

ANTÔNIO CALAZANS REIS MIRANDA

**MÉTODOS DE SEPARAÇÃO DOS ESCOAMENTOS SUPERFICIAL DIRETO E
SUBTERRÂNEO: ESTUDO DE CASO PARA A BACIA DO RIO DAS VELHAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2012

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

M672m
2012

Miranda, Antônio Calazans Reis, 1980-

Métodos de separação dos escoamentos superficial direto e subterrâneo: estudo de caso para a Bacia do Rio das Velhas / Antônio Calazans Reis Miranda. – Viçosa, MG, 2012. xviii, 83f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Fernando Falco Pruski.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 69-77

1. Hidrologia - Processamento de dados. 2. Água - Conservação. 3. Bacias hidrográficas. 4. Escoamento superficial. 5. Ciclo hidrológico. 6. Recursos hídricos. 7. Velhas, Rio das, Bacia (MG). I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

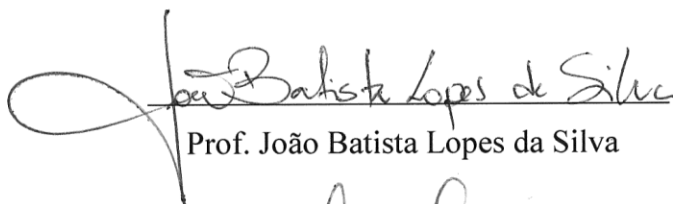
CDD 22. ed. 551.480285

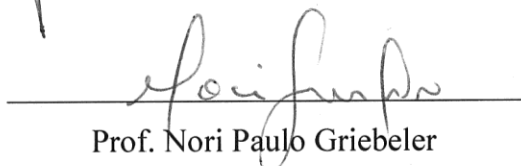
ANTÔNIO CALAZANS REIS MIRANDA

**MÉTODOS DE SEPARAÇÃO DOS ESCOAMENTOS SUPERFICIAL DIRETO E
SUBTERRÂNEO: ESTUDO DE CASO PARA A BACIA DO RIO DAS VELHAS**

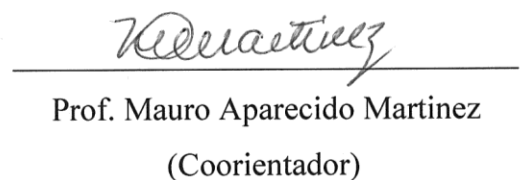
Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

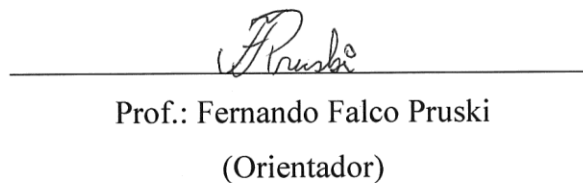
APROVADA: 13 de fevereiro de 2012.


Prof. João Batista Lopes da Silva


Prof. Nori Paulo Griebeler


Prof.^a Juliana Cristina Braga


Prof. Mauro Aparecido Martinez
(Coorientador)


Prof.: Fernando Falco Pruski
(Orientador)

Aos meus afilhados, João Vitor e Gustavo, que são inspiração e motivação em minha vida.

“Sonho que se sonha só é só mais um sonho que se sonha só. Mas sonho que se sonha junto é realidade.”

Raul Seixas

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por tudo.

A meus pais, Antônio e Ana Maria, pelo apoio irrestrito e incondicional, pelo seu amor, e pela confiança a mim depositada durante toda a minha trajetória pessoal e profissional.

Às minhas amadas irmãs, Ana Paula e Andréia, pelo exemplo que são para mim enquanto pessoas de bem e profissionais extremamente competentes e dedicadas.

Aos amigos da república Marignos, aos que já ganharam o mundo e aos que hoje estão na república, pela boa convivência, paciência e companheirismo.

Ao grande amigo de trabalho Eloy, por todo o apoio, companheirismo, seja no cafezinho ou no trabalho pesado, no escritório e no campo. Considero um exemplo de bom profissional e homem de bem.

Ao grande amigo Danilo, pelo apoio, não só no trabalho, mas que também foi como um irmão para mim, essencial na superação inclusive das dificuldades pessoais. Considero como outro grande exemplo de bom profissional e homem de bem.

Aos amigos pesquisadores Abrahão, André (andrezão), Bruno, Felipe, David (guerrero), David Quintão, Donizete, Gustavo, Heber, Hugo Alexandre, Hugo Rody, João Batista, João Felipe, Júlio, Luan, Luiz Bof, Paulo (ciclone), Paola, Raimundo pelas preciosas palavras e pela boa convivência, tanto no horário de trabalho quanto nas horas de lazer e descontração.

Aos amigos do laboratório de hidráulica, Eduardo e Chicão, pela confiança e pela importante ajuda prestada durante a realização de muitos trabalhos.

Aos estagiários e colegas do Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos - GPRH, que apoiaram na realização deste e de tantos outros trabalhos realizados dentro e fora da UFV.

Agradecimento especial aos amigos Denver e Willian, pelas preciosas contribuições e pelos bons exemplos de dedicação e responsabilidade.

Aos demais amigos e familiares, que estiveram comigo, mesmo que à distância, nos momentos difíceis e felizes.

Ao estimado orientador, Prof. Fernando Pruski, pelo apoio, paciência, amizade e pela oportunidade de trabalhar e aprender muito, tanto na realização deste, quanto de tantos outros trabalhos.

Aos coorientadores, Prof. Mauro Martinez e Prof. Paulo Cecon, pelo imprescindível auxílio e pelas preciosas contribuições para o enriquecimento deste trabalho.

À FAPEMIG e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da UFV, pela concessão da bolsa de mestrado, indispensável para minha manutenção na Viçosa.

E por fim, agradeço muito à UFV, em especial aos meus queridos professores da Engenharia Ambiental - Ann, Bohnenberger e Rafael - pela minha formação pessoal e profissional, conferindo-me as condições necessárias para contribuir para o desenvolvimento científico e tecnológico.

BIOGRAFIA

ANTÔNIO CALAZANS REIS MIRANDA, filho de Antônio Calazans de Miranda e Ana Maria de Miranda Reis, nasceu no dia 13 de setembro de 1980, em Senhora de Oliveira, Estado de Minas Gerais.

No primeiro semestre de 2003, ingressou no curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Viçosa (UFV), concluindo o curso em julho de 2008. Durante o curso, foi membro do Departamento de Projetos da Associação Júnior de Engenharia Ambiental - Ambiental Jr., onde atuou durante três anos chegando à diretoria do Departamento de Projetos da referida associação, e estagiou em projetos de iniciação científica sobre tratamento de efluentes na Divisão de Água e Esgotos (DAE) da UFV.

Foi bolsista de Desenvolvimento Tecnológico e Industrial (BDTI) pela Fundação Arthur Bernardes (FUNARBE), em 2008, atuando em projetos de pesquisa e extensão desenvolvidos pelo Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos (GPRH) do Departamento de Engenharia Agrícola (DEA) da UFV.

Em 2009 trabalhou como consultor técnico em meio ambiente da prefeitura municipal de Senhora de Oliveira-MG, participando como gerente do Conselho gestor da Área de Proteção Ambiental, APA-Senhora de Oliveira, coordenando os trabalhos da Usina de Triagem e Compostagem (UTC), e elaborando projetos visando à conservação da água e do solo no município.

Em março de 2010, iniciou o Curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, área de concentração em Recursos Hídricos e Ambientais, no DEA da UFV, submetendo-se à defesa da dissertação em 13 de fevereiro de 2012.

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS	x
LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABELAS	xiv
RESUMO	xv
ABSTRACT	xvii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. Processo de formação das vazões e fatores intervenientes nas condições de escoamento	3
2.1.1. Formação das vazões.....	3
2.1.2. Fatores intervenientes nas condições de escoamento.....	4
2.1.3. Análise dos hidrogramas	5
2.2. Importância da separação do escoamento superficial direto do escoamento subterrâneo	8
2.3. Métodos disponíveis para a separação do escoamento superficial direto do subterrâneo	10
2.3.1. Análise de traçadores	10
2.3.2. Filtragem de base física.....	11
2.3.3. Análises gráficas	13
2.4. Utilização dos métodos de separação do escoamento superficial direto do subterrâneo no Brasil.....	18
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	21
3.1. Avaliação dos métodos de separação do escoamento superficial direto do escoamento subterrâneo	21

3.1.1. Métodos de separação utilizados.....	21
3.1.1.1. Método do Intervalo Fixo (IF)	21
3.1.1.2. Método do Intervalo Móvel (IM)	22
3.1.1.3. Método do Mínimo Local (ML).....	24
3.1.2. Quantificação do escoamento superficial direto e do escoamento subterrâneo	25
3.1.3. Avaliação do desempenho dos métodos de separação	27
3.1.3.1. Áreas estudadas	27
3.1.3.2. Comparação entre os valores estimados pelos métodos de separação ...	31
3.2. Avaliação da influência da impermeabilização pela urbanização no escoamento superficial direto na bacia hidrográfica do Rio das Velhas, MG	34
3.2.1. Caracterização das áreas estudadas quanto aos aspectos que interferem no escoamento superficial direto.....	34
3.2.2. Índices utilizados na comparação do escoamento superficial direto nas duas áreas de drenagem	38
3.3. Desenvolvimento do sistema computacional para a aplicação dos métodos de separação do escoamento superficial direto do escoamento subterrâneo.....	40
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	44
4.1. Sistema Computacional para a aplicação dos métodos de separação do escoamento superficial direto do escoamento subterrâneo	44
4.2. Desempenho dos métodos de separação do escoamento superficial direto do escoamento subterrâneo	53
4.2.1. Comparação entre os métodos IF e IM	53
4.2.2. Comparação entre os métodos IM e ML.....	56
4.2.3. Comparação entre os métodos IF e ML	59
4.3. Influência da impermeabilização pela urbanização no escoamento superficial direto na bacia hidrográfica do Rio das Velhas, MG	62
5. CONCLUSÕES.....	67
6. RECOMENDAÇÕES	68
7. REFERÊNCIAS	69
APÊNDICES.....	78

LISTA DE SÍMBOLOS

- a = parâmetro de filtragem que permite controlar o grau de atenuação da vazão filtrada.
- a_q = parâmetro de filtragem que relaciona a taxa de variação do escoamento subterrâneo à taxa de variação da vazão.
- A = área de drenagem, km^2 .
- A_n = área de influência de cada estação pluviométrica, km^2 .
- BFI_{max} = máximo valor do índice de escoamento de base.
- c_1 = parcela da precipitação média na bacia convertida em escoamento superficial direto.
- c_3 = parcela da precipitação média na bacia convertida em recarga do aquífero.
- C = parâmetro de filtragem que permite a alteração do formato da curva de separação.
- C_{GW} = concentração do soluto utilizado como traçador associado ao escoamento subterrâneo, g m^{-3} .
- C_{SR} = concentração do soluto utilizado como traçador associado ao escoamento superficial direto, g m^{-3} .
- C_{TR} = concentração do soluto utilizado como traçador, medida no rio, g m^{-3} .
- CES = coeficiente de escoamento superficial direto, %.
- CET = coeficiente de escoamento total, %.
- d = índice de concordância entre modelos, de Willmott.
- D = dia utilizado como critério de identificação do menor valor de vazão nos métodos de separação IM e ML.

Dd	=	densidade de drenagem da bacia hidrográfica.
IES	=	índice de escoamento superficial direto, %.
IF	=	método do Intervalo Fixo.
IM	=	método do Intervalo Móvel.
j	=	intervalo de tempo entre o início da infiltração e a recarga do aquífero, dias.
$q_{(i)}$	=	vazão correspondente ao instante i, $m^3 s^{-1}$.
$q_{(i-1)}$	=	vazão correspondente ao instante anterior a i, $m^3 s^{-1}$.
$q_{(i-j-1)}$	=	vazão correspondente ao instante anterior a i e considerando o intervalo de tempo j entre a ocorrência da precipitação e a recarga do aquífero, $m^3 s^{-1}$.
$q_{b(i)}$	=	escoamento subterrâneo correspondente ao instante i, $m^3 s^{-1}$.
$q_{b(i-1)}$	=	escoamento subterrâneo correspondente ao instante anterior a i, $m^3 s^{-1}$.
$q_{b(i-j-1)}$	=	escoamento subterrâneo correspondente ao instante anterior a i e considerando o intervalo de tempo j entre a ocorrência da precipitação e a recarga do aquífero, $m^3 s^{-1}$.
$q_{f(i)}$	=	vazão filtrada pelo algoritmo, correspondente ao instante i, $m^3 s^{-1}$.
$q_{f(i-1)}$	=	vazão filtrada pelo algoritmo, correspondente ao instante anterior a i, $m^3 s^{-1}$.
$Q(t)$	=	vazão correspondente ao instante t, $m^3 s^{-1}$.
Q_{ESub}	=	vazão correspondente ao escoamento subterrâneo individualizado, $m^3 s^{-1}$.
Q_{GW}	=	vazão associada ao escoamento subterrâneo, $m^3 s^{-1}$.
Q_{SR}	=	vazão associada ao escoamento superficial direto, $m^3 s^{-1}$.
Q_{TR}	=	vazão total, $m^3 s^{-1}$.
k	=	parâmetro dado pela constante da curva de recessão ajustada.
K	=	fator forma da bacia hidrográfica.
ML	=	método do Mínimo Local.
NS	=	índice de análise de eficiência de modelos, de Nash e Sutcliff.
N	=	duração do escoamento superficial direto, dias.
N^*	=	número inteiro imediatamente superior a N, dias.
p	=	número de estações pluviométricas.
P_n	=	precipitação total diária registrada em cada estação, mm.
P_t	=	precipitação total média na área, mm.
t	=	tempo, s.

- ud = último dia de cada ano hidrológico considerado para a obtenção de V_{ESa} , de IES, e de Pt.
- V = volume de escoamento total, m^3 .
- V_{ESub} = volume de escoamento subterrâneo, m^3 .
- V_{ES} = volume de escoamento superficial direto obtido para cada dia, m^3 .
- V_{ESa} = volume de escoamento superficial direto anual, m^3 .
- α = o coeficiente de recessão, ou de esgotamento, s^{-1} .
- $\hat{\beta}_1$ = parâmetro ajustado do modelo de regressão utilizado na comparação entre os métodos de separação.
- Δt = intervalo de tempo entre os instantes t_i e t_{i+1} , correspondente às 24 horas do dia, s.
- e = base dos logaritmos neperianos.
- γ = parâmetro relacionado à constante de recessão da bacia.
- θ_j = variação temporal da umidade do solo na zona insaturada durante a separação do escoamento subterrâneo.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Hidrograma com a separação do escoamento subterrâneo (linha contínua) dada pelo filtro recursivo de base física (Adaptado de: FUREY; GUPTA, 2001).	12
Figura 2. Métodos de separação do escoamento superficial direto do escoamento subterrâneo por análises gráficas (Adaptado de: CUSTÓDIO; LLAMAS, 1983).....	14
Figura 3. Exemplo de aplicação dos métodos do intervalo fixo (a), do intervalo móvel (b) e do mínimo local (c) (Modificado de: SLOTO e CROUSE, 1996).	18
Figura 4. Separação do escoamento superficial direto do escoamento subterrâneo utilizando o método IF (Modificado de: SLOTO; CROUSE, 1996).....	22
Figura 5. Separação do escoamento superficial direto do escoamento subterrâneo utilizando o método IM (Modificado de: SLOTO; CROUSE, 1996).....	23
Figura 6. Separação do escoamento superficial direto do escoamento subterrâneo utilizando o método ML (Modificado de: SLOTO; CROUSE, 1996).....	24
Figura 7. 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 as técnicas IF (a), IM (b) e ML (c) (Modificado de: SLOTO; CROUSE, 1996).....	26
Figura 8. Áreas de drenagem das estações selecionadas - localização (a) e detalhe (b). Fonte de dados: ANA (2011).....	29
Figura 9. Diagrama de barras com a disponibilidade dos dados das estações fluviométricas.	30
Figura 10. Mapa de solos das áreas de drenagem das estações. Fontes de dados: PRODEMGE (1998).	34
Figura 11. Mapa das áreas urbanizadas individualizadas para as áreas de drenagem das estações. Fontes de dados: Filgueiras (2007).	35

Figura 12. Estações pluviométricas utilizadas e eliminadas na estimativa da precipitação total média nas áreas de drenagem. Fonte de dados: ANA (2011).	36
Figura 13. Fluxograma do sistema computacional.	41
Figura 14. Tela de apresentação do sistema computacional.	44
Figura 15. Tela de acesso aos módulos de entrada de dados e de separação.	45
Figura 16. Tela de acesso à entrada de dados de vazão e de chuvas.	45
Figura 17. Tabela do arquivo <i>Access</i> com os dados de vazão de uma estação pluviométrica obtida do sistema <i>HidroWeb</i>	46
Figura 18. Planilha de entrada de dados de vazão.	47
Figura 19. Planilha de entrada de dados de chuvas.	47
Figura 20. Tela de acesso às funções do <i>software</i>	48
Figura 21. Diagrama de barras com a disponibilidade anual de registros fluviométricos da estação 41199998 e pluviométricos nas estações selecionadas.	50
Figura 22. Gráfico com os dados processados pelo sistema computacional desenvolvido, referente ao método ML.	51
Figura 23. Planilha contendo o resumo dos resultados da separação.	52
Figura 24. 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).	54
Figura 25. 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).	58
Figura 26. 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).	60
Figura 27. Comparação entre os coeficientes de escoamento total (a), entre os índices de escoamento superficial direto (b), e entre os valores dos coeficientes de escoamento superficial direto (c), estimados para as duas áreas de drenagem estudadas.	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Principais algoritmos para filtragem digital recursiva	15
Tabela 2. Tipo de solo e impermeabilização do solo das áreas de drenagem individualizadas.....	35
Tabela 3. Precipitações anuais para cada ano nas áreas de drenagem das estações.....	38
Tabela 4. Resultados da comparação entre os métodos de separação IF e IM	53
Tabela 5. 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	55
Tabela 6. Resultados da comparação entre os métodos de separação do Intervalo Móvel (IM) e do Mínimo Local (ML)	57
Tabela 7. Resultados da comparação entre os métodos de separação do Intervalo Fixo (IF) e do Mínimo Local (ML).....	59
Tabela 8. Resultados da análise da influência da impermeabilização pela urbanização no comportamento do escoamento superficial direto	62
Tabela 9. Resíduos das regressões na comparação entre os valores de CES estimados para cada área de drenagem.....	64

RESUMO

MIRANDA, Antônio Calazans Reis, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2012. **Métodos de separação dos escoamentos superficial direto e subterrâneo: estudo de caso para a bacia do Rio das Velhas.** Orientador: Fernando Falco Pruski. Coorientadores: Paulo Roberto Cecon e Mauro Aparecido Martinez.

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. Permite também a análise da influência sobre o escoamento subterrâneo e sobre o escoamento superficial direto de fatores, como a adoção de práticas conservacionistas, ou a impermeabilização do solo pelo processo de urbanização. Diante da importância dos estudos sobre o escoamento superficial direto e o escoamento subterrâneo, este trabalho teve os seguintes objetivos: analisar o desempenho de métodos de separação do escoamento superficial direto do escoamento subterrâneo; analisar a influência da impermeabilização provocada pela Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) no escoamento superficial direto em uma sub-bacia do Rio das Velhas; e desenvolver um sistema computacional para a aplicação dos métodos de separação. A análise do desempenho foi feita com a comparação entre os volumes de escoamento superficial direto considerando os valores diários e os totais anuais estimados pelos métodos de separação: intervalo fixo, intervalo móvel e mínimo local. A análise da influência da impermeabilização da bacia provocada pela RMBH foi feita pela comparação entre os valores dos coeficientes de escoamento total, dos índices de escoamento superficial direto, e dos coeficientes de escoamento superficial direto, estimados para uma sub-bacia sem a influência da RMBH e outra sub-bacia que está sobre a influência da RMBH. O *software* foi desenvolvido em VBA, com interface planejada no *Microsoft Office Excel*. 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; a RMBH exerceu influência significativa no comportamento do escoamento superficial direto gerado na sub-bacia do Rio das Velhas; e o sistema computacional desenvolvido permite a aplicação dos métodos de separação – intervalo fixo, intervalo móvel e mínimo local – e a obtenção da precipitação anual para as bases de dados disponíveis no sistema *HidroWeb*, da ANA.

ABSTRACT

MIRANDA, Antônio Calazans Reis, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2012. **Direct runoff from baseflow separation methods: case study for the Rio das Velhas watershed.** Adviser: Fernando Falco Pruski. Co-Advisers: Paulo Roberto Cecon and Mauro Aparecido Martinez.

The separation of direct runoff from baseflow gives an understanding of the magnitude and dynamics of groundwater and direct runoff in watersheds. It also allows the analysis of the influence of factors, such as conservation practices, or soil sealing by urbanization process, on baseflow and direct runoff. Given the importance of studies on direct runoff and baseflow, this work had the following purposes: to analyze the performance of the direct runoff from baseflow separation methods; to analyze the influence of sealing caused by the Belo Horizonte metropolitan region (RMBH) in direct runoff into a Rio das Velhas watershed; and to develop a software for application of separation methods. The performance analysis was made with the comparison between the volumes of direct runoff considering daily values and annual total estimated by the separation methods: fixed interval, sliding interval and local minimum. The analysis of the influence of the sealing of the basin caused by RMBH was made by comparing the total runoff coefficients, the direct surface runoff indexes, and the direct runoff coefficients, estimated for one watershed without the RMBH influence, and another watershed that is under the RMBH influence. The software was developed in VBA, with interface designed in Microsoft Office Excel. The results indicate that the three separation methods analysed gives similar results into estimate daily direct runoff and annual total direct runoff. The RMBH has significant influence on the amount of direct runoff generated in the Rio das Velhas watershed

considered. The developed computer system allows the practical and objective application of the three separation methods – fixed interval, sliding interval and local minimum – and the obtaining of annual precipitation, for databases available on the *HidroWeb* system, of ANA.

1. 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 foram desenvolvidos com o objetivo de aprimorar a separação do escoamento superficial direto do subterrâneo (CUSTÓDIO; LLAMAS, 1983; BRODIE; HOSTETLER, 2005). Entretanto a aplicação de metodologias desenvolvidas em outros países não é tão simples para nossas condições, 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.*, 2004; IGAM, 2005; 2006 e 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 dar suporte, por exemplo, às atividades de gestão da quantidade e da qualidade da água nas bacias hidrográficas brasileiras. Neste sentido, a influência de aspectos relacionados ao uso e

manejo do solo em bacias hidrográficas, que ocasionam a alteração do escoamento superficial direto, constitui-se em uma informação de extrema importância.

Dentre os usos do solo, aquele que pode provocar a impermeabilização expressiva da superfície do solo, tendo, portanto, grande influência no escoamento superficial direto, são os processos de urbanização (TUCCI, 2009). Além disso, muito já se sabe qualitativamente a respeito do impacto dos grandes centros urbanos sobre o escoamento superficial direto em bacias hidrográficas (CASTRO *et al.*, 2009; CANNAVO *et al.*, 2010), no entanto, não existe ainda muito conhecimento quantitativo a respeito destes impactos.

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, os objetivos deste trabalho foram:

- avaliar o desempenho de métodos de separação do escoamento superficial direto do escoamento subterrâneo;
- avaliar a influência da impermeabilização pela urbanização no escoamento superficial direto na bacia hidrográfica do Rio das Velhas, MG; e
- desenvolver um sistema computacional para a aplicação dos métodos de separação do escoamento superficial direto do escoamento subterrâneo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Processo de formação das vazões e fatores intervenientes nas condições de escoamento

2.1.1. Formação das vazões

As vazões que escoam em um rio incluem o escoamento subterrâneo (referente à contribuição pelos aquíferos), e, em algumas épocas do ano estas vazões incluem também as águas provenientes do escoamento superficial direto (resposta de curto prazo para um evento de chuva), que são aquelas que escoam sobre a superfície do solo (CUSTÓDIO; LLAMAS, 1983; TUCCI, 2009).

Uma vez que a precipitação atinge a superfície terrestre a água pode infiltrar no solo, escoar sobre a superfície, ou acumular nas folhas das plantas ou em poças de onde se evapora de volta para a atmosfera. A água da chuva que se infiltra no solo faz parte da água do solo, da qual, uma parte pode ser usada pelas plantas para a transpiração, retornando à atmosfera, outra parte pode retornar diretamente para a atmosfera através da evaporação na superfície do solo, e uma terceira parte pode constituir a recarga das águas subterrâneas, caso a infiltração seja suficiente para ir além da zona do enraizamento da vegetação. A água subterrânea se move lateralmente e lentamente em direção ao mar para completar o ciclo hidrológico, mas parte dela resurge em nascentes, córregos, rios e lagos durante este percurso em direção ao mar. Desta forma águas subterrâneas mantêm o nível de água em poços, e a continuidade da vazão dos rios durante os períodos secos, referidas como fluxo de base. Já as águas superficiais movem-se rapidamente das encostas para os rios, contribuindo para os picos de vazões (SHAXSON; BARBER, 2003).

2.1.2. Fatores intervenientes nas condições de escoamento

O comportamento e a variação das vazões em um rio estão associados à variabilidade da precipitação, do escoamento subterrâneo e do escoamento superficial direto (HUANG; ZHANG, 2004).

A precipitação varia consideravelmente no espaço e no tempo, sendo influenciada pelos padrões de circulação atmosférica e por fatores locais (CHOW *et al.*, 1988), sendo necessária, em estudos que requerem a realização do balanço hídrico, a avaliação da lâmina precipitada sobre uma área de drenagem (FEITOSA *et al.*, 2008).

Além da precipitação existem outros aspectos relacionados à bacia hidrográfica que influenciam no escoamento subterrâneo e no escoamento superficial direto, e que, portanto, influenciam na forma de variação das vazões. Os aspectos mais importantes a serem considerados são: a evapotranspiração; o tipo, o uso e o manejo do solo; e a topografia. Estes aspectos interferem nos processos de saída de água do sistema e nos processos de infiltração da água no solo e, conseqüentemente, têm grande influência no escoamento superficial direto e na recarga dos aquíferos (BRANDÃO *et al.*, 2006; TUCCI, 2009).

A evapotranspiração consiste na combinação de dois processos separados através do qual a água é perdida: a evaporação e a transpiração das culturas. A evaporação é o processo pelo qual a água líquida vaporiza a partir de uma variedade de superfícies, tais como: lagos, rios, superfícies impermeabilizadas, solos e vegetação molhada. Já a transpiração consiste na vaporização da água líquida durante as atividades fisiológicas das plantas. Assim, a evapotranspiração é influenciada tanto por parâmetros meteorológicos, como radiação, temperatura do ar, umidade e velocidade do vento, quanto pelas características das culturas, como resistência à transpiração, altura de plantas, rugosidade da cultura, reflexão, cobertura do solo e enraizamento. Neste contexto o manejo da cultura (irrigação, aplicação de fertilizantes, controle de doenças e pragas) e os aspectos ambientais (permeabilidade, salinidade e fertilidade do solo, presença de reservatórios de água superficiais) também têm influência sobre a evapotranspiração (ALLEN *et al.*, 1998). Grande parte do total de água precipitada é transferida de volta para a atmosfera por evapotranspiração (NISBET, 2005; PEREIRA *et al.*, 2007), que, portanto, é uma importante componente do ciclo hidrológico (HARSCH *et al.*, 2009) tendo grande influência na parte do total precipitado que constitui a vazão dos rios.

O tipo, o uso e o manejo do solo interferem tanto na evapotranspiração quanto nos escoamentos superficial direto e subterrâneo. Os diversos tipos de solo existentes possuem características físicas distintas, como a quantidade de macro e de microporos, que definem as propriedades hidráulicas do solo, como capacidade de infiltração e de retenção de água na matriz do solo, e a velocidade do escoamento subsuperficial (ASBJORNSEN *et al.*, 2011). A capacidade de infiltração está relacionada à porosidade (PEDRETTI *et al.*, 2011) e à profundidade dos solos (STÜRMER *et al.*, 2009), ou seja, em solos com poros maiores, porém mais rasos, a água que infiltra atinge rapidamente a camada impermeável, camada rochosa, e passa a movimentar-se lateralmente abastecendo o fluxo dos recursos hídricos superficiais. Em solos com menor capacidade de infiltração, também ocorre a maior propensão da ocorrência do escoamento superficial direto. A capacidade de infiltração da água no solo está mais intimamente relacionada às condições da superfície do solo, que por sua vez, sofrem influência expressiva do uso e manejo dos solos (VIEIRA; KLEIN, 2007; MENDONÇA *et al.*, 2009). Quase todas as atividades de uso do solo podem alterar diretamente parâmetros ambientais, incluindo o solo, a vegetação, topografia e, por sua vez, modificar o transporte de água em sistemas fluviais (SEITZ *et al.*, 2011). Neste contexto, a urbanização pode ser considerada um dos tipos de uso do solo que afetam expressivamente as condições de escoamento em uma bacia hidrográfica (SONG *et al.*, 2012).

O crescimento dos centros urbanos acarreta sérios impactos ambientais, relacionados à redução da recarga de aquíferos subterrâneos e ao aumento do escoamento superficial direto devido à impermeabilização do solo (POFF *et al.*, 2006; NASCIMENTO *et al.*, 2007). Com isso, surgem também os problemas relacionados tanto à disponibilidade hídrica nos aquíferos quanto às enchentes, erosão do solo e arraste de poluentes para os cursos de água (CASTRO *et al.*, 2009; CANNAVO *et al.*, 2010). Um exemplo considerável de impermeabilização provocado pela expansão da ocupação urbana no Brasil corresponde à capital mineira, Belo Horizonte, que sofre com casos frequentes de enchentes, principalmente na região do ribeirão arrudas (POLIGNANO, 2009; AYER, 2010).

2.1.3. Análise dos hidrogramas

O gráfico que relaciona a vazão e o tempo, denominado hidrograma, representa o resultado da interação dos componentes do ciclo hidrológico em uma bacia hidrográfica. Portanto, o formato da hidrógrafa de um rio é influenciado pelos fatores intervenientes nas

condições de escoamento na bacia hidrográfica, podendo assumir diversas formas, dependendo da intensidade e da duração da precipitação, das condições de infiltração da água no solo, do relevo e do formato da bacia (CHOW *et al.*, 1988; FEITOSA *et al.*, 2008; TUCCI, 2009).

Sloto e Crouse (1996) mencionam a existência de dois tipos de métodos comumente usados para a análise de hidrogramas: os que se baseiam na curva de recessão do escoamento e os baseados em ajuste de linhas para a separação do escoamento superficial direto do escoamento subterrâneo. Muitos dos métodos de separação do escoamento superficial direto do subterrâneo utilizam parâmetros provenientes da análise da curva de recessão do escoamento.

A curva de recessão é a parte do hidrograma correspondente ao período do ano em que a vazão do rio é alimentada principalmente pelo escoamento de água subterrânea, ou seja, a contribuição pelo escoamento superficial direto é mínima. Este trecho do hidrograma é delimitado pelo ponto de inflexão, evidenciado após o último pico de cheia, e é caracterizado pelo decréscimo suave da vazão até o fim do período de estiagem (TODD; MAYS, 2005; FEITOSA *et al.*, 2008).

O procedimento de análise das curvas de recessão é de grande importância em estudos hidrogeológicos, pois permite avaliar a magnitude do armazenamento de água subterrânea nos aquíferos que interagem com a hidrografia, ou o volume total de água subterrânea restituído pelos aquíferos à hidrografia (CUSTÓDIO; LLAMAS, 1983; BRODIE; HOSTETLER, 2005).

As curvas de recessão ajustam-se satisfatoriamente à equação de decaimento exponencial, também dita equação de Maillet (FETTER, 2001; GONÇALVES *et al.*, 2005):

$$Q(t) = Q_0 e^{-\alpha t} \quad (1)$$

em que

$Q(t)$ = vazão no instante t , $m^3 s^{-1}$;

t = tempo, meses ou dias;

- Q_0 = vazão no instante inicial do período de recessão t_0 , $m^3 s^{-1}$;
 e = base dos logaritmos neperianos; e
 α = coeficiente de recessão, s^{-1} .

O valor de α depende das características da bacia hidrográfica. O termo $e^{-\alpha}$ pode ser substituído por k , conhecido como constante de recessão, geralmente utilizado como indicador da extensão do aquífero. A constante de recessão pode ser determinada pelo método de Meyboom, que consiste na plotagem da série de vazões em escala semilogarítmica e na verificação da declividade de uma linha reta traçada acompanhando a tendência de variação da vazão durante a recessão do escoamento. Este método é indicado para bacias hidrográficas que não contenham estruturas de regularização de vazões e em que os aquíferos freáticos sejam mais profundos, com a calha do rio apenas parcialmente penetrada no aquífero (FETTER, 2001; VITVAR *et al.*, 2002; TODD; MAYS, 2005).

O coeficiente de recessão α , que varia entre 10^{-4} e 10^{-1} , é um elemento utilizado como indicador do potencial de armazenamento de água subterrânea nos aquíferos, já que maiores valores de α estão associados a reservas pouco significativas, enquanto que menores valores indicam maiores armazenamentos. Este coeficiente serve também para caracterizar o comportamento hidrodinâmico dos sistemas aquíferos de uma bacia hidrográfica, pois é inversamente proporcional à extensão (dimensão linear) dos reservatórios subterrâneos e diretamente proporcional à porosidade efetiva e a condutividade hidráulica dos aquíferos (GONÇALVES *et al.*, 2005; FEITOSA *et al.*, 2008, SILVA *et al.*, 2010).

Nos estudos que buscam a quantificação do escoamento superficial direto a análise dos hidrogramas baseada na separação do escoamento superficial direto do escoamento subterrâneo é uma técnica largamente utilizada. Os elementos α e k , identificados nas análises das curvas de recessão, são utilizados como parâmetros de entrada em alguns dos métodos de separação do escoamento superficial direto do subterrâneo nos hidrogramas (NATHAN; McMAHON, 1990; CHAPMAN; MAXWELL, 1996; ECKHARDT, 2005).

2.2. Importância da separação do escoamento superficial direto do escoamento subterrâneo

Além das partículas de solo em suspensão, o escoamento superficial direto transporta nutrientes, matéria orgânica, sementes e defensivos agrícolas. O escoamento superficial direto pode ser considerado também como um desperdício de água que poderia ter contribuído para a produção de culturas e para a recarga dos aquíferos, mas que, freqüentemente, provoca inundações, danos a estradas e fazendas, e a erosão do solo (SHAXSON; BARBER, 2003). Portanto, além de causar prejuízos à produção agropecuária, o escoamento superficial direto também causa poluição nos cursos de água. Assim, a utilização de tecnologias para a redução do escoamento superficial direto pode diminuir consideravelmente os danos causados pela erosão hídrica (SILVA *et al.*, 2006; BERTOL *et al.*, 2007).

Informações sobre o volume ou a vazão de escoamento superficial direto são necessárias em projetos de estruturas para o controle da erosão e de inundações, dependendo do objetivo do projeto (GRIEBELER *et al.*, 2001).

O conhecimento do escoamento superficial direto pode ser utilizado também como indicador da potencialidade do emprego de práticas conservacionistas, e para verificar o real impacto do uso de determinadas práticas conservacionistas na redução do escoamento superficial direto (HUANG; ZHANG, 2004). Assim, a investigação de métodos que produzam estimativas confiáveis do escoamento superficial direto é de grande importância.

A análise do hidrograma baseada na 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 (BRODIE; HOSTETLER, 2005). A separação do escoamento superficial direto do subterrâneo permite também uma melhor compreensão da variabilidade espacial e temporal dos processos de escoamento superficial direto em bacias hidrográficas. Assim, a separação dos escoamentos por meio da análise dos hidrogramas serve para o fornecimento de subsídios importantes para o melhor gerenciamento da quantidade e da qualidade da água em uma bacia hidrográfica (FUREY; GUPTA, 2001).

Análises desta natureza têm conduzido a resultados de grande interesse científico e prático. A separação dos escoamentos pode ser utilizada no dimensionamento de barragens

e outras estruturas para a contenção do escoamento superficial direto (CUSTÓDIO; LLAMAS, 1983; BRODIE; HOSTETLER, 2005). Outra aplicação prática da separação é na estimativa do Índice de Escoamento de Base (BFI), que é a razão entre o escoamento de base, ou subterrâneo, e o escoamento total. O BFI permite a identificação da influência da geologia, da presença de lagos e de outras características da bacia que venham a interferir nas vazões mínimas. Assim, o BFI pode ser utilizado como uma importante variável explicativa em equações de regionalização de vazões mínimas (GUSTARD *et al.*, 1987; CLAUSEN, 1995; WAHL; WAHL, 1995).

Uma aplicação interessante da separação dos escoamentos é caracterizada no trabalho conduzido por Huang e Zhang (2004), no qual verificaram a influência das práticas conservacionistas no escoamento superficial direto e no subterrâneo em uma bacia hidrográfica da China. Estes autores concluíram que as práticas para a conservação de água e de solos implantadas na bacia estudada proporcionaram um decréscimo expressivo nos picos de vazão dos cursos de água, reduzindo o volume de escoamento superficial direto na bacia. Assim, a separação do escoamento superficial direto do escoamento subterrâneo permite também a identificação de estratégias adequadas para o controle de problemas relacionados ao assoreamento de rios e lagos, às enchentes, e à escassez hídrica nos períodos de estiagem. Neste contexto, a separação do escoamento superficial direto do escoamento subterrâneo pode ser utilizada para o planejamento e gestão dos recursos hídricos.

Uma grande variedade de aplicações práticas e científicas da separação do escoamento superficial direto do escoamento subterrâneo é descrita na literatura (CHOW *et al.*, 1988; FUREY; GUPTA, 2001; DRUMOND; BACELLAR, 2006; TUCCI, 2009). Diante da importância de estudos que envolvem a separação do escoamento superficial direto do subterrâneo, diversos métodos foram desenvolvidos com o objetivo de aprimorar as técnicas de separação.

2.3. Métodos disponíveis para a separação do escoamento superficial direto do subterrâneo

Em alguns dos métodos de separação do escoamento superficial direto do subterrâneo são utilizadas análises químicas de determinadas substâncias identificadas como traçadores. Em outros métodos são utilizados filtros digitais de base física, e existem, ainda, os métodos que se baseiam em ajustes de curvas por meio da análise gráfica dos hidrogramas.

2.3.1. Análise de traçadores

Neste método, são feitas análises de alguns tipos de sólidos ou íons dissolvidos no aquífero e então é feita a medição das concentrações destas substâncias no curso d'água (TODD; MAYS, 2005; GONZALES *et al.*, 2009). A estimativa do escoamento subterrâneo é feita da seguinte forma:

$$Q_{GW} = [(C_{TR} - C_{SR}) / (C_{GW} - C_{SR})] Q_{TR} \quad (2)$$

$$Q_{TR} = Q_{GW} + Q_{SR} \quad (3)$$

em que

Q_{GW} = vazão associada ao escoamento subterrâneo, $m^3 s^{-1}$;

C_{TR} = concentração do soluto utilizado como traçador, medida no rio, $g m^{-3}$;

C_{SR} = concentração do soluto utilizado como traçador associado ao escoamento superficial direto, $g m^{-3}$;

C_{GW} = concentração do soluto utilizado como traçador associado ao escoamento subterrâneo, $g m^{-3}$;

Q_{TR} = vazão total, $m^3 s^{-1}$; e

Q_{SR} = vazão associada ao escoamento superficial direto, $m^3 s^{-1}$.

Gonzales *et al.* (2009) testaram os seguintes traçadores para a separação: condutividade elétrica, Ca^{+2} , Mg^{+2} , e sílica dissolvida (SiO_2). Concluíram que os resultados

obtidos com a sílica dissolvida foram mais confiáveis por esta funcionar como um traçador mais conservativo e que sofre pouca interferência das características geológicas dos aquíferos.

A separação com o uso de traçadores, geralmente, é utilizada para a calibração e validação dos resultados de outros métodos de separação. No entanto, a análise de traçadores não é um procedimento prático e tampouco econômico, principalmente nos casos de longos períodos de análise. Além disso, deve ser considerado que existem imprecisões e incertezas quanto às concentrações finais das substâncias utilizadas como traçadores nos cursos d'água (GONZALES *et al.*, 2009) A separação com o uso de traçadores também não pode ser aplicada para séries de vazão antigas e que não tenham dados sobre as características físico-químicas da água dos rios e dos aquíferos, o que acontece na maioria dos casos (HOEG *et al.*, 2000; ECKHARDT, 2005).

2.3.2. Filtragem de base física

Furey e Gupta (2001) propuseram um procedimento de filtragem com embasamento físico, contendo parâmetros que são derivados a partir do balanço de massa nas encostas da bacia hidrográfica estudada. O procedimento de separação por filtragem de base física é feito pela equação:

$$q_{b(i)} = (1 - \gamma) q_{b(i-1)} + \gamma \frac{c_3}{c_1} (q_{(i-j-1)} - q_{b(i-j-1)}) \quad (4)$$

em que

- $q_{b(i)}$ = escoamento subterrâneo correspondente ao instante i , $m^3 s^{-1}$;
- γ = parâmetro relacionado à constante de recessão;
- $q_{b(i-1)}$ = escoamento subterrâneo correspondente ao instante anterior a i , $m^3 s^{-1}$;
- c_3 = parcela da precipitação média na bacia convertida em recarga do aquífero;
- c_1 = parcela da precipitação média na bacia convertida em escoamento superficial direto;
- $q_{(i-j-1)}$ = vazão correspondente ao instante anterior a i e considerando o intervalo de j dias, $m^3 s^{-1}$;

j = intervalo de tempo entre o início da infiltração e a recarga do aquífero, dias; e

$q_{b(i-j-1)}$ = escoamento subterrâneo correspondente ao instante anterior a i e considerando o intervalo de j dias, $m^3 s^{-1}$.

O valor de $(1 - \gamma)$ equivale à constante de recessão da bacia hidrográfica. Os mesmos autores que desenvolveram o modelo descrito testaram o seu desempenho e identificaram erros nas estimativas do escoamento subterrâneo. Uma das prováveis fontes de erros do modelo está em assumir a relação c_3/c_1 como sendo constante, enquanto que na prática eles variam temporal e espacialmente por sofrerem influência da precipitação e da umidade do solo. Assim também ocorre com a variável j , que varia de acordo com o nível do aquífero.

A aplicação do filtro desenvolvido por Furey e Gupta (2001) foi feita para a estação fluviométrica da bacia hidrográfica do rio Flint, Georgia, cujo resultado é apresentado na Figura 1.

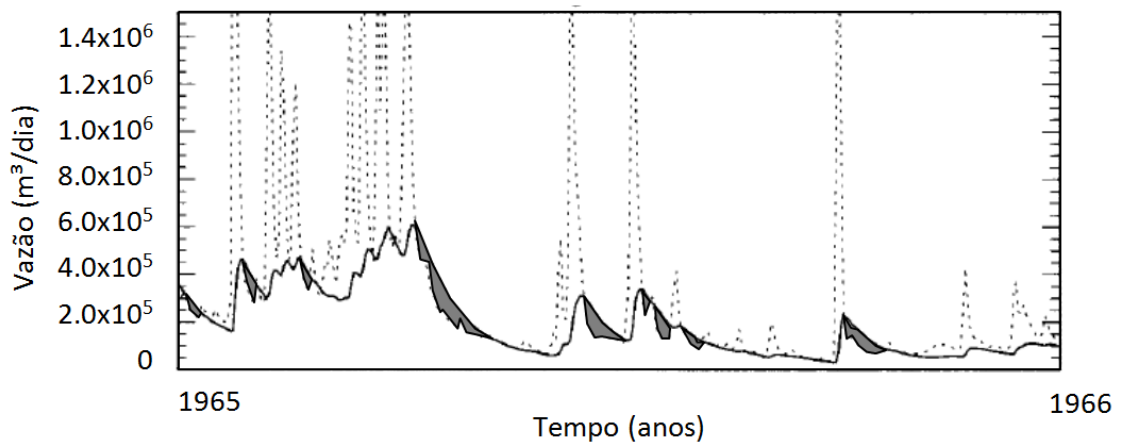


Figura 1. Hidrograma com a separação do escoamento subterrâneo (linha contínua) dada pelo filtro recursivo de base física (Adaptado de: FUREY; GUPTA, 2001).

No exemplo apresentado na Figura 1 podem ser observadas as superestimativas que o filtro de base física desenvolvido produz com relação ao escoamento subterrâneo. Estas superestimativas (áreas em destaque no gráfico da Figura 1) também ocorreram para outras estações fluviométricas para as quais o filtro foi aplicado na mesma bacia hidrográfica.

Diante das inconsistências do filtro apresentado, Furey e Gupta propuseram em 2003 um novo filtro, com a mesma formulação do filtro anterior, mas que incorpora a variável θ_j , relacionada à variação temporal da umidade do solo na zona não saturada. No entanto, ao aplicarem este novo filtro para uma bacia experimental Shale Hills, na Pennsylvania, detectaram inconsistências nos resultados para a estimativa do escoamento subterrâneo. Concluíram que algumas das possíveis fontes de erro seriam a não consideração da variação espacial da umidade do solo e a falta de precisão na estimativa de alguns dos parâmetros de entrada do novo filtro.

2.3.3. Análises gráficas

Estas técnicas tendem a focarem na definição dos pontos do hidrograma em que a vazão é representada pelo escoamento subterrâneo no início e no fim dos picos de vazão. Na sequência estes pontos são interligados por meio de ajuste de curvas (*curve-fitting*), de tal forma que represente o comportamento do escoamento subterrâneo naquele intervalo de tempo (CUSTÓDIO; LLAMAS, 1983; BRODIE; HOSTETLER, 2005).

Existe uma variedade de métodos de separação por análises gráficas. Custódio e Llamas (1983) descrevem alguns destes métodos, conforme apresentado na Figura 2.

O método para o traçado da linha AE'E (Figura 2) pressupõe que o ponto E' coincida com o dia em que ocorre o ponto de inflexão do gráfico entre o pico e a recessão de escoamento. Este método é considerado uma suposição válida para zonas cársticas, em que o escoamento subterrâneo alcança rapidamente a hidrografia. Uma variação deste método, chamado método da declividade variável (*variable slope method*), consiste no traçado de linhas retas interligando os pontos AD'E'E (CUSTÓDIO; LLAMAS, 1983; CHOW *et al.*, 1988).

Para a utilização dos métodos correspondentes ao traçado das linhas AD'D ou AD (Figura 2), primeiramente é necessária a definição do intervalo de dias N (LINSLEY *et al.*, 1982), que corresponde ao intervalo de duração do escoamento superficial direto após o pico de vazão (ponto B, Figura 2) identificado no hidrograma.

Os métodos de separação por análises gráficas são aplicados, geralmente, de forma manual. No entanto, um mesmo método de separação aplicado manualmente para uma mesma área, mas por diferentes pesquisadores ou técnicos, pode produzir resultados diferentes devido à subjetividade envolvida no traçado das linhas de separação. Neste

sentido, a padronização dos procedimentos de separação por meio de *softwares* auxilia na obtenção de resultados com menor nível de subjetividade e em um menor intervalo de tempo do que em processos manuais de separação (WAHL; WAHL, 1995; SLOTO; CROUSE, 1996; LIM *et al.*, 2005). Assim, foram desenvolvidos os métodos de separação denominados filtros digitais recursivos (*recursive digital filters*).

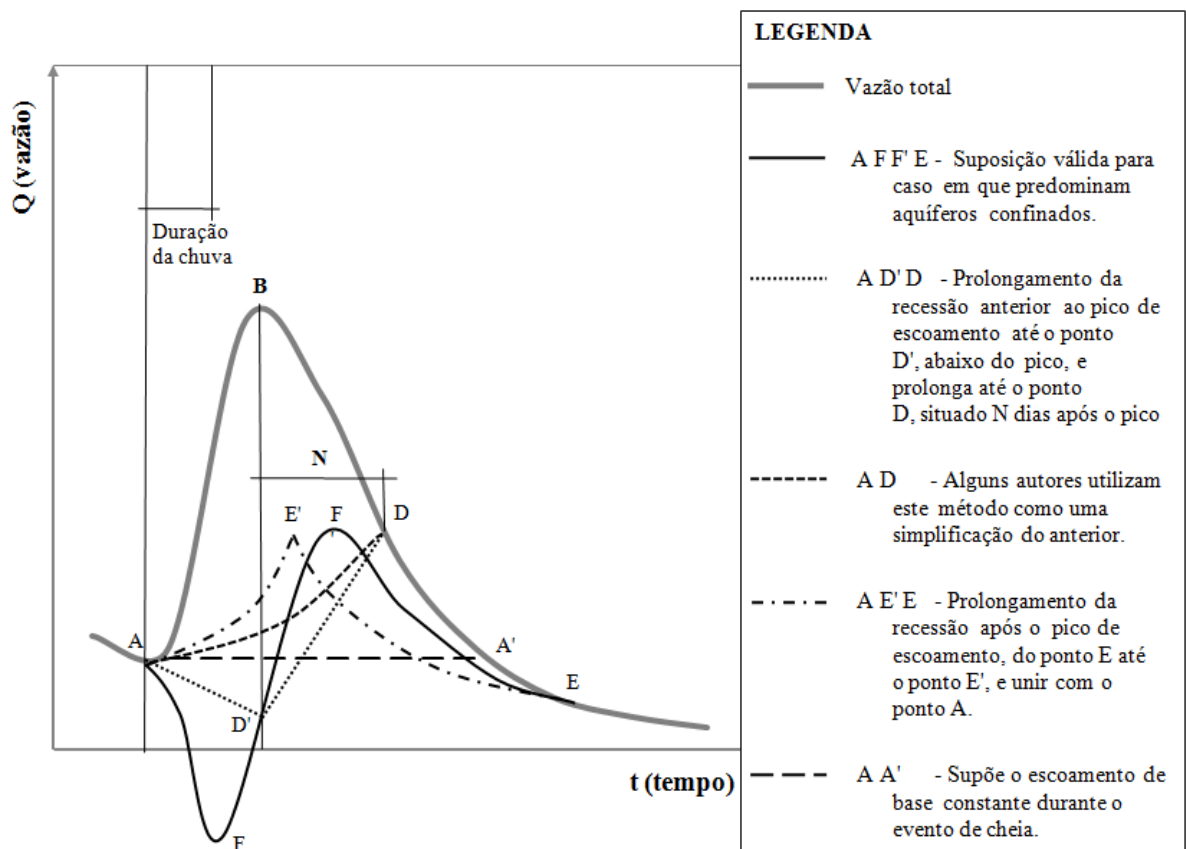


Figura 2. Métodos de separação do escoamento superficial direto do escoamento subterrâneo por análises gráficas (Adaptado de: CUSTÓDIO; LLAMAS, 1983).

Os filtros digitais recursivos consistem em rotinas computacionais que são repetidas durante o processamento dos dados de vazão formando as curvas de separação do escoamento superficial direto do subterrâneo. Nestes métodos são aplicadas equações contendo um, dois ou três parâmetros que são ajustados de forma a estimar o escoamento subterrâneo a cada dia formando as curvas de separação. A equação 5 representa um modelo geral utilizado na formulação da maioria dos filtros de um parâmetro (ECKHARDT, 2005).

$$q_{b(i)} = \frac{(1 - BFI_{\max}) k q_{b(i-1)} + (1 - k) BFI_{\max} q_i}{(1 - k BFI_{\max})} \quad (5)$$

em que

- $q_{b(i)}$ = escoamento subterrâneo no instante i , $m^3 s^{-1}$;
- BFI_{\max} = máximo valor do índice de escoamento de base;
- k = constante do período de recessão;
- $q_{b(i-1)}$ = escoamento subterrâneo no instante anterior a i , $m^3 s^{-1}$; e
- $q_{(i)}$ = vazão correspondente ao instante i , $m^3 s^{-1}$.

Gonzales *et al.* (2009) concluíram que o filtro recursivo proposto por Eckhardt (2005) permitiu a obtenção de resultados mais próximos aos obtidos com o método da análise de traçadores. No entanto, salientam que este resultado era o mais provável de acontecer, pois o parâmetro de entrada no filtro recursivo, o BFI_{\max} , foi previamente calibrado com o resultado da separação feita com o método da análise de traçadores.

Na Tabela 1 estão descritos alguns dos principais algoritmos de filtragem digital recursiva, desenvolvidos para a separação dos hidrogramas.

Tabela 1. Principais algoritmos para filtragem digital recursiva

Algoritmo	Modelo	Fonte	Considerações
Algoritmo de um parâmetro	$q_{b(i)} = \frac{k}{2-k} q_{b(i-1)} + \frac{k-1}{2-k} q_{(i)}$	Chapman e Maxwell (1996)	$q_{b(i)} \leq q_{(i)}$ Aplicado em um único passo através da série de dados.
Algoritmo de dois parâmetros	$q_{b(i)} = \frac{k}{1+C} q_{b(i-1)} + \frac{C}{1+C} q_{(i)}$	Boughton (1993) Chapman e Maxwell (1996)	$q_{b(i)} \leq q_{(i)}$ Aplicado em um único passo através da série de dados. O ajuste do parâmetro C permite a calibração do modelo por meio de outras informações sobre o escoamento subterrâneo na região.
Algoritmo de três parâmetros	$q_{b(i)} = \frac{k}{1+C} q_{b(i-1)} + \frac{C}{1+C} a_q q_{(i-1)}$	Jakeman e Hornberger (1993)	É uma modificação do algoritmo de dois parâmetros de Boughton.

Tabela 1. Continuação...

Algoritmo	Modelo	Fonte	Considerações
Algoritmo de Lyne e Hollick	$q_{f(i)} = a q_{f(i-1)} + (q_{(i)} - q_{(i-1)}) \frac{1+a}{2}$	Lyne e Hollick (1979); Nathan e McMahon, (1990)	$q_{(i)} \geq 0$ o valor de 0,925 é recomendado para o parâmetro “a” para aplicar este filtro em três passos na série de dados. O escoamento subterrâneo é dado por: $q_b = q - q_f$
Algoritmo de Chapman	$q_{f(i)} = \frac{3a-1}{3-a} q_{f(i-1)} + \frac{2}{3-a} (q_{(i)} - a q_{(i-1)})$	Chapman (1991)	O escoamento subterrâneo é dado por: $q_b = q - q_f$

Adaptado de: Brodie e Hostetler (2005).

em que

$q_{b(i)}$ = escoamento subterrâneo correspondente ao instante i , $m^3 s^{-1}$;

$q_{(i)}$ = vazão correspondente ao instante i , $m^3 s^{-1}$;

k = constante do período de recessão;

$q_{b(i-1)}$ = escoamento subterrâneo correspondente ao instante anterior a i , $m^3 s^{-1}$;

C = parâmetro equivalente a $(1 - k)$, que permite a alteração do formato da curva de separação;

a_q = parâmetro de filtragem que relaciona a taxa de variação do escoamento subterrâneo à taxa de variação da vazão;

$q_{(i-1)}$ = vazão correspondente ao instante anterior a i , $m^3 s^{-1}$;

$q_{f(i)}$ = vazão filtrada pelo algoritmo, correspondente ao instante i , $m^3 s^{-1}$;

$q_{f(i-1)}$ = vazão filtrada pelo algoritmo, correspondente ao instante anterior a i , $m^3 s^{-1}$; e

a = parâmetro de filtragem que permite controlar o grau de atenuação da vazão filtrada.

O princípio de funcionamento dos filtros digitais apresentados na Tabela 1 consiste em considerar os sinais de alta frequência dos picos dos hidrogramas como sendo indicativos do escoamento superficial direto (MAU; WINTER, 1997; LIM *et al.*, 2005).

Alguns dos filtros digitais de separação citados anteriormente estão consolidados em *softwares*, como o *Web based Hydrograph Analysis Tool* (WHAT), desenvolvido por Lim *et al.* (2005). O WHAT é um *software* que congrega dois filtros digitais recursivos, baseados nos modelos desenvolvidos por Lyne e Hollick (1979) e no modelo de Eckhardt (2005).

Os filtros digitais recursivos apresentados exigem uma calibração prévia dos parâmetros com base em características dos aquíferos que interferem no comportamento das águas subterrâneas. Ainda assim, estes tipos de filtros digitais recursivos constituem procedimentos predominantemente subjetivos (SLOTO; CROUSE, 1996; LIM *et al.*, 2005; BRODIE; HOSTETLER, 2005).

Pettyjohn e Henning (1979) desenvolveram três métodos de separação por análise gráfica de hidrogramas, que são: o intervalo fixo (*fixed interval*), o intervalo móvel (*sliding interval*) e o mínimo local (*local minimum*). Estes métodos foram constituídos como rotinas computacionais que consistem em filtros digitais com menor complexidade de aplicação, bastando apenas o conhecimento do tamanho da área de drenagem da estação analisada.

Os desenvolvedores dos métodos do intervalo fixo, do intervalo móvel e do mínimo local, analisaram o desempenho destes com relação ao escoamento subterrâneo total anual e concluíram que os três métodos produzem resultados com boa aproximação dos resultados obtidos com a separação feita manualmente para várias estações fluviométricas. Apesar dessa conclusão, as diferenças entre as estimativas diárias e anuais do escoamento superficial direto por cada método de separação não foi verificada por estes pesquisadores. Considerando que o escoamento superficial direto pode apresentar amplitudes menores do que o escoamento subterrâneo para muitos casos em que a contribuição pelos aquíferos é expressiva, as diferenças entre os métodos de separação pode se apresentar como significativa em relação às estimativas do escoamento superficial direto. Relataram também sobre as vantagens da praticidade, rapidez, menor nível de subjetividade e menor custo operacional conseguidos com a utilização dos métodos automáticos de separação desenvolvidos.

Sloto e Crouse (1996), pesquisadores do *U. S. Geological Survey* (USGS), desenvolveram o *computer program for streamflow hydrograph separation and analysis* (HYSEP), que congrega, dentre outras rotinas de análises hidrológicas, a adaptação dos três métodos desenvolvidos por Pettyjohn e Henning (1979).

Na Figura 3 pode ser visualizado um exemplo da aplicação dessas três técnicas com a utilização do HYSEP, na bacia hidrográfica French Creeck, Phoenixville, Pennsylvania, para o mês de abril de 1992.

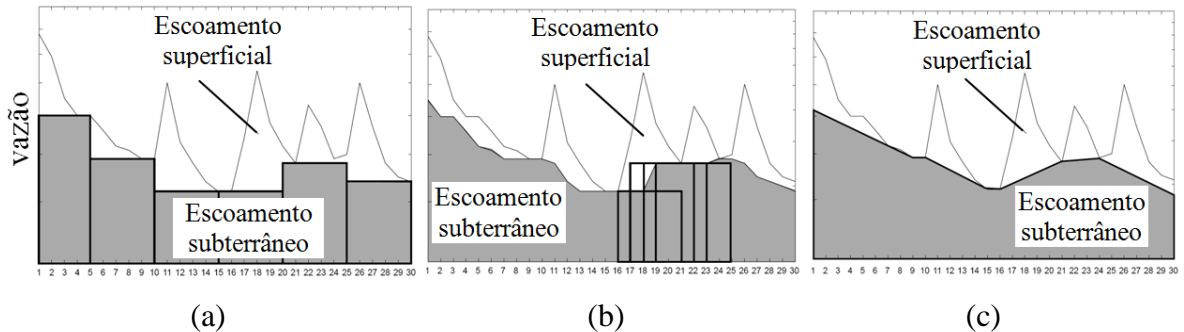


Figura 3. Exemplo de aplicação dos métodos do intervalo fixo (a), do intervalo móvel (b) e do mínimo local (c) (Modificado de: SLOTO e CROUSE, 1996).

Gonzales *et al.* (2009) também compararam os resultados da separação do escoamento superficial direto do escoamento subterrâneo utilizando o HYSEP com os resultados da análise de traçadores. Concluíram que o método do intervalo fixo produziu o pior resultado entre os três métodos do HYSEP e que os métodos do intervalo móvel e do mínimo local produziram resultados mais próximos aos resultados da separação utilizando a análise de traçadores. Estes resultados estão afetos a um intervalo de apenas 40 dias de análises em que foram comparados os totais de escoamento superficial direto separados utilizando os métodos do HYSEP e o método por análise de traçadores durante este intervalo de tempo, em que foram feitas também análises apenas qualitativas entre os gráficos de separação obtidos pelos diferentes métodos.

2.4. Utilização dos métodos de separação do escoamento superficial direto do subterrâneo no Brasil

O Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) avaliou a disponibilidade hídrica subterrânea durante a elaboração dos Planos Diretores das bacias dos rios Paracatu e Rio das Velhas, e do Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Doce (IGAM,

2005; 2006 e 2010). Nestes trabalhos foi aplicada apenas a metodologia de Barnes, ou método dos gráficos semilogaritmos (CUSTÓDIO; LLAMAS, 1983; GONÇALVES, 2005) para a separação do escoamento superficial direto do subterrâneo, adotando sempre procedimentos manuais durante as análises dos hidrogramas.

Alguns outros trabalhos, como os do Hidroservice (1998), de Bertol (2007), e de Silva *et al.* (2010), também utilizaram a análise de hidrogramas, no entanto, assim como no caso do IGAM (2005; 2006 e 2010), estes trabalhos se pautaram mais pelo estudo envolvendo a análise das curvas de recessão.

Já Menegasse *et al.* (2004) avaliaram as disponibilidades hídricas superficial e subterrânea na região do Alto São Francisco, utilizando o *software* HYSEP para a separação do escoamento superficial direto do escoamento subterrâneo, no entanto, estes pesquisadores não informam qual dos três métodos do HYSEP que foi utilizado na separação e o porquê da escolha deste método.

Os *softwares* existentes para auxílio à separação são concebidos para serem aplicados às bases de dados do país ou região onde foram desenvolvidos. O HYSEP e o WHAT, por exemplo, aceitam entrada de dados que estejam configurados de acordo com dois formatos padrões adotados pela USGS (SLOTO; CROUSE, 1996; LIM *et al.*, 2005): o formato *American Standard Code for Information Interchange* (ASCII), organizado conforme o padrão *USGS National Water Data Storage and Retrieval System* (WATSTORE), e o *Watershed Data Management* (WDM). Portanto, a sua aplicação, por exemplo, para o formato padrão da base de dados de vazão adotado pela Agência Nacional de Águas (ANA), no Brasil, requer uma prévia conversão dos dados e adequação da organização destes conforme os padrões exigidos pelos referidos *softwares*. Além disso, geralmente é indispensável que se proceda ao pré-processamento dos dados oriundos da base de dados brasileira com o intuito de análise e eliminação de falhas antes de um estudo envolvendo a utilização destes dados, procedimento não disponível nos softwares HYSEP e WHAT.

As dificuldades associadas aos procedimentos manuais de análises de hidrogramas e a incompatibilidade dos padrões das bases de dados brasileiras com as configurações aceitas pelos *softwares* existentes para a aplicação dos métodos de separação são fatores determinantes da escassez de estudos relacionados à separação do escoamento superficial direto do escoamento subterrâneo no Brasil.

Diante da importância dos resultados de estudos que envolvem a separação do escoamento superficial direto do subterrâneo é necessário o desenvolvimento de tecnologias apropriadas para as condições brasileiras.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Avaliação dos métodos de separação do escoamento superficial direto do escoamento subterrâneo

3.1.1. Métodos de separação utilizados

Os métodos de separação do escoamento superficial do escoamento subterrâneo utilizados foram os métodos 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 $2N^*$ dias (PETTYJOHN; HENNING, 1979) é utilizado na aplicação dos métodos de separação IF, IM e ML. O $2N^*$ dias corresponde ao número inteiro imediatamente superior ao dobro de N (LINSLEY *et al.*, 1982), que é estimado com boa adequação (FETTER, 2001; BRODIE; HOSTETLER, 2005) pela equação empírica:

$$N = 0,827 A^{0,2} \quad (6)$$

em que A é a área de drenagem, em km^2 .

3.1.1.1. Método do Intervalo Fixo (IF)

No método IF é selecionada a menor vazão dentro do intervalo de $2N^*$ dias. Esta vazão é adotada como a descarga do escoamento subterrâneo, sendo este valor mantido constante durante todo o intervalo $2N^*$ dias (Figura 4).

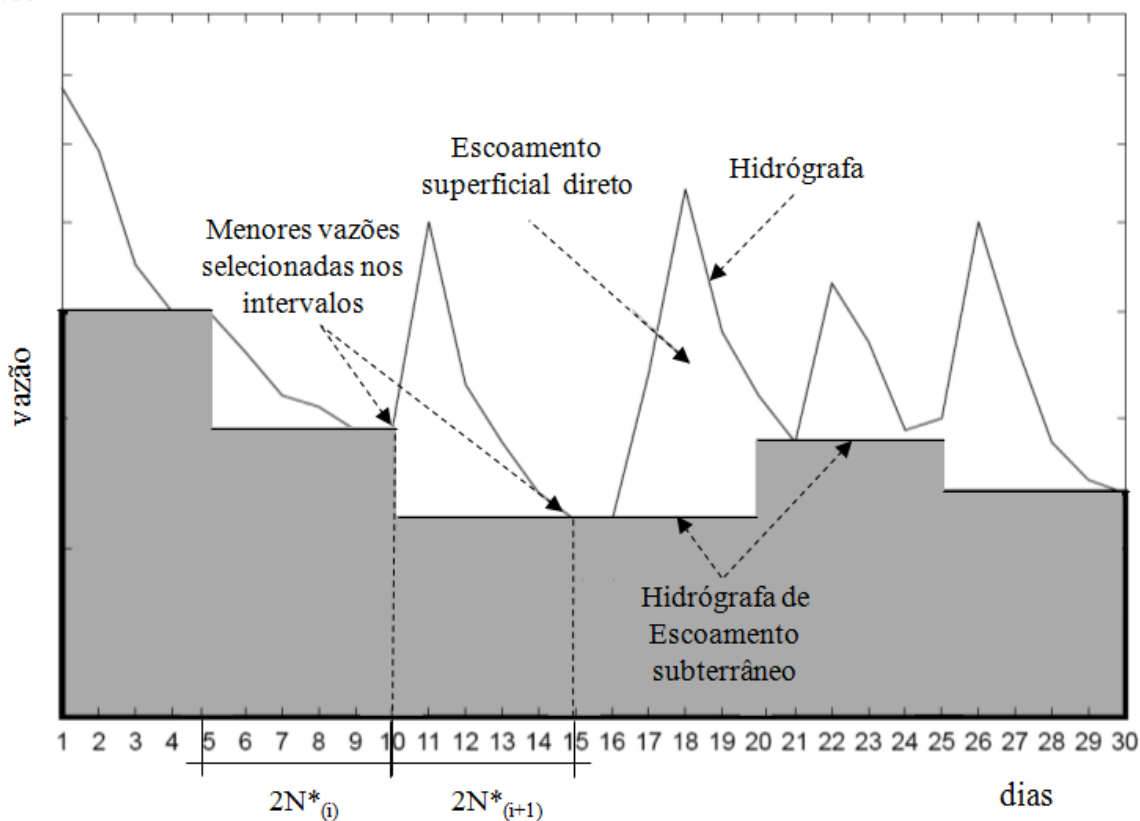


Figura 4. Separação do escoamento superficial direto do escoamento subterrâneo utilizando o método IF (Modificado de: SLOTO; CROUSE, 1996).

No exemplo apresentado na Figura 4 os intervalos fixos $2N^*$ são de cinco dias. No primeiro intervalo fixo demonstrado ($2N^*_{(i)}$), que corresponde ao intervalo entre o dia 5 e o dia 10, foi selecionada a menor vazão dentro deste intervalo, que corresponde à vazão do dia 10. Esta vazão então foi adotada como o escoamento subterrâneo para todo o intervalo $2N^*_{(i)}$. No próximo intervalo fixo ($2N^*_{(i+1)}$), que corresponde ao intervalo entre o dia 10 e o dia 15, foi selecionada a menor vazão dentro deste intervalo, que corresponde à vazão do dia 15. Esta vazão foi então adotada como o escoamento subterrâneo de todo o intervalo ($2N^*_{(i+1)}$). Este mesmo procedimento é adotado para todos os intervalos fixos $2N^*$ da série.

3.1.1.2. Método do Intervalo Móvel (IM)

No método IM o menor valor de vazão é selecionado no intervalo $2N^*$ dias e este valor é adotado como o escoamento subterrâneo do dia $D_{(i)}$ dentro do mesmo intervalo. O critério de seleção do dia D dentro do intervalo $2N^*$ dias é estimado pela equação:

$$D_{(i)} = \begin{cases} 0,5 (2N^* - 1) \rightarrow 2N^* \text{ é um número ímpar} \\ N^* \rightarrow 2N^* \text{ é um número par} \end{cases} \quad (7)$$

em que $D_{(i)}$ é o dia selecionado dentro do intervalo $2N^*$ dias.

O intervalo de $2N^*$ dias é deslocado para o próximo dia da série de vazões em que é selecionado um novo valor mínimo que é adotado como o escoamento subterrâneo do dia $D_{(i+1)}$ (Figura 5).

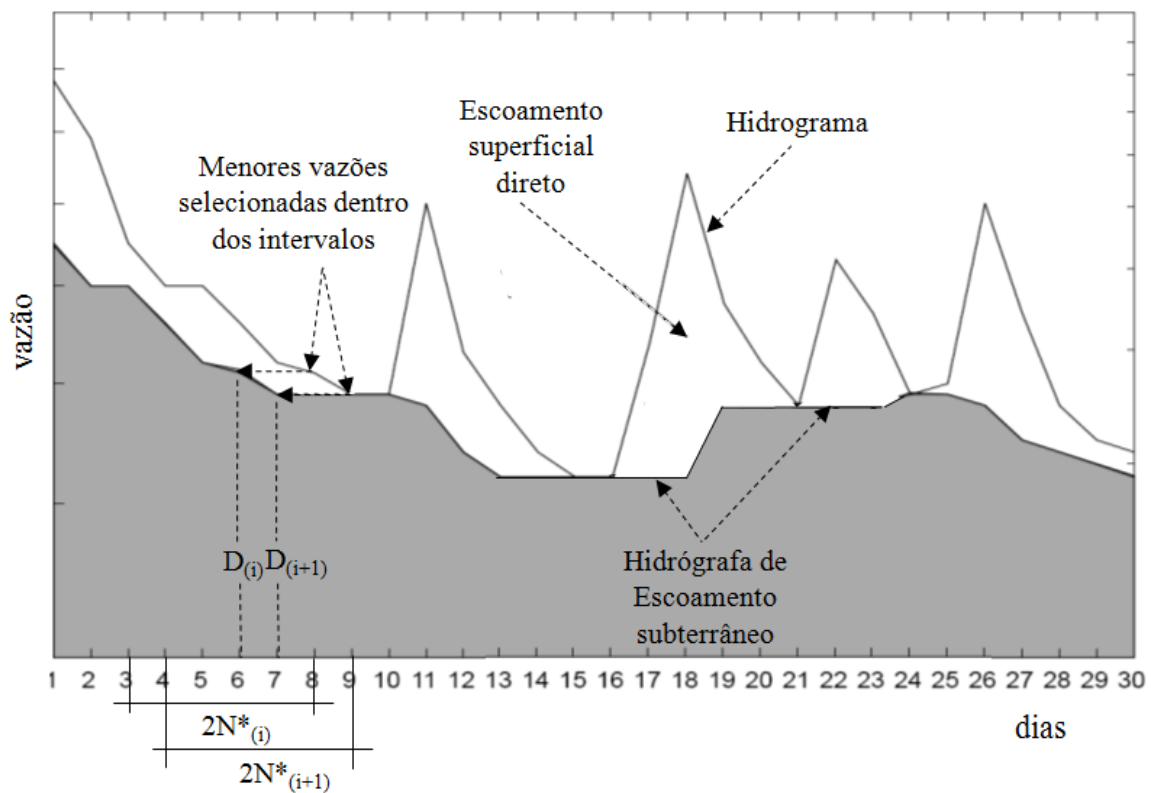


Figura 5. Separação do escoamento superficial direto do escoamento subterrâneo utilizando o método IM (Modificado de: SLOTO; CROUSE, 1996).

No exemplo apresentado na Figura 5 os intervalos $2N^*$ são de cinco dias. No primeiro intervalo demonstrado ($2N^*_{(i)}$), que corresponde ao intervalo entre o dia 3 e o dia 8, foi selecionada a menor vazão dentro deste intervalo, que corresponde à vazão do dia 8.

Esta vazão então foi adotada como o escoamento subterrâneo para o dia $D_{(i)}$ correspondente ao dia 6. O intervalo então foi movido para o próximo dia e passa a ser representado pelo intervalo $(2N^*_{(i+1)})$, que corresponde ao intervalo entre o dia 4 e o dia 9. A menor vazão dentro deste intervalo corresponde à vazão do dia 9. Esta vazão foi então adotada como o escoamento subterrâneo do dia $D_{(i+1)}$ correspondente ao dia 7. Este procedimento é repetido para cada dia da série de vazões e os valores de escoamento subterrâneo nos dias $D_{(i)}$ de cada intervalo são ligados entre si por linhas que representam o comportamento do escoamento subterrâneo.

3.1.1.3. Método do Mínimo Local (ML)

No método ML é feita a verificação se a vazão do dia $D_{(i)}$ (equação 7) é a menor dentro do intervalo $2N^*$ dias. Atendida essa condição, então este dia é considerado um mínimo local. O intervalo de $2N^*$ então é deslocado para o próximo dia da série de vazões em que é feita a verificação se a vazão do dia $D_{(i+1)}$ é a menor dentro do intervalo (Figura 6).

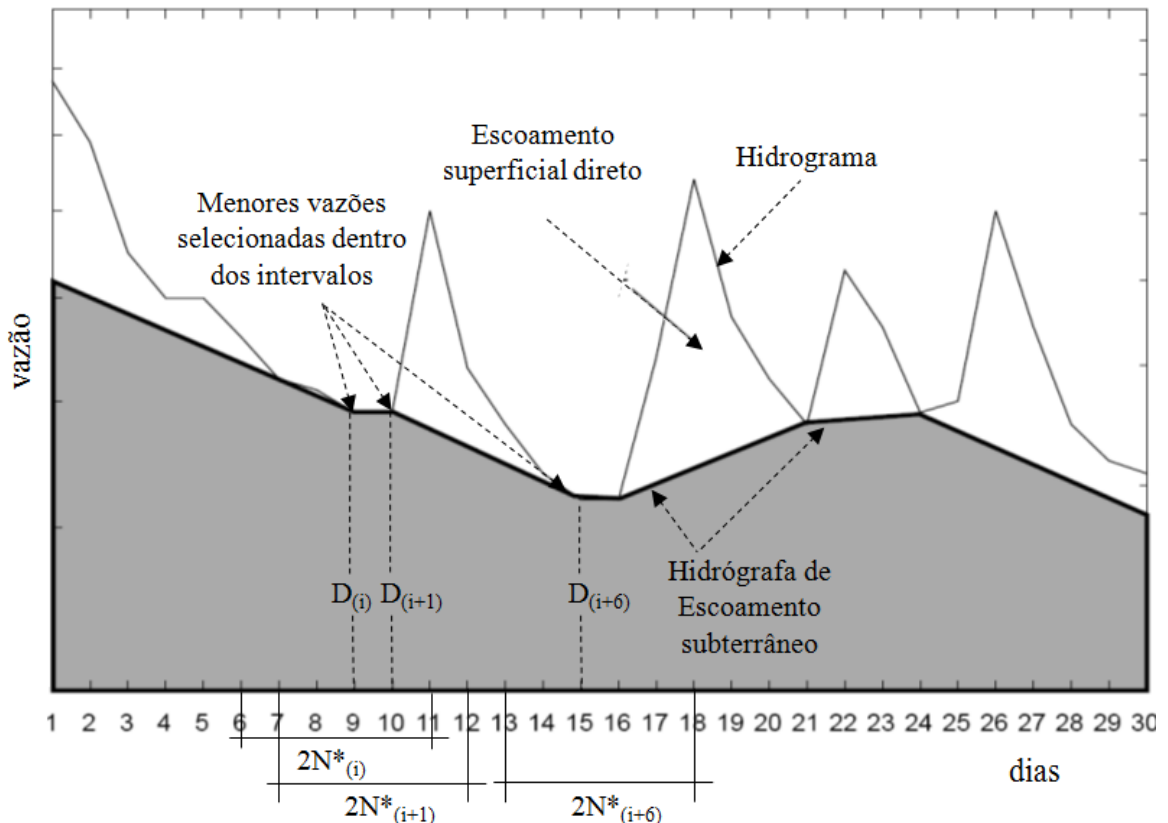


Figura 6. Separação do escoamento superficial direto do escoamento subterrâneo utilizando o método ML (Modificado de: SLOTO; CROUSE, 1996).

No exemplo apresentado na Figura 6 os intervalos $2N^*$ são de cinco dias. O primeiro intervalo demonstrado ($2N^*_{(i)}$) corresponde ao intervalo entre o dia 7 e o dia 12. O dia $D_{(i)}$ deste intervalo correspondente ao dia 9 no qual foi verificada a menor vazão dentro deste intervalo. Esta vazão então foi adotada como sendo um mínimo local. O intervalo então foi movido para o próximo dia e passa a ser representado pelo intervalo ($2N^*_{(i+1)}$), que corresponde ao intervalo entre o dia 8 e o dia 13. O dia $D_{(i+1)}$ deste intervalo corresponde ao dia 9 no qual foi verificada a menor vazão dentro deste intervalo. Esta vazão então foi adotada como sendo outro mínimo local. Quando os intervalos passam para os próximos dias (intervalos dos dias 9 ao 14 [$2N^*_{(i+2)}$], 10 ao 15 [$2N^*_{(i+3)}$], 11 ao 16 [$2N^*_{(i+4)}$] e 12 ao 17 [$2N^*_{(i+5)}$]) verifica-se que as menores vazões não coincidem com os dias 11 [$D_{(i+2)}$], 12 [$D_{(i+3)}$], 13 [$D_{(i+4)}$] e 14 [$D_{(i+5)}$] destes intervalos. Nestes casos nenhum mínimo local é selecionado. Somente quando o intervalo passa a ser entre os dias 13 e 18 [$2N^*_{(i+6)}$] a menor vazão coincide com o dia 15 [$D_{(i+6)}$] e este valor é selecionado como outro mínimo local. Este procedimento é repetido para cada dia da série de vazões até que sejam selecionados todos os mínimos locais. Os valores dos mínimos locais selecionados então são ligados entre si por linhas que representam o comportamento do escoamento subterrâneo.

3.1.2. Quantificação do escoamento superficial direto e do escoamento subterrâneo

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

$$V_{(i)} = \int_{t_i}^{t_{i+1}} Q_{(i)} dt = \frac{(Q_{(i+1)} + Q_{(i)})}{2} \Delta t \quad (8)$$

$$V_{\text{ESub}(i)} = \int_{t_i}^{t_{i+1}} Q_{\text{ESub}(i)} dt = \frac{(Q_{\text{ESub}(i+1)} + Q_{\text{ESub}(i)})}{2} \Delta t \quad (9)$$

$$V_{ES(i)} = V_{(i)} - V_{ESub(i)} \quad (10)$$

em que

$V_{(i)}$ = volume de escoamento total no dia i , m^3 ;

$Q_{(i)}$ = vazão do dia i , obtida da base de dados da estação fluviométrica, $m^3 s^{-1}$;

Δt = intervalo de tempo compreendido entre os instantes t_i e t_{i+1} , igual a 86400s;

$V_{ESub(i)}$ = volume de escoamento subterrâneo no dia i , m^3 ;

$Q_{ESub(i)}$ = vazão correspondente ao escoamento subterrâneo no dia i , $m^3 s^{-1}$; e

$V_{ES(i)}$ = volume de escoamento superficial direto no dia i , 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 7).

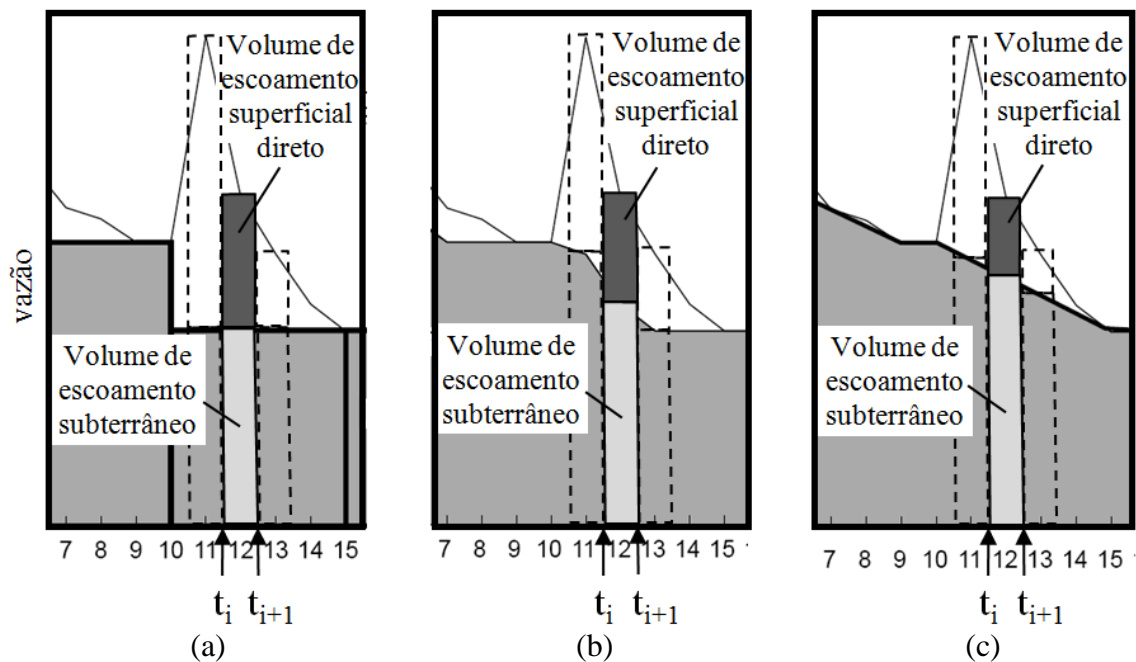


Figura 7. Esquema representativo dos volumes de escoamento superficial direto e de escoamento subterrâneo calculados para o dia i (intervalo de tempo entre t_i e t_{i+1}) da série, utilizando as técnicas IF (a), IM (b) e ML (c) (Modificado de: SLOTO; CROUSE, 1996).

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

$$V_{ESa} = \sum_{i=1}^{ud} V_{ES(i)} \quad (11)$$

em que

V_{ESa} = volume de escoamento superficial direto total anual, m³;

$V_{ES(i)}$ = volume de escoamento superficial direto no dia i, m³; e

ud = último dia do ano hidrológico.

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

3.1.3. Avaliação do desempenho dos métodos de separação

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 $V_{ES(i)}$ e os V_{ESa} obtidos para cada área.

3.1.3.1. 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, 2011). Estas estações estão localizadas no Estado de Minas Gerais, na bacia do Rio das Velhas, que é um importante afluente do rio São Francisco.

A bacia hidrográfica do rio São Francisco é de extrema importância para o Brasil, pois sua área de drenagem representa 7,5% do território brasileiro, e esta bacia é uma importante indutora do desenvolvimento dos diversos Estados abrangidos pela bacia (PEREIRA *et al.*, 2007).

A bacia hidrográfica do Rio das Velhas se localiza na unidade fisiográfica da região de cabeceira da bacia do São Francisco, denominada região do Alto São Francisco. A precipitação total anual na bacia do Rio das Velhas varia entre 1100 e 2000 mm (IGAM, 2005), sendo a terceira maior contribuinte para a vazão do rio São Francisco (PEREIRA *et al.*, 2007). O volume escoado no Rio das Velhas representa o percentual entre 25 e 35% do total precipitado na bacia hidrográfica deste rio (PEREIRA *et al.*, 2007), o que reflete um percentual entre 65 e 75% que inclui, em grande parte, as perdas por evapotranspiração na área desta bacia hidrográfica, além do que fica retido no sistema, em represamentos, na vegetação e no solo.

As áreas de drenagem das estações fluviométricas 41199998 e 41260000 estão localizadas na região do Alto Rio das Velhas, região de cabeceira da bacia hidrográfica do Rio das Velhas. O clima desta região é caracterizado como um clima quente de inverno seco, com médias anuais de temperatura em torno de 18°C valores médios de umidade da ordem de 75%, e com períodos secos que ocorrem de maio a setembro (IGAM, 2005).

A região do Alto Rio das Velhas é caracterizada também pelo desenvolvimento intenso da mineração, pela crescente ocupação urbana e pela expansão imobiliária. Neste sentido, é uma região onde ocorrem conflitos quanto ao uso dos solos e dos recursos hídricos, além de sofrer com os processos erosivos intensos e assoreamento dos mananciais (SANTOS; SOBREIRA, 2008). A região metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) envolve 34 municípios em que cerca de 60% da área total destes municípios está localizada dentro da bacia do Rio das Velhas (FILGUEIRAS, 2007). Assim, os problemas advindos da ocupação desordenada e excessiva da RMBH afetam toda a bacia hidrográfica do rio São Francisco (DUTRA *et al.*, 2010).

Além da importância da sub-bacia do Rio das Velhas no contexto da bacia do São Francisco, um dos critérios de seleção das estações 41199998 e 41260000 para este estudo foi a influência da impermeabilização pela urbanização. As duas estações selecionadas correspondem a uma sub-bacia do Rio das Velhas sem a influência da impermeabilização provocada pela região metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) – estação 41199998 – e outra sub-bacia que sofre uma influência expressiva desta região metropolitana – estação 41260000.

Os detalhes de formato e localização das áreas de drenagem das duas estações, individualizadas a partir do MDEHC obtido, são mostrados na Figura 8.

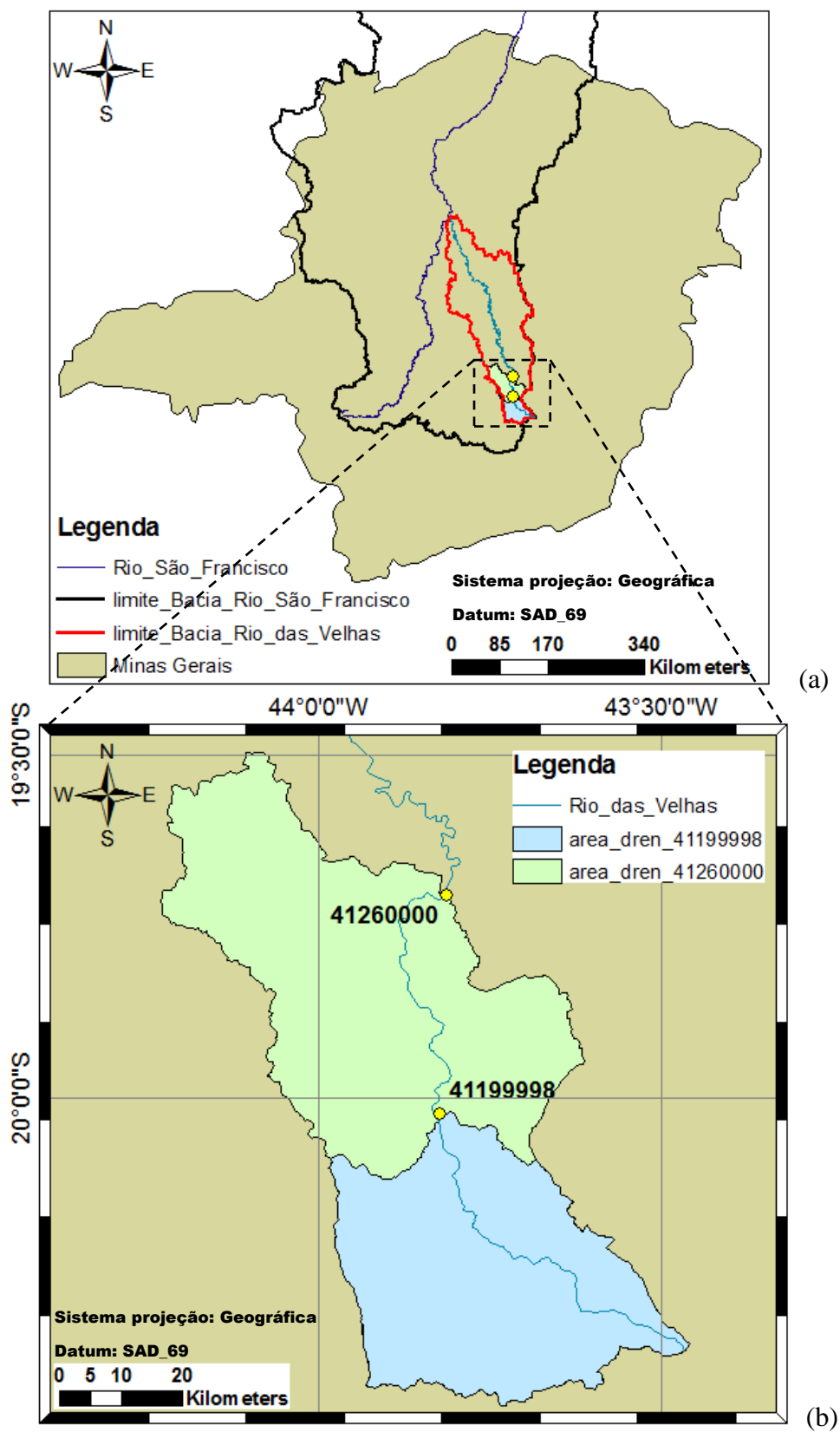


Figura 8. Áreas de drenagem das estações selecionadas - localização (a) e detalhe (b).

Fonte de dados: ANA (2011).

As áreas de drenagem correspondentes às duas estações fluviométricas foram individualizadas com o objetivo de delimitar os processos de escoamento superficial direto e de precipitação 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) de códigos SE-23-Y-C, SE-23-Y-D, SE-23-Z-C, SF-23-V-A, SE-23-V-B e SE-23-X-A, para a obtenção do Modelo Digital de Elevação Hidrograficamente Condicionado (MDEHC) da região (ENGMAN, 1996; VALERIANO, 2004; EMBRAPA, 2005; MARQUES; SILVA, 2007; 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 km² e 3.722,9 km², respectivamente. Estes valores das áreas de drenagem foram utilizados para a definição do intervalo 2N* de cada área para a aplicação dos filtros digitais. Assim, os valores de N calculados a partir da equação 6 (item 3.1.1) foram de 5,25 e 6,26 para as estações 41199998 e 41260000, respectivamente, e os intervalos 2N* foram considerados como sendo 11 dias 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 (Figura 9).

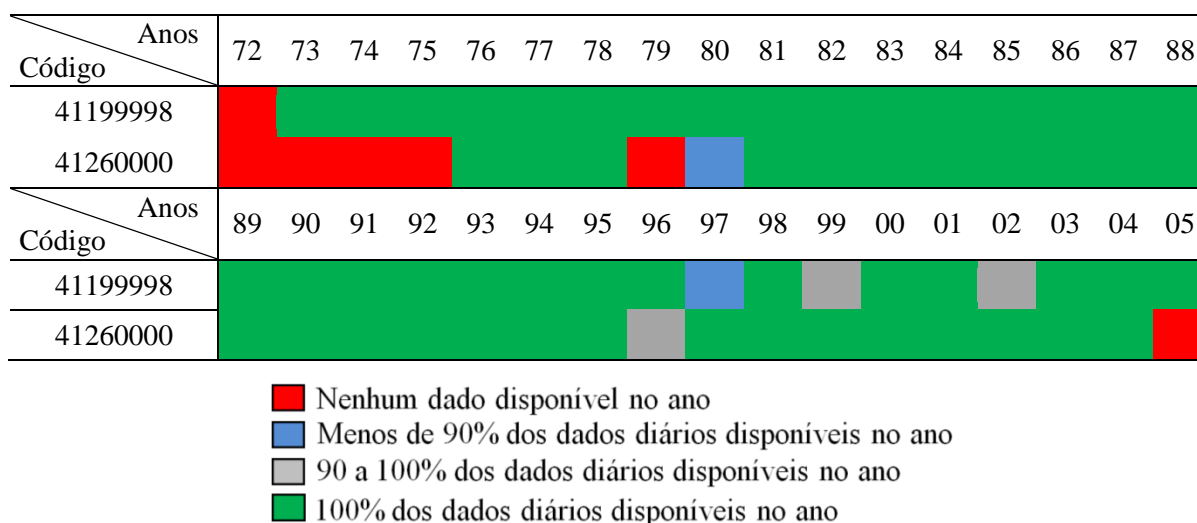


Figura 9. Diagrama de barras com a disponibilidade dos dados das estações fluviométricas.

O diagrama de barras (Figura 9), utilizado para a verificação das falhas nos dados de vazão, foi gerado com o auxílio do *software* SisCAH (SOUSA *et al.*, 2009).

Foram selecionados os anos hidrológicos correspondentes aos anos com 100% dos dados disponíveis em ambas as 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.

As menores vazões observadas por meio dos hidrogramas de praticamente todos os anos selecionados estiveram entre os meses de outubro e novembro, para as duas estações fluviométricas, comportamento similar ao apresentado por IGAM (2005) para a região. Assim, os anos hidrológicos foram considerados como sendo do dia 01 de outubro ao dia 30 de setembro.

3.1.3.2. 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:

$$Y_i = \beta_1 X_i + e_i \quad (12)$$

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 12. 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). Essa forma de análise comparativa foi adotada com base nas seguintes considerações: o método IF é o que produz os piores resultados em comparação com outros métodos de separação (GONZALES *et al.*, 2009); e o método ML é o método mais similar aos métodos de separação aplicados manualmente.

Após o ajuste da equação 12 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:

$$\hat{V}(\hat{\beta}_1) = \frac{Q.M.Res.}{\sum_{i=1}^n X_i^2} \quad (13)$$

$$Q.M.Res. = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i^2 - \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n X_i}{(n - 1)} \quad (14)$$

$$t_c = \frac{\hat{\beta}_1 - 1}{\sqrt{\hat{V}(\hat{\beta}_1)}} \quad (15)$$

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 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:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}{\sum_{i=1}^n [(|Y_i - \bar{Y}|) + (|X_i - \bar{X}|)]^2} \quad (16)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (17)$$

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 16) é conhecido como índice de concordância entre modelos, desenvolvido por Willmott (1981). Este índice corresponde à padronização do quadrado médio dos resíduos das estimativas de um modelo qualquer em relação aos dados observados ou em relação aos dados estimados por outro modelo.

O índice NS (equação 17) 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. Esta estatística foi utilizada para comparar os dados estimados por um e por outro método de separação a partir da consideração dos resultados de um método de separação como sendo os dados observados e do outro método confrontado como sendo os dados estimados.

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 a estimativa dos dados estimados por outro modelo, adotado como o padrão na comparação.

3.2. Avaliação da influência da impermeabilização pela urbanização no escoamento superficial direto na bacia hidrográfica do Rio das Velhas, MG

Para analisar a influência da impermeabilização pela urbanização no escoamento superficial direto as áreas de drenagem foram analisadas quanto às suas características físicas que interferem no escoamento superficial direto e quanto à precipitação que ocorre em cada área.

3.2.1. Caracterização das áreas estudadas quanto aos aspectos que interferem no escoamento superficial direto

As características quanto à distribuição dos tipos de solo podem ser visualizadas nas Figura 11, e, correspondentes à urbanização das áreas de drenagem das duas estações fluviométricas estudadas, na Figura 11.

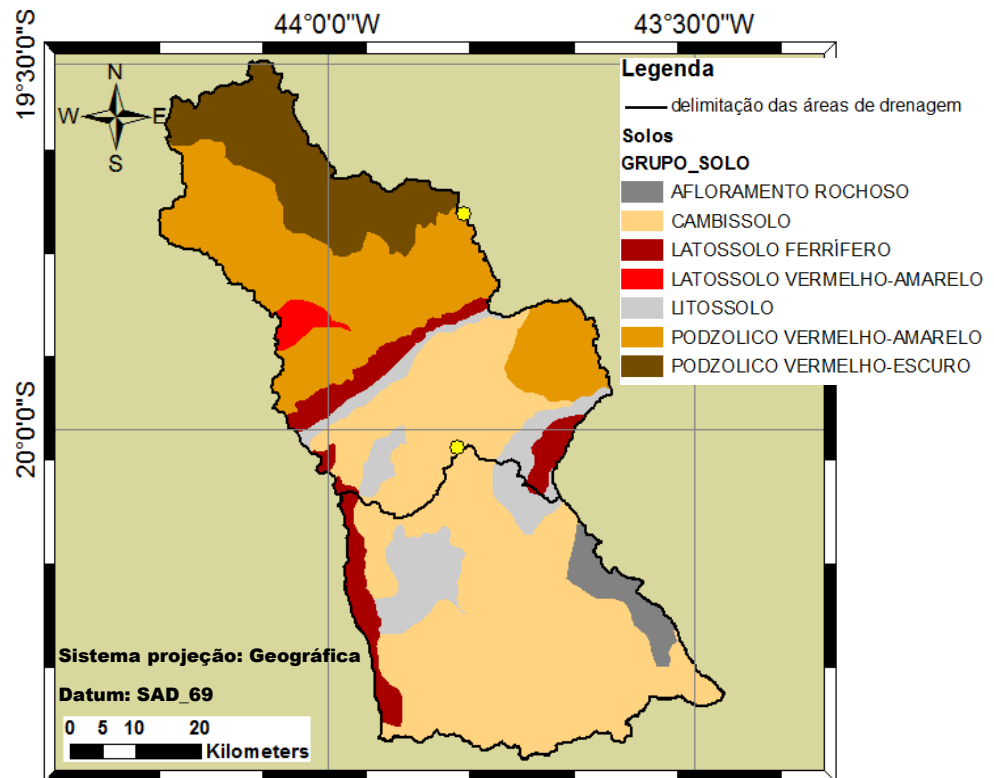


Figura 10. Mapa de solos das áreas de drenagem das estações. Fontes de dados: PRODEMGE (1998).

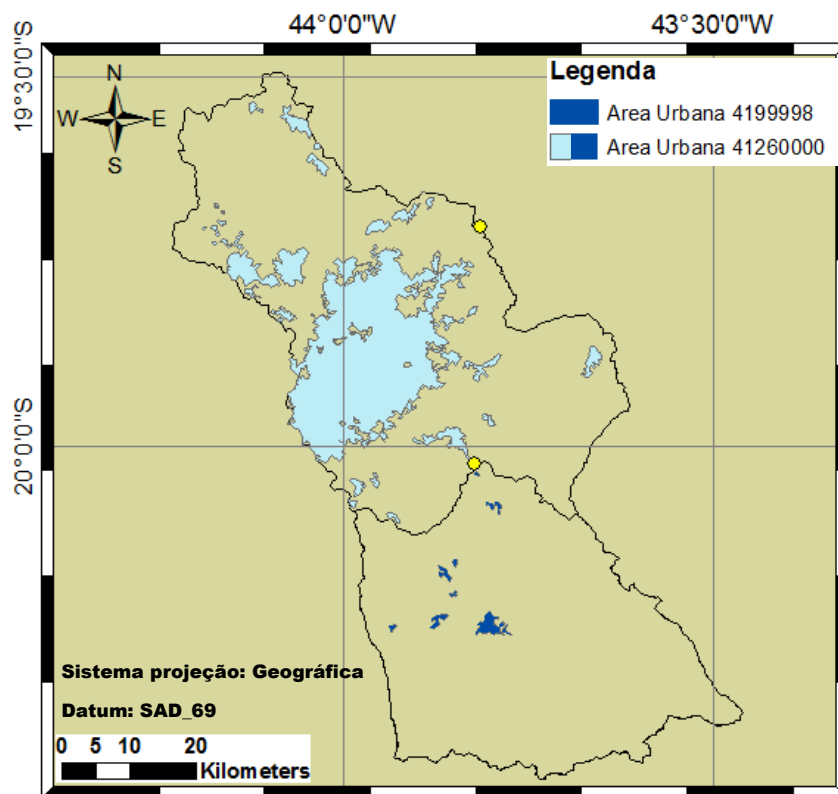


Figura 11. Mapa das áreas urbanizadas individualizadas para as áreas de drenagem das estações. Fontes de dados: Filgueiras (2007).

As porcentagens que cada tipo de solo e que a impermeabilização do solo representam em relação a cada área de drenagem das estações fluviométricas estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Tipo de solo e impermeabilização do solo das áreas de drenagem individualizadas

Estação Fluv.	Área km ²	Solos				Impermeabilização	
		Litos- solos	Cambis- solos	Podzo- licos	Latos- solos	Afloramento Rochoso ¹	Área Urbanizada
		% em relação à área total					
EM	1.544,6	8,7	78,2	0,0	8,4	4,6	0,8
EJ	3.722,9	7,5	33,5	49,1	8,1	1,9	14,8

A área de drenagem da estação a montante (41199998) corresponde à área EM, que sofre pouca influência da impermeabilização do solo pela urbanização, enquanto a área de drenagem da estação a jusante (41260000) corresponde à área EJ, que sofre influência expressiva da impermeabilização do solo pela região metropolitana de Belo Horizonte (RMBH).

Os afloramentos rochosos foram contabilizados como áreas impermeáveis juntamente com as áreas urbanizadas.

Além das características físicas das áreas estudadas de cada área, também foi feita a análise da precipitação anual que ocorre em cada área. Os dados de precipitação foram obtidos a partir de estações pluviométricas localizadas dentro e no entorno de cada área de drenagem estudada. Na Figura 12 podem ser visualizadas a localização e a situação das estações pluviométricas analisadas em cada uma das áreas de drenagem das estações fluviométricas.

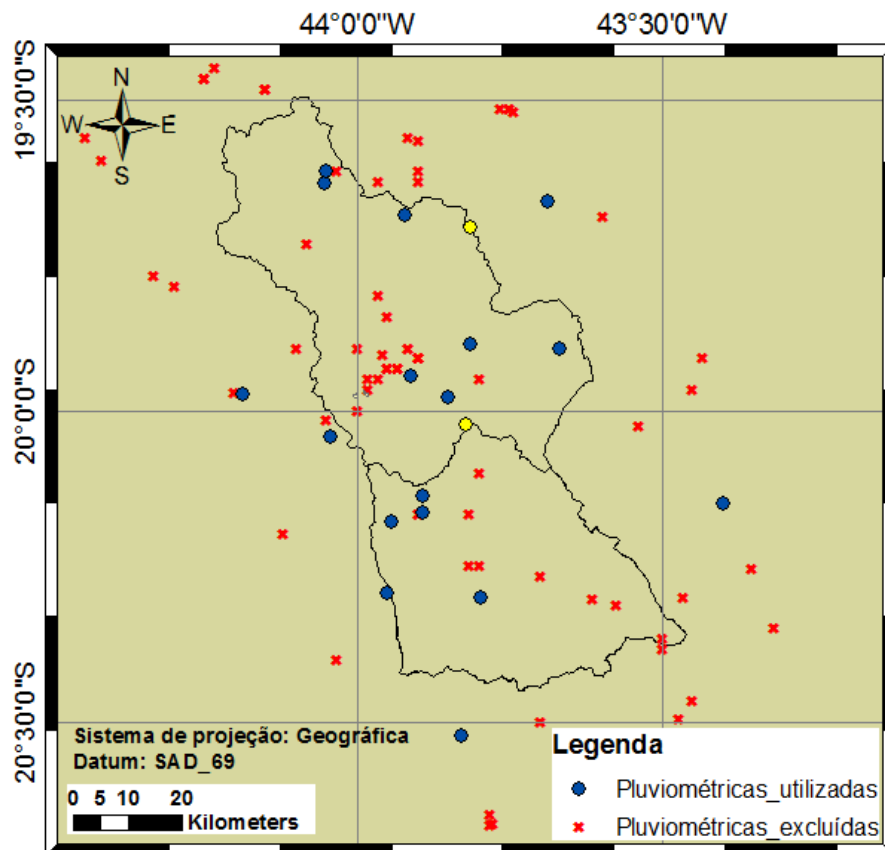


Figura 12. Estações pluviométricas utilizadas e eliminadas na estimativa da precipitação total média nas áreas de drenagem. Fonte de dados: ANA (2011).

Como pode ser observado na Figura 11, várias estações pluviométricas foram desprezadas no processo de obtenção da precipitação anual em cada área por causa da inexistência ou indisponibilidade de dados, ou ainda, do excesso de falhas no banco de dados.

O método utilizado para a obtenção da precipitação em cada área foi o método dos polígonos de Thiessen (SIGNH; CHOWDHURY, 1986; CHOW *et al.*, 1988; FETTER, 2001; TUCCI, 2009; FEITOSA *et al.*, 2008). Os polígonos de Thiessen foram reformulados de acordo com as estações pluviométricas que dispunham de dados de precipitação em cada ano. As malhas dos polígonos de Thiessen das estações pluviométricas e as áreas de cada polígono foram obtidas com o auxílio do *software* ArcGIS versão 9.3.

A precipitação anual de cada área foi calculada pelo método da média ponderada utilizando as áreas de influência das estações, representadas pelos Polígonos de Thiessen, como critério de ponderação, sendo calculada pela equação:

$$Pt = \sum_{i=1}^{ud} \left(\frac{\sum_{n=1}^p A_n P_n}{\sum_{n=1}^p A_n} \right)_i \quad (18)$$

em que

- Pt = precipitação anual na área, mm;
- P_n = precipitação registrada em cada estação, mm;
- A_n = área de influência de cada estação pluviométrica, km²;
- p = número de estações pluviométricas; e
- ud = último dia do ano hidrológico considerado para a obtenção de Pt.

Assim, a precipitação anual (Pt) para cada área e para cada um dos anos da série de dados analisada, foi comparada entre uma área e a outra (Tabela 3).

Tabela 3. Precipitações anuais para cada ano nas áreas de drenagem das estações

Ano	Pt _{EM}	Pt _{EJ} (mm)	Diferença (Pt _{EM} – Pt _{EJ})
1976/1977	1624,42	1584,01	40,41
1977/1978	1552,94	1450,55	102,39
1981/1982	1677,15	1696,24	-19,09
1982/1983	2043,06	1901,77	141,29
1983/1984	1374,60	1282,42	92,18
1984/1985	2018,52	2057,36	-38,84
1985/1986	1514,93	1398,16	116,77
1986/1987	1522,77	1369,90	152,87
1987/1988	1405,69	1448,20	-42,51
1988/1989	1418,59	1375,72	42,87
1989/1990	1544,36	1487,42	56,94
1990/1991	1898,62	1713,88	184,74
1991/1992	1810,51	1664,77	145,74
1992/1993	1690,77	1556,46	134,31
1993/1994	1478,63	1387,12	91,51
1994/1995	1398,62	1321,40	77,22
1995/1996	1654,01	1618,00	36,01
2000/2001	1220,97	1153,77	67,2
2003/2004	1603,40	1667,74	-64,34
Média	1602,77	1533,42	69,4

3.2.2. Índices utilizados na comparação do escoamento superficial direto nas duas áreas de drenagem

Para a análise da influência da impermeabilização pela urbanização no escoamento superficial direto, é necessária a remoção das outras fontes de não-estacionariedade que interferem na variabilidade da vazão (HUANG; ZHANG, 2004). Portanto, é necessária uma análise conjunta sobre o comportamento da precipitação, do escoamento subterrâneo e do escoamento superficial direto em uma dada região. Neste sentido, a análise da influência da urbanização no escoamento superficial direto foi feita através da comparação de três relações:

- a razão entre o volume total que escoo no rio e o volume total precipitado na área de drenagem da estação fluviométrica;
- a razão entre o volume de escoamento superficial direto e o volume total que escoo no rio; e

- a razão entre volume de escoamento superficial direto e o volume total precipitado na área de drenagem da estação fluviométrica.

Estas três relações contam com fatores importantes que interferem na variação do escoamento nas áreas de drenagem, que são a evapotranspiração, o escoamento subterrâneo e a precipitação.

A razão entre o volume total que escoo no rio e o volume total precipitado (PEREIRA *et al.*, 2007), foi designada como coeficiente de escoamento total, e é calculada pela equação:

$$CET = \frac{\sum_{i=1}^{ud} V_{(i)}}{10 A Pt} \quad (19)$$

em que

- CET = coeficiente de escoamento total, %;
- ud = último dia do ano hidrológico;
- $V_{(i)}$ = volume de escoamento total, m³;
- A = área de drenagem da estação fluviométrica, km²; e
- Pt = precipitação total na área, mm.

A razão entre o volume de escoamento superficial direto e o volume total que escoo no rio (GONZALES *et al.*, 2009) foi designada como índice de escoamento superficial direto, e é calculada pela equação:

$$IES = \frac{V_{ESa}}{\sum_{i=1}^{ud} V_{(i)}} - 100 \quad (20)$$

em que

- IES = índice de escoamento superficial direto, %; e
- V_{ESa} = volume de escoamento superficial direto total anual, m³.

A razão entre o volume de escoamento superficial direto total anual e o volume total anual precipitado foi designada como coeficiente de escoamento superficial direto, e é calculada pela equação:

$$CES = \frac{V_{ESa}}{10 A Pt} \quad (21)$$

em que CES é o coeficiente de escoamento superficial direto, %.

A análise da influência da urbanização no escoamento superficial direto foi feita utilizando o mesmo procedimento para avaliar se o valor de $\hat{\beta}_1$ se aproxima da unidade, considerando o modelo de regressão dado pela equação 12 (item 3.1.3.2). Nos casos em que aconteceram diferenças significativas nas comparações entre as áreas EJ e EM os vieses foram calculados pela diferença dos valores de $\hat{\beta}_1$ com relação a um. O viés indica o quanto que, em média, a área EJ, influenciada pela impermeabilização provocada pela RMBH, produziu a mais (viés positivo) ou a menos (viés negativo) em termos dos valores de CET, de IES e de CES em comparação com a área EM.

As estatísticas d e NS (equações 16 e 17) também foram utilizadas para confirmar se ocorreu diferença entre os valores estimados para cada área. Neste caso foram comparados os valores de CET, de IES, e de CES obtidos para cada área considerando as bases anuais de escoamento superficial direto e de precipitação, com base no ano hidrológico de cada área, e utilizando cada um dos métodos de separação.

Os índices CET, IES e CES estimados para a área de drenagem da estação a jusante (41260000), assumiram a condição de variável dependente (Y_i), sendo designados como CET_{EJ} , IES_{EJ} e CES_{EJ} , respectivamente. Já os valores estimados para a área de drenagem da estação a montante (41199998), assumiram a condição de variável independente (X_i), sendo designados como CET_{EM} , IES_{EM} e CES_{EM} , respectivamente.

3.3. Desenvolvimento do sistema computacional para a aplicação dos métodos de separação do escoamento superficial direto do escoamento subterrâneo

Foi desenvolvido um sistema computacional configurado de forma a atender os padrões dos bancos de dados de vazão e de chuvas provenientes do sistema *HidroWeb*

(ANA, 2011), e a aplicação dos métodos IF, IM e ML. A organização do sistema foi feita considerando a sequência lógica apresentada no fluxograma da Figura 13.

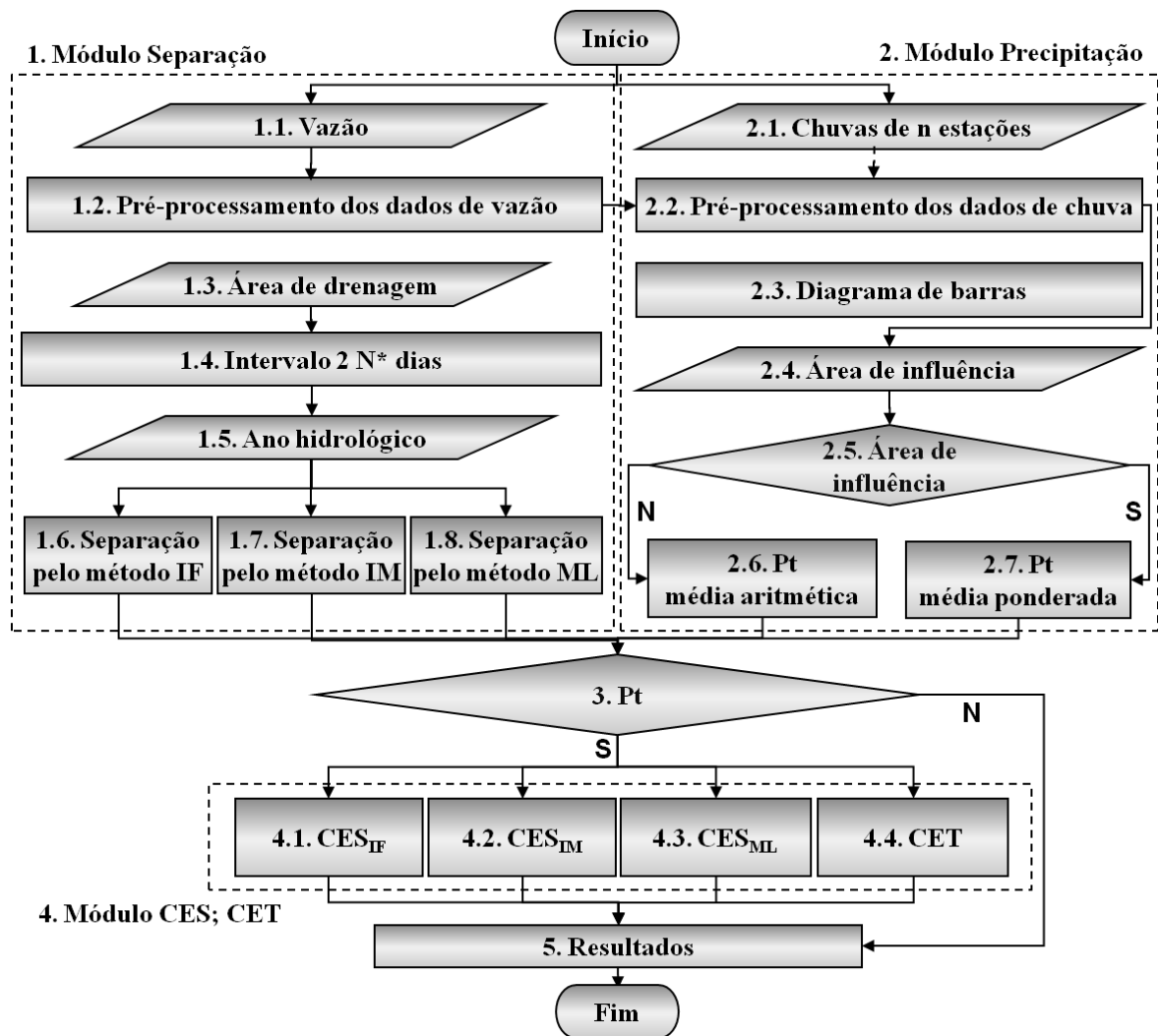


Figura 13. Fluxograma do sistema computacional.

As etapas apresentadas no fluxograma da Figura 13 consistem nos seguintes procedimentos:

1. Módulo Separação

1.1. Vazão: entrada de dados de vazão;

1.2. Pré-processamento dos dados de vazão: identificação e remoção de anos com excesso de falhas na série de vazões;

- 1.3. Área de drenagem: entrada de dado referente à área de drenagem da estação fluviométrica, necessário para o cálculo de CES e para a definição do intervalo $2N^*$ dias;
- 1.4. Intervalo $2N^*$ dias: após o passo 1.3 é calculado o intervalo $2N^*$ dias utilizado nos métodos de separação;
- 1.5. Ano hidrológico: após o passo 1.2, o usuário deverá analisar os hidrogramas e definir o ano hidrológico;
- 1.6. Separação pelo método IF: cálculo de Q_{ESub_IF} , V , V_{ESub_IF} , V_{ESd_IF} e IES_{IF} para cada ano hidrológico considerado na série de dados;
- 1.7. Separação pelo método IM: cálculo de Q_{ESub_IM} , V , V_{ESub_IM} , V_{ESd_IM} e IES_{IM} para cada ano hidrológico considerado na série de dados;
- 1.8. Separação pelo método ML: cálculo de Q_{ESub_ML} , V , V_{ESub_ML} , V_{ESd_ML} e IES_{ML} para cada ano hidrológico considerado na série de dados;

2. Módulo Precipitação

- 2.1. Chuvas de n estações: entrada de dados de chuvas das estações pluviométricas. Além da separação do escoamento superficial do escoamento subterrâneo pelos três métodos (IF, IM e ML), o sistema computacional permite o cálculo da precipitação média considerando dados de até 100 estações pluviométricas;
- 2.2. Pré-processamento dos dados de chuvas: identificação e remoção de anos com excesso de falhas na série de chuvas e pareamento dos dados de chuva pré-processados com os dados de vazão pré-processados. Antes do pré-processamento dos dados de chuvas é necessário proceder aos passos 1.1 e 1.2, pois os dados de chuvas serão selecionados de acordo com os dados de vazão selecionados previamente;
- 2.3. Diagrama de barras: após os passos 1.2 e 2.2, referentes ao pré-processamento dos dados de vazão e de chuvas, o usuário poderá verificar a disponibilidade dos dados das estações fluviométricas e pluviométricas por meio da construção de um diagrama de barras;
- 2.4. Área de influência: preenchimento das áreas de influência das estações pluviométricas definidas pelos polígonos de Thiessen. Este passo é necessário apenas quando o usuário optar pelo método da média ponderada para a estimativa

- dos valores de Pt. Este critério deve ser utilizado com cuidado, pois os polígonos de Thiessen devem ser reformulados e os novos valores das áreas de influência devem ser preenchidos caso ocorram falhas nos bancos de dados de alguma estação pluviométrica;
- 2.5. Verificação se foram fornecidos os dados das áreas de influência das estações pluviométricas;
 - 2.6. Pt média aritmética: cálculo dos valores de Pt pelo método da média aritmética, quando a resposta do passo 2.5 é negativa;
 - 2.7. Pt média ponderada: cálculo dos valores de Pt pelo método da média ponderada, quando a resposta do passo 2.5 é positiva;
3. Verificação se os valores de Pt foram calculados;
4. Módulo CES; CET
 - 4.1. CES_{IF}: cálculo dos valores de CES pelo método IF quando a resposta do passo 3 é positiva;
 - 4.2. CES_{IM}: cálculo dos valores de CES pelo método IM quando a resposta do passo 3 é positiva;
 - 4.3. CES_{ML}: cálculo dos valores de CES pelo método ML quando a resposta do passo 3 é positiva;
 - 4.4. CET: cálculo dos valores de CET; e
5. Resumo dos resultados: apresentação dos resultados em tabelas e gráficos.

A versão atual do sistema computacional foi desenvolvida em linguagem *Visual Basic* – VBA, com as rotinas computacionais e a interface planejada em ambiente do *Microsoft Office Excel*, para que permita melhor interatividade do usuário com o sistema.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Sistema Computacional para a aplicação dos métodos de separação do escoamento superficial direto do escoamento subterrâneo

O sistema computacional desenvolvido possui interface simples e objetiva, planejada no *Microsoft Office Excel*, e um requisito para sua utilização é a inserção de dados de vazão e de chuvas nos formatos padrões dos bancos de dados do sistema *HidroWeb* (ANA, 2011). Na Figura 14 é apresentada a tela inicial do sistema computacional, o qual foi denominado SepHidro.



Figura 14. Tela de apresentação do sistema computacional.

Pressionando-se o botão “Iniciar” o usuário é conduzido para a interface intermediária, na qual ele optará pela entrada de dados, caso esteja iniciando um novo

projeto, ou pela separação, caso ele esteja trabalhando com um projeto salvo anteriormente (Figura 15).

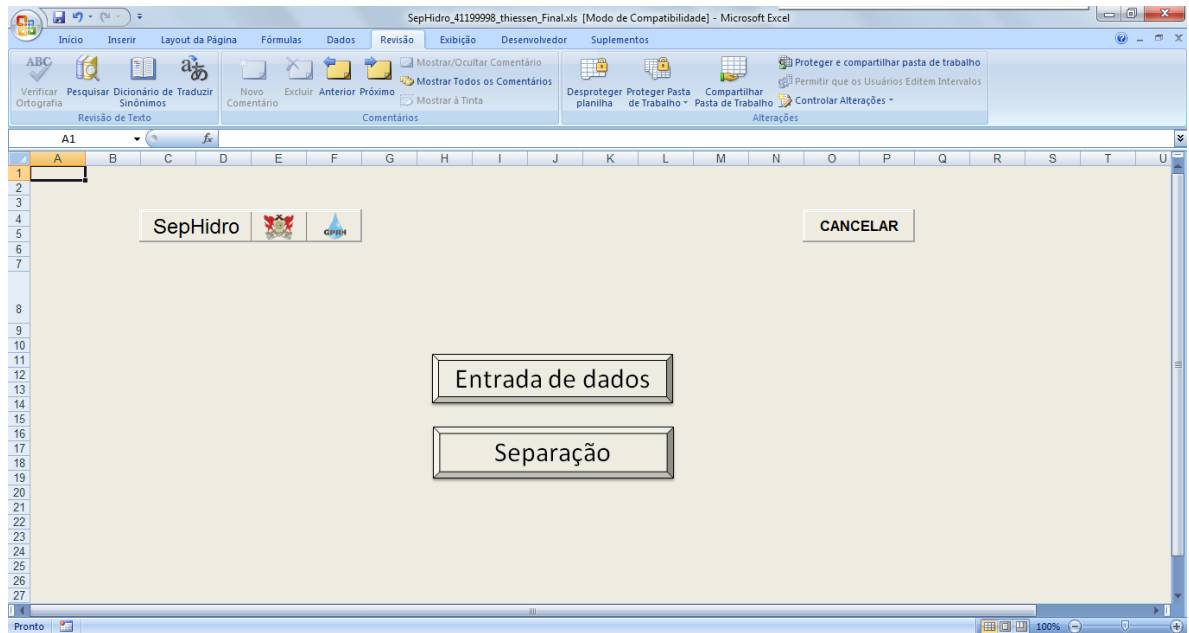


Figura 15. Tela de acesso aos módulos de entrada de dados e de separação.

Pressionando-se o botão “Entrada de dados” o usuário é conduzido para a interface de entrada de dados de chuva e de vazão (Figura 16).

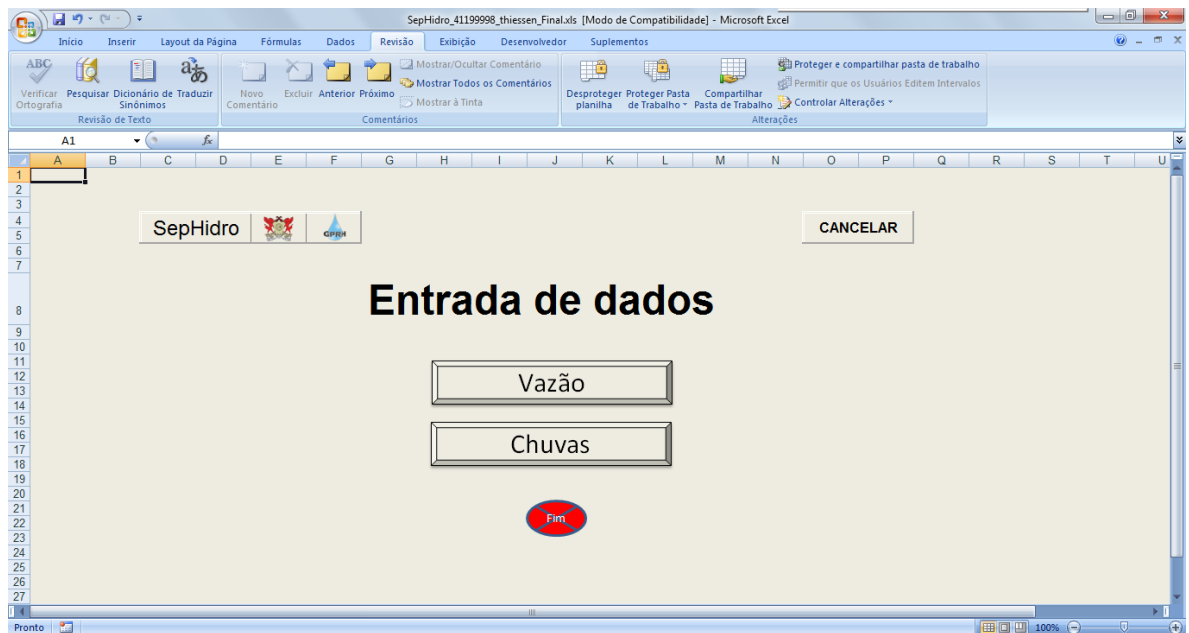



Figura 16. Tela de acesso à entrada de dados de vazão e de chuvas.

Na tela apresentada na Figura 16, ao pressionar o botão “Vazão” o usuário é direcionado a uma planilha na qual deverá ser inserido o conteúdo selecionado e copiado da tabela de vazões do arquivo *Access* correspondente à estação fluviométrica obtida do sistema *HidroWeb* (Figura 17).

The screenshot shows the Microsoft Access interface with a table named 'Vazoes' open in Datasheet view. The table contains 20 rows of data. A context menu is displayed over the first row, with the 'Copiar' option selected. The table columns are: Registro, Importado, Temporario, Removido, Importador, EstacaoCodi, NivelConsis, Data, Hora, MediaDiaria, MetodoObt, and Maxima.

Registro	Importado	Temporario	Removido	Importador	EstacaoCodi	NivelConsis	Data	Hora	MediaDiaria	MetodoObt	Maxima
0	0	0	0	0	41199998	1	01/01/2006		1	1	1
1	0	0	0	0	41199998	1	01/02/2006		1	1	1
2	0	0	0	0	41199998	1	01/03/2006		1	1	7
3	0	0	0	0	41199998	1	01/04/2006		1	1	4
4	0	0	0	0	41199998	1	01/05/2006		1	1	2
5	0	0	0	0	41199998	1	01/06/2006		1	1	1
6	0	0	0	0	41199998	1	01/07/2006		1	1	2
7	8	0	0	0	41199998	1	01/08/2006		1	1	1
8	9	0	0	0	41199998	1	01/09/2006		1	1	2
9	10	0	0	0	41199998	1	01/10/2006		1	1	5
10	11	0	0	0	41199998	1	01/11/2006		1	1	5
11	12	0	0	0	41199998	1	01/12/2006		1	1	1
12	13	0	0	0	41199998	1	01/01/2007		1	1	1
13	14	0	0	0	41199998	1	01/03/2007		1	1	5
14	15	0	0	0	41199998	1	01/04/2007		1	1	6
15	16	0	0	0	41199998	1	01/05/2007		1	1	3
16	17	0	0	0	41199998	1	01/06/2007		1	1	2
17	18	0	0	0	41199998	1	01/07/2007		1	1	2
18	19	0	0	0	41199998	1	01/08/2007		1	1	1
19	20	0	0	0	41199998	1	01/09/2007		1	1	1

Figura 17. Tabela do arquivo *Access* com os dados de vazão de uma estação fluviométrica obtida do sistema *HidroWeb*.

Para copiar todo o conteúdo da tabela de vazões do arquivo *Access*, basta pressionar com o botão direito do *mouse* no ícone  no canto superior esquerdo da tabela (Figura 17) e selecionar a opção “copiar”.

Voltando ao *software* SepHidro, basta selecionar com o botão direito do *mouse* na primeira célula da planilha (célula A1), a qual será preenchida com os dados da estação fluviométrica após a seleção da opção “colar” (Figura 18).

Inserido o conteúdo da tabela de vazões do arquivo *Access* na planilha do SepHidro, basta pressionar o botão “Voltar” para retornar à tela apresentada na Figura 16. Estando novamente na tela da Figura 16 basta pressionar o botão “Chuvas” para acessar a planilha na qual serão inseridos os dados da tabela chuvas do arquivo *Access* da estação pluviométrica obtida do sistema *HidroWeb*.

RegistroID	RepeticaoCodigo	Consistencia	Data	Hora	MediaDiaria	Obtencao	Maxima	Minima	Media	DiaMaxima	DiaMinima	maximaStat	minimaStat	mediaStat
1	0	60635000	1 01/01/2007		1	1	24,6	5,01	9,7	12	9	1	1	1
2	0	60635000	1 01/02/2007		1	1	36,4	9,3	18	9	25	1	1	1
3	0	60635000	1 01/03/2007		1	1	20,4	6,73	9,92	1	31	1	1	1
4	0	60635000	1 01/04/2007		1	1	8,64	3,64	6,24	9	8	1	1	1
5	0	60635000	1 01/05/2007		1	1	6,23	3,81	4,62	1	28	1	1	1
6	0	60635000	1 01/06/2007		1	1	5,14	3,03	3,68	30	23	1	1	1
7	0	60635000	1 01/07/2007		1	1	5,41	2,36	2,94	1	18	1	1	1
8	0	60635000	1 01/08/2007		1	1	2,78	2,03	2,26	2	27	1	1	1
9	0	60635000	1 01/09/2007		1	1	2,11	1,46	1,69	1	27	1	1	1
10	0	60635000	1 01/10/2007		1	1	2,19	1,34	1,78	3	11	1	1	1
11	0	60635000	1 01/11/2007		1	1	5,32	2,07	3,09	6	25	1	1	1
12	0	60635000	1 01/12/2007		1	1	3,64	1,74	2,69	27	4	1	1	1
13	0	60635000	2 01/11/1947		1	1	9,26884			30	1	0	0	0
14	0	60635000	2 01/12/1947		1	1	12,96721	3,713028	5,866829	28	15	1	1	1
15	0	60635000	2 01/01/1948		1	1	8,706575	4,368844	6,061525	8	31	1	1	1
16	0	60635000	2 01/02/1948		1	1	8,892254	4,368844	6,877271	19	1	1	1	1
17	0	60635000	2 01/03/1948		1	1	19,00074	5,365967	9,236718	11	3	1	1	1
18	0	60635000	2 01/04/1948		1	1	10,04282	3,713028	5,413898	1	16	1	1	1
19	0	60635000	2 01/05/1948		1	1	8,706575	4,100819	4,662353	6	10	1	1	1
20	0	60635000	2 01/06/1948		1	1	7,804493	3,464079	4,831503	26	22	1	1	1
21	0	60635000	2 01/07/1948		1	1	5,144629	3,713028	4,573072	22	13	1	1	1
22	0	60635000	2 01/08/1948		1	1	4,999383	3,904778	4,595464	5	29	1	1	1
23	0	60635000	2 01/09/1948		1	1	5,976422	3,464079	4,186956	15	14	1	1	1

Figura 18. Planilha de entrada de dados de vazão.

O procedimento para copiar e inserir os dados da tabela chuvas é o mesmo descrito anteriormente para a cópia e inserção dos dados de vazão. A diferença do preenchimento dos dados de chuvas com relação aos dados de vazão é que o usuário pode preencher até 100 planilhas com dados de chuvas de estações pluviométricas distintas para a estimativa da precipitação anual média em relação à área de drenagem da estação fluviométrica (Figura 19).

RegistroID	RepeticaoCodigo	Consistencia	Data	poMedicaoChuv	Maxima	Total	DiaMaxima	DiasDeChuv	maximaStat	TotalStatusDeChuv	TotalAnual	AnualSta	Chuva01	Chuva0
2	0	1943000	1 02/02/1900		1	261,1	261,1	28	1	0	0	0	0	0
3	0	1943000	1 01/03/1900		1	301,5	301,5	31	1	0	0	0	0	0
4	0	1943000	1 01/04/1900		1	91,4	91,4	30	1	1	1	1	0	0
5	0	1943000	1 01/05/1900		1	121,9	121,9	31	1	0	0	0	0	0
6	0	1943000	1 01/06/1900		1	35,6	35,6	30	1	0	0	0	0	0
7	0	1943000	1 01/07/1900		1	0,5	0,5	31	1	0	0	0	0	0
8	0	1943000	1 01/08/1900		1	7,1	7,1	31	1	0	0	0	0	0
9	0	1943000	1 01/09/1900		1	127	127	30	1	0	0	0	0	0
10	0	1943000	1 01/10/1900		1	64,5	64,5	31	1	0	0	0	0	0
11	0	1943000	1 01/11/1900		1	332	332	30	1	0	0	0	0	0
12	0	1943000	1 01/12/1900		1	639,8	639,8	31	1	0	0	0	0	0
13	0	1943000	1 01/01/1901		1	442,7	442,7	31	1	0	0	0	0	0
14	0	1943000	1 01/02/1901		1	235,3	235,3	28	1	0	0	0	0	0
15	0	1943000	1 01/03/1901		1	416,3	416,3	31	1	0	0	0	0	0
16	0	1943000	1 01/04/1901		1	28,4	28,4	30	1	0	0	0	0	0
17	0	1943000	1 01/05/1901		1	0,8	0,8	31	1	0	0	0	0	0
18	0	1943000	1 01/06/1901		1	2	2	30	1	0	0	0	0	0
19	0	1943000	1 01/07/1901		1	21,6	21,6	31	1	0	0	0	0	0
20	0	1943000	1 01/08/1901		1	0,2	0,2	31	1	0	0	0	0	0
21	0	1943000	1 01/09/1901		1	66,8	66,8	30	1	0	0	0	0	0
22	0	1943000	1 01/10/1901		1	56,6	56,6	31	1	0	0	0	0	0
23	0	1943000	1 01/11/1901		1	214,6	214,6	30	1	0	0	0	0	0

Figura 19. Planilha de entrada de dados de chuvas.

Em cada planilha de preenchimento de dados de chuvas (Figura 19) existe um botão “Próximo”, que permite acessar outras planilhas para a inserção de dados de outras estações pluviométricas.

As planilhas de entrada de dados de chuvas também dispõem de um botão “Fim”, para retornar à tela apresentada na Figura 16. De volta a essa tela, basta o usuário pressionar no botão “Fim” para acessar a tela que oferecerá as opções de pré-processamento dos dados de vazão e de chuvas e também as opções de aplicação das três técnicas de separação, além do cálculo da precipitação média (Figura 20).

No módulo “Separação” (Figura 20, campo A), pressionando no botão “Pré-processamento dos dados de vazão”, os dados de vazão da planilha passarão por um processo de análise de falhas, seleção e organização dos dados com nível de consistência 2 dos anos sem falhas.

No campo “Área da Bacia” (Figura 20, campo B), o usuário deverá fornecer a dimensão da área de drenagem da estação fluviométrica. Esta área de drenagem pode ser obtida no sistema *HidroWeb*, em km². Com isso, é calculado o valor de N dias (equação 6, item 3.1.1), com o qual é calculado o valor de 2N dias. O valor de 2N dias pode não ser um valor inteiro. Portanto, o usuário deverá preencher o campo “2N* dias” (Figura 20, campo C), o valor inteiro imediatamente superior ao valor apresentado no campo “2N dias”.

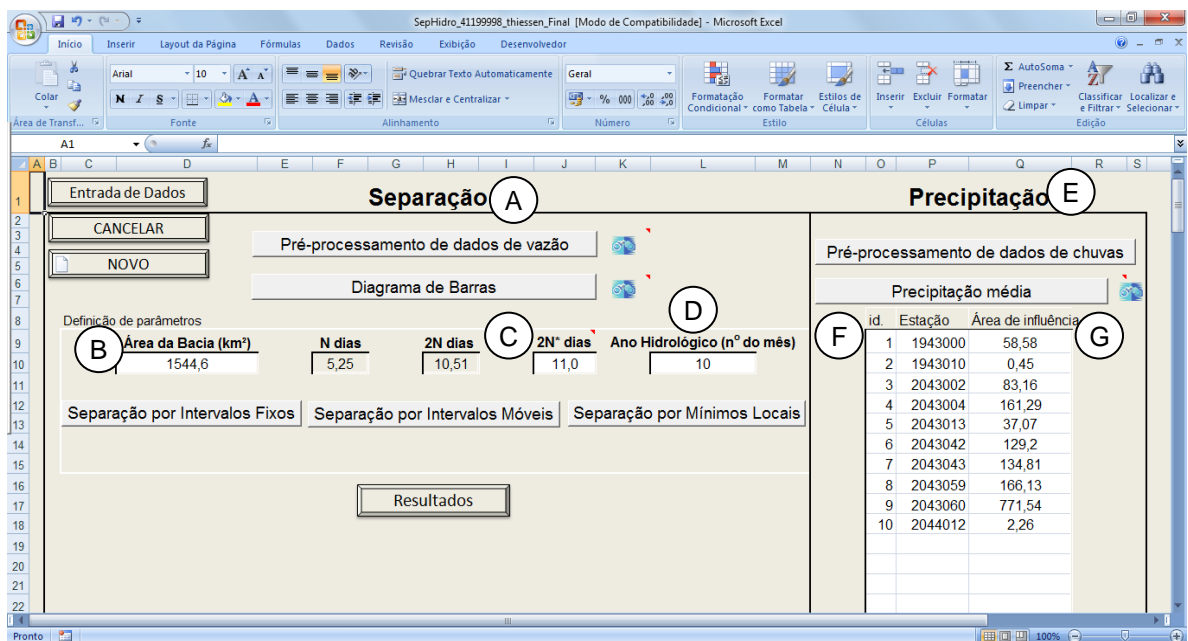


Figura 20. Tela de acesso às funções do software.

No campo “Ano Hidrológico” (Figura 20, campo D) o número correspondente ao mês adotado como início do ano hidrológico é definido pelo usuário. Assim, o ano hidrológico para o cálculo os valores de V_{ES} totais anuais será considerado do primeiro dia do mês adotado até o último dia do mês anterior ao adotado do ano subsequente.

Após o pré-processamento dos dados de vazão, a definição do intervalo $2N^*$ dias e do Ano Hidrológico, e ainda na tela da Figura 20, o usuário pode então proceder à aplicação dos três métodos de separação pressionando os botões “Separação por Intervalos Fixos (IF)”, “Separação por Intervalos Móveis (IM)” e “Separação por Mínimos Locais (ML)”.

No módulo “Precipitação” (Figura 20, campo E), com o botão “Pré-processamento de dados de chuvas”, os dados de chuvas de cada uma das estações pluviométricas que foram preenchidas nas planilhas passarão por um processo de análise de falhas e organização dos dados com nível de consistência 2 dos anos sem falhas. Serão selecionados os dados de chuvas correspondentes a cada dia dos dados de vazão selecionados no pré-processamento dos dados da estação fluviométrica. Assim, é feito o pareamento dos dados de chuvas com os dados de vazão para os estudos envolvendo o balanço hídrico diário e anual.

No pré-processamento dos dados de chuvas, os campos relacionados ao “id” e à “Estação” (Figura 20, campo F) serão preenchidos com os códigos referentes às estações pluviométricas selecionadas. Assim, o usuário pode fornecer o valor da área de influência de cada estação pluviométrica nos campos “Área de influência” (Figura 20, campo G). Se os campos referentes às áreas de influência das estações não forem preenchidos a precipitação média é calculada considerando a média aritmética dos dados das estações. Caso estes valores sejam substituídos por fatores de ponderação como, por exemplo, a área de influência de cada estação dada pelos polígonos de Thiessen, então a precipitação média é calculada por média ponderada.

Além das opções de pré-processamento dos dados de vazão e de chuvas, existe a opção “Diagrama de Barras”, que permite a obtenção de um diagrama que mostra os níveis de falhas totais anuais nas séries de dados da estação fluviométrica e de cada uma das estações pluviométricas analisadas. O diagrama de barras gerado pelo sistema computacional é similar ao apresentado na Figura 21.

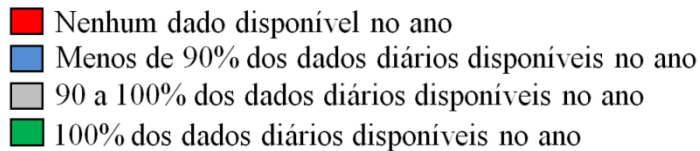
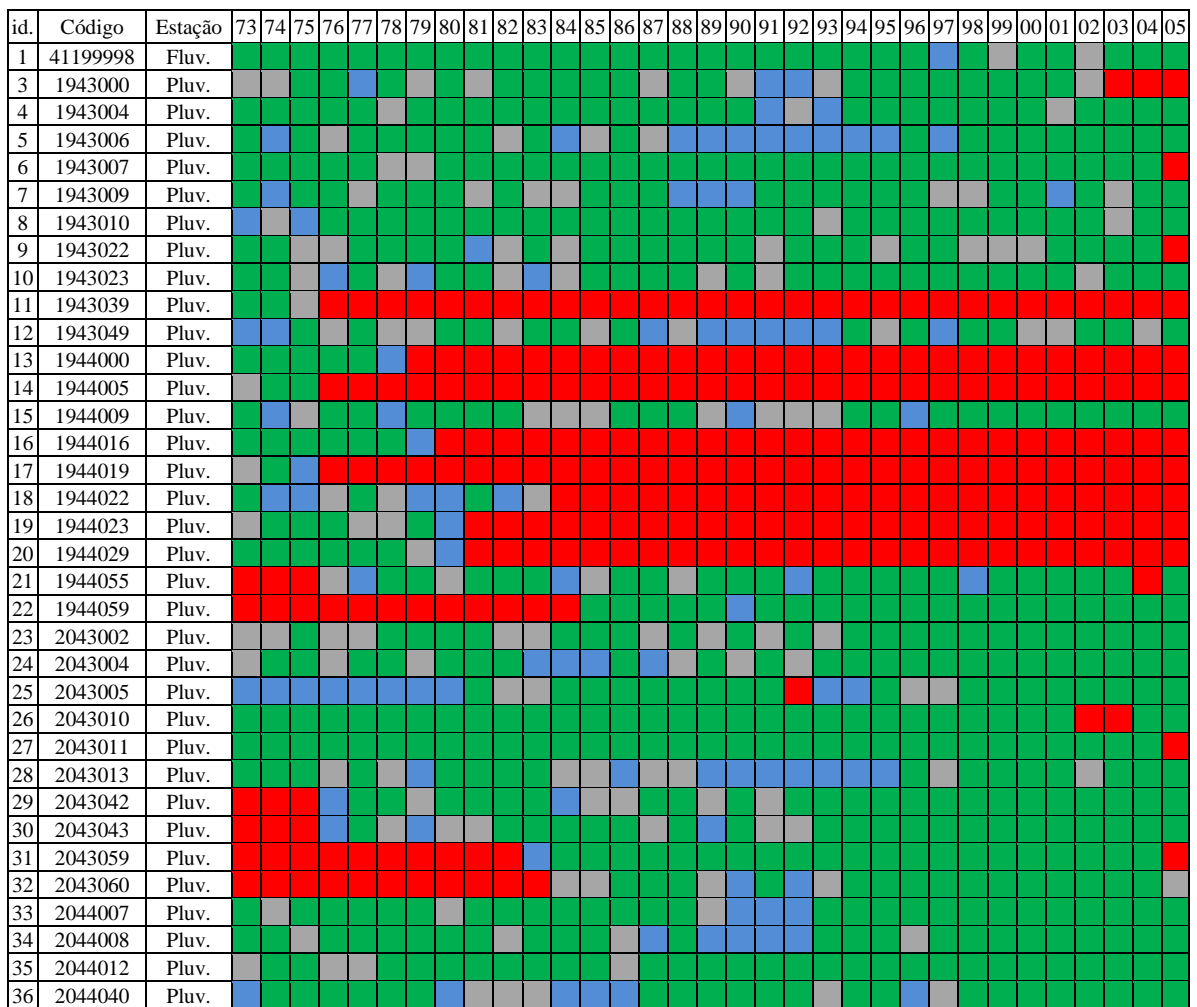



Figura 21. Diagrama de barras com a disponibilidade anual de registros fluviométricos da estação 41199998 e pluviométricos nas estações selecionadas.

Ao lado dos botões “Pré-processamento de dados de vazão”, “Diagrama de Barras” e “Precipitação média” está disponível um ícone  (Figura 20) que permite acessar as planilhas que contém os dados pré-processados de vazão, o diagrama de barras e a precipitação média, respectivamente. A planilha do pré-processamento dos dados de vazão contém os dados de vazão dos anos sem falhas e os dados de Q_{ES} , Q_{ESub} , V_{ES} e de V_{ESub} , calculados para cada dia da série selecionada. Já a planilha da precipitação média contém os dados de precipitação diária dos anos sem falhas de cada estação pluviométrica,

considerando também os dados de vazão previamente selecionados, e contem os valores de Pt calculados para cada ano hidrológico da série.

Após o processamento dos dados é possível gerar gráficos diversos utilizando os próprios recursos do *Microsoft Office Excel*, como o exemplo apresentado na Figura 22.

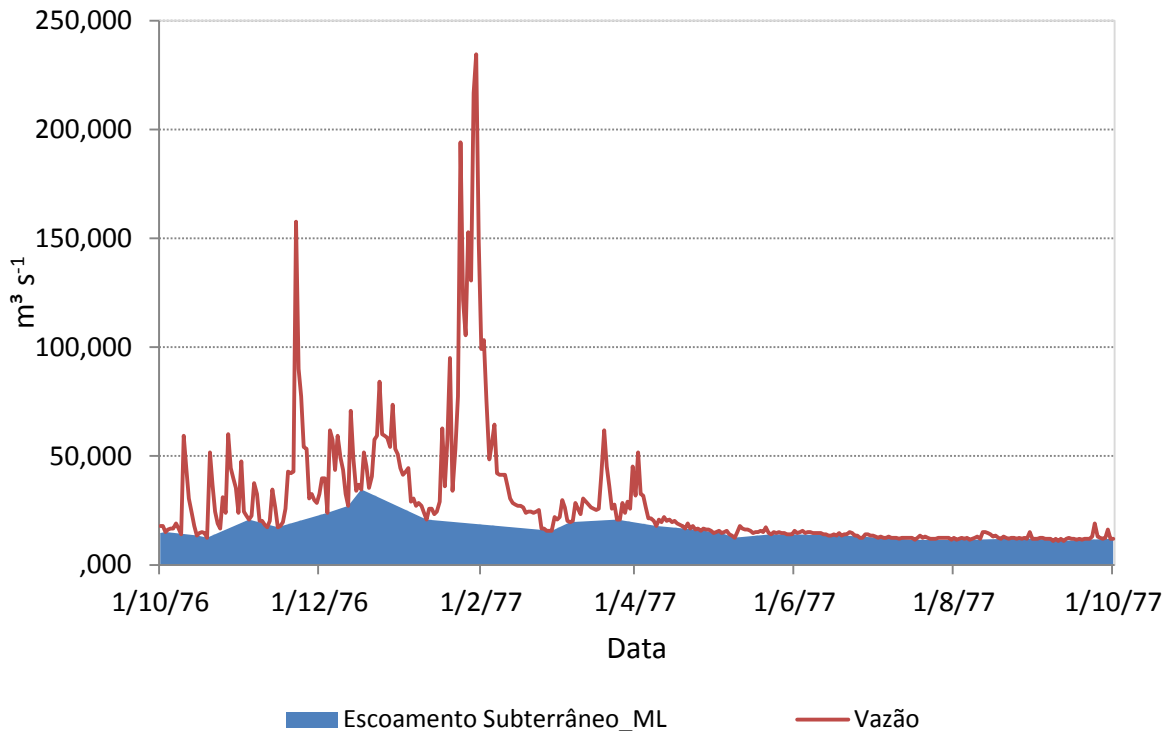


Figura 22. Gráfico com os dados processados pelo sistema computacional desenvolvido, referente ao método ML.

Com os botões “Novo” e “Entrada de Dados” (Figura 20) o usuário pode proceder a limpeza de todas as células preenchidas e voltar à tela que dá acesso à entrada de dados de vazão e de chuvas (Figura 16), respectivamente, para que se inicie um novo projeto.

Com o botão “Resultados” é acessada a planilha que contém os dados de V_{ESa} , Pt, CET, IES e de CES para cada ano da série analisada (Figura 23). Nesta planilha são disponibilizados os volumes de escoamento superficial direto e de escoamento subterrâneo, que são apresentados em termos de lâminas de escoamento superficial direto (LES) e de lâmina de escoamento subterrâneo (LESub), para facilitar a comparação com os totais precipitados na área. São apresentados também os valores médios de longa duração para

cada mês do ano tanto para os valores de LES e LESub, obtidos por cada método de separação, quanto dos valores de CET, IES e de CES.

	anos	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	TMA	1973	1974	1975	1976	1977
Pt (mm)	30	166,87	147,90	146,14	149,93	159,76	162,50	139,30	119,51	102,16	97,88	134,80	97,00	348,60	1537,28	1273,93	1356,93	1538,53	1295,57
IF_LESub	30	55,97	46,09	47,30	39,15	33,73	29,41	27,87	26,39	24,86	26,98	30,77	44,86	433,40	399,72	348,11	303,80	286,98	329,56
IF_LES		52,06	24,52	23,00	9,10	4,98	2,97	2,82	2,96	3,97	6,44	17,81	39,70	190,33	193,28	142,43	134,69	158,11	143,89
IM_LESub	30	58,13	46,73	47,40	39,61	34,05	29,52	27,90	26,47	24,99	26,78	30,90	45,56	438,03	404,25	348,50	313,37	282,77	327,49
IM_LES		49,90	23,89	22,90	8,64	4,66	2,87	2,79	2,89	3,85	6,64	17,67	39,01	185,70	188,74	142,03	125,13	162,32	145,96
ML_LESub	30	55,77	47,07	47,95	40,26	34,05	29,71	28,09	26,53	24,94	26,65	30,38	43,31	434,70	402,77	362,70	313,10	287,00	346,65
ML_LES		52,26	23,55	22,35	7,99	4,66	2,67	2,60	2,83	3,90	6,77	18,19	41,26	189,03	190,23	127,83	125,40	158,10	126,80
IF_IES(%)		48,19	34,73	32,72	18,86	12,87	9,16	9,19	10,10	13,77	19,27	36,66	46,95	30,52	32,59	29,03	30,72	35,52	30,39
IF_CES(%)		31,20	16,58	15,74	6,07	3,12	1,83	2,02	2,48	3,89	6,58	13,21	40,93	54,60	12,57	11,18	9,93	10,28	11,11
IM_IES(%)		46,19	33,82	32,58	17,91	12,04	8,85	9,09	9,84	13,34	19,87	36,38	46,13	29,77	31,83	28,95	28,54	36,47	30,83
IM_CES(%)		29,90	16,15	15,67	5,77	2,92	1,76	2,00	2,42	3,76	6,78	13,11	40,22	53,27	12,28	11,15	9,22	10,55	11,27
ML_IES(%)		48,38	33,35	31,79	16,55	12,05	8,24	8,48	9,65	13,51	20,25	37,45	48,79	30,31	32,08	26,06	28,60	35,52	26,78
ML_CES(%)		31,32	15,92	15,29	5,33	2,92	1,64	1,87	2,37	3,81	6,91	13,49	42,53	54,23	12,37	10,03	9,24	10,28	9,79
CET(%)		64,74	47,75	48,10	32,18	24,23	19,93	22,03	24,56	28,22	34,14	36,03	87,18	178,92	38,57	38,51	32,32	28,93	36,54

Figura 23. Planilha contendo o resumo dos resultados da separação.

Um avanço expressivo do sistema computacional proposto em relação aos demais *softwares* existentes para a separação do escoamento superficial direto do escoamento subterrâneo é a consideração dos dados de precipitação em conjunto com os de vazão. Assim, os estudos que envolvam balanço hídrico poderão ser aplicados com maior praticidade por meio da utilização da ferramenta computacional desenvolvida. Outra contribuição importante do sistema computacional é a utilização de dados de vazão e de chuvas em formatos comuns no Brasil.

4.2. Desempenho dos métodos de separação do escoamento superficial direto do escoamento subterrâneo

4.2.1. Comparação entre os métodos IF e IM

Na Tabela 4 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 direto diários (V_{ES}) e totais anuais (V_{ESa}) estimados para as áreas de drenagem das duas estações fluviométricas.

Tabela 4. 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.

Na Figura 24 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.

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 24, 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.

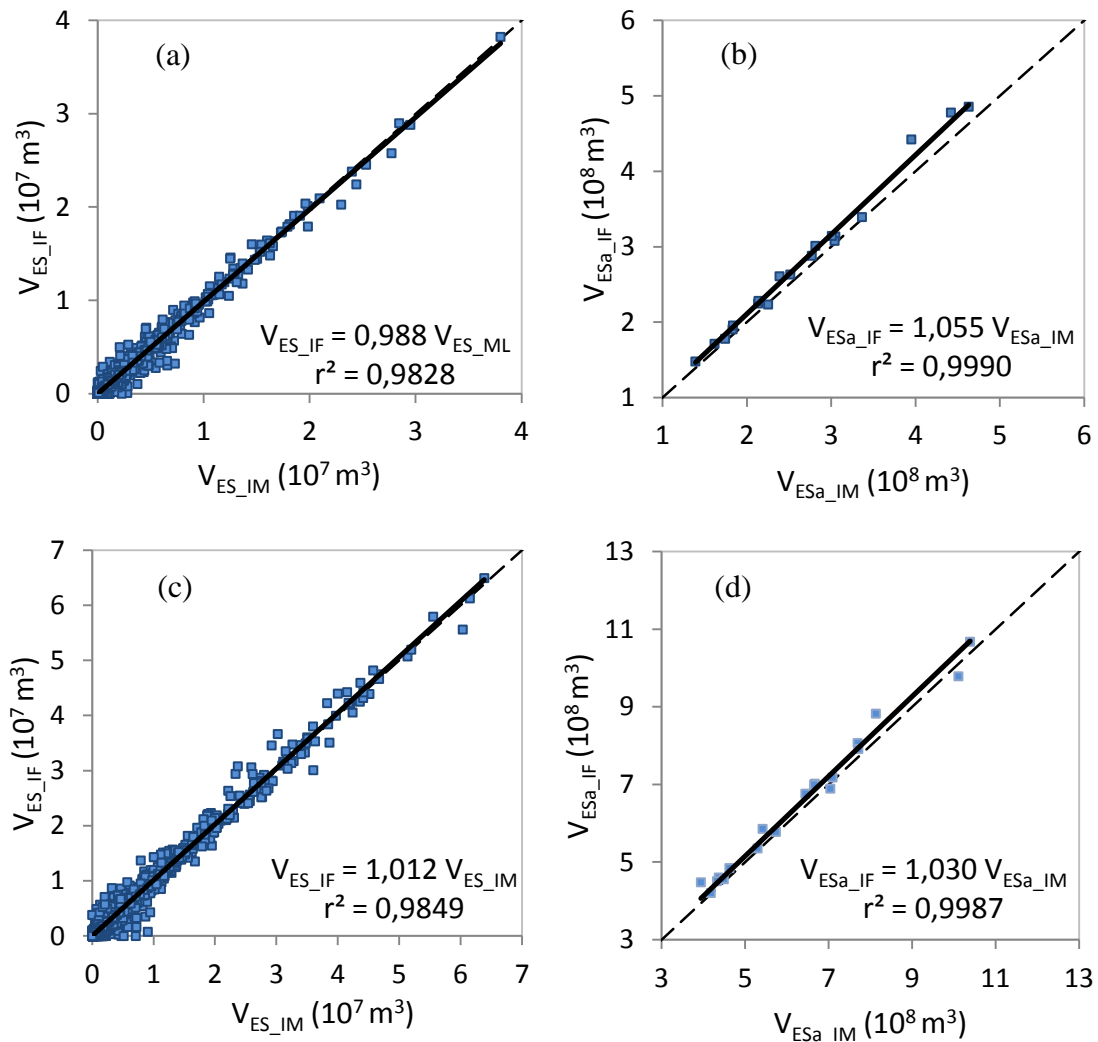


Figura 24. Comparação entre os métodos de separação do Intervalo Fixo (IF) e do Intervalo Móvel (IM) com relação à estimativa dos volumes de escoamento superficial direto diários (V_{ES}) e totais anuais (V_{ESa}) para as áreas de drenagem das estações 41199998 (a, b) e 41260000 (c, d).

Na Tabela 5 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 5. 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	$V_{ES_IF} \times V_{ES_IM}$		$V_{ESa_IF} \times V_{ESa_IM}$	
	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	

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.

No caso da 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 13), que são muito baixos em todas as comparações realizadas, tenderam a apresentar os valores de t_c (equação 15) 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 24a). 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 24b).

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 24c) quanto dos valores de V_{ESa} (Figura 24d).

Os casos apresentados na Figura 24c e na Figura 24d 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 4)

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.

Mesmo que 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} tenham sido significativos em termos estatísticos, vale ressaltar que, em termos práticos, estes vieses podem ser considerados aceitáveis em termos práticos, 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).

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 nas estações fluviométricas, 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.

As análises das variâncias das comparações entre os métodos IF e IM estão disponibilizadas no Apêndice A.

4.2.2. Comparação entre os métodos IM e ML

Na Tabela 6 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 6. 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 25).

Os modelos ajustados nas comparações entre os métodos IM e ML também apresentaram resíduos pequenos (Apêndice A), 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 para as duas áreas de drenagem.

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.

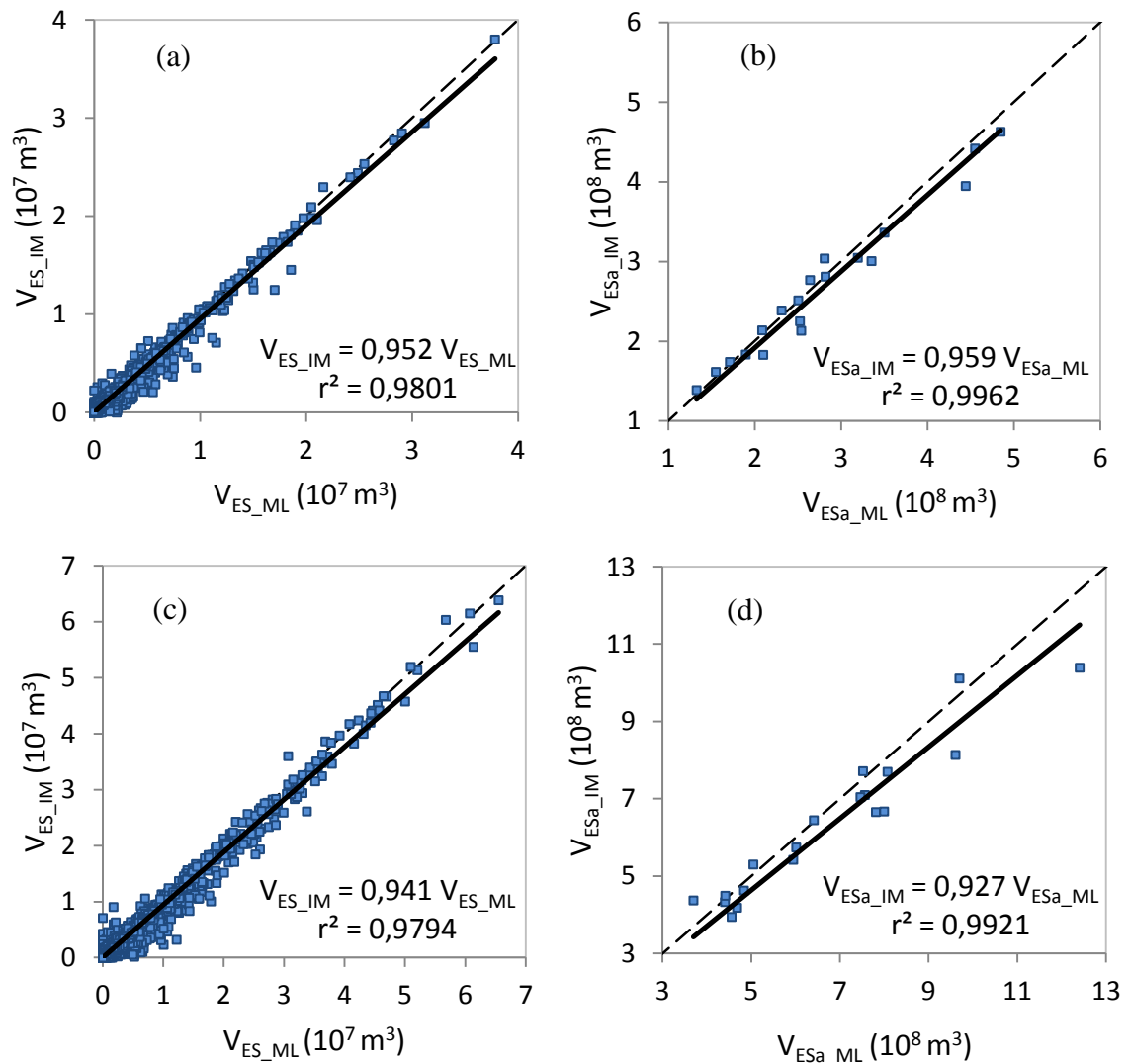


Figura 25. Comparação entre os métodos de separação do Intervalo Móvel (IM) e do Mínimo Local (ML) com relação à estimativa dos volumes de escoamento superficial direto diários (V_{ES}) e anuais (V_{ESa}) para as áreas de drenagem das estações 41199998 (a, b) e 41260000 (c, d).

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 25d).

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.

4.2.3. Comparação entre os métodos IF e ML

Na Tabela 7 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 7. 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 ^{ns}	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 ^{ns}	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 7 foram também 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 26 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.

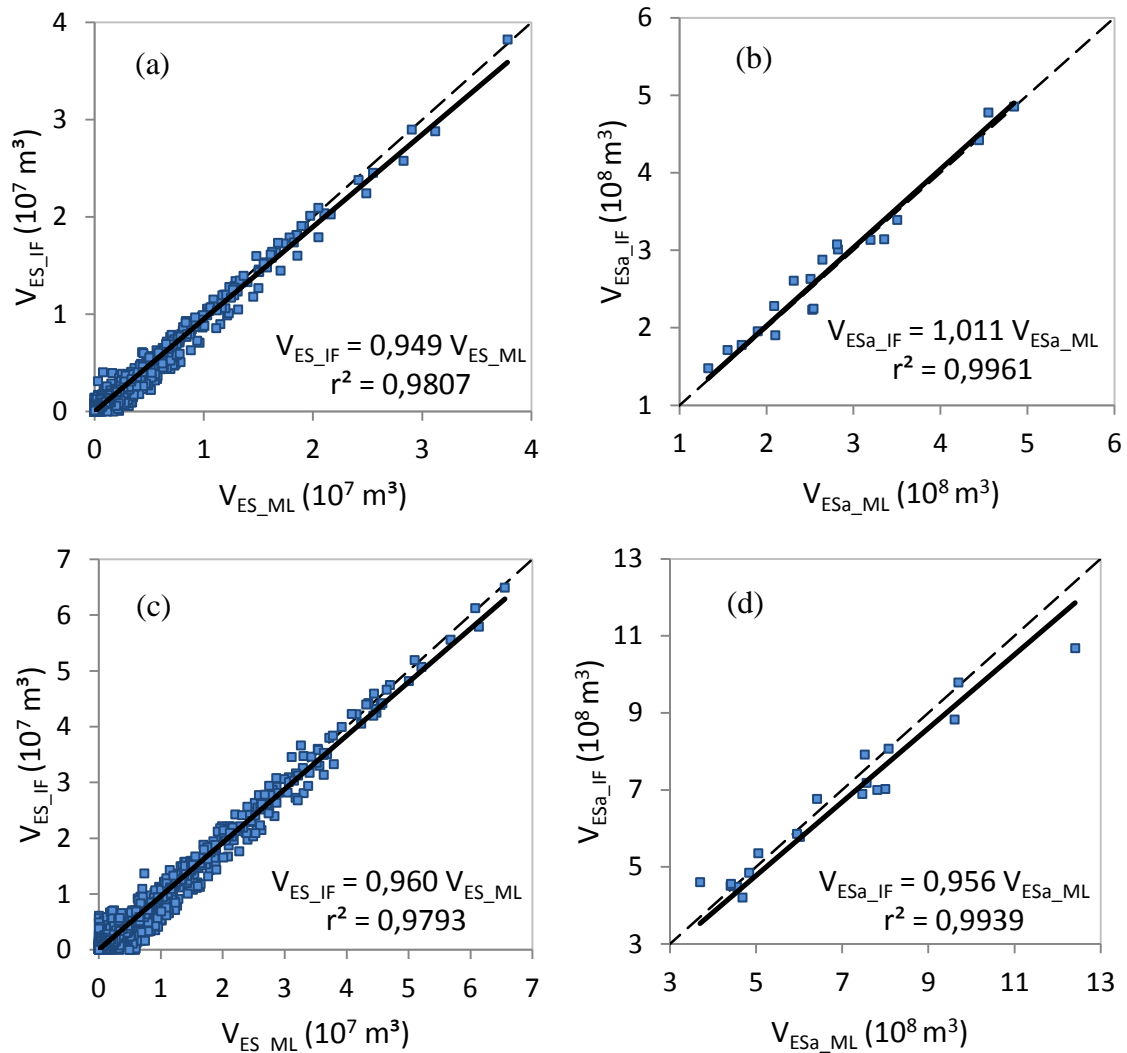


Figura 26. Comparação entre os métodos de separação do Intervalo Fixo (IF) e do Mínimo Local (ML) com relação à estimativa dos volumes de escoamento superficial direto diários (V_{ES}) e anuais (V_{ESa}) para as áreas de drenagem das estações 41199998 (a, b) e 41260000 (c, d).

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 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 (Apêndice A).

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 26a). 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 26b).

Já no caso da comparação entre os valores de V_{ES} estimados pelos métodos IF e ML para a estação 41260000 (Figura 26c), 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 foi verificada para os valores de V_{ESa} estimados para a mesma área de drenagem e pelos mesmos dois métodos (Figura 26d), mesmo que, neste caso tenha sido verificado o valor de $\hat{\beta}_1$ que mais se distanciou da unidade. 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 ele seja o que mais se diferiu de um. Este resultado deve estar afeto às maiores dispersões das estimativas em relação ao modelo ajustado, levando aos resíduos da regressão mais elevados e interferindo, conseqüentemente, 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 26d, o valor de $\hat{\beta}_1$ se distancia mais da unidade do que os valores de $\hat{\beta}_1$ obtidos em cinco das outras comparações feitas (ver Figuras 24a, 24c, 24d, 25b e 26c). Mesmo assim, os menores vieses destas outras comparações foram considerados significativos, o que é resultado dos menores resíduos das regressões nos casos significativos em comparação com o resíduo apresentado na comparação apresentada na Figura 26d.

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 pequenas diferenças, identificadas como significantes a 5% de probabilidade entre os métodos IF e ML, são aceitáveis sob o ponto de vista prático.

4.3. Influência da impermeabilização pela urbanização no escoamento superficial direto na bacia hidrográfica do Rio das Velhas, MG

Diante do fato de que os valores de V_{ES} e de V_{ESa} estimados pelos métodos IF, IM e ML podem ser considerados semelhantes, foi adotado o método ML na análise da influência da impermeabilização pela urbanização.

A opção pelo método de separação ML partiu do fato de que este é o método que mais se assemelha aos processos manuais de separação. Dentre os métodos IF, IM e ML, o método ML foi também o que permite a obtenção de estimativas de escoamento superficial direto mais próximas às obtidas com o método dos traçadores (GONZALES *et al.*, 2009).

Na Tabela 8 estão disponíveis 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 índices CET, IES e de CES obtidos para as áreas de drenagem das estações 41199998 e 41260000.

Tabela 8. Resultados da análise da influência da impermeabilização pela urbanização no comportamento do escoamento superficial direto

Índices comparados	$\hat{\beta}_1$	d	NS
$CET_{EM} \times CET_{EJ}$	0,908*	0,7956	0,2649
$IES_{EM} \times IES_{EJ}$	1,153*	0,6751	-0,8011
$CES_{EM} \times CES_{EM}$	1,030 ^{ns}	0,8259	0,3983

(*) significativo a 5% de probabilidade.

(ns) não significativo a 5% de probabilidade.

Na Figura 27 são apresentadas as comparações entre os valores dos os coeficientes de escoamento total (CET), dos índices de escoamento superficial direto (IES) e dos coeficientes de escoamento superficial direto (CES) estimados para as áreas EM e EJ.

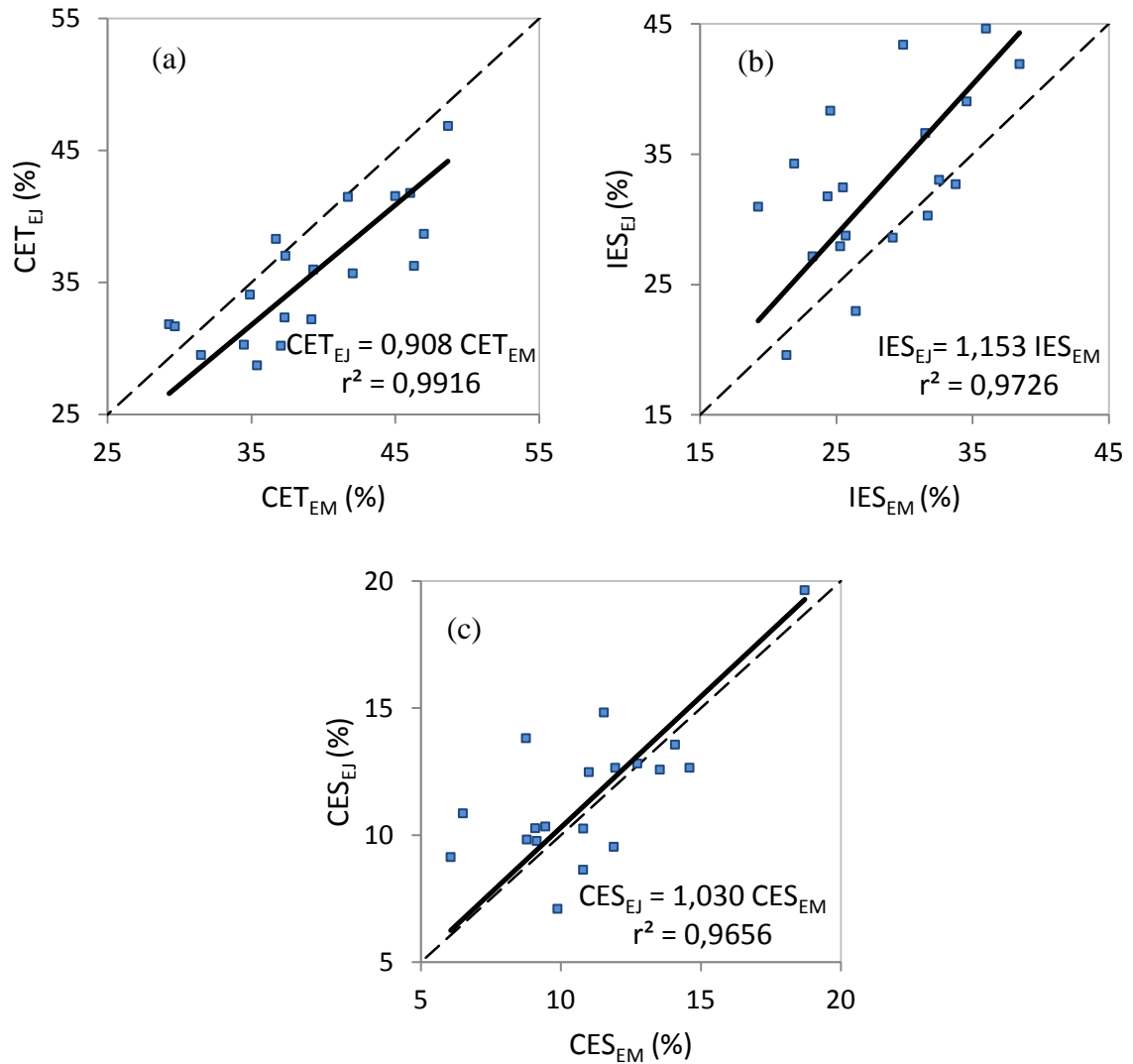


Figura 27. Comparação entre os coeficientes de escoamento total (a), entre os índices de escoamento superficial direto (b), e entre os valores dos coeficientes de escoamento superficial direto (c), estimados para as duas áreas de drenagem estudadas.

Pode-se observar que os testes de hipóteses indicaram que as diferenças dos valores $\hat{\beta}_1$ são significativas a 5% de probabilidade com relação à diferença entre os valores de

CET e de IES obtidos para as duas áreas. Já os valores de CES para as duas áreas não apresentaram diferenças significativas. Neste caso evidencia-se que os resíduos das regressões ajustadas foram maiores do que os resíduos encontrados na análise de desempenho dos métodos de separação (Tabela 9).

Tabela 9. Resíduos das regressões na comparação entre os valores de CES estimados para cada área de drenagem

Comparações		CET _{EM} x CET _{EJ}	IES _{EM} x IES _{EJ}	CES _{EM} x CES _{EM}
F.V.	G.L.	Q.M.	Q.M.	Q.M.
Regressão	1	24194,56	20742,34	2615,56
Resíduo	18	11,40	32,50	5,18
Total	19			

(*) significativo a 5% de probabilidade.

No caso da comparação entre os valores de CES obtidos para as duas áreas de drenagem (Figura 27c), a diferença do valor de $\hat{\beta}_1$ da unidade é maior do que as diferenças apresentadas em algumas das análises de desempenho dos métodos de separação em que as diferenças foram apontadas como significativas (ver Figuras 24a e 24c). Mesmo assim, essa maior diferença do valor de $\hat{\beta}_1$ da unidade no caso da análise do CES foi apontada como não significativa. Com os valores dos quadrados médios dos resíduos maiores, como o exemplo da análise de variância do CES, apresentado na Tabela 9, vale ressaltar que os intervalos de confiança da regressão também são amplos, e o teste de significância menos restritivo. Portanto, apenas as diferenças mais expressivas dos valores de $\hat{\beta}_1$ com relação à unidade são consideradas significativas neste caso; dependendo também do nível de probabilidade adotado.

As análises das variâncias dos modelos de regressão ajustados para a comparação entre os índices CET, IES e CES obtidos para cada área de drenagem estão disponíveis no Apêndice B.

Observa-se também que os valores dos índices d e NS foram muito abaixo dos encontrados nas análises de desempenho dos métodos de separação. Os baixos valores dos

índices d e NS nestes casos indicam, respectivamente, que ocorreu pouca concordância entre os valores de CET , IES e CES estimados para as duas áreas de drenagem, e pouca eficiência da área EJ apresentar os mesmos valores de CET , IES e CES da área EM .

Diante dos maiores resíduos dos modelos de regressão ajustados entre os valores de CET , IES e CES , das maiores diferenças dos valores de $\hat{\beta}_1$ com relação à unidade, e dos menores valores dos índices d e NS , a significância dos vieses entre as duas áreas de drenagem foram consideradas. Os valores de CET_{EM} tenderam a superar em 9,2% os valores de CET_{EJ} (Figura 27a). O CET_{EM} médio foi de 38,9%, enquanto o CET_{EJ} médio foi de 35,3%.

O aumento do coeficiente de escoamento total com o aumento do total precipitado está diretamente associado ao fato de que, com o aumento do total precipitado, menor parte da precipitação será convertida em evapotranspiração, acarretando maior proporção da precipitação convertida em escoamento nos cursos d'água (PEREIRA *et al.*, 2007), o que foi determinante do fato evidenciado, em que o comportamento do CET foi mais influenciado pelas diferenças de precipitação entre as duas áreas do que pela urbanização

Na Figura 27b pode-se constatar a tendência dos valores de IES_{EJ} de superarem os valores IES_{EM} . Esta tendência é indicada pelo viés positivo de 15,3%.

Na área de drenagem da estação 41260000 (EJ) a soma da área urbana e do afloramento rochoso representa 11,3% (ver Figura 10, pg. 34) a mais de impermeabilização do que a impermeabilização na área de drenagem da estação 41199998 (EM). A impermeabilização causada pela urbanização referente à $RMBH$ representa 9,8% desses 11,3%. Assim, a urbanização pode ser considerada, neste caso, como o fator que interfere de forma efetiva na diferença entre as proporções do escoamento superficial direto entre a área EM e a área EJ . Portanto, a área EJ , que sofre influência da $RMBH$, tendeu a apresentar proporções de escoamento superficial direto em relação ao escoamento total de 15,3% maiores do que a área EM , menos urbanizada. Sendo que o valor médio de IES_{EM} é de 28,2%, o valor médio de IES_{EJ} foi de 32,5%, nos anos hidrológicos analisados.

Considerando que os 32,5% do valor médio de IES_{EJ} equivalem ao valor médio de V_{ESa} na área EJ de, aproximadamente, $6,5 \cdot 10^8 \text{ m}^3$, pode-se dizer que 15,3% deste volume de escoamento superficial direto total anual estimado, que correspondem a $1,03 \cdot 10^8 \text{ m}^3$, é resultado da influência da impermeabilização pela urbanização correspondente à $RMBH$.

Ou seja, em média, mais de 100 milhões de m³ de água são perdidos por ano na forma de escoamento superficial direto em virtude da influência da impermeabilização causada pela urbanização correspondente à região metropolitana de Belo Horizonte. No caso dos valores de CES (Figura 27c), a comparação entre as duas áreas não demonstrou que a área EJ, sob influência expressiva da RMBH, apresenta maiores valores proporcionais de escoamento superficial direto em relação à precipitação total anual. Este resultado está afeto à ocorrência, em média, de maiores precipitações na área EM do que na área EJ (Tabela 3, item 3.2.1), tendendo a ocorrerem maiores volumes de escoamento total na área EM, ao mesmo tempo em que, a proporção do escoamento superficial direto na área EJ em relação ao total escoado nesta área é maior, devido ao efeito da urbanização. Ou seja, ocorreu um efeito compensatório dos efeitos da precipitação e da evapotranspiração sobre o incremento do escoamento superficial direto causado pela urbanização, identificado na análise do IES, fazendo com que a tendência deste incremento não fosse evidenciada nos valores de CES_{EJ}.

Considerando também os problemas decorrentes do grande volume de escoamento superficial direto gerado em áreas urbanas (HONG, 2008; CANNAVO *et al.*, 2010), como o exemplo evidenciado na análise da influência da região metropolitana de Belo Horizonte, a adoção de práticas que visem ao controle deste escoamento superficial direto é de extrema importância (NASCIMENTO *et al.*, 1999; DECHESNE *et al.*, 2004; LASSABATERE *et al.*, 2010).

5. CONCLUSÕES

1. 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.
2. A área de drenagem na qual está inserida a região metropolitana de Belo Horizonte apresentou um aumento considerável no escoamento superficial direto em relação à área de drenagem que não sofreu o efeito da urbanização.
3. O sistema computacional desenvolvido (SepHidro) permite a aplicação dos métodos de separação do Intervalo Fixo, Intervalo Móvel e Mínimo Local, e a obtenção dos valores de vazão de escoamento subterrâneo (Q_{ESub}), volume de escoamento total (V), volume de escoamento superficial direto (V_{ES}), volume de escoamento superficial direto anual (V_{ESa}), coeficiente de escoamento total (CET), índice de escoamento superficial direto (IES) e de coeficiente de escoamento superficial direto (CES), a partir dos dados das estações fluviométricas e pluviométricas disponibilizados no sistema *HidroWeb* da ANA.
4. Os métodos de separação fornecem indicativos importantes para o planejamento em bacias hidrográficas.

6. RECOMENDAÇÕES

1. Recomenda-se a utilização da metodologia desenvolvida neste trabalho para a aquisição de informações sobre a influência de diferentes níveis de urbanização, e de aspectos relacionados a outros tipos de uso e manejo do solo, no comportamento do escoamento superficial direto.
2. Recomenda-se o aprimoramento do sistema computacional para a separação do escoamento superficial do escoamento subterrâneo em relação aos seguintes aspectos: o desvinculo do sistema computacional da plataforma do *Microsoft Office Excel*; a incorporação de rotinas que permitam a consulta e o *download* dos bancos de dados das estações do sistema *HidroWeb* por meio do próprio sistema computacional; e incorporação de rotinas que permitam a consulta a partir de mapas de localização das estações pluviométricas e fluviométricas, e o preenchimento de falhas nos bancos de dados de precipitação para o cálculo da precipitação média.

7. REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. HidroWeb:ANA. *Mapas*. Brasília, DF, 2011. Base de Dados em Shapefile.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. HidroWeb:ANA. *Dados Hidrológicos - Séries históricas*. Brasília, DF, 2011. Base de Dados em MDB do Microsoft Office Access.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and drainage paper 56*. FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 1998.
- 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. *Eng. Agríc.*, Jaboticabal, v. 30, n. 6, p.1046-1049, 2010.
- AYER, F. Impermeabilização do solo aumenta risco de enchentes em BH. *Jornal Estado de Minas*. 2010. Disponível em: <http://www.uai.com.br/htmls/app/noticia173/2010/01/18>. Acesso em: outubro de 2011.
- ASBJORNSEN, H.; GOLDSMITH, G. R.; ALVARADO-BARRIENTOS, M. S.; REBEL, K.; OSCH, F. P. V.; RIETKERK, M.; CHEN, J.; GOTSCH, S.; TOBÓN, C.; GEISSERT, D. R.; GÓMEZ-TAGLE, A.; VACHE, K.; DAWSON, T. E. Ecohydrological advances and applications in plant–water relations research: a review. *Journal of Plant Ecology*. v. 4, n. 1-2, p. 3-22, 2011.
- 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.

- BERTOL, G. A. Avaliação da recarga anual no aquífero Bauru no município de Araguari, Minas Gerais. *Dissertação: Magister Scientiae* - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Aprovado em: abril de 2007. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/handle/1843/MPBB-74MN3Y>>. Acesso em: Janeiro de 2010.
- BERTOL, I.; COGO, N. P.; SCHICK, J.; GUDAGNIN, J. C.; AMARAL, A. J. Aspectos financeiros relacionados às perdas de nutrientes por erosão hídrica em diferentes sistemas de manejo do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, v. 31, p. 133-142, 2007.
- BOUGHTON, W. C. A hydrograph-based model for estimating water yield of ungauged catchments. *Institute of Engineers Australia National Conference*. Publ. 93/14, p. 317-324, 1993.
- BRANDÃO, V. S.; CECÍLIO, R. A.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D. *Infiltração da Água no Solo*. 3 ed. Editora UFV, Viçosa, MG, 2006, 120 p.
- BRASIL. *Lei nº 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.
- CANNAVO, P.; VIDAL-BEAUDET, L.; BÉCHET, B.; LASSABATÈRE, L.; CHARPENTIER, S. Spatial distribution of sediments and transfer properties in soils in a stormwater infiltration basin. *Journal Soils Sediments*. v. 10, p.1499-1509, 2010.
- CASTRO, L. M. A.; BAPTISTA, M. B.; BARRAUD, S. Proposição de metodologia para a avaliação dos efeitos da urbanização nos corpos de água. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 14, n. 4, p. 113-123, 2009.
- CHAPMAN, T. G.; MAXWELL, A. I. *Baseflow Separation - Comparison of Numerical Methods with Tracer Experiments*. In: Hydrology and Water Resources Symposium. Barton, ACT: Institution of Engineers, Australia, National conference publication, n. 96/05, p. 539-545, 1996.
- CHAPMAN, T. A comparison of algorithms for stream flow recession and baseflow separation. *Hydrological Processes*, v. 13, p. 710-714, 1999.

- CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. *Applied Hydrology*. International edition. Copyright by McGraw-Hill, Inc. 1988, 572 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.
- CLAUSEN, B. Discharge Data Collection and Analysis Strategies in Low Flow Studies. Department of Earth Sciences, Aarhus University, Denmark. *Nordic Hydrology*, v. 26, p. 191-204, 1995.
- CNRH - Conselho Nacional de Recursos Hídricos. *Conjunto de Normas Legais: Recursos Hídricos*. 6. ed. Brasília, DF, 2008. Ministério do Meio Ambiente - MMA, Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano, Secretaria Executiva do Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Organizado por: Márley Caetano de Mendonça.
- COELHO, A. L. N. Uso de dados SRTM como ferramenta de apoio ao mapeamento geomorfológico de bacia de médio-grande porte. *Rev. Geogr. Acadêmica*, v. 2, n. 2, p. 138-153, viii. 2008.
- 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.
- DECHESENE, M.; BARRAUD, S.; BARDIN, J. P. indicators for hydraulic and pollution retention assessment of stormwater infiltration basins. *Journal of Environmental Management*. v. 71, p. 371-380, 2004.
- DRUMOND, F. N. e BACELLAR, L. A. P. Caracterização hidrossedimentológica e dos processos evolutivos de voçoroca em área de rochas gnáissicas do alto Rio das Velhas (MG). *Revista Brasileira de Geomorfologia*. Porto Alegre, Ano 7, nº 2, p.87-96, 2006.
- DUTRA, C. S.; VILAS BOAS, C.; OLIVEIRA, G. A.; FARIA, W. Estudo comparativo dos escoamentos superficiais na calha do ribeirão arrudas em Belo Horizonte-Minas Gerais. MundoGEO. 2010. Disponível em: <http://mundogeo.com/blog/2010/08/12>. Acesso em: agosto de 2011.
- ECKHARDT, K. How to Construct Recursive Digital Filters for Baseflow Separation. *Hydrological Processes*. v. 19, n. 2, p. 507-515, 2005.
- 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.
- FEITOSA, F. A. C.; FILHO, J. M.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. *Hidrogeologia: Conceitos e aplicações*. 3 ed. Revis. e ampl. CPRM - Serviço Geológico do Brasil, LABHID, Rio de Janeiro, 2008, 812 p.
- FETTER, C. W. *Applied Hydrogeology*. 4 ed. Prentice Hall, Inc. Upper Saddle River, New Jersey, 2001, 598 p.
- FILGUEIRAS, J. A bacia do rio das Velhas no contexto da Região Metropolitana de Belo Horizonte. Instituto Mineiro de Gestão das Águas - IGAM, 2007. *Mapa*. Base de dados digitalizados em formato pdf. Disponível em: <http://aguas.igam.mg.gov.br/>. Acesso em: mar. 2011.
- 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, p. 1297, doi:10.1029/2002WR001621, 2003.
- GONÇALVES, J. A. C.; SCUDINO, P. C. B.; SOBREIRA, F. G. Reservas Renováveis e Caracterização dos Aquíferos Fissurais do Leste da Zona da Mata de Minas Gerais e Adjacências. *Revista Instituto de Geociências – USP. Geol. USP Sér. Cient.* [online] São Paulo, v. 5, n. 1, p. 19-27, 2005.
- GONZALES, A. L.; NONNER, J.; HEIJKERS, J.; UHLENBROOK, S. Comparison of different base flow separation methods in a lowland catchment. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* v. 6, p. 3483-3515, 2009.
- GRIEBELER, N. P.; PRUSKI, F. F.; MARTINS JÚNIOR, D.; SILVA, D. D. Avaliação de um modelo para a estimativa da lâmina máxima de escoamento. *R. Bras. Ci. Solo*, v. 25, p. 411-417, 2001.
- GUSTARD, A; MARSHALL, D. C. W.; SUTCLIFFE, M. F. *Low flow estimation in Scotland*. Institute of Hydrology: Report N^o. 101. Wallingford, United Kingdom, 1987, 29 p.
- HARSCH, N.; BRANDENBURG, M.; KLEMM, O. Large-scale lysimeter site St. Arnold, Germany: analysis of 40 years of precipitation, leachate and evapotranspiration. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, v. 13, p. 305-317, 2009.

- HIDROSERVICE Engenharia Ltda. *Plano Estadual de Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte: Estudos de Base - caracterização hidrogeológica dos aquíferos do Rio Grande do Norte*. Recife, 1998.
- HOEG, S.; UHLENBROOK, S.; LEIBUNDGUT, Ch. Hydrograph separation in a mountainous catchment-combining hydrochemical and isotopic tracers. *Hydrol. Process.* v. 14, p. 1199-1216, 2000.
- HONG, Y. M. Graphical estimation of detention pond volume for rainfall of short duration. *Journal of Hydro-environmental Research.* v. 2, p. 109-117, 2008.
- HUANG, M.; ZHANG, L. Hydrological responses to conservation practices in a catchment of the Loess Plateau, China. *Hydrol. Process.* v. 18, p. 1885-1898, 2004.
- IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas. *Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas: Resumo executivo*. IGAM/Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas. Belo Horizonte, 2005, 288 p.
- IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas. *Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paracatu: Resumo executivo*. IGAM/Comitê da Sub-bacia Hidrográfica do Rio Paracatu. Belo Horizonte, 2006, 384 p.
- IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas. *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*. IGAM/ Consórcio ECOPLAN – LUME, Belo Horizonte, 2010, 463 p. mais anexos.
- JAKEMAN, A. J.; HORNBERGER, G. M. How much complexity is warranted in a rainfall-runoff model? *Water Resources Research*, v. 29, n. 8, p. 2637-2649, 1993.
- LASSABATERE, L.; ANGULO-JARAMILLO, R.; GOUTALAND, D.; LETELLIER, L.; GAUDET, J. P.; WINIARSKI, T.; DELOLME, C. Effect of settlement of sediments on water infiltration in two urban infiltration basins. *Geoderma.* v. 156, p. 316-325, 2010.
- LIM, K. J. *et al.*. 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* (3rded.). McGraw-Hill, New York, 1982, 508 p.

- LYNE, V. D.; HOLLICK, M. Stochastic Time-Variable Rainfall- Runoff Modeling. *In: Hydro. and Water Resour. Symp.* Institution of Engineers Austrália, Perth, Austrália, p. 89-92, 1979.
- MARQUES, F. A.; SILVA, D. D. Obtenção pixel a pixel de variáveis morfométricas em SIG após tratamento de dados SRTM. *Anais... XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto.* INPE, Florianópolis, SC, p. 3445-3452, 2007.
- MAU, D. P.; WINTER, T. C. Estimating ground-water recharge from streamflow hydrographs for a small mountain watershed in a temperate humid climate, New Hampshire, USA. *Ground Water*, v. 35, n. 2, p. 291-304, 1997.
- MENDONÇA, L. A. R.; VÁSQUEZ, M. A. N.; FEITOSA, J. V.; OLIVEIRA, J. F.; FRANCA, R. M.; VÁSQUEZ, E. M. F.; FRISCHKORN, H. Avaliação da capacidade de infiltração de solos submetidos a diferentes tipos de manejo. *Eng Sanit Ambient*, v.14, n.1, p. 89-98, 2009.
- 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, 2004.
- MONTGOMERY, D. C.; PECK, E. A. *Introduction to linear regression analysis*. 2. ed. New York: John Wiley, v. 1, 1992, 527 p.
- MORIASI, 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.
- NASCIMENTO, N. O.; ELLIS, J. B.; BAPTISTA, M. B.; DEUTSCH, J. C. Using detention basin: operational experience and lessons. *Urban Water*, v. 1, p. 113-124, 1999.
- NASCIMENTO, E. A.; QUELHAS, O. L. G.; FONSECA, P. L. Qualidade do meio ambiente urbano: medidas para o controle do escoamento superficial direto na cidade do Rio de Janeiro, Brasil. *Ciência & Engenharia*, v. 16, n. 1/2, p. 81-87, 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.
- NATHAN, R. J.; MCMAHON, T. A. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. *Water Resources Research*. v. 26, n. 7, p. 1465-1473, 1990.

- NISBET, T. Water Use by Trees. *Information Note*. Forestry Commission, Edinburgh, 2005.
- PEDRETTI, D.; FERNÁNDEZ-GARCIA, D.; SANCHEZ-VILA, X.; BARAHONA-PALOMO, M.; BOLSTER, D. Combining physical-based models and satellite images for the spatio-temporal assessment of soil infiltration capacity. *Stoch Environ Res Risk Assess*, v. 25, p. 1065-1075, 2011.
- PEREIRA, S. B.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D.; RAMOS, M. M. Estudo do comportamento hidrológico do Rio São Francisco e seus principais afluentes. *R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental*, v. 11, n. 6, p. 615-622, 2007.
- 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.
- POFF, N. L.; BLEDSO, B. P.; CUHACIYAN, C. O. Hydrologic variation with land use across the contiguous United States: Geomorphic and ecological consequences for stream ecosystems. *Geomorphology*, v. 79, p. 264-285, 2006.
- POLIGNANO, M. V. Belo Horizonte não está se preparando para prevenir enchentes. Projeto Manuelzão UFMG. 2009. Disponível em: <http://www.manuelzao.ufmg.br>. Acesso em: julho de 2011.
- PRODEMGE - Companhia de Tecnologia da informação do Estado de Minas Gerais. *Mapas*. Belo Horizonte, MG, 1998. Base de dados digitalizados e geo-referenciados em formato shp. Disponível em: <ftp://ftp.prodemge.gov.br/pub/geominas/>. Acesso em: 28 mar. 2009.
- SANTOS, C. A.; SOBREIRA, F. G. Análise morfométrica como subsídio ao zoneamento territorial: o caso das bacias do Córrego Carioca, Córrego do Baçõ e Ribeirão Carioca na região do Alto Rio das Velhas-MG. *REM: Rev. Esc. Minas*, Ouro Preto, v. 61, n. 1, p. 77-85, 2008.
- SEITZ, N. E.; WESTBROOK, C. J.; NOBLE, B. F. Bringing science into river systems cumulative effects assessment practice. *Environmental Impact Assessment Review*, v. 31, p. 172-179, 2011.
- SHAXSON, F.; BARBER. R. Optimizing soil moisture for plant production: the significance of soil porosity. *FAO Soils Bulletin 79*, FAO - Food and Agriculture Organization of the united nations, Rome, 2003.

- SINGYH, V. P.; CHOWDHURY, P. K. Comparing some methods of estimating mean areal rainfall. *Water Resour. Bull.*, v. 22, n. 2, p. 275-282, 1986.
- SILVA, J. M. A.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D.; CECÍLIO, R. A. Metodologia para obtenção do hidrograma de escoamento superficial direto em encostas e canais. Parte I: desenvolvimento e avaliação. *Eng. Agríc.*, Jaboticabal, v. 26, n. 3, p. 695-703, 2006.
- SILVA, R. F. G.; BACELLAR, L. de A. P.; FERNANDES, K. N. Estimativa de parâmetros de aquíferos através do coeficiente de recessão em áreas de embasamento cristalino de Minas Gerais. *Rem: Rev. Esc. Minas.* v. 63, n. 3 [cited 2011-02-25], p. 465-471, 2010.
- 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.
- SONG, X.; LU, X.; LIU, Z.; SUN, Y. Runoff Change of Naoli River in Northeast China in 1955–2009 and Its Influencing Factors. *Chin. Geogra. Sci.* v. 22, n. 2, p. 144-153, 2012.
- 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.
- STÜRMER, S. L. K.; DALMOLIN, R. S. D.; AZEVEDO, A. C.; PEDRON, F. A.; MENEZES, F. P. Relação da granulometria do solo e morfologia do saprolito com a infiltração de água em Neossolos Regolíticos do rebordo do Planalto do Rio Grande do Sul. *Ci. Rural*, v. 39, p. 2057-2064, 2009.
- 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.
- TOOD, D. K.; MAYES, L. W. *Groundwater Hydrology*. 3 ed. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, N. J., 2005, 636 p.
- TUCCI, C. E. M. *Hidrologia: ciência e aplicação*. 4 ed. Editora da UFRGS/ABRH. Porto Alegre, RS, 2009, 943 p.

- VALERIANO, M. M. *Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para América do Sul*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE): Coordenação de Ensino, Documentação e Programas Especiais (INPE-10550-RPQ/756), São José dos Campos, 2004, 72p.
- VIEIRA, M. L.; KLEIN, V. A. Propriedades físico-hídricas de um latossolo vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. *R. Bras. Ci. Solo*, v. 31, p. 1271-1280, 2007.
- VITVAR, T.; BURNS, D. A.; LAWRENCE, G. B.; McDONNELL, J. J.; WOLOCK, D. M. Estimation of baseflow residence times in watersheds from the runoff hydrograph recession: method and application in the Neversink watershed, Catskill Mountains, New York. *Hydrol. Process.* v. 16, p. 1871-1877, 2002.
- 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.
- WAHL, K. L.; WAHL, T. L. Determining the Flow of Comal Springs at New Braunfels, Texas, *Texas Water '95*, American Society of Civil Engineers, August 16-17, 1995, San Antonio, Texas, p. 77-86, 1995.
- 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. *Hydrol. Process*, v. 15, p. 337-358, 2001.

APÊNDICES

Apêndice A

Quadro 1A – Análise de variância na comparação entre os valores de V_{ES} estimados pelos métodos de separação IF e IM para a área de drenagem da estação 41199998

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regresso	1	293,10	293,10	396956,44*
Resíduo	6939	5,12	0,00074	
Total	6940	298,22		

(*) significativo a 5% de probabilidade.

Quadro 2A – Análise de variância na comparação entre os valores de V_{ESa} estimados pelos métodos de separação IF e IM para a área de drenagem da estação 41199998

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regresso	1	168,65	168,65	18281,59*
Resíduo	18	0,17	0,01	
Total	19	168,81		

(*) significativo a 5% de probabilidade.

Quadro 3A – Análise de variância na comparação entre os valores de V_{ES} estimados pelos métodos de separação IF e IM para a área de drenagem da estação 41260000

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	1655,28	1655,28	453938,31*
Resíduo	6939	25,30	0,0036	
Total	6940	1680,58		

(*) significativo a 5% de probabilidade.

Quadro 4A – Análise de variância na comparação entre os valores de V_{ESa} estimados pelos métodos de separação IF e IM para a área de drenagem da estação 41260000

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	877,98	877,98	13914,89*
Resíduo	18	1,14	0,06	
Total	19	879,12		

(*) significativo a 5% de probabilidade.

Quadro 5A – Análise de variância na comparação entre os valores de V_{ES} estimados pelos métodos de separação IM e ML para a área de drenagem da estação 41199998

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	294,4469	294,4469	341658,29*
Resíduo	6939	5,98	0,000862	
Total	6940	300,43		

(*) significativo a 5% de probabilidade.

Quadro 6A – Análise de variância na comparação entre os valores de V_{ESa} estimados pelos métodos de separação IM e ML para a área de drenagem da estação 41199998

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	151,01	151,01	4657,27*
Resíduo	18	0,58	0,03	
Total	19	151,60		

(*) significativo a 5% de probabilidade.

Quadro 7A – Análise de variância na comparação entre os valores de V_{ES} estimados pelos métodos de separação IM e ML para a área de drenagem da estação 41260000

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	1582,086	1582,086	330310,52*
Resíduo	6939	33,24	0,00479	
Total	6940	1615,32		

(*) significativo a 5% de probabilidade.

Quadro 8A – Análise de variância na comparação entre os valores de V_{ESa} estimados pelos métodos de separação IM e ML para a área de drenagem da estação 41260000

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	821,79	821,79	2272,22*
Resíduo	18	6,51	0,36	
Total	19	828,30		

(*) significativo a 5% de probabilidade.

Quadro 9A – Análise de variância na comparação entre os valores de V_{ES} estimados pelos métodos de separação IF e ML para a área de drenagem da estação 41199998

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	318,37	318,37	352535,08*
Resíduo	6939	6,27	0,001	
Total	6940	324,64		

(*) significativo a 5% de probabilidade.

Quadro 10A – Análise de variância na comparação entre os valores de V_{ESa} estimados pelos métodos de separação IF e ML para a área de drenagem da estação 41199998

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	163,74	163,74	4562,09*
Resíduo	18	0,65	0,04	
Total	19	164,39		

(*) significativo a 5% de probabilidade.

Quadro 11A – Análise de variância na comparação entre os valores de V_{ES} estimados pelos métodos de separação IF e ML para a área de drenagem da estação 41260000

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	1749,27	1749,27	327705,47*
Resíduo	6939	37,04	0,005	
Total	6940	1786,31		

(*) significativo a 5% de probabilidade.

Quadro 12A – Análise de variância na comparação entre os valores de V_{ESa} estimados pelos métodos de separação IF e ML para a área de drenagem da estação 41260000

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	951,06	951,06	2957,55*
Resíduo	18	5,79	0,32	
Total	19	956,85		

(*) significativo a 5% de probabilidade.

Apêndice B

Quadro 1B – Análise de variância na comparação entre os valores de CET estimados para cada área de drenagem

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	24194,56	24194,56	2122,34*
Resíduo	18	205,20	11,40	
Total	19	24399,76		

(*) significativo a 5% de probabilidade.

Quadro 2B – Análise de variância na comparação entre os valores de IES estimados para cada área de drenagem

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	20742,34	20742,34	10,77*
Resíduo	18	584,98	32,50	
Total	19	21327,32		

(*) significativo a 5% de probabilidade.

Quadro 3B – Análise de variância na comparação entre os valores de CES estimados para cada área de drenagem

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	2615,56	2615,56	16,91*
Resíduo	18	93,18	5,18	
Total	19	2708,74		

(*) significativo a 5% de probabilidade.