



VINÍCIUS AUGUSTO DE OLIVEIRA

**REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES NAS
REGIÕES DAS UNIDADES DE
PLANEJAMENTO E GESTÃO DE RECURSOS
HÍDRICOS GD1 E GD2, MINAS GERAIS**

LAVRAS - MG

2013

VINÍCIUS AUGUSTO DE OLIVEIRA

**REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES NAS REGIÕES DAS UNIDADES
DE PLANEJAMENTO E GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS GD1
E GD2, MINAS GERAIS**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Lavras,
como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em
Recursos Hídricos em Sistemas
Agrícolas, para a obtenção do título
de Mestre.

Orientador

Dr. Gilberto Coelho

LAVRAS - MG

2013

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Coordenadoria de Produtos e
Serviços da Biblioteca Universitária da UFLA**

Oliveira, Vinícius Augusto de.

Regionalização de vazões nas regiões das Unidades de
Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos GD1 e GD2, Minas
Gerais / Vinícius Augusto de Oliveira. – Lavras : UFLA, 2013.
99 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2013.

Orientador: Gilberto Coelho.

Bibliografia.

1. Gestão de recursos hídricos. 2. Disponibilidade hídrica. 3.
Vazões mínimas. 4. Bacias hidrográficas - Regionalização de
vazões. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 551.48

VINÍCIUS AUGUSTO DE OLIVEIRA

**REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES NAS REGIÕES DAS UNIDADES
DE PLANEJAMENTO E GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS GD1
E GD2, MINAS GERAIS**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Lavras,
como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em
Recursos Hídricos em Sistemas
Agrícolas, para a obtenção do título
de Mestre.

APROVADA em 30 de setembro de 2013

Dr. Carlos Rogério de Mello UFLA

Dra. Mirléia Aparecida de Carvalho UFLA

Dr. Gilberto Coelho
Orientador

LAVRAS - MG

2013

Aos meus pais, João Augusto de Oliveira e Vani Carvalho de Oliveira, por
todo o incentivo, apoio e amor dedicado a mim por toda minha vida.
À minha querida irmã, Polyanna Mara de Oliveira, pelo amor, carinho e por
toda a ajuda em todos os momentos.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar forças para superar mais um desafio.

À Universidade Federal de Lavras, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, pela oportunidade de realizar o curso e este trabalho.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

À minha família, minha base e minha força, pelo amor, carinho e suporte nos momentos difíceis.

Ao professor Gilberto Coelho, pelos ensinamentos, pela amizade, ajuda e pela orientação, fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Carlos Rogério de Mello, pelos ensinamentos, confiança, ajuda e sugestões para a melhoria deste trabalho.

Ao professor Antônio Marciano da Silva, pelo incentivo, amizade e pelos ensinamentos desde a graduação, por ter me dado a primeira oportunidade de contato com a área de recursos hídricos.

Aos amigos do Setor de Engenharia de Água e Solo (Hidráulica), pela convivência, troca de experiências e companheirismo, em especial aos amigos Lucas Pontes, Marcelo Linon, Rosângela, Lívia, Alisson e Geovane.

À Ariela, por todo amor, carinho, companheirismo, paciência, incentivo e apoio em todos os momentos, fazendo parecerem mais fáceis os desafios enfrentados.

Aos meus queridos amigos, pela amizade, companheirismo e bons momentos, sempre presentes, mesmo que distantes.

Enfim, a todas as pessoas que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização de mais uma etapa da minha vida.

MUITO OBRIGADO!

RESUMO

A vazão representa a resposta da bacia hidrográfica aos fatores naturais e antrópicos. As vazões mínimas assumem importante papel, do ponto de vista ambiental, pois indicam a disponibilidade de água da bacia e são a base para uma adequada gestão de recursos hídricos. Com a regionalização de vazões é possível transferir informações de um local para outro com escassez de dados observados. A regionalização tem grande importância no planejamento e na gestão de recursos hídricos, pois gera subsídios para estudos de disponibilidade hídrica, abastecimento e estudos de concessão de outorgas de direitos de uso da água. Portanto, objetivou-se, neste trabalho, proceder à regionalização dos indicadores de vazão mínima $Q_{7,10}$; Q_{90} ; Q_{95} ; e da vazão média de longo termo (Q_{MLT}) a fim de se obter uma ferramenta de apoio à gestão de recursos hídricos das Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos (UPGRH) Alto Rio Grande (GD1) e Vertentes do Rio Grande (GD2), no estado de Minas Gerais. Foi adotada a metodologia proposta pela Eletrobrás, a qual utiliza equações de regressão regionais em função das características físicas e climáticas das áreas de interesse. Os resultados sinalizaram que a metodologia utilizada mostrou-se adequada, visto que os modelos apresentaram estatísticas de precisão satisfatórias, indicando bons ajustes. A área de drenagem (A) apresentou-se como a variável mais expressiva para representar as vazões estudadas e a inserção de dados de vazão de bacias hidrográficas de microescala possibilitou, de maneira aceitável, a utilização das equações de regionalização recomendadas.

Palavras-chave: Gestão de recursos hídricos. Vazões mínimas. Disponibilidade hídrica.

ABSTRACT

Discharge is the response of a watershed to natural and anthropogenic factors. Minimum discharge plays an important role from an environmental point of view, since it indicates the availability of water in the basin and is the basis for proper water resource management. The regionalization aims to transfer information from one location to another with limited observed data. Regionalization has great importance in planning and management of water resources, as it provides data for water availability and supply studies and concession of water use grants. Therefore, the aim of this work was to regionalize the minimum discharge indices $Q_{7,10}$; Q_{90} ; Q_{95} ; and long-term average discharge (Q_{LTA}) in order to obtain a tool to support the water resource management of the Alto Rio Grande (GD1) and Vertentes do Rio Grande (GD2), Water Resource Planning and Management Units (UPGRH) in the state of Minas Gerais. The methodology proposed by Eletrobras was adopted, which uses regional regression equations as a function of physical and climatic characteristics of the areas of interest. The results showed that the use of this methodology was appropriate, since the models showed satisfactory accuracy statistics, indicating good adjustments. The drainage area (A) was presented as the most significant variable to represent the studied flows and the insertion of micro-scale watershed discharge data enabled, in an acceptable manner, the use of the recommended regionalization equations.

Keywords: Water resources management. Minimum discharge. Water availability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Mapa da localização das UPGRH estudadas	30
Figura 2 Localização das sub-bacias experimentais em estudo situadas na UPGRH-GD1.....	32
Figura 3 Modelo digital de elevação (MDE) da sub-bacia hidrográfica experimental do ribeirão Lavrinha	33
Figura 4 Modelo digital de elevação (MDE) da sub-bacia hidrográfica experimental do ribeirão Jaguará	34
Figura 5 Localização e modelo digital de elevação da sub-bacia hidrográfica experimental do ribeirão Marcela	35
Figura 6 Localização das estações fluviométricas selecionadas para o estudo...	40
Figura 7 Localização das estações pluviométricas selecionadas para o estudo..	41
Figura 8 Representação do mapa da área de drenagem acumulada e obtenção da área de drenagem de uma estação fluviométrica	47
Figura 9 Delimitação das regiões homogêneas nas UPGRH GD1 e GD2	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Critérios para outorga do uso de águas superficiais	15
Tabela 2	Longitude e latitude, em graus decimais, e altitude, em metros, das estações fluviométricas selecionadas na UPGRH-GD1	36
Tabela 3	Longitude e latitude, em graus decimais, e altitude, em metros, das estações fluviométricas selecionadas na UPGRH-GD2	37
Tabela 4	Longitude e latitude, em graus decimais, e altitude, em metros, das estações pluviométricas selecionadas na UPGRH-GD1	38
Tabela 5	Longitude e latitude, em graus decimais, e altitude, em metros, das estações pluviométricas selecionadas na UPGRH-GD2	39
Tabela 6	Características físicas e climáticas das sub-bacias hidrográficas da UPGRH-GD1	56
Tabela 7	Características físicas e climáticas das sub-bacias hidrográficas da UPGRH-GD2	57
Tabela 8	Modelos de regressão das vazões mínimas e parâmetros estatísticos associados a cada região homogênea	62
Tabela 9	Modelos de regressão das vazões médias e parâmetros estatísticos associados a cada região homogênea	62
Tabela 10	Valores de vazões mínimas e médias, observadas e estimadas, em m ³ /s e erro relativo percentual das estações fluviométricas de cada região hidrologicamente homogênea das UPGRH GD1 e GD2	64
Tabela 11	Valores das vazões $Q_{7,10}$, Q_{90} , Q_{95} e Q_{MLT} das estações fluviométricas na UPGRH-GD1, em m ³ /s	67
Tabela 12	Valores das vazões $Q_{7,10}$, Q_{90} , Q_{95} e Q_{MLT} das estações fluviométricas na UPGRH-GD2, em m ³ /s	68

Tabela 13	Rendimentos específicos de vazões mínimas na UPGRH-GD1, em $L s^{-1} km^{-2}$	69
Tabela 14	Rendimentos específicos de vazões mínimas na UPGRH-GD2, em $L s^{-1} km^{-2}$	70
Tabela 15	Modelos de regressão recomendados para a estimativa de vazões $Q_{7,10}$, Q_{90} e Q_{95} , em $m^3 s^{-1}$, para as regiões hidrologicamente homogêneas das UPGRH GD1 e GD2	74
Tabela 16	Valores do erro relativo percentual médio (ER médio) e do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (C_{NS}) dos modelos de regressão recomendados para a estimativa das vazões mínimas de referência $Q_{7,10}$, Q_{90} e Q_{95}	75
Tabela 17	Valores de vazões mínimas de referência observados e estimados pelos modelos de regressão recomendados, em m^3/s , e seus respectivos erros relativos percentuais	76
Tabela 18	Comparação entre os valores estimados da $Q_{7,10}$ pelos modelos recomendados pelo presente trabalho (MINAS GERAIS, 2009; OLIVEIRA, 2008; PIERANGELI, 2003).....	80
Tabela 19	Comparação entre os valores estimados da Q_{90} e Q_{95} pelos modelos recomendados pelo presente trabalho e Oliveira (2008)..	85
Tabela 20	Modelos de regressão recomendados para a estimativa da vazão média de longo termo (Q_{MLT}), em $m^3 s^{-1}$, para as regiões hidrologicamente homogêneas das UPGRH GD1 e GD2	89
Tabela 21	Valores do erro relativo percentual médio (ER médio) e do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (C_{NS}) dos modelos de regressão recomendados para a estimativa da vazão média de longo termo (Q_{MLT}).....	90

Tabela 22	Valores de vazão média de longo termo (Q_{MLT}) observados e estimados pelos modelos de regressão recomendados, em m^3/s , e seus respectivos erros relativos percentuais	90
-----------	---	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	14
2.1	Gestão de Recursos Hídricos.....	14
2.2	Vazão em cursos d'água	16
2.3	Hidrologia estatística: Processos e variáveis hidrológicas.....	17
2.4	Indicadores de vazões mínimas de referência.....	18
2.4.1	Vazão de referência $Q_{7,10}$	19
2.4.2	Vazões de referência Q_{90} e Q_{95}	20
2.5	Regionalização de Vazões.....	21
2.6	Variáveis explicativas utilizadas na regionalização de vazões.....	22
2.6.1	Características físicas	22
2.6.2	Características climáticas.....	23
2.7	Métodos de regionalização de vazões	25
2.7.1	Metodologia de regionalização de vazões proposta pela Eletrobrás ...	26
2.8	O efeito da escala na regionalização de vazões	27
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	29
3.1	Descrição da área de estudo	29
3.1.1	Descrição das sub-bacias hidrográficas experimentais	31
3.2	Seleção e análise de dados	35
3.3	Determinação das vazões mínimas de referência e de longo termo	41
3.4	Obtenção das características físicas da área de estudo.....	44
3.4.1	Área de drenagem (A)	45
3.4.2	Comprimento do curso d'água principal (L).....	48
3.4.3	Declividade média das sub-bacias (S)	49
3.5	Obtenção das características climáticas.....	49

3.6	Metodologia de regionalização de vazões.....	50
3.6.1	Identificação de regiões hidrologicamente homogêneas	50
3.7	Ajuste das equações regionais	52
3.8	Estatísticas de precisão	53
3.9	Rendimento específico de vazões.....	54
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
4.1	Características físicas e de precipitação.....	56
4.2	Identificação de regiões hidrologicamente homogêneas	59
4.3	Vazões mínimas de referência e média de longo termo	67
4.4	Regionalização de vazões.....	73
4.4.1	Regionalização de vazões mínimas de referência $Q_{7,10}$, Q_{90} e Q_{95}	73
4.4.2	Regionalização da vazão média de longo termo (Q_{MLT})	89
5	CONCLUSÕES	93
	REFERÊNCIAS.....	94

1 INTRODUÇÃO

O estudo de vazões é fundamental para o entendimento da dinâmica do ciclo da água em bacias hidrográficas, pois representa a resposta da bacia às alterações climáticas e antrópicas, como eventos extremos de precipitação e mudanças do uso e ocupação do solo, respectivamente. As vazões podem ser caracterizadas em mínimas, médias e máximas, sendo as duas primeiras fundamentais para estudos de disponibilidade hídrica e concessão de outorgas de direito de uso da água, ferramentas fundamentais para o gerenciamento adequado de recursos hídricos.

As vazões mínimas têm recebido atenção especial, pois representam a condição crítica da bacia, uma vez que ocorrem no período de estiagem, quando a oferta de água é comprometida. Elas refletem a capacidade de produção de água da bacia hidrográfica, pois são o resultado do fenômeno de recarga do aquífero subterrâneo. Diversos estudos de vazões mínimas têm sido realizados com a finalidade de preservar os recursos naturais e, concomitantemente, fornecer informações e ferramentas para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos.

As Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos (UPGRH) são unidades físico-territoriais, identificadas dentro das bacias hidrográficas entre os limites do estado, caracterizadas por aspectos físicos, socioculturais, econômicos e políticos. As UPGRH Alto Rio Grande (GD1) e Vertentes do Rio Grande (GD2) se localizam na mesorregião sul/sudeste do estado de Minas Gerais, onde, juntas, representam, aproximadamente, 19.500 km² de extensão territorial. Essas regiões caracterizam-se como sendo de grande potencial de produção de água, devido à combinação de fatores fisiográficos e climáticos, como o regime de precipitação, uso do solo, relevo e formação geológica.

Devido à importância dessas regiões, no tocante à preservação ambiental e à disponibilidade hídrica, medidas que auxiliem o gerenciamento adequado dos recursos naturais são de fundamental importância para o desenvolvimento sustentável na região. Uma dessas ferramentas é a concessão de outorga do direito do uso da água, que consiste em permissão concedida pelo gestor (federal ou estadual) para uso da água de maneira racional, ou seja, que ela seja utilizada a fim de promover o desenvolvimento social, sem causar danos aos recursos ambientais.

Os índices de vazões mínimas, normalmente, são utilizados como referência para a vazão outorgada, em que é considerada uma porcentagem desses índices, de maneira que não se comprometa o escoamento no curso d'água. Geralmente, em rios perenes, são adotados os índices $Q_{7,10}$ (vazão mínima de 7 dias consecutivos e período de retorno de 10 anos) e as vazões de permanência Q_{90} e Q_{95} .

Como a implementação de estações hidrométricas representa elevado custo e demanda de tempo, os dados de vazões são insuficientes para cobrir todo o território nacional, o que prejudica a gestão adequada dos recursos hídricos. Uma alternativa para contornar esse problema é a adoção de técnicas para a regionalização de vazões.

A regionalização de vazões tem por objetivo a transferência de informações de um local onde há dados para outro sem dados ou com pouca informação. Ela se baseia na similaridade espacial e na homogeneidade hidrológica entre esses locais, levando-se em conta variáveis e parâmetros que permitam essa transferência.

Várias técnicas de regionalização são utilizadas para este propósito. A metodologia proposta pela Centrais Elétricas Brasileiras - Eletrobrás (1985) tem sido a mais utilizada para a regionalização de vazões, a qual utiliza equações de

regressão regionais em função das características físicas e climáticas das áreas de interesse.

Diante do exposto, objetivou-se, neste trabalho, a obtenção de equações regionais para a estimativa das vazões $Q_{7,10}$, Q_{90} , Q_{95} e Q_{MLT} (vazão média de longo termo) nas Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos (UPGRH) Alto do Rio Grande (GD1) e Vertentes do Rio Grande (GD2), proporcionando uma ferramenta que forneça subsídios para auxiliar a gestão dos recursos hídricos na região em estudo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Gestão de recursos hídricos

A água é um recurso natural renovável essencial à vida, necessário para as atividades humanas, caracterizando-se como um fator preponderante e limitante para o desenvolvimento da sociedade. Presta-se para múltiplos usos, como geração de energia elétrica, abastecimento doméstico e industrial, irrigação de culturas agrícolas, navegação, recreação, aquicultura, piscicultura, pesca e também para a assimilação e o afastamento de esgotos (SETTI et al., 2001).

Visto que a água é um recurso natural indispensável à vida, é de fundamental importância a adoção de um gerenciamento adequado desse elemento, de forma que a relação entre a utilização desse recurso e o desenvolvimento da sociedade possa ser sustentável.

Após a promulgação da Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei n. 943/1997), foi criado o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, com a finalidade de conservar e recuperar os recursos hídricos degradados, bem como mitigar os impactos danosos que possam alterar a qualidade dos recursos hídricos. Essa lei tem como princípios básicos: a adoção da bacia hidrográfica como unidade de planejamento; a consideração dos múltiplos usos da água; o reconhecimento da água como um bem finito, vulnerável e dotado de valor econômico e a necessidade da consideração da gestão descentralizada e participativa desse recurso (BRASIL, 1997).

De acordo com Lemos (2006), a principal vantagem de adotar as bacias hidrográficas como unidade de planejamento é que a rede de drenagem de uma bacia consiste num dos caminhos preferenciais de boa parte das relações causa-

efeito, particularmente aquelas que envolvem os recursos hídricos. Porém, nem sempre os limites municipais e estaduais respeitam os divisores da bacia e, conseqüentemente, a dimensão espacial de algumas relações de causa-efeito de caráter econômico e político.

A Política Nacional de Recursos Hídricos utiliza-se de cinco instrumentos para uma gestão adequada da água: os planos de recursos hídricos, o enquadramento dos corpos d'água em classes de uso, a outorga dos direitos de uso, a cobrança pelo uso e o Sistema de Informação sobre Recursos Hídricos (BRASIL, 1997). Dentre estes instrumentos, destaca-se a outorga, que concede ou não ao usuário o direito do uso da água, assegurando ao gestor o controle quantitativo e o efetivo exercício dos direitos de acesso a ela.

A outorga do uso da água é um instrumento essencial para o gerenciamento dos recursos hídricos, sendo necessário um suporte técnico-científico para uma correta implementação desse instrumento. A vazão outorgada está condicionada a uma porcentagem da vazão mínima de referência, a qual varia de acordo com o regime e a jurisdição do rio (OLIVEIRA, 2008). Vazões como $Q_{7,10}$ (vazão mínima média com duração de sete dias e período de retorno de 10 anos), Q_{90} e Q_{95} (vazão mínima associada às permanências de 90% e 95% no tempo, respectivamente) são usualmente utilizadas para este propósito.

Na Tabela 1 são apresentados alguns critérios para a outorga do uso de águas superficiais, estabelecidos por diferentes órgãos gestores.

Tabela 1 Critérios para outorga do uso de águas superficiais

Órgão gestor	Vazão máxima outorgável	Limite máximo de vazões insignificantes
ANA	70% da Q_{95}	1 L/s
IGAM - MG	30% da $Q_{7,10}$	1 L/s na maior parte do estado e 0,5 L/s em

regiões de escassez

Tabela 1, conclusão

Órgão Gestor	Vazão máxima outorgável	Limite máximo de vazões insignificantes
DAEE - SP	50% da $Q_{7,10}$	5 m ³ /dia
SEMARH - GO	70% da Q_{95}	Sem definição
SRH - CE	90% da $Q_{90\text{reg}}$	0,56 L/s

2.2 Vazão em cursos d'água

A vazão é a principal variável utilizada na gestão e no planejamento de recursos hídricos, bem como em projetos de obras hidráulicas e abastecimento. Constitui-se na avaliação do volume de água que escoar por unidade de tempo por uma ou mais seções.

A aferição da vazão em bacias hidrográficas é feita na seção de controle, uma vez que toda a rede de drenagem flui para esse ponto. Para essa finalidade, são utilizados instrumentos de medição, entre os quais se destacam os vertedores, as calhas Parshal ou WSC e as estações fluviométricas (linimétricas).

As estações fluviométricas utilizam instrumentos (régua linimétrica e/ou linígrafo) responsáveis por medirem a variação do nível da água ao longo do tempo. As leituras das régua linimétricas, geralmente, são feitas duas vezes por dia; já o linígrafo é um dispositivo automático que mede continuamente as variações ao longo do tempo, permitindo registrar os eventos significativos de curta duração, ocorrendo especialmente em bacias de pequenas áreas.

Para se obter a vazão, utiliza-se a relação entre a vazão e o nível da água, medidos instantaneamente, denominada de curva-chave, que é construída com base em valores de vazão amostrados em diferentes épocas do ano. Assim,

a série da variação do nível da água é transformada em vazão por meio da equação da curva-chave.

Segundo Oliveira (2008), a vazão pode ser estudada em termos de sua probabilidade de ocorrência e de períodos de retorno devido à sua variação natural ao longo do tempo, sendo distinguida em vazão máxima, média e mínima.

As vazões máximas são entendidas como a maior vazão que ocorre numa seção de um rio num período definido e representa a condição de inundação do local (TUCCI, 2002). A estimativa dessa vazão tem importância fundamental para o planejamento ambiental, bem como no planejamento de custos e de segurança de obras hidráulicas e projetos de engenharia.

As vazões médias são importantes na avaliação da disponibilidade hídrica de determinada bacia hidrográfica. A vazão média de longo termo é obtida pela média de todas as observações diárias de toda a série histórica e é definida como a vazão máxima possível de ser regularizada, abstraindo-se perdas por evaporação e infiltração. A vazão média é resultado da precipitação na bacia, das condições de evaporação, da cobertura do solo e do tamanho da bacia.

As vazões mínimas, também conhecidas como vazões de estiagem, são caracterizadas pelos menores valores de uma série de vazões, e também pela magnitude, a duração e a frequência e têm aplicação para estudos de disponibilidade de água, concessão de outorgas e projetos de irrigação. Representam a situação crítica de escoamento dos cursos d'água, visto que ocorrem no período de estiagem, quando há redução significativa da precipitação, sendo responsáveis pela recarga do aquífero subterrâneo.

2.3 Hidrologia estatística: processos e variáveis hidrológicas

Os fenômenos hidrológicos apresentam grande variabilidade, ao longo do tempo e do espaço, em decorrência de variações do clima em escala global e regional, bem como das particularidades regionais e locais, como aspectos meteorológicos, geomorfológicos e propriedades de uso de solo, entre outros (NAGHETTINI; PINTO, 2007).

A intensidade com que ocorrem esses fenômenos hidrológicos em função do tempo ou do espaço, ou de ambos, é denominada de processos hidrológicos. Esses processos hidrológicos podem ser classificados em determinísticos e estocásticos, embora seja rara ou quase inexistente a observação do comportamento determinístico em dados hidrológicos. Os processos hidrológicos, em geral, apresentam um comportamento estocástico, ou seja, são governados por, pelo menos em parte, processos aleatórios, sendo, então, regidos por leis de probabilidades.

As variações no tempo e no espaço dos processos hidrológicos são descritas pelas variáveis hidrológicas, como a vazão, a precipitação e a evapotranspiração, entre outros. Devido ao fato de essas variáveis estarem ligadas a processos estocásticos, elas são consideradas variáveis aleatórias, sendo descritas por distribuições de probabilidades.

Desse modo, a hidrologia estatística tem a finalidade de fornecer ferramentas adequadas para interpretar as características dos processos hidrológicos, sendo possível determinar a probabilidade desses processos de se situar, igualar ou extrapolar um limite de referência previamente determinado (GUIMARÃES, 2011; NAGHETTINI; PINTO, 2007).

2.4 Indicadores de vazões mínimas de referência

Os indicadores de vazões mínimas têm sido amplamente utilizados e são considerados apropriados ao nível de planejamento do desenvolvimento dos

recursos hídricos, fornecendo um método conveniente para a avaliação dos limiares de vazão (PYRCE, 2004). Estes indicadores têm como finalidade representar uma situação crítica sobre o regime de escoamento de um determinado curso d'água em que tal situação ocorre, geralmente, no período de estiagem, quando as vazões dos cursos d'água são alimentadas somente pela lenta drenagem do aquífero subterrâneo, caracterizando o período de valores mínimos de escoamento.

Segundo Tucci (2002), o conhecimento das vazões mínimas são importantes para projetos de abastecimento de água, irrigação, energia elétrica e outorga de uso da água, entre outros. As vazões mínimas que ocorrem em época de estiagem são utilizadas, nesses estudos, dentro de uma das seguintes finalidades: análise, projeto, previsão ou estimativa, regulamentação legal, operação e planejamento.

2.4.1 Vazão de referência $Q_{7,10}$

O índice $Q_{7,10}$ é um dos mais comumente utilizados em estudos de disponibilidade hídrica e concessão de outorgas para abastecimento de água. Ele representa o valor mínimo da média móvel da vazão de sete dias consecutivos, associado a um período de retorno de dez anos, ou seja, que este valor pode se repetir, em média, uma vez a cada dez anos.

De acordo com Tucci (2002), a vazão mínima é caracterizada por dois fatores: a sua magnitude e a sua duração. A vazão mínima instantânea apresenta pouco interesse ao usuário, pois esta deve ser próxima da vazão mínima diária. Assim, as vazões com durações maiores, como sete dias ou trinta dias, são mais utilizadas, por representarem uma situação desfavorável para a demanda de água ou para as condições de conservação ambiental.

A $Q_{7,10}$ apresenta uma série de usos, tais como proteção/regularização da qualidade da água contra descargas de águas residuais, situação crítica de escoamento na modelagem da qualidade da água, quantidade mínima de vazão necessária para a proteção de espécies aquáticas e indicador de condições de estiagem, entre outros. Porém, esse índice tem sido bastante utilizado em estudos de abastecimento de água e concessão de outorga pelo uso da água.

Mendes (2007) avaliou a disponibilidade hídrica da bacia hidrográfica do rio Turvo, em São Paulo, com a finalidade de investigar a adequação do índice $Q_{7,10}$ ao processo de outorga do uso da água. Cruz (2001) avaliou a $Q_{7,10}$, em termos de disponibilidade hídrica, para outorgas e o seu gerenciamento.

2.4.2 Vazões de referência Q_{90} e Q_{95}

Um dos interesses do usuário pode ser o de conhecer a amplitude de variação das vazões e a frequência com que um determinado valor de vazão ocorre em uma determinada seção do curso d'água. Para essa finalidade são adotados os modelos de distribuição de probabilidades e curvas de permanência de vazão.

As vazões Q_{90} e Q_{95} representam as vazões em que 90% ou 95% do tempo se têm valores iguais ou superiores a elas. Em outras palavras, representa uma “garantia” de que um determinado valor de vazão esteja presente em 90% ou 95% do tempo em uma determinada seção do curso d'água. Os índices Q_{90} e Q_{95} têm sido utilizados em estudos de avaliação de impactos ambientais e, principalmente, na concessão de outorgas do uso da água. Estes índices são mais simples de serem determinados e mais simples de serem compreendidos do que a $Q_{7,10}$. Como visto anteriormente, na Tabela 1, os índices Q_{90} e Q_{95} são utilizados como critério para outorga por diferentes órgãos gestores.

O conhecimento dos intervalos de confiança das vazões de permanência permite ao planejador equacionar a otimização do uso dos recursos hídricos, facilitando, assim, a tarefa de planejamento (CRUZ, 2001).

2.5 Regionalização de vazões

O conhecimento do comportamento hidrológico de bacias hidrográficas assume importante papel no planejamento e na gestão dos recursos hídricos. Devido à dificuldade de se obter informações hidrológicas que cubram todos os locais de interesse necessários ao gerenciamento dos recursos hídricos de uma região, a regionalização hidrológica é uma alternativa para solucionar esse problema (CHIANG; TSAY; NIX, 2002).

Tucci (2002) define regionalização hidrológica como a transferência de informações de um local para outro sem informações, dentro de uma área de comportamento semelhante. A regionalização de vazões tem grande importância no planejamento e na gestão de recursos hídricos, pois gera subsídios para estudos de previsão de riscos de enchentes, disponibilidade hídrica para usos, como geração hidráulica, de energia e de abastecimento, bem como em estudos de concessão de outorga de uso da água.

Nos estudos de regionalização, devem ser consideradas as características físicas e climáticas das bacias que mais interferem na distribuição espacial da vazão e que sejam facilmente mensuráveis, permitindo, assim, ajustar um modelo de regressão entre os dados de vazão obtidos nas estações fluviométricas e as características físicas e climáticas da bacia, sendo o modelo gerado utilizado para prever a vazão em locais sem dados hidrológicos (BAENA et al., 2004; OLIVEIRA, 2008).

2.6 Variáveis explicativas utilizadas na regionalização de vazões

As variáveis explicativas são utilizadas para estimar o valor da vazão a ser regionalizada. Geralmente, são utilizadas características físicas e climáticas da bacia hidrográfica. Em estudos de regionalização de vazões é importante conhecer as características físicas e climáticas que influenciam e explicam o comportamento e a distribuição das vazões a serem regionalizadas, priorizando aquelas que sejam de fácil determinação.

2.6.1 Características físicas

O conhecimento das características físicas de uma bacia hidrográfica tem importância fundamental para o entendimento do comportamento hidrológico de uma região. Geralmente, as características físicas mais comuns em estudos de regionalização são a área de drenagem, a densidade de drenagem e o comprimento do curso d'água principal da bacia hidrográfica e sua declividade.

A área de drenagem é a área plana delimitada pelo divisor de águas, constituindo uma das principais variáveis explicativas na quase totalidade dos estudos de regionalização de vazões, em função da sua influência na potencialidade hídrica da bacia hidrográfica (LEMOS, 2006). A área de drenagem segue as regras de delimitação de bacias hidrográficas, ou seja, é individualizada pela união dos pontos de cota máxima (divisores de água), até coincidir com o exutório da bacia.

A densidade de drenagem é a relação entre o comprimento total de todos os drenos da bacia hidrográfica pela sua área. É um índice que representa a eficiência da drenagem da bacia.

O comprimento e a declividade do curso d'água principal de uma bacia são utilizados como variáveis explicativas na regionalização de vazões, devido ao fato de o curso d'água principal drenar o maior volume de água dentro da bacia hidrográfica.

No estudo de regionalização hidrológica na bacia do Alto Rio São Francisco conduzido por Euclides et al. (2001) foram adotadas, como variáveis físicas explicativas, a área de drenagem e a declividade do rio principal na regionalização das vazões máximas e médias de longo termo (Q_{MLT}). Baena et al. (2004) adotaram área de drenagem, comprimento do rio principal e densidade de drenagem na regionalização de vazões médias, máximas e mínimas na bacia do Rio Paraíba do Sul, e constataram que a área de drenagem e o comprimento do curso d'água principal apresentaram-se mais expressivos para a representação das vazões regionalizadas.

Silva, Marques e Lemos (2009) utilizaram área de drenagem, comprimento do rio principal, densidade de drenagem, declividade média da bacia e declividade do rio principal como variáveis explicativas na avaliação de metodologias de regionalização de vazões mínimas de referência na bacia do rio São Francisco. Tsakiris, Nalbantis e Cavadias (2011) adotaram a área de drenagem, a densidade de drenagem e a declividade média da bacia na regionalização de vazões mínimas no desenvolvimento de uma metodologia baseada na análise de correlação canônica.

2.6.2 Características climáticas

A precipitação é o fenômeno climático que influencia diretamente o regime de escoamento de um curso d'água. Por esse motivo, ela tem sido utilizada como variável explicativa em diversos trabalhos de regionalização de vazões. Para a regionalização de vazões máximas, geralmente, é adotada a

precipitação máxima diária anual como variável explicativa, bem como a utilização de períodos máximos de precipitação acumulada (semestral e trimestral). Já a precipitação total anual média é utilizada para explicar o comportamento das vazões médias de longo termo (Q_{MLT}). Para as estimativas de vazões mínimas, as precipitações mais utilizadas são total anual médio, semestre mais seco e trimestre mais seco (LEMOS, 2006; OLIVEIRA, 2008; RODRIGUEZ, 2008).

Baena et al. (2004) adotaram as precipitações dos períodos trimestral e bimestral mais secos e mais chuvosos, do mês mais chuvoso; os totais anuais médios com base nos anos civil e hidrológico e a precipitação máxima diária anual na regionalização das vazões máximas, médias e mínimas na bacia do rio Paraíba do Sul, no qual a precipitação total anual, com base no ano civil e a precipitação acumulada do semestre mais seco foram caracterizadas como as mais expressivas para a representação das diversas variáveis e funções regionalizadas.

Ferreira (2010) utilizou a precipitação média anual para a estimativa das vazões $Q_{7,10}$ e Q_{90} no estado do Espírito Santo, compreendida entre as bacias dos rios Doce e Itabapoana. Mehaiguene et al. (2012) utilizaram a precipitação média como variável explicativa na regionalização da Q_{MLT} no noroeste da Argélia.

Lemos (2006), no estudo de regionalização de vazões mínimas de referência na bacia hidrográfica do rio São Francisco, a montante do reservatório de Três Marias, Minas Gerais, adotou a precipitação total anual, a precipitação do trimestre mais seco, a precipitação do mês mais seco e a precipitação média na bacia. Segundo o autor, a precipitação do trimestre mais seco apresentou-se como a variável que melhor representou a $Q_{7,10}$.

2.7 Métodos de regionalização de vazões

Diversos métodos têm sido implementados em estudos de regionalização de vazões. Dentre os mais conhecidos, destacam-se a metodologia tradicional proposta pela Eletrobrás (1985), a metodologia proposta por Chaves et al. (2002) e o *Index Flood*, conhecido como método da vazão específica (baseado em momentos-L) e análise de *clusters*.

Em termos gerais, a metodologia proposta Eletrobrás (1985) tem como característica principal a utilização de equações de regressão regionais aplicadas às regiões hidrologicamente homogêneas, visando à obtenção de vazões em qualquer posição da rede de drenagem da bacia em estudo. Já a metodologia de Chaves et al. (2002) utiliza técnicas de interpolação e extrapolação das vazões, os quais dependem da posição relativa do ponto de interesse em relação aos postos fluviométricos mais próximos. Por se tratar de um método interpolativo, o mesmo dispensa a definição de regiões hidrologicamente homogêneas.

O método *Index Flood*, ou método da vazão específica, parte do princípio de que a vazão na seção de interesse é obtida por uma relação de proporcionalidade entre as vazões e as áreas de drenagem dos postos fluviométricos mais próximos (NOVAES et al., 2007).

A análise de *clusters* é um nome genérico de uma variedade de procedimentos estatísticos multivariados utilizados para investigar, interpretar e classificar determinados dados em grupos (*clusters*) semelhantes, os quais podem ser ou não sobrepostos. Um grupo, ou *cluster*, consiste em um ou mais vetores característicos (vetor de dados) compostos por variados atributos ou variáveis. Em regionalização de vazões incluem-se as características fisiográficas da bacia, as características associadas ao uso e à ocupação do solo, as características climáticas da bacia hidrográficas e as características do solo, como umidade, infiltração e drenagem, entre outros (RAO; SRINIVAS, 2008).

Silva, Marques e Lemos (2009) analisaram as metodologias propostas pela Chaves et al. (2002) e Eletrobrás (1985), além do método da vazão específica e constataram que as duas últimas apresentaram-se mais eficientes na regionalização de vazões mínimas de referência na bacia do rio São Francisco. Estes métodos também foram considerados mais eficientes na estimativa da regionalização de vazões mínimas de referência na bacia do rio Doce conduzidos por Ribeiro, Marques e Silva (2005). Já no estudo conduzido por Lemos (2006), a metodologia que obteve melhores resultados foi a tradicional (ELETROBRÁS, 1985).

Rao e Srinivas (2006) utilizaram a análise de *clusters* para a regionalização de bacias hidrográficas no estado de Indiana, nos Estados Unidos da América, assim como Srinivas et al. (2008).

2.7.1 Metodologia de regionalização de vazões proposta pela Eletrobrás

A metodologia tradicional para a regionalização de vazões, descrita pela Eletrobrás (1985), consiste na identificação de regiões hidrologicamente homogêneas, que podem ser consideradas como as regiões que subdividem uma área maior, teoricamente, com base na homogeneidade das características hidrológicas (LEMOS, 2006; RIBEIRO; MARQUES; SILVA, 2005).

Esta etapa é considerada uma das mais importantes para a aplicação desta metodologia, visto que a delimitação incorreta dessas regiões compromete significativamente a qualidade das equações que serão obtidas.

A delimitação de regiões hidrologicamente homogêneas é feita a partir de parâmetros físicos e climáticos da bacia. As regiões que apresentam comportamento semelhante são consideradas hidrologicamente homogêneas (ELETROBRÁS, 1985). A identificação de regiões homogêneas deve ser feita em duas etapas consecutivas: a primeira, delimitando regiões com base nas

características locais e a segunda, consistindo de um teste estatístico construído com base somente nas estatísticas locais, com o objetivo de verificar os resultados preliminares obtidos (HOSKING; WALLIS, 1997).

Normalmente, são adotados dois critérios para a identificação de regiões hidrologicamente homogêneas, que são:

- a) critério baseado na análise de distribuição de frequências das vazões adimensionalizadas de cada estação;
- b) critério baseado na análise do ajuste do modelo de regressão múltipla.

Após a obtenção das informações físicas e climáticas da região em estudo e da delimitação das regiões homogêneas, parte-se para a obtenção das equações regionais, quando se escolhe o modelo (potencial, exponencial, logarítmico, linear) em que as variáveis explicativas representem melhor o comportamento da variável dependente. Segundo o trabalho desenvolvido pela Eletrobrás (1985), devem-se testar todas as combinações possíveis de regressão, mantendo-se sempre a área de drenagem. O trabalho também indicou que o uso de modelos lineares pode apresentar algumas limitações, como: as bacias hidrográficas de maior vazão serão mais bem ajustadas com o método dos mínimos quadrados e as vazões mínimas estimadas podem apresentar valores negativos em bacias pequenas.

2.8 O efeito da escala na regionalização de vazões

A regionalização hidrológica tem por finalidade estimar o valor de uma determinada variável em um local onde esta não tem um valor conhecido. Porém, a regionalização apresenta sérias limitações, no que diz respeito à

extrapolação de seus resultados para bacias de pequeno porte (SILVA JÚNIOR et al., 2003), gerando incertezas na tomada de decisão. Segundo Niadas (2005), são frequentes os casos em que os dados observados referem-se a uma escala espacial da zona de influência muito maior do que seria necessário para as equações de regressão regionais serem aplicáveis a pequenas bacias.

A escala tem papel fundamental na identificação das variáveis físicas de uma determinada bacia hidrográfica. De acordo com Silva Júnior et al. (2003), a identificação dessas variáveis nas diferentes escalas pode ser realizada por: modelos hidrológicos que produzem os processos de forma dinâmica no tempo e no espaço, pelo estabelecimento de relações empíricas entre estatísticas de vazões e parâmetros ou variáveis que expliquem estas estatísticas.

Como a regionalização busca a melhor correlação entre a variável em estudo (vazão) e suas variáveis explicativas (físicas e/ou climáticas), os melhores resultados serão obtidos à medida que as variáveis explicativas escolhidas tenham variabilidade na região e tenham significância ao explicar o comportamento da variável dependente.

Devido à grande variabilidade dos elementos envolvidos é de se esperar que a extrapolação dos resultados deve ser cuidadosa, principalmente para bacias de menor porte, nas quais o efeito da resposta das variáveis climáticas e físicas da bacia apresenta maior desvio padrão. Uma situação em que esse efeito pode ser explicado é a análise do rendimento específico de vazões, cujo valor aumenta significativamente em bacias menores.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição da área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Grande está situada na região sudeste do Brasil, na região hidrográfica Paraná que, em conjunto com as regiões hidrográficas Paraguai e Uruguai, compõe a bacia do rio da Prata. É uma bacia hidrográfica de expressiva área territorial, com mais de 143.000 km² de área de drenagem.

Ela pode ser dividida em três regiões fisiográficas: Alto, Médio e Baixo Rio Grande, e caracteriza-se por um período chuvoso de seis a sete meses (outubro a março/abril), com concentração de mais de 80% das chuvas no verão. Os meses de setembro e abril são considerados de transição (OLIVEIRA, 2008).

As Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos (UPGRH) do Rio Grande GD1 e GD2 se encontram na região do Alto Rio Grande, no sul de Minas Gerais, entre as coordenadas 20° 40' 0" S e 23° 0' 0" S e 43° 30' 0" W e 45° 40' 0" W , abrangendo uma área de, aproximadamente, 9.000 km² e 10.500 km², respectivamente. A localização geográfica das UPGRH em estudo está representada na Figura 1.

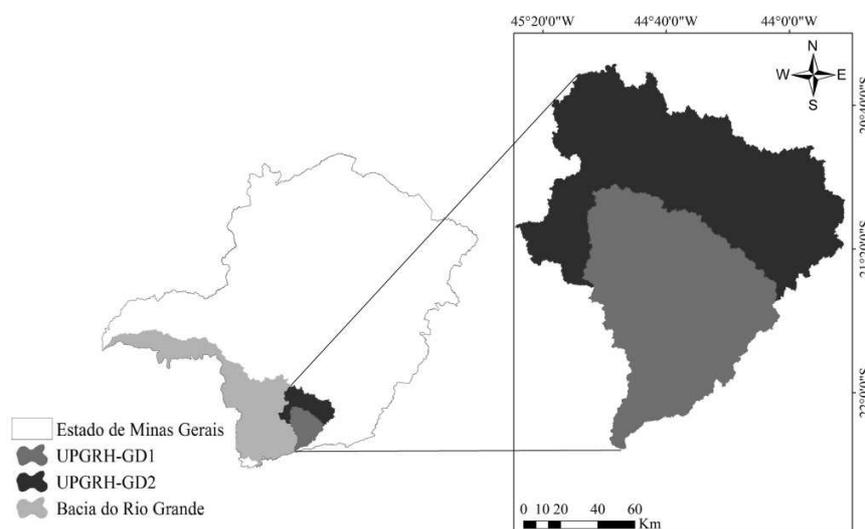


Figura 1 Mapa da localização das UPGRH estudadas

A UPGRH – GD1 denominada de Alto Rio Grande é uma região que apresenta relevo forte ondulado na região de cabeceira, onde há a presença de Cambissolos e suave ondulado nas regiões baixas da UPGRH, onde há predominância de Latossolos e Argissolos, com altitude variando de 802 m a 2.631 m. Tem como vegetação predominante os Campos de Altitude, com fragmentos de Floresta Estacional Semidecidual e Floresta Ombrófila (MINAS GERAIS, 2008; SCOLFORO; CARVALHO, 2006).

A região apresenta clima caracterizado como úmido (B_3 e B_4), segundo classificação climática de Thornthwaite, podendo apresentar precipitações médias anuais acima de 1.600 mm e temperatura média inferior a 18 °C. Além disso, o clima da região tem características de umidade mais elevada, com níveis de temperaturas mais baixas, sofrendo influências de regiões serranas (MINAS GERAIS, 2008).

O relevo exerce grande influência no regime pluviométrico da região, principalmente na região de cabeceira, como na serra da Mantiqueira, onde a

precipitação total anual pode apresentar valores superiores a 2.000 mm. A UPGRH do Alto Rio Grande tem precipitação média anual em torno de 1.524 mm e temperatura média anual em torno de 18 °C. Seus rios principais são Capivari, Ingaí, Aiuruoca e Grande, sendo estes dois últimos drenados para o reservatório da Usina Hidrelétrica de Camargos (UHE-Camargos).

Já a UPGRH Vertentes do Rio Grande (GD2) é assim chamada por possuir diversas nascentes entre os seus limites. Seu clima é caracterizado como úmido (B₃), segundo classificação climática de Thornthwaite, apresentando regiões com precipitações médias anuais acima de 1.600 mm e temperaturas médias inferiores a 18 °C (MINAS GERAIS, 2008).

Tem relevo ondulado a suave-ondulado, com predominância de Cambissolos na região de cabeceira e Latossolos e Argissolos nas regiões onde o relevo é suavizado, com altitude variando de 757 m a 1.498 m. A vegetação predominante é do tipo Campos de Altitude, nas regiões cabeceira da bacia do rio das Mortes, e Floresta Estacional Semidecidual, ao longo de toda a sua extensão territorial (MINAS GERAIS, 2008; SCOLFORO; CARVALHO, 2006).

A UPGRH Vertentes do Rio Grande apresenta precipitação média anual de, aproximadamente, 1.382 mm, temperatura média anual de 18 °C e os rios principais são o das Mortes, o Jacaré e parte do Grande.

3.1.1 Descrição das sub-bacias hidrográficas experimentais

As sub-bacias hidrográficas de microescala analisadas neste estudo situam-se na UPGRH – GD1, as quais apresentam dados de clima, vazão e precipitação monitorados periodicamente pelo Núcleo Didático-Científico de Engenharia de Água e Solo do Departamento de Engenharia (DEG) da

Universidade Federal de Lavras (UFLA). A localização das sub-bacias hidrográficas de microescala é apresentada na Figura 2.

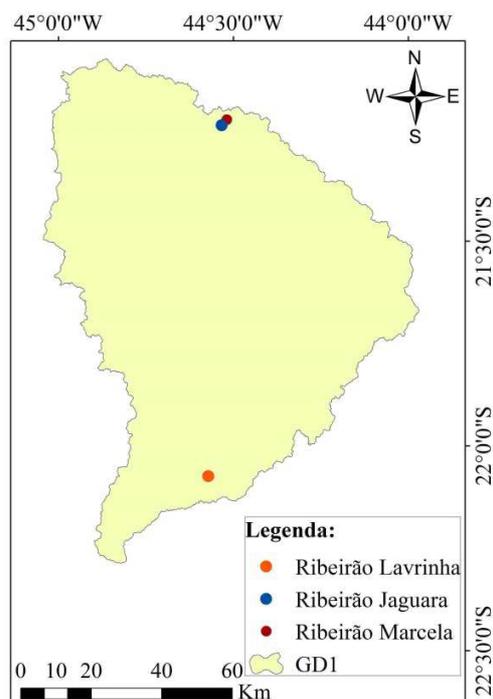


Figura 2 Localização das sub-bacias experimentais em estudo situadas na UPGRH-GD1

A sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha (Figura 3) está inserida na região da serra da Mantiqueira, a qual deságua diretamente no rio Grande. Localizada ao sul da UPGRH-GD1, no município de Bocaina de Minas, apresenta altitudes variando entre 1.159 e 1.732 m, com área de drenagem da ordem de 6,76 km² e declividade média de 38,5% (SILVA, 2009).

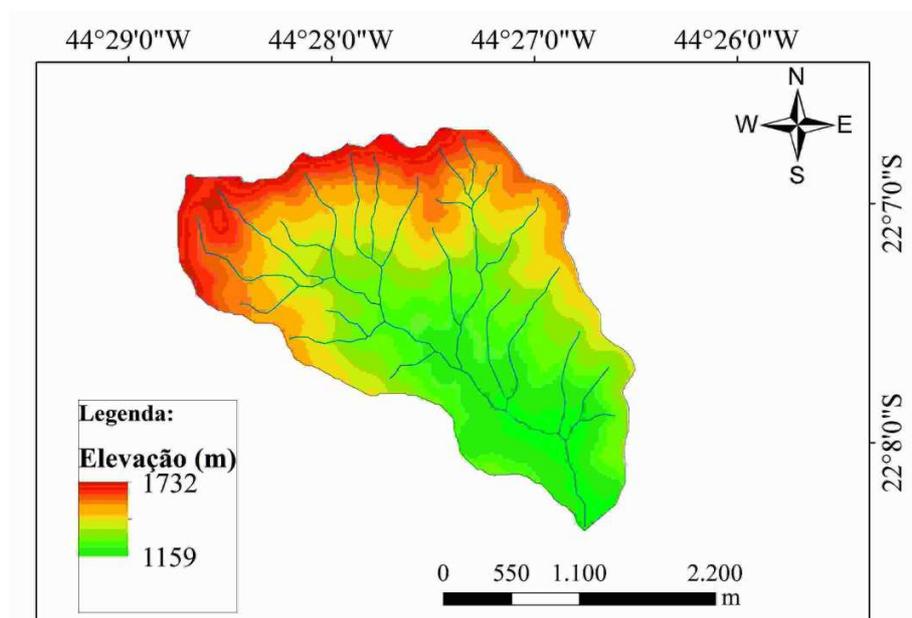


Figura 3 Modelo digital de elevação (MDE) da sub-bacia hidrográfica experimental do ribeirão Lavrinha

Segundo Junqueira Júnior (2006), a sub-bacia hidrográfica do ribeirão Lavrinha apresenta classificação climática de Köppen do tipo Cwb, caracterizado como mesotérmico de verões brandos e suaves e estiagem de inverno. De acordo com registros da estação meteorológica localizada na sub-bacia, a precipitação média anual é de 1.860 mm e a temperatura média anual está em torno de 17,5° C, com ocorrência de temperaturas máxima e mínima diária ao longo do ano de 32 °C e 2,7 °C, respectivamente.

A sub-bacia hidrográfica experimental do córrego Jaguará está localizada na porção norte da UPGRH-GD1, nos municípios de Nazareno e São João Del Rei, a qual deságua no reservatório da Usina Hidrelétrica de Camargos (Camargos/CEMIG). A área é de 32 km², com altitudes variando de 950 a 1.070 m (Figura 4). A bacia hidrográfica do córrego Jaguará apresenta temperatura

média anual de, aproximadamente, 19,2° C, com ocorrência de temperaturas mínimas e máximas diárias de 2,3 °C e 36,2 °C, respectivamente.

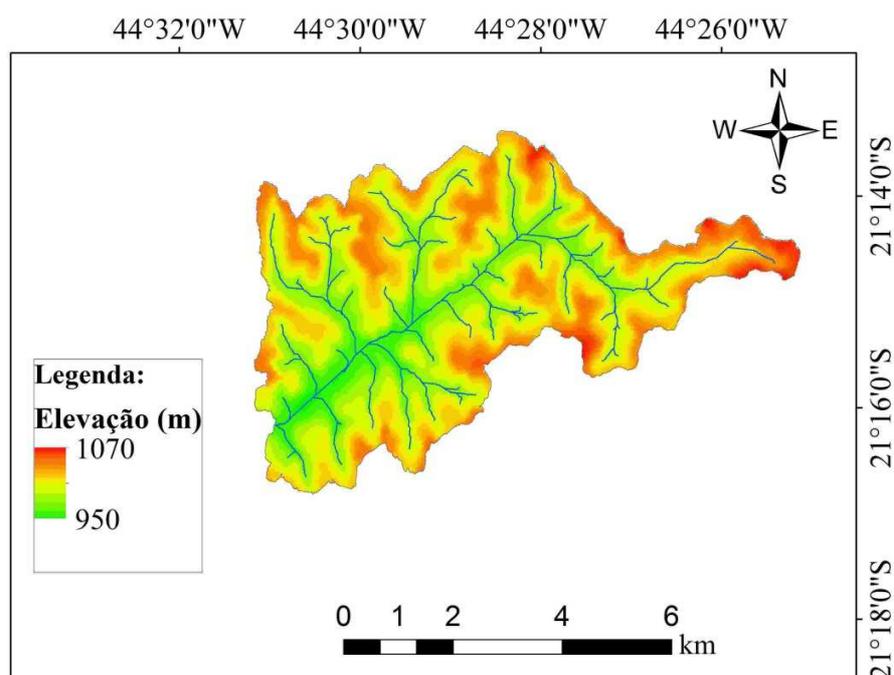


Figura 4 Modelo digital de elevação (MDE) da sub-bacia hidrográfica experimental do ribeirão Jaguara

Segundo classificação climática de Köppen, a área é caracterizada como Cwa, a qual apresenta alta concentração de chuvas entre a primavera e verão (outubro a março), inverno e outono secos e frios (BESKOW et al., 2011). A precipitação anual média é de, aproximadamente, 1.400 mm, apresentando valores mínimos e máximos de 900 mm e 2.100 mm.

A sub-bacia hidrográfica do ribeirão Marcela, a qual deságua no córrego Jaguara (Figura 5), tem área de drenagem de 4,7 km², com altitudes variando de 958 a 1.059 m, com declividade média de 12,3% (SILVA, 2009).

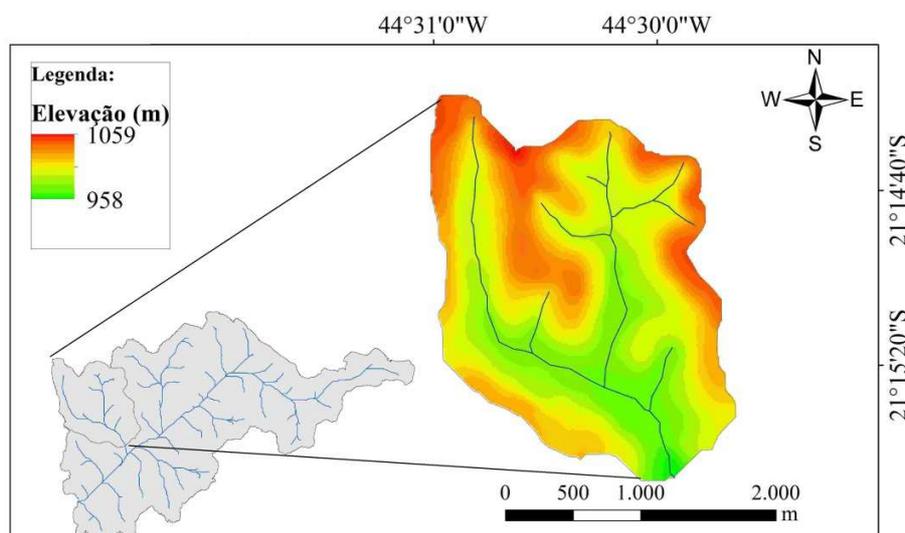


Figura 5 Localização e modelo digital de elevação da sub-bacia hidrográfica experimental do ribeirão Marcela

De acordo com a classificação climática de Köppen, a área é caracterizada como do tipo Cwa, ou seja, clima temperado com verões quentes e úmidos e invernos secos (SILVA, 2009). Conforme registros da estação meteorológica localizada na sub-bacia do ribeirão Marcela, a precipitação média anual é de 1.300 mm e a temperatura média anual está em torno de 19,2 °C, com ocorrência de temperatura mínima e máxima, diárias, de 2,3 °C e 36,2 °C, respectivamente.

3.2 Seleção e análise de dados

Para o estudo de regionalização de vazões foram utilizados dados fluviométricos e pluviométricos obtidos por meio do banco de dados da Agência Nacional de Águas (ANA/HIDROWEB). Foram identificadas 53 estações fluviométricas nas UPGRH GD1 e GD2 e, a partir das informações geográficas

dessas estações, foram obtidas 43 estações pluviométricas situadas nos mesmos locais ou próximo às estações fluviométricas.

Após esta etapa, as séries das 53 estações fluviométricas foram analisadas e selecionadas de acordo com os seguintes critérios: não apresentar falhas maiores que 15 dias consecutivos no período de estiagem e ter, no mínimo, 10 anos de observação contínua, com exceção dos dados fluviométricos das bacias hidrográficas experimentais, nas quais as séries apresentaram tamanho inferior a 10 anos. Porém, segundo recomendação de Tucci (2002), devem ser selecionadas as estações fluviométricas com, no mínimo, cinco anos de observação.

Já as estações pluviométricas foram selecionadas de acordo com a sua localização geográfica, de maneira que os registros de precipitação possam representar melhor o comportamento das vazões observadas pelas estações fluviométricas mais próximas. Também foi adotado o critério estabelecido por Tucci (2002), em que são selecionadas estações com o período de observação de no mínimo dez anos.

Das 53 estações fluviométricas, foram selecionadas 40 que se enquadraram nos critérios previamente descritos, sendo 21 estações na UPGRH-GD1 e 19 na UPGRH-GD2. As informações das estações fluviométricas selecionadas são apresentadas nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 Longitude e latitude, em graus decimais, e altitude, em metros, das estações fluviométricas selecionadas na UPGRH-GD1

Número	Código	Estação	Longitude	Latitude	Altitude
1	61004000	Ponte do Costa	-44,1000	-21,8000	1130
2	61006000	Fazenda Piedade	-44,1333	-21,9000	1118
3	61009000	Bom Jardim de Minas	-44,1947	-21,9472	1099
4	61011000	Santana do Garambéu	-44,1000	-21,6000	1076
5	61012000	Madre de Deus de Minas	-44,3269	-21,4922	875

Tabela 2, conclusão

Número	Código	Estação	Longitude	Latitude	Altitude
6	61014000	Alagoa	-44,6369	-22,1700	1036
7	61016000	Alagoa	-44,6500	-22,1833	1139
8	61024000	Aiuruoca	-44,6025	-21,9797	966
9	61031000	Carvalhos	-44,4639	-21,9983	1087
10	61041000	Fazenda da Cachoeira	-44,3947	-21,9631	989
11	61043000	Mina de Níquel	-44,3500	-22,0000	1050
12	61045000	Fazenda Paraíba	-44,3542	-21,7450	940
13	61052000	Andrelândia	-44,3053	-21,7378	951
14	61060000	Fazenda Laranjeiras	-44,3483	-21,6925	905
15	61065001	Itutinga	-44,6453	-21,2811	787
16	61075000	Luminárias	-44,9156	-21,5061	1050
17	61078000	Itumirim	-44,8731	-21,3211	807
18	61125000	Ponte do rio do Peixe	-44,4500	-21,9000	878
19	MAR	Marcela	-44,4946	-21,2645	951
20	JAG	Jaguara	-44,5086	-21,2787	950
21	LAV	Lavrinha	-44,4420	-22,1412	1159

Tabela 3 Longitude e latitude, em graus decimais, e altitude, em metros, das estações fluviométricas selecionadas na UPGRH-GD2

Número	Código	Estação	Longitude	Latitude	Altitude
22	61081000	Fazenda Loschi	-43,6667	-21,2500	1095
23	61085000	Campolide	-43,8144	-21,2794	997
24	61087000	Fazenda da Conquista	-43,7167	-21,3167	1127
24	61088000	Usina Barbacena	-43,7000	-21,2667	1070
26	61090000	Barroso	-43,9797	-21,1858	900
27	61093000	Alfredo Vasconcelos	-43,6561	-21,1311	1132
28	61100000	Ibertioga	-43,9633	-21,4444	980

Tabela 3, conclusão

Número	Código	Estação	Longitude	Latitude	Altitude
29	61105000	Porto do Elvas	-44,1358	-21,1647	880
30	61107000	Porto Tiradentes	-44,2333	-21,1222	660
31	61115000	Usina São João del Rei	-44,2111	-21,0525	842
32	61122000	Vila Rio das Mortes	-44,3286	-21,1956	870
33	61135000	Ibituruna	-44,7397	-21,1425	799
34	61145000	Macaia	-44,9139	-21,1447	757
35	61150000	Ribeirão Vermelho	-45,0500	-21,1833	729
36	61170000	Carmo da Cachoeira	-45,0333	-21,4500	955
37	61173000	Usina Couro do Cervo	-45,1714	-21,3422	813
38	61175000	Usina Nepomuceno	-45,1672	-21,2572	728
39	61195000	Ponte Fernão Dias	-44,7167	-20,7500	882
40	61202000	Santana do Jacaré	-45,1319	-20,9031	785

As estações pluviométricas selecionadas nas UPGRH GD1 e GD2 são apresentadas nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 4 Longitude e latitude, em graus decimais, e altitude, em metros, das estações pluviométricas selecionadas na UPGRH-GD1

Número	Código	Estação	Longitude	Latitude	Altitude
1	2044000	Ponte Rio do Peixe	-44,4500	-21,9000	878
2	2144001	Bom Jardim de Minas	-44,1947	-21,9472	1099
3	2144005	Itumirim	-44,8731	-21,3211	807
4	2144006	Luminárias	-44,9156	-21,5061	1050
5	2144007	Madre de Deus de Minas	-44,3269	-21,4922	875
6	2144013	Itutinga	-44,6453	-21,2811	787
7	2144015	Santana do Garambéu	-44,1000	-21,6000	1076
8	2144018	Aiuruoca	-44,6025	-21,9797	966

Tabela 4, conclusão

Número	Código	Estação	Longitude	Latitude	Altitude
9	2144019	Andrelândia	-44,3053	-21,7378	951
10	2144021	Fazenda Laranjeiras	-44,3483	-21,6925	905
11	2144022	Fazenda Paraíba	-44,3542	-21,7450	940
12	2144025	Carvalhos	-44,4639	-21,9983	1087
13	2244056	Mina de Níquel	-44,3500	-22,0000	1050
14	2244057	Ponte do Costa	-44,1000	-21,8000	1130
15	2244065	Alagoa	-44,6369	-22,1700	1036
16	JAG	Jaguara	-44,5086	-21,2787	950
17	LAV	Lavrinha	-44,4420	-22,1412	1159

Tabela 5 Longitude e latitude, em graus decimais, e altitude, em metros, das estações pluviométricas selecionadas na UPGRH-GD2

Número	Código	Estação	Longitude	Latitude	Altitude
18	2044027	Ponte Fernão Dias	-44,7167	-20,7500	882
19	2045004	Santana do Jacaré	-45,1319	-20,9031	785
20	2143005	Campolide	-43,8144	-21,2794	997
21	2143006	Barroso	-43,9797	-21,1858	900
22	2143007	Vargem do Engenho	-43,6333	-21,1833	1178
23	2143008	Ibertioga	-43,9633	-21,4444	980
24	2143009	Usina Barbacena	-43,7000	-21,2667	1070
25	2144000	Bom Sucesso	-44,7714	-21,0342	832
26	2144002	Porto Tiradentes	-44,2333	-21,1222	660
27	2144009	Porto do Elvas	-44,1358	-21,1647	880
28	2144020	Usina São João del Rei	-44,2111	-21,0525	842
29	2144023	Ibituruna	-44,7397	-21,1425	799
30	2144024	Vila Rio das Mortes	-44,3286	-21,1956	870
31	2144026	Macaia	-44,9139	-21,1447	757

Tabela 5, conclusão

Número	Código	Estação	Longitude	Latitude	Altitude
32	2145005	Ribeirão Vermelho	-45,0500	-21,1833	729
33	2145007	Usina Couro do Cervo	-45,1714	-21,3422	813
34	2145021	Usina Nepomuceno	-45,1672	-21,2572	728
35	2145044	Carmo da Cachoeira	-45,0333	-21,4500	955

A distribuição espacial das estações fluviométricas e pluviométricas está representada nas Figuras 6 e 7, respectivamente.

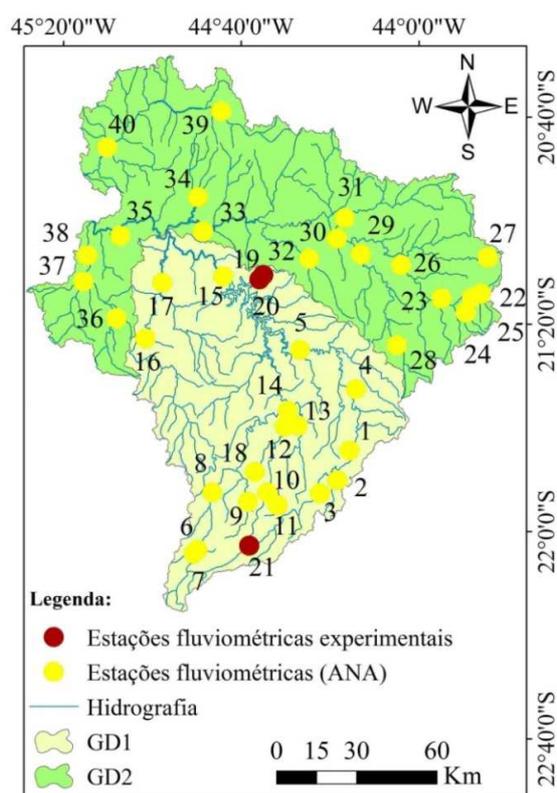


Figura 6 Localização das estações fluviométricas selecionadas para o estudo

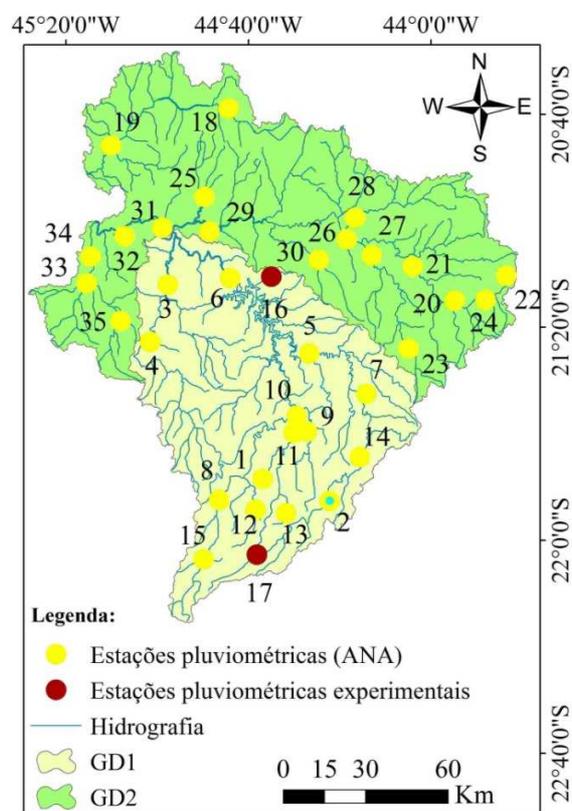


Figura 7 Localização das estações pluviométricas selecionadas para o estudo

3.3 Determinação das vazões mínimas de referência e de longo termo

Neste trabalho foram calculadas as vazões mínimas de referência $Q_{7,10}$, Q_{90} e Q_{95} , além da vazão média de longo termo (Q_{MLT}).

A estimativa da vazão mínima de sete dias consecutivos (Q_7) foi obtida calculando-se a média móvel de sete dias consecutivos das vazões em cada ano da série de dados, em que os menores valores médios anuais foram selecionados. Após a obtenção da série anual das vazões mínimas de sete dias consecutivos (Q_7), foi ajustado um modelo de distribuição de probabilidades que represente

adequadamente o comportamento das séries de Q_7 , o qual permite associar o valor a um período de retorno de 10 anos, obtendo-se, assim, a $Q_{7,10}$.

Já os valores dos índices Q_{90} e Q_{95} foram obtidos associando-se os valores da série de vazões médias diárias às probabilidades de ocorrência de 90% e 95%, respectivamente.

Devido ao fato de as sub-bacias experimentais não apresentarem dez anos de observação, foram adotados os três menores valores de Q_7 de cada ano da série histórica e, depois de obtidas as séries de vazão mínima de sete dias consecutivos (Q_7), foram calculados os valores de $Q_{7,10}$.

Os modelos de distribuição de probabilidades Log-Normal a dois parâmetros e Gumbel para valores mínimos foram adotados para a obtenção dos índices previamente citados.

A distribuição de probabilidade Log-Normal a dois parâmetros é representada por

$$FDP = \frac{1}{x\sigma_n\sqrt{2\pi}} e^{-0,5\left(\frac{\ln(x)-\mu_n}{\sigma_n}\right)^2} \quad (1)$$

em que

FDP: função densidade de probabilidade

x: variável aleatória

μ_n : parâmetro de posição da distribuição Log-Normal

σ_n : parâmetro de escala da distribuição Log-Normal

Como essa distribuição se assemelha à distribuição normal, porém trabalha com os logaritmos dos dados, na distribuição Log-Normal a 2

parâmetros, o valor de K_{TR} se assemelha ao valor de z da distribuição normal, podendo, então, ser representada pela equação de Ven Te Chow da seguinte forma:

$$X_{TR} = e^{\mu_n + K_{TR} \cdot \sigma_n} \quad (2)$$

A distribuição de probabilidades Gumbel para valores mínimos é representada por

$$FDP = \alpha e^{\{\alpha(x-\mu) - e^{\alpha(x-\mu)}\}} \quad (3)$$

em que

FDP: função densidade de probabilidade;

x : variável aleatória;

α : parâmetro de escala estimado pelo método dos momentos;

μ : parâmetro de posição estimado pelo método dos momentos.

Os parâmetros α e μ são obtidos por:

$$\alpha = \frac{1,2826}{S} \quad (4)$$

$$\mu = \bar{X} + 0,45 S \quad (5)$$

em que

\bar{X} : média amostral

S: desvio padrão amostral

A função cumulativa de probabilidade (FCP) é dada pela probabilidade de não excedência

$$P(x \leq x_i) = 1 - e^{-e^{\alpha(x-\mu)}} \quad (6)$$

em que

P: probabilidade de não excedência.

Para conferir a adequabilidade dos modelos de distribuição de probabilidades, foram utilizados os testes de aderência de Kolmogorov-Smirnov, para os índices Q_{90} e Q_{95} e Qui-quadrado, para o índice $Q_{7,10}$, ambos com nível de significância de 5%.

3.4 Obtenção das características físicas da área de estudo

Para a obtenção das características físicas das estações fluviométricas selecionadas para o estudo, foi utilizado o Modelo Digital de Elevação (MDE), obtido por meio de imagens do sensor *Advanced Spacebone Thermal Emission and Reflection Radiometer*, ou ASTER, disponibilizado pelo *website* da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). O MDE-ASTER apresenta resolução espacial de 30 m.

Após a obtenção das imagens, estas passaram por um processo de preenchimento de depressões, gerando, assim, o chamado modelo digital de elevação hidrologicamente consistente (MDEHC). De posse das estações

fluviométricas, da hidrografia mapeada e do MDEHC, foram, então, obtidas as características físicas das bacias estudadas, utilizando-se o sistema de informações geográficas (SIG) ArcGis 10.1 (ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE - ESRI, 2013).

3.4.1 Área de drenagem (A)

Neste trabalho, a área de drenagem foi obtida por meio de manipulação do modelo digital de elevação (DEM) com a finalidade de se obter mapas temáticos de rendimentos específicos de cada vazão regionalizada. Para a obtenção da área de drenagem foi utilizado o seguinte procedimento:

- obtenção da direção do escoamento de cada célula: a direção do escoamento é obtida por meio do método D-8, proposto por Jenson e Domingue (1988), o qual considera uma das oito direções possíveis de escoamento (norte, sul, leste, oeste, nordeste, noroeste, sudeste e sudoeste) para cada uma das células do MDE;
- obtenção do fluxo acumulado de cada célula: essa ferramenta calcula a quantidade de células que drenam para uma determinada célula. Áreas que apresentam grande acúmulo de fluxo são áreas de fluxo concentrado, obtendo-se, então, um provável canal de drenagem;
- áreas de drenagem das UPGRH: obtidas pelo produto da área de cada pixel (900 m²) e pelo fluxo acumulado. Dessa maneira, cada célula do *grid* gerado apresenta um valor de área de drenagem de acordo com o número de células acumuladas obtidas anteriormente (fluxo acumulado);

- obtenção da rede de drenagem matricial: a hidrografia matricial foi obtida a partir do fluxo acumulado, em que as células são classificadas de acordo com um limite de área de drenagem que caracterize o início da drenagem. Dessa maneira, é possível identificar as células abaixo e acima desse limite, podendo-se, então, considerar que todas as células acima desse limite constituem cursos d'água e, com isso, é possível derivar uma rede de drenagem matricial;
- geração do mapa de área de drenagem das estações: de posse dos itens descritos anteriormente, multiplicou-se a área de drenagem acumulada das UPGRH pela hidrografia matricial, de maneira que os valores nulos da área de drenagem não sejam transferidos para o *grid* de saída, ou seja, que somente haja pixels coincidentes com a área de drenagem.

Dessa maneira, o valor da área de drenagem de cada estação fluviométrica foi extraído do pixel coincidente ou mais próximo de cada estação fluviométrica no mapa, como é mostrado na Figura 8.



Figura 8 Representação do mapa da área de drenagem acumulada e obtenção da área de drenagem de uma estação fluviométrica

Após a obtenção da área de drenagem, foram calculados o coeficiente de compacidade e o índice de conformação das sub-bacias hidrográficas, os quais representam, numericamente, a influência da forma da bacia na resposta (escoamento superficial) à ocorrência de uma precipitação. O coeficiente de compacidade é representado por

$$k_c = 0,28 \frac{P_{BH}}{A_{BH}} \quad (7)$$

em que

k_c : coeficiente de compacidade;

P_{BH} : perímetro da bacia hidrográfica;

A_{BH} : área da bacia hidrográfica.

Assim, esse coeficiente pode ser interpretado da seguinte maneira:

- $1,00 < kc < 1,25$: bacia com alta propensão a grandes enchentes;
- $1,25 < kc < 1,50$: bacia com tendência mediana a grandes enchentes;
- $kc > 1,50$: bacia com menor propensão a grandes enchentes.

O índice de conformação é obtido por

$$I_c = \frac{A_{BH}}{L_{ax}^2} \quad (8)$$

em que

I_c : índice de conformação;

A_{BH} : área da bacia hidrográfica;

L_{ax} : comprimento axial da bacia hidrográfica.

O índice de conformação também expressa a capacidade da bacia em gerar enchentes e, quanto mais próximo de 1, maior é a propensão de enchentes.

3.4.2 Comprimento do curso d'água principal (L)

A hidrografia dos rios principais das UPGRH GD1 e GD2, utilizadas neste estudo, é o resultado da Base Cartográfica Integrada do Brasil ao Milionésimo Digital (bCIBMd), a qual é um produto cartográfico do IBGE que retrata a situação vigente do território na escala de 1:1.000.000, por meio da

representação vetorial das linhas definidoras dos elementos cartográficos de referência, agregados em categorias de informação.

Os comprimentos dos cursos d'água principais de cada estação foram medidos por meio do *software* ArcGis 10.1 (ESRI, 2013).

3.4.3 Declividade média das sub-bacias (S)

Após serem delimitadas as sub-bacias considerando como ponto de controle as estações fluviométricas selecionadas para o estudo, a declividade média de cada área de drenagem foi obtida com auxílio do MDEHC, calculando-se a média aritmética das declividades de todas as células inseridas em determinada sub-bacia hidrográfica (BAENA et al., 2004; FERREIRA, 2010; LEMOS, 2006).

3.5 Obtenção das características climáticas

Neste trabalho utilizou-se a precipitação total anual média (P) como variável explicativa climática. A média da precipitação anual de cada estação pluviométrica foi calculada com, no mínimo, dez anos de observação, exceto nas estações das bacias experimentais, que apresentam observações de até sete anos.

Para se obter informações sobre a concentração sazonal da quantidade de precipitação das sub-bacias estudadas, utilizou-se o Índice de Concentração de Precipitação (ICP), o qual pode ser utilizado para análise do comportamento da precipitação em uma bacia hidrográfica e, conseqüentemente, para o entendimento de seus processos hidrológicos (APAYDIN et al., 2006).

O Índice de Concentração de Precipitação (ICP) (OLIVER, 1980) é obtido por

$$\text{ICP (\%)} = \frac{\sum_{i=1}^{12} p_i^2}{\left(\sum_{i=1}^{12} p_i\right)^2} \cdot 100 \quad (9)$$

em que

p_i : precipitação do i -ésimo mês

Oliver (1980) sugere que valores de ICP menores que 10% representam uma distribuição de precipitação mensal uniforme; valores de PCI entre 11% e 15% apresentam uma distribuição moderada; valores de 16% a 20% apresentam distribuição irregular e valores maiores que 20% apresentam distribuição muito irregular.

3.6 Metodologia de regionalização de vazões

Neste trabalho, as vazões mínimas de referência e a vazão média de longo termo (Q_{MLT}) foram regionalizadas de acordo com metodologia proposta pela Eletrobrás (1985), a qual tem como objetivo principal a utilização de regressões regionais aplicadas a regiões hidrologicamente homogêneas para se obter a vazão analisada em qualquer local da área em estudo.

3.6.1 Identificação de regiões hidrologicamente homogêneas

Para a identificação de regiões hidrologicamente homogêneas foram adotados dois critérios estatísticos conforme descrito a seguir.

- a) Critério baseado na análise de distribuição de frequências das vazões adimensionalizadas de cada estação

Este critério é baseado no fato de que as distribuições de frequências das vazões médias, máximas e mínimas das estações em uma região hidrologicamente homogênea apresentam um mesmo comportamento. Essa característica permite que, ao se obter séries transformadas de vazões, por meio da divisão dos seus valores pelas respectivas médias, as distribuições de frequência dessas séries transformadas sejam idênticas (LEMOS, 2006).

As distribuições de frequência das séries de vazões podem ser representadas por distribuições teóricas de probabilidades, como as distribuições Normal, Log-Normal, Gumbel e Weibull (EUCLYDES et al., 2001). O gráfico formado pelos pontos das vazões adimensionalizadas é o de uma reta, em que uma equação do tipo $Y = \beta_0 + \beta_1 X_1$ é ajustada para cada estação fluviométrica. As estações que apresentarem coeficientes β_1 próximos entre si podem ser consideradas como pertencentes a uma mesma região hidrologicamente homogênea.

- b) Critério baseado na análise do ajuste do modelo de regressão múltipla

Por este critério, as regiões hidrologicamente homogêneas são obtidas a partir de regressões múltiplas entre as séries de vazões mínimas e as características físicas e climáticas das sub-bacias de cada estação fluviométrica analisada. Estas características físicas e climáticas são, geralmente, representadas por área de drenagem, comprimento do rio principal, densidade de drenagem, declividade média da bacia, declividade média do rio principal e precipitação média da bacia.

Para a definição das regiões hidrologicamente homogêneas, são analisados os coeficientes da regressão, a tendência e a classificação dos resíduos padronizados, e o erro relativo percentual entre os valores das vazões observadas e as estimadas pelo modelo (EUCLYDES et al., 2001). Quando os dois critérios apresentarem bons resultados, a região é definida como hidrologicamente homogênea para as vazões estudadas. Caso isso não ocorra, é necessário, então, subdividir a região.

Para a subdivisão de regiões hidrologicamente homogêneas e a aplicação dos critérios descritos anteriormente, foi utilizado o *software* RH 4.1 – Regionalização Hidrológica, atualização do *software* proposto por Euclides (1999).

3.7 Ajuste das equações regionais

Após a obtenção das vazões $Q_{7,10}$, Q_{90} , Q_{95} e Q_{MLT} e das características físicas e climáticas (A, L, S e P) das áreas de drenagem de cada estação fluviométrica da área de estudo, aplicou-se a regressão entre as vazões estudadas e as variáveis explicativas em cada região identificadas como hidrologicamente homogênea. A área de drenagem foi adotada como sendo a variável explicativa principal da equação. Nos casos em que a equação potencial em função da área de drenagem não apresentou um ajuste adequado, foi adotada a regressão múltipla, utilizando-se os modelos linear e polinomial, apresentados, respectivamente, a seguir.

$$Q = \beta_0 A^{\beta_1} \quad (10)$$

$$Q = \beta_0 + \beta_1 A + \beta_2 L + \beta_3 S + \beta_4 P \quad (11)$$

$$Q = \beta_0 A^2 + \beta_1 A + \beta_2 \quad (12)$$

em que

A: área (km²);

L: comprimento do rio principal (km);

S: declividade média da sub-bacia (%)

P: precipitação média anual (mm);

β_i : parâmetros de ajuste das equações.

3.8 Estatísticas de precisão

Para verificar se as equações regionais representam adequadamente o comportamento da vazão em cada região hidrologicamente homogênea, ou seja, para verificar a precisão do modelo, adotaram-se o erro relativo e o Coeficiente de Eficiência de Nash e Sutcliffe (NASH; SUTCLIFFE, 1970) entre os valores observados e estimados, descritos pelas Equações 13 e 14, respectivamente:

$$ER = \left| \frac{Q_{obs} - Q_{est}}{Q_{obs}} \right| \cdot 100 \quad (13)$$

em que

ER: erro relativo (%)

Q_{obs} : vazão observada

Q_{est} : vazão estimada pela equação regional

$$C_{NS} = 1 - \frac{\sum (Q_{obs} - Q_{est})^2}{\sum (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (14)$$

em que

C_{NS} : coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe;

Q_{obs} : vazão observada;

Q_{est} : vazão estimada pela equação regional;

\bar{Q}_{obs} : média dos valores de vazão observados.

Segundo a classificação de Gottschalk e Motovilov (2000), o C_{NS} pode ser classificado das seguintes maneiras: C_{NS} igual a 1 corresponde a um ajuste perfeito; C_{NS} maior que 0,75 corresponde a um ajuste adequado e bom, e C_{NS} entre 0,36 e 0,75 corresponde a um ajuste aceitável.

3.9 Rendimento específico de vazões

O rendimento específico das vazões regionalizadas foi obtido com a finalidade de se conhecer a disponibilidade hídrica da região. O rendimento específico representa a capacidade de determinada bacia hidrográfica em produzir água, e quanto maior for este rendimento maior será a produção de água.

O rendimento específico de vazões é obtido pela seguinte equação:

$$RE = \frac{Q}{A} \quad (15)$$

em que

RE: rendimento específico, em $L s^{-1} km^2$

Q: vazão, em $L s^{-1}$

A: área de drenagem, em km^2

Para a análise da disponibilidade hídrica, o rendimento específico das vazões mínimas foi classificado com base na análise da vulnerabilidade das águas superficiais do estado de Minas Gerais, presente no Zoneamento Ecológico-Econômico de Minas Gerais (ZEE-MG) (MINAS GERAIS, 2008). Os rendimentos específicos das vazões mínimas podem ser classificados da seguinte maneira:

- muito baixos: $< 1 L s^{-1} km^2$;
- baixos: 1 a $3 L s^{-1} km^2$;
- médios: 3 a $5 L s^{-1} km^2$;
- altos: 5 a $7 L s^{-1} km^2$;
- muito altos: $> 7 L s^{-1} km^2$.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Características físicas e de precipitação

Foram analisadas, como características físicas, a área de drenagem (A), o comprimento do curso d'água principal (L) e a declividade média das sub-bacias (S). Como parâmetro climático, foi utilizada a precipitação total anual (P). As características físicas e de precipitação das áreas de drenagem de cada estação fluviométrica analisada são apresentadas nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 6 Características físicas e climáticas das sub-bacias hidrográficas da UPGRH-GD1

Estação	A (km ²)	L (km)	S (%)	P (mm)	ICP (%)	k _c	I _c
Ponte do Costa	774,60	94,3	27,4	1856,3	14,9	2,4	0,21
Fazenda Piedade	65,20	19,4	28,3	1253,3	17,5	2,2	0,19
Bom Jardim de Minas	505,30	64,4	29,3	1388,5	13,9	2,1	,016
Santana do Garambéu	1168,90	134,5	19,0	1336,1	17,2	2,7	0,13
Madre de Deus de Minas	2058,40	180,2	17,1	1483	17,1	2,6	0,20
Alagoa	216,20	28,9	38,9	1668,5	15,4	1,6	0,38
Alagoa	38,30	9,4	37,3	1668,5	15,4	1,3	0,65
Aiuruoca	526,80	52,1	33,3	1612,3	15,8	2,5	0,02
Carvalhos	102,10	20,3	30,8	1578	16,3	1,9	0,26
Fazenda da Cachoeira	65,40	21,7	24,9	1253,3	17,5	2,0	0,18
Mina de Níquel	28,98	12,3	23,1	1253,3	17,5	2,0	0,22
Fazenda Paraíba	383,60	49,7	21,4	1550,2	15,3	2,1	0,19
Andrelândia	273	33,6	22,1	1475,1	15,5	1,8	0,28

Tabela 6, conclusão

Estação	A (km ²)	L (km)	S (%)	P (mm)	ICP (%)	k _c	I _c
Fazenda Laranjeiras	1952	122,6	24,3	1339,3	16,2	2,0	0,22
Itutinga	6250,20	242,3	20,1	1448,3	16,5	1,9	0,35
Luminárias	987,9	54,8	18,2	1403,9	16,5	2,0	0,22
Itumirim	1803,50	55,0	16,8	1510,8	15,2	2,1	0,27
Ponte Rio do Peixe	123	242,3	20,1	2087,7	18,5	-	-
Marcela	4,7	3,6	12,3	1365,8	-	1,2	0,43
Jaguara	32	12	14,4	1365,8	-	2,5	0,33
Lavinha	6,76	4,45	38,5	2112,9	-	1,3	0,39

Tabela 7 Características físicas e climáticas das sub-bacias hidrográficas da UPGRH-GD2

Estação	Área (km ²)	L (km)	S (%)	P (mm)	ICP (%)	k _c	I _c
Fazenda Loschi	43,30	16,6	27,2	1421,6	14,9	2,1	0,22
Campolide	398,10	36,9	20,7	1502,2	15,9	2,3	0,31
Fazenda da Conquista	51,20	13,7	22,6	1227	14,9	1,7	0,35
Usina Barbacena	180,30	21,3	24,8	1421,6	15,7	2,0	0,24
Barroso	1011,40	63,0	19,6	1334,2	16,7	2,0	0,67
Alfredo Vasconcelos	20,10	5,7	22,4	1421,6	14,9	1,5	0,55
Ibertioga	185,40	21,7	21,4	1227	15,8	2,0	0,32
Porto do Elvas	825,50	71,7	17,2	1476,8	16,1	2,0	0,26
Porto Tiradentes	2692,20	89,0	18,5	1475	16,4	1,7	0,59
Usina São João Del Rei	637	73,7	16,4	1464,5	16,1	2,2	0,27
Vila Rio das Mortes	272,20	30,0	14,2	1194,1	17,1	1,8	0,35
Ibituruna	6019,20	163,9	17,5	1601,3	15,9	2,0	0,44
Bom Sucesso	350,76	27,1	16,9	1397,4	16,1	1,5	0,48

Tabela 7, continua

Estação	Área (km ²)	L (km)	S (%)	P (mm)	ICP (%)	k _c	I _c
Ribeirão Vermelho	15720	321,0	18,4	1241,8	16,1	1,9	0,41
Carmo da Cachoeira	235,40	32,2	15,6	1247,4	16,5	1,7	0,39
Usina Couro do Cervo	387	32,2	17,4	1390,2	16,0	1,7	0,72
Usina Nepomuceno	1016,20	63,6	16,8	1420,8	16,3	1,9	0,42
Ponte Fernão Dias	312	37,6	16,3	1479	15,8	2,0	0,39
Santana do Jacaré	1599	87,2	17,2	1306,4	15,9	2,3	0,29

Observa-se que as áreas de drenagem das regiões em estudo variaram de 4,7 km², referente à estação ribeirão Marcela, até 15.720 km², referente à estação ribeirão Vermelho. Como as UPGRH são delimitadas de acordo com critérios políticos e estratégicos, e não de acordo com as regras de delimitação de bacias hidrográficas, a região não apresenta um exutório para o qual todos os cursos d'água são drenados. Por isso, a maior área encontrada foi a da estação Ribeirão Vermelho e não a área total das UPGRH.

A declividade média apresentou valores da ordem de 12,3%, na sub-bacia do ribeirão Marcela, na UPGRH-GD1 e de até 38,9%, na sub-bacia da estação Alagoa, situada na serra da Mantiqueira. A declividade média das UPGRH é de, aproximadamente, 18,2%.

A precipitação total anual apresentou valores entre 1.227 mm, na estação Fazenda da Conquista (UPGRH-GD2) e 2.112,9 mm na sub-bacia do ribeirão Lavrinha (UPGRH-GD1). O elevado valor da precipitação nesta estação se deve ao fato de a mesma estar situada na região da serra da Mantiqueira, a qual contribui para o aumento da lâmina precipitada devido ao seu efeito orográfico.

De acordo com os resultados do Índice de Concentração de Precipitação (ICP), observa-se que, em geral, a UPGRH-GD1 apresenta uma distribuição

irregular da precipitação mensal (16% a 20%), enquanto, na UPGRH-GD2, a distribuição da precipitação mensal é caracterizada como moderada (11% a 15%). Mello et al. (2013), analisando a concentração de precipitação de todo o território nacional, demonstraram que grande parte do sudeste do Brasil apresenta uma concentração moderada, tal como resultados obtidos na região da UPGRH-GD2. Este comportamento pode ser explicado pelo fato de a região apresentar um período de estiagem durante o inverno e, conseqüentemente, valores de ICP variando de 11% a 16%.

Os valores de ICP obtidos na UPGRH-GD1 foram semelhantes aos relatados por Mello et al (2013), que variaram entre 16% e 20% na região leste do estado de Minas Gerais, onde estão inseridas as UPGRH estudadas. Segundo os autores, elevados valores de ICP nesta região podem ser explicados devido à influência da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), responsável pelo aumento da concentração de chuvas nos meses de dezembro a fevereiro, gerando eventos de precipitação de alta intensidade.

De acordo com os valores do coeficiente de compacidade (k_c) e o índice de conformação (I_c) das sub-bacias hidrográficas, a região em estudo, em geral, apresenta menor propensão a grandes enchentes, com valores de k_c maiores que 1,5 e I_c menores e distantes de 1.

4.2 Identificação de regiões hidrologicamente homogêneas

Segundo metodologia proposta pela Eletrobrás (1985), a transferência de dados de vazões de um local com observações para outro onde não há informação deve ser aplicada em áreas que apresentem comportamento hidrológico semelhante. A Eletrobrás (1985) considera que o comportamento semelhante é o resultado da combinação de fatores físicos e climáticos. As

regiões que apresentam tal comportamento são denominadas regiões hidrologicamente homogêneas.

Inicialmente, foi realizada uma tentativa de considerar toda a área como uma região homogênea, porém, o coeficiente de ajuste (R^2) da equação regional obtida pelo critério 2 apresentou valor de 0,84. A fim de obter áreas que melhor representem as vazões em estudo, foi realizada a subdivisão da área de estudo em regiões hidrologicamente homogêneas.

Assim como em estudos realizados por Baena et al. (2004) e Lemos (2006), tomou-se por base a distribuição geográfica das estações fluviométricas, a similaridade dos coeficientes β_1 obtidos pelo critério 1, a região de influência do curso d'água principal e a homogeneidade do relevo para proceder à subdivisão da área em regiões homogêneas.

Foram identificadas quatro regiões homogêneas, em que o número de estações fluviométricas em cada área variou entre 9 e 12. Essas regiões podem ser observadas na Figura 9, as quais apresentam as seguintes características:

- região I: apresenta área de, aproximadamente, 6.967 km² e tem, entre seus limites, nove estações fluviométricas. Tem como cursos d'água principais os rios Ingaí e Capivari, os quais nascem na região I, fazendo confluência com o rio Grande, também na mesma região;
- região II: apresenta área de, aproximadamente, 6.018 km², a qual foi delimitada entre a região da serra da Mantiqueira, onde nasce o rio das Mortes, até a estação fluviométrica Ibituruna. Tem, entre seus limites, doze estações fluviométricas;
- região III: delimitada entre a nascente do rio Aiuruoca, na serra da Mantiqueira, até a estação fluviométrica Itutinga, essa região ocupa área aproximada de 3.773 km², onde está localizado o Reservatório

de Camargos (CEMIG/UHE-Camargos). Apresenta, entre seus limites, dez estações fluviométricas;

- região IV: delimitada desde a nascente do rio Grande, também localizada na serra da Mantiqueira, até a estação fluviométrica Madre de Deus de Minas, localizada a montante do Reservatório de Camargos (CEMIG/UHE-Camargos). A área é de, aproximadamente, 2.480 km² e tem um total de nove estações fluviométricas entre os seus limites.

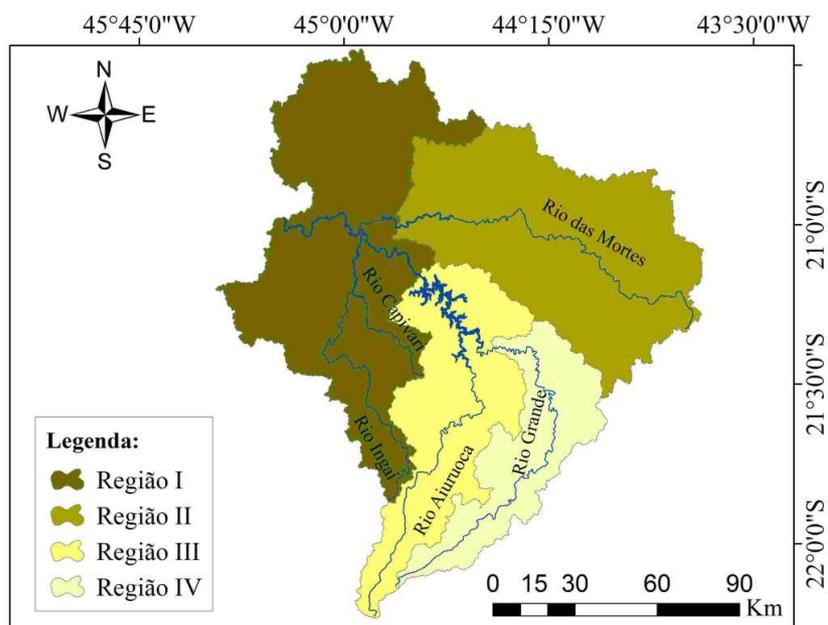


Figura 9 Delimitação das regiões homogêneas nas UPGRH GD1 e GD2

Nas Tabelas 8 e 9 são apresentadas as equações de regressão para a identificação de regiões homogêneas, segundo o critério 2, de eventos mínimos e médios, respectivamente. As variáveis independentes área de drenagem (A), declividade média da bacia (S) e precipitação média anual (P) foram as que melhor explicaram o comportamento das vazões mínimas e médias das regiões

homogêneas I e III. Todavia, nas regiões II e IV, as variáveis explicativas que melhor representaram as vazões mínimas e médias foram a área de drenagem (A) e a precipitação total anual média (P).

Tabela 8 Modelos de regressão das vazões mínimas e parâmetros estatísticos associados a cada região homogênea

Região homogênea	Modelo de regressão	R ²	EP	F (%)	NE ER < 30%
I	$Q_{\min} = 1,85 \cdot 10^{-20} A^{1,041} S^{5,436} P^{3,395}$	0,986	1,20	0,001	8
II	$Q_{\min} = 1,75 \cdot 10^{-20} A^{0,396} P^{6,161}$	0,702	1,89	0,323	3
III	$Q_{\min} = 4,64 \cdot 10^{-11} A^{1,049} S^{1,009} P^{2,143}$	0,989	1,28	0,000	9
IV	$Q_{\min} = 435,5 A^{0,856} P^{1,368}$	0,943	1,51	0,008	6

NE_{ER < 30%}: número de estações com ER < 30%; Unidades: A (km²); S (%); P (mm).

Tabela 9 Modelos de regressão das vazões médias e parâmetros estatísticos associados a cada região homogênea

Região homogênea	Modelo de regressão	R ²	EP	F (%)	NE ER < 30%
I	$Q_{\text{med}} = 2,31 \cdot 10^{-20} A^{1,049} S^{4,379} P^{3,928}$	0,978	1,25	0,005	9
II	$Q_{\text{med}} = 2,5 \cdot 10^{-20} A^{0,389} P^{6,259}$	0,721	1,84	0,248	4
III	$Q_{\text{med}} = 0,0003 A^{0,952} S^{0,6567} P^{0,371}$	0,993	1,18	0,000	10
IV	$Q_{\text{med}} = 24,91 A^{0,933} P^{0,918}$	0,959	1,45	0,000	6

NE_{ER < 30%}: número de estações com ER < 30%; Unidades: A (km²); S (%); P (mm).

Na Tabela 10 são apresentados os erros relativos referentes às estimativas das vazões mínimas e médias nas UPGRH GD1 e GD2. Observa-se que, na região I, a equação regional apresentou coeficiente de determinação elevado ($R^2 = 0,978$) e estimativas com baixos erros relativos, tendo todas as estações apresentado valores menores que 30%, tanto para as estimativas de vazões mínimas quanto para as de vazão média. Na região III, somente a estação

Alagoa (61014000) apresentou erro relativo maior que 30% para a estimativa de vazões mínimas.

Na região IV, três estações apresentaram erros relativos maiores superiores a 30% (Ponte do Costa, Fazenda da Cachoeira e Mina de Níquel) na estimativa das vazões mínimas. Já na estimativa das vazões médias, as estações Ponte do Costa, Bom Jardim de Minas e Fazenda da Cachoeira apresentaram erros relativos elevados.

A região II apresentou um coeficiente de determinação baixo ($R^2 = 0,721$) e um teste F não significativo ($F = 0,248$), porém, este resultado foi o melhor encontrado entre todas as tentativas de subdivisão de regiões homogêneas. Essa região apresentou o mesmo comportamento tanto para valores de vazão mínima quanto para os de vazão média.

O número de observações que apresentaram erros relativos menores que 30% foi elevado na maioria das regiões, exceto na região II, devido ao ajuste ineficiente das variáveis físicas e de precipitação aos valores de vazões mínimas. Almeida (2010) e Elesbon (2004) adotaram valores de erros relativos menores que 30% como referência para a escolha de modelos de regressão, tanto na identificação de regiões homogêneas quanto na avaliação dos modelos recomendados de regionalização.

O erro relativo (ER) e as vazões mínimas e médias observadas e estimadas de cada estação fluviométrica são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 Valores de vazões mínimas e médias, observadas e estimadas, em m³/s e erro relativo percentual das estações fluviométricas de cada região hidrologicamente homogênea das UPGRH GD1 e GD2

Região homogênea	Código	Estação	Q _{min,obs}	Q _{min,est}	ER (%)	Q _{med,obs}	Q _{med,est}	ER (%)
I	61075000	Luminárias	8,93	8,21	7,97	24,19	23,99	0,83
	61078000	Itumirim	13,02	13,08	0,48	38,08	43,24	13,56
	61140000	Bom Sucesso	1,38	1,84	33,03	6,94	5,74	17,21
	61150000	Ribeirão Vermelho	112,04	105,30	6,02	304,91	289,34	5,11
	61170000	Carmo da Cachoeira	0,59	0,53	9,12	1,53	1,71	11,23
	61173000	Usina Couro do Cervo	2,67	2,38	10,70	5,66	7,18	26,83
	61175000	Usina Nepomuceno	5,84	5,84	0,00	15,43	18,61	20,62
	61195000	Ponte Fernão Dias	1,83	1,63	11,00	7,13	5,44	23,61
	61202000	Santana do Jacaré	6,62	7,93	19,77	27,23	23,68	13,05
II	61081000	Fazenda Loschi	1,38	2,08	50,52	3,20	5,86	82,89
	61085000	Campolide	4,04	6,88	70,43	13,33	19,19	43,99
	61087000	Fazenda da Conquista	1,69	0,90	47,01	4,53	2,49	45,09
	61088000	Usina Barbacena	6,32	3,65	42,21	16,23	10,20	37,17
	61090000	Barroso	9,03	4,90	45,78	21,80	13,40	38,54
	61100000	Ibertioga	1,63	3,72	128,00	3,72	10,04	169,80

Tabela 10, continua

Região homogênea	Código	Estação	Q _{min,obs}	Q _{min,est}	ER (%)	Q _{med,obs}	Q _{med,est}	ER (%)
II	61105000	Porto do Elvas	7,37	8,45	14,57	18,12	23,38	29,04
	61107000	Porto Tiradentes	19,20	14,56	24,17	52,82	39,97	24,34
	61115000	Usina São João del Rei	3,29	7,24	120,40	13,14	20,06	52,71
	61122000	Vila Rio das Mortes	1,58	1,47	6,75	5,58	4,02	27,93
	61135000	Ibituruna	53,02	30,58	42,33	135,93	83,99	38,21
III	61014000	Alagoa	3,23	4,23	30,89	7,88	9,14	16,02
	61016000	Alagoa	0,88	0,66	24,61	2,08	1,71	17,92
	61024000	Aiuruoca	7,32	8,55	16,83	20,41	19,05	6,67
	61031000	Carvalhos	1,40	1,35	3,31	3,28	3,76	14,82
	61045000	Fazenda Paraíba	3,12	3,60	15,58	8,46	10,37	22,59
	61060000	Fazenda Laranjeiras	23,29	16,46	29,31	59,95	50,23	16,22
	61065001	Itutinga	51,86	54,52	5,14	137,53	138,34	0,59
	61125000	Ponte do rio do Peixe	1,61	1,44	10,35	3,32	3,10	6,46
	JAG	Jaguara	0,11	0,14	22,00	0,68	0,72	4,89
	MAR	Marcela	0,02	0,02	4,52	0,11	0,10	3,33

Tabela 10, conclusão

Região homogênea	Código	Estação	Q _{min,obs}	Q _{min,est}	ER (%)	Q _{med,obs}	Q _{med,est}	ER (%)
IV	61006000	Fazenda Piedade	1,25	0,90	28,11	1,72	1,76	2,03
	61004000	Ponte do Costa	2,36	4,37	85,16	7,16	12,32	72,13
	61009000	Bom Jardim de Minas	6,14	4,51	26,58	15,75	10,80	31,42
	61011000	Santana do Garambéu	10,32	9,50	7,96	25,47	24,05	5,56
	61012000	Madre de Deus de Minas	17,93	13,72	23,49	51,06	37,70	26,17
	61041000	Fazenda da Cachoeira	0,62	0,90	44,30	1,09	1,76	62,11
	61043000	Mina de Níquel	0,32	0,45	42,45	0,91	0,82	9,17
	61052000	Andrelândia	2,64	2,48	6,01	5,67	5,80	2,20
	LAV	Lavinha	0,08	0,06	24,80	0,17	0,13	20,87

4.3 Vazões mínimas de referência e média de longo termo

As vazões mínimas de referência $Q_{7,10}$, Q_{90} e Q_{95} e a média de longo termo (Q_{MLT}) obtidas nas UPGRH GD1 e GD2 são apresentadas nas Tabelas 11 e 12, respectivamente.

Tabela 11 Valores das vazões $Q_{7,10}$, Q_{90} , Q_{95} e Q_{MLT} das estações fluviométricas na UPGRH-GD1, em m^3/s

Código	Estação	$Q_{7,10}$	Q_{90}	Q_{95}	Q_{MLT}
61004000	Ponte do Costa	1,91	2,66	2,12	7,16
61006000	Fazenda Piedade	0,58	1,02	0,84	2,27
61009000	Bom Jardim de Minas	4,06	6,54	5,09	14,79
61011000	Santana do Garambéu	8,09	11,06	9,09	17,04
61012000	Madre de Deus de Minas	11,95	18,62	15,01	48,23
61014000	Alagoa	2,55	3,20	2,64	7,43
61016000	Alagoa	0,73	1,46	1,19	2,07
61024000	Aiuruoca	4,34	6,77	5,43	18,35
61031000	Carvalhos	0,95	1,29	1,04	3,50
61041000	Fazenda da Cachoeira	0,40	0,53	0,44	1,12
61043000	Mina de Níquel	0,11	0,18	0,13	0,88
61045000	Fazenda Paraíba	2,00	3,00	2,41	7,91
61052000	Andrelândia	1,62	2,19	1,79	5,39
61060000	Fazenda Laranjeiras	15,51	18,65	15,07	48,60
61065001	Itutinga	39,06	54,18	43,94	135,93
61075000	Luminárias	5,01	6,48	5,10	19,37
61078000	Itumirim	7,30	10,65	8,27	33,49
61125000	Ponte do rio do Peixe	0,80	1,33	1,06	3,35
MAR	Ribeirão Marcela	0,01	0,02	0,01	0,09
JAG	Córrego Jaguará	0,06	0,14	0,10	0,67

Tabela 11, conclusão

Código	Estação	Q _{7,10}	Q ₉₀	Q ₉₅	Q _{MLT}
LAV	Ribeirão Lavinha	0,05	0,07	0,06	0,16

Tabela 12 Valores das vazões Q_{7,10}, Q₉₀, Q₉₅ e Q_{MLT} das estações fluviométricas na UPGRH-GD2, em m³/s

Código	Estação	Q _{7,10}	Q ₉₀	Q ₉₅	Q _{MLT}
61081000	Fazenda Loschi	0,99	1,28	1,04	3,25
61085000	Campolide	2,10	4,61	3,66	13,56
61087000	Fazenda da Conquista	0,97	1,36	1,05	4,67
61088000	Usina Barbacena	4,34	6,47	5,22	16,96
61090000	Barroso	5,99	7,66	6,12	20,87
61093000	Alfredo Vasconcelos	1,13	1,32	1,11	2,75
61100000	Ibertioga	1,00	1,26	1,01	3,44
61105000	Porto do Elvas	3,99	6,11	4,93	16,12
61107000	Porto Tiradentes	13,59	18,93	15,19	51,22
61115000	Usina São João Del Rei	1,93	3,00	2,23	12,56
61122000	Vila Rio das Mortes	1,00	1,47	1,11	5,63
61135000	Ibituruna	40,12	54,87	44,47	118,33
61140000	Bom Sucesso	0,41	1,55	1,15	5,84
61150000	Ribeirão Vermelho	90,16	116,08	93,33	307,66
61170000	Carmo da Cachoeira	0,37	0,69	0,57	1,58
61173000	Usina Couro do Cervo	1,75	2,53	2,07	5,97
61175000	Usina Nepomuceno	4,07	5,72	4,56	16,21
61195000	Ponte Fernão Dias	1,21	1,98	1,51	7,12
61202000	Santana do Jacaré	3,49	9,05	6,98	30,89

O modelo de distribuição de probabilidade que melhor se ajustou à série para a obtenção da Q_{7,10} foi o Log-Normal a dois parâmetros, pois apresentou

menores valores de Qui-Quadrado, quando comparados aos da distribuição Gumbel. Somente as estimativas da $Q_{7,10}$ das estações Jaguará e Marcela não foram aprovadas no teste Qui-Quadrado, porém, foram aceitas no teste de Kolmogorov-Smirnov, possibilitando, assim, sua utilização. Na obtenção da Q_{90} e Q_{95} , todas as estimativas obtidas pelo modelo de distribuição de probabilidades Log-Normal a dois parâmetros apresentaram-se adequadas, pelo teste de Kolmogorov-Smirnov.

Nas Tabelas 13 e 14 apresentam-se os valores de rendimentos específicos das vazões mínimas em estudo. Nota-se que, em geral, os rendimentos específicos $RE_{7,10}$, RE_{90} e RE_{95} das regiões Alto Rio Grande (UPGRH-GD1) e Vertentes do Rio Grande (UPGRH-GD2) apresentam elevados valores de rendimento específico de vazões mínimas ($> 5 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$), o que representa boas condições de recarga dos aquíferos subterrâneos, refletindo uma disponibilidade hídrica satisfatória no período de estiagem.

Tabela 13 Rendimentos específicos de vazões mínimas na UPGRH-GD1, em $\text{L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$

Código	Estação	$RE_{7,10}$	RE_{90}	RE_{95}	RE_{MLT}
61004000	Ponte do Costa	2,47	3,44	2,74	9,24
61006000	Fazenda Piedade	8,95	15,58	12,87	34,82
61009000	Bom Jardim de Minas	8,03	12,94	10,08	29,27
61011000	Santana do Garambéu	6,92	9,46	7,77	22,00
61012000	Madre de Deus de Minas	5,80	9,05	7,29	23,43
61014000	Alagoa	11,24	14,80	12,22	34,37
61016000	Alagoa	19,35	38,00	31,17	54,05
61024000	Aiuruoca	7,50	12,86	10,31	34,83
61031000	Carvalhos	9,42	12,65	10,19	34,28
61041000	Fazenda da Cachoeira	6,10	8,07	6,80	17,13
61043000	Mina de Níquel	3,93	6,14	4,46	30,37

Tabela 13, conclusão

Código	Estação	RE _{7,10}	RE ₉₀	RE ₉₅	RE _{MLT}
61045000	Fazenda Paraíba	5,11	7,83	6,28	20,62
61052000	Andrelândia	6,68	8,04	6,56	19,74
61060000	Fazenda Laranjeiras	7,70	9,55	7,72	24,36
61065001	Itutinga	5,98	8,67	7,03	21,75
61075000	Luminárias	5,07	6,55	5,17	19,61
61078000	Itumirim	4,05	5,91	4,59	18,57
61125000	Ponte Rio do Peixe	6,63	10,79	8,64	27,24
MAR	Ribeirão Marcela	1,18	3,76	2,71	19,15
JAG	Córrego Jaguara	2,45	4,39	3,23	20,94
LAV	Ribeirão Lavinha	7,78	10,17	8,32	23,67

Tabela 14 Rendimentos específicos de vazões mínimas na UPGRH-GD2, em L s⁻¹ km⁻²

Código	Estação	RE _{7,10}	RE ₉₀	RE ₉₅	RE _{MLT}
61081000	Fazenda Loschi	22,78	29,51	23,92	75,06
61085000	Campolide	5,28	11,58	9,18	34,06
61087000	Fazenda da Conquista	19,00	26,60	20,46	91,21
61088000	Usina Barbacena	24,07	35,91	28,95	94,07
61090000	Barroso	5,92	7,57	6,05	20,63
61093000	Alfredo Vasconcelos	56,33	65,88	55,22	136,82
61100000	Ibertioga	5,42	6,81	5,45	18,55
61105000	Porto do Elvas	4,83	7,41	5,97	19,53
61107000	Porto Tiradentes	5,05	7,03	5,64	19,03
61115000	Usina São João Del Rei	3,03	4,71	3,51	19,72
61122000	Vila Rio das Mortes	3,66	5,39	4,08	20,68
61135000	Ibituruna	6,67	9,12	7,39	19,66
61140000	Bom Sucesso	1,17	4,41	3,29	16,65

Tabela 14, conclusão

Código	Estação	RE _{7,10}	RE ₉₀	RE ₉₅	RE _{MLT}
61150000	Ribeirão Vermelho	5,74	7,38	5,94	19,57
61170000	Carmo da Cachoeira	1,58	2,93	2,41	6,71
61173000	Usina Couro do Cervo	4,52	6,54	5,35	15,43
61175000	Usina Nepomuceno	4,00	5,63	4,48	15,95
61195000	Ponte Fernão Dias	3,87	6,34	4,84	22,82
61202000	Santana do Jacaré	2,18	5,66	4,36	19,32

De acordo com o estudo pedológico e hidrológico realizado por Araújo (2006), a região do Alto Rio Grande apresenta três classes de potencial do solo quanto à recarga de aquíferos que são: baixo potencial, médio potencial e alto potencial. De acordo com o autor, a classe predominante na região é a de “baixo potencial”, devido ao fato de grande parte da região apresentar Cambissolos Háplicos, com baixa capacidade de armazenamento.

Por outro lado, as áreas com solos classificados com alto potencial de recarga dos aquíferos são compostas, na sua maioria, por Latossolos. Os solos com alto potencial de recarga tendem a se concentrar nas áreas de influência direta do reservatório da Usina Hidrelétrica de Camargos. Áreas de médio potencial à recarga são encontradas nas porções sul e oeste da região do Alto Rio Grande, com presença de Cambissolos e Latossolos.

Observa-se que as bacias Aiuruoca e Carvalhos apresentaram elevados valores de rendimento específico de vazões mínimas, variando entre 7,5 a 12,86 L s⁻¹ km⁻². Essa situação pode ser explicada devido à sua geologia, a qual constituída por mantos de alteração caracterizados por depósitos de fluxo gravitacional de detritos espessos, com bom potencial de armazenamento de águas subterrâneas. Há predomínio de gnaisses de alto grau de metamorfismo, granitoides e quartzitos (ARAÚJO, 2006; MELLO; VIOLA; BESKOW, 2008).

Devido a estas características, essas bacias apresentam maior potencial de geração de escoamento subterrâneo, refletindo em valores de vazões mínimas mais significativas.

Já as bacias Madre de Deus, Fazenda Laranjeiras, Andrelândia, Fazenda Paraíba e Santana do Garambéu apresentaram menores valores de rendimento específico mínimo, quando comparadas às anteriormente citadas. Segundo Araújo (2006) e Mello, Viola e Beskow (2008), nesta região encontra-se o domínio dos Cambissolos de rocha pelítica (textura fina), com menor espessura do manto de alteração. A pequena espessura do solo, aliada ao relevo movimentado da região, indica que o armazenamento de água subterrânea ocorre apenas na parte do manto composto por rocha argilosa, com baixa condutividade hidráulica.

De acordo com Araújo (2006), a região de cabeceira do Alto Rio Grande possui, em termos pedológicos, geológicos e morfológicos, média condição de recarga de aquíferos, mas seu regime pluviométrico proporciona boas condições para a manutenção do escoamento subterrâneo, alimentando as nascentes dos rios Grande e Aiuruoca. Essa situação pode explicar o comportamento do rendimento específico na bacia Bom Jardim de Minas, situada na região da serra da Mantiqueira, a qual tem um regime pluviométrico que supera os 2.000 mm anuais e é relativamente bem distribuído ao longo do ano.

Nota-se que as bacias Alagoa (61016000), Fazenda Loschi, Fazenda da Conquista e Alfredo Vasconcelos apresentaram os maiores valores de rendimento específico, evidenciando o efeito da escala no comportamento do rendimento específico, em que menores áreas promovem um maior rendimento específico.

A região estudada apresentou rendimentos específicos semelhantes quando comparados aos do mapeamento dos recursos hídricos superficiais do estado de Minas Gerais (HIDROTEC), desenvolvido por Euclides (2001), em

que as UPGRH GD1 e GD2 são consideradas regiões com elevada disponibilidade hídrica.

Já no estudo de vulnerabilidade natural dos recursos hídricos superficiais no estado de Minas Gerais, presente no Zoneamento Ecológico-Econômico de Minas Gerais (MINAS GERAIS, 2008), as UPGRH em estudo foram classificadas como de “baixa” ($3,5 < RE_{7,10} < 5,5 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$) e “muito baixa” ($RE_{7,10} > 5,5 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$) vulnerabilidade natural, refletindo uma situação favorável de recarga de aquíferos subterrâneos.

4.4 Regionalização de vazões

4.4.1 Regionalização de vazões mínimas de referência $Q_{7,10}$, Q_{90} e Q_{95}

Os modelos de regionalização recomendados para a estimativa das vazões mínimas de referência para cada região hidrologicamente homogênea estão representados na Tabela 13.

A área de drenagem apresentou-se como a variável mais significativa para o ajuste das equações regionais. Além disso, a obtenção da área de drenagem é simples, o que facilita a aplicação do modelo pelo usuário, otimizando, assim, o processo para a estimativa das vazões mínimas de referência.

Pela análise dos dados da Tabela 15, nota-se que, para todas as vazões de referência, o modelo ajustado na região II foi o polinomial; nas demais estações, o melhor modelo foi o potencial. Para a estimativa da $Q_{7,10}$ na região III, adotaram-se os modelos potencial e linear, separados por intervalos de área. Essa manipulação foi necessária devido ao ajuste ineficiente da $Q_{7,10}$ em áreas superiores a 1.952 km^2 . De acordo com Eletrobras (1985), os modelos lineares apresentam algumas limitações, podendo-se citar entre elas o fato de que as

estimativas de vazões mínimas podem apresentar valores negativos em bacias pequenas. Porém, neste caso, essa situação não ocorre devido ao fato de a equação apresentar um intercepto positivo e o modelo ser recomendado apenas para áreas maiores.

Tabela 15 Modelos de regressão recomendados para a estimativa das vazões $Q_{7,10}$, Q_{90} e Q_{95} , em $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, para as regiões hidrologicamente homogêneas das UPGRH GD1 e GD2

Vazão	Região homogênea	Modelo de regressão	R ²
$Q_{7,10}$	I	$Q_{7,10} = 0,0007 A^{1,2279}$	0,921
	II	$Q_{7,10} = 6 \times 10^{-7} A^2 + 0,0032 A + 1,018$	0,991
	III	$Q_{7,10} = 0,0025 A^{1,1723} (0 \leq A \leq 1952 \text{ km}^2)$	0,919
		$Q_{7,10} = 0,0063 A + 0,5398 (A > 1952 \text{ km}^2)$	0,995
IV	$Q_{7,10} = 0,0074 A^{0,9545}$	0,955	
Q_{90}	I	$Q_{90} = 0,0024 A^{1,1244}$	0,977
	II	$Q_{90} = 7 \times 10^{-7} A^2 + 0,0046 A + 1,5305$	0,991
	III	$Q_{90} = 0,0074 A^{1,0586}$	0,923
	IV	$Q_{90} = 0,0104 A^{0,9614}$	0,948
Q_{95}	I	$Q_{95} = 0,0018 A^{1,1268}$	0,978
	II	$Q_{95} = 6 \times 10^{-7} A^2 + 0,0036 A + 1,2232$	0,9903
	III	$Q_{95} = 0,0054 A^{1,0733}$	0,918
	IV	$Q_{95} = 0,0083 A^{0,9638}$	0,944

Unidades: A (km^2).

O erro relativo percentual médio e o coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (C_{NS}) são apresentados na Tabela 16. Observa-se que, em geral, os modelos ajustados representam de maneira adequada os valores de vazão de referência, o que pode ser comprovado pelos valores do erro relativo médio

(22,95 a 53%) e elevados coeficientes de eficiência de Nash e Sutcliffe (0,75 a 0,99).

Tabela 16 Valores do erro relativo percentual médio (ER médio) e do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (C_{NS}) dos modelos de regressão recomendados para a estimativa das vazões mínimas de referência $Q_{7,10}$, Q_{90} e Q_{95}

Vazão	Região homogênea	ER médio (%)	C_{NS}
$Q_{7,10}$	I	43,28	0,99
	II	33,59	0,99
	III	53,00	0,99
	IV	32,7	0,95
Q_{90}	I	16,91	0,99
	II	22,95	0,97
	III	47,55	0,78
	IV	34,68	0,91
Q_{95}	I	16,14	0,99
	II	36,10	0,99
	III	50,53	0,75
	IV	36,39	0,91

Na Tabela 17 são apresentados os resultados da aplicação dos modelos de regressão recomendados, bem como o erro relativo das estimativas das vazões em relação aos valores observados.

Tabela 17 Valores de vazões mínimas de referência observados e estimados pelos modelos de regressão recomendados, em m³/s, e seus respectivos erros relativos percentuais

Região homogênea	Estação	Q _{7,10}			Q ₉₀			Q ₉₅		
		Q _{7,10 obs}	Q _{7,10 est}	ER (%)	Q _{90 obs}	Q _{90 est}	ER (%)	Q _{95 obs}	Q _{95 est}	ER (%)
I	Luminárias	5,01	3,33	33,49	6,48	5,59	13,66	5,10	4,26	16,46
	Itumirim	7,30	6,97	4,46	10,65	11,00	3,26	8,27	8,40	1,54
	Bom Sucesso	0,41	0,93	126,91	1,55	1,75	12,76	1,15	1,33	15,08
	Ribeirão Vermelho	90,16	99,52	10,39	116,08	125,52	8,13	93,33	96,35	3,23
	Carmo da Cachoeira	0,37	0,57	53,93	0,69	1,11	61,69	0,57	0,85	49,20
	Usina Couro do Cervo	1,75	1,05	39,76	2,53	1,95	22,98	2,07	1,48	28,34
	Usina Nepomuceno	4,07	3,45	15,24	5,72	5,77	0,88	4,56	4,40	3,39
	Ponte Fernão Dias	1,21	0,81	32,96	1,98	1,53	22,66	1,51	1,16	22,89
	Santana do Jacaré	3,49	6,01	72,39	9,05	9,61	6,13	6,98	7,33	5,10
II	Fazenda Loschi	0,99	1,16	17,37	1,57	1,73	10,57	1,04	1,38	33,28
	Campolide	2,10	2,96	41,08	5,91	4,28	27,58	3,66	3,39	7,26
	Fazenda da Conquista	0,97	1,18	21,62	1,89	1,77	6,28	1,05	1,41	34,50
	Usina Barbacena	4,34	1,61	62,79	7,91	2,38	69,88	5,22	1,89	63,76
	Barroso	5,99	4,87	18,68	9,45	6,90	26,98	6,12	5,48	10,43

Tabela 17, continua

Região homogênea	Estação	Q _{7,10}			Q ₉₀			Q ₉₅		
		Q _{7,10 obs}	Q _{7,10 est}	ER (%)	Q _{90 obs}	Q _{90 est}	ER (%)	Q _{95 obs}	Q _{95 est}	ER (%)
II	Alfredo Vasconcelos	1,13	1,08	4,38	1,59	1,62	1,91	1,11	1,30	16,75
	Ibertioga	1,00	1,63	62,50	1,53	2,41	57,70	1,01	1,91	88,99
	Porto do Elvas	3,99	4,07	1,97	7,33	5,80	20,78	4,93	4,60	6,54
	Porto Tiradentes	13,59	13,98	2,88	23,79	18,99	20,19	15,19	15,26	0,52
	Usina São João Del Rei	1,93	3,30	71,11	4,18	4,74	13,63	2,23	3,76	68,31
	Vila Rio das Mortes	1,00	1,93	93,95	2,51	2,83	12,94	1,11	2,25	102,51
	Ibituruna	40,12	42,02	4,73	51,03	54,58	6,96	44,47	44,63	0,37
III	Alagoa	2,55	1,36	46,52	3,20	2,19	31,46	2,64	1,73	34,45
	Alagoa	0,73	0,18	75,40	1,46	0,35	75,89	1,19	0,27	77,37
	Aiuruoca	4,34	3,88	10,57	6,77	5,63	16,91	5,43	4,50	17,05
	Carvalhos	0,95	0,57	40,17	1,29	0,99	23,27	1,04	0,77	25,64
	Fazenda Paraíba	2,00	2,67	33,37	3,00	4,02	34,01	2,41	3,20	33,05
	Fazenda Laranjeiras	15,51	18,00	16,06	18,65	22,52	20,75	15,07	18,37	21,91
	Itutinga	39,06	39,92	2,19	54,18	77,19	42,48	43,94	64,05	45,78
	Ponte Rio do Peixe	0,80	0,70	12,34	1,33	1,21	9,03	1,06	0,95	11,02

Tabela 17, conclusão

Região homogênea	Estação	Q _{7,10}			Q ₉₀			Q ₉₅		
		Q _{7,10 obs}	Q _{7,10 est}	ER (%)	Q _{90 obs}	Q _{90 est}	ER (%)	Q _{95 obs}	Q _{95 est}	ER (%)
III	Marcela	0,01	0,02	159,46	0,02	0,04	115,25	0,01	0,03	123,51
	Jaguara	0,06	0,15	133,88	0,14	0,29	106,47	0,10	0,22	115,52
IV	Ponte do Costa	1,91	4,24	121,5	2,66	6,23	133,97	2,12	5,05	137,83
	Fazenda Piedade	0,58	0,40	31,6	1,02	0,58	43,20	0,84	0,47	44,55
	Bom Jardim de Minas	4,06	2,82	30,6	6,54	4,13	36,82	5,09	3,35	34,28
	Santana do Garambéu	8,09	6,27	22,4	11,06	9,26	16,29	9,09	7,51	17,32
	Madre de Deus de Minas	11,95	10,76	9,9	18,62	15,95	14,38	15,01	12,69	13,66
	Fazenda da Cachoeira	0,40	0,40	0,3	0,53	0,58	9,61	0,44	0,47	4,90
	Mina de Níquel	0,11	0,18	61,5	0,18	0,26	48,63	0,13	0,21	64,88
	Andrelândia	1,62	1,57	3,4	2,19	2,29	4,22	1,79	1,85	3,21
	Lavinha	0,05	0,05	12,9	0,07	0,07	5,01	0,06	0,05	6,87

Apesar de os valores estimados de vazão de algumas estações fluviométricas apresentarem erro relativo maiores que 30%, os modelos recomendados foram adequados para representar as vazões em estudo, visto que os valores do coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe apresentaram-se satisfatórios. Resultados semelhantes a esta situação podem ser encontrados em estudos realizados por Almeida (2010) e Lemos (2006).

Na Tabela 18 estão apresentadas as comparações dos valores da $Q_{7,10}$ estimadas pelos modelos propostos no presente trabalho e por Pierangeli (2003), para regionalização na região do Alto Rio Grande a montante do reservatório de Camargos; por Oliveira (2008), para a macrorregião do Alto Rio Grande e pelo Zoneamento Ecológico-Econômico de Minas Gerais (MINAS GERAIS, 2008), para toda a porção da bacia do Rio Grande inserida no estado de Minas Gerais.

Comparando-se os resultados deste trabalho aos de Pierangeli (2003), observa-se que 9 das 18 estações apresentaram estimativas de $Q_{7,10}$ com menores erros relativos. Confrontando-se com os resultados obtidos dos modelos recomendados por Oliveira (2008), o presente trabalho apresentou 24 estações, de um total de 40, com melhores ajustes das estimativas da $Q_{7,10}$. Já quando comparados aos resultados do Zoneamento Ecológico-Econômico de Minas Gerais, essa situação foi observada em 23 das 40 estações fluviométricas analisadas.

Com relação aos resultados da $Q_{7,10}$ obtidos nas bacias hidrográficas de microescala (Marcela, Jaguará e Lavrinha), os erros relativos evidenciaram que, no presente trabalho, obtiveram-se os modelos mais eficientes para o cálculo da $Q_{7,10}$ em bacias hidrográficas de maior magnitude. As estimativas da $Q_{7,10}$ nas estações Marcela, Jaguará e Lavrinha apresentaram erros relativos da ordem de 159,46%, 136,88% e 12,86%, respectivamente.

Tabela 18 Comparação entre os valores estimados da $Q_{7,10}$ pelos modelos recomendados pelo presente trabalho (MINAS GERAIS, 2009; OLIVEIRA, 2008; PIERANGELI, 2003)

UPGRH	Estação	$Q_{7,10}$ obs	$Q_{7,10}$ est	ER (%)	Pierangeli (2003)	Oliveira (2008)	Minas Gerais (2008)			
					$Q_{7,10}$ est	ER (%)	$Q_{7,10}$ est	ER (%)	$Q_{7,10}$ est	ER (%)
GD1	Ponte do Costa	1,91	4,24	121,51	4,70	145,86	4,70	145,86	4,43	131,48
	Fazenda Piedade	0,58	0,40	31,65	0,39	33,34	0,39	33,34	0,45	22,51
	Bom Jardim de Minas	4,06	2,82	30,58	3,06	24,65	3,06	24,65	2,99	26,43
	Santana do Garambéu	8,09	6,27	22,42	7,11	12,02	7,11	12,02	6,47	20,02
	Madre de Deus de Minas	11,95	10,76	9,90	12,57	5,25	12,57	5,25	10,89	8,82
	Alagoa	2,55	1,36	46,52	2,09	17,93	1,30	49,03	1,37	46,50
	Alagoa	0,73	0,18	75,40	0,39	46,71	0,23	68,78	0,28	62,03
	Aiuruoca	4,34	3,88	10,57	4,98	14,91	3,19	26,45	3,10	28,44
	Carvalhos	0,95	0,57	40,17	1,01	6,61	0,61	35,45	0,68	27,77
	Fazenda da Cachoeira	0,40	0,40	0,32	0,39	2,16	0,39	2,16	0,45	13,71
	Mina de Níquel	0,11	0,18	61,47	0,17	50,92	0,17	50,92	0,21	87,99
	Fazenda Paraíba	2,00	2,67	33,37	3,66	82,54	2,32	15,58	2,32	15,54
	Andrelândia	1,82	1,57	14,21	1,64	9,84	1,64	9,84	1,69	7,22

Tabela 18, continua

UPGRH	Estação	Q _{7,10 obs}	Q _{7,10 est}	ER (%)	Pierangeli (2003)		Oliveira (2008)		Minas Gerais (2008)	
					Q _{7,10 est}	ER (%)	Q _{7,10 est}	ER (%)	Q _{7,10 est}	ER (%)
GD1	Fazenda Laranjeiras	15,51	18,00	16,06	17,82	14,86	11,92	23,16	10,37	33,13
	Itutinga	39,06	39,92	2,19	-	-	38,47	1,51	30,32	22,38
	Luminárias	5,01	3,33	33,49	-	-	6,00	19,97	5,54	10,63
	Itumirim	7,30	6,97	4,46	-	-	11,01	50,87	9,64	32,17
	Ponte do rio do Peixe	0,80	0,70	12,34	1,21	50,51	0,74	8,29	0,81	1,00
	Marcela	0,01	0,02	159,46	0,05	753,90	0,03	365,94	0,04	577,71
	Jaguara	0,06	0,15	133,88	0,33	425,17	0,19	205,76	0,23	277,67
	Lavrinha	0,05	0,05	12,86	0,04	24,52	0,04	24,52	0,06	6,44
GD2	Fazenda Loschi	0,99	1,16	17,37	-	-	0,26	73,88	0,31	68,55
	Campolide	2,10	2,96	41,08	-	-	3,34	58,83	3,23	53,94
	Fazenda da Conquista	0,97	1,18	21,62	-	-	0,31	68,65	0,36	62,80
	Usina Barbacena	4,34	1,61	62,79	-	-	1,08	75,03	1,15	73,39
	Barroso	5,99	4,87	18,68	-	-	6,15	2,71	5,66	5,47

Tabela 18, continua

UPGRH	Estação			Pierangeli (2003)		Oliveira (2008)		Minas Gerais (2008)		
		Q _{7,10} obs	Q _{7,10} est	ER (%)	Q _{7,10} est	ER (%)	Q _{7,10} est	ER (%)	Q _{7,10} est	ER (%)
GD2	Alfredo Vasconcelos	1,13	1,08	4,38	-	-	0,12	89,49	0,15	86,49
	Ibertioga	1,00	1,63	62,50	-	-	1,11	10,95	1,18	17,99
	Porto do Elvas	3,99	4,07	1,97	-	-	5,01	25,60	4,69	17,62
	Porto Tiradentes	13,59	13,98	2,88	-	-	16,48	21,23	13,95	2,65
	Usina São João del Rei	1,93	3,30	71,11	-	-	3,86	100,18	3,70	91,63
	Vila Rio das Mortes	1,00	1,93	93,95	-	-	1,64	64,52	1,69	69,33
	Ibituruna	40,12	42,02	4,73	-	-	37,04	7,68	29,28	27,01
	Bom Sucesso	0,41	0,93	126,91	-	-	2,12	414,61	2,13	418,34
	Ribeirão Vermelho	90,16	99,52	10,39	-	-	97,37	8,00	70,93	21,32
	Carmo da Cachoeira	0,37	0,57	53,93	-	-	1,42	281,27	1,48	297,31
	Usina Couro do Cervo	1,75	1,05	39,76	-	-	2,34	33,67	2,33	33,52
	Usina Nepomuceno	4,07	3,45	15,24	-	-	6,18	51,94	5,68	39,79

Tabela 18, conclusão

UPGRH	Estação	Q _{7,10} obs	Q _{7,10} est	ER (%)	Pierangeli (2003)		Oliveira (2008)		Minas Gerais (2008)	
					Q _{7,10} est	ER (%)	Q _{7,10} est	ER (%)	Q _{7,10} est	ER (%)
GD2	Ponte Fernão Dias	1,21	0,81	32,96	-	-	1,88	56,03	1,91	58,74
	Santana do Jacaré	3,49	6,01	72,39	-	-	9,75	179,56	8,63	147,44

Por outro lado, os demais modelos apresentaram valores de erro relativo variando de 24,52% a 753,90%, com exceção do modelo proposto pelo Zoneamento Ecológico-Econômico de Minas Gerais, o qual se apresentou mais adequado para estimar a $Q_{7,10}$ na estação Lavrinha, com erro relativo de 6,44%.

Os modelos de regionalização da Q_{90} e Q_{95} foram comparados aos modelos propostos por Oliveira (2008), os quais são apresentados na Tabela 19. Nota-se que os modelos de regionalização apresentados no presente trabalho também se mostraram mais eficientes, quando comparados aos de Oliveira (2008), em que 29 das 40 estações apresentaram menores valores de erros relativos na estimativa da Q_{90} . Já na estimativa da Q_{95} , 26 estações apresentaram melhores ajustes aos modelos propostos por este trabalho.

Analisando-se os resultados obtidos pelos modelos nas regiões de microescala, nota-se uma situação semelhante aos resultados obtidos pelos modelos da $Q_{7,10}$. Nas estações Marcela e Jaguará, a Q_{90} foi estimada com erros relativos de 111,59% e 102,06%, respectivamente, ao passo que as estimativas dos modelos de Oliveira (2008) apresentaram um erro relativo de 158,49% e 116,29%. Já as estimativas da Q_{95} apresentaram erros relativos de 122,79% e 113,95%, nas estações Marcela e Jaguará, respectivamente, enquanto as estimativas do modelo de Oliveira (2008) apresentaram erros relativos de 212,24% e 155,52%.

Tabela 19 Comparação entre os valores estimados da Q_{90} e Q_{95} pelos modelos recomendados pelo presente trabalho e Oliveira (2008)

UPGRH	Estação	Oliveira (2008)						Oliveira (2008)			
		$Q_{90\text{ obs}}$	$Q_{90\text{ est}}$	ER (%)	$Q_{90\text{ est}}$	ER (%)	$Q_{95\text{ obs}}$	$Q_{95\text{ est}}$	ER (%)	$Q_{95\text{ est}}$	ER (%)
UPGRH	Ponte do Costa	2,66	6,23	133,97	7,09	166,36	2,12	5,05	137,83	6,18	190,63
	Faz. Piedade	1,02	0,58	43,20	0,61	39,51	0,84	0,47	44,55	0,53	36,28
	Bom Jardim de Minas	6,54	4,13	36,82	4,65	28,89	5,09	3,35	34,28	4,05	20,54
	Santana do Garambéu	11,06	9,26	16,29	10,65	3,64	9,09	7,51	17,32	9,27	2,07
	Madre de Deus de Minas	18,62	15,95	14,38	18,64	0,07	15,01	12,96	13,66	16,23	8,09
GD1	Alagoa	3,20	2,14	33,22	2,01	37,17	2,64	1,71	35,19	1,75	33,79
	Alagoa	1,46	0,34	76,42	0,36	75,04	1,19	0,27	77,54	0,32	73,53
	Aiuruoca	6,77	5,47	19,20	4,85	28,45	5,43	4,44	18,14	4,22	22,31
	Carvalhos	1,29	0,97	25,10	0,96	25,84	1,04	0,77	26,35	0,83	19,96
	Faz. da Cachoeira	0,53	0,58	9,61	0,62	16,75	0,44	0,47	4,90	0,54	20,57
	Mina de Níquel	0,18	0,26	48,63	0,28	54,90	0,13	0,21	64,88	0,24	85,71

Tabela 19, continua

UPGRH	Estação	Oliveira (2008)						Oliveira (2008)			
		Q _{90 obs}	Q _{90 est}	ER (%)	Q _{90 est}	ER (%)	Q _{95 obs}	Q _{95 est}	ER (%)	Q _{95 est}	ER (%)
GD1	Faz. Paraíba	3,00	3,91	30,40	3,54	18,00	2,41	3,16	31,40	3,08	28,01
	Andrelândia	2,19	2,29	4,22	2,53	15,37	1,79	1,85	3,21	2,20	22,90
	Faz. Laranjeiras	18,65	21,83	17,06	17,69	5,16	15,07	18,08	19,99	15,40	2,20
	Itutinga	54,18	74,63	37,76	55,86	3,11	43,94	62,89	43,13	48,65	10,74
	Luminárias	6,48	5,59	13,66	9,02	39,33	5,10	4,26	16,46	7,85	53,90
	Itumirim	10,65	11,00	3,26	16,36	53,53	8,27	8,40	1,54	14,24	72,13
	Ponte Rio do Peixe	1,33	1,18	11,25	1,15	13,23	1,06	0,94	11,91	1,00	5,73
	Marcela	0,02	0,04	111,59	0,05	158,29	0,01	0,03	122,79	0,04	212,24
	Jaguara	0,14	0,28	102,06	0,30	116,49	0,10	0,22	113,95	0,26	155,92
	Lavinha	0,07	0,07	5,01	0,07	4,81	0,06	0,05	6,87	0,06	1,18
GD2	Fazenda Loschi	1,28	1,73	35,45	0,41	67,90	1,04	1,38	33,28	0,36	65,55
	Campolide	4,61	4,28	7,16	5,07	9,97	3,66	3,39	7,26	4,41	20,68
	Faz. da Conquista	1,36	1,77	29,81	0,48	64,46	1,05	1,41	34,50	0,42	59,81
	Usina Barbacena	6,47	2,38	63,20	1,68	74,06	5,22	1,89	63,76	1,46	72,00

Tabela 19, continua

UPGRH	Estação	Oliveira (2008)						Oliveira (2008)			
		Q _{90 obs}	Q _{90 est}	ER (%)	Q _{90 est}	ER (%)	Q _{95 obs}	Q _{95 est}	ER (%)	Q _{95 est}	ER (%)
	Barroso	7,66	6,90	9,90	9,23	20,60	6,12	5,48	10,43	8,04	31,44
	Alfredo Vasconcelos	1,32	1,62	22,58	0,19	85,49	1,11	1,30	16,75	0,17	84,95
	Ibertioga	1,26	2,41	90,57	1,73	36,68	1,01	1,91	88,99	1,50	48,55
	Porto do Elvas	6,11	5,80	5,07	7,55	23,55	4,93	4,60	6,54	6,58	33,50
	Porto Tiradentes	18,93	18,99	0,29	24,30	28,35	15,19	15,26	0,52	21,16	39,34
GD2	Usina S. J. Del Rei	3,00	4,74	58,16	5,85	94,92	2,23	3,76	68,31	5,09	127,82
	Vila R. das Mortes	1,47	2,83	93,33	2,52	72,13	1,11	2,25	102,51	2,20	97,86
	Ibituruna	54,87	54,58	0,53	53,82	1,91	44,47	44,63	0,37	46,88	5,42
	Bom Sucesso	1,55	1,75	12,76	3,24	109,50	1,15	1,33	15,08	2,82	144,64
	Ribeirão Vermelho	116,1	125,52	8,13	138,99	19,74	93,33	96,35	3,23	121,09	29,75
	Carmo da Cachoeira	0,69	1,11	61,69	2,19	217,17	0,57	0,85	49,20	1,90	235,12
	Usina C. do Cervo	2,53	1,95	22,98	3,57	41,21	2,07	1,48	28,34	3,11	50,27

Tabela 19, conclusão

UPGRH	Estação	Oliveira (2008)						Oliveira (2008)			
		Q _{90 obs}	Q _{90 est}	ER (%)	Q _{90 est}	ER (%)	Q _{95 obs}	Q _{95 est}	ER (%)	Q _{95 est}	ER (%)
	Usina Nepomuceno	5,72	5,77	0,88	9,28	62,18	4,56	4,40	3,39	8,08	77,29
GD2	Ponte Fernão Dias	1,98	1,53	22,66	2,89	46,01	1,51	1,16	22,89	2,51	66,58
	Santana do Jacaré	9,05	9,61	6,13	14,52	60,40	6,98	7,33	5,10	12,64	81,15

De maneira geral, os modelos de regionalização apresentados no presente estudo se mostraram mais eficientes do que os demais. Isso pode ser explicado devido à inserção de dados de vazão das bacias de microescala à regressão, o que, apesar de superestimar os valores observados, permite ao usuário uma aproximação razoável, possibilitando a utilização dos modelos de regionalização como uma ferramenta de auxílio na gestão de recursos hídricos em áreas de menor escala.

4.4.2 Regionalização da vazão média de longo termo (Q_{MLT})

Assim como na regionalização das vazões mínimas, a área de drenagem (A) apresentou-se como a variável mais adequada para a obtenção das vazões médias de longo termo (Q_{MLT}). As equações de regionalização recomendadas para a estimativa da vazão média de longo termo (Q_{MLT}) são apresentadas na Tabela 20.

Tabela 20 Modelos de regressão recomendados para a estimativa da vazão média de longo termo (Q_{MLT}), em $m^3 s^{-1}$, para as regiões hidrologicamente homogêneas das UPGRH GD1 e GD2

Região homogênea	Modelos de regressão	R ²
I	$Q_{MLT} = 0,0074 A^{1,1168}$	0,953
II	$Q_{MLT} = 0,0189 A + 2,7494$	0,987
III	$Q_{MLT} = 0,0286 A^{0,9741}$	0,945
IV	$Q_{MLT} = 0,0313 A^{0,9322}$	0,958

Unidades: A (km²).

O erro relativo médio do modelo das diferentes regiões homogêneas e o coeficiente de Nash e Sutcliffe (C_{NS}) são apresentados na Tabela 21. Assim como na regionalização das vazões mínimas de referência, os resultados permitem inferir que os modelos recomendados são eficientes para a estimativa

da vazão média de longo termo (Q_{MLT}), devido a baixos valores do erro relativo médio ($< 30\%$) e a elevados valores de coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe ($> 0,50$).

Tabela 21 Valores do erro relativo percentual médio (ER médio) e do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (C_{NS}) dos modelos de regressão recomendados para a estimativa da vazão média de longo termo (Q_{MLT})

Região homogênea	ER médio (%)	C_{NS}
I	23,45	0,96
II	22,94	0,99
III	38,27	0,99
IV	31,98	0,91

Os valores de Q_{MLT} observados e estimados pelos modelos de regressão recomendados para cada estação fluviométrica e seus respectivos erros estão representados na Tabela 22. Observa-se que, em geral, os modelos de regionalização da Q_{MLT} , juntamente com os modelos de regionalização da $Q_{7,10}$, apresentaram maior número de estações com valores de erro relativo menores do que 30% (28 estações). Já os modelos de regionalização das vazões Q_{90} e Q_{95} apresentaram 24 estações cada, com valores de erro relativo inferiores a 30%.

Tabela 22 Valores de vazão média de longo termo (Q_{MLT}) observados e estimados pelos modelos de regressão recomendados, em m^3/s , e seus respectivos erros relativos percentuais

Região homogênea	Código	Estação	$Q_{MLT\ obs}$	$Q_{MLT\ est}$	ER (%)
I	61075000	Luminárias	19,37	16,36	15,54
	61078000	Itumirim	33,49	32,04	4,34
	61140000	Bom Sucesso	5,84	5,15	11,93

Tabela 22, continua

Região homogênea	Código	Estação	Q _{MLT obs}	Q _{MLT est}	ER (%)
I	61150000	Ribeirão Vermelho	307,66	359,61	16,89
	61170000	Carmo da Cachoeira	1,58	3,30	108,40
	61173000	Usina Couro do Cervo	5,97	5,74	3,86
	61175000	Usina Nepomuceno	16,21	16,88	4,17
	61195000	Ponte Fernão Dias	7,12	4,52	36,62
	61202000	Santana do Jacaré	30,89	28,01	9,34
II	61081000	Fazenda Loschi	3,25	3,57	9,77
	61085000	Campolide	13,56	13,17	2,93
	61087000	Fazenda da Conquista	4,67	3,72	20,47
	61088000	Usina Barbacena	16,96	6,16	63,71
	61090000	Barroso	20,87	21,86	4,77
	61093000	Alfredo Vasconcelos	2,75	3,13	14,0
	61100000	Ibertioga	3,44	6,25	81,53
	61105000	Porto do Elvas	16,12	18,35	13,82
	61107000	Porto Tiradentes	51,22	53,63	4,71
	61115000	Usina São João Del Rei	12,56	14,79	17,78
	61122000	Vila Rio das Mortes	5,63	7,89	40,27
	61135000	Ibituruna	118,33	116,51	1,53
III	61014000	Alagoa	7,43	5,38	27,63
	61016000	Alagoa	2,07	1,00	51,96
	61024000	Aiuruoca	18,35	12,81	30,18
	61031000	Carvalhos	3,50	2,59	25,99
	61045000	Fazenda Paraíba	7,91	9,40	18,89
	61052000	Andrelândia	2,34	6,75	188,16

Tabela 22, conclusão

Região homogênea	Código	Estação	Q _{MLT obs}	Q _{MLT est}	ER (%)
III	61060000	Fazenda Laranjeiras	47,56	45,88	3,53
	61065001	Itutinga	135,93	142,54	4,87
	61125000	Ponte do rio do Peixe	3,35	3,11	7,18
	MAR	Marcela	0,09	0,13	37,09
	JAG	Jaguara	0,67	0,84	25,49
IV	61004000	Ponte do Costa	7,16	15,44	115,64
	61006000	Fazenda Piedade	2,27	1,54	32,34
	61009000	Bom Jardim de Minas	14,79	10,37	29,89
	61011000	Santana do Garambéu	25,71	22,66	11,85
	61012000	Madre de Deus de Minas	48,23	38,41	20,36
	61041000	Fazenda da Cachoeira	1,12	1,54	37,74
	61043000	Mina de Níquel	0,88	0,72	17,75
	61052000	Andrelândia	5,39	5,84	8,37
	LAV	Lavrinha	0,16	0,19	13,90

5 CONCLUSÕES

- As UPGRH GD1 e GD2 apresentaram quatro áreas hidrologicamente homogêneas, as quais são compreendidas pelas regiões dos rios Ingaí/Capivari e parte do Grande, rio das Mortes, rio Aiuruoca e rio Grande.
- A utilização da metodologia proposta pela Eletrobrás (1985) se mostrou adequada, visto que as equações regionais para estimativa das vazões $Q_{7,10}$, Q_{90} , Q_{95} e Q_{MLT} das UPGRH Alto do Rio Grande (GD1) e Vertentes do rio Grande (GD2) apresentaram resultados satisfatórios, de acordo com as estatísticas de precisão.
- A área de drenagem (A) é a variável mais expressiva para se estimar as vazões estudadas. A utilização apenas da área de drenagem nas equações de regressão facilita a aplicação do modelo pelo usuário, o que otimiza o processo para a estimativa das vazões em estudo.
- A inserção de dados de vazão de bacias hidrográficas de microescala possibilitou, de maneira aceitável, a utilização das equações de regionalização recomendadas em tais áreas, apesar de estes modelos superestimarem as vazões observadas.
- Os elevados valores dos rendimentos específicos $RE_{7,10}$, RE_{90} e RE_{95} permitiram constatar que as regiões do Alto Rio Grande (UPGRH-GD1) e Vertentes do Rio Grande (UPGRH-GD2) apresentam boas condições de recarga dos aquíferos subterrâneos, refletindo em uma disponibilidade hídrica satisfatória no período de estiagem.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, M. M. **Regionalização de vazões médias de longo período e de volumes de reservatórios de regularização**. 2010. 209 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2010.

APAYDIN, H. et al. Evaluation of indices for characterizing the distribution and concentration of precipitation: a case for the region of Southeastern Anatolia Project, Turkey. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 328, n. 3/4, p. 726-732, Aug. 2006.

ARAÚJO, A. R. **Solos da bacia do Alto Rio Grande: base para estudos hidrológicos e aptidão agrícola**. 2006. 345 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

BAENA, L. G. N. et al. Regionalização de vazões com base em modelo digital de elevação para a bacia do Rio Paraíba do Sul. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 3, p. 612-624, set./dez. 2004.

BESKOW, S. et al. Performance of a distributed semi-conceptual hydrological model under tropical watershed conditions. **Catena**, Amsterdam, v. 86, n. 3, p. 160-171, Sept. 2011.

BRASIL. Lei nº 9433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Coleção de Leis do Brasil**, Brasília, v. 1, p. 18, 8 jan. 1997. Seção 1.

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS. **Metodologia para regionalização de vazões**. Rio de Janeiro, 1985. v. 1, 202 p.

CHAVES, H. M. L. et al. Regionalização de vazões mínimas em bacias através de interpolação em sistemas de informação geográfica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 7, n. 3, p. 43-51, 2002.

CHIANG, S.; TSAY, T.; NIX, S. J. Hydrologic regionalization of watersheds: I, methodology development. **Journal of Water Resources Planning and Management**, Dublin, v. 3, n. 1, p. 3-11, Jan./Feb. 2002.

CRUZ, J. C. **Disponibilidade hídrica para outorga: avaliação de aspectos técnicos e conceituais**. 2001. 198 p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

ELESBON, A. A. A. **Utilização de sistemas de informação geográfica na regionalização de vazões**. 2004. 129 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2004.

ENVIROMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. **ArcGIS 10.1: getting started with ArcGIS**. Disponível em: <<http://resources.arcgis.com/en/help/getting-started/>>. Acesso em: 10 set. 2013.

EUCLYDES, H. P. Hidrotec: uma ferramenta para planejamento e gestão de recursos hídricos. In: ENCONTRO DE PRESERVAÇÃO DE MANANCIAS DA ZONA DA MATA MINEIRA, 1., 2001, Viçosa, MG. **Anais...** Viçosa, MG: UFV, 2001. p. 78-80.

EUCLYDES, H. P. **RH 3.0 regionalização hidrológica**. Viçosa, MG: UFV/Ruralminas, 1999.

EUCLYDES, H. P. et al. Regionalização hidrológica na bacia do Alto São Francisco a montante da barragem de Três Marias, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 6, n. 2, p. 81-105, 2001.

FERREIRA, G. M. **Regionalização de vazões de referência $Q_{7,10}$ e Q_{90}** . 2010. 180 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2010.

GOTTSCHALK, L.; MOTOVILOV, Y. Macro-scale hydrological modelling: a scandinavian experience. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON: 'CAN SCIENCE AND SOCIETY SAVE THE WATER CRISIS IN THE 21ST CENTURY - REPORTS FROM THE WORLD', 21., 2000, Tokyo. **Proceedings...** Tokyo: Society of Hydrology and Water Resources, 2000. p. 38-45.

GUIMARÃES, R. C. **Probabilidade e estatística aplicada à hidrologia**. Évora: Universidade de Évora, 2011. 75 p.

HOSKING, J. R. M.; WALLIS, J. R. **Regional frequency analysis: an approach based on L-moments**. Cambridge: Cambridge University, 1997. 224 p.

JENSON, S. K.; DOMINGUE, J. O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Falls Church, v. 54, n. 11, p. 1593-1600, 1988.

JUNQUEIRA JÚNIOR, J. A. **Escoamento de nascentes associado à variabilidade espacial de atributos físicos e uso do solo de uma bacia hidrográfica de cabeceira do Rio Grande, MG**. 2006. 84 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

LEMOS, A. F. **Avaliação de metodologias de regionalização de vazões mínimas de referência para a bacia hidrográfica do rio São Francisco, a montante do reservatório de Três Marias**. 2006. 157 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2006.

MEHAIGUENE, M. et al. Low flows quantification and regionalization in North West Algeria. **Journal of Arid Environments**, London, v. 87, n. 1, p. 67-76, Dec. 2012.

MELLO, C. R. et al. Multivariate models for annual rainfall erosivity in Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 202/203, p. 88-102, 2013.

MELLO, C. R.; VIOLA, M. R.; BESKOW, S. Vazões máximas e mínimas para bacias hidrográficas da região Alto Rio Grande, MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 2, p. 494-502, mar./abr. 2010.

MENDES, L. A. **Análise dos critérios de outorga de direito de usos consuntivos dos recursos hídricos baseados em vazões mínimas e em vazões de permanência**. 2007. 187 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

MINAS GERAIS. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. **Zoneamento ecológico-econômico do Estado de Minas Gerais - ZEE-MG**. Belo Horizonte, 2008. Disponível em: <http://www.zee.mg.gov.br/pdf/componentes_geofisico_biotico/5recursos_hidricos.pdf>. Acesso em: 10 set. 2013.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. **Hidrologia estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007. 552 p.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models: a discussion of principles. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 10, p. 282-290, 1970.

NIADAS, I. A. Regional flow duration curve estimation in small ungauged catchments using instantaneous flow measurements and a censored data approach. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 314, n. 1/4, p. 48-66, Nov. 2005.

NOVAES, L. F. et al. Avaliação do desempenho de cinco metodologias de regionalização de vazões. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 12, n. 2, p. 51-61, 2007.

OLIVEIRA, F. A. **Procedimentos para aprimorar a regionalização de vazões**: estudo de caso da Bacia do Rio Grande. 2008. 187 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2008.

OLIVER, J. F. Monthly precipitation distribution: a comparative index. **The Professional Geographer**, London, v. 32, p. 300-309, 1980.

PIERANGELI, C. **Regionalização de vazões para a região do Alto Rio Grande à montante da represa da UHE-Camargos/CEMIG**. 2003. 59 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2003.

PYRCE, R. S. **Hydrological low flow indices and their uses**. Peterborough: Trent University, 2004. 37 p. Relatório.

RAO, A. R.; SRINIVAS, V. V. **Regionalization of watersheds**: an approach based on cluster analysis. College Station: Springer, 2008. 254 p.

RAO, A. R.; SRINIVAS, V. V. Regionalization of watersheds by hybrid-cluster analysis. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 318, n. 1/4, p. 37-56, Mar. 2006.

RIBEIRO, C. B. M.; MARQUES, F. A.; SILVA, D. D. Estimativa de regionalização de vazões mínimas de referência para a bacia do Rio Doce. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v. 13, n. 2, p. 103-117, 2005.

RODRIGUEZ, D. G. R. **Proposta conceitual para a regionalização de vazões**. 2008. 195 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2008.

SCOLFORO, J. R. S.; CARVALHO, L. M. T. **Mapeamento da flora nativa e dos reflorestamentos de Minas Gerais**. Lavras: UFLA, 2006. v. 1, 288 p.

SETTI, A. A. et al. **Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos**. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica-Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas, 2001. 207 p.

SILVA, D. D.; MARQUES, F. A.; LEMOS, A. F. Avaliação de metodologias de regionalização de vazões mínimas de referência para a bacia do Rio São Francisco. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v. 17, n. 5, p. 392-403, 2009.

SILVA, L. A. **Regime de escoamento e recarga subterrânea de nascentes na região do Alto Rio Grande, MG**. 2009. 134 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

SILVA JÚNIOR, O. B. et al. Extrapolação espacial na regionalização da vazão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 8, n. 1, p. 21-37, 2003.

SRINIVAS, V. V. et al. Regional flood frequency analysis by combining self-organizing feature map and fuzzy clustering. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 348, n. 1/2, p. 148-166, Jan. 2008.

TSAKIRIS, G.; NALBANTIS, I.; CAVADIAS, G. Regionalization of low flows based on canonical correlation analysis. **Advances in Water Resources**, Southampton, v. 34, n. 7, p. 865-872, 2011.

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