

## Métodos de Separação dos Escoamentos Superficial Direto e Subterrâneo: Estudo de Caso para a Bacia do Rio das Velhas

Antônio Calazans Reis Miranda\*, Falco Pruski\*, Mauro Aparecido Martinez\*, Paulo Roberto Cecon\*

antonioicalazans.mma@gmail.com; fffpruski@ufv.br; mmauro@ufv.br; cecon@ufv.br

Recebido: 05/09/12 - revisado: 13/06/13 - aceito: 09/12/13

### RESUMO

A separação do escoamento superficial direto do escoamento subterrâneo permite a compreensão da magnitude e da dinâmica das águas subterrâneas e do escoamento superficial direto em bacias hidrográficas. Diante da importância dos estudos sobre o escoamento superficial direto e o escoamento subterrâneo, este trabalho teve como objetivos: analisar métodos de separação do escoamento superficial direto do escoamento subterrâneo, e desenvolver um aplicativo computacional para a aplicação de métodos automáticos de separação. A análise dos métodos de separação foi feita com base na comparação entre os volumes de escoamento superficial direto, obtidos para duas sub-bacias da região do Alto Rio das Velhas, considerando os valores diários e os totais anuais estimados pelos métodos de separação: intervalo fixo, intervalo móvel e mínimo local. Foi desenvolvido um aplicativo computacional em linguagem VBA, para viabilizar a aplicação dos métodos automáticos de separação considerando o formato padrão da base de dados do sistema HidroWeb, da ANA. Os resultados indicam que os métodos de separação analisados produzem resultados semelhantes entre si com relação à estimativa do escoamento superficial direto diário e total anual; e o aplicativo computacional permite a aplicação dos métodos de separação – intervalo fixo, intervalo móvel e mínimo local – para as bases de dados do sistema HidroWeb.

**Palavras-chave:** vazão, hidrograma, recursos hídricos, bacia hidrográfica, análise estatística.

### INTRODUÇÃO

A separação do escoamento superficial direto do escoamento subterrâneo é um procedimento que permite a compreensão da magnitude e da dinâmica da descarga de águas subterrâneas e dos processos de escoamento superficial direto em bacias hidrográficas (FUREY & GUPTA, 2001; BRODIE & HOSTETLER, 2005). Permite também a análise da influência de diversos fatores sobre o escoamento subterrâneo e sobre o escoamento superficial direto. Como, por exemplo, a análise da influência da adoção de práticas para a conservação de água e de solo na redução dos picos de vazão e no aumento das vazões mínimas em períodos de estiagem (HUANG & ZHANG, 2004).

Diversos métodos, como o de análise de traçadores, os que envolvem filtros digitais de base física, e os que se baseiam em ajustes de curvas, manualmente ou automaticamente, por meio da análise gráfica dos hidrogramas, foram desenvolvidos

com o objetivo de aprimorar a separação do escoamento superficial direto do subterrâneo (CUSTÓDIO & LLAMAS, 1983; FUREY & GUPTA, 2003; BRODIE & HOSTETLER, 2005; GONZALES *et al.*, 2009). Esses métodos muitas vezes são utilizados como provedores dos dados observados de escoamento superficial direto e subterrâneo, utilizados, inclusive, na calibração e validação de modelos hidrológicos. No entanto, a aplicação de métodos desenvolvidas em outros países não é tão simples para as condições brasileiras, sendo necessária a avaliação do desempenho destas metodologias para as condições específicas onde elas são aplicadas (AMORIM *et al.*, 2010).

No Brasil, ainda são poucos os estudos que tratam da separação do escoamento superficial direto do subterrâneo pela análise dos hidrogramas (MENEGASSE *et al.*, 2002; IGAM, 2005 e 2010; COSTA & BACELLAR, 2010). No entanto, considerando o disposto na legislação brasileira sobre a importância da aquisição de informações sobre recursos hídricos (BRASIL, 1997; CNRH, 2008), a estimativa do escoamento superficial direto e do escoamento subterrâneo pode servir para a constituição de uma base de dados importante para

\*Universidade Federal de Viçosa/UFV

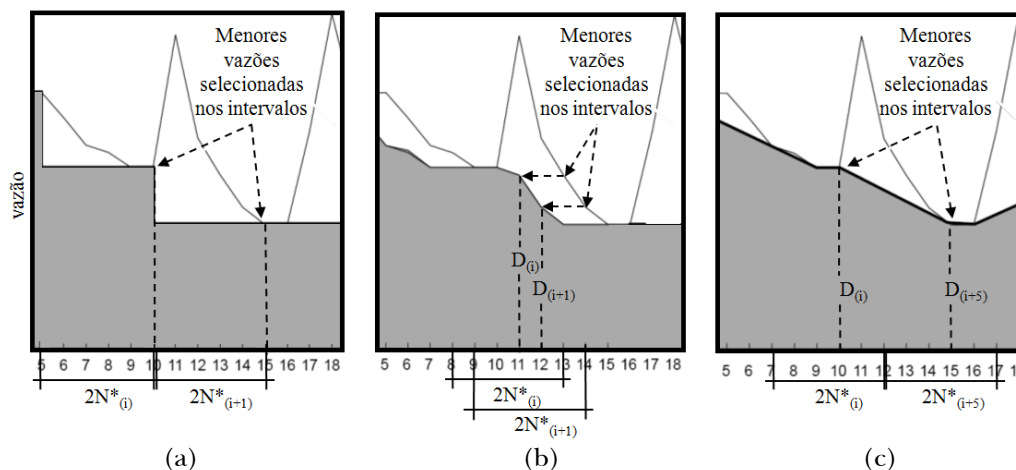


Figura 1 - Separação do escoamento superficial direto do escoamento subterrâneo utilizando os métodos IF (a), IM (b) e ML (c) (Adaptado de: Sloto & Crouse, 1996).

dar suporte, por exemplo, às atividades de gestão da quantidade e da qualidade da água nas bacias hidrográficas brasileiras.

Alguns métodos de separação já estão consolidados em ambiente computacional (SLOTO & CROUSE, 1996; LIM *et al.*, 2005), entretanto, um problema na utilização dos *softwares* existentes consiste na sua concepção para serem aplicados às bases de dados no formato padrão do país ou região onde foram desenvolvidos, o que dificulta sua aplicação para outros países, como no caso do Brasil.

Diante da importância de estudos que envolvem a separação do escoamento superficial direto do escoamento subterrâneo, o objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho de métodos de separação do escoamento superficial direto do escoamento subterrâneo.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Avaliação do desempenho dos métodos de separação

#### Métodos de separação avaliados

Os métodos de separação do escoamento superficial do escoamento subterrâneo utilizados foram os desenvolvidos por Pettyjohn e Henning (1979), que são: o método do Intervalo Fixo (IF); o método do Intervalo Móvel (IM); e o método do Mínimo Local (ML). Estes métodos de separação consistem em filtros digitais que não envolvem limitações de ordem prática e econômica para a sua

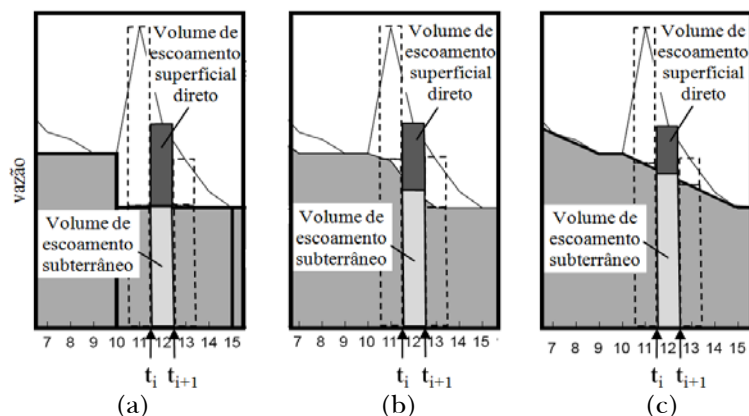
aplicação, como ocorre com os demais métodos de separação. Além disso, estes métodos de separação produzem resultados com boa aproximação dos resultados obtidos com processos manuais de separação (SLOTO & CROUSE, 1996) e com o método dos traçadores (GONZALES *et al.*, 2009).

O intervalo de dias igual a  $2N^*$  é utilizado na aplicação dos métodos de separação IF, IM e ML (PETTYJOHN & HENNING, 1979). O  $2N^*$  é o número inteiro imediatamente superior ao dobro de  $N$ , que é o intervalo de duração do escoamento superficial direto após o pico de vazão (LINSLEY *et al.*, 1982), estimado com boa adequação (FETTER, 2001) pela equação empírica:

$$N = 0,827 \times A^{0,2} \quad (1)$$

em que:  $A$  – área de drenagem,  $\text{km}^2$ .

No método IF é selecionada a menor vazão dentro do intervalo de  $2N^*$ . Esta vazão é adotada como a descarga do escoamento subterrâneo, sendo este valor mantido constante durante todo o intervalo  $2N^*$  dias (Figura 1a). No método IM o menor valor de vazão é selecionado no intervalo  $2N^*$  e este valor é adotado como o escoamento subterrâneo do dia  $D_{(i)}$ , correspondente ao dia do meio do intervalo (Figura 1b). No método ML é feita a verificação se a vazão do dia  $D_{(i)}$  é a menor dentro do intervalo  $2N^*$  dias. Atendida essa condição, então este dia é considerado um mínimo local. Após a detecção de todos os mínimos locais, estes são unidos por meio de retas (Figura 1c).



**Figura 2 - Esquema representativo dos volumes de escoamento superficial direto e de escoamento subterrâneo calculados para o dia  $i$  (intervalo de tempo entre  $t_i$  e  $t_{i+1}$ ) da série, utilizando os métodos IF (a), IM (b) e ML (c) (Adaptado de: Sloto & Crouse, 1996).**

#### Quantificação do escoamento superficial direto e do escoamento subterrâneo

Após a aplicação dos métodos de separação IF, IM e ML, os volumes de escoamento superficial direto e de escoamento subterrâneo são calculados pelas equações:

$$V_{(i)} = \int_{t_i}^{t_{i+1}} Q_{(i)} dt = \frac{(Q_{(i+1)} + Q_{(i)})}{2} \Delta t \quad (2)$$

$$V_{\text{ESub}(i)} = \int_{t_i}^{t_{i+1}} Q_{\text{ESub}(i)} dt = \frac{(Q_{\text{ESub}(i+1)} + Q_{\text{ESub}(i)})}{2} \Delta t \quad (3)$$

$$V_{\text{ES}(i)} = V_{(i)} - V_{\text{ESub}(i)} \quad (4)$$

em que:  $V_{(i)}$  – volume de escoamento total no dia  $i$ ,  $\text{m}^3$ ;  $Q_{(i)}$  – vazão do dia  $i$ , obtida da base de dados da estação fluviométrica,  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $\Delta t$  – intervalo de tempo compreendido entre os instantes  $t_i$  e  $t_{i+1}$ , igual a 86400s;  $V_{\text{ESub}(i)}$  – volume de escoamento subterrâneo no dia  $i$ ,  $\text{m}^3$ ;  $Q_{\text{ESub}(i)}$  – vazão correspondente ao escoamento subterrâneo no dia  $i$ ,  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ; e  $V_{\text{ES}(i)}$  – volume de escoamento superficial direto no dia  $i$ ,  $\text{m}^3$ .

Os volumes provenientes do escoamento superficial direto e do escoamento subterrâneo são estimados para cada dia ( $t_i - t_{i+1}$ ) da série de vazões (Figura 2).

Os volumes de escoamento superficial direto totais anuais foram calculados pela equação:

$$V_{\text{ESa}} = \sum_{i=1}^{ud} V_{\text{ES}(i)} \quad (5)$$

em que:  $V_{\text{ESa}}$  – volume de escoamento superficial direto total anual,  $\text{m}^3$ ;  $V_{\text{ES}(i)}$  – volume de escoamento superficial direto no dia  $i$ ,  $\text{m}^3$ ; e  $ud$  – último dia do ano hidrológico.

O ano hidrológico é identificado pela análise dos períodos de recessão do escoamento dos hidrogramas.

A avaliação do desempenho dos métodos de separação IF, IM e ML foi feita a partir da comparação entre os volumes de escoamento superficial direto obtidos com a aplicação de cada método. Esta análise foi feita para duas áreas de drenagem distintas considerando os valores de  $V_{\text{ES}(i)}$  e os  $V_{\text{ESa}}$  obtidos para cada área.

#### Áreas estudadas

As áreas selecionadas correspondem às áreas de drenagem das estações fluviométricas Honório Bicalho - Montante (41199998) e Pinhões (41260000), cujas bases de dados foram obtidas no sistema *HidroWeb* (ANA, 2011b). Estas estações estão localizadas no Estado de Minas Gerais, na região do Alto Rio das Velhas, região de cabeceira da bacia hidrográfica do Rio das Velhas, que é um importante afluente do rio São Francisco. Os detalhes de formato e localização das áreas de drenagem das duas estações, individualizadas a partir do Modelo Digital de Elevação Hidrograficamente Condicionado (MDEHC) obtido, são mostrados na Figura 3.

As áreas de drenagem correspondentes às duas estações fluviométricas foram individualizadas com o objetivo de delimitar os processos de escoamento superficial direto que ocorrem dentro de cada área. Foi utilizado o *software* ArcGIS versão 9.3 no processamento das informações espaciais. Foram utilizadas as imagens *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) para a obtenção MDEHC da região (ENG-MAN, 1996; EMBRAPA, 2005; COELHO, 2008).

No condicionamento do MDE foi utilizada a hidrografia das cartas do IBGE em escala de 1:50.000.

As dimensões das áreas de drenagem das estações 41199998 e 41260000, individualizadas a partir do MDEHC, foram de 1.544,6 km<sup>2</sup> e 3.722,9 km<sup>2</sup>, respectivamente. Assim, os valores de N, calculados a partir da equação 1, foram de 5,25 e 6,26 para as estações 41199998 e 41260000, respectivamente, e os intervalos 2N\* foram considerados como sendo 11 e 13 dias, respectivamente.

As estações fluviométricas 41199998 e 41260000 foram selecionadas dentre outras estações fluviométricas localizadas na região por disporem de uma extensa série histórica de dados de vazões diárias e com poucas falhas. A análise de falhas foi feita a partir do diagrama de barras gerado com o auxílio do *software* SisCAH (SOUSA *et al.*, 2009), sendo selecionados os anos hidrológicos correspondentes aos anos com 100% dos dados disponíveis nas duas estações. Assim, foram selecionados os anos compreendidos entre 1976 e 2004, sendo eliminados, devido a falhas, os anos de 1979, 1980, 1996, 1997, 1999 e 2002.

Os anos hidrológicos foram considerados como sendo do dia 01 de outubro ao dia 30 de setembro, considerando que as menores vazões observadas nos hidrogramas estiveram entre os meses de outubro e novembro, para as duas estações fluviométricas, similar ao observado por IGAM (2005) para a mesma região.

#### *Comparação entre os valores estimados pelos métodos de separação*

Na comparação entre os métodos IF, IM e ML, os valores de  $V_{ES}$  e de  $V_{ESa}$  estimados por cada um desses métodos passaram a ser designados como  $V_{ES\_IF}$  e  $V_{ESa\_IF}$ ;  $V_{ES\_IM}$  e  $V_{ESa\_IM}$ ; e  $V_{ES\_ML}$  e  $V_{ESa\_ML}$ , respectivamente.

A comparação foi feita por análise de regressão com o uso da equação:

$$Y_i = \beta_1 X_i + e_i \quad (6)$$

em que:  $Y_i$  e  $X_i$  assumem os valores dos volumes de escoamento superficial direto obtidos com a aplicação de cada método de separação.

Foram feitas as combinações  $V_{ES\_IF}$  versus  $V_{ES\_IM}$ ,  $V_{ES\_IF}$  versus  $V_{ES\_ML}$ ,  $V_{ES\_IM}$  versus  $V_{ES\_ML}$ ,  $V_{ESa\_IF}$  versus  $V_{ESa\_IM}$ ,  $V_{ESa\_IF}$  versus  $V_{ESa\_ML}$ ,  $V_{ESa\_IM}$  versus  $V_{ESa\_ML}$  para o ajuste do modelo de regressão da equação 6. Nas comparações entre o método IF e os métodos IM e ML, os valores de  $V_{ES\_IF}$  e  $V_{ESa\_IF}$  assumiram a condição de variável dependente ( $Y_i$ ), enquanto que os valores de  $V_{ES\_IM}$ ,  $V_{ES\_ML}$ ,  $V_{ESa\_IM}$  e  $V_{ESa\_ML}$  assumiram a condição de variável independente ( $X_i$ ).

Já na comparação entre os métodos IM e o método ML, os valores de  $V_{ES\_IM}$  e  $V_{ESa\_IM}$  assumiram a condição de variável dependente ( $Y_i$ ), enquanto que os valores  $V_{ES\_ML}$  e  $V_{ESa\_ML}$  assumiram a condição de variável independente ( $X_i$ ).

Após o ajuste da equação 6 para cada combinação entre os valores estimados pelos métodos de separação, os valores de  $\hat{\beta}_1$  foram avaliados quanto a sua aproximação da unidade. Foi utilizado o teste  $t$ , para o qual foi adotado o nível de 5% de significância e  $(n - 1)$  graus de liberdade, sendo testadas as hipóteses  $H_0: \hat{\beta}_1 = 1$  e  $H_a: \hat{\beta}_1 \neq 1$  (MONTGOMERY & PECK, 1992; TEDESCHI, 2006).

O cálculo de  $t$  para os testes de hipóteses foi feito pelas equações:

$$\hat{V}(\hat{\beta}_1) = \frac{Q.M.Res.}{\sum_{i=1}^n X_i^2} \quad (7)$$

$$Q.M.Res. = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i^2 - \hat{\beta}_1 \cdot \sum_{i=1}^n X_i}{(n - 1)} \quad (8)$$

$$t_c = \frac{\hat{\beta}_1 - 1}{\sqrt{\hat{V}(\hat{\beta}_1)}} \quad (9)$$

em que:  $\hat{V}(\hat{\beta}_1)$  - estimador da variância do estimador do parâmetro  $\hat{\beta}_1$ ; Q.M.Res. - quadrado médio do resíduo da regressão linear simples passando.

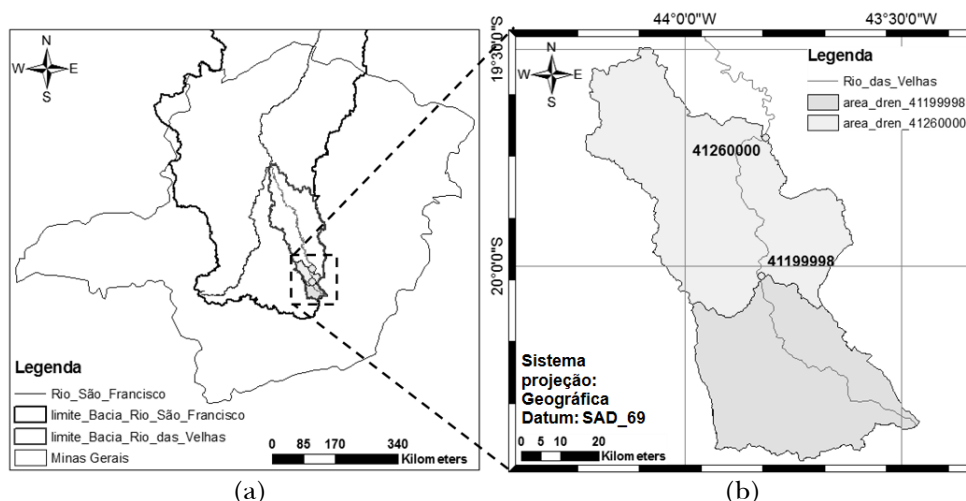


Figura 3 - Áreas de drenagem das estações selecionadas - localização (a) e detalhe (b). Fonte de dados: ANA (2011a).

pela origem; e  $t_c - t$  calculado para o teste de hipótese a respeito do parâmetro  $\hat{\beta}_1$

Outras estatísticas que foram utilizadas para a avaliação do desempenho dos métodos de separação foram os índices  $d$  e  $NS$ , estimados pelas equações:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}{\sum_{i=1}^n [(|Y_i - \bar{X}|) + (|X_i - \bar{X}|)]^2} \quad (10)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (11)$$

em que:  $Y_i$  e  $X_i$  assumem os valores dos volumes de escoamento superficial direto obtidos com a aplicação de cada método de separação.

O índice  $d$  (equação 10) é conhecido como índice de concordância entre modelos, desenvolvido por Willmott (1981). O índice  $NS$  (equação 11) é conhecido como índice de análise da eficiência de modelos, desenvolvido por Nash e Sutcliffe (1970), e indica quanto que os dados estimados pelo modelo se distanciam em relação ao comportamento médio dos dados observados. Estes índices são largamente utilizados com o objetivo tanto de avaliar o desempenho de modelos quanto de comparar resultados obtidos com a aplicação de diferentes metodologias (ZIEGLER *et al.*, 2001; CHUA & WONG, 2011). Os

valores de  $d$  variam entre 0 e 1 (WILLMOTT, 1981; 1982; WILLMOTT *et al.*, 1985) e os valores de  $NS$  variam entre  $-\infty$  e 1 (MORIASI *et al.*, 2007).

Quanto mais os valores destes índices se aproximam da unidade, maior é o indicativo de concordância entre modelos e de eficiência de um modelo em relação à estimativa dos dados estimados por outro modelo, adotado como o padrão na comparação.

#### Desenvolvimento do aplicativo computacional

Foi desenvolvido um aplicativo computacional, em linguagem *Visual Basic for Applications* – VBA, configurado para viabilizar a aplicação dos métodos IF, IM e ML, atendendo também os padrões dos bancos de dados de vazão provenientes do sistema *HidroWeb* (ANA, 2011b).

A organização do sistema foi feita considerando a seguinte sequência lógica:

1. Entrada de dados de vazão;
2. Identificação e remoção de anos com excesso de falhas na série de vazões;
3. Entrada de dado referente à área de drenagem da estação fluviométrica, necessário para a definição do intervalo  $2N^*$  dias;
4. Cálculo o intervalo  $2N^*$  dias;
5. Separação pelos métodos IF, IM e ML, e cálculo de  $V_{ES\_IF}$  e  $V_{ESa\_IF}$ ;  $V_{ES\_IM}$  e  $V_{ESa\_IM}$ ; e  $V_{ES\_ML}$  e  $V_{ESa\_ML}$ , conforme representado na Figura 2, para cada ano hidrológico considerado na série de dados.

A entrada de dados é feita simplesmente se copiando todo o conteúdo da tabela de vazões do arquivo “.MDB” correspondente à estação fluviométrica obtida do sistema *HidroWeb*, e colando em uma planilha eletrônica do *Microsoft Office Excel*.

## RESULTADOS

### Desempenho dos métodos de separação

#### Comparação entre os métodos IF e IM

Na Tabela 1 são apresentados os valores de  $\hat{\beta}_1$  dos modelos ajustados, o resultado dos testes de significância da diferença dos valores de  $\hat{\beta}_1$  da unidade, e os valores dos índices d e NS para as comparações feitas entre os métodos de separação do Intervalo Fixo (IF) e do Intervalo Móvel (IM), considerando os valores dos volumes de escoamento superficial diários ( $V_{ES}$ ) e totais anuais ( $V_{ESa}$ ) estimados para as áreas de drenagem das duas estações fluviométricas.

Na Figura 4 são apresentados os gráficos nos quais é possível a visualização dos desvios das linhas de tendência com relação à função identidade nas comparações feitas entre os métodos IF e IM, considerando os valores de  $V_{ES}$  e de  $V_{ESa}$  obtidos para as áreas de drenagem das estações fluviométricas 41199998 e 41260000.

**Tabela 1 - Resultados da comparação entre os métodos de separação IF e IM**

Estação	Escoamento superficial direto	$\hat{\beta}_1$	d	NS
41199998	$V_{ES\_IF} \times V_{ES\_IM}$	0,988*	0,9950	0,9803
	$V_{ESa\_IF} \times V_{ESa\_IM}$	1,055*	0,9907	0,9595
41260000	$V_{ES\_IF} \times V_{ES\_IM}$	1,012*	0,9955	0,9819
	$V_{ESa\_IF} \times V_{ESa\_IM}$	1,030*	0,9929	0,9717

(\*) significativo a 5% de probabilidade.

Embora os testes *t* tenham detectado que as diferenças dos valores de  $\hat{\beta}_1$  com relação à unidade (vieses das estimativas de um método em relação ao outro) sejam significativas a 5% de probabilidade

nas comparações feitas, os valores de  $\hat{\beta}_1$  dos modelos ajustados são muito próximos da unidade. Este fato pode ser observado em todos os casos apresentados na Figura 4, sendo, portanto, os desvios das linhas de tendência em relação à reta representativa da função identidade (linha tracejada em que  $Y = X$ ) muito baixos. Também se evidencia que a dispersão dos dados em torno dos modelos ajustados é baixa, como é indicado pelos valores de  $r^2$  muito próximos da unidade, fato resultante dos valores dos quadrados médios dos resíduos das regressões serem muito baixos.

Na Tabela 2 são apresentados os resíduos das regressões na comparação entre os valores de  $V_{ES}$  e de  $V_{ESa}$  estimados pelos métodos de separação IF e IM para a área de drenagem da estação 41199998.

**Tabela 2 – Resíduos das regressões na comparação entre os valores de  $V_{ES}$  e de  $V_{ESa}$  estimados pelos métodos de separação IF e IM para a área de drenagem da estação 41199998**

Comparações	$V_{ES\_IF} \times V_{ES\_IM}$		$V_{ESa\_IF} \times V_{ESa\_IM}$	
F.V.	G.L.	Q.M.	G.L.	Q.M.
Regresso	1	293,10	1	168,65
Resíduo	6939	0,00074	18	0,01
Total	6940		19	

Na análise dos valores de  $V_{ES}$ , cujo tamanho da amostra é expressivo, esta situação é ainda mais acentuada, pois os valores dos quadrados médios destes resíduos ficam ainda menores. Assim, os valores das variâncias de  $\hat{\beta}_1$  (equação 7), que são muito baixos em todas as comparações realizadas, tenderam a apresentar os valores de  $t_c$  (equação 9) sempre superiores aos valores de  $t_{(n-1; 5\%)}$ , mesmo que a diferença de  $\hat{\beta}_1$  com relação a unidade seja mínima.

O método IM tendeu a superestimar os valores de  $V_{ES}$  em relação ao método IF para a área de drenagem da estação 41199998, como indicado pelo teste de significância da diferença do valor de  $\hat{\beta}_1$  da unidade (Figura 4a). Por outro lado, foi observado um comportamento oposto quando comparados os totais anuais estimados para a área de drenagem da mesma estação e utilizando os mesmos métodos de separação (Figura 4b).

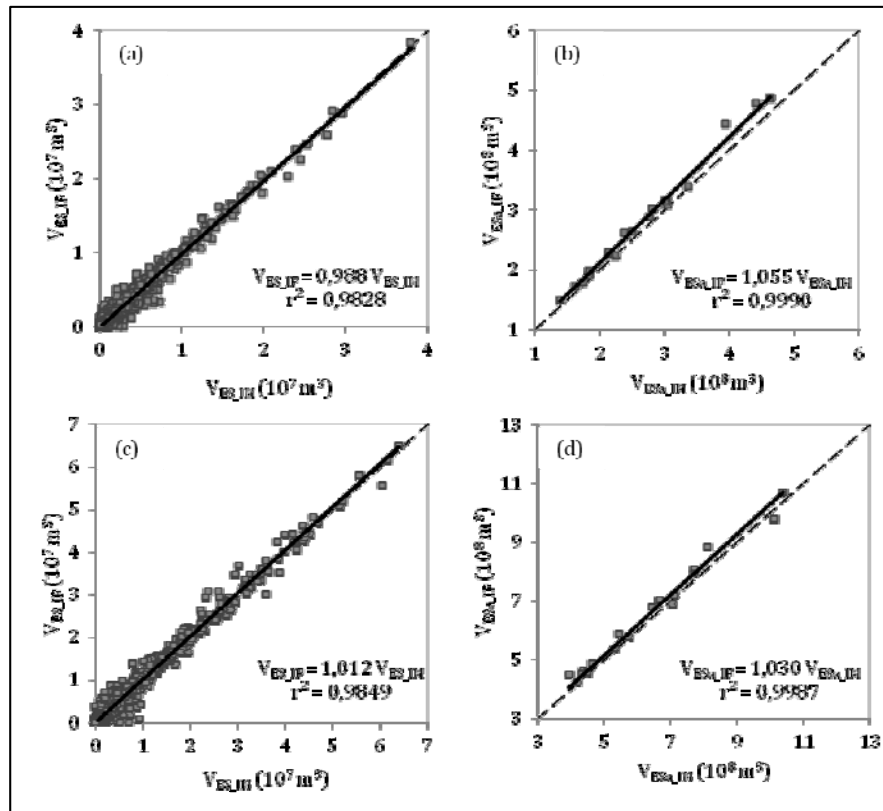


Figura 4 – Comparação entre os métodos de separação do Intervalo Fixo (IF) e do Intervalo Móvel (IM) com relação à estimativa dos volumes de escoamento superficial direto diários ( $V_{ES}$ ) e totais anuais ( $V_{ESa}$ ) para as áreas de drenagem das estações 41199998 (a, b) e 41260000 (c, d).

Já para a área de drenagem da estação 41260000, que corresponde à maior área de drenagem, os valores de  $\hat{\beta}_1$  foram maiores que um na comparação entre os métodos IF e IM, tanto com relação aos valores de  $V_{ES}$  (Figura 4c) quanto dos valores de  $V_{ESa}$  (Figura 4d).

Os casos apresentados na Figura 4c e na Figura 4d também apresentaram resíduos das regressões bastante pequenos resultando na diferença significativa dos valores de  $\hat{\beta}_1$  com relação à unidade. Por outro lado, os valores dos índices d e NS (Tabela 1) apresentaram valores bastante próximos da unidade para as comparações feitas entre os métodos de separação IF e IM considerando as áreas de drenagem das duas estações.

A proximidade do índice d com relação à unidade indica a boa concordância entre os métodos IF e IM com relação às estimativas dos valores de  $V_{ES}$  e de  $V_{ESa}$ .

Já a proximidade do índice NS da unidade é indicativo da eficiência do método IF com relação à estimativa dos valores de  $V_{ES}$  e de  $V_{ESa}$  obtidos com o método IM.

Os vieses de 1,2 a 5,5% indicados nas comparações entre os métodos IF e IM com relação à estimativa de  $V_{ES}$  e de  $V_{ESa}$  foram significativos em termos estatísticos. No entanto, vale ressaltar que, em termos práticos, estes vieses podem ser considerados aceitáveis, considerando-se as aproximações e simplificações envolvidas nos métodos utilizados nas medições de vazões em cursos d'água (TEAGUE *et al.*, 2001; BARRICK *et al.*, 2003).

Como os resíduos das regressões apresentaram valores muito pequenos, qualquer desvio dos valores de  $\hat{\beta}_1$  com relação à unidade, mesmo que sejam desvios mínimos, fazem com que o teste *t* identifique estes vieses como significativos, dados os reduzidos intervalos de confiança associados às regressões.

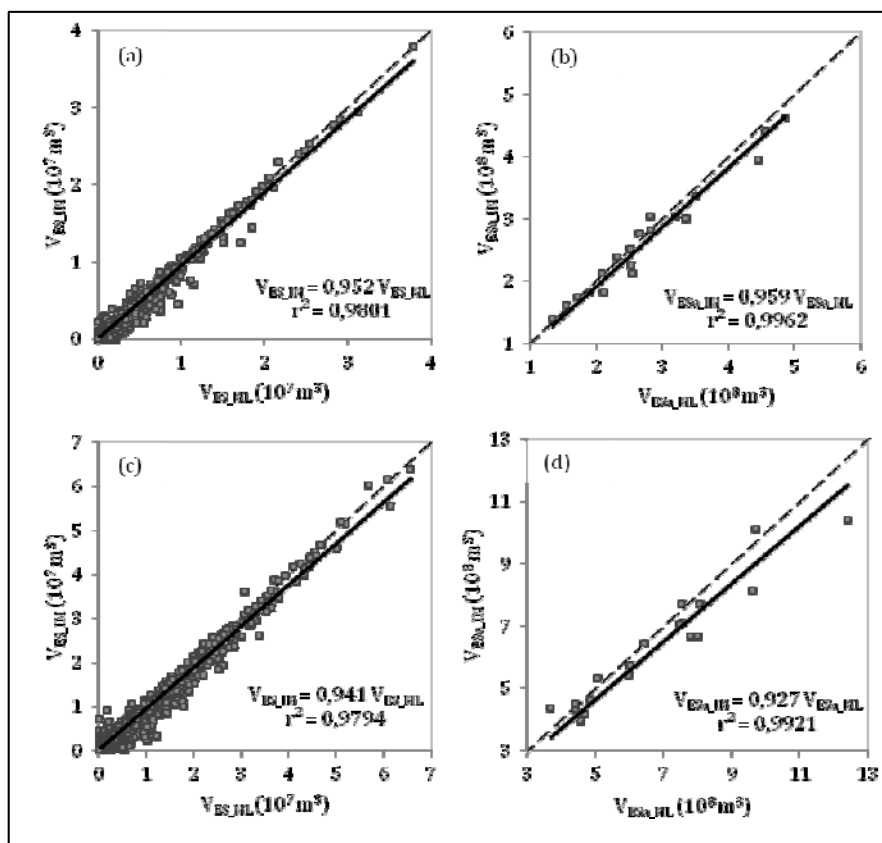


Figura 5 - Comparação entre os métodos de separação do Intervalo Móvel (IM) e do Mínimo Local (ML) com relação à estimativa dos volumes de escoamento superficial direto diários ( $V_{ES}$ ) e anuais ( $V_{ESa}$ ) para as áreas de drenagem das estações 41199998 (a, b) e 41260000 (c, d).

Portanto, diante dos baixos valores dos resíduos das regressões ajustadas e a proximidade dos valores de  $\hat{\beta}_1$  e dos índices d e NS com relação à unidade, além dos aspectos práticos envolvidos na medição da vazão, os valores de  $V_{ES}$  e de  $V_{ESa}$  estimados pelo método IF podem ser considerados semelhantes aos valores de  $V_{ES}$  e de  $V_{ESa}$  estimados pelo método IM.

#### Comparação entre os métodos IM e ML

Na Tabela 3 são apresentados valores de  $\hat{\beta}_1$  dos modelos ajustados, o resultado do teste de significância da diferença dos valores de  $\hat{\beta}_1$  da unidade, e os valores dos índices d e NS para as comparações feitas entre os métodos de separação do Intervalo Móvel (IM) e do Mínimo Local (ML), considerando os valores de  $V_{ES}$  e  $V_{ESa}$  estimados para as áreas de drenagem das duas estações fluviométricas estudadas.

Tabela 3 – Resultados da comparação entre os métodos de separação do Intervalo Móvel (IM) e do Mínimo Local (ML)

Estação	Escoamento superficial direto	$\hat{\beta}_1$	d	NS
41199998	$V_{ES\_IM} \times V_{ES\_ML}$	0,952*	0,9938	0,9763
	$V_{ESa\_IM} \times V_{ESa\_ML}$	0,959*	0,9869	0,9521
41260000	$V_{ES\_IM} \times V_{ES\_ML}$	0,941*	0,9933	0,9746
	$V_{ESa\_IM} \times V_{ESa\_ML}$	0,927*	0,9625	0,8737

(\*) significativo a 5% de probabilidade.

Nas comparações entre os métodos IM e ML pode-se observar que ocorreram diferenças um pouco maiores dos valores de  $\hat{\beta}_1$  com relação à unidade do que nas comparações feitas entre os métodos IF e IM.



As diferenças dos valores de  $\hat{\beta}_1$  com relação à unidade foram identificadas como significativas a 5% de probabilidade nas comparações entre os métodos IM e ML.

Assim, de acordo com os testes de significância, foram constatadas tendências de superestimativas dos valores de  $V_{ES}$  e de  $V_{ESa}$  pelo método ML em relação ao método IM. No entanto, nestes casos também ocorreram desvios pequenos dos valores estimados pelos dois métodos com relação aos modelos de regressão ajustados, dada a proximidade dos valores de  $r^2$  dos modelos ajustados com relação à unidade (Figura 5).

Os modelos ajustados nas comparações entre os métodos IM e ML também apresentaram resíduos pequenos, o que levou a um intervalo de confiança bastante restritivo e, conseqüentemente, a uma alta sensibilidade do teste de significância em detectar qualquer desvio mínimo dos valores de  $\hat{\beta}_1$  com relação à unidade.

Apesar das diferenças significativas entre os métodos IM e ML, apontadas pelos testes da diferença dos valores de  $\hat{\beta}_1$  com relação à unidade, os índices d e NS se mostraram próximos à unidade em todas as comparações feitas entre os métodos IM e ML.

Os maiores valores dos índices d e NS ocorreram para as comparações dos valores de  $V_{ES}$ , que apresentaram também os menores em relação ao modelo de regressão ajustado e os menores desvios com relação à reta identidade.

Os menores valores dos índices d e NS aconteceram para a estimativa dos valores de  $V_{ESa}$  para a área de drenagem da estação 41260000, o que coincidiu também com o menor valor de  $\hat{\beta}_1$ . Ainda assim, pode-se observar que não existem dispersões acentuadas entre os valores estimados pelos métodos de separação IM e ML com relação ao modelo ajustado neste caso (Figura 5d).

Mesmo que os vieses de 4,1 a 7,3% indicados nas comparações entre os métodos IF e IM com relação à estimativa de  $V_{ES}$  e de  $V_{ESa}$  devam ser considerados significativos em termos estatísticos, estes vieses também podem ser considerados aceitáveis em termos práticos.

Portanto, diante dos baixos valores dos resíduos das regressões ajustadas e a proximidade dos valores de  $\hat{\beta}_1$  e dos índices d e NS com relação à unidade, além dos aspectos práticos envolvidos na medição das vazões nas estações fluviométricas, os valores de  $V_{ES}$  e de  $V_{ESa}$  estimados pelo método IM podem ser considerados semelhantes aos valores de

$V_{ES}$  e de  $V_{ESa}$  estimados pelo método ML, considerando as duas áreas distintas.

#### Comparação entre os métodos IF e ML

Na Tabela 4 são apresentados os valores de  $\hat{\beta}_1$  dos modelos ajustados, o resultado do teste de significância da diferença dos valores de  $\hat{\beta}_1$  da unidade, e os valores dos índices d e NS, para as comparações feitas entre os métodos de separação do Intervalo Fixo (IF) e do Mínimo Local (ML), considerando os valores de  $V_{ES}$  e  $V_{ESa}$  estimados para as áreas de drenagem das duas estações fluviométricas estudadas.

**Tabela 4 - Resultados da comparação entre os métodos de separação do Intervalo Fixo (IF) e do Mínimo Local (ML)**

Estação	Escoamento superficial direto	$\hat{\beta}_1$	d	NS
41199998	$V_{ES\_IF} \times V_{ES\_ML}$	0,949*	0,9939	0,9745
	$V_{ESa\_IF} \times V_{ESa\_ML}$	1,011 <sup>ns</sup>	0,9904	0,9618
41260000	$V_{ES\_IF} \times V_{ES\_ML}$	0,960*	0,9937	0,9741
	$V_{ESa\_IF} \times V_{ESa\_ML}$	0,956 <sup>ns</sup>	0,9767	0,8891

(\*) significativo a 5% de probabilidade.

(ns) não significativo a 5% de probabilidade.

Pode-se observar que os valores de  $\hat{\beta}_1$  em todas as comparações apresentadas na Tabela 4 também foram muito próximos da unidade. No entanto, na comparação entre os métodos IF e ML com relação à estimativa dos valores de  $V_{ES}$ , as diferenças dos valores de  $\hat{\beta}_1$  da unidade foram consideradas significativas a 5% de probabilidade, enquanto que, com relação à estimativa dos valores de  $V_{ESa}$ , foram consideradas não significativas.

Na Figura 6 são apresentados os gráficos nos quais é possível a visualização dos desvios das linhas de tendência com relação à função identidade nas comparações feitas entre os métodos IF e ML, considerando os valores de  $V_{ES}$  e de  $V_{ESa}$  obtidos para as áreas de drenagem das estações fluviométricas 41199998 e 41260000.

Os desvios das linhas de tendência com relação à reta representativa da função identidade são pequenos. Porém, nestes casos também ocorreram dispersões pequenas dos valores estimados pelos

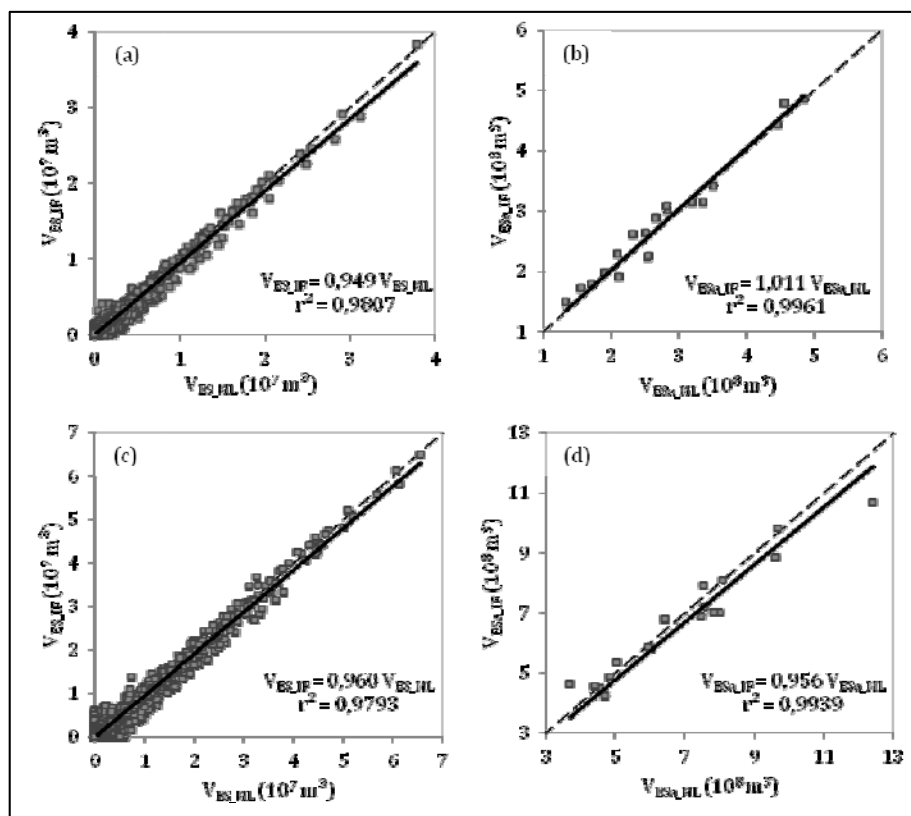


Figura 6 - Comparação entre os métodos de separação do Intervalo Fixo (IF) e do Mínimo Local (ML) com relação à estimativa dos volumes de escoamento superficial direto diários ( $V_{ES}$ ) e anuais ( $V_{ESa}$ ) para as áreas de drenagem das estações 41199998 (a, b) e 41260000 (c, d).

dois métodos em relação aos modelos ajustados, de acordo com a proximidade dos valores de  $r^2$  com relação à unidade, o que resultou em resíduos da regressão muito pequenos e em intervalos de confiança restritivos.

No caso da comparação entre os valores de  $V_{ES}$  estimados pelos métodos IF e ML para a estação 41199998, o teste de significância indicou que o método ML tende a superestimar os valores de  $V_{ES}$  em relação ao método IF (Figura 6a). No entanto, esta superestimativa não foi verificada para os valores de  $V_{ESa}$  estimados para a mesma área de drenagem e pelos mesmos dois métodos (Figura 6b).

Já no caso da comparação entre os valores de  $V_{ES}$  estimados pelos métodos IF e ML para a estação 41260000 (Figura 6c), o teste de significância indicou que o método ML tende a superestimar os valores de  $V_{ES}$  em relação ao método IF. Mas, esta superestimativa também não ocorreu para os valores de  $V_{ESa}$  estimados para a mesma área de drenagem e pelos mesmos dois métodos (Figura 6d). Pode-se

verificar que, neste último caso, ocorreu a não significância da diferença do valor de  $\hat{\beta}_1$  com relação à unidade, mesmo que sua diferença de um seja maior que a do  $\hat{\beta}_1$  da Figura 6c. Este resultado deve estar afeto às maiores dispersões das estimativas em relação ao modelo ajustado, levando aos resíduos da regressão mais elevados e interferindo, consequentemente, no nível de aceitação do valor de  $\hat{\beta}_1$  pelo teste de significância.

Outra constatação a respeito dos testes de significância que não rejeitaram a hipótese de que o valor de  $\hat{\beta}_1$  seja igual a um é que, no caso apresentado na Figura 6d, o valor de  $\hat{\beta}_1$  se distancia mais da unidade do que os valores de  $\hat{\beta}_1$  obtidos nas comparações mostradas nas Figuras 4a, 4c, 4d, 5b e 6c, cujos vieses foram considerados significativos, o que é resultados dos menores resíduos das regressões nos casos significativos em comparação com o resí-

duo apresentado na comparação apresentada na Figura 6d.

Por outro lado, os valores dos índices d e NS também apresentaram valores próximos da unidade em todas as comparações feitas entre os métodos IF e ML. Assim, os métodos IF e ML apresentam boa concordância entre si com relação às estimativas dos valores de  $V_{ES}$  e de  $V_{ESa}$  ao mesmo tempo em que o método ML possui boa eficiência na estimativa de valores de  $V_{ES}$  e de  $V_{ESa}$  semelhantes aos valores estimados pelo método IF.

Nestes casos, as aproximações e simplificações envolvidas nos métodos utilizados na medição de vazões em cursos d'água permitem também a consideração de que estas diferenças entre os métodos IF e ML são aceitáveis sob o ponto de vista prático.

## CONCLUSÕES

Os métodos de separação do Intervalo Fixo, do Intervalo Móvel e do Mínimo Local produziram resultados semelhantes entre si na estimativa dos valores de  $V_{ES}$  e de  $V_{ESa}$  para as duas áreas de drenagem estudadas na bacia do Rio das Velhas.

O aplicativo computacional desenvolvido permite a aplicação dos métodos de separação do Intervalo Fixo, Intervalo Móvel e Mínimo Local, e a obtenção dos valores de volume de escoamento superficial direto ( $V_{ES}$ ), volume de escoamento superficial direto anual ( $V_{ESa}$ ), a partir dos dados das estações fluviométricas disponibilizados no sistema *HidroWeb* da ANA.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pela bolsa que possibilitou a realização deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- ANA. *HidroWeb*:ANA. Mapas. Agência Nacional de Águas (ANA), Brasília, DF, 2011a. Base de Dados em *Shapefile*.
- ANA. *HidroWeb*:ANA. Dados Hidrológicos - Séries históricas. Agência Nacional de Águas (ANA), Brasília, DF, 2011b. Base de Dados em MDB do *Microsoft Office Access*.
- AMORIM, R. S. S.; SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F.; MATOS, A. T. Avaliação do desempenho dos modelos de predição da erosão hídrica USLE, RUSLE e WEPP para diferentes condições edafoclimáticas do Brasil. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 30, n. 6, p.1046-1049, 2010.
- BARRICK, D.; TEAGUE, C.; LILLEBOE, P.; CHENG, R.; GARTNER, J. Profiling river surface velocities and volume flow estimation with bistatic UHF RiverSonde radar. *Proceedings... IEEE/OES Seventh Working Conference on Current Measurement Technology*, 2003.
- BRASIL. Lei N° 9433, de 08 de janeiro de 1997: Instituição da Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.
- BRODIE, R. S.; HOSTETLER, S. A review of techniques for analysing baseflow from stream hydrographs. Bureau of Rural Sciences; Australian Government; Department of Agriculture, Fisheries and Forestry. *International Association of Hydrogeologist Conference*. Camberra, 2005, 13 p.
- CHUA, L. H. C.; WONG, T. S. W. Runoff forecasting for an asphalt plane by Artificial Neural Networks and comparisons with kinematic wave and autoregressive moving average models. *Journal of Hydrology*, v. 397, p. 191-201, 2011.
- CNRH. Conjunto de Normas Legais: Recursos Hídricos. 6. ed. Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano, Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), Brasília, DF, 2008.
- COELHO, A. L. N. Uso de dados SRTM como ferramenta de apoio ao mapeamento geomorfológico de bacia de médio e grande porte. *Revista Geografia Acadêmica*, v. 2, n. 2, p. 138-153, viii. 2008.
- COSTA, F. M.; BACELLAR, L. A. P. Caracterização Hidrogeológica de Aquíferos a Partir do Fluxo de Base. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. v. 15, n. 3, p. 173-183, 2010.
- CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M. R. Relaciones entre las escorrentías superficial y subterránea. *In: Hidrología subterránea*. 2. ed. Editora Omega, Barcelona, 1983. cap 11.2, p. 1121-1157.
- EMBRAPA. Brasil em Relevo. Modelos Numéricos de Elevação - Imagens SRTM. Brasília, DF, 2005. Base de Dados em formato GEOTIFF com resolução de 1:250.000.

- ENGMAN, E. T. Remote sensing applications to hydrology. *Future Impact. Hydrology Sciences Journal*, v. 41, n. 4, p. 637-647, 1996.
- FETTER, C. W. *Applied Hydrogeology*. 4 ed. Prentice Hall, Inc. Upper Saddle River, New Jersey, 2001, 598 p.
- FUREY, P. R.; GUPTA, V. K. A physically based filter for separating base flow from streamflow time series. *Water Resources Research*, v. 37, n. 11, p. 2709-2722, 2001.
- FUREY, P. R.; GUPTA, V. K. Tests of two physically based filters for base flow separation. *Water Resources Research*, v. 39, n. 10, 1297, doi:10.1029/2002WR001621, 2003.
- GONZALES, A. L.; NONNER, J.; HEIJKERS, J.; UHLENBROOK, S. Comparison of different base flow separation methods in a lowland catchment. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. v. 6, p. 3483-3515, 2009.
- HUANG, M.; ZHANG, L. Hydrological responses to conservation practices in a catchment of the Loess Plateau, China. *Hydrological Processes*, v. 18, p. 1885-1898, 2004.
- IGAM. Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas: Resumo executivo. Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), e Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas. Belo Horizonte, 2005, 288 p.
- IGAM. Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Doce e Planos de Ações para as Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos no Âmbito da Bacia do Rio Doce: Contrato N° 043/2008, Relatório final, v. 1. Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), e Consórcio ECOPLAN – LUME, Belo Horizonte, 2010, 463 p. mais anexos.
- LIM, K. J.; ENGEL, B. A.; TANG, Z.; CHOI, J.; KIM, Ki-S.; MUTHUKRISHNAN, S.; TRIPATHY, D. Automated Web GIS based Hydrograph Analysis Tool, WHAT. *Journal of the American Water Resources Association*. n. 04133, p. 1407-1416, 2005.
- LINSLEY, R. K.; KOHLER, M. A.; PAULHUS, J. L. *Hydrology for engineers (3rd ed.)*. McGraw-Hill, New York, 1982, 508 p.
- MENEGASSE, L.; GONÇALVES, J.; FANTINEL, L. Disponibilidades hídricas na província cárstica de Arcos-Pains-Doresópolis, Alto São Francisco, Minas Gerais, Brasil. *Águas Subterrâneas, América do Norte*, v. 16, 2002.
- MONTGOMERY, D. C.; PECK, E. A. *Introduction to linear regression analysis*. 2. ed. New York: John Wiley, v. 1, 1992, 527 p.
- MORIAZI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.
- NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models, Part 1 - A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, v. 10, p. 282-290, 1970.
- PETTYJOHN, W.A.; HENNING, R. Preliminary estimate of ground-water recharge rates, related streamflow and water quality in Ohio. Ohio State University. Water Resources Center Project Completion, Report N° 552. Ohio, 1979, 323 p.
- SLOTO, R. A.; CROUSE, M. Y. HYSEP: A computer program for streamflow hydrograph separation and analysis. U. S. Geological Survey. Water-Resources Investigations Report 96-4040, Lemoyne, Pennsylvania, 1996, 46 p.
- SOUSA, H. T.; PRUSKI, F. F.; BOF, L. H. N; CECON, P. R.; SOUZA, J. R. C. SisCAH: Sistema Computacional para Análises Hidrológicas. Brasília, DF: ANA; Viçosa, MG: UFV, 2009, 60 p.
- TEAGUE, C. C.; BARRICK, D. E.; LILLEBOE, P.; CHENG, R. T. Canal and river tests of a RiverSonde streamflow measurement system. *Conference Publication... Geoscience and Remote Sensing Symposium*, v. 3, p. 1288-1290, 2001.
- TEDESCHI, L. O. Assessment of the adequacy of mathematical models. *Agricultural Systems*, v. 89, p. 225-247, 2006.
- WILLMOTT, C. J. On the validation of models. *Physical Geography*. v. 2, n. 2, p. 184-194, 1981.
- WILLMOTT, C. J. Some comments on the Evaluation of Model Performance. *Bulletin American Meteorological Society*, p. 0003-0007, 1982.
- WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J.; ROWE C. M. Statistics for the Evaluation and Comparison of Models. *Journal of Geophysical Research*, v. 90, n. c5, p. 8995-9005, 1985.
- ZIEGLER, A. D.; GIAMBELLUCA, T. W.; SUTHERLAND, R. A. Erosion prediction on unpaved mountain roads in northern Thailand: validation of dynamic erodibility modeling using KINEROS2. *Hydrological Processes*, v. 15, p. 337-358, 2001.

***Direct Runoff From Baseflow Separation  
Methods: Case Study For The Rio Das Velhas  
Basin.***

**ABSTRACT**

*The separation of direct runoff from baseflow shows the magnitude and dynamics of groundwater and direct runoff in basins. Given the importance of studies on direct runoff and baseflow, the purpose of this paper was: to analyze the performance of the direct runoff from baseflow separation methods; and to develop an algorithm for application of automated separation methods. The performance analysis was carried out comparing the direct runoff considering daily and total annual volumes estimated by the separation methods: fixed interval, sliding interval and local minimum. The algorithm was developed in VBA code, to permit the application of the automated separation methods considering the standard format of the databases available in the HidroWeb system, of ANA. The results indicate that the three separation methods analyzed have similar results in estimating daily direct runoff and annual total direct runoff. The computer system developed allows the application of the three separation methods – fixed interval, sliding interval and local minimum – for HidroWeb system databases.*

**Key-words:** *streamflow, hydrogram, water resources, river basin, statistical analysis*