

FERNANDO SILVA REGO

**REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES CONSIDERANDO A EVAPOTRANSPIRAÇÃO
REAL EM SEU PROCESSO DE FORMAÇÃO**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2013

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

T

R343r
2013 Rego, Fernando Silva, 1988-
Regionalização de vazões considerando a evapotranspiração
real em seu processo de formação / Fernando Silva Rego. –
Viçosa, MG, 2013.
vii, 53 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Fernando Falco Pruski.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 43-47.

1. Recursos hídricos - Desenvolvimento. 2. Recursos
hídricos - Planejamento. 3. Recursos hídricos - Administração.
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Agrícola. Programa de Pós-Graduação em Meteorologia
Agrícola. II. Título.

CDD 22. ed. 630.2515

FERNANDO SILVA REGO

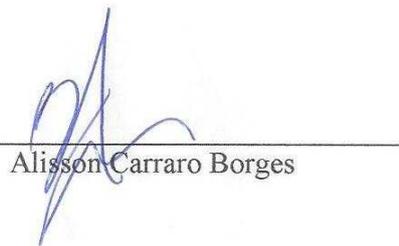
**REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES CONSIDERANDO A EVAPOTRANSPIRAÇÃO
REAL EM SEU PROCESSO DE FORMAÇÃO**

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

APROVADA: 27 de novembro de 2013.



Francisco Fernando Noronha Marcuzzo



Alisson Carraro Borges



Fernando Falco Pruski
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por estar sempre presente em minha vida e na vida da minha família.

Aos meus pais, Miriam e Fernando, pelo apoio, amor e confiança em todas as etapas da minha vida. Amo vocês!

A toda minha família, em especial às minhas irmãs Liliane e Andreia, meus cunhados Angelo e Alê e meus sobrinhos Angelinho e Nandinho por terem me ajudado muito, ainda que muitas vezes não tenham percebido.

Ao Professor Fernando Falco Pruski, por ter sido, além de Orientador, um grande amigo. Jóia!

À Marina Camila, pelo carinho e confiança.

À família Santana Lelis, por ter me adotado como um membro da família.

A todo o pessoal do GRPH, principalmente Arthur, Aline, Marlon, Andressa, Luane, Júlia, Toninho, João, Pedro, Luiz, Felícia e Renan, pelos momentos de trabalho e descontração. Jóia!

A todos meus amigos pelos bons momentos vividos, em especial o pessoal da Engenharia Ambiental 2007, da Meteorologia e Engenharia Agrícola e aos grandes amigos Mateus, Gláucio e Elias.

À UFV, principalmente à Engenharia Ambiental e ao Departamento de Engenharia Agrícola, por todas as oportunidades que me foram proporcionadas. Agradeço também a todos os Professores que contribuíram para a minha formação.

BIOGRAFIA

FERNANDO SILVA REGO, filho de Fernando Danziato Rego e Miriam Ataide Silva Rego, nasceu em Goiânia, GO, no dia 23 de março de 1988.

Em março de 2007 iniciou o curso de Engenharia Ambiental na Universidade Federal de Viçosa, concluindo em janeiro de 2012.

Em março de 2012 iniciou o curso de Mestrado em Meteorologia Agrícola, na área de Hidroclimatologia, na Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa de dissertação em novembro de 2013.

SUMÁRIO

RESUMO	v
ABSTRACT	vii
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 A regionalização de vazões no planejamento e gestão de recursos hídricos	3
2.2 Variáveis explicativas na regionalização de vazões	5
2.3 Processo de formação de vazões	7
3 METODOLOGIA	10
3.1 Bacia hidrográfica de estudo	10
3.2 Dados utilizados	11
3.3 Regionalização de vazões	15
3.4 Avaliação do desempenho	18
3.4.1 Avaliação estatística	18
3.4.2 Avaliação física	19
3.4.3 Avaliação de risco	19
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
4.1 Regionalização de vazões para a sub-bacia do rio Paracatu	21
4.1.1 Regionalização da $Q_{7,10}$ para a sub-bacia do Paracatu	22
4.1.2 Regionalização da Q_{95} para a sub-bacia do rio Paracatu	28
4.1.3 Regionalização da Q_{mld} para a sub-bacia do rio Paracatu	32
4.2 Regionalização da $Q_{7,10}$ para a bacia do rio Pará	36
5 CONCLUSÃO	42
REFERÊNCIAS	43
APÊNDICE	48

RESUMO

REGO, Fernando Silva, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, novembro de 2013. **Regionalização de vazões considerando a evapotranspiração real em seu processo de formação.** Orientador: Fernando Falco Pruski.

A regionalização de vazões visa suprir a carência de informações hidrológicas em locais com pouca ou nenhuma disponibilidade de dados, sendo o conhecimento e o aprimoramento dessa técnica de grande importância para estimativas mais seguras das vazões. Esse trabalho teve como objetivo aperfeiçoar o procedimento de regionalização de vazões mínimas e média, considerando uma variável explicativa que representa a evapotranspiração real no processo de formação de vazões. O estudo foi realizado em duas bacias do rio São Francisco: uma sub-bacia do rio Paracatu, onde foram avaliados a vazão média de longa duração (Q_{mld}), a vazão mínima com permanência de 95% do tempo (Q_{95}) e a vazão mínima com sete dias de duração associada a um período de retorno de dez anos ($Q_{7,10}$); e a bacia do rio Pará, na qual foi avaliado apenas a $Q_{7,10}$. As variáveis independentes utilizadas foram a área de drenagem, a vazão equivalente ao volume precipitado (Peq), a vazão equivalente ao volume precipitado menos 750 mm (Peq_{750}) e a vazão equivalente ao volume precipitado menos a média estimada da evapotranspiração real na bacia (Peq_{ETR}). Avaliou-se o desempenho da regionalização por meio de três análises: estatística, comportamento físico e risco. A Peq_{ETR} proporcionou os melhores ajustes estatísticos para as três vazões analisadas na sub-bacia do rio Paracatu, contudo, enquanto essa variável foi a que representou o melhor comportamento físico e estimativas mais seguras das vazões mínimas, a Peq_{750} foi a que teve estimativas mais representativas da vazão média. Para a bacia do rio Pará, o uso da Peq_{ETR} como variável explicativa gerou os melhores ajustes estatísticos e uma melhor representação do comportamento físico e de risco da variável dependente analisada. Assim, o uso da variável explicativa que considera a evapotranspiração real proporcionou, nas bacias estudadas, os

melhores ajustes estatísticos e, com exceção da vazão média, uma análise física mais representativa e segura.

ABSTRACT

REGO, Fernando Silva, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, November, 2013. **Streamflow regionalization considering the actual evapotranspiration in its formation process.** Adviser: Fernando Falco Pruski.

Streamflow regionalization aims to supply the hydrological information lack in places where there are little or no data availability, and the knowledge and improvement of this technique is of great importance for a safer streamflow estimate. This study aimed to improve the procedure of low flow and average streamflow regionalization, considering an explanatory variable that represents the actual evapotranspiration in the process of streamflow formation. The study was performed for two basins of San Francisco river: a subbasin of Paracatu river, being evaluated the long-term average streamflow (Q_{mld}), the minimum streamflow present 95 % of the time (Q_{95}), and the minimum streamflow of seven days duration associated with a ten years return period ($Q_{7,10}$); and the Pará basin, being evaluated just $Q_{7,10}$. The independent variables were the drainage area (A), the streamflow equivalent to the rainfall volume (Peq), the streamflow equivalent to the rainfall volume minus 750 mm (Peq_{750}) and streamflow equivalent to the rainfall volume minus the estimated average actual evapotranspiration in the basin (Peq_{ETR}). We evaluated regionalization performance through three analysis: statistics, physical behavior and risk. The Peq_{ETR} provided the best statistical adjustments for the three streamflows analyzed in the Paracatu subbasin, however, while this was the variable that best represented the physical behavior and safer estimatives for low flows, the Peq_{750} had more representative estimates to average streamflow. For Pará basin, the use of Peq_{ETR} as an explanatory variable created the best statistical adjustments and a better representation of the physical and risk behavior of the dependent variable analyzed. Thus, the use of the explanatory variable that represents the actual evapotranspiration provided, in the subbasins analysed, best statistical adjustments and, with the exception of average streamflow, a physical analysis more representative and reliable.

1 INTRODUÇÃO

O planejamento e a gestão dos recursos hídricos são de fundamental importância em uma bacia hidrográfica, principalmente na atenuação dos conflitos pelo uso da água, sendo o conhecimento das vazões essencial para uma adequada gestão, visto que auxiliam os órgãos gestores nas tomadas de decisão.

A disponibilidade hídrica natural em uma bacia hidrográfica é representada pelas vazões mínimas, e seu conhecimento é de extrema importância nas outorgas a fio d'água. Em situações em que a disponibilidade hídrica natural não é suficiente para suprir as demandas, existe a possibilidade de aumento da disponibilidade pelo aproveitamento do potencial de regularização de vazão nos cursos d'água, sendo a máxima vazão possível de ser regularizada igual à vazão média.

Por mais que uma região possua uma alta densidade de estações fluviométricas, a rede hidrológica não é capaz de cobrir toda a hidrografia, dificultando o planejamento e a gestão dos recursos hídricos. Uma técnica amplamente empregada para contornar essa situação é a regionalização de vazões, que visa transferir as informações hidrológicas, no caso as vazões, de uma região com dados para outra com ausência de dados, considerando que essas regiões possuam características topológicas e climáticas semelhantes. A utilização dessa técnica permite estimar a disponibilidade hídrica em outros trechos de hidrografia da região regionalizada, fornecendo informações para o planejamento e gestão dos recursos hídricos e, conseqüentemente, diminuindo a possibilidade de conflitos.

O aperfeiçoamento de métodos para identificação de regiões hidrologicamente homogêneas e a busca de variáveis mais explicativas são procedimentos que devem ser metas para uma melhor representatividade de estudos de regionalização de vazões.

Rodriguez (2008) e Pruski *et al.* (2013) propuseram duas novas variáveis explicativas: a vazão equivalente ao volume precipitado (Peq), que leva em consideração a área de drenagem e a precipitação a montante da estação em análise; e a vazão equivalente ao volume

precipitado menos o valor empírico de 750 mm (Peq_{750}), que leva em consideração, além da área, uma redução de 750 mm da precipitação, correspondente a um fator de abstração do processo de formação de vazões. Em estudo realizado na sub-bacia do rio Paracatu, os autores constataram que o uso da Peq_{750} produziu considerável melhora na estimativa das vazões mínimas e média quando comparado com as outras variáveis explicativas analisadas. Os autores salientam que uma forma de aprimoramento do processo de regionalização de vazões constitui na consideração de um valor de abstração que considere as características edafoclimáticas da bacia analisada. Deste modo, o presente trabalho se baseia na hipótese de que a consideração de variáveis explicativas que representem a circulação de água na bacia pode fornecer melhores estimativas de vazão.

Como a evapotranspiração real é o principal processo da abstração da precipitação para a formação de vazões, objetivou-se, nesse trabalho, aperfeiçoar o procedimento de regionalização de vazões mínimas e média, considerando uma variável explicativa que representa a evapotranspiração real no processo de formação de vazões.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A regionalização de vazões no planejamento e gestão de recursos hídricos

O conhecimento das vazões é de extrema importância para o planejamento e gestão dos recursos hídricos, podendo auxiliar no projeto de barragens e usinas hidrelétricas, na avaliação da disponibilidade de água para irrigação e outros usos da água, na avaliação dos riscos de cheia e seca, entre outros (MASIH *et al.*, 2010; TSAKIRIS *et al.*, 2011). Logo, estudos que visam a representação adequada dos valores de vazão em cursos d'água se tornam uma importante ferramenta para a tomada de decisão por parte dos gestores desses recursos.

A disponibilidade dos recursos hídricos é representada pelas vazões médias e mínimas (NOVAES *et al.*, 2009). A vazão média de longa duração representa a disponibilidade de água potencial, sendo seu conhecimento essencial para o planejamento e gestão dos recursos hídricos (MASIH *et al.*, 2010; NOVAES *et al.*, 2009), visto que essa é a máxima vazão possível de ser regularizada, abstraindo-se as perdas por evaporação e infiltração (PRUSKI; PRUSKI, 2011). As vazões mínimas caracterizam a disponibilidade hídrica natural ao longo da hidrografia e são utilizadas como vazão de referência para concessão de outorgas e na elaboração de projetos de irrigação. São representadas, geralmente, pela vazão mínima com sete dias de duração e período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$) ou pelas vazões associadas a uma permanência de 90% (Q_{90}) ou 95% (Q_{95}) do tempo.

Dados históricos são necessários para a estimativa das vazões, porém estas informações nem sempre estão disponíveis no local de interesse ou, muitas vezes, os dados disponíveis não representam efetivamente as condições presentes na bacia hidrográfica (PANDEY; NGUYEN, 1999). A estimativa de vazões em bacias com ausência de dados é uma tarefa fundamental para o planejamento e gestão dos recursos hídricos, e continua sendo um grande desafio para a comunidade hidrológica (WAGENER; WHEATER, 2006; LI *et al.*, 2009).

Para a estimativa de vazões em locais com pouca ou nenhuma disponibilidade de dados é utilizada a técnica de regionalização (PANDEY; NGUYEN, 1999; SIVAPALAN *et al.*, 2003; LAAHA; BLOSCHL, 2006; RAO; SRINIVAS, 2006; YOUNG, 2006; CUTORE *et al.*, 2007; YADAV *et al.*, 2007; ESLAMIAN; BIABANAK, 2008; MASIH *et al.*, 2010; SAMUEL *et al.*, 2011). Esse método relaciona os processos hidrológicos com características físicas e climáticas de uma bacia.

Em estudos de regionalização de vazões os parâmetros do modelo de regressão são, mais frequentemente, associados às características físicas da bacia, uma vez que, devido às diferenças de escala e a erros que podem advir da modelagem, existem grandes dificuldades na consideração dos processos físicos na obtenção dos parâmetros do modelo (YADAV *et al.*, 2007; YOUNG, 2006). O clima, entretanto, pode desempenhar um importante papel na representação do comportamento hidrológico pelos modelos (YOUNG, 2006).

Os métodos utilizados para descrever as relações entre os parâmetros do modelo, as características físicas da bacia e as condições climáticas são variados, mas a abordagem mais comum consiste em relacionar os parâmetros do modelo e as características da bacia estatisticamente (LAMB *et al.*, 2000; LAMB; KAY, 2004; MERZ; BLOSCHL, 2004; LAAHA; BLOSCHL, 2006; WAGENER; WHEATER, 2006).

A técnica da regressão múltipla é um meio de determinar a magnitude das vazões para um determinado período de retorno, e principalmente para a transferência das informações de locais onde há medição de vazão para outros locais com pequena disponibilidade de informações (MALEKINEZHAD *et al.*, 2011). Caso seja usada apenas uma variável independente, a regressão múltipla passa a ser uma regressão simples. Existem diversos modelos de regressão, sendo os principais: linear, potencial, exponencial, logarítmico e recíproco. O modelo de regressão mais usado para relacionar a vazão com as características da bacia é o modelo potencial (PANDEY; NGUYEN, 1999; SAMUEL *et al.*, 2011; MERZ; BLOSCHL, 2004; PARAJKA *et al.*, 2005). GPRH e IGAM (2012) obtiveram o modelo potencial como o melhor modelo de regressão para todas as bacias regionalizadas no estado de Minas Gerais, em comparação com os modelos linear, exponencial, logarítmico e recíproco.

A regionalização é uma importante ferramenta para o conhecimento hidrológico espacial, mas existem limitações expressivas para a extrapolação de seus resultados, principalmente em bacias de menor porte (SILVA JÚNIOR *et al.*, 2003; TUCCI, 2002), visto

que a maioria das estações fluviométricas estão localizadas em seções da hidrografia às quais estão associadas grandes áreas de drenagem.

Naghattini e Pinto (2007) salientam que, de forma geral, não é recomendada a extrapolação da equação de regressão para além dos limites dos dados amostrais utilizados na estimativa dos parâmetros da regressão linear. Entretanto, a impossibilidade de estimar a vazão para áreas de drenagem menores que a menor área observada entre as estações fluviométricas limita a estimativa da disponibilidade hídrica a uma pequena parcela da hidrografia, impossibilitando o planejamento e gestão dos recursos hídricos para a maior parte dela.

O aprimoramento de técnicas, como a regionalização de vazões, que contribua com estimativas mais confiáveis de vazões nos cursos d'água se torna de grande importância para um bom planejamento e gestão dos recursos hídricos. Nesse sentido, o uso de variáveis mais explicativas do processo de formação de vazões tende a melhorar a regionalização e diminuir as zonas de extrapolação (PRUSKI *et al.*, 2012).

2.2 Variáveis explicativas na regionalização de vazões

As variáveis explicativas empregadas nos modelos de regressão são as características físicas e climáticas da bacia hidrográfica. Elas são determinadas para a área de drenagem a montante de cada uma das estações fluviométricas existentes na bacia.

As principais características físicas da bacia são a área, o comprimento do rio principal e a densidade de drenagem, entretanto o uso das duas últimas variáveis não é recomendado, uma vez que, considerando o processo de formação das vazões médias e mínimas, evidencia-se que estas variáveis têm pequena interferência em relação ao processo de geração destas vazões, além de acarretarem, em alguns casos, problemas de caráter operacional.

A área de drenagem é considerada a principal variável explicativa em diversos estudos de regionalização de vazões (RAZAVI; COULIBALY, 2013), em função da sua influência na disponibilidade de água ao longo da hidrografia (AZEVEDO, 2004; BAENA, 2002; EUCLYDES *et al.*, 2005; LEMOS, 2006; RIBEIRO *et al.*, 2005). GPRH e IGAM (2012) e Silva *et al.* (2003) observaram que a área de drenagem foi a variável explicativa que melhor explicou o comportamento das vazões para a bacia do rio Paraopeba e para a bacia do rio Grande, respectivamente.

A variável climática mais empregada é a precipitação, sendo que para as vazões máximas as precipitações mais frequentes são: máxima diária anual, mês mais chuvoso, trimestre mais chuvoso e semestre mais chuvoso. A precipitação média de longa duração é usada na regionalização das vazões médias e a precipitação total anual é mais utilizada para as vazões mínimas e média (BAENA *et al.*, 2004). Como a variação da precipitação reflete diretamente no comportamento das vazões específicas, seu uso pode representar uma melhoria do modelo de regionalização (DINPASHOH *et al.*, 2004).

Em estudo de regionalização de vazões da bacia do rio Paraíba do Sul, Baena (2002) constatou que a precipitação total anual foi a variável climática que melhor explicou o comportamento da vazão mínima. Silva *et al.* (2002) encontraram que a precipitação total anual foi a variável climática mais expressiva para a representação das vazões mínimas, para a média de longo período e para as vazões correspondentes aos diferentes níveis de permanência.

Expressões com uma única variável são preferíveis em estudos comparativos, uma vez que pode ser de difícil interpretação a importância relativa de dois ou mais parâmetros. Por outro lado, as expressões com mais de um parâmetro geralmente se ajustam melhor aos dados observados, devendo ser utilizadas em estudos mais detalhados (TALLAKSEN, 1995).

Rodriguez (2008) e Pruski *et al.* (2013) propuseram duas novas variáveis explicativas, a vazão equivalente ao volume precipitado (Peq) e a vazão equivalente ao volume precipitado menos um fator de abstração da precipitação correspondente a 750 mm (Peq₇₅₀). Essas variáveis representam as características físicas e climáticas da bacia em uma só variável, permitindo, além de uma representação bidimensional da relação entre as variáveis dependentes e independentes, o ganho de um grau de liberdade na análise estatística, que tem o efeito de reduzir a variância das estimativas quando comparado com as equações de uma única variável explicativa.

O fator de abstração da precipitação correspondente a 750 mm, considerado na Peq₇₅₀, leva em conta a porção da precipitação que não foi convertida em vazão devido a outros processos, em especial à evapotranspiração. O valor de 750 mm foi estimado no estudo de Novaes (2005), que ajustou modelos de regressão para as estações fluviométricas do Paracatu, visando representar a vazão correspondente ao início do período de recessão como uma função do total precipitado nos 12 meses anteriores ao início desse período. Assim, o autor evidenciou que, em média, se a precipitação anual na bacia do Paracatu fosse inferior a um

valor da ordem de 750 mm, não haveria escoamento no leito do rio no início do período de recessão do escoamento subterrâneo.

Pruski *et al.* (2013) mostram que o uso da Peq melhorou as estimativas das vazões Q_{mid} e Q_{95} em uma sub-bacia do rio Paracatu quando comparado ao uso da área, sendo essa melhora mais evidente quando utilizada a Peq_{750} . Além disso, o uso dessas variáveis minimizou o risco associado ao uso das equações de regionalização em regiões de extrapolação.

Pruski *et al.* (2012) evidenciaram uma melhora da regionalização da $Q_{7,10}$ para a bacia do Pará, quando se usa a Peq_{750} como variável explicativa. Considerando a área de drenagem como variável explicativa, a zona de extrapolação na bacia do rio Pará para a $Q_{7,10}$ foi de 85%, enquanto que, com o uso da variável Peq_{750} , essa região correspondeu a 45%.

Desta forma, a utilização de uma variável que represente a porção da precipitação que não é convertida em vazão pode contribuir para o aperfeiçoamento dos modelos de regionalização de vazões.

Cada bacia deve apresentar um valor de abstração, sendo este tanto maior quanto maior for a evapotranspiração da bacia, as capacidades de retenção de água no solo e da interceptação pela cobertura vegetal. Dessa forma, estudos que visam entender os processos dessas abstrações e que identifiquem a quantidade de água perdida são de grande importância para aperfeiçoar o processo de regionalização de vazões e, conseqüentemente, para o planejamento e a gestão de recursos hídricos.

2.3 Processo de formação de vazões

Uma das grandes demandas ambientais atuais consiste no desenvolvimento de estudos que representem adequadamente o processo de formação do escoamento, de forma a fornecer subsídios para a tomada de decisão por parte dos gestores de recursos hídricos (SANTOS *et al.*, 2010). Para que a complexidade envolvida no balanço hídrico possa ser compreendida, torna-se necessário o conhecimento de cada um dos processos envolvidos.

Manning (1997) salienta que o balanço hídrico em uma bacia hidrográfica pode ser descrito em termos das entradas e saídas de água na mesma. Em uma região úmida, e assumindo a precipitação como a única forma de entrada de água no sistema, a equação do balanço hídrico pode ser escrita como:

$$\text{Evapotranspiração} = \text{Precipitação} - \text{Escoamento} \pm \text{Variação do Armazenamento} \quad (1)$$

Iniciada a precipitação, parte dela é interceptada pela vegetação, parte infiltra no solo e outra parte pode ser retida em depressões ou escoar sobre a superfície do terreno (CHOW *et al.*, 1988; SANTOS *et al.*, 2010). A parcela da água infiltrada ficará na zona aerada do solo e, caso a infiltração seja suficiente para ir além da zona de enraizamento da vegetação, esta recarregará os aquíferos. A água armazenada na zona aerada será utilizada pelas culturas e pelo solo através da evapotranspiração.

A evapotranspiração é a combinação de dois processos: a evaporação, em que a água é perdida pela superfície, e a transpiração, perdida através da vegetação. A evaporação é o processo em que a água líquida é convertida em vapor d'água e removida da superfície evaporante, como lagos, rios, pavimentos, solos e vegetação molhada. A transpiração consiste na vaporização da água líquida contida nos tecidos das plantas e remoção de vapor para a atmosfera. Logo, a evapotranspiração é influenciada por parâmetros meteorológicos, como radiação, temperatura do ar, umidade e velocidade do vento, e pelas características das culturas, como resistência à transpiração, altura de plantas, rugosidade da cultura, reflexão, cobertura do solo e enraizamento (ALLEN *et al.*, 1998).

Grande parte do total de água precipitada é transferida de volta para a atmosfera por meio da evapotranspiração (NISBET, 2005; PEREIRA *et al.*, 2007), que é, portanto, uma importante componente do ciclo hidrológico (HARSCH *et al.*, 2009), tendo grande influência na parte do total precipitado que constitui a vazão dos rios. Quanto maior a evapotranspiração das plantas, a rugosidade da superfície do solo, e a porcentagem de cobertura vegetal, maior será a taxa de infiltração da água no solo, logo, menor será o escoamento superficial (SPOHR *et al.*, 2009). Assim, esses aspectos interferem nos processos de saída de água e de infiltração.

Ao longo do ano, uma parcela da precipitação que infiltrou constituirá o escoamento subterrâneo (BRODIE *et al.*, 2008; SMAKHTIN, 2001), sendo este processo o principal responsável pela manutenção do escoamento em períodos de estiagem. Logo, as águas subterrâneas mantêm a continuidade da vazão dos rios durante os períodos secos. O escoamento superficial é gerado a partir do momento em que a precipitação supera a capacidade de infiltração do solo (BEVEN; WOOD, 1983). A água que escoar sobre a superfície do solo constitui o escoamento superficial, que junto com o escoamento subterrâneo, formará os córregos, ribeirões, rios, lagos e reservatórios (CHOW *et al.*, 1988). Portanto, enquanto as vazões médias envolvem tanto processos associados ao escoamento

superficial direto como ao escoamento subterrâneo, as vazões mínimas estão associadas diretamente ao escoamento subterrâneo.

O escoamento produzido em uma bacia hidrográfica depende da variabilidade temporal e espacial das chuvas que ocorrem nesta (WINCHELL *et al.*, 1998). Além da precipitação, existem outros aspectos relacionados à bacia que influenciam nas vazões, como evapotranspiração e uso e manejo do solo.

Em um estudo realizado na bacia do São Francisco (Brasil), Pereira *et al.* (2007) observaram que em algumas sub-bacias, como a do rio Pandeiros, que possui uma precipitação média anual da ordem de 1.100 mm, apenas cerca de 17% do volume precipitado é convertido em escoamento em sua foz. Na sub-bacia do rio Verde Grande, essa baixa conversão é ainda mais evidente, pois com uma precipitação média anual da ordem de 850 mm, apenas cerca de 4% desse volume transforma-se em escoamento na seção em que deságua no rio São Francisco. Já na bacia do Paracatu, com uma precipitação média anual de cerca de 1.300 mm, essa porcentagem é da ordem de 28%. A observação desses valores reforça a importância do balanço entre total precipitado e total evapotranspirado para a quantificação das vazões. Petersen *et al.* (2012) afirma que a repartição da precipitação anual média em vazão anual média e evapotranspiração anual média é a chave para entender o balanço hídrico de longo termo.

3 METODOLOGIA

3.1 Bacia hidrográfica de estudo

O estudo foi realizado para duas bacias localizadas na bacia do rio São Francisco, a bacia do rio Paracatu - Jusante, que será denominada ao longo do texto como sub-bacia do rio Paracatu, situada no médio São Francisco, e a bacia do rio Pará, no alto São Francisco. A localização dessas bacias é apresentada na Figura 1.

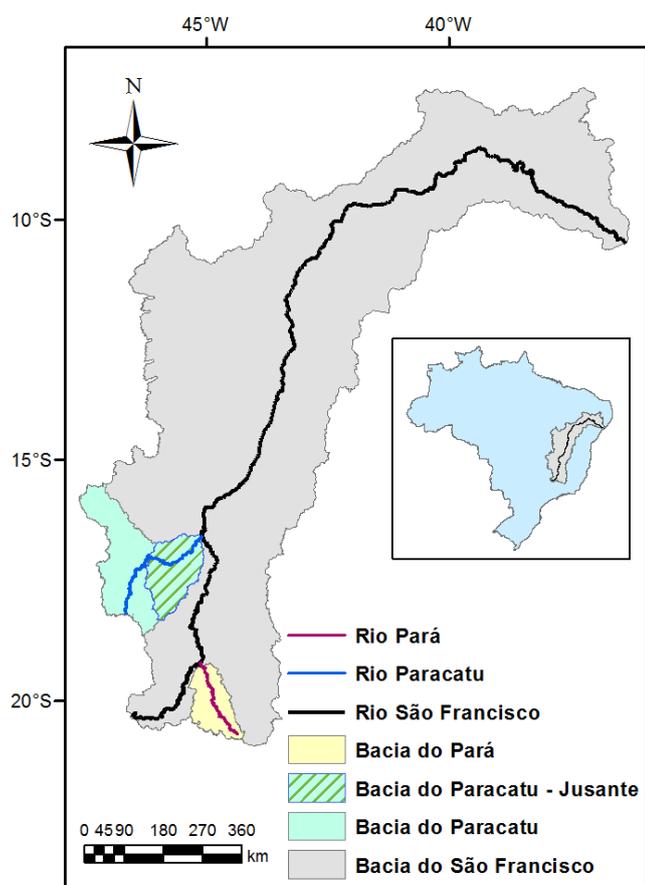


Figura 1 – Localização da bacia do São Francisco no Brasil e das sub-bacias analisadas.

A região referente à sub-bacia do rio Paracatu está localizada no estado de Minas Gerais e possui os seguintes municípios com todo ou parte do seu território na sub-bacia: João Pinheiro, Brasilândia de Minas, Buritizeiro e outros. Os principais afluentes dessa sub-bacia são o rio do Sono, com área de drenagem de 5.958 km², e o rio Santo Antônio, com 2.512 km², cujo rio é afluente direto do rio do Sono. Em sua totalidade, a sub-bacia possui 16.565 km², representando, aproximadamente, um terço da área total da bacia do rio Paracatu. O clima da bacia do Paracatu é quente e úmido, com temperaturas médias anuais que oscilam entre 22 e 24 °C, variando pouco de uma estação para outra (BRASIL, 1996).

O rio Pará possui bacia hidrográfica com área de aproximadamente 12.300 km² e, assim como a sub-bacia do rio Paracatu, está inserida no estado de Minas Gerais, sendo os principais municípios Divinópolis, Nova Serrana e Itaúna. Os afluentes diretos que formam as maiores sub-bacias da bacia hidrográfica do rio Pará são: rio Itapeçerica, rio São João, rio Lambari, rio do Peixe e rio Picão. O clima temperado chuvoso predomina na região, seguido do clima subtropical de altitude, também temperado chuvoso (CBH-PARÁ, 2007).

3.2 Dados utilizados

Foram utilizados dados consistidos de vazão e precipitação das séries históricas obtidas do sistema HidroWeb, da Rede Hidrometeorológica Nacional, da Agência Nacional das Águas (ANA, 2001), sendo o período de análise para as duas bacias de 1968 a 2005. No apêndice são apresentados os diagramas de barras com os anos utilizados em cada estação fluviométrica e pluviométrica, sendo que os anos com mais de 5% de falhas foram descartados do estudo.

Sete estações fluviométricas foram utilizadas na sub-bacia do rio Paracatu e seis estações na bacia do rio Pará, sendo estas as únicas estações com um período de dados com mais de 20 anos. As estações fluviométricas da sub-bacia do rio Paracatu e da bacia do rio Pará estão caracterizadas nas Tabelas 1 e 2, respectivamente, e a localização espacial dessas estações é apresentada na Figura 2.

Tabela 1 – Estações fluviométricas utilizadas no estudo, situadas na sub-bacia do rio Paracatu

Código	Nome da estação	Latitude (°)	Longitude (°)	Área (km ²)	Curso d'água
42690001	Porto da Extrema	-17,030	-46,014	30100	Rio Paracatu
42750000	Caatinga	-17,143	-45,880	33500	Rio Paracatu
42840000	Veredas	-18,139	-45,759	209	Rio Santo Antônio
42850000	Cachoeira das Almas	-17,351	-45,533	4390	Rio do Sono
42860000	Cachoeira do Paredão	-17,121	-45,436	5710	Rio do Sono
42930000	Porto do Cavalo	-17,031	-45,539	40900	Rio Paracatu
42980000	Porto Alegre	-16,907	-45,383	41300	Rio Paracatu

Tabela 2 – Estações fluviométricas utilizadas no estudo, situadas na bacia do rio Pará

Código	Nome da estação	Latitude (°)	Longitude (°)	Área (km ²)	Curso d'água
40150000	Carmo do Cajuru	-20,181	-44,793	2500	Rio Pará
40170000	Marilândia (Ponte BR-494)	-20,216	-44,918	1040	Rio Itapecirica
40269900	Itaúna - Montante	-20,066	-44,581	338	Rio São João
40300001	Jaguaruna - Jusante	-19,743	-44,818	1560	Rio São João
40330000	Velho da Taipa	-19,693	-44,930	7330	Rio Pará
40400000	Álvaro da Silveira	-19,753	-45,117	1820	Rio Lambari

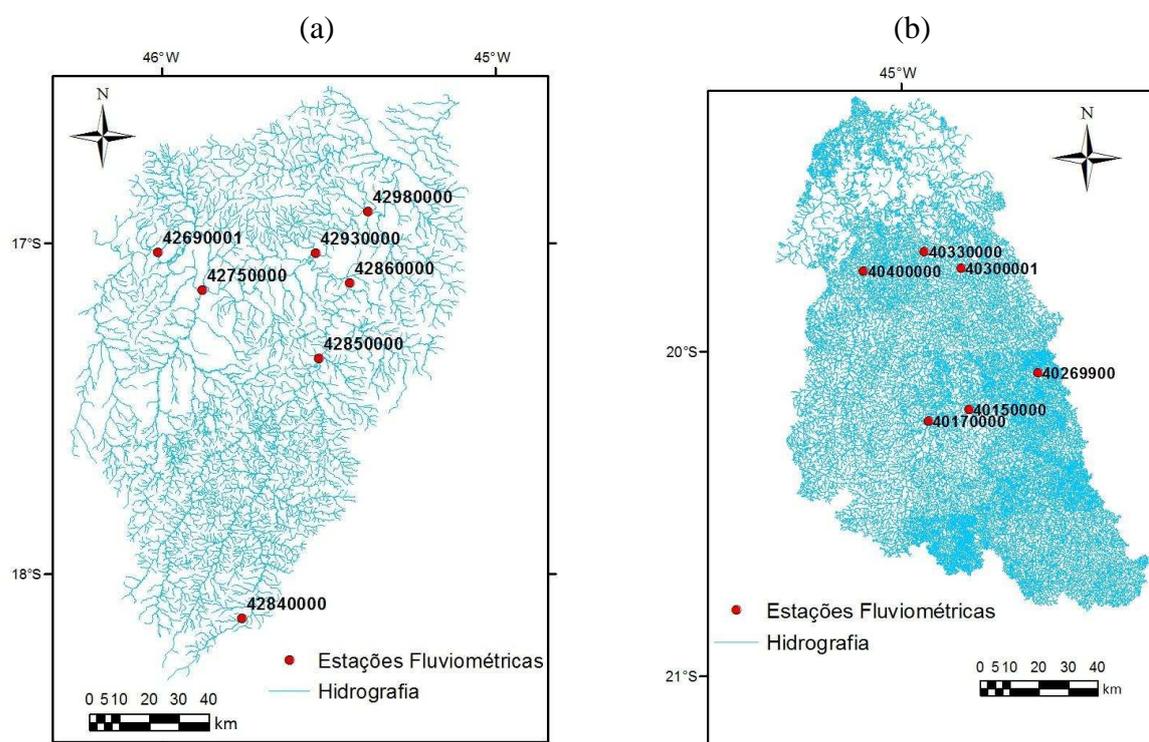


Figura 2 – Localização espacial das estações fluviométricas utilizadas na sub-bacia do rio Paracatu (a) e na bacia do rio Pará (b).

Foram utilizadas 17 estações pluviométricas na criação do mapa de precipitação da sub-bacia do rio Paracatu, sendo essas estações localizadas dentro da bacia e em regiões circunvizinhas. Para a bacia do rio Pará foram utilizadas 25 estações pluviométricas. As estações da sub-bacia do rio Paracatu e da bacia do rio Pará estão caracterizadas nas Tabelas 3 e 4, respectivamente, e a localização espacial dessas estações é apresentada na Figura 3.

Tabela 3 – Estações pluviométricas utilizadas no estudo, situadas na sub-bacia do rio Paracatu

Código	Nome da estação	Longitude (°)	Latitude (°)	Precipitação (mm)
1644012	Ibiai	-44,917	-16,867	968,51
1645000	São Romão	-45,083	-16,372	1039,88
1645002	Santo Inacio	-45,414	-16,282	1015,63
1645003	Barra Do Escuro	-45,238	-16,269	1040,47
1645005	Vila Urucuia	-45,742	-16,3	1098,75
1645009	Cachoeira da Manteiga	-45,081	-16,657	1046,68
1645013	Fazenda Água Branca	-45,03	-16,807	1113,32
1646000	Porto dos Poções	-46,322	-16,83	1105,9
1745000	Caatinga	-45,88	-17,146	1114,51
1745007	Porto do Cavalo	-45,541	-17,027	1172,58
1746001	Porto da Extrema	-46,014	-17,031	1184,00
1746002	Santa Rosa	-46,474	-17,255	1306,37
1746007	Ponte da Br-040 - Paracatu	-46,572	-17,503	1300,73
1845002	Fazenda São Felix	-45,647	-18,464	1269,91
1845011	Sao Goncalo Do Abaete	-45,833	-18,35	1417,58
1845013	São Gonçalo do Abaeté	-45,837	-18,344	1408,94
1846003	Major Porto	-46,037	-18,707	1323,51

Tabela 4 – Estações pluviométricas utilizadas no estudo, situadas na bacia do rio Pará

Código	Nome da estação	Longitude (°)	Latitude (°)	Precipitação (mm)
1944007	Fazenda Escola Florestal	-44,422	-19,88	1399,67
1944011	Jaguaruna-Jusante	-44,807	-19,728	1314,65
1944021	Velho da Taipa	-44,929	-19,696	1371,80
1944031	Ponte da Taquara	-44,548	-19,423	1255,14
1944032	Se Pitangui	-44,879	-19,684	1374,37
1944049	Papagaios	-44,72	-19,428	1269,57
1945004	Estação Álvaro da Silveira	-45,117	-19,752	993,51
1945008	Bom Despacho	-45,255	-19,743	1453,53
1945035	Abaeté	-45,443	-19,163	1358,22
1945038	Porto das Andorinhas	-45,286	-19,279	1290,83
2044003	Carmo do Cajuru	-44,794	-20,192	1360,58
2044006	Divinópolis	-44,892	-20,137	1369,84
2044009	Fazenda Campo Grande	-44,433	-20,625	1524,56
2044016	Fazenda Benedito Chaves	-44,515	-20,169	1506,76
2044020	Calambau	-44,492	-20,068	1407,23
2044026	Fazenda Coqueiros	-44,474	-20,13	1447,12
2044027	Ponte Fernão Dias	-44,783	-20,741	1471,03
2044038	Resende Costa	-44,238	-20,924	1522,26
2044041	Fazenda Laranjeiras	-44,485	-20,102	1497,91
2044042	Carmo da Mata (Eta – Copasa)	-44,868	-20,563	1444,26
2044047	Serra da Saudade	-44,468	-20,024	1440,08
2045005	Lamounier	-45,036	-20,472	1458,08
2045010	Arcos (Copasa)	-45,543	-20,295	1337,98
2045011	Lagoa da Prata	-45,535	-20,037	1466,22
2045013	Santo Antônio do Monte	-45,297	-20,084	1448,47
2045021	Formiga	-45,419	-20,457	1153,71

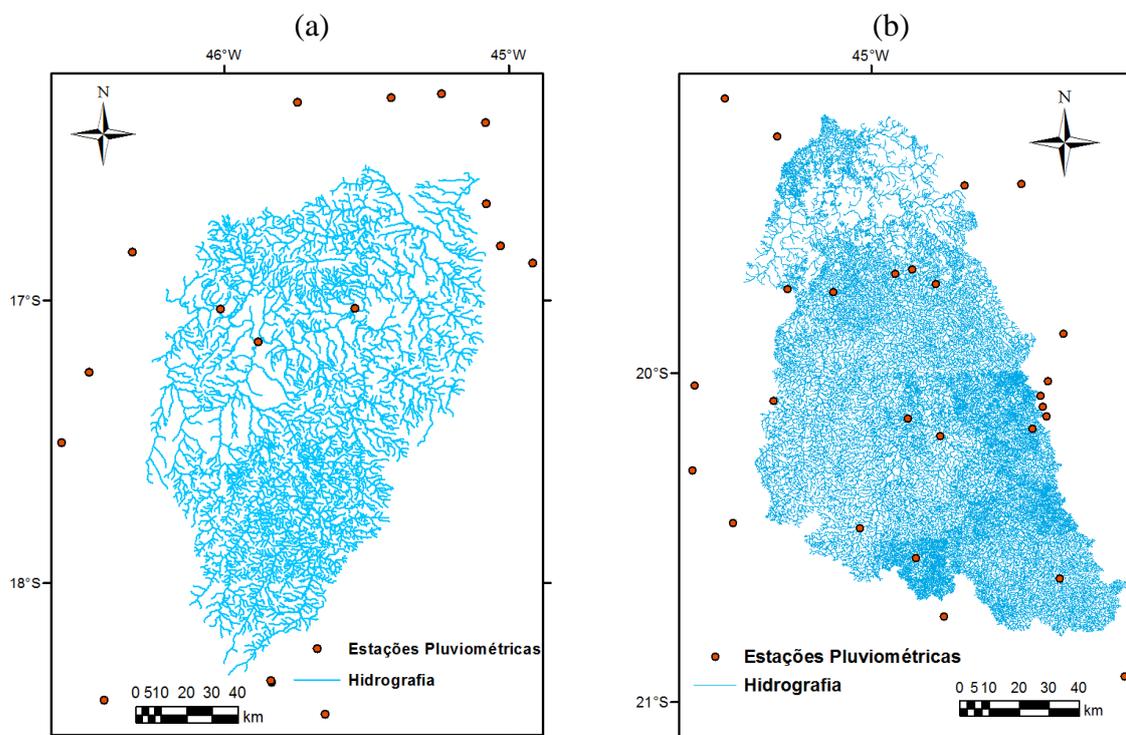


Figura 3 – Localização espacial das estações pluviométricas utilizadas na sub-bacia do rio Paracatu (a) e na bacia do rio Pará (b).

3.3 Regionalização de vazões

A regionalização de vazões foi feita por meio do método das regressões regionais, sendo analisada a regressão simples. O procedimento para aplicação deste método envolve, inicialmente, a definição prévia das regiões hidrologicamente homogêneas e, em uma segunda etapa, a obtenção das equações que permitam associar a vazão com variáveis topológicas e climáticas.

Verificou-se, pelo "Estudo de regionalização de vazão para o aprimoramento do processo de outorga no estado de Minas Gerais", realizado por GPRH e IGAM (2012), que a sub-bacia do rio Paracatu e a bacia do rio Pará constituem, individualmente, em regiões hidrologicamente homogêneas.

Para fins de comparação do desempenho da utilização de variáveis mais explicativas do processo de formação das vazões, as variáveis independentes utilizadas foram: área de drenagem (A); a vazão equivalente ao volume precipitado (Peq), representada pela equação 2; a vazão equivalente ao volume precipitado menos 750 mm, Peq₇₅₀ (equação 3); e vazão equivalente ao volume precipitado menos a média estimada da evapotranspiração real na bacia, Peq_{ETR} (equação 4).

$$Peq = \frac{PA}{31536} \quad (2)$$

$$Peq_{750} = \frac{(P - 750)A}{31536} \quad (3)$$

em que: Peq = vazão equivalente ao volume precipitado, m³ s⁻¹; P = precipitação total anual média na área de drenagem considerada, mm; A = área de drenagem, km²; 31.536 é uma constante que converte P para metros, A para m² e divide pelo número de segundos do ano; e Peq₇₅₀ = vazão equivalente ao volume precipitado menos 750 mm, m³ s⁻¹.

Grande parte do total de água precipitada é transferida de volta para a atmosfera por meio da evapotranspiração, sendo o principal fator da abstração inicial do processo de formação de vazões. Assim, o uso da evapotranspiração real (ETR) anual média como abstração inicial, além de sair do empirismo dos 750 mm, pode melhorar a regionalização de vazões, visto que utiliza-se uma variável explicativa mais consistente e descritiva do ponto de vista físico. Essa nova variável é a vazão equivalente ao volume precipitado menos o valor

médio da evapotranspiração real total anual média da região homogênea, sendo calculada pela equação

$$Peq_{ETR} = \frac{(P - ETR_{méd})A}{31536} \quad (4)$$

em que: Peq_{ETR} = vazão equivalente ao volume precipitado considerando a subtração da evapotranspiração real, $m^3 s^{-1}$; e $ETR_{méd}$ = valor médio da evapotranspiração real total anual média, mm.

A área de drenagem de cada trecho da hidrografia foi obtida usando o Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistido (MDEHC), gerado por meio de cartas planialtimétricas e de hidrografia mapeada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) na escala de 1:100.000, para a sub-bacia do Paracatu, e 1:50.000, para a bacia do Pará.

O mapa de precipitação para a bacia do rio São Francisco foi feito a partir da interpolação do inverso do quadrado da distância dos dados das estações pluviométricas. Assim, individualizou-se a precipitação nas regiões em estudo, sendo dispostos na Figura 4 o mapa de precipitação da sub-bacia do rio Paracatu (a) e da bacia do rio Pará (b).

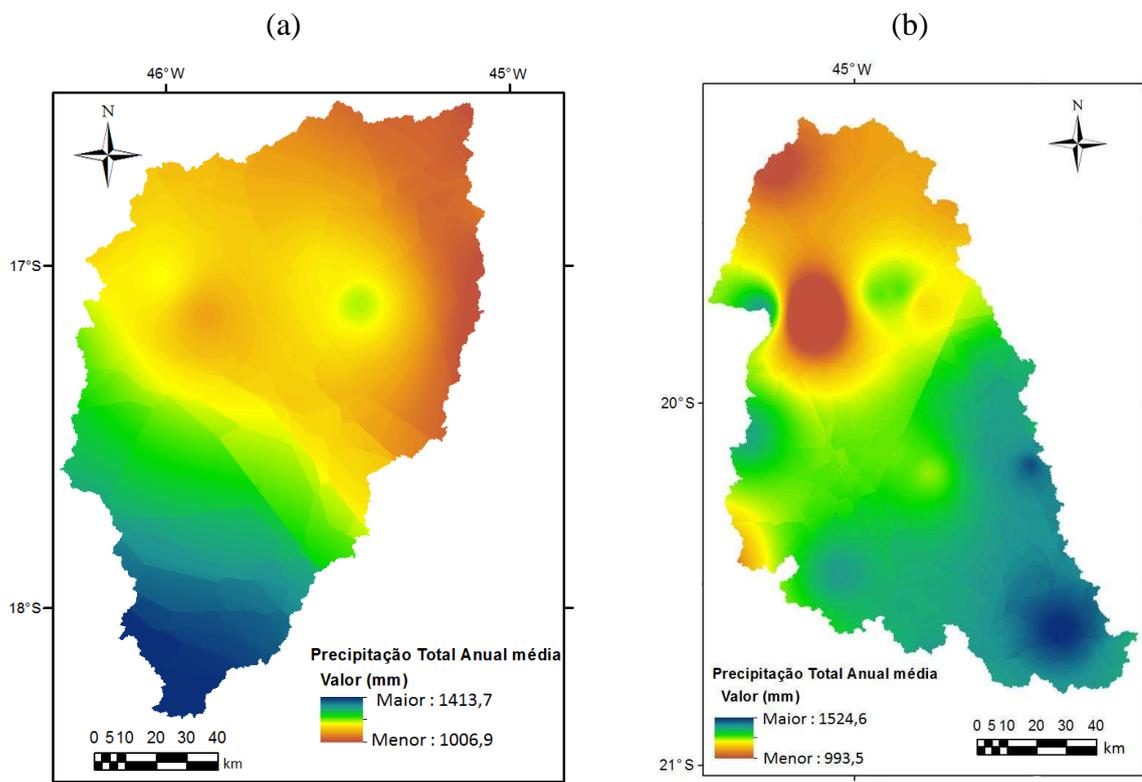


Figura 4 – Distribuição espacial da precipitação na sub-bacia do rio Paracatu (a) e na bacia do rio Pará (b).

A estimativa da evapotranspiração real foi feita com base no balanço hídrico para cada estação fluviométrica, sendo esse balanço descrito pela equação 1. Como foi analisada a média de um longo período de dados, a variação do armazenamento foi desprezada, assim, por meio da relação do balanço hídrico, a evapotranspiração real para cada estação foi obtida por

$$ETR_{estação} = P_{estação} - Q_{mld} \left(\frac{31536}{A} \right) \quad (5)$$

em que, Q_{mld} é a vazão média de longa duração, $m^3 s^{-1}$.

De posse dos dados de evapotranspiração real relativos a área de cada estação fluviométrica, foi feita a interpolação, pelo inverso do quadrado da distância, para se estimar o valor médio da evapotranspiração real anual da bacia, sendo esse o fator de abstração utilizado para definir a variável explicativa definida como Peq_{ETR} .

As variáveis dependentes utilizadas na regionalização de vazões foram a vazão média de longa duração (Q_{mld}), a vazão mínima com permanência de 95% do tempo (Q_{95}) e a vazão mínima com sete dias de duração associada a um período de retorno de dez anos ($Q_{7,10}$).

A regionalização da Q_{mld} e da Q_{95} , usando a Peq_{750} como variável explicativa para a sub-bacia do rio Paracatu, proporcionou melhores estimativas das vazões regionalizadas, quando comparado com as variáveis área e Peq (PRUSKI *et al.*, 2013). Assim, foi feita uma comparação direta entre a Peq_{ETR} e a Peq_{750} para essas vazões na sub-bacia do rio Paracatu. Considerando que a variável $Q_{7,10}$ é de grande interesse para a representação das vazões mínimas e é a vazão de referência no estado de Minas Gerais, procedeu-se, também, a análise das variáveis explicativas para essa variável. Contudo, como não houve estudo prévio para essa vazão nessa sub-bacia, as quatro variáveis explicativas foram analisadas.

Para a bacia do rio Pará a análise foi feita apenas para a $Q_{7,10}$, devido sua importância já mencionada e por ter sido a variável dependente utilizada por Pruski *et al.* (2012), onde foi verificado que o uso da Peq_{750} como variável explicativa gerou menos zonas de extrapolação das estimativas pela equação de regionalização, quando comparado com as variáveis área e Peq .

Para a aplicação da regionalização foi utilizado o programa Sistema Computacional para a Regionalização de Vazões (SisCoRV 1.0), desenvolvido por Sousa (2009), sendo avaliado o modelo de regressão potencial, visto que esse é o modelo de regressão que melhor representou a regionalização realizada por GRPH e IGAM (2012).

3.4 Avaliação do desempenho

A avaliação do desempenho da regionalização das vazões para as diferentes variáveis explicativas foi feita a partir de três análises: estatística, física e de risco.

3.4.1 Avaliação estatística

Os parâmetros utilizados na comparação estatística das variáveis explicativas foi feita, assim como Laaha e Blöschl (2005), analisando o erro absoluto (equação 7), estimado pela raiz quadrada do erro quadrático médio (equação 6), o coeficiente de determinação (equação 8), o erro relativo (equação 9), além do índice de concordância de Willmott, representado pela equação 10.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum (Q_{reg} - Q_{obs})^2 \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{MSE} \quad (7)$$

$$r^2 = \frac{SQR}{SQT} \quad (8)$$

$$ER = \left(\frac{Q_{obs} - Q_{reg}}{Q_{obs}} \right) 100 \quad (9)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum (Q_{reg} - Q_{obs})^2}{\sum (|Q_{reg} - \bar{Q}| + |Q_{obs} - \bar{Q}|)^2} \right] \quad (10)$$

em que: MSE = erro quadrático médio; RMSE = erro absoluto; Qreg = vazão estimada pelo modelo de regionalização, m³ s⁻¹; Qobs = vazão observada na estação fluviométrica, m³ s⁻¹; \bar{Q} = média das vazões observadas, m³ s⁻¹; r² = coeficiente de determinação; SQR = soma dos quadrados da regressão; SQT = soma dos quadrados totais, e igual à soma de quadrados da regressão mais a soma de quadrados dos erros; ER = erro relativo, %; e d = índice de Willmott.

O RMSE tem objetivo de mostrar a dimensão do erro de uma determinada estimativa, com o valor nulo indicando uma previsão perfeita; o aumento desse índice é observado

conforme aumenta a diferença entre valores de previsão e observação. O coeficiente de determinação expressa o percentual de variação da variável dependente que é explicada pela variação da variável independente, variando de -1 a 1. O erro relativo visa medir o erro pontual da estimativa de cada dado observado. O índice de concordância entre modelos, desenvolvido por Willmott (1981), 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, variando de 0 a 1.

3.4.2 Avaliação física

A avaliação do comportamento físico foi feita pela análise da distribuição espacial do coeficiente de escoamento, CE, (definido como a razão entre o total escoado e o total precipitado), para a Q_{mld} , e da vazão específica, para as vazões mínimas, verificando-se a tendência do comportamento destas variáveis em relação ao mapa de precipitação.

3.4.3 Avaliação de risco

Considerando que a utilização da equação de regionalização fora dos limites da regressão apresenta maior insegurança das estimativas de vazão (NAGHETTINI; PINTO, 2007), foi feita uma avaliação do risco associado às estimativas obtidas pelo uso das diferentes variáveis explicativas. Nessa análise, foram criadas classes que consideram limites físicos correspondentes aos valores observados nas estações fluviométricas do coeficientes de escoamento (vazão média) e das vazões específicas (vazões mínimas).

Os valores estimados superiores ao maior valor observado na bacia em análise são aceitáveis por serem fisicamente possíveis, principalmente em regiões de cabeceira, onde existe uma tendência de crescimento do coeficiente de escoamento e da vazão específica. Contudo, esses locais tornam-se um problema do ponto de vista do planejamento e da gestão dos recursos hídricos, pois geram um potencial de superestimativa que pode criar falsas expectativas de disponibilidade hídrica.

Os valores estimados inferiores ao menor valor observado nas estações fluviométricas são fisicamente possíveis e garantem maior segurança para o planejamento e a gestão de recursos hídricos, visto que tendem a subestimar a vazão em análise.

A classe correspondente aos valores compreendidos entre os limites máximo e mínimo observados nas estações fluviométricas é a classe denominada como provável, visto que essa classe é a que possui a variação das vazões específicas ou dos coeficientes de escoamento obtidos nessas estações. Assim, esse intervalo é confiável para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos.

Com esses intervalos definidos, conforme apresentados na Tabela 5, foi feita uma análise de frequência (histograma) do coeficiente de escoamento e das vazões específicas estimadas. Assim, para cada variável explicativa em cada região hidrologicamente homogênea, quantificou-se a porcentagem de segmentos que estão em cada intervalo, verificando-se o risco associado às estimativas geradas pela regionalização das diferentes variáveis.

Tabela 5 – Intervalos utilizados para a análise de frequência das vazões regionalizadas

CE	$q_{\text{mín}}$	Classificação
$CE_{\text{est}} > CE_{\text{máx_obs}}$	$q_{\text{est}} > q_{\text{máx_obs}}$	Aceitável - Potencial de superestimativa
$CE_{\text{mín_obs}} < CE_{\text{est}} < CE_{\text{máx_obs}}$	$q_{\text{mín_obs}} < q_{\text{est}} < q_{\text{máx_obs}}$	Provável - Confiável
$CE_{\text{est}} < CE_{\text{mín_obs}}$	$q_{\text{est}} < q_{\text{mín_obs}}$	Aceitável - Potencial de subestimativa

em que: CE = coeficiente de escoamento; CE_{est} = CE estimado considerando as variáveis explicativas em análise; $CE_{\text{máx_obs}}$ = CE máximo observado entre as estações fluviométricas da região em estudo; $CE_{\text{mín_obs}}$ = CE mínimo observado entre as estações fluviométricas da região em estudo; $q_{\text{mín}}$ = vazão mínima específica; q_{est} = q_{95} ou $q_{7,10}$ estimada considerando as variáveis explicativas em análise; $q_{\text{máx_obs}}$ = q_{95} ou $q_{7,10}$ máxima observada entre as estações fluviométricas da região em estudo; e $q_{\text{mín_obs}}$ = q_{95} ou $q_{7,10}$ mínima observada entre as estações fluviométricas da região em estudo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Regionalização de vazões para a sub-bacia do rio Paracatu

Os valores relativos à área de drenagem, precipitação, evapotranspiração real (ETR), $Q_{7,10}$, Q_{95} , Q_{mld} , às vazões específicas $q_{7,10}$ e q_{95} e ao coeficiente de escoamento (CE), para as estações fluviométricas utilizadas na regionalização da sub-bacia do rio Paracatu, são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Área de drenagem, precipitação, evapotranspiração real, $Q_{7,10}$, Q_{95} , Q_{mld} , as vazões específicas $q_{7,10}$ e q_{95} e o CE para as estações fluviométricas utilizadas no estudo

Estação	Área (km ²)	Precip. (mm)	ETR (mm)	$Q_{7,10}$ (m ³ s ⁻¹)	Q_{95} (m ³ s ⁻¹)	Q_{mld} (m ³ s ⁻¹)	$q_{7,10}$ (L s ⁻¹ km ⁻²)	q_{95} (L s ⁻¹ km ⁻²)	CE (%)
42690001	30100	1279,4	947,6	34,41	56,37	316,72	1,14	1,87	25,9
42750000	33500	1269,1	942,7	41,79	60,32	346,78	1,25	1,8	25,7
42840000	209	1471,9	963,9	0,79	1,09	3,37	3,75	5,23	34,5
42850000	4390	1297,4	898,4	3,19	6,34	55,55	0,72	1,44	30,8
42860000	5710	1261,9	947,4	4,84	7,16	56,93	0,85	1,25	24,9
42930000	40900	1264,4	906,6	52,72	82,38	464,03	1,29	2,01	28,3
42980000	41300	1265,1	944,0	56,17	76,39	420,64	1,36	1,85	25,4

A menor área de drenagem para essa sub-bacia foi de 209 km² (estação 42840000) e a variação das vazões específicas foi de 0,72 a 3,75 L s⁻¹ km⁻² para a $q_{7,10}$, e de 1,25 a 5,23 L s⁻¹ km⁻² para a q_{95} . O coeficiente de escoamento variou de 24,9 a 34,5%. O valor médio da evapotranspiração real média dessa sub-bacia é de 930 mm, assim, para essa região, a $Pe_{q_{ETR}}$ foi designada como $Pe_{q_{930}}$.

4.1.1 Regionalização da $Q_{7,10}$ para a sub-bacia do Paracatu

As equações de regionalização para a $Q_{7,10}$ obtidas, considerando as variáveis área de drenagem, Peq , Peq_{750} e Peq_{930} , são as equações de 11 a 14, respectivamente.

$$Q_{7,10} = 0,0054 \text{ Área}^{0,8440} \quad (11)$$

$$Q_{7,10} = 0,0685 \text{ Peq}^{0,8690} \quad (12)$$

$$Q_{7,10} = 0,1304 \text{ Peq}_{750}^{0,8912} \quad (13)$$

$$Q_{7,10} = 0,1564 \text{ Peq}_{930}^{0,9271} \quad (14)$$

Na Tabela 7 são apresentados os valores do coeficiente de determinação, da amplitude do erro relativo, da raiz quadrada do erro quadrático médio e do coeficiente de Willmott para a regionalização da $Q_{7,10}$, considerando a área de drenagem, a Peq , a Peq_{750} e a Peq_{930} como variáveis explicativas.

Tabela 7 – Estatísticas analisadas na regionalização da $Q_{7,10}$ considerando as variáveis explicativas Área, Peq , Peq_{750} e Peq_{930} na sub-bacia do rio Paracatu

	$Q_{7,10}$			
	Área	Peq	Peq_{750}	Peq_{930}
r^2	0,935	0,941	0,946	0,952
Amplitude do ER (%)	-37,6 a 100,5	-36,9 a 96,2	-36,0 a 93,6	-34,8 a 88,2
RMSE	7,22	6,88	6,61	6,19
d	0,966	0,97	0,973	0,976

A tendência de melhora quando se substitui a área pela Peq e a Peq pela Peq_{750} , evidenciada por Pruski *et al.* (2013) para a Q_{mld} e Q_{95} , também é constatada para a regionalização da $Q_{7,10}$, sendo observada melhora em todas estatísticas analisadas (Tabela 7). A utilização da Peq_{930} na regionalização da $Q_{7,10}$ gerou ajustes estatísticos ainda melhores que os obtidos com o uso da Peq_{750} , visto que: o r^2 obtido com o uso da Peq_{750} é de 0,946, enquanto o uso da Peq_{930} assume o valor de 0,952; a amplitude do erro relativo passa de -36,0 a 93,6%, com o uso da Peq_{750} , para -34,8 a 88,2%, com o uso da Peq_{930} ; o RMSE diminui de 6,61 para 6,19; e o índice de concordância fica mais próximo da unidade, sendo o desempenho da Peq_{930} de 0,976.

A análise estatística é uma importante ferramenta na avaliação do comportamento dos processos hidrológicos, entretanto, procedimentos que auxiliem entender o comportamento físico dos processos de formação de vazões são importantes para uma melhor representação dos dados disponíveis (LI *et al.*, 2009).

Para auxiliar na interpretação dos dados são apresentados, nas Figuras 5 e 6, os mapas de distribuição da vazão específica ($q_{7,10}$) ao longo da bacia, considerando a área de drenagem (5a), Peq (5b), Peq_{750} (6a) e Peq_{930} (6b) como variáveis explicativas.

Quando a $q_{7,10}$ é obtida considerando exclusivamente a área (Figura 5a), essa vazão não reflete a distribuição da precipitação ao longo da bacia (Figura 4a), fazendo com que nas regiões mais ao norte, onde ocorrem as menores precipitações, as vazões específicas estimadas associadas a pequenas áreas de drenagem sejam altas. Com isso, as $q_{7,10}$ estimadas são predominantemente superiores a $3,75 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ (maior valor observado nas estações pluviométricas), chegando à estimativa de $6,89 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$.

O uso da variável Peq (Figura 5b) proporcionou uma melhor representação espacial das vazões específicas ao longo da bacia, passando a refletir a variação da precipitação ao longo da bacia. Nesse caso, a proporção de trechos superiores de $3,75 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ passa a ser expressivamente reduzido e concentrado na região sul, na qual ocorrem maiores precipitações médias anuais. O maior valor observado para essa variável foi de $5,08 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$.

O uso da Peq_{750} na regionalização da $Q_{7,10}$ permite uma distribuição ainda mais representativa da tendência de variação das precipitações, como pode ser visualizada na Figura 6a. Tal comportamento também foi evidenciado por Pruski *et al.* (2013) na regionalização das vazões Q_{mld} e Q_{95} .

O uso da Peq_{930} como variável explicativa também gera uma distribuição das vazões específicas conforme o mapa de precipitação (Figura 6b). Contudo, como a ordem de magnitude da abstração inicial dessa variável independente é próximo a 750 mm, as alterações no comportamento da Peq_{930} em comparação com a Peq_{750} não foram tão relevantes como no caso das substituições da área pela Peq e da Peq pela Peq_{750} .

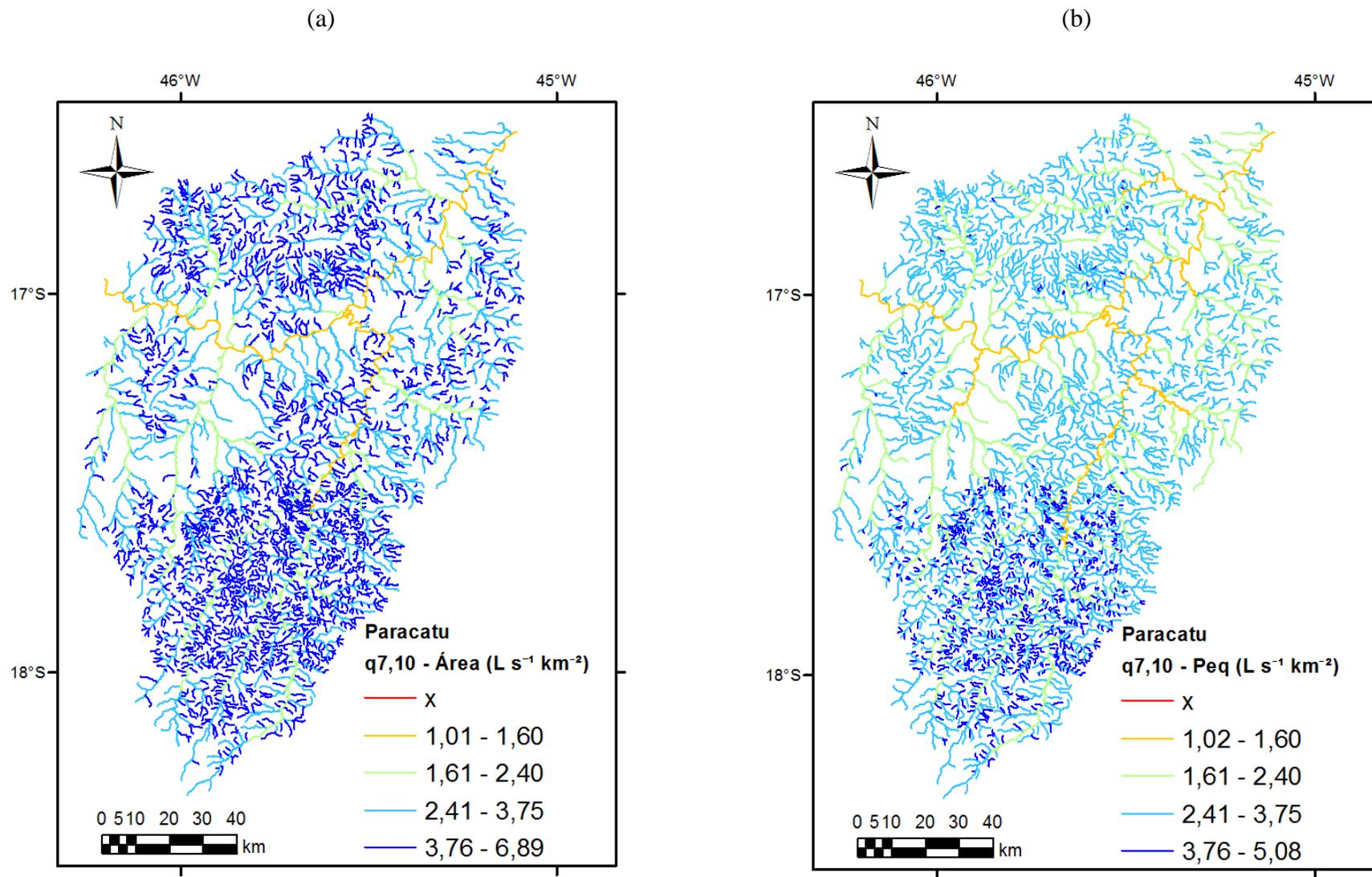


Figura 5 – Distribuição da $q_{7,10}$ estimada utilizando as variáveis área de drenagem (a) e Peq (b) ao longo da sub-bacia do rio Paracatu.

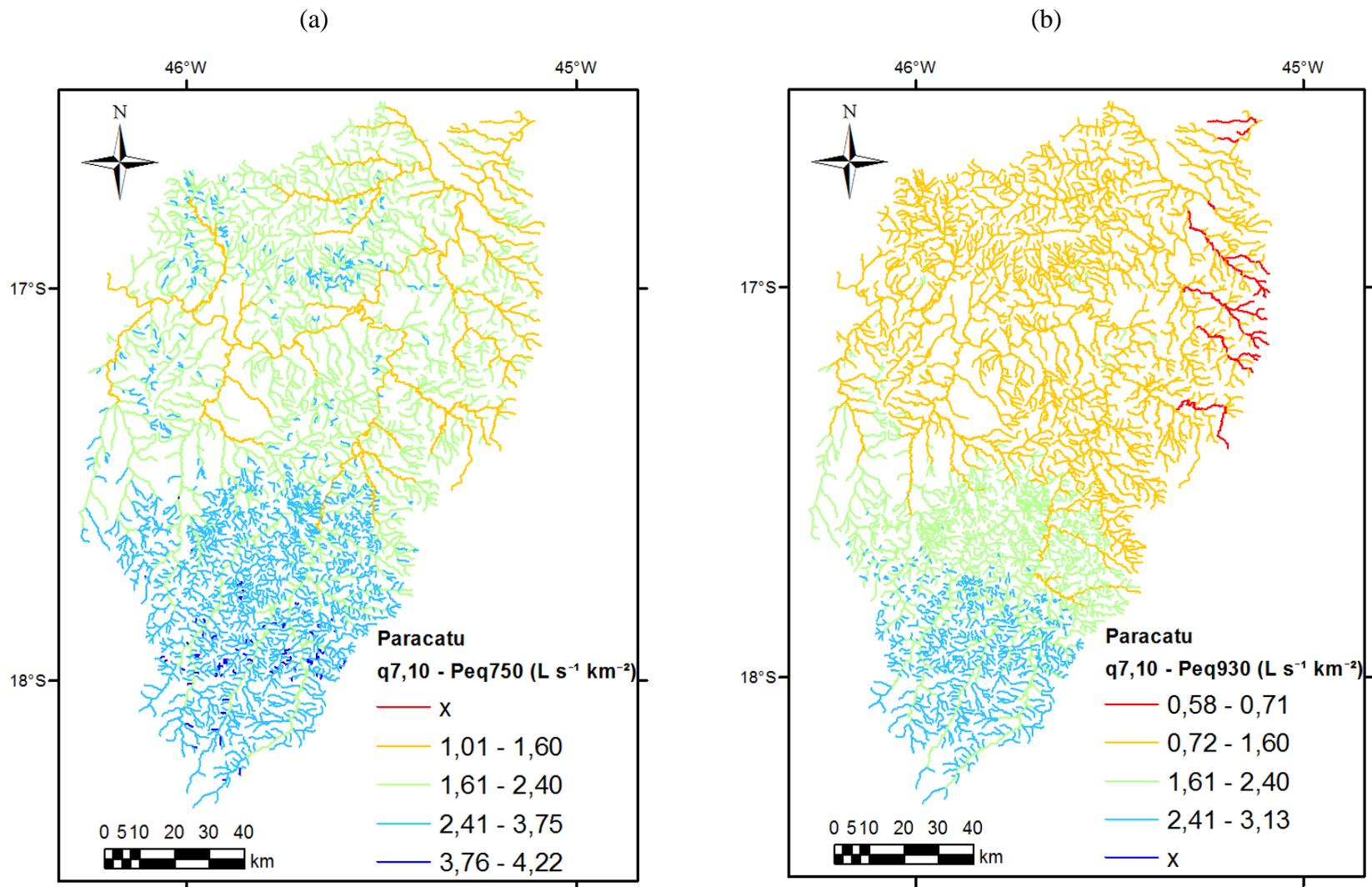


Figura 6 – Distribuição da $q_{7,10}$ estimada utilizando as variáveis Peq_{750} (a) e Peq_{930} (b) ao longo da sub-bacia do rio Paracatu.

Para se analisar o risco associado às estimativas das vazões considerando as diferentes variáveis explicativas, apresenta-se, na Figura 7, o histograma com a porcentagem de segmentos da hidrografia correspondentes a cada classe de $q_{7,10}$. Os limites dos intervalos são os valores, mínimo e máximo, de vazão específica observados nas estações fluviométricas.

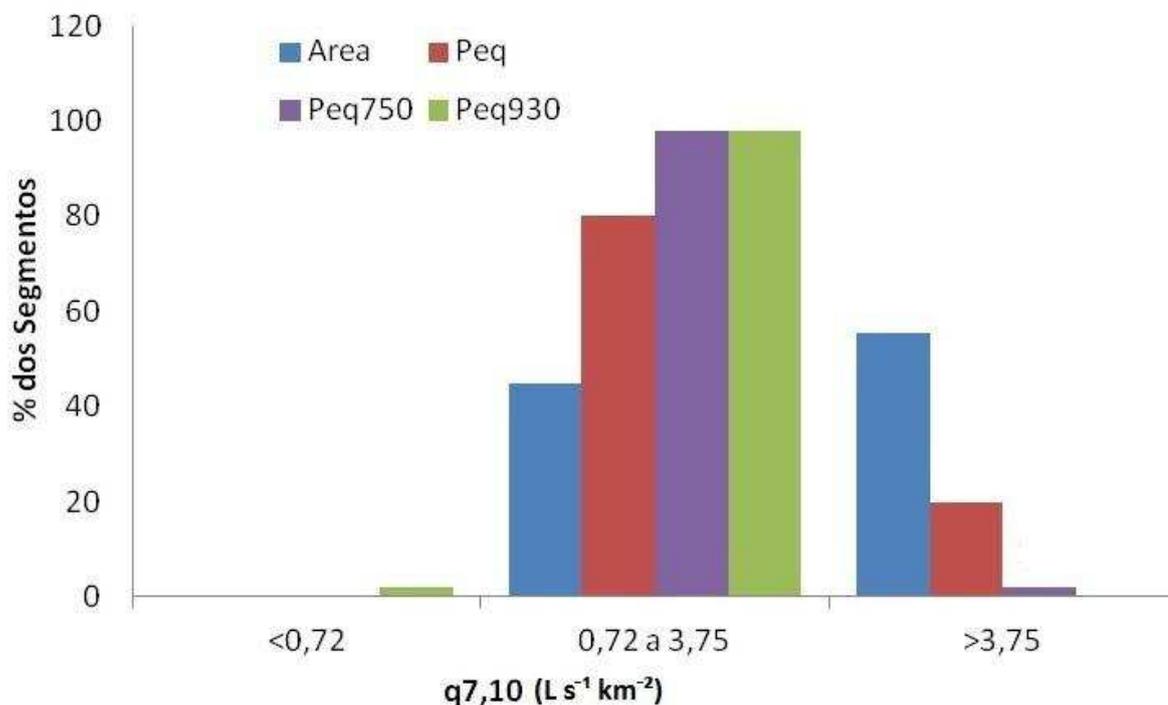


Figura 7 – Histograma com a porcentagem de segmentos da hidrografia correspondentes a cada classe de $q_{7,10}$.

A influência da variável explicativa é claramente observada nesse histograma, visto que a porcentagem de segmentos da $q_{7,10}$ superior ao maior valor observado entre as estações fluviométricas ($3,75 L s^{-1} km^{-2}$) é muito maior quando se usa a variável área, para o qual 55,4% dos segmentos da hidrografia estão associados com a classe correspondente ao potencial de superestimativa, sendo que essa porcentagem diminui para 19,8% quando se usa a Peq, 1,9% usando a Peq₇₅₀ e sendo ausente na regionalização considerando a Peq₉₃₀.

Por mais que a vazão específica possua a tendência de crescimento em regiões de cabeceira, não há garantia que esse crescimento seja obtido usando alguma variável que venha a superestimar. As vazões estimadas considerando a área e a Peq como variáveis explicativas possuem potencial de superestimativa das vazões em regiões de cabeceira, quando comparado com as outras duas variáveis explicativas, sendo que as produções específicas chegam a mais

de $5 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ (Figuras 5a e 5b). Assim, as estimativas das vazões usando algumas dessas variáveis podem gerar falsas expectativas de disponibilidade hídrica e causar problemas socioeconômicos e ambientais.

A regionalização usando as variáveis área, Peq e Peq₇₅₀ não apresentam segmentos com produções específicas menores que o menor valor observado $0,72 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$, assim, para essas variáveis, não há estimativas no intervalo considerado aceitável, em função do seu potencial de subestimativa. Contudo, 2% dos segmentos estimados considerando a Peq₉₃₀ estão dentro desse intervalo, localizados na região nordeste da bacia (Figura 6b), onde ocorre os menores valores de precipitação.

Assim, 44,6% dos trechos estimados, considerando a área de drenagem, possuem produção específica no intervalo de $0,72$ a $3,75 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$, classificado como confiável na análise de risco para o planejamento e gestão dos recursos hídricos. Para a Peq esse valor sobe para 80,2%, chegando à magnitude de 98% para a Peq₇₅₀ e Peq₉₃₀.

O uso das variáveis Peq₇₅₀ e Peq₉₃₀ para a regionalização da $Q_{7,10}$ são as que possuem maior porcentagem de trechos no intervalo de variação das vazões específicas observadas nas estações fluviométricas, entretanto, enquanto a Peq₇₅₀ possui 1,9% dos trechos no intervalo de potencial de superestimativa, o que caracteriza uma insegurança na estimativa, a Peq₉₃₀ possui 2% dos segmentos no potencial de subestimativa, sendo essas estimativas mais seguras.

Assim, verificou-se que a troca da área pela Peq e da Peq pela Peq₇₅₀ melhorou expressivamente os desempenhos estatístico e físico, e a análise de risco. Já a troca da Peq₇₅₀ pela Peq₉₃₀ proporcionou melhora no desempenho estatístico, entretanto, as mudanças no desempenho físico e no comportamento de risco foram pouco expressivas, podendo ser explicadas pela magnitude do fator de abstração, pois enquanto a troca da Peq pela Peq₇₅₀ tem-se uma abstração de 750 mm, a troca da Peq₇₅₀ pela Peq₉₃₀ há um aumento de apenas 180 mm na abstração. Logo, o valor da evapotranspiração real para essa sub-bacia é relativamente próximo do valor empírico, refletindo nas poucas mudanças observadas nas avaliações física e de risco entre essas duas variáveis. Contudo, o uso de um valor físico encontrado na bacia para a representação do processo de formação de vazões é mais representativo que o uso do valor empírico de 750 mm, pois considera a variação das condições edafoclimáticas de cada bacia.

4.1.2 Regionalização da Q_{95} para a sub-bacia do rio Paracatu

Como Pruski *et al.* (2013) observaram uma tendência de melhora na substituição da variável área pela Peq e da Peq pela Peq_{750} para a vazão mínima Q_{95} na sub-bacia do Paracatu, a análise para essa vazão foi feita diretamente entre a Peq_{750} e a Peq_{930} . As equações de regionalização para Q_{95} , considerando as variáveis Peq_{750} e Peq_{930} , são as equações 15 e 16, respectivamente.

$$Q_{95} = 0,1994 Peq_{750}^{0,8926} \quad (15)$$

$$Q_{95} = 0,2399 Peq_{930}^{0,9280} \quad (16)$$

Os valores do coeficiente de determinação, da amplitude do erro relativo, da raiz quadrada do erro quadrático médio e do índice de concordância de Willmott para regionalização da Q_{95} , considerando a Peq_{750} e Peq_{930} como variáveis explicativas, são apresentados na Tabela 8.

Verifica-se que a Peq_{930} proporcionou os melhores desempenhos estatísticos da Q_{95} , ocorrendo uma pequena melhora no coeficiente de determinação (0,972) e no índice de Willmot (0,986) e uma melhora mais acentuada na amplitude do erro relativo (-28 a 49,9%) e no RMSE (7,08).

Tabela 8 – Estatísticas analisadas para regionalização da Q_{95} considerando as variáveis explicativas Peq_{750} e Peq_{930} na sub-bacia do rio Paracatu

	Q_{95}	
	Peq_{750}	Peq_{930}
r^2	0,966	0,972
Amplitude do ER (%)	-29,5 a 57,2	-28 a 49,9
RMSE	7,70	7,08
d	0,983	0,986

Com intuito de melhor representação da q_{95} estimada, é apresentada na Figura 8 a distribuição dessa vazão específica ao longo da bacia, considerando as variáveis Peq_{750} (a) e Peq_{930} (b).

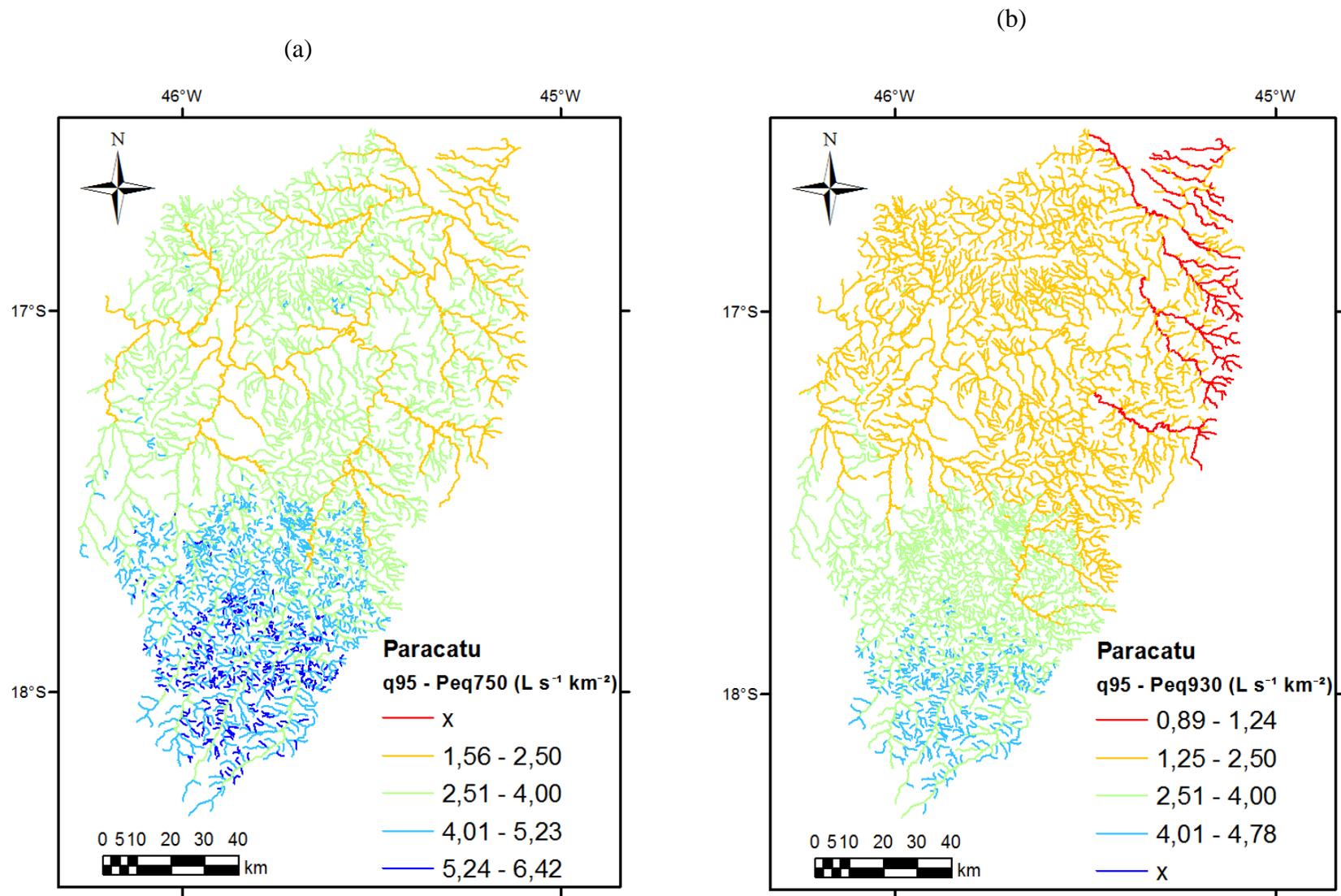


Figura 8 – Distribuição da q_{95} estimada utilizando as variáveis Peq_{750} (a) e Peq_{930} (b) ao longo sub-bacia do rio Paracatu.

Observa-se que as distribuições das vazões específicas regionalizadas seguem a variação do mapa de precipitação (Figura 4a) para as duas variáveis explicativas analisadas, sendo os locais onde há maior total precipitado, ao sul da sub-bacia, com maiores produções específicas e as regiões com menor precipitação, ao norte/nordeste, com uma tendência de diminuição da vazão específica.

Assim como na análise da $q_{7,10}$, a avaliação do risco associado às estimativas considerando as diferentes variáveis explicativas foi feita por meio do histograma (Figura 9) que possui a porcentagem de segmentos da hidrografia correspondentes a cada classe de q_{95} .

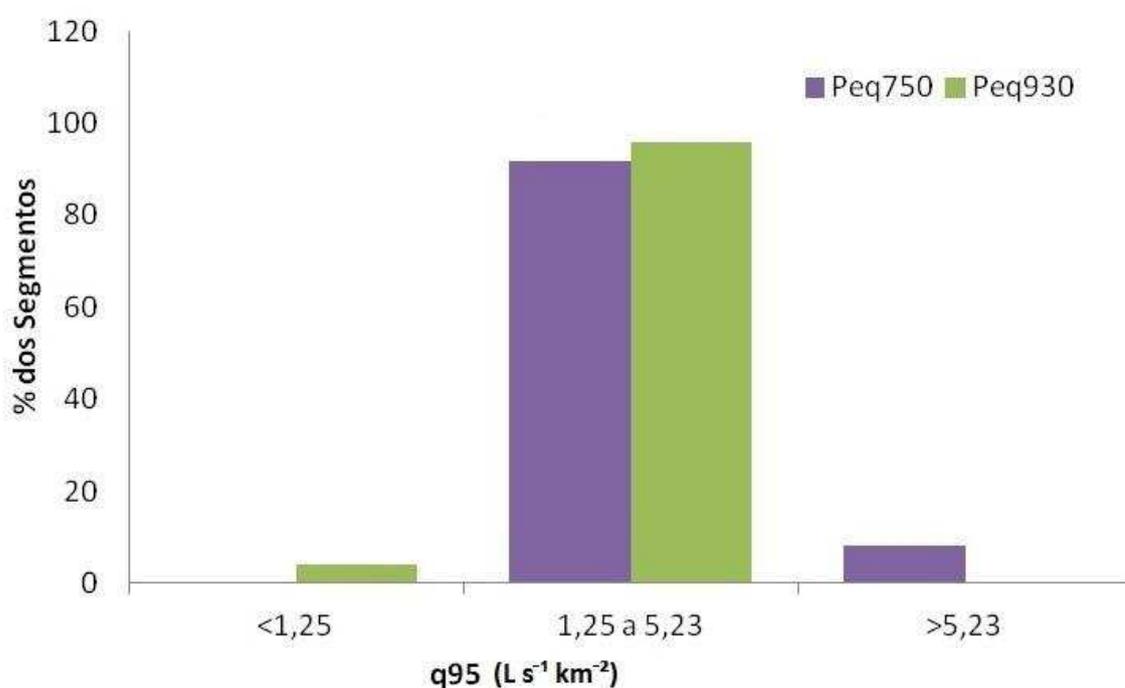


Figura 9 – Histograma com a porcentagem de segmentos da hidrografia correspondentes a cada classe de q_{95} .

A variável que possui o valor empírico gera 8,3% dos trechos na classe caracterizada pelo potencial de superestimativa, com predominância ao sul da bacia (Figura 8a), enquanto o uso da Peq_{930} não proporciona nenhum segmento da hidrografia nessa classe. O uso da Peq_{750} não gera trechos com estimativa inferiores a $1,25 L s^{-1} km^{-2}$ (Figura 9). Ao contrário dessa variável, a Peq_{930} produz trechos no intervalo de potencial de subestimativa, sendo de 4% e localizados na região nordeste (Figura 8b). Logo, 91,7% dos trechos possuem estimativas compreendendo o intervalo de variação da q_{95} observada com o uso da Peq_{750} , sendo esse valor de 96% quando se usa a Peq_{930} .

Conforme mencionado na análise da $q_{7,10}$, embora a vazão específica tenda a crescer em regiões de cabeceira, não existe garantia de que essa tendência seja a observada quando se usa a Peq_{750} como variável explicativa. Os trechos ao sul da bacia com vazões estimadas por essa variável têm potencial de superestimativa das vazões em regiões de cabeceira, chegando a produções de até $6,42 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$. Assim, pode-se criar uma falsa expectativa de disponibilidade hídrica.

O uso da Peq_{930} como variável explicativa da regionalização da Q_{95} tende a reduzir o risco de superestimativa dessa vazão e, conseqüentemente, reduz os riscos socioeconômicos e ambientais associados à superestimativa. Por mais que a Peq_{930} possua trechos no intervalo de potencial de subestimativa, essa estimativa, além de ser em baixa porcentagem, favorece a segurança.

Assim, o uso da variável explicativa Peq_{930} para a regionalização da Q_{95} proporcionou, além de uma pequena melhora nos ajustes estatísticos analisados, uma maior porcentagem dos segmentos estimados dentro do intervalo de variação da q_{95} observada nas estações fluviométricas, uma redução do risco de superestimativas e uma distribuição das produções específicas seguindo a tendência de variação da precipitação. Conforme já mencionado na análise para a $q_{7,10}$, o uso de um valor físico encontrado na bacia é mais representativo que um valor empírico.

4.1.3 Regionalização da Q_{mld} para a sub-bacia do rio Paracatu

Como Pruski *et al.* (2013) observaram uma tendência de melhora na estimativa da vazão média na sub-bacia do rio Paracatu quando se substituiu a variável área pela Peq e a Peq pela Peq_{750} , a análise para a Q_{mld} foi feita, assim como para a Q_{95} , apenas para a Peq_{750} e Peq_{930} . As equações de regionalização para a Q_{mld} obtidas considerando as variáveis Peq_{750} e Peq_{930} são as equações 17 e 18, respectivamente.

$$Q_{mld} = 0,7711 P_{eq750}^{0,9708} \quad (17)$$

$$Q_{mld} = 0,9555 P_{eq930}^{1,0066} \quad (18)$$

Na Tabela 9 são apresentados os valores do coeficiente de determinação, da amplitude do erro relativo, da raiz quadrada do erro quadrático médio e do índice de concordância de Willmott para a Q_{mld} considerando a Peq_{750} e a Peq_{930} como variáveis explicativas.

Tabela 9 – Estatísticas analisadas na regionalização da Q_{mld} considerando as variáveis explicativas Peq_{750} e Peq_{930} na sub-bacia do rio Paracatu

	Q_{mld}	
	Peq_{750}	Peq_{930}
r^2	0,998	0,998
Amplitude do ER (%)	-8,1 a 8,9	-9,7 a 4,5
RMSE	15,66	15,53
d	0,998	0,998

Observa-se que o uso da Peq_{930} e da Peq_{750} como variáveis explicativas proporcionou ajustes estatísticos na regionalização da Q_{mld} muito próximos (Tabela 9). Não houve diferença no coeficiente de determinação e no índice de Willmott, entretanto a amplitude do erro relativo teve uma pequena diminuição, variando de 17% (-8,1 a 8,9%) ao ser utilizada a Peq_{750} , e 14,2% (-9,7 a 4,5%) quando se usa da Peq_{930} . O RMSE também teve um redução, sendo igual a 15,53 para a Peq_{930} , enquanto para a Peq_{750} foi de 15,66.

Na Figura 10 é apresentada a distribuição do coeficiente de escoamento considerando a Peq_{750} (a) e Peq_{930} (b) como variáveis explicativas.

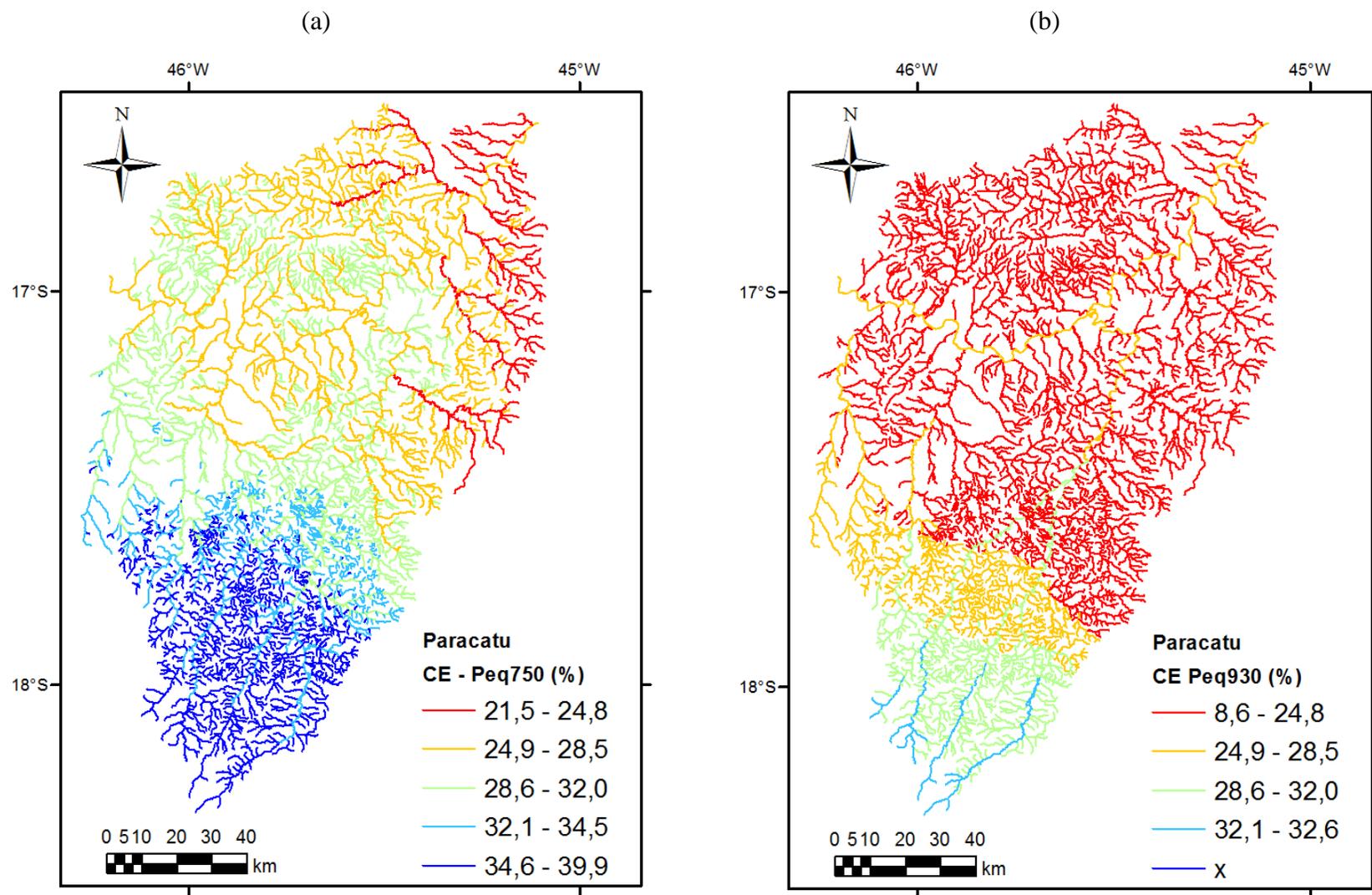


Figura 10 – Distribuição do CE estimado utilizando as variáveis Peq₇₅₀ (a) e Peq₉₃₀ (b) ao longo da bacia.

Observa-se que tanto a Peq_{750} como a Peq_{930} apresentam a variação do coeficiente de escoamento seguindo a mesma tendência do mapa de precipitação (Figura 4a), com maiores valores de CE na parte sul da bacia, região com maior total precipitado, tendo uma redução no sentido norte, região com menor precipitação anual média.

A análise de risco, representada na Figura 11 pelo histograma com a porcentagem de segmentos da hidrografia correspondentes a cada classe de CE, evidencia que o uso da variável Peq_{750} como variável explicativa faz com que 26% dos trechos fiquem no intervalo de potencial de superestimativa, visto que possuem estimativas de CE superiores ao maior valor observado na bacia (34,5%), chegando a estimativa máxima desse coeficiente de 39,9% (Figura 10a). Esses trechos estão localizados predominantemente na região sul, refletindo um comportamento que, de certa forma, pode ser justificado pelo mapa de precipitação (Figura 4a). O uso da Peq_{930} , diferentemente da Peq_{750} , não gera segmentos no intervalo do potencial de superestimativa, visto que nenhum trecho foi estimado com CE superior a 34,5%.

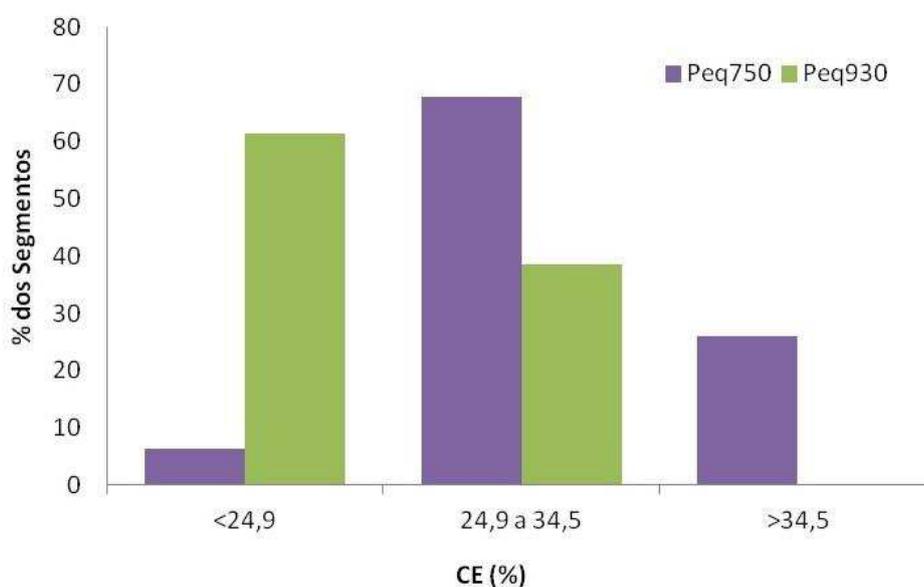


Figura 11 – Histograma com a porcentagem de segmentos da hidrografia correspondentes a cada classe de CE.

A regionalização considerando a Peq_{750} como variável explicativa gera 6,3% dos trechos estimados menores que o menor valor observado, que é 24,9%. Esses segmentos estão localizados predominantemente na região nordeste da bacia (Figura 10a), com o CE mínimo de 21,5%. O uso da Peq_{930} como variável explicativa faz com que 61,4% dos trechos estejam com coeficiente de escoamento estimado menor que o menor valor observado, chegando a

uma estimativa mínima de 8,6%, sendo localizados nas regiões centro e norte da bacia (Figura 10b).

Por mais que o coeficiente de escoamento tenda a crescer em regiões de cabeceira, não há garantia de que essa tendência seja a observada quando se usa a Peq_{750} como variável explicativa. Os trechos estimados considerando a Peq_{750} possuem um potencial de superestimativa, quando comparados com a Peq_{930} , dessas regiões (Figuras 10a e 11). Essa superestimativa é um grande problema para o planejamento e gestão de recursos hídricos, conforme já discutido na regionalização das outras variáveis. O uso da Peq_{930} como variável explicativa não gera trechos no intervalo de potencial de superestimativa, evitando essa falsa expectativa. Contudo, essa variável explicativa gera um potencial de subestimativa, que por mais que favoreça a segurança, é em mais de 60% da bacia.

Apesar do fato do uso da Peq_{930} ter possibilitado uma pequena melhora no ajuste estatístico e uma redução no risco associado à superestimativa das vazões, considera-se que a alta porcentagem de segmentos em que os coeficientes de escoamento estimados foram menores que o menor CE observado entre as estações fluviométricas estudadas tende a promover uma expressiva redução na estimativa dos recursos hídricos disponíveis, sendo estimativas excessivamente seguras. Assim, considera-se que as estimativas utilizando a Peq_{750} como variável explicativa são mais representativas.

Como foi observado por Pruski *et al.* (2013) que a Peq_{750} foi a variável explicativa que melhor representou a vazão média, para essa sub-bacia do rio Paracatu, em comparação com as variáveis área e Peq , evidencia-se que o uso de uma abstração da precipitação no processo de formação de vazões aprimora a regionalização da Q_{mld} , no entanto, o uso da evapotranspiração real como esse fator de abstração não proporcionou melhora para essa variável nessa sub-bacia. Assim, como não existem informações a respeito de variáveis explicativas que levem em conta uma abstração do processo de formação de vazões na literatura, faz-se necessários testes para outras bacias e a busca de variáveis que possam vir a explicar melhor a vazão média.

Embora o desempenho associado a variável Peq_{750} possa ser considerado mais representativo, o uso da Peq_{930} possui, em contrapartida, a vantagem de se considerar um valor físico representativo da bacia.

4.2 Regionalização da $Q_{7,10}$ para a bacia do rio Pará

Na Tabela 10 é apresentada a área de drenagem, a precipitação, a evapotranspiração real (ETR), a $Q_{7,10}$ e a $q_{7,10}$ para as estações fluviométricas utilizadas no regionalização da bacia do rio Pará.

Tabela 10 – Área de drenagem, precipitação, evapotranspiração real, $Q_{7,10}$ e $q_{7,10}$ para as estações fluviométricas utilizadas no estudo

Código	Área (km ²)	Precipitação (mm)	ETR (mm)	$Q_{7,10}$ (m ³ s ⁻¹)	$q_{7,10}$ (L s ⁻¹ km ⁻²)
40150000	2500	1462,0	1013,5	12,23	4,89
40170000	1040	1411,8	972,6	1,99	1,92
40269900	338	1475,4	1060,1	1,83	5,41
40300001	1560	1414,3	983,5	3,98	2,55
40330000	7330	1424,8	985,3	22,13	3,02
40400000	1820	1336,8	932,1	4,54	2,49

A menor área de drenagem entre as estações é de 338 km² e a variação da vazão mínima específica é de 1,92 a 5,41 L s⁻¹ km⁻². O valor da evapotranspiração real média dessa bacia é de 980 mm, logo, para essa bacia, a Peq_{ETR} será chamada de Peq_{980} .

As equações 19 a 22 são as equações de regionalização da $Q_{7,10}$ considerando a área de drenagem, a Peq , a Peq_{750} e a Peq_{980} como variáveis explicativas, respectivamente.

$$Q_{7,10} = 0,0066 Area^{0,8988} \quad (19)$$

$$Q_{7,10} = 0,1006 Peq^{0,9153} \quad (20)$$

$$Q_{7,10} = 0,1897 Peq_{750}^{0,9305} \quad (21)$$

$$Q_{7,10} = 0,2698 Peq_{980}^{0,9438} \quad (22)$$

Os valores do coeficiente de determinação, da amplitude do erro relativo, da raiz quadrada do erro quadrático médio e do índice de Willmott para as variáveis explicativas Área, Peq , Peq_{750} e Peq_{980} estão dispostos na Tabela 11.

Tabela 11 – Estatísticas analisadas para as variáveis explicativas Área, Peq, Peq₇₅₀ e Peq₉₈₀ na bacia do Pará

	Q _{7,10}			
	Area	Peq	Peq ₇₅₀	Peq ₉₈₀
r ²	0,842	0,858	0,874	0,888
Amplitude do ER (%)	-38,4 a 71,4	-36,3 a 69,3	-33,8 a 67,4	-31,3 a 65,6
RMSE	2,31	2,11	1,91	1,73
d	0,9	0,917	0,981	0,985

Pruski *et al.* (2012) evidenciaram, para a bacia do rio Pará, uma melhora no ajuste estatístico quando se usa a variável Peq em comparação com a área e a variável Peq₇₅₀ em relação a Peq. A utilização da variável explicativa Peq₉₈₀ mantém essa tendência de melhora, o que pode ser observado pelo maior valor do coeficiente de determinação (0,888), menor amplitude do erro relativo (-31,3 a 65,6%), menor RMSE (1,73) e maior índice de Willmott (0,985).

São apresentadas nas Figura 12 e 13 a variação da q_{7,10} considerando as variáveis área de drenagem (12a), Peq (12b), Peq₇₅₀ (13a) e Peq₉₈₀ (13b) ao longo da bacia.

As vazões estimadas obtidas pela variável explicativa área não representam a variação da precipitação ao longo da bacia (Figura 4b), por isso que as menores áreas de drenagem estão sempre associadas com vazões específicas altas, independentemente da precipitação que ocorre nessa área. Isso pode ser evidenciado ao norte da bacia, onde a precipitação é mais baixa e existe altos valores de vazão específica estimadas em trechos que possuem pequenas áreas de drenagem (Figura 12a). Com isso, a regionalização da Q_{7,10}, utilizando a área de drenagem como variável explicativa, teve predominância das estimativas das vazões superiores a 5,41 L s⁻¹ km⁻², que é o maior valor observado nas estações fluviométricas ao longo de toda a bacia.

A variável Peq segue a mesma tendência que a variável área, com uma pequena melhora da distribuição ao norte da bacia. Por mais que a tendência física natural de que os valores de produção específicas sejam maiores nas cabeceiras, o comportamento da vazão específica não é condicionado apenas à variável área. A vazão, que é altamente dependente da precipitação, começa a refletir o efeito da variação da precipitação quando se usa a Peq como variável explicativa. Assim, os valores de produção específica começam a seguir a tendência de redução em locais com baixa precipitação.

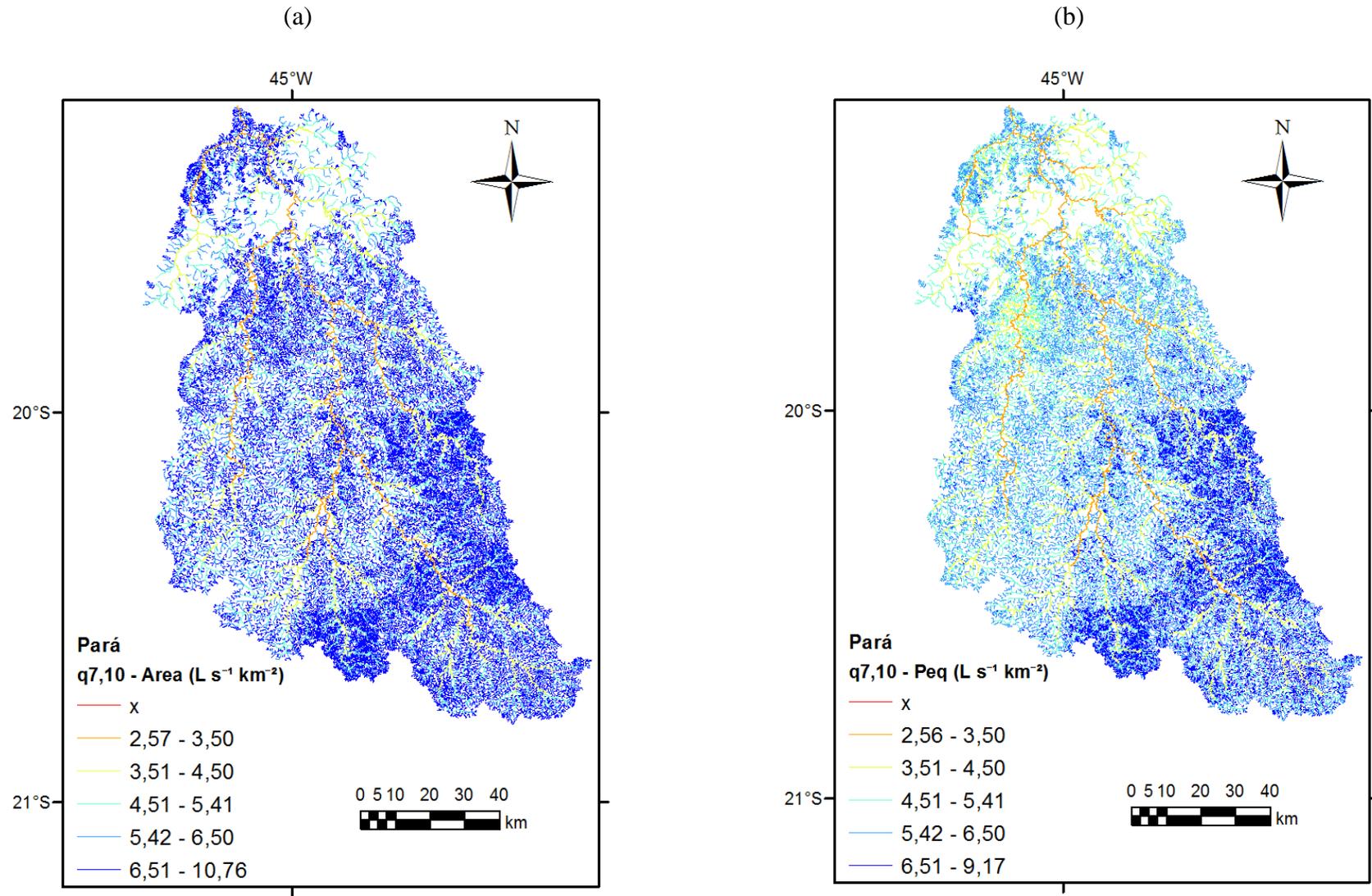


Figura 12 – Estratificação em classes da distribuição da $q_{7,10}$ estimada utilizando as variáveis área de drenagem (a) e Peq (b) ao longo da bacia.

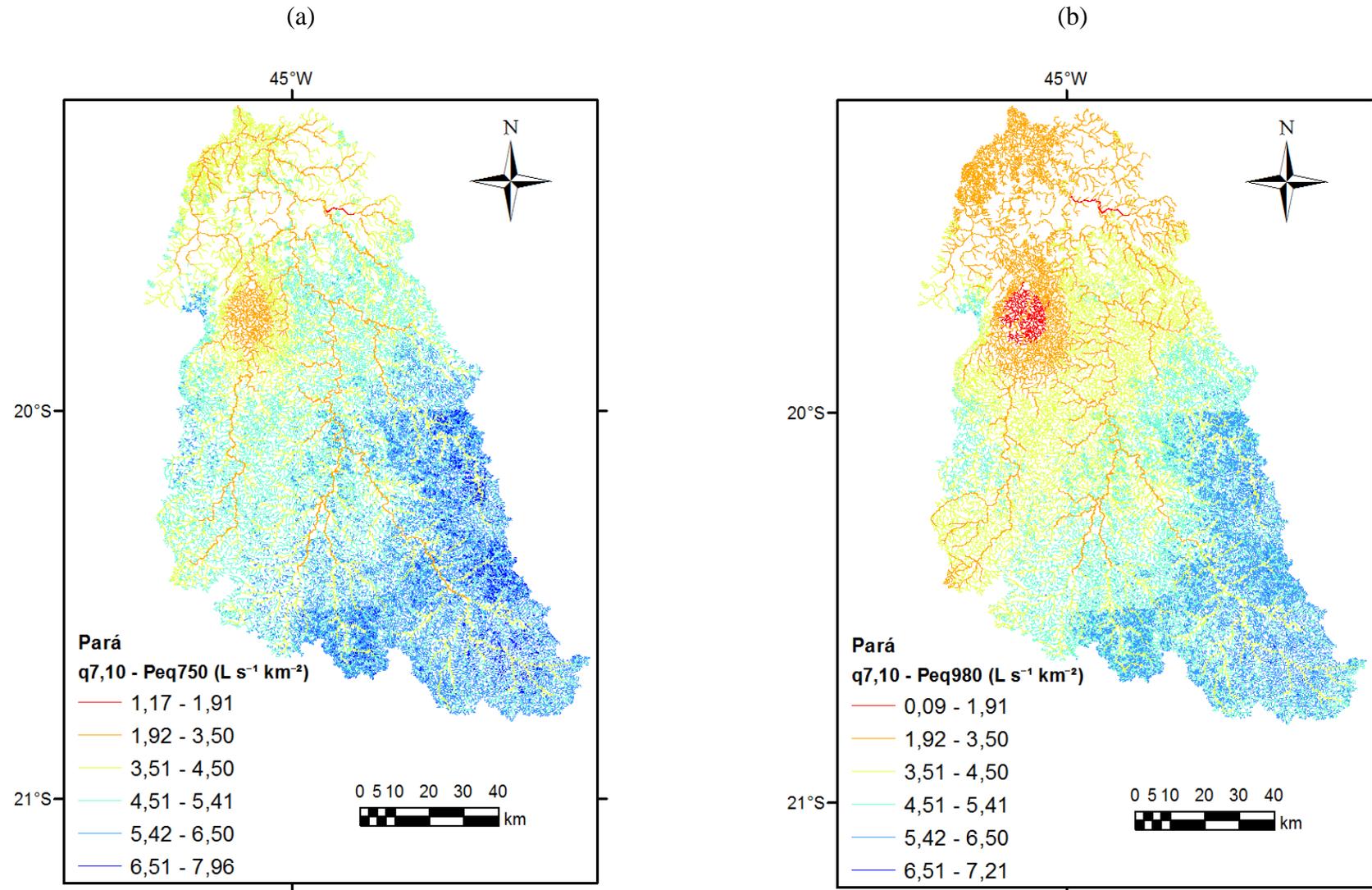


Figura 13 – Estratificação em classes da distribuição da $q_{7,10}$ estimada utilizando as variáveis Peq_{750} (a) e Peq_{980} (b) ao longo da bacia.

Verifica-se, pela Figura 13a, que o uso da variável Peq_{750} faz com que a região sudeste possua as maiores produções específicas e a região norte as menores. Observando o mapa de precipitação (Figura 4b), nota-se que a distribuição da vazão específica para essa variável segue a tendência desse mapa, visto que as regiões com maiores produções são as regiões com maior precipitação e os locais com menores produções são os locais com menor precipitação. O uso da variável explicativa Peq_{980} gerou uma distribuição ao longo da bacia que segue, mais nitidamente, a tendência do mapa de precipitação, conforme visualizado na Figura 13b.

Com intuito de se analisar o risco associado às estimativas das vazões, foi feita, assim como na sub-bacia do rio Paracatu, uma análise de frequência (Figura 14) dos segmentos da hidrografia correspondentes a cada classe de $q_{7,10}$ definida na Tabela 5.

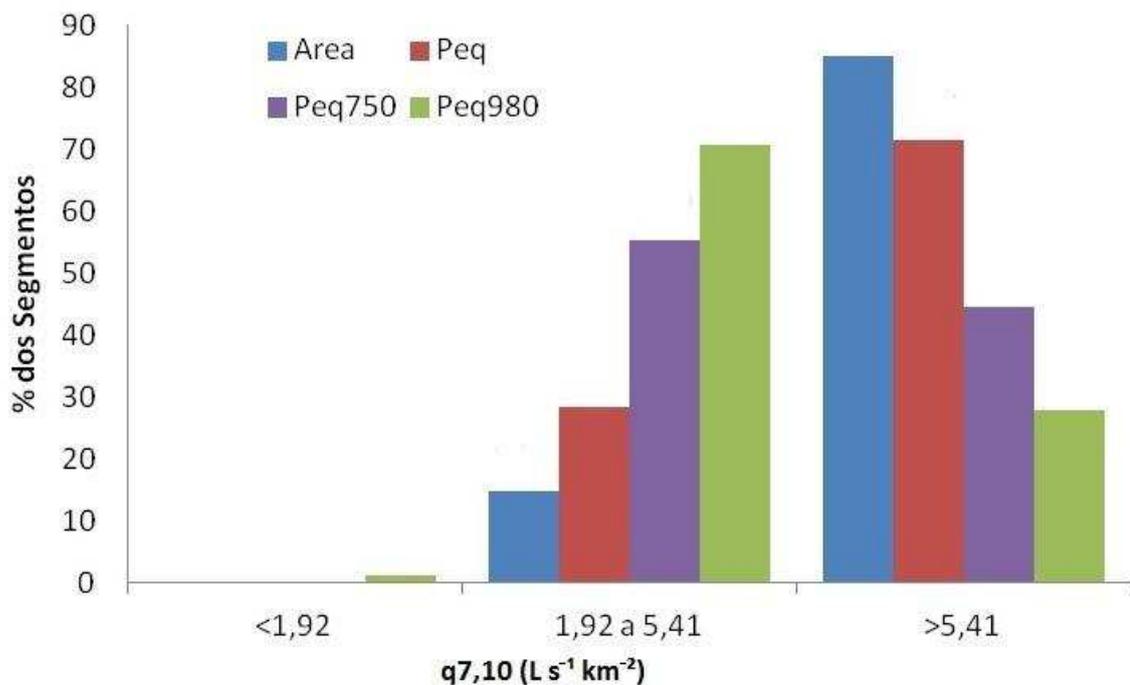


Figura 14 – Histograma com a porcentagem de segmentos que cada variável explicativa possui em cada intervalo.

A influência do uso de variáveis mais explicativas do processo de formação de vazões é claramente observada nesse histograma, uma vez que a porcentagem de segmentos de $q_{7,10}$ superiores a $5,41 L s^{-1} km^{-2}$, intervalo correspondente ao potencial de superestimativa, é muito maior quando se usa a variável área. Assim, 85% dos segmentos regionalizados utilizando essa variável estão nesse intervalo, ocorrendo uma diminuição para 71,5% quando do uso da Peq , chegando a 44,6% dos segmentos usando a Peq_{750} e de 28% quando se usa a Peq_{980} .

Os rios com vazões estimadas pela área de drenagem e até mesmo pela variável Peq tendem a superestimar as vazões em regiões de cabeceira, quando comparados com a Peq_{750} e Peq_{980} , chegando a produções específicas maiores que $9 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ (Figura 12a e 12b), quase o dobro do maior valor observado entre as estações fluviométricas. O uso da Peq_{980} tende a reduzir o potencial de superestimativa da $q_{7,10}$ a 28% dos trechos, sendo localizados predominantemente na região sudeste da bacia (Figura 13b), caracterizada pela maior precipitação total anual média (Figura 4b). Assim, essa variável reduz os riscos associados a essa superestimativa.

Ao contrário das outras duas variáveis que não apresentam segmentos com vazões específicas estimadas menores que $1,92 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$, a Peq_{750} possui 0,02% dos segmentos nessa classe, enquanto que a Peq_{980} apresenta 1,25% dos trechos com potencial de subestimativa. Além dessas porcentagens serem consideradas inexpressivas, verifica-se, comparando com o mapa de precipitação, que esses segmentos estão associados às menores precipitações totais anuais médias.

O uso da variável Peq_{980} seguiu a tendência de melhora da substituição da área pela Peq e da Peq pela Peq_{750} evidenciada por Pruski *et al.* (2012). Assim, o uso da Peq_{980} melhorou os desempenhos estatístico e físico e na análise de risco, sendo este último caracterizado pela menor porcentagem de trechos na classe de potencial de superestimativa e pela maior porcentagem dos segmentos estimados dentro do intervalo de variação das vazões específicas observadas nas estações fluviométricas. Além disso, o uso da evapotranspiração real na variável explicativa que considera uma abstração do processo de formação de vazões é mais representativo que o valor empírico de 750 mm, pois leva em consideração um valor físico obtido na própria região em análise.

5 CONCLUSÃO

Com o trabalho desenvolvido obteve-se as seguintes conclusões:

- A regionalização das vazões mínimas, considerando a variável explicativa Peq_{ETR} , permitiu melhorias nos índices estatísticos, melhor representação física e a predição de valores mais seguros que as outras variáveis analisadas, sendo esta melhoria bem acentuada em relação ao desempenho das variáveis área e Peq e menos expressivo em relação à Peq_{750} .

- O uso da Peq_{ETR} na regionalização da Q_{mld} possibilitou melhora no ajuste estatístico e uma redução no risco associado à superestimativa das vazões, contudo, essa variável tende a promover estimativa das vazões excessivamente seguras na região estudada. Sendo assim, as estimativas utilizando a Peq_{750} como variável explicativa são consideradas mais representativas para essa vazão nessa sub-bacia.

- A utilização da evapotranspiração real como fator de abstração da precipitação no processo de formação de vazões, em substituição ao valor de 750 mm, permite a consideração da variação das condições edafoclimáticas de cada bacia e a redução do empirismo decorrente do uso de um valor pré-estabelecido para todas as bacias.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Roma: FAO (Irrigation and Drainage, n.56). 1998. 300p.
- ANA - Agência Nacional das Águas. Brasil, 2001. Disponível em <<http://hidroweb.ana.gov.br>>. Acesso em: 15 de maio de 2010.
- AZEVEDO, A. A. **Avaliação de metodologias de regionalização de vazões mínimas de referência para a sub-bacia do rio Paranã**. 2004. 101 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2004.
- BAENA, L. G. N. **Regionalização de vazões para a bacia do rio Paraíba do Sul, a montante de Volta Redonda, a partir de modelo digital de elevação hidrologicamente consistente**. 2002. 135 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.
- BAENA, L. G. N.; SILVA D. D.; PRUSKI, F. F.; CALIJURI, M. L. Regionalização de vazões com base em modelo digital de elevação para a bacia do rio Paraíba do Sul. **Revista Engenharia na Agricultura**, Jaboticabal, v. 24, n.3, p. 612-624, set./dez. 2004, doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162004000300013>
- BEVEN, K.; WOOD, E.F. Catchment geomorphology and the dynamics of runoff contributing areas. **Journal of Hydrology**. v.65, p.139-158. 1983.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paracatu**. Brasília: PLANPAR, 1996. v.1, t.1. CD-ROM.
- BRODIE, R. S.; HOSTELER, S.; SLATTER, E. Comparison of daily percentiles of streamflow and rainfall to investigate stream-aquifer connectivity. **Journal of Hydrology**. v.349, p.56–67. 2008.
- CBH-PARÁ. **Plano Diretor da Bacia Hidrográfica do Rio Pará: Etapa 2 - Caracterização do meio físico**. Minas Gerais, 2007.
- CHOW, V.T.; MAIDMENT, D.R.; MAYS, L.W. **Applied hydrology**. New York: McGraw-Hill, (Water Resources and Environmental Engineering). 1988. 572p.

CUTORE, P.; CRISTAUDO, G.; CAMPISANO, A.; MODICA, C.; CANCELLIERE, A.; ROSSI, G. Regional models for the estimation of streamflow series in ungauged basins. **Water Resour. Manage.** 21, 789–800. 2007.

DINPASHOH, Y.; FAKHERI-FARD, A.; MOGHADDAM, M.; JAHANBAKHS, S.; MIRNIA, M. Selection of variables for the purpose of regionalization of Iran's precipitation climate using multivariate methods. **Journal of Hydrology**. v.297, 109–123. 2004.

ESLAMIAN, S.; BIABANAKI, M. Low flow regionalization modeling. **International Journal of Ecological Economics & Statistics**, Set./Nov. 2008. Disponível em: <http://findarticles.com/p/articles/mi_6925/is_12/ai_n28516608/>. Acesso em: 24 mar. 2010.

EUCLYDES, H. P.; FERREIRA, P. A.; FARIA FILHO, R. F. R. **Atlas digital das águas de Minas**. Viçosa, MG: UFV, RURALMINAS, IGAM, 2005. 78 p.

FILL, H.H. Informações hidrológicas. In: **Modelos para gerenciamento de recursos hídricos**. São Paulo: Nobel/ABRH, 1987.

GPRH - Grupo de Pesquisas em Recursos Hídricos da UFV, IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Estudo de regionalização de vazão para o aprimoramento do processo de outorga no Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: IGAM. 2012. 415p.

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.

LAAHA, G.; BLÖSCHL, G. Low flow estimates from short stream flow records - A comparison of methods. **Journal of Hydrology**, v.306, p.264-286, 2005.

LAAHA, G.; BLÖSCHL, G. A comparison of low flow regionalisation methods - catchment grouping. **Journal of Hydrology**. 323, p.193-214. 2006.

LAMB, R. An approach to the calibration of a conceptual rainfall-runoff model for flood frequency estimation by continuous simulation. **Water Resour. Res.** v.35, 3103–3114. 2000.

LAMB, R.; KAY, A.L. Confidence intervals for a spatially generalized, continuous simulation flood frequency model for Great Britain. **Water Resour. Res.** 40, W07501. 2004. <http://dx.doi.org/10.1029/2003WR002428>.

LEMOS, A. F. **Avaliação de metodologias de regionalização de vazões mínimas de referência para a bacia do rio São Francisco, à montante do reservatório de Três Marias**. 2006. 85 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

LI, Z.; LIU, W.; ZHANG, X.; ZHENG, F. Impacts of land use change and climate variability on hydrology in an agricultural catchment on the Loess Plateau of China. **Journal of Hydrology**, v. 377, p. 35- 42, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Bases e referenciais**. Disponível em: <<http://mapas.ibge.gov.br/bases-e-referenciais/bases-cartograficas/cartas/>>. Acesso em: 01 ago. 2010.

- MALEKINEZHAD, H.; NACHTNEBEL, H. P.; KLIK, A. Comparing the index flood and multiple regression methods using L-moments. **Physics and Chemistry of the Earth**. v.36, p.54-60. 2011.
- MANNING, J.C. **Applied Principles of Hydrology**. 3 ed., Upper Saddle River, N.J., Prentice Hall. 1997. 276p.
- MASIH, I.; UHLENBROOK, S.; MASKEY, S.; AHMAD, M.D. Regionalization of a conceptual rainfall-runoff model based on similarity of the flow duration curve: A case study from the semi-arid Karkheh basin, Iran. **Journal of Hydrology**, v. 391, p.188-201. 2010.
- MERZ, R.; BLÖSCHL, G. Regionalisation of catchment model parameters. **Journal of Hydrology**. (Amsterdam).v.287, p.95-123. 2004.
- NAGHETTINI, M.; PINTO, É. J. de A. **Hidrologia estatística**. Belo Horizonte, CPRM, 2007. 552p.
- NISBET, T. **Water Use by Trees**. Information Note. Forestry Commission, Edinburgh, 2005.
- NOVAES, L. F. **Modelo para a quantificação da disponibilidade hídrica na Bacia Hidrográfica do Rio Paracatu**. Viçosa: UFV. 2005. 104p. Dissertação Mestrado.
- NOVAES, L.F.; PRUSKI, F.F.; QUEIROZ, D.O. DE; RODRIGUEZ, R. del G.; SILVA, D.D.; RAMOS M.M. Modelo para a quantificação da disponibilidade hídrica: parte 1 – obtenção da equação de recessão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.14, n.1, p. 15-26. 2009.
- PANDEY, G. R.; NGUYEN, V.T.V. A comparative study of regression based methods in regional frequency analysis. **Journal of Hydrology**. v.225, p.92-101. 1999.
- PARAJKA, J.; MERZ, R.; BLÖSCHL, G. A comparison of regionalisation methods for catchment model parameters. **Hydrol. Earth Syst. Sci.** v.9, n.3, 157-171. 2005.
- PEREIRA, S. B.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D.; RAMOS, M. M. Estudo do comportamento hidrológico do Rio São Francisco e seus principais afluentes. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.11, n.6, p. 615-622, 2007.
- RIBEIRO, C. B. M.; MARQUES F. A.; SILVA D. D. Estimativa e regionalização de vazões mínimas de referência para a bacia do rio Doce. **Engenharia na agricultura**, Viçosa, v.13, n. 2, p. 103-107,2005.
- PETERSEN, T; DEVINENI, N; SANKARASUBRAMANIAN, A. Seasonality of monthly runoff over the continental United States: Causality and relations to mean anual and mean monthly distributions of moisture and energy. **Journal of Hydrology**, v.468-469, p. 139-150, 2012, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.08.028>
- PRUSKI, F.F.; NUNES, A.A.; PRUSKI, P.L.; RODRIGUEZ, R. del G. Improved regionalization of streamflow by use of the streamflow equivalent of precipitation as an explanatory variable. **Journal of Hydrology**, v.476, p. 52-71, 2013, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.10.005>

PRUSKI, F.F.; NUNES, A.A.; REGO, F. S.; SOUZA, M. F. Extrapolação de equações de regionalização de vazões mínimas: Alternativas para atenuar os riscos. **Water Resources and Irrigation Management**, v. 1, p. 51-59, 2012.

PRUSKI, F.F.; PRUSKI, P.L. Tecnologia e inovação frente a gestão de recurso hídricos. In: Medeiros, S. de S., Gheyi, H.R., Galvão, C. de O., Paz, V.P.S. (Eds), **Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas**. Instituto Nacional do Semiárido, Campina Grande, 27-58. 2011.

RAO, A.R.; SRINIVAS, V.V. Regionalization of watersheds by fuzzy cluster analysis, **Journal of Hydrology**. v.318, p.57-79. 2006.

RAZAVI, T; COULIBALY, P. Streamflow prediction in ungauged basins: review of regionalization methods. **J. Hydrologic Eng.** v.18, n.8, 958-975. 2013, doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000690](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000690)

RODRIGUEZ, R. del G. **Proposta conceitual para a regionalização de vazões**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008. 254p.

SAMUEL, J.; COULIBALY, P.; METCALFE, R. A. Estimation of continuous streamflow in Ontario ungauged basins: comparison of regionalization methods. **J. Hydrologic Eng.** 16, 447. 2011.

SANTOS, E.H.M.; GRIEBELER, N.P.; OLIVEIRA, L.F.C. Relação entre uso do solo e comportamento hidrológico na Bacia Hidrográfica do Ribeirão João Leite. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.14, n.8, 826-834. 2010.

SILVA, D. D. et al. **Regionalização de vazões para a Sub-Bacia 51**. Brasília: ANEEL; Viçosa: UFV, 2002. 207p.

SILVA, B.C.; TIAGO FILHO, G.L.; SILVA, A.P.M.; de PAULO, R.G.F. Regionalização de vazões na bacia do Rio Grande. In: XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2003, Curitiba. **Anais...**Curitiba: ABRH, 2003, CD-ROM.

SILVA JÚNIOR, O.B.; BUENO, E.O.; TUCCI, C.E.M.; CASTRO, N.M.R. Extrapolação espacial na regionalização de vazão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre: ABRH. v.8, .n.1, Jan./Mar., 21-37. 2003.

SIVAPALAN, M.; TAKEUCHI, K.; FRANKS, S.W.; GUPTA, V.K.; KARAMBIRI, H.; LAKSHIM, V.; LIANG, X.; MCDONNELL, J.J.; MENDIONDO, E.M.; CONNELL, O.; OKI, T.; POMEROY, J.W.; SCHERTZER, D.; UHLENBROOK, S.; ZEHE, E. IAHS Decade on predictions in ungauged basins (PUB), 2003–2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences. **Hydrol. Sci. J.** v.48, n.6, 857–880. 2003.

SMAKHTIN, V.U. Low flow hydrology: a review. **Journal of Hydrology**. v.240, 147-186. 2001.

SOUZA, H.T. **Sistema computacional para regionalização de vazões**. Viçosa: UFV. 2009. 86p. Dissertação Mestrado.

SPOHR, R.B.; CARLESSO, R.; GALLÁRRETA, C.G.; PRÉCHAC, F.G.; PETILLO, M.G. Runoff modeling from soil physical characteristics in different places in Uruguay. **Ciência Rural**. v.39, n.1, p.74-81. 2009.

TALLAKSEN, L. M. A review of baseflow recession analysis. **Journal of hydrology**, n. 165, p. 349-370, 1995.

TSAKIRIS, G.; NALBANTIS, I.; CAVADIAS, G. Regionalization of low flows based on canonical correlation analysis. **Adv. Water Resour.** v.34, 865–872. 2011.

TUCCI, C.E.M. **Regionalização de vazões**. Porto Alegre, Editora Universidade UFRGS. 2002. 256 p.

WAGENER, T.; WHEATER, H.S. Parameter estimation and regionalization for continuous rainfall–runoff models including uncertainty. **Journal of Hydrology**. v.320, 132–154. 2006.

WAGENER, T.; WHEATER, H.S.; GUPTA, H.V. Rainfall-Runoff Modelling in Gauged and Ungauged Catchments. **Imperial College Press**, London p. 300. 2004.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**. v. 2, n. 2, p. 184-194, 1981.

WINCHELL M.; GUPTA, H.V.; SOROOSHIAN, S. On the simulation of infiltration- and saturation-excess runoff using radar-based rainfall estimates: effects of algorithm uncertainty and pixel aggregation. **Water Resources Research**. v.34 n.10, p.2655-2670. 1998.

YADAV, M.; WAGENER, T.; GUPTA, H. Regionalization of constraints on expected watershed response behavior for improved predictions in ungauged basins. **Adv. Water Resour.** v.30, 1756–1774. 2007.

YOUNG, A.R. Stream flow simulation within UK ungauged catchments using a daily rainfall–runoff model. **Journal of Hydrology**. v.320, 155–172. 2006.

APÊNDICE

Tabela 1.A. - Diagrama de barras das estações fluviométricas utilizadas na bacia do rio Paracatu - Jusante

Ano/Estação	42690001	42750000	42840000	42850000	42860000	42930000	42980000
1968							
1969							
1970							
1971							
1972							
1973							
1974							
1975							
1976							
1977							
1978							
1979							
1980							
1981							
1982							
1983							
1984							
1985							
1986							
1987							
1988							
1989							
1990							
1991							
1992							
1993							
1994							
1995							
1996							
1997							
1998							
1999							
2000							
2001							
2002							
2003							
2004							
2005							

 Anos com mais de 95% dos dados

Tabela 2.A - Diagrama de barras das estações fluviométricas utilizadas na bacia do rio Pará

Ano/Estação	40150000	40170000	40269900	40300001	40330000	40400000
1968						
1969						
1970						
1971						
1972						
1973						
1974						
1975						
1976						
1977						
1978						
1979						
1980						
1981						
1982						
1983						
1984						
1985						
1986						
1987						
1988						
1989						
1990						
1991						
1992						
1993						
1994						
1995						
1996						
1997						
1998						
1999						
2000						
2001						
2002						
2003						
2004						
2005						

 Anos com mais de 95% dos dados

Tabela 3.A - Diagrama de barras das estações pluviométricas utilizadas na bacia do rio Paracatu - Jusante

Estação	1644012	1645000	1645002	1645003	1645005	1645009	1645013	1646000	1745000	1745007	1746001	1746002	1746007	1845002	1845011	1845013	1846003
1968																	
1969																	
1970																	
1971																	
1972																	
1973																	
1974																	
1975																	
1976																	
1977																	
1978																	
1979																	
1980																	
1981																	
1982																	
1983																	
1984																	
1985																	
1986																	
1987																	
1988																	
1989																	
1990																	
1991																	
1992																	
1993																	
1994																	
1995																	
1996																	
1997																	
1998																	
1999																	
2000																	
2001																	
2002																	
2003																	
2004																	
2005																	

 Anos com mais de 95% dos dados

Tabela 4.A - Diagrama de barras das estações pluviométricas utilizadas na bacia do rio Pará

Ano/Estação	1944007	1944011	1944021	1944031	1944032	1944049	1945004	1945008	1945035	1945038	2044003	2044006	2044009	2044016	2044020	2044026	2044027
1968																	
1969																	
1970																	
1971																	
1972																	
1973																	
1974																	
1975																	
1976																	
1977																	
1978																	
1979																	
1980																	
1981																	
1982																	
1983																	
1984																	
1985																	
1986																	
1987																	
1988																	
1989																	
1990																	
1991																	
1992																	
1993																	
1994																	
1995																	
1996																	
1997																	
1998																	
1999																	
2000																	
2001																	
2002																	
2003																	
2004																	
2005																	

continua....

Tabela 4.A - Continuação

Ano/Estação	2044038	2044041	2044042	2044047	2045005	2045010	2045011	2045013	2045021
1968									
1969									
1970									
1971									
1972									
1973									
1974									
1975									
1976									
1977									
1978									
1979									
1980									
1981									
1982									
1983									
1984									
1985									
1986									
1987									
1988									
1989									
1990									
1991									
1992									
1993									
1994									
1995									
1996									
1997									
1998									
1999									
2000									
2001									
2002									
2003									
2004									
2005									

 Anos com mais de 95% dos dados