)} ; P2_{(t)} ; \dots ; Pn_{(t)}$: precipitação observada em cada posto pluviométrico da bacia, no instante de tempo t (mm).

$ke_1 ; ke_2 ; \dots ; ke_n$: coeficientes de representação espacial de cada posto pluviométrico, ou seja, o peso de cada posto no cálculo da precipitação média $Pb_{(t)}$ observada na bacia.

$kt_{(-3)} ; kt_{(-2)} ; \dots ; kt_{(+1)}$: coeficientes de representação temporal, ou seja, os pesos utilizados para o cálculo da precipitação média $P_{(t)}$ na bacia, a ser considerada pelo modelo.

Os coeficientes de representação temporal foram utilizados para o cálculo da precipitação média na bacia a ser considerada pelo modelo devido aos seguintes aspectos:

- Em geral, as medidas de precipitação nos postos pluviométricos são realizadas às 7:00h, ou seja, a maior parte da precipitação ocorrida no dia t só é medida e computada no dia $t+1$. Dessa forma, principalmente em bacias com tempo de concentração relativamente pequeno, a vazão média do dia t pode ser influenciada pela precipitação medida no dia $t+1$.

- Em bacias com tempos de concentração maiores, pode haver uma defasagem temporal entre os picos de precipitação e de vazão. Neste caso, modelos concentrados ou mesmo semiconcentrados, como o SMAP, têm mais dificuldades

de reproduzir esta defasagem, caso a precipitação média observada na bacia no instante de tempo t ($P_{b(t)}$) seja considerada integralmente como a precipitação a ser utilizada pelo modelo no instante de tempo t ($P_{(t)}$).

Os totais diários de evapotranspiração potencial - $Ep_{(t)}$, a serem utilizados para cada trecho incremental, são obtidos a partir dos valores mensais de evapotranspiração potencial estimados pelo modelo SISEVAPO [Müller, 2001], para o reservatório localizado no exutório desse trecho incremental. Esse modelo é utilizado pelo ONS para o cálculo da evaporação líquida de todos os reservatórios do SIN. A formulação utilizada para o cálculo da evapotranspiração potencial - $Ep_{(t)}$ é a seguinte:

$$Ep_{(t)} = Ep_{us,jus(t)} \times kep \quad (5.18)$$

onde:

$Ep_{us,jus(t)}$: evapotranspiração potencial mensal fornecida pelo modelo SISEVAPO [ONS, 2004] para a usina correspondente à bacia estudada ou, no caso de bacias em locais de estações fluviométricas, para a usina imediatamente a jusante da bacia (mm).

kep : coeficiente de ajuste da evapotranspiração potencial média da bacia.

Na aplicação do modelo SMAP à bacia do alto/médio rio Grande, foram utilizadas planilhas eletrônicas Excel. Para as etapas de calibração, validação e testes de desempenho do modelo foram utilizados períodos e conjunto de dados de entrada distintos.

5.2 Calibração e validação dos parâmetros

Para o modelo SMAP aplicado à bacia do alto/médio rio Grande, os parâmetros calibrados, para cada sub-bacia estudada, foram os seguintes:

A_i : abstração inicial (mm).

Str : capacidade de saturação do solo (mm).

$Capc$: capacidade de campo (%).

$Crec$: parâmetro de recarga subterrânea (%).

K_{2t} : constante de recessão do escoamento superficial (dia).

K_{kt} : constante de recessão do escoamento básico (dia).

H : altura representativa para início de escoamento em planícies (mm).
 $K1t$: constante de recessão do escoamento para planícies (dia).
 $K3t$: constante de recessão do escoamento da superfície/planícies (dia).
 $ke_1 ; ke_2 ; \dots ; ke_n$: coeficientes de representação espacial de cada posto pluviométrico.
 $kt_{(-3)} ; kt_{(-2)} ; \dots ; kt_{(+1)}$: coeficientes de representação temporal.
 kep : coeficiente de ajuste da evapotranspiração potencial média da sub-bacia.

Vale ressaltar que os seis primeiros parâmetros (A_i ; Str ; $Capc$; $Crec$; $K2t$ e Kkt) são os mesmos a calibrar quando se utiliza a versão original do modelo SMAP com três reservatórios. Os três parâmetros seguintes (H ; $K1t$ e $K3t$) são decorrentes da incorporação do quarto reservatório, que representa o eventual extravasamento pelas margens e escoamento pelas planícies de inundação. Os coeficientes ke ; kt e kep devem ser calibrados com vistas a uma melhor representatividade dos dados de precipitação média da sub-bacia - $P_{(t)}$ e de evapotranspiração potencial média da sub-bacia - $Ep_{(t)}$, a serem utilizados pelo modelo.

Neste estudo, assim como no estudo anterior, realizado para a bacia incremental da UHE Itaipu, optou-se por fixar o valor da abstração inicial - A_i em 2,0mm.

As faixas adotadas para possíveis variações dos demais parâmetros, obtidas, em geral, a partir da aplicação do modelo SMAP em bacias de diversas regiões brasileiras, são apresentadas na tabela 5.1.

O valor mínimo do parâmetro H (altura representativa para início de escoamento em planícies) deve ser estimado com base nos resultados preliminares da calibração e na experiência do hidrólogo na sub-bacia. Sugere-se, nas primeiras iterações da calibração, fixar um valor elevado para esse parâmetro (200,00 por exemplo), que iniba o funcionamento do quarto reservatório (ver figura 5.3). Caso os resultados da calibração indiquem a existência de significativos amortecimentos em eventos de grandes cheias ou uma distribuição irregular dos coeficientes de representação temporal - kt , com valor de $kt_{(-3)}$ e/ou $kt_{(-2)}$ relativamente alto, é conveniente a ativação do quarto reservatório. Nestes casos, o valor mínimo de H deverá ser fixado acima dos valores máximos da variável de estado R_{sup} obtidos na calibração de eventos/períodos com cheias pequenas e médias. Não há valor máximo para o parâmetro H .

Os valores mínimos e máximos dos coeficientes de representação espacial das estações pluviométricas – ke dependem da quantidade de estações existentes na sub-bacia e em sua proximidade, bem como na localização e situação relativa de cada estação.

Tabela 5.1 – Faixas de variação dos parâmetros do modelo

Parâmetro	Valor Mínimo	Valor Máximo
Str	100 mm	2.000 mm
Capc	30%	50%
Crec	0%	100%
H	variável	-
K1t	0,2 dia	10,0 dia
K2t	0,2 dia	10,0 dia
K3t	10,0 dia	60,0 dia
ke1 ; ke2 ;...; ken	variável	variável
kt(-3) ; kt(-2) ;...; kt(+1)	0	1
kep	0,8	1,2

Para iniciar a calibração, é necessário fornecer valores iniciais para as variáveis de estado do modelo, ou seja, valores de Rsolo(0), Rsub(0), Rsup(0) e Rsup2(0). Estes valores são calculados pelas seguintes expressões:

$$R_{solo(0)} = \frac{T_{uin}}{100} \times Str \quad (5.19)$$

$$R_{sub(0)} = \frac{E_{bin}}{(1 - 0,5^{(1/Kkt)}) \times Ad} \times 86,4 \quad (5.20)$$

$$R_{sup(0)} = \frac{S_{upin}}{(1 - 0,5^{(1/K2t)}) \times Ad} \times 86,4 \quad (5.21)$$

$$R_{sup2(0)} = \frac{S_{up2in}}{(1 - 0,5^{(1/K3t)}) \times Ad} \times 86,4 \quad (5.22)$$

onde:

Tuin : teor de umidade inicial do solo (%).

Ebin : vazão básica inicial (m³/s).

Supin : vazão superficial inicial, proveniente do reservatório da superfície (m³/s).

Sup2in: vazão superficial inicial, proveniente do reservatório da superfície/planície (m³/s).

A correta estimativa dos valores de Tuin, Ebin, Supin e Sup2in é importante para o bom desempenho do modelo. Para isso, deve-se sempre iniciar o período de calibração no meio para o final do período seco do ano, com valores baixos de umidade do solo e de vazão superficial. Dessa forma, a vazão básica inicial (Ebin) deverá ser próxima da vazão observada inicial (Qobs(o)). Para a estimativa do valor de Supin, deve-se verificar a quantidade de chuva ocorrida nos dias anteriores. O valor de Sup2in, em geral, é nulo.

Para calibração dos parâmetros de cada sub-bacia, utilizou-se a rotina solver da planilha eletrônica Excel, de forma semi-automática e iterativa, ajustando-se, a cada passo, um dos parâmetros listados na tabela 5.1. A função objetivo adotada foi a maximização do valor da seguinte expressão:

$$\text{SomaCoef} = \text{Cef} + \text{Cer} \quad (5.23)$$

onde:

$$\text{Cef} = \frac{\sum (Q_{\text{obs}(t)} - \overline{Q_{\text{obs}}})^2 - \sum (Q_{\text{obs}(t)} - Q_{\text{calc}(t)})^2}{\sum (Q_{\text{obs}(t)} - \overline{Q_{\text{obs}}})^2} \quad (5.24)$$

$$\text{Cer} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n \frac{\text{abs}(Q_{\text{calc}(t)} - Q_{\text{obs}(t)})}{Q_{\text{obs}(t)}}}{n} \quad (5.25)$$

Cef : coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe [Nash, 1970].

Cer : coeficiente de erro relativo.

$\overline{Q_{\text{obs}}}$: vazão média observada no período considerado (m³/s).

O coeficiente de eficiência - Cef apresenta valores sempre inferiores à unidade, podendo variar na faixa de valores compreendidos entre $-\infty$ e 1. Valores elevados do coeficiente de eficiência (próximos à unidade) indicam elevada associação entre os dados observados e calculados, representando um bom ajuste do modelo aos

dados de campo. A obtenção de um coeficiente de eficiência igual à unidade representaria o ajuste perfeito (ou seja, a coincidência perfeita) entre as vazões observadas e calculadas. Devido à sua formulação, o coeficiente de eficiência é mais sensível aos desvios nas vazões mais elevadas.

O coeficiente de erro relativo - Cer também apresenta valores sempre inferiores à unidade, podendo variar na faixa de valores compreendidos entre $-\infty$ e 1. Da mesma forma, a obtenção de um coeficiente de eficiência igual à unidade representaria o ajuste perfeito entre as vazões observadas e calculadas. Devido à sua formulação, o coeficiente de eficiência é mais sensível aos desvios nas vazões mais baixas.

Como SomaCoef é a soma dos dois coeficientes, o mesmo pode variar entre $-\infty$ e 2, sendo que a obtenção de uma soma igual a 2 representaria o ajuste perfeito entre as vazões observadas e calculadas. Devido à sua formulação, este coeficiente, utilizado na função objetivo para calibração automática do modelo, é sensível aos desvios em todo o período do ano, tanto nas vazões mais baixas, quanto nas vazões mais elevadas.

Para a etapa de calibração dos parâmetros do modelo, são selecionados de dois a cinco períodos distintos de 365 dias, procurando situações hidrológicas diversificadas na bacia, ou seja, períodos com cheias anuais baixa, média e alta.

Uma vez calibrados os parâmetros, passa-se à etapa de validação dos mesmos, selecionando de dois a cinco períodos distintos de 365 dias, diferentes dos usados na etapa de calibração. Os parâmetros A_i ; Str ; $Capc$; $Crec$; H ; $k1t$; $K2t$; $K3t$; Kkt e os valores dos coeficientes kt , mais relacionados às características físicas da bacia, são os mesmos obtidos na etapa de calibração. Os valores dos coeficientes de distribuição espacial - ke , e o coeficiente de ajuste da evapotranspiração potencial média da bacia - kep , mais relacionados à representatividade dos dados de entrada do modelo, são redefinidos para cada período.

Nas duas etapas (calibração e validação) procurou-se trabalhar com uma rede de estações pluviométricas mais densa possível, sem distinção entre estações telemétricas e estações convencionais. O objetivo é assegurar uma maior distribuição espacial nos valores de precipitação observada na bacia, permitindo a obtenção de parâmetros do modelo mais representativos possíveis.