



**REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES PARA A  
REGIÃO DO ALTO RIO GRANDE À  
MONTANTE DA REPRESA DA UHE-  
CAMARGOS/CEMIG**

**CYNTIA PIERANGELI**

**2003**

57451

HEM 049037

CYNTIA PIERANGELI

**REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES PARA A REGIÃO DO ALTO RIO  
GRANDE À MONTANTE DA REPRESA DA UHE-CAMARGOS/CEMIG**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de  
Lavras, como parte das exigências do Programa de  
Pós-graduação em Engenharia Agrícola, área de  
concentração em Irrigação e Drenagem, para  
obtenção do título de "Mestre".

Orientador

Prof. Antônio Marciano da Silva

BIBLIOTECA CENTRAL

UFLA

N.º T551.48

PIE

122

N.º REGISTRO 57451

DATA 12/05/09

LAVRAS  
MINAS GERAIS - BRASIL  
2003

BIBLIOTECA CENTRAL - UFLA



57451

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos  
da Biblioteca Central da UFLA**

**Pierangeli, Cyntia**

Regionalização de vazão para a região do Alto Rio Grande à montante da represa da UHE-Camargos/CEMIG / Cyntia Pierangeli. -- Lavras: UFLA, 2003.  
59 p. : il.

Orientador: Antônio Marciano da Silva.

Dissertação (Mestrado) – UFLA.

Bibliografia.

1. Bacia hidrográfica. 2. Modelo matemático. 3. Probabilidade. 4. Vazão máxima. 5. Vazão mínima. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD-551.48

**CYNTIA PIERANGELI**

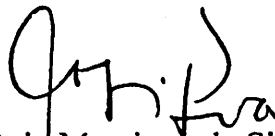
**REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES PARA A REGIÃO DO ALTO RIO  
GRANDE À MONTANTE DA REPRESA DA UHE-CAMARGOS/CEMIG**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Irrigação e Drenagem, para obtenção do título de "Mestre".

APROVADA em 18/12/2003

Prof. Dr. Jacinto de Assunção Carvalho      UFLA

Pesquisador Dr. Carlos Rogério de Mello      UFLA



Prof. Antônio Marciano da Silva  
UFLA  
(Orientador)

LAVRAS  
MINAS GERAIS - BRASIL

A Deus;

A minha querida vó Noemi;

Aos meus queridos pais

Dedico.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, razão da minha existência.

A minha mãe, pelo grande exemplo de vida.

Ao meu pai, pelo incentivo e apoio.

A Priscila e Thays, pela alegria.

A Vó Noemi, por sua presença constante em minha vida, e também a querida Vó Tina.

Ao Adriano, pelo amor e amizade.

Ao orientador, Prof. Marciano, pela amizade, confiança e orientações.

Ao Carlos Rogério, pelos ensinamentos e tão grande ajuda.

A todo corpo docente do curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola.

Aos funcionários da Hidráulica.

Ao Departamento de Engenharia e à Universidade Federal de Lavras, pela oportunidade de realização do trabalho.

A todos companheiros de trabalho, especialmente Ricardo, Gilberto, Carlinhos e Fábio, por sempre estarem prontos a me ajudar.

A todos os colegas de curso pela convivência e troca de conhecimentos.

Aos meus amigos e família sempre presentes, em especial as amigas Polyanna e Luciana pelo auxílio de todas as horas.

Ao CNPq/CTHidro- Brasil, pela concessão da bolsa de estudos.

Enfim, a todos aqueles que de alguma forma colaboraram para que este trabalho alcançasse seus objetivos.

## SUMÁRIO

RESUMO.....	i
ABSTRACT.....	ii
1 INTRODUÇÃO .....	1
2 REFERENCIAL TEÓRICO .....	4
2.1 Abordagem geral sobre vazões em curso d'água .....	4
2.2 Modelos probabilísticos aplicados às séries históricas de vazões .....	7
2.3 Regionalização de vazão .....	8
3 MATERIAL E MÉTODOS .....	12
3.1 Características morfométricas da área de estudo .....	12
3.2 Desenvolvimento do trabalho .....	15
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	23
4.1 Caracterização hidrológica geral das sub-bacias analisadas .....	23
4.2 Ajuste de modelos de probabilidade a dados de vazão mínima de 7 dias .....	24
4.3 Ajuste de modelos de probabilidade a dados de vazão máxima diária anual .....	29
4.4 Ajuste de modelos de probabilidade a dados de vazão mínima diária anual .....	35
4.5 Regionalização de vazões máximas diárias anuais .....	40
4.6 Regionalização de vazões mínimas médias anuais de 7 dias .....	45
4.7 Regionalização de vazões mínimas diárias anuais .....	49
5 CONCLUSÕES .....	56
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	57

## RESUMO

PIERANGELI, Cyntia. **Regionalização de vazões para a região do Alto Rio Grande à montante da represa da UHE-Camargos/CEMIG.** 2003. 59 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal de Lavras, MG. \*

Objetivou-se com este trabalho estudar modelos de probabilidade adequados aos dados de vazões máximas e mínimas diárias anuais e médias mínimas para 7 dias consecutivos e ajustar modelos matemáticos para regionalização destas variáveis hidrológicas com base nas características morfométricas das sub-bacias hidrográficas monitoradas e comparar os valores de vazão diária máxima e mínima das médias de 7 dias, ambas para tempo de retorno de 10 anos, calculados pelos modelos de probabilidades e pela metodologia de Souza (1998), para 7 sub-bacias hidrográficas da região do Alto Rio Grande, à montante da Represa da UHE de Camargos. Utilizou-se das séries históricas de vazão e de precipitação referentes ao período de 1969 a 1999 fornecidas pela ANA e CEMIG. Foram aplicados os modelos de probabilidades log-normal 2 e 3 parâmetros e Gumbel para dados de vazão máxima diária anual e log-normal 3 parâmetros, Weibull e Gumbel para vazões mínima diária anual e média mínima de 7 dias. Verificou-se a adequacidade dos modelos de probabilidades pelos testes de Qui-quadrado e Kolmogorov-Smirnov, sendo os valores obtidos pelo primeiro, a referência para seleção do melhor modelo. Os modelos de regionalização foram gerados por regressão múltipla linear, pelo método de mínimos quadrados e procedimento “backward” para seleção de variáveis significativas. A avaliação destes modelos foi feita pelo coeficiente de determinação, erros absolutos médios e significância dos parâmetros estimados. O modelo de probabilidades log-normal 3 parâmetros foi o que melhor se adequou aos dados de vazões mínima diária anual e média mínima de 7 dias e o modelo de Gumbel aos dados de vazão máxima anual. Os modelos de regionalização produziram bons ajustes estatísticos que permitem sua aplicação para estimativa das respectivas vazões na região de estudo. Os desvios ocorridos entre os valores de vazões calculados pelo modelo de probabilidades e pela metodologia de Souza (1998) foram menores para as vazões mínimas (21%) do que para as máximas (51%), estando ambos dentro dos limites aceitáveis na Hidrologia.

---

\* Comitê Orientador: Antônio Marciano da Silva – UFLA (Orientador), Carlos Rogério de Mello - UFLA (Co-Orientador).



## ABSTRACT

PIERANGELI, Cyntia. **Flow regionalization the upstream side of Camargos hydroelectric power plant reservoir in the Alto Rio Grande region.** 2003. 59p. Thesis (Master of Science in Agricultural Engineering/Irrigation and Drainage) – Federal University of Lavras, Lavras, MG.\*

This study aimed, firstly, to evaluate the most adequate probability distribution function applied to annual maximum and minimum daily flow and to mean seven days minimum flow in order to adjust regional mathematical models for those hydrologic variables for seven watersheds located at the upstream side of Camargos hydroelectric power plant reservoir in the Alto Rio Grande region. In addition to this, maximum daily flow and mean seven days minimum flow associated to a 10 years recurrence interval were estimated by both the best fit probability function and by the methodology proposed by Souza (1998). Flow historical series, from 1969 to 1999, were obtained through ANA and CEMIG (both governmental companies). Log-normal, 2 and 3 parameters, and Gumbel probability distributions were applied to annual maximum daily flow, while 3 parameters log-normal, Weibull and Gumbel (asymptotic minimum value) were tested to both, annual minimum daily flow and mean seven days minimum flow. The moment technique was used to adjust the distributions to the data. The adequacy of the different distribution probability functions was evaluated by Chi-square and by Kolmogorov-Smirnov tests. The smallest Chi-square value was used to identify the chosen probability distribution function. Regional parameters for the mathematical distribution were adjusted through the least square methodology and variables were selected by a “backward” procedure with at a 5% probability level. Model quality was evaluated upon to the coefficient of determination, absolute mean error and significance of estimated parameters. Annual daily minimum flow and mean seven days minimum flow were better represented by the 3 parameters log-normal distribution and annual daily maximum flow by Gumbel probability function. Regional frequency analysis results in good fit to the data allowing its application to the estimative of these flows in the region under study. The comparison between annual maximum daily flow and mean seven days minimum flow, generated by the two methodologies, showed differences, within acceptable limits of hydrologic sciences, that were smaller for mean minimum flow (21%) than for maximum flow (51%).

---

\* Guidance Committee: Antônio Marciano da Silva – UFLA (Mayor Professor) and Carlos Rogério de Mello – UFLA.

## 1 INTRODUÇÃO

Em todo o mundo, o pensamento científico e as correntes políticas vêm elevando os recursos hídricos à condição de matéria de primeira importância. Atualmente, a maioria dos governos e grande número de agências internacionais destacam a água como prioridade dentro do conjunto dos recursos naturais estratégicos.

De uma forma geral, os esforços para interpretar a realidade física, de maneira a produzir resultados diretamente utilizáveis no planejamento dos recursos hídricos, no gerenciamento dos corpos d'água ou no projeto e operação de obras hidráulicas, enquadram-se em três estágios distintos, embora inter-relacionados (Souza, 1998). O primeiro estágio corresponde ao que convencionou chamar de investigação básica, durante a qual os fenômenos naturais são observados e medidos por meio de métodos organizados de aquisição de informações. Com essa finalidade são ativados programas permanentes de sensoriamento e monitoração capazes de registrar o comportamento das grandezas relevantes, de forma a garantir uma boa amostragem das variações espaciais e temporais. O segundo estágio corresponde à racionalização do conhecimento obtido com a investigação básica e compreende as ações de interpretação temática ou de ajustamento dos modelos e formulações teóricas capazes de explicar a natureza dos fenômenos que produziram os resultados observados. Finalmente, no terceiro estágio, as formulações conceituais e os modelos teóricos concebidos, para interpretar a realidade física, são utilizados na avaliação de situações específicas para as quais esteja sendo cogitado algum tipo de ação ou intervenção antrópica. Este é um processo de síntese no qual são extraídas as variáveis requeridas no dimensionamento de projetos e na operação

de sistemas hidráulicos, ou ainda, no qual são geradas as informações necessárias ao planejamento das utilizações da água e à gestão dos recursos hídricos.

Nos estudos para aproveitamento dos recursos hídricos das bacias hidrográficas, onde não existe série histórica de vazão ou, se existe, a extensão da série histórica observada é pequena, torna-se necessário aplicar técnicas, que permitem a transferência de informações de outros locais hidrologicamente semelhantes para a bacia hidrográfica, que se deseja estudar.

Em sentido amplo, entende-se por regionalização hidrológica qualquer processo de transferência de informações das estações plúvio e fluviométricas para outros locais, em geral, sem observações. Essas transferências podem abranger diretamente as séries de vazões e, ou, precipitações ou determinados parâmetros estatísticos relevantes, tais como: média, variância, máximos e mínimos ou ainda equações e parâmetros relacionados com estas estatísticas.

Em sentido mais restrito, a regionalização hidrológica significa apenas as duas últimas formas de transferência, isto é, equações e parâmetros relacionados com as estatísticas, sendo suficiente para obter resultados em qualquer ponto de toda uma região. A transferência de séries de vazões ou precipitações é denominada, simplesmente, "transferência de informações" e se restringe a locais particulares.

A COPASA MG (1998), como órgão demandador de águas no estado, buscando melhores níveis para o conhecimento hidrológico, vem implantando um amplo programa de sistematização do conhecimento técnico, relacionado com os recursos hídricos e suas interrelações com o meio ambiente. No entanto, com a publicação do Deflúvio Superficial no Estado de Minas Gerais, sua abrangência foi generalizada, com o objetivo de ordenar e racionalizar o conhecimento sobre os recursos hídricos em todo o estado (Souza, 1998).

Pelos aspectos mencionados, objetivou-se com este trabalho, primeiramente, estudar a aplicação de modelos de probabilidade às séries históricas de vazões máxima e mínima diária anual e mínima média anual de 7 dias, para 7 estações fluviométricas à montante do reservatório da Usina Hidrelétrica de Camargos – CEMIG (UHE – Camargos), comparar os valores de vazões máxima e mínima média de 7 dias, ambas para tempo de retorno de 10 anos, extraídos pela metodologia proposta por Souza (1998) e calculadas pelo modelo de probabilidades de melhor aderência, com o intuito de avaliar a aplicação da primeira metodologia na região de estudo, uma vez que esta é consideravelmente empregada no estado de Minas Gerais, e desenvolver modelos matemáticos para regionalização destas vazões, nesta região, considerando-se características morfométricas das sub-bacias de drenagem monitoradas.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Abordagem geral sobre vazões em curso d'água

De acordo com Tucci (2001) e Euclides (1992), tradicionalmente, a estimativa das vazões dos cursos d'água é tratada de forma específica para cada bacia. Entretanto, com a aplicação de métodos estatísticos, pode-se aproveitar registros regionais que permitem a estimativa confiável da vazão de projetos, usando dados de outra bacia.

Segundo Tucci (2001), a escassez de dados tem dois parâmetros básicos, a disponibilidade temporal e espacial da informação. Devido aos altos custos de implantação, operação e manutenção de uma rede hidrométrica, torna-se importante a otimização das informações disponíveis.

A regionalização consiste num conjunto de ferramentas, que exploram ao máximo as informações existentes, visando à estimativa das variáveis hidrológicas em locais sem dados ou informações insuficientes. Esta técnica pode ser utilizada para melhor explorar as amostras pontuais, verificar a consistência das séries hidrológicas e identificar a falta de postos de observação. Os postos selecionados devem ter pelo menos cinco anos de dados. A amostra não é necessariamente representativa para séries curtas na vizinhança de cinco anos, mas o conjunto dos postos pode ser representativo do comportamento das vazões em estudo para a região (Tucci, 2001; Chaves et al., 2002; Tucci, 1998).

Segundo Chow et al. (1988) e Euclides (1992), para o dimensionamento de obras hidráulicas, é necessário o conhecimento da distribuição das vazões máximas e mínimas, as quais permitem estimar:

a) vazão máxima - caracterizada pela frequência, refere-se aos valores extremos que podem produzir enchentes nas margens. Esta é utilizada em estudos

básicos para projetos de obras hidráulicas, tais como, vertedores, canais, diques de proteção contra inundações, retificação e dragagem de cursos d'água, sistemas de drenagem, bueiros, galerias pluviais, pontes, etc;

b) vazão mínima - caracterizada pela sua duração e frequência, é utilizada para estudar a capacidade natural dos cursos d'água, regularização artificial, qualidade de água, etc.

A vazão mínima com sete dias de duração e dez anos de recorrência é utilizada, com frequência, como indicador da disponibilidade hídrica natural dos cursos d'água e as principais vantagens da aplicação desta variável hidrológica estão associadas ao fato de não sofrerem influências significativas de erros operacionais e intervenções humanas no curso d'água e de ser suficientemente mais minuciosa que a vazão mínima mensal (DAEE, 1988; ELETROBRAS/IPH - UFRGS, 1985).

Segundo Mattos (1983), a enchente, pelo seu caráter catastrófico, sempre despertou interesse dos pesquisadores de recursos hídricos, que desenvolveram estudos e técnicas para minimizar seus efeitos. No entanto a seca hidrológica é um campo com muitas indagações, ainda sem respostas, principalmente, pela não existência de uma definição quantitativa de seca que seja universalmente aceita. O mesmo autor considera o estudo das vazões de estiagem, em rios perenes, de suma importância, em virtude do aumento acelerado da demanda de recursos hídricos, do crescimento sócio-econômico e da ocorrência de secas prolongadas.

Conforme Euclides (1992), Konechy & Nachtnebel (1985) e Linsley & Franzini (1978), existe uma dificuldade considerável para se obter uma análise real entre os custos das obras e os prejuízos previsíveis, de modo a se obter a solução economicamente mais conveniente. As incertezas hidrológicas não são as únicas em projetos hidráulicos, pois demandas futuras, benefícios e custos são

desconhecidos até um certo grau, porém valores hidrológicos futuros mal estimados podem acarretar prejuízos na economia do projeto.

O período de retorno é definido, segundo Karamouz & Szidarovszky (2003), Righetto (1998) e Haan (1979), como o intervalo de tempo médio (em anos), dentro do qual poderá ocorrer um valor igual ou maior (para máximos) ou menor ou igual (para mínimos) ao de uma grandeza hidrológica qualquer, pelo menos uma vez. Um dos critérios para a escolha do período de retorno baseia-se no chamado risco permissível ou risco que se pode correr para o caso de ruptura ou falha da estrutura. A escolha e a justificativa do período de retorno, para implantação de uma determinada obra, prende-se a uma análise de economia e segurança da obra. Quanto maior o período de retorno, maiores serão os valores das vazões máximas esperadas e, conseqüentemente, mais cara e mais segura deverá ser a obra.

Para projetos de contenção de cheias, como barragens, onde acidentes ocasionam prejuízos incalculáveis, com elevado risco de vida humana, pode-se adotar período de retorno de 1.000 a 10.000 anos. Nestes casos, deve-se ter uma longa série de dados para permitir a extrapolação de valores de grande período de retorno, com a segurança necessária.

Quanto ao desenvolvimento de estudos e projetos relacionados às vazões mínimas, Silva & Novo (1988) mencionam que a vazão mínima de sete dias de duração, com período de retorno de 10 anos, é normalmente utilizada para estudos de qualidade da água em rios nos Estados Unidos como também no Brasil. Para certos tipos de aproveitamentos, a prática da engenharia já fixou critérios de projeto para o período de recorrência e a duração de sete dias com período de retorno de 10 anos.

## 2.2 Modelos de probabilidade aplicados às séries históricas de vazões

Segundo Euclides (1992), não se pode definir, a priori, a distribuição de probabilidades para descrever a frequência de vazões em hidrologia, mas selecionar uma família de curvas indicadas ao tipo de dados analisados e, em seguida, individualizar a lei de probabilidade que mais se adapta a interpretar cada série histórica disponível. Em estudos envolvendo vazão máxima na Itália, foi testada a distribuição log-normal a dois e três parâmetros, gama a dois parâmetros, Pearson tipo III e tipo I dos extremos, em 108 dados. A log-normal a dois parâmetros foi a mais aceitável. Também, na Itália, pesquisadores aplicaram as distribuições de Gumbel, log-normal a dois e três parâmetros, Fuller-Coutagne e Pearson a dois e três parâmetros. Os resultados demonstraram que a distribuição log-normal a dois parâmetros ajustou-se melhor aos dados, seguidos das de Gumbel, Pearson e Fuller-Coutagne.

Em estudos envolvendo vazões mínimas, Kaviski (1983) aplicou as distribuições de probabilidades log-normal a três parâmetros, log-Gumbel e Weibull em pequenas bacias hidrográficas do Estado de Santa Catarina. A distribuição selecionada como a mais adequada foi a de Weibull, sendo adotada em 36 estações. Em pesquisa, para o rio Missouri (EUA), comparando-se a distribuição normal, log-normal, gama, Weibull e normal quadrática, em 55 estações, concluiu-se que a distribuição gama ajustou-se melhor aos dados de todas as estações.

Euclides (1992), estudando a região da bacia do Rio Juatuba, utilizou as distribuições de Gumbel, log-normal a dois e três parâmetros e Fuller-Coutagne e concluiu que, para representar os eventos máximos, a distribuição log-normal a dois parâmetros apresentou resultados significativos e os resultados relativos à



determinação das vazões mínimas foram melhor representados pela distribuição log-normal a três parâmetros.

Observa-se que a aderência de um modelo de probabilidades a dados de vazão necessita de estudos mais aprofundados, uma vez que há discordância entre estudos desenvolvidos no Brasil e no exterior. Há tendência de o modelo log-normal, em suas duas versões, predominar para vazões mínimas, apesar do modelo Weibull ter sido o mais adequado, em estudos no estado de Santa Catarina.

### 2.3 Regionalização de vazões

No estudo de regionalização devem ser consideradas as características físicas e climáticas das bacias que mais explicam a distribuição da vazão e sejam mais facilmente mensuráveis, considerando ainda um comportamento hidrológico homogêneo. Segundo Tucci et al. (1983), são usadas como características físicas a área da bacia, o comprimento do curso d'água principal, a densidade de drenagem e a precipitação. Além dessas variáveis, pode-se incluir também o tempo de concentração e a altitude média da bacia.

De acordo com Villela & Mattos (1975), o índice de densidade de drenagem das bacias hidrográficas varia de 0,5 km/km<sup>2</sup>, para bacias com drenagem pobre e a 3,5 ou mais, para bacias excepcionalmente bem drenadas.

As variáveis independentes utilizadas na regressão apresentam pesos diferentes, de acordo com a região em estudo. A exemplo disso, Euclides (1992) cita os estudos de regionalização, envolvendo vazões máximas, efetuados na Itália, onde os parâmetros da distribuição log-normal a dois parâmetros apresentaram melhor correlação com a superfície e a altitude média das bacias.

Cita-se também o estudo de regionalização efetuado pela Eletrobrás (1985), envolvendo vazões máximas, média de longo período e mínima para a região do Alto Paraguai. As distribuições adotadas foram a de Gumbel e a de Weibull. As variáveis independentes utilizadas foram a área da bacia, a declividade média e o comprimento do curso d'água principal, a densidade de drenagem, a precipitação média anual e a precipitação média do semestre mais chuvoso. Os resultados mostraram que as variáveis que explicaram melhor a variação, tanto da vazão de cheia quanto da vazão média de longo período, foram a precipitação e a área da bacia. Para vazões mínimas, com duração de sete dias, as variáveis selecionadas foram a área, a precipitação e a densidade de drenagem.

De acordo com Souza (1998), o número de atributos fisiográficos que interferem no comportamento hidrológico de qualquer região, distinguindo uma das outras, seria muito elevado. No entanto, alguns deles são mais relevantes e explicam, sem outras considerações, a maior parte da variação de comportamento dentro de limites razoáveis. Em vista disso e, para simplificar a identificação das tipologias homogêneas em seus estudos, adotam-se três atributos na caracterização das diversas formas regionais.

O primeiro desses atributos selecionados descreve o regime pluvial preponderante em cada ponto do território, através do total anual normal de precipitação. O segundo atributo relevante, considerado na caracterização, descreve a declividade do relevo e, para completar a caracterização das tipologias homogêneas, é utilizado um terceiro atributo, capaz de descrever a capacidade de infiltração de água no solo.

Com relação aos estudos sobre a identificação de regiões homogêneas, Tucci et al. (1983) e Silva Júnior et al. (2003) comentam que o comportamento semelhante na distribuição da frequência e na correlação das vazões é o resultado da combinação de um grande número de fatores físicos e climáticos. As regiões

que apresentam este comportamento semelhante são definidas como regiões homogêneas.

Segundo ainda os mesmos autores, as curvas de frequência individuais nem sempre apresentam uma tendência única com pequena dispersão, como também a equação regional de regressão pode apresentar baixos valores de coeficientes de correlação.

Segundo Souza (1998), os fluxos difusos, que dão origem às vazões, concentradas nos cursos d'água, costumam ser denominados de contribuições unitárias ou rendimentos específicos e podem ser expressos por unidade de área. São também comuns as transformações que resultam da integração desses fluxos difusos ao longo de um período de tempo pré-determinado, com a sua expressão final na forma de altura da lâmina d'água, que seria acumulada sobre a superfície da área elementar, se esta fosse rigorosamente plana, impermeável e contida em todo o seu perímetro, por uma estrutura hipotética. A esse conceito costuma ser dada a denominação de deflúvio específico. A rigor, o deflúvio específico corresponde a um volume e só tem sentido físico e matemático, quando explicitamente referenciado ao período, ao longo do qual os fluxos foram integrados. Essa mesma observação é válida, também, para os deflúvios associados a uma seção qualquer de um curso d'água e que resultam da integração dos deflúvios específicos ao longo da respectiva bacia hidrográfica.

De acordo com Tucci (2001), ELETROBRÁS/IPH-UFRGS (1985) e Euclides (1992), modelos de regionalização de vazões normalmente são ajustados com base em regressões múltiplas não-lineares, em modelos do tipo potenciais (quando há mais de uma variável independente). No entanto, os resultados encontrados por alguns autores, entre eles Euclides et al. (2001) e Chaves et al. (2002), mostram a dificuldade em se obter bons modelos matemáticos com esta metodologia, geralmente modelos com coeficiente de determinação de pequena

magnitude. Para melhoria dos modelos é necessário maior quantidade de variáveis de entrada (fisiográficas e ou climáticas), tornando-os de aplicação mais difícil e menos prática. Assim, emerge a concepção de se ajustar modelos de regressão linear por meio de outras técnicas estatísticas que permitam a estruturação de modelos com menos variáveis físicas de entrada e maior precisão.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Características morfométricas da área de estudo

O Rio Grande nasce na vertente mineira da Serra da Mantiqueira no município de Bocaina de Minas e junta-se ao Rio Paranaíba, na divisa tríplice entre os Estados de Goiás, Minas Gerais e São Paulo, para formar o Rio Paraná. O Rio Grande é o rio, que possui o mais longo percurso dentro de Minas Gerais, com 1390 km de extensão, sendo parte deste percurso na divisa com o Estado de São Paulo. A Bacia do Rio Grande abrange 87 mil km<sup>2</sup> dentro de Minas Gerais, sendo a segunda maior bacia hidrográfica do estado.

A sub-bacia do Alto Rio Grande vai desde sua nascente a 1980 m de altitude, próximo ao Parque Nacional do Itatiaia, até à foz do Rio das Mortes a 800 m de altitude, no Município de Ijaci, abrangendo total ou parcialmente 64 municípios, que ocupam uma área de 15 mil km<sup>2</sup>.

O clima predominante na Bacia do Alto Rio Grande, pela classificação de Koppen, é Cwb e Cwa, com invernos frios e secos e verões quentes e úmidos, (Antunes et al., 1982). A temperatura média anual é 19°C, com pequena variação entre a média do mês mais quente (Janeiro, 21°C) e a do mês mais frio (Julho, 15°C).

A Bacia do Alto Rio Grande é caracterizada pelo relevo bastante movimentado. Inexistem grandes áreas contínuas de declividade menores que 5% e grande parte, aproximadamente 90% da área da bacia, tem declividades maiores que 15%. A maior parte, acima de 80% da Bacia do Alto Rio Grande, é constituída de planaltos de elevada altitude (aproximadamente 1000 m).

A vegetação dominante no Alto Rio Grande é o cerrado, bastante modificado por pastejo extensivo. Entre as sub-formas de cerrado, o cerrado

*sensu stricto* e o campo-cerrado são dominantes, com ausência de cerradão na bacia. Florestas, na sua maioria secundárias (capoeiras), encontram-se distribuídas ocasionalmente na paisagem (CETEC, 1983).

Os principais solos da Bacia do Alto Rio Grande são os Cambissolos, em aproximadamente 75% da área, Latossolo Vermelho-Amarelo, em 10%, e Latossolo Vermelho-Escuro, em 10% (CETEC, 1983).

O estudo foi desenvolvido na parte de montante da região do Alto Rio Grande, Minas Gerais, até a seção onde se encontra o maciço da represa de Camargos. Na Figura 1, apresenta-se a área de estudo, bem como as sub-bacias delimitadas utilizadas neste trabalho e a localização das respectivas estações fluviométricas.

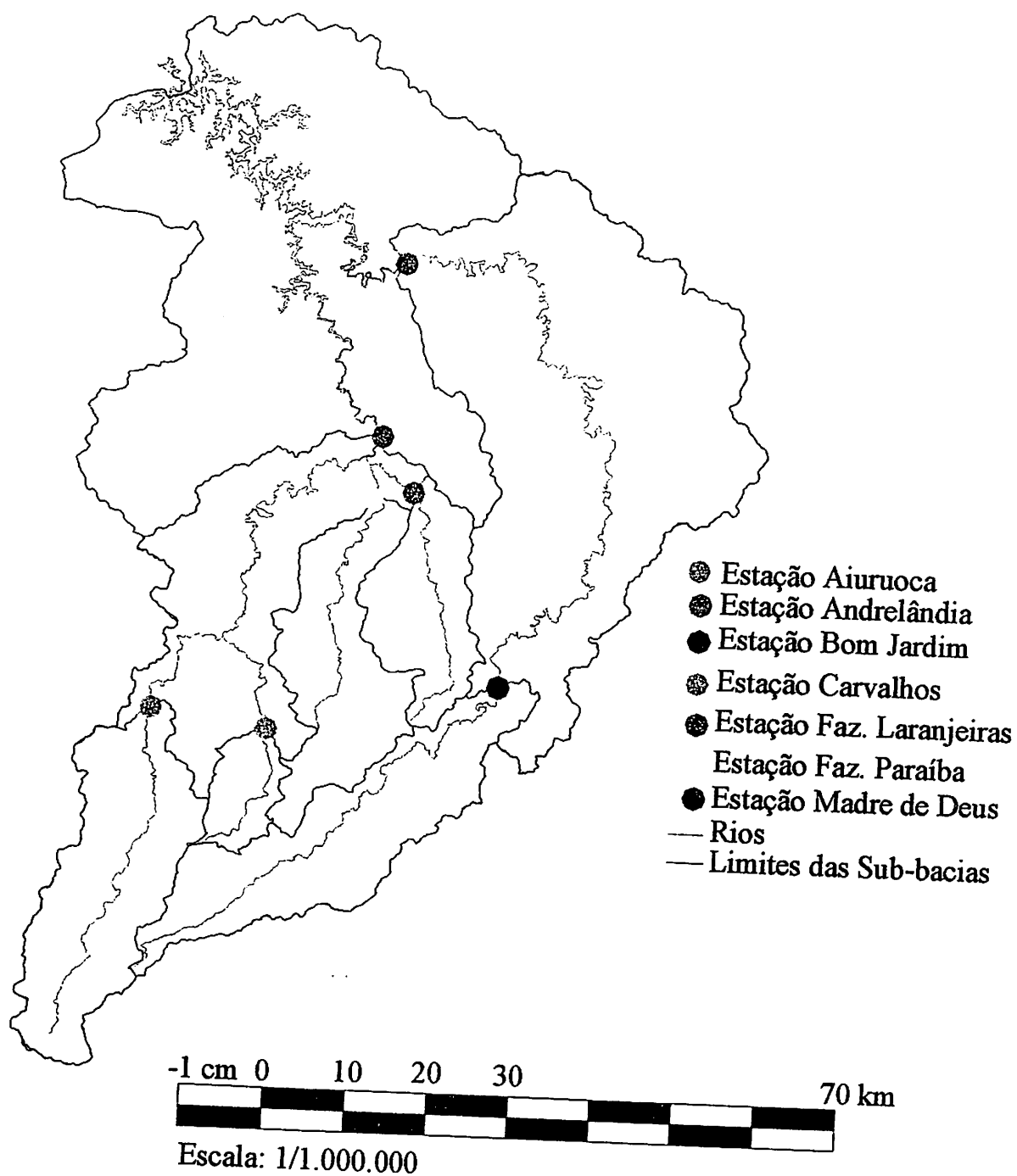


FIGURA 1. Mapa da região de estudo com as sub-bacias hidrográficas delimitadas e localização das estações pluviométricas e fluviométricas.

### 3.2 Desenvolvimento do trabalho

Este trabalho foi desenvolvido em quatro etapas. Na primeira etapa, foi feita a coleta dos dados hidrológicos e o cálculo das características morfométricas das sub-bacias, necessários ao estudo da regionalização. Os dados hidrológicos foram disponibilizados pela CEMIG e pela ANA (Agência Nacional de Águas). Foram utilizadas cartas topográficas, a partir das quais, foram extraídas as características morfométricas das sub-bacias hidrográficas: área, tempo de concentração, densidade de drenagem e comprimento do curso d'água principal. Para aquisição destes dados foram utilizadas as cartas digitalizadas do IBGE, com o auxílio do software MAPINFO.

Os cálculos do tempo de concentração e densidade de drenagem foram desenvolvidos por meio, respectivamente, da fórmula de Giandotti (equação 1) e equação 2.

$$T_c = \frac{4\sqrt{A + 1,5L}}{0,8\sqrt{H_m - H_o}} \quad (1)$$

em que:

$T_c$  = tempo de concentração, h;

$A$  = área da bacia,  $\text{km}^2$ ;

$L$  = comprimento do curso d'água principal, km;

$H_m$  = altitude média da bacia, m;

$H_o$  = altitude no final da área da bacia em estudo, m.

A densidade de drenagem é dada pela seguinte equação:

$$D_d = \frac{\sum L}{A} \quad (2)$$

em que:

$D_d$  = densidade de drenagem,  $\text{km}/\text{km}^2$ ;



$\Sigma L$  = comprimento total dos cursos d'água, km.

Na Tabela 1, apresentam-se as características morfométricas das sub-bacias do Alto Rio Grande, sendo área (A), comprimento do curso d'água principal (L), tempo de concentração (tc) e densidade de drenagem (Dd), com respectivas denominações.

TABELA 1. Características morfométricas das sub-bacias do Alto Rio Grande (à montante da represa da UHE-Camargos/CEMIG) utilizadas neste trabalho.

Estação	Curso d'água	A(km <sup>2</sup> )	L(km)	Tc (h)	Dd(km/km <sup>2</sup> )
Aiuruoca	Rio Aiuruoca	536	58,68	4,03	0,1095
Andrelândia	Rio Turvo Pequeno	274	41,95	8,98	0,1531
Bom Jardim	Rio Grande	509	92,43	5,24	0,1815
Carvalhos	Rib. do Francês	105	23,72	1,46	0,2259
Faz.Laranjeiras	Rio Aiuruoca	2083	156,4	9,53	0,0750
Faz. Paraíba	Rio Turvo Grande	381	46,63	6,89	0,1224
Madre de Deus	Rio Grande	2226	260,65	18,74	0,1171

Na segunda etapa, como primeiro critério para seleção dos postos, foram adotados aqueles onde se encontram à montante da Represa de Camargos, constituindo-se séries históricas de trinta anos para as estações pluviométricas e fluviométricas. Um segundo critério foi uma análise de homogeneidade hidrológica da região, realizada com base nas vazões adimensionalizadas de acordo com Tucci (2001), complementada pela análise dos coeficientes de escoamento superficial médio para cada sub-bacia.

A análise de homogeneidade hidrológica regional teve como base a adimensionalização das vazões máxima diária anual e mínima média anual de 7 dias, para tempos de retorno entre 2 e 100 anos, tendo-se como referência as respectivas médias aritméticas das séries históricas de cada estação fluviométrica.

As vazões associadas aos tempos de retorno foram estimadas com base nas distribuições de probabilidade que melhor se ajustaram a cada situação (máximo ou mínimo). Para os cálculos das vazões adimensionalizadas, utilizaram-se as seguintes equações:

$$Q_{(\max, TR) \text{ a dim ens.}} = \frac{Q_{\max., TR}}{Q_{\text{méd., máx}}} \quad (3)$$

$$Q_{(\min, TR) \text{ a dim ens.}} = \frac{Q_{\min., TR}}{Q_{\text{méd., min}}} \quad (4)$$

Utilizou-se também dos valores médios das diferentes estações para cada tempo de retorno, para representar a curva regional adimensionalizada.

Para regionalização da vazão máxima, foram utilizados os valores máximos diários, observados em cada ano das séries históricas de cada estação fluviométrica e, para regionalização da vazão mínima, foram utilizados os valores mínimos diários anuais e os valores mínimos das médias das vazões diárias em sete dias consecutivos, obtidos por média móvel. Para cada estação fluviométrica há a respectiva estação pluviométrica, da qual foram constituídas séries históricas de precipitação máxima diária anual e precipitação total anual. Segundo Haan (1979), para as primeiras, deve-se ajustar o modelo de Gumbel e, para a segunda, o modelo Normal, os quais foram aplicados nos modelos de regionalização.

Na Tabela 2, encontram-se as estações pluviométricas e fluviométricas selecionadas, bem como o curso d'água e o período de constituição das séries históricas.

TABELA 2. Estações Pluviométricas e Fluviométricas à montante da represa da UHE Camargos/CEMIG, utilizadas no trabalho.

Estação	Rio	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Período da série
Bom Jardim	Grande	21° 56'52''	44° 11'47''	1175	69 a 99
Madre de Deus	Grande	21° 29'32''	44° 19'37''	875	69 a 99
Aiuruoca	Aiuruoca	21° 58'48''	44° 36'05''	966	69 a 99
Carvalhos	Rib. do Francês	21° 59'52''	44° 27'48''	1087	69 a 99
Andrelândia	Turvo Pequeno	21° 44'17''	44° 18'19''	897	69 a 99
Fazenda Paraíba	Turvo Grande	21° 44'42''	44° 21'15''	940	69 a 99
Fazenda Laranjeiras	Aiuruoca	21° 40'33''	44° 20'34''	905	69 a 99

A terceira etapa correspondeu na seleção e aplicação das distribuições de probabilidades a cada série histórica. Foram selecionadas as distribuições de Gumbel, log-normal a dois parâmetros, log-normal a três parâmetros para representar eventos máximos, enquanto Gumbel, Weibull e log-normal a três parâmetros para eventos mínimos. A Função Densidade de Probabilidade (FDP) e a Função Cumulativa de Probabilidades (FCP) dos modelos trabalhados são apresentadas a seguir, de acordo com Lanna (2001).

- Distribuição log-normal a dois parâmetros

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

sendo  $\mu_n$  e  $\sigma_n$  seus parâmetros. A FCP deste modelo constitui-se de uma integral da equação (3), para a qual não há solução analítica. Devido a isso, trabalha-se com a Distribuição Normal padronizada (DN (0,1)), havendo para a mesma solução numérica por aproximação em série e valores tabelados em função da variável padrão Z.

- Distribuição log-normal a três parâmetros

$$FDP : f(x) = \frac{1}{(x - \beta) \cdot \sigma_n \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-0,5 \cdot \left( \frac{\text{Ln}(x - \beta) - \mu_n}{\sigma_n} \right)^2} \quad (6)$$

com  $x \geq \beta$

sendo  $\mu_n$ ,  $\sigma_n$  e  $\beta$  seus parâmetros. A sua FCP é obtida de forma idêntica à versão 2 parâmetros.

- Distribuição de Assintótica de Valores Mínimos (Gumbel para valores mínimos)

Esta distribuição para valores máximos apresenta a seguinte FCP:

$$FCP = P(Y \leq y) = e^{-e^{-\alpha(y - \mu)}} \quad (7)$$

que tem como função densidade de probabilidade :

$$FDP = \alpha \cdot e^{-\alpha(y - \mu)} \cdot e^{-e^{-\alpha(y - \mu)}} \quad (8)$$

Para análise dos eventos mínimos, a função cumulativa de probabilidades é modificada para a forma da Equação (7).

$$FCP = P(Y \geq y) = e^{-e^{\alpha(y - \mu)}} \quad (9)$$

que tem como função densidade de probabilidade,

$$FDP = \alpha \cdot e^{-\left\{ \alpha \cdot (y - \mu) - e^{\alpha(y - \mu)} \right\}} \quad (10)$$

#### - Distribuição de Weibull

$$FCP: P(Y \leq y) = e^{-\left[ (\phi - y) / (\phi - \mu) \right]^\lambda} \quad (11)$$

$$FDP: P(y) = \left[ \lambda / (\phi - \mu) \right] \left[ (\phi - y) / (\phi - \mu) \right]^{\lambda - 1} \quad (12)$$

Sendo  $\phi$ ,  $\mu$  e  $\chi$  seus parâmetros.

Os parâmetros dos modelos de probabilidade foram ajustados com base no método dos momentos, conforme descrito em Lanna (2001) e Haan (1979).

A aplicação das distribuições de probabilidades foi efetuada a partir da análise dos dados das estações fluviométricas e pluviométricas selecionadas determinando-se assim, os valores das vazões máximas, mínimas e precipitações máximas, referentes aos períodos de retorno de 5, 20, 50 e 100 anos.

A seleção das distribuições de probabilidade que melhor se ajustou aos dados de cada série histórica disponível foi realizada pelos testes de Kolmogorov-Smirnov e Qui-quadrado, os quais apresentam as seguintes concepções:

#### - Teste de Kolmogorov-Smirnov

É feita uma comparação direta entre os valores de freqüências observadas e teóricas (estimados pelos modelos de probabilidades), calculando-se a diferença entre elas, em módulo. Adota-se a maior diferença ( $\Delta F_{calc} = |F_{obs} - F_{teórica}|$ ) como referência e por meio de tabela específica do teste, seleciona-se o  $\Delta F_{tabela}$  com base no tamanho da amostra e nível de significância. O modelo de probabilidades é adequado, se  $\Delta F_{calc}$  for menor que  $\Delta F_{tabela}$ .

- Teste de Qui –quadrado

Este teste é mais rigoroso que o anterior, por agrupar os dados da série histórica em classes de frequência e acumular os erros entre as frequências observada e teórica, com participação de todas as classes. A soma destes erros (obtida pela soma dos erros de todas as classes) gera o valor de  $\lambda^2_{\text{calculado}}$ . Por meio de tabela específica de  $\lambda^2$ , adota-se o valor tabelado com base nos graus de liberdade ( $n^\circ$  de classes -1) e nível de significância. Para que o modelo de probabilidades tenha aderência aos dados, o valor de  $\lambda^2_{\text{calculado}}$  deve ser menor que o de tabela. Assim, tem-se:

$$\chi^2_{\text{calculado}} = \sum_{i=1}^n \frac{(f_{\text{obsi}} - f_{\text{teóricoi}})^2}{f_{\text{teóricoi}}} \quad (13)$$

em que  $n$  é o número de classes,  $f_{\text{obsi}}$  e  $f_{\text{teóricoi}}$  são, respectivamente, as frequências observada e teórica na classe  $i$ . As classes com menos de 3 valores foram agrupadas com as classes vizinhas, seguindo os critérios de aplicação do teste (Catalunha et al., 2002).

Visando a apresentar uma primeira sinalização de avaliação dos valores apresentados por Souza (1998) para  $Q_{7,10}$ , confrontaram os mesmos com aqueles obtidos diretamente das séries históricas.

A quarta etapa compreendeu a modelagem, por meio de regressões, para as vazões máximas e mínimas diárias anuais e mínimas média anual de 7 dias (para os devidos períodos de retorno estudados), tendo-se como variáveis independentes as áreas das sub-bacias, a precipitação total anual (modelos para vazões mínimas), precipitação máxima diária anual (modelo para vazão máxima), densidade de drenagem e comprimento do curso d'água principal. Os modelos foram ajustados pelo método de mínimos quadrados, com base no procedimento "backward"; o qual seleciona as variáveis significativamente diferentes de zero

(0) pelo teste t, a um determinado nível de significância (5%), através do programa SAS for Windows (SAS, 1985).

Os melhores modelos foram selecionados observando-se os maiores valores do coeficiente de determinação, menores valores do erro médio, significância dos parâmetros estimados pelo teste t, dispersão dos valores em torno da reta 1:1 e menor número de variáveis independentes. O erro médio absoluto foi calculado por:

$$e = \frac{\sum_{i=1}^n |V_{\text{obsi}} - V_{\text{predi}}|}{V_{\text{obsi}}/n} \quad (14)$$

Em que  $V_{\text{obsi}}$  é o  $i$ ésimo valor observado (real),  $V_{\text{predi}}$  é o  $i$ ésimo valor predito pelo modelo e  $n$  o número de dados.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Caracterização hidrológica geral das sub-bacias analisadas

Na Tabela 3, apresentam-se as características hidrológicas gerais das sub-bacias hidrográficas avaliadas à montante da represa da UHE de Camargos, na região Alto Rio Grande. O coeficiente C reflete o potencial de produção de água das sub-bacias, uma vez que é obtido pela relação entre o deflúvio superficial médio anual e a precipitação total anual. Observa-se que as sub-bacias de Aiuruoca, Bom Jardim e Carvalhos produziram os maiores valores de escoamento superficial, acima de 60% do total precipitado. Isto significa que estas sub-bacias, especialmente a de Aiuruoca, têm maior potencial de produção de água. Este comportamento está associado à capacidade de transformação da precipitação em escoamento superficial, algo extremamente influenciável pelo relevo, vegetação e manejo do solo nas sub-bacias. Assim, pode-se afirmar que, ao longo de 30 anos, houve maiores condições para infiltração de água no solo nestas sub-bacias e conseqüentemente, maior potencial para recarga do lençol freático e posteriormente, produção de escoamento base ou subterrâneo, o qual influencia no valor da vazão média. Deve-se ressaltar que estes valores são médios de uma série histórica (1969-1999), não se podendo inferir, com maior propriedade e segurança, sobre as condições atuais de manejo nestas microbacias.



TABELA 3. Características hidrológicas médias das sub-bacias estudadas à montante da represa da UHE de Camargos.

Sub-bacias	$Q_{med. máx}$	$Q_{med. min.}$	$Q_{med. annual}$	$Q_{med. 7 dias}$	$C^*$
	-----m <sup>3</sup> /s-----				
Aiuruoca	108,95	7,49	19,98	7,79	0,69
Andrelândia	29,54	2,71	5,66	2,80	0,44
Bom Jardim	59,78	6,17	15,46	6,41	0,66
Carvalhos	19,48	1,39	3,51	1,46	0,64
F. Laranjeiras	227,00	22,09	54,05	22,90	0,56
F. Paraíba	28,38	3,02	7,90	3,26	0,41
Madre de Deus	201,10	18,19	49,80	19,12	0,48

$Q_{med. máx}$  = vazão média máxima anual;  $Q_{med. min.}$  = vazão média mínima anual;

$Q_{med. annual}$  = vazão média anual;  $Q_{med. 7 dias}$  = vazão média mínima de 7 dias;

$C^*$ =coeficiente C, adimensional.

#### 4.2 Ajuste de modelos de probabilidade a dados de vazão mínima de 7 dias

Na Tabela 4, apresentam-se os resultados dos testes de Qui-quadrado e Kolmogorov para os modelos de probabilidades ajustados aos dados de vazão mínima média de 7 dias. Pode-se observar que o modelo de Weibull não foi aderente a duas estações fluviométricas, de Bom Jardim e Fazenda Paraíba, pelo teste de Qui-quadrado. Os modelos log-normal 3 parâmetros e Gumbel (Assintótica de Valores Mínimos) foram adequados a todas as estações, por ambos os testes. Tomando-se como base o critério de seleção adotado por Catalunha et al. (2002), os quais trabalharam com dados de precipitação, pode-se afirmar que, com base na quantidade de estações, para as quais os modelos foram adequados, o modelo de Weibull foi o que apresentou o pior desempenho,

inclusive com os maiores valores de Qui-quadrado, mostrando maior dificuldade de ajuste a dados de vazão mínima média de 7 dias, oriundos de sub-bacias da região à montante da represa da UHE Camargos. Concomitantemente, por meio de observação direta das Figuras 2 e 3, verificam-se ajustes de qualidade inferior para o modelo Weibull quando comparados aos modelos log-normal 3 parâmetros e Gumbel.

Os modelos log-normal 3 parâmetros e Gumbel apresentaram ajustes de boa qualidade, podendo serem aplicados a dados de vazão mínima média de 7 dias na região. Ambos os modelos foram aprovados nos testes estatísticos trabalhados e uma observação direta das Figuras 2 e 3 mostrará alguma semelhança de comportamento, sendo difícil explicitar qual o melhor modelo. No entanto, analisando-se os valores de Qui-quadrado calculados (Tabela 4), verifica-se que o modelo log-normal gerou os menores valores para 6 estações fluviométricas, empatando em uma (estação de Carvalhos) com o modelo Gumbel. Como o Qui-quadrado reflete um erro estatístico, pois é baseado no quadrado da diferença entre as frequências observadas e estimadas e leva em consideração toda a diferença existente entre frequência observada e esperada, é plausível admitir o modelo log-normal 3 parâmetros como o mais adequado para explicar o comportamento dos dados de vazão mínima média de 7 dias na região de estudo. Será com base neste modelo de probabilidades que os modelos de regionalização para vazão mínima média de 7 dias serão ajustados.

TABELA 4. Testes de Qui-quadrado e Kolmogorov aplicados aos modelos de probabilidade ajustados a dados de vazão mínima média de 7 dias para estações fluviométricas à montante da represa da UHE Camargos.

Estação	Modelo	$\chi^2$ calc.	$\chi^2$ tab.	Adeq.	$ \Delta F _{\text{máx}}$	$ \Delta F _{\text{tab.}}$	Adeq.
Aiuruoca	L-N 3	2,80	5,59	A	0,115	0,242	A
	Weibull	3,68	5,59	A	0,200	0,242	A
	Gumbel	3,10	5,59	A	0,151	0,242	A
Andrelândia	L-N 3	1,16	5,59	A	0,125	0,242	A
	Weibull	5,02	5,59	A	0,129	0,242	A
	Gumbel	3,01	5,59	A	0,097	0,242	A
B. Jardim	L-N 3	2,32	5,59	A	0,095	0,242	A
	Weibull	6,07	5,59	NA	0,190	0,242	A
	Gumbel	3,31	5,59	A	0,112	0,242	A
Carvalhos	L-N 3	0,42	3,83	A	0,070	0,242	A
	Weibull	0,037	3,83	A	0,112	0,242	A
	Gumbel	0,42	3,83	A	0,070	0,242	A
F. Laranjeiras	L-N 3	0,36	5,59	A	0,117	0,242	A
	Weibull	3,27	5,59	A	0,146	0,242	A
	Gumbel	0,88	5,59	A	0,097	0,242	A
F. Paraíba	L-N 3	1,13	5,59	A	0,140	0,242	A
	Weibull	6,21	5,59	NA	0,163	0,242	A
	Gumbel	3,87	5,59	A	0,150	0,242	A
F. Madre Deus	L-N 3	0,235	5,59	A	0,128	0,242	A
	Weibull	3,95	5,59	A	0,142	0,242	A
	Gumbel	1,58	5,59	A	0,104	0,242	A

L-N 3 = log normal a 3 parâmetros; A = adequado; NA = não adequado

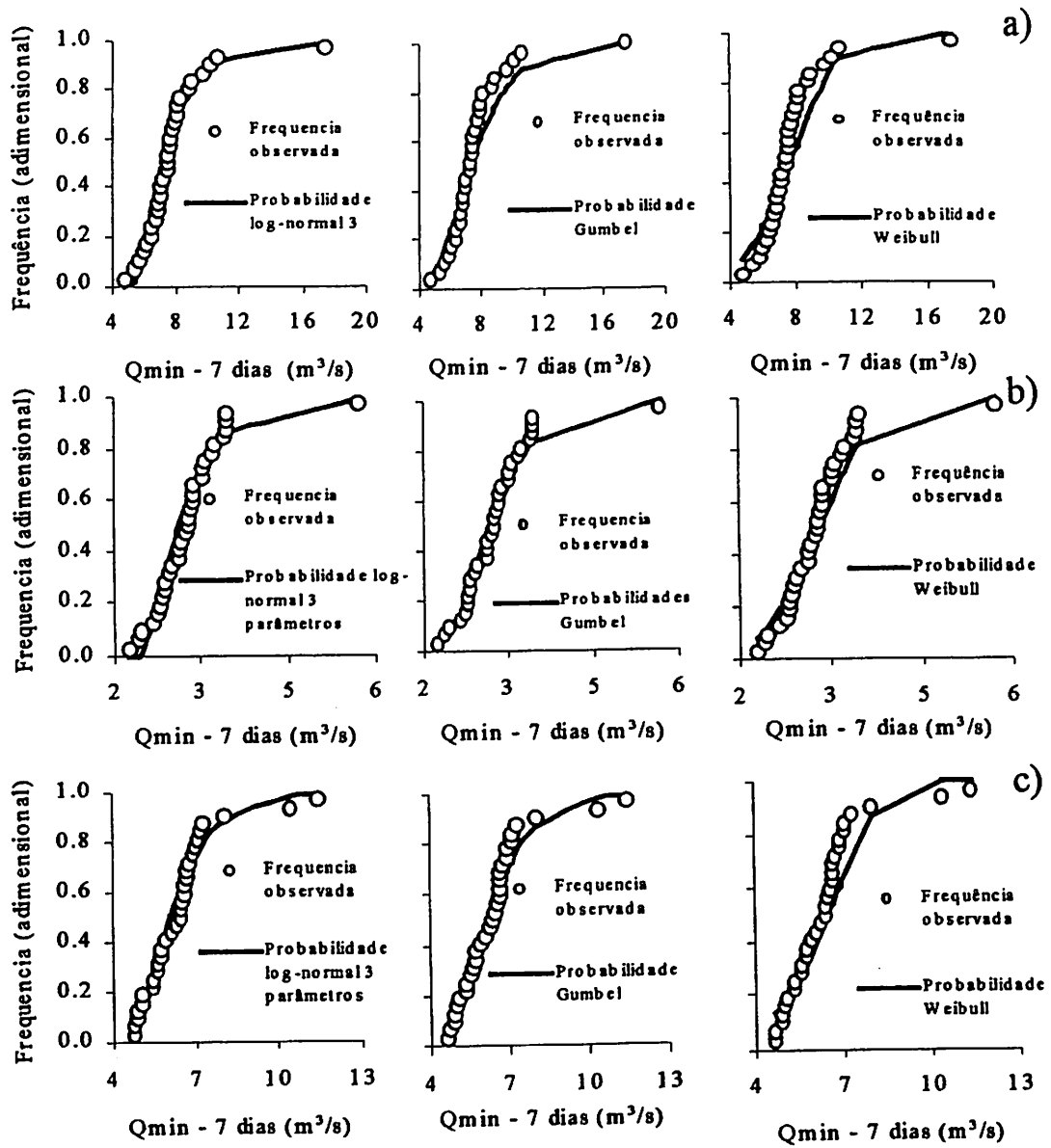


FIGURA 2. Gráficos dos modelos de probabilidade ajustados para os dados de vazão mínima média de 7 dias para as estações fluviométricas de Aiuruoca (a), Andrelândia (b) e Bom Jardim (c).

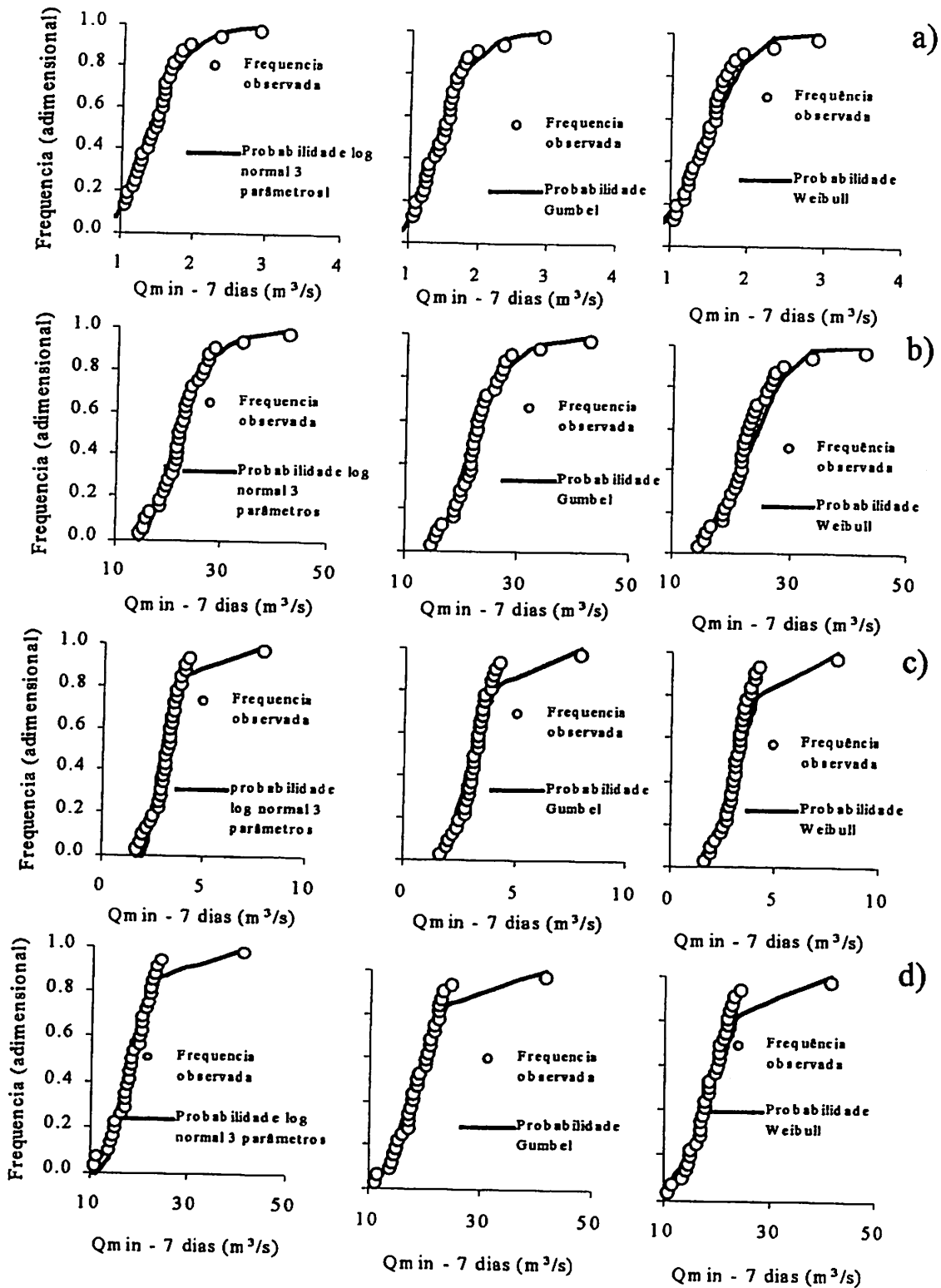


FIGURA 3. Gráficos dos modelos de probabilidade ajustados para dados de vazão mínima média de 7 dias para estações fluviométricas de Carvalhos (a), Fazenda Laranjeiras (b), Fazenda Paraíba (c) e Madre de Deus (d).

Analisando-se ainda as Figuras 2 e 3, especificamente os ajustes do modelo log-normal 3 parâmetros, verifica-se que, para valores de vazões mínimas de menor magnitude (parte inicial dos gráficos), há maiores erros de ajuste (maiores distâncias entre os dados e o modelo ajustado), o que pode ter prejudicado a análise em discussão. Tal comportamento é esperado para este modelo devido à existência do 3º parâmetro (que reflete a assimetria, aqui representada por  $\beta$ ). Quando a estimativa deste parâmetro gerar valores mais elevados, o modelo apresentará dificuldade de estimativa dos menores valores da variável em questão, gerando subestimativa da frequência teórica. Em alguns casos, o modelo pode inclusive não estimar a probabilidade para estes primeiros valores da série histórica, uma vez que a relação  $X_{TR} > \beta$  deve ser obrigatória, equação 6, devido à presença do logaritmo. Apesar deste aspecto, o modelo log-normal a 3 parâmetros foi o que produziu o melhor ajuste.

#### **4.3 Ajuste de modelos de probabilidade a dados de vazão máxima diária anual**

Na Tabela 5, apresentam-se os testes aplicados aos modelos de probabilidade ajustados a dados de vazões máximas diárias anuais. Nas Figuras 4 e 5, os ajustes proporcionados pelos respectivos modelos em relação às frequências observadas. Para a estação Fazenda Paraíba, o modelo log-normal 3 parâmetros não se ajustou, o parâmetro assimetria foi maior que todos os valores da variável em estudo, impossibilitando estimativa da frequência pelo modelo. Isto representa uma limitação imposta por este modelo e pelo método de ajuste dos parâmetros, que é o método dos momentos estatísticos.

TABELA 5. Testes de Qui-quadrado e Kolmogorov aplicados aos modelos de probabilidade ajustados a dados de vazão máxima diária anual para estações fluviométricas à montante do reservatório da UHE Camargos.

Estação	Modelo	$\chi^2$ calc.	$\chi^2$ tab.	Adeq.	$ \Delta F _{\text{máx}}$	$ \Delta F _{\text{tab.}}$	Adeq.
Aiuruoca	L-N 3	0,38	7,81	A	0,070	0,242	A
	L-N 2	2,35	7,81	A	0,134	0,242	A
	Gumbel	0,22	7,81	A	0,070	0,242	A
Andrelândia	L-N 3	4,73	9,49	A	0,109	0,242	A
	L-N 2	5,67	9,49	A	0,136	0,242	A
	Gumbel	4,47	9,49	A	0,114	0,242	A
B. Jardim	L-N 3	0,40	7,81	A	0,094	0,242	A
	L-N 2	0,88	7,81	A	0,119	0,242	A
	Gumbel	0,80	7,81	A	0,094	0,242	A
Carvalhos	L-N 3	4,06	9,49	A	0,070	0,242	A
	L-N 2	7,20	9,49	A	0,122	0,242	A
	Gumbel	3,62	9,49	A	0,058	0,242	A
F. Laranjeiras	L-N 3	0,48	5,59	A	0,071	0,242	A
	L-N 2	1,12	5,59	A	0,105	0,242	A
	Gumbel	0,64	5,59	A	0,051	0,242	A
F. Paraíba	L-N 3	-	7,81	NA	-	0,242	NA
	L-N 2	0,81	7,81	A	0,091	0,242	A
	Gumbel	0,54	7,81	A	0,140	0,242	A
F. Madre Deus	L-N 3	0,42	5,59	A	0,096	0,242	A
	L-N 2	2,93	5,59	A	0,184	0,242	A
	Gumbel	0,78	5,59	A	0,109	0,242	A

Verifica-se que, à exceção da situação descrita anteriormente, os modelos foram aderentes aos dados de vazão máxima diária anual na região de estudo. Ao se avaliar os valores de Qui-quadrado calculados, verifica-se que o modelo log-normal 2 parâmetros produziu os maiores valores, o que, em primeira instância, permite concluir que este apresenta ajuste de qualidade inferior. Além deste aspecto, analisando-se os gráficos deste modelo, nas Figuras 4 e 5, verifica-se uma maior dispersão da frequência observada em relação ao modelo ajustado, em comparação com os demais modelos. Esta situação reforça o comentário feito anteriormente.

O modelo de Gumbel proporcionou os menores valores de Qui-quadrado para 4 estações fluviométricas e modelo log-normal a 3 parâmetros, para as outras 3 estações, mostrando uma predominância do modelo de Gumbel. Esta situação pode também ser verificada nos gráficos das Figuras 4 e 5, com o modelo de Gumbel produzindo maior aderência aos dados observados. Desta forma, avalia-se que este modelo produziu melhores resultados, para vazões máximas diárias anuais nas sub-bacias hidrográficas da região de estudo. Isto pode ser afirmado não só pelo maior número de estações em que o mesmo foi melhor, mas também pelo não ajuste do modelo log-normal 3 parâmetros a uma estação (Fazenda Paraíba). Assim, o modelo Gumbel será utilizado para geração dos valores de vazões máximas diárias anuais na região, associados a diferentes tempos de retorno, os quais serão aplicados à geração dos modelos de regionalização de vazões máximas diárias anuais.



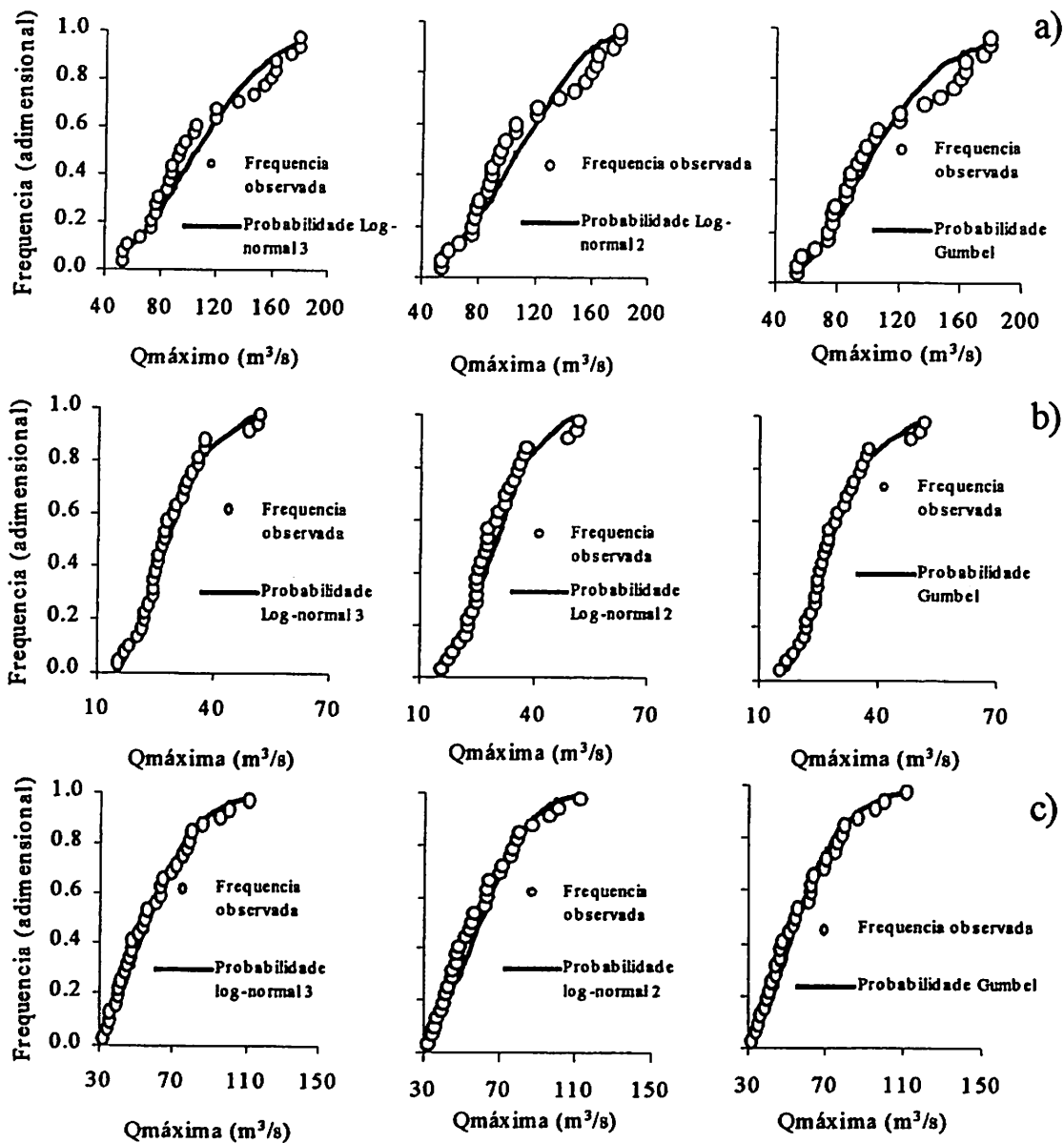


FIGURA 4. Gráficos dos modelos de probabilidade ajustados aos dados de vazão máxima diária anual, para as estações fluviométricas de Aiuruoca (a), Andrelândia (b) e Bom Jardim (c).

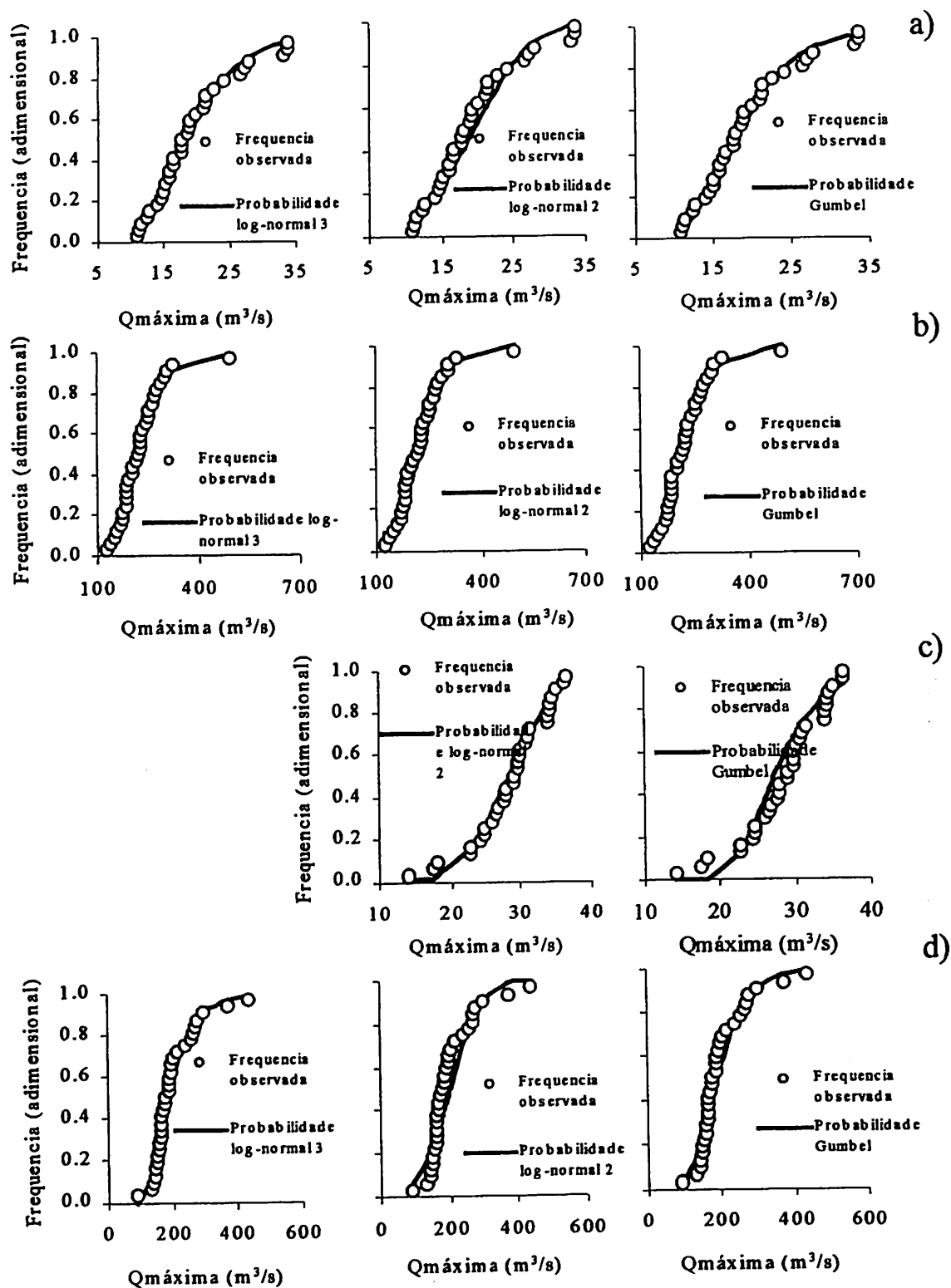


FIGURA 5. Gráficos dos modelos de probabilidade ajustados aos dados de vazão máxima diária anual para as estações fluviométricas de Carvalhos (a), Fazenda Laranjeiras (b), Fazenda Paraíba (c) e Madre de Deus (d).

Strupczewski et al. (2001), analisando vazões máximas em 39 estações fluviométricas na Polônia, obtiveram o modelo log-normal a 2 parâmetros como o de melhor ajuste em 43,6% das estações e em segundo lugar, o modelo log-normal a 3 parâmetros para outras 10,3%, mostrando que os modelos baseados na transformação logarítmica da distribuição normal se sobressaíram em relação a Pearson tipo III. Vale ressaltar que estes autores não trabalharam com o modelo de Gumbel e foi este modelo que se sobressaiu em relação aos modelos log-normal neste trabalho. Sendo assim, não é possível fazer comparação de resultados entre ambas pesquisas.

Confrontando-se o estudo de probabilidades desenvolvido para vazões mínimas médias de 7 dias e vazões máximas em sub-bacias da região Alto Rio Grande, pode-se avaliar que estas últimas propiciaram melhores ajustes, tanto em termos de precisão da estimativa da frequência observada quanto na facilidade de aderência, uma vez que houve duas situações de não aderência, para vazões mínimas médias de 7 dias e 1 para vazões máximas. Outro aspecto, que deve ser mencionado e que está associado ao comentário anterior, é com relação à quantidade de classes utilizadas no teste de Qui-quadrado, no qual verificam-se apenas 3 classes, para todas as estações no caso de vazões mínimas médias de 7 dias e de 3 a 5 classes, para vazões máximas, o que proporciona maiores graus de liberdade para o estudo. Vale ressaltar que, no teste de Kolmogorov-Smirnov todos os modelos mostraram-se adequados, evidenciando o rigor consideravelmente inferior deste teste em relação ao de Qui-quadrado, conforme comentado e encontrado em vários trabalhos sobre o tema (Catalunha et al., 2002; Haan, 1979).

#### 4.4 Ajuste de modelos de probabilidade a dados de vazão mínima diária anual

Na Tabela 6, apresentam-se os testes estatísticos de aderência, para os modelos de probabilidades ajustados aos dados de vazão mínima diária anual. Observa-se que houve aderência dos modelos ajustados, para todas as estações fluviométricas, por ambos os testes, diferentemente das variáveis anteriormente estudadas (vazão mínima média de 7 dias e vazão máxima diária anual). Com base nos valores de Qui-quadrado calculados, observa-se que o modelo log-normal a 3 parâmetros produziu os menores valores para 6 estações, com exceção da estação de Carvalhos, para a qual o modelo de Weibull gerou o menor o valor. Isto ocorreu, também de maneira semelhante, para a estação Fazenda Paraíba, porque os dados foram agrupados em apenas 2 classes de frequência, reduzindo consideravelmente os graus de liberdade do teste para estas estações. Esta situação pode facilitar a adequação dos modelos de probabilidade, especialmente o de Weibull, não significando, no entanto, melhor desempenho em relação aos demais modelos.

O modelo de Gumbel gerou o 2º menor valor de Qui-quadrado para todas as estações, podendo-se qualificá-lo como o segundo em termos de ajuste e aderência. Ao se comparar o comportamento destes dados com os de vazão mínima média de 7 dias, pode-se constatar semelhança entre os mesmos, tanto em termos de graus de liberdade das classes de frequência, dados indiretamente pelos valores de Qui-quadrado de tabela (Haan, 1979), como pelo melhor modelo ajustado, que foi o log-normal a 3 parâmetros. Apesar de haver aderência de todas as estações ao modelo de Weibull, pode-se notar que, para a estação de Bom Jardim, houve a menor diferença entre os valores de Qui-quadrado, havendo, por sua vez, maior dificuldade de adequação para esta estação. No caso da

variável vazão mínima média de 7 dias, este modelo, para esta estação, não foi adequado.

Nas Figuras 6 e 7, pode-se verificar o melhor ajuste do modelo log-normal 3 parâmetros para todas as 7 estações, inclusive para estação de Carvalhos, na qual o modelo Weibull produziu o menor Qui-quadrado calculado, conforme já comentado. Para esta situação, com apenas 1 grau de liberdade, o teste ficou prejudicado, não refletindo o real comportamento em termos de aderência. Observa-se também o melhor ajuste do modelo de Gumbel em relação ao de Weibull para todas as situações. Estas observações reforçam o comentário feito anteriormente sobre a qualidade dos modelos de probabilidades ajustados. Euclides (1992), analisando dados de vazão mínima em sub-bacias do Rio Juatuba, concluiu que o modelo log-normal 3 parâmetros foi o mais adequado, para estimativa desta variável hidrológica, de maneira semelhante ao presente estudo.

TABELA 6. Testes de Qui-quadrado e Kolmogorov aplicados aos modelos de probabilidade ajustados a dados de vazão mínima diária anual para estações fluviométricas à montante do reservatório da UHE Camargos.

Estação	Modelo	$\chi^2$ calc.	$\chi^2$ tab.	Adeq.	$ \Delta F _{\text{máx}}$	$ \Delta F _{\text{tab.}}$	Adeq.
Aiuruoca	L-N 3	0,60	5,59	A	0,135	0,242	A
	Weibull	1,86	5,59	A	0,205	0,242	A
	Gumbel	1,73	5,59	A	0,165	0,242	A
Andrelândia	L-N 3	0,57	5,59	A	0,134	0,242	A
	Weibull	3,62	5,59	A	0,127	0,242	A
	Gumbel	1,86	5,59	A	0,095	0,242	A
B. Jardim	L-N 3	1,62	5,59	A	0,075	0,242	A
	Weibull	5,23	5,59	A	0,156	0,242	A
	Gumbel	2,53	5,59	A	0,099	0,242	A
Carvalhos	L-N 3	0,36	3,83	A	0,094	0,242	A
	Weibull	0,06	3,83	A	0,124	0,242	A
	Gumbel	0,34	3,83	A	0,091	0,242	A
F. Laranjeiras	L-N 3	0,39	5,59	A	0,110	0,242	A
	Weibull	3,45	5,59	A	0,146	0,242	A
	Gumbel	0,90	5,59	A	0,089	0,242	A
F. Paraíba	L-N 3	0,89	3,83	A	0,157	0,242	A
	Weibull	0,99	3,83	A	0,192	0,242	A
	Gumbel	1,42	3,83	A	0,136	0,242	A
F. Madre Deus	L-N 3	0,11	5,59	A	0,142	0,242	A
	Weibull	0,93	5,59	A	0,167	0,242	A
	Gumbel	0,12	5,59	A	0,119	0,242	A

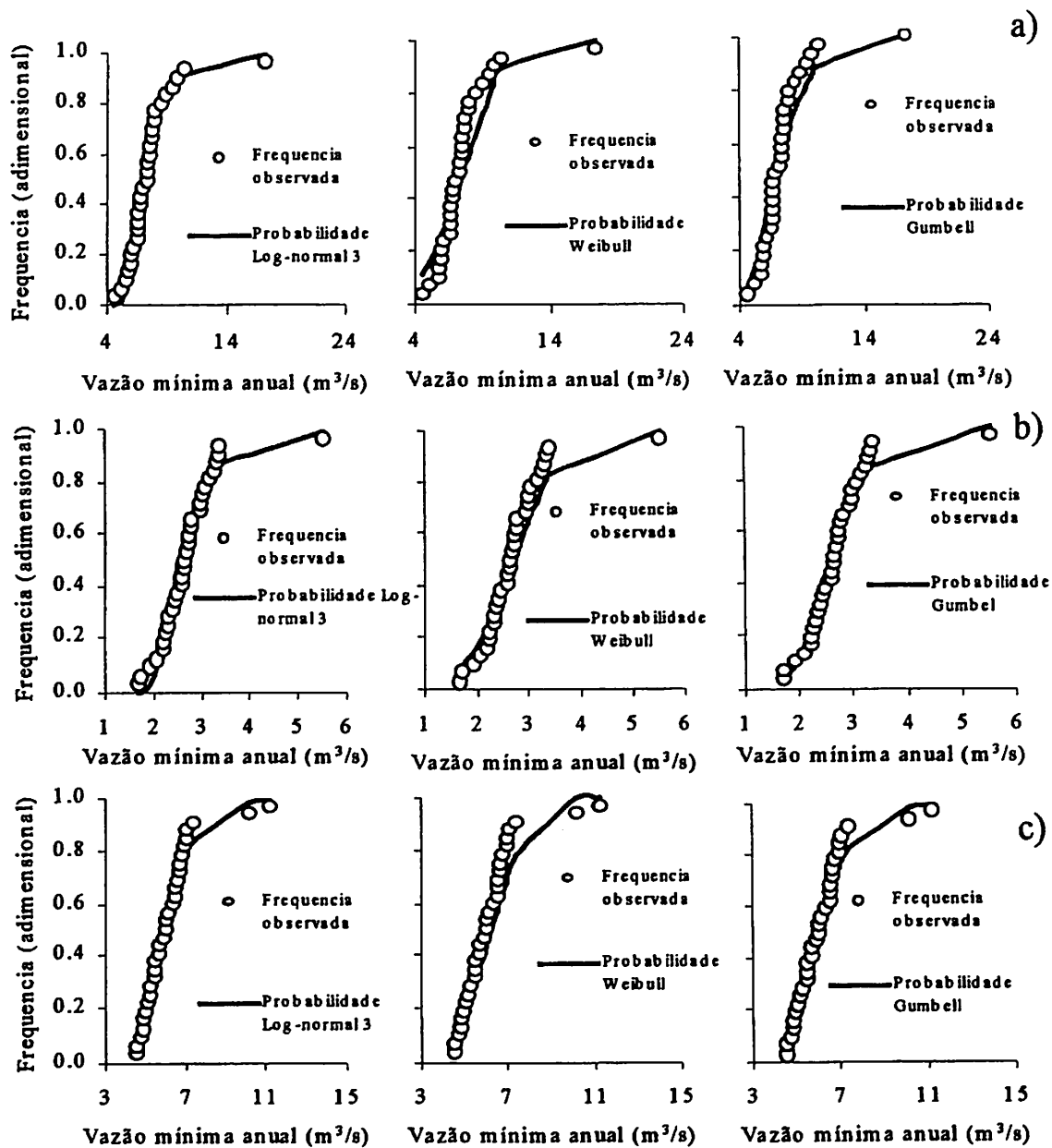


FIGURA 6. Gráficos dos modelos de probabilidade ajustados para dados de vazão mínima diária anual para as estações fluviométricas de Aiuruoca (a), Andrelândia (b) e Bom Jardim (c).

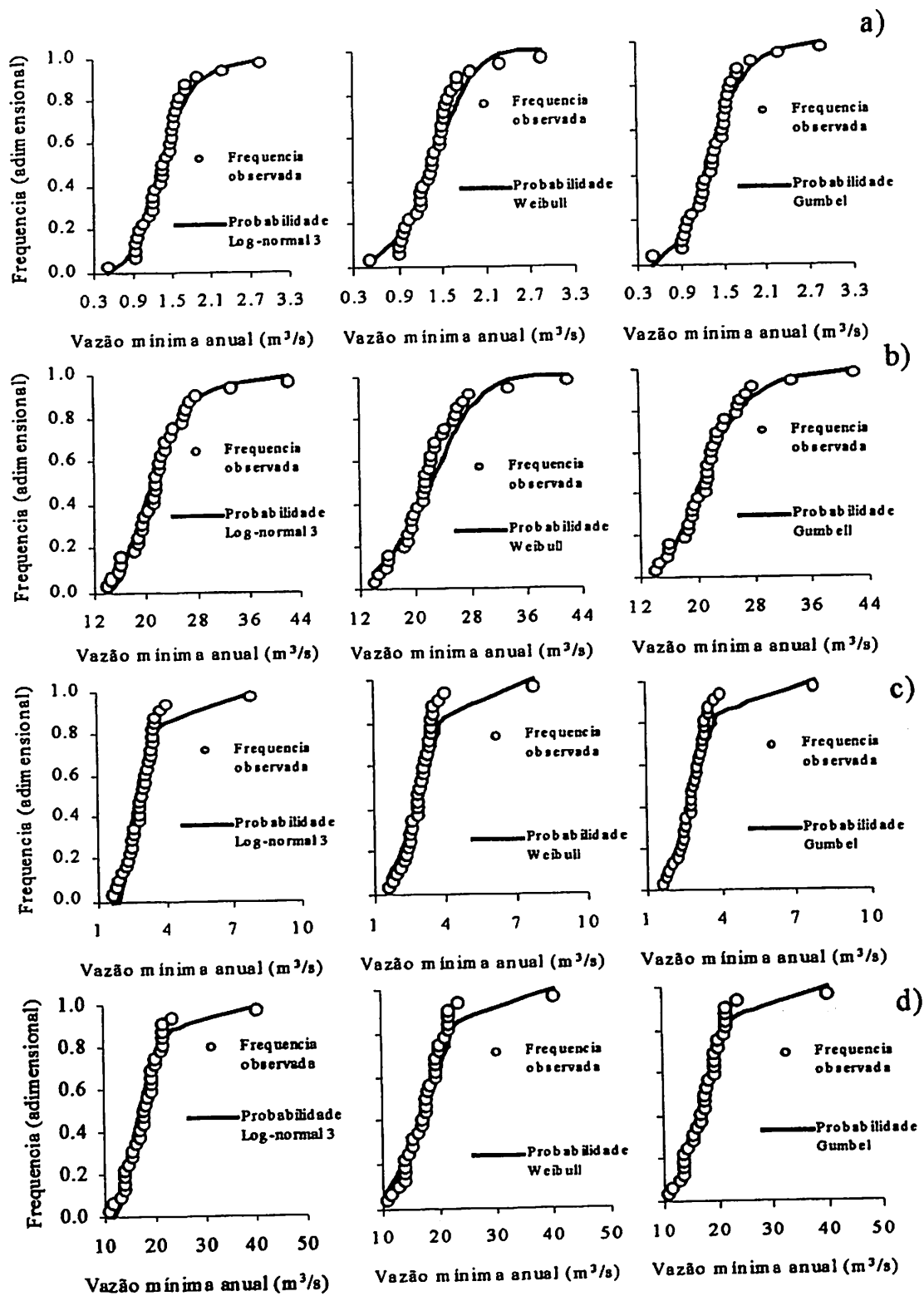


FIGURA 7. Gráficos dos modelos de probabilidade ajustados aos dados de vazão mínima diária anual para estações fluviométricas de Carvalhos (a), Fazenda Laranjeiras (b), Fazenda Paraíba (c) e Madre de Deus (d).



#### 4.5 Regionalização de vazões máximas diárias anuais

Na Figura 8, apresenta-se o comportamento das vazões máximas diárias anuais, adimensionalizadas pela vazão média, para as estações fluviométricas avaliadas. Este estudo é de suma importância para a geração de modelos de regionalização. Segundo Tucci (2001), este gráfico permite avaliar o grau de homogeneidade destes dados (vazão máxima) na região, permitindo detectar se há diferenças que possam comprometer os modelos de regionalização. Desta forma, pode-se observar que há um comportamento bastante próximo dos dados de vazão máxima adimensionalizada em função da probabilidade de ocorrência, havendo apenas uma estação que se diferencia do comportamento das demais, que é a estação Fazenda Paraíba. O modelo potencial ajustado pode ser utilizado para estimativa da relação  $Q_{\text{máx}}/Q_{\text{méd}}$  em função da probabilidade de ocorrência, expressa pelo tempo de retorno e pelo bom ajuste do mesmo. Observa-se que este comportamento subsidia o processo de regionalização baseado em regressão, permitindo a geração de modelos representativos para a região de estudo.

Na Tabela 7, apresentam-se os modelos ajustados, para vazão máxima diária anual, em função das características morfométricas das sub-bacias (área, comprimento e declividade do curso d'água principal) e precipitação diária máxima anual, esta última gerada de acordo com o tempo de retorno e o modelo de probabilidades de Gumbel.

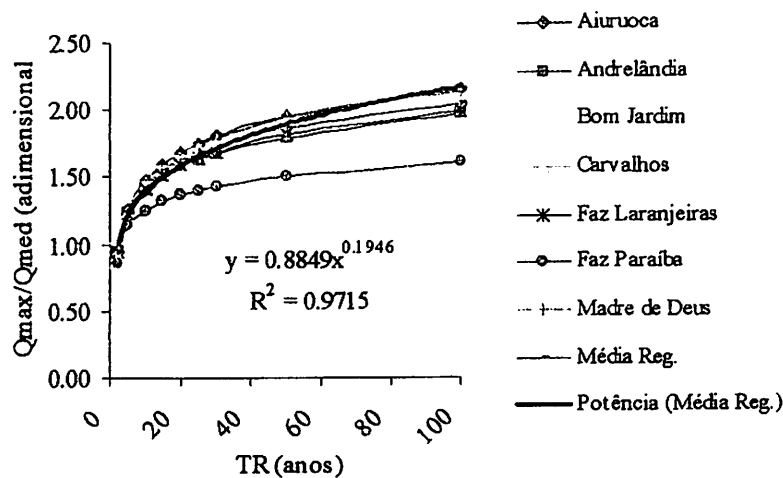


FIGURA 8. Comportamento da vazão máxima adimensionalizada em função do tempo de retorno para as estações fluviométricas estudadas na região Alto Rio Grande (à montante da represa da UHE-Camargos/CEMIG).

A variável densidade de drenagem não foi significativa, sendo excluída pelo procedimento “backward”. O tempo de concentração, por ser determinado com base nas características morfométricas das sub-bacias (área e comprimento e declividade do talvegue, principalmente), produziu co-variância com estas variáveis, sendo da mesma forma, excluído. Ao se analisar o modelo geral, observa-se um bom ajuste, evidenciado pelo elevado coeficiente de determinação e baixo erro médio de predição. É de suma importância também a significância dos parâmetros estimados para as variáveis criadas, destacando-se as variáveis associadas às características morfométricas das sub-bacias, o que demonstra elevada importância destas para explicar a variável hidrológica vazão máxima diária anual. As variáveis de entrada associadas à precipitação máxima diária anual foram significativamente diferentes de zero, pelo teste t, a um nível de significância de 1% de probabilidade ( $\ln(P)$  e  $(A \times P)$ ), mostrando que esta variável é de grande importância para o desenvolvimento de modelos de regionalização máxima. Deve-se destacar que, para estimativa da vazão máxima,

é necessária a estimativa da precipitação máxima diária anual por um modelo de probabilidade, para um dado tempo de retorno.

TABELA 7. Modelos ajustados para vazão máxima diária anual em sub-bacias à montante da represa da UHE Camargos/CEMIG.

Tipo de modelo	Modelo	Significância dos parâmetros	R <sup>2</sup>	Erro (%)
Geral	$Q_{\max} = -333,34 + 0,086 \cdot D \cdot L + 7,66 \cdot 10^{-4} \cdot A \cdot P + 67,98 \cdot \ln(P) - \frac{1136,76}{A} \cdot \ln(A)$	Intercepto: 0,0019** AP: 0,0001** Ln (P): 0,0031** (1/A)*Ln (A): 0,019* DL: 0,0001**	0,995	14,2
TR = 5 anos	$Q_{\max} = -3,024 + 8,296 \cdot 10^{-3} \cdot A \cdot D + 1,532 \cdot 10^{-3} \cdot L^2 + 3,02 \cdot 10^{-4} \cdot A \cdot P$	Intercepto: 0,725 <sup>ns</sup> AD: 0,017* L <sup>2</sup> : 0,0935 <sup>□</sup> AP: 0,281 <sup>ns</sup>	0,994	14,7
TR = 20 anos	$Q_{\max} = -2,472 + 0,0119 \cdot A \cdot D + 2,9 \cdot 10^{-3} \cdot L^2 + 7,62 \cdot 10^{-5} \cdot A \cdot P$	Intercepto: 0,843 <sup>ns</sup> AD: 0,0153* L <sup>2</sup> : 0,0387* AP: 0,076 <sup>□</sup>	0,992	17,4
TR = 50 anos	$Q_{\max} = -5,72 + 0,0137 \cdot A \cdot D + 3,04 \cdot 10^{-3} \cdot L^2 + 1,51 \cdot 10^{-4} \cdot A \cdot P$	Intercepto: 0,7079 <sup>ns</sup> AD: 0,0169* L <sup>2</sup> : 0,0472* AP: 0,055 <sup>□</sup>	0,992	18,1
TR = 100 anos	$Q_{\max} = -6,895 + 0,0152 \cdot A \cdot D + 3,464 \cdot 10^{-3} \cdot L^2 + 1,28 \cdot 10^{-4} \cdot A \cdot P$	Intercepto: 0,694 <sup>ns</sup> AD: 0,0177* L <sup>2</sup> : 0,0468* AP: 0,061 <sup>□</sup>	0,991	19,1

ns= não significativo; \* significativo a 5%; \*\* significativo a 1%; □ significativo a 10%

Ajustando-se um modelo para cada tempo de retorno, analisa-se, primeiramente, modelos mais simples, com menor número de variáveis. Isto ocorreu devido ao fato de que dispõe-se de apenas 7 conjuntos de valores de vazão, área, talvegue, declividade e precipitação (7 sub-bacias), por TR, obrigando a geração de modelos menos complexos, pois, ao se aplicar as mesmas variáveis do modelo geral, a significância das variáveis tende a 1, desqualificando o modelo. Além deste aspecto, vale destacar que as variáveis destes modelos apresentaram menor significância estatística, com algumas sendo não significativas e nenhuma delas significativa a 1% de probabilidade, colaborando, no entanto, com a geração de um elevado coeficiente de determinação. Outro aspecto relevante está na magnitude dos erros médios, com valores superiores ao que foi produzido pelo modelo geral. Assim, para estimativa da vazão máxima diária anual, recomenda-se a aplicação do modelo geral, apesar deste exigir maior disponibilidade de variáveis, tanto quantitativamente quanto qualitativamente.

Os gráficos da Figura 9 reforçam o comportamento descrito acima. Verifica-se dispersão dos valores em torno da reta 1:1 menor para o modelo geral (a) em comparação aos modelos para cada tempo de retorno (b, c, d, e). Verifica-se também, por esta Figura e Tabela 7, que não há diferenças entre os modelos para cada tempo de retorno.

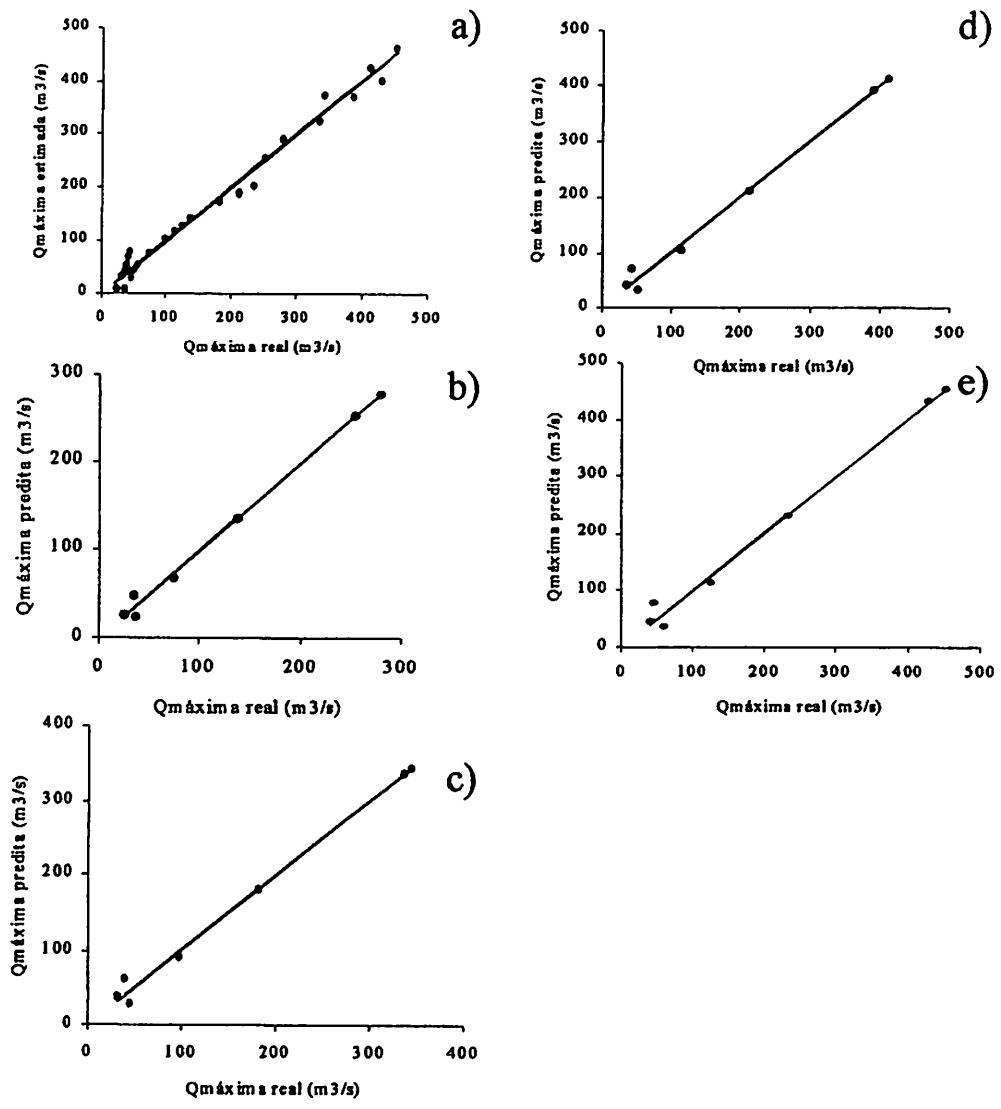


FIGURA 9. Dispersão dos valores de vazão máxima diária anual, preditos e reais, em torno da reta 1:1 produzidos pelos modelos ajustados (a – modelo geral; b – TR = 5 anos; c – TR = 20 anos; d - TR = 50 anos; e – TR = 100 anos).

#### 4.6 Regionalização de vazões mínimas médias anuais de 7 dias

Na Figura 10, apresentam-se gráficos que relacionam os valores de vazão mínima média anual de 7 dias, adimensionalizados pela respectiva vazão média. Da mesma forma que, para vazão máxima diária anual, os dados desta variável hidrológica apresentam comportamento similar em relação aos valores de tempo de retorno, podendo-se considerar assim que há boa homogeneidade dos dados entre as estações avaliadas. Isto permite o ajuste de modelos regionais tanto para a variável vazão mínima diária anual quanto vazão mínima média de 7 dias, uma vez que esta última é gerada por média móvel a partir da primeira. No caso destes dados, observa-se, da mesma forma, que a estação fazenda Paraíba também apresentou comportamento ligeiramente diferenciado das demais. No entanto, pode-se afirmar que os dados de vazão mínima apresentam maior homogeneidade em relação aos dados de vazão máxima diária anual.

Na Tabela 8, apresentam-se os modelos gerados para predição de vazões mínimas médias de 7 dias, variável esta de suma importância para projetos de Outorga do Uso da Água no estado de Minas Gerais. Avalia-se, primeiramente, que as variáveis associadas à precipitação produziram melhorias para o modelo geral, destacando-se, no entanto, a área das sub-bacias como sendo a única variável morfométrica de importância para a predição da vazão mínima médias de 7 dias. Neste caso, a precipitação associada ao modelo é a total anual, por esta refletir o comportamento hidrológico das sub-bacias ao longo do ano, especialmente nos períodos de seca.

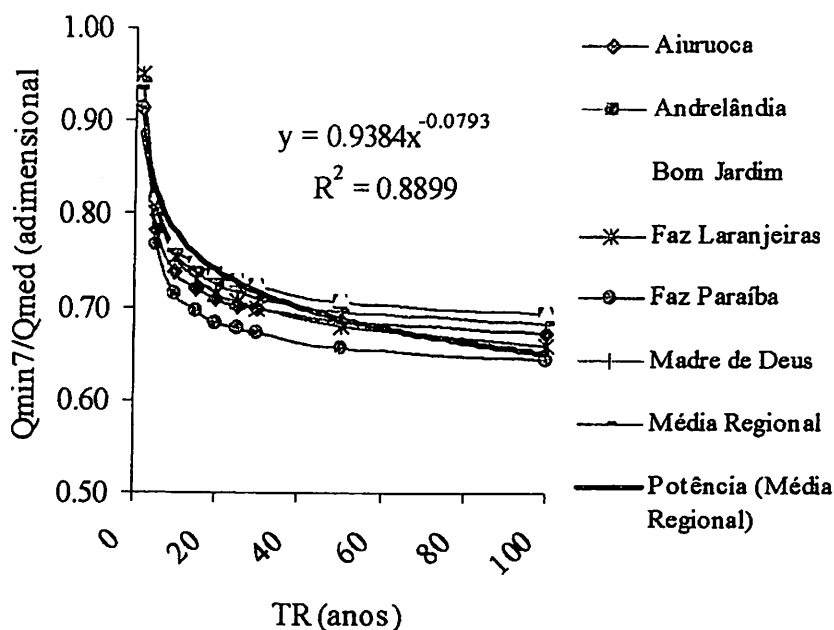


FIGURA 10. Comportamento dos dados de vazão mínima média de 7 dias, adimensionalizados pela vazão média, em função do tempo de retorno para estações fluviométricas da região Alto Rio Grande (à montante da represa da UHE-Camargos/CEMIG)..

É possível observar diferenças comportamentais relevantes em relação aos modelos para vazões máximas diárias anuais. Uma delas diz respeito ao fato de que o modelo geral ajustado para vazões mínimas médias de 7 dias foi de qualidade ligeiramente superior e os modelos para cada tempo de retorno apresentaram melhores ajustes, com erros médios inferiores aos respectivos modelos para vazões máximas, além de maior significância das variáveis estimadas. Observam-se também modelos com menor número de variáveis de entrada, baseados apenas nas áreas das sub-bacias. Comparativamente à dispersão dos valores apresentada pela Figura 9, observa-se, na Figura 11, menor dispersão dos valores produzidos pelos modelos para vazões mínimas médias de 7 dias. Para estimativa da vazão mínima média de 7 dias, ambos os modelos podem

ser aplicados, possivelmente, com melhores resultados, quando se aplicar os modelos individuais para cada TR.

TABELA 8. Modelos ajustados para vazão mínima média de 7 dias em sub-bacias à montante da represa da UHE Camargos/CEMIG.

Tipo de modelo	Modelo	Significância dos parâmetros	R <sup>2</sup>	Erro (%)
Geral	$Q_{\min 7} = 1,40 - 2,39 \cdot 10^{-6} \cdot A \cdot P$ $- 7,264 \cdot 10^{-3} \cdot A + 1,62 \cdot 10^{-4} \cdot A^2$ $- 1,996 \cdot 10^{-5} \cdot A^2 \cdot \ln(A)$	Intercepto: 0,0015** AP: 0,0001** A <sup>2</sup> *Ln (A): 0,0001** A <sup>2</sup> : 0,0001** A: 0,0257**	0,995	9,6
TR = 5 anos	$Q_{\min 7} = 2,233 - 0,02019 \cdot A$ $+ 2,199 \cdot 10^{-4} \cdot A^2$ $- 2,702 \cdot 10^{-5} \cdot A^2 \cdot \ln(A)$	Intercepto: 0,0772 <sup>□</sup> A <sup>2</sup> *Ln (A): 0,009** A <sup>2</sup> : 0,0136* A: 0,0452*	0,997	8,3
TR = 20 anos	$Q_{\min 7} = 1,74 - 0,016 \cdot A$ $+ 1,86 \cdot 10^{-4} \cdot A^2$ $- 2,286 \cdot 10^{-5} \cdot A^2 \cdot \ln(A)$	Intercepto: 0,1227 <sup>ns</sup> A <sup>2</sup> *Ln (A): 0,013* A <sup>2</sup> : 0,0169* A: 0,0718 <sup>□</sup>	0,997	11,0
TR = 50 anos	$Q_{\min 7} = 1,50 - 0,01406 \cdot A$ $+ 1,71 \cdot 10^{-4} \cdot A^2$ $- 2,103 \cdot 10^{-5} \cdot A^2 \cdot \ln(A)$	Intercepto: 0,1618 <sup>ns</sup> A <sup>2</sup> *Ln (A): 0,0161* A <sup>2</sup> : 0,0169* A: 0,0956 <sup>□</sup>	0,997	8,7
TR = 100 anos	$Q_{\min 7} = 1,35 - 0,0127 \cdot A$ $+ 1,61 \cdot 10^{-4} \cdot A^2$ $- 1,98 \cdot 10^{-5} \cdot A^2 \cdot \ln(A)$	Intercepto: 0,1927 <sup>ns</sup> A <sup>2</sup> *Ln (A): 0,0188** A <sup>2</sup> : 0,0197* A: 0,1166 <sup>ns</sup>	0,996	12,8



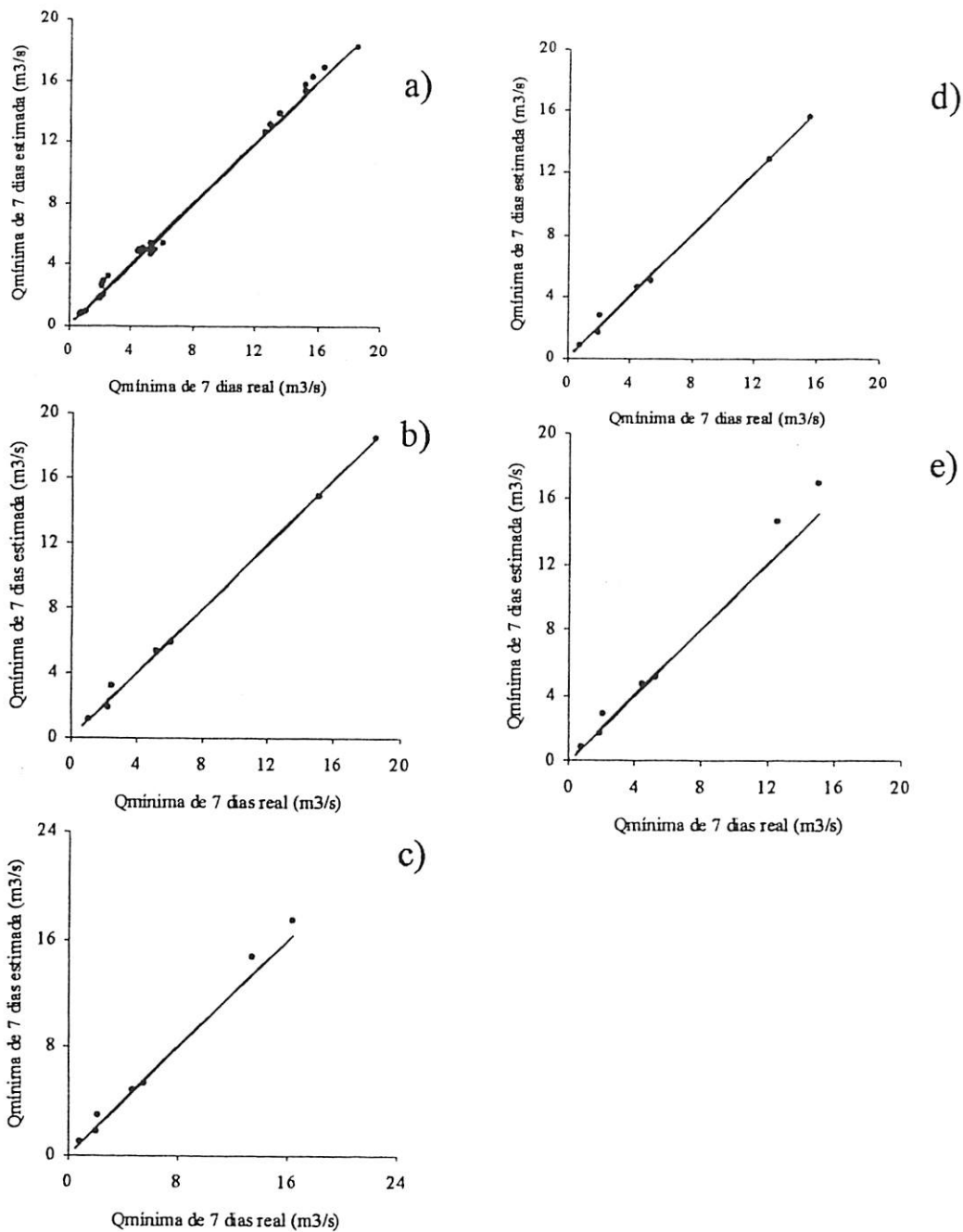


FIGURA 11. Dispersão dos valores de vazão mínima média de 7 dias preditos e reais em torno da reta 1:1 produzidos pelos modelos ajustados (a – modelo geral; b – TR = 5 anos; c – TR = 20 anos; d - TR = 50 anos; e – TR = 100 anos).

#### 4.7 Regionalização de vazões mínimas diárias anuais

Na Tabela 9, apresentam-se os modelos ajustados para predição da vazão mínima diária anual, variável hidrológica de grande relevância no contexto ambiental e no uso e manejo dos recursos hídricos em bacias hidrográficas. O modelo geral ajustado possui qualidades estatísticas, baseadas no coeficiente de determinação e na significância dos parâmetros, que permitem qualificá-lo como ótimo preditor da vazão mínima anual. Este apresenta grande semelhança com aquele gerado para vazão mínima média de 7 dias, tanto estrutural, na figura das variáveis de entrada que constituem o modelo, quanto nas suas qualidades estatísticas. A precipitação utilizada como variável de entrada neste modelo corresponde ao total anual e a probabilidade ou o tempo de retorno estão implicitamente ligados à estimativa prévia da precipitação com base num modelo de probabilidades, normalmente o modelo Normal ou Gauss.

Os modelos para cada tempo de retorno apresentam, da mesma forma anterior, excelente qualidade estatística, permitindo a predição da vazão mínima diária anual com elevada precisão. São semelhantes aos gerados para vazões mínima média de 7 dias, com erros médios pouco superiores. Na Figura 12, apresentam-se as dispersões dos valores reais e preditos em torno da reta 1:1, mostrando pequena dispersão, o que significa erros de pequena magnitude.

TABELA 9. Modelos ajustados para vazão mínima diária anual em sub-bacias à montante da represa da UHE Camargos/CEMIG.

Tipo de modelo	Modelo	Significância dos parâmetros	R <sup>2</sup>	Erro (%)
Geral	$Q_{\min} = 1,27 - 2,35 \cdot 10^{-6} \cdot A \cdot P$ $- 6,404 \cdot 10^{-3} \cdot A + 1,52 \cdot 10^{-4} \cdot A^2$ $- 1,881 \cdot 10^{-5} \cdot A^2 \cdot \text{Ln}(A)$	Intercepto: 0,0045** AP: 0,0001** A <sup>2</sup> *Ln (A): 0,0576 <sup>□</sup> A <sup>2</sup> : 0,0001** A: 0,0041**	0,994	13,9
TR = 5 anos	$Q_{\min} = 2,181 - 0,02005 \cdot A$ $+ 2,154 \cdot 10^{-4} \cdot A^2$ $- 2,646 \cdot 10^{-5} \cdot A^2 \cdot \text{Ln}(A)$	Intercepto: 0,092 <sup>□</sup> A <sup>2</sup> *Ln (A): 0,0112* A <sup>2</sup> : 0,0116* A: 0,050*	0,997	9,2
TR = 20 anos	$Q_{\min} = 1,56 - 0,01479 \cdot A$ $+ 1,761 \cdot 10^{-4} \cdot A^2$ $- 2,169 \cdot 10^{-5} \cdot A^2 \cdot \text{Ln}(A)$	Intercepto: 0,1953 <sup>ns</sup> A <sup>2</sup> *Ln (A): 0,0221* A <sup>2</sup> : 0,023* A: 0,1169 <sup>ns</sup>	0,997	9,7
TR = 50 anos	$Q_{\min} = 1,356 - 0,01276 \cdot A$ $+ 1,584 \cdot 10^{-4} \cdot A^2$ $- 1,95 \cdot 10^{-5} \cdot A^2 \cdot \text{Ln}(A)$	Intercepto: 0,2064 <sup>ns</sup> A <sup>2</sup> *Ln (A): 0,022* A <sup>2</sup> : 0,0231* A: 0,1271 <sup>ns</sup>	0,996	10,9
TR = 100 anos	$Q_{\min} = 1,20 - 0,01135 \cdot A$ $+ 1,479 \cdot 10^{-4} \cdot A^2$ $- 1,824 \cdot 10^{-5} \cdot A^2 \cdot \text{Ln}(A)$	Intercepto: 0,2487 <sup>ns</sup> A <sup>2</sup> *Ln (A): 0,0261** A <sup>2</sup> : 0,0274* A: 0,1581 <sup>ns</sup>	0,996	9,4

Chaves et al. (2002), trabalhando com vazões mínimas associadas a percentis de 90%, ajustaram modelos exponenciais em função da área, extraída de 11 sub-bacias do rio Itapicuru (BA), obtendo coeficientes de determinação menores que 60% e com erro médio de predição maior que 280%. Euclides et al. (2001), trabalhando com regressões para regionalização de vazões mínimas anuais e 33 estações fluviométricas na região Alto São Francisco, encontraram

coeficientes de determinação médios de 0,94. Estes trabalhos demonstram, comparativamente ao presente estudo, que este último produziu um avanço considerável no tocante à regionalização de vazões, especialmente a mínima média de 7 dias e mínima diária anual, baseada em modelos de regressão, mostrando que tanto os modelos quanto a metodologia adotada podem ser implementados.

Na Tabela 10, encontram-se modelos potenciais para as vazões mínimas médias de 7 dias, mínimas diárias anuais e máximas diárias anuais em função da área da bacia hidrográfica. Pode-se verificar, com base no coeficiente de determinação gerado, que estes modelos são de qualidade consideravelmente inferior aos das Tabelas 4, 5 e 6, especialmente para vazões máximas, demonstrando que apenas a variável área, trabalhada na forma de um modelo potencial e ou exponencial, não produzirá modelos de qualidade comparável aos ajustados por regressão múltipla pela técnica "backward". Tucci (2001) apresenta modelos deste tipo para representar vazões associadas aos percentis de 50 e 95%, porém com coeficiente de determinação acima de 95%. O autor destacou que o acréscimo da variável precipitação não produziu melhorias consistentes aos modelos. Esta situação não foi observada durante a execução deste trabalho, no qual pode-se verificar que tanto a precipitação máxima diária anual quanto a precipitação total anual são importantes para caracterizar as vazões máxima e mínimas médias de 7 dias e diária anual, respectivamente.

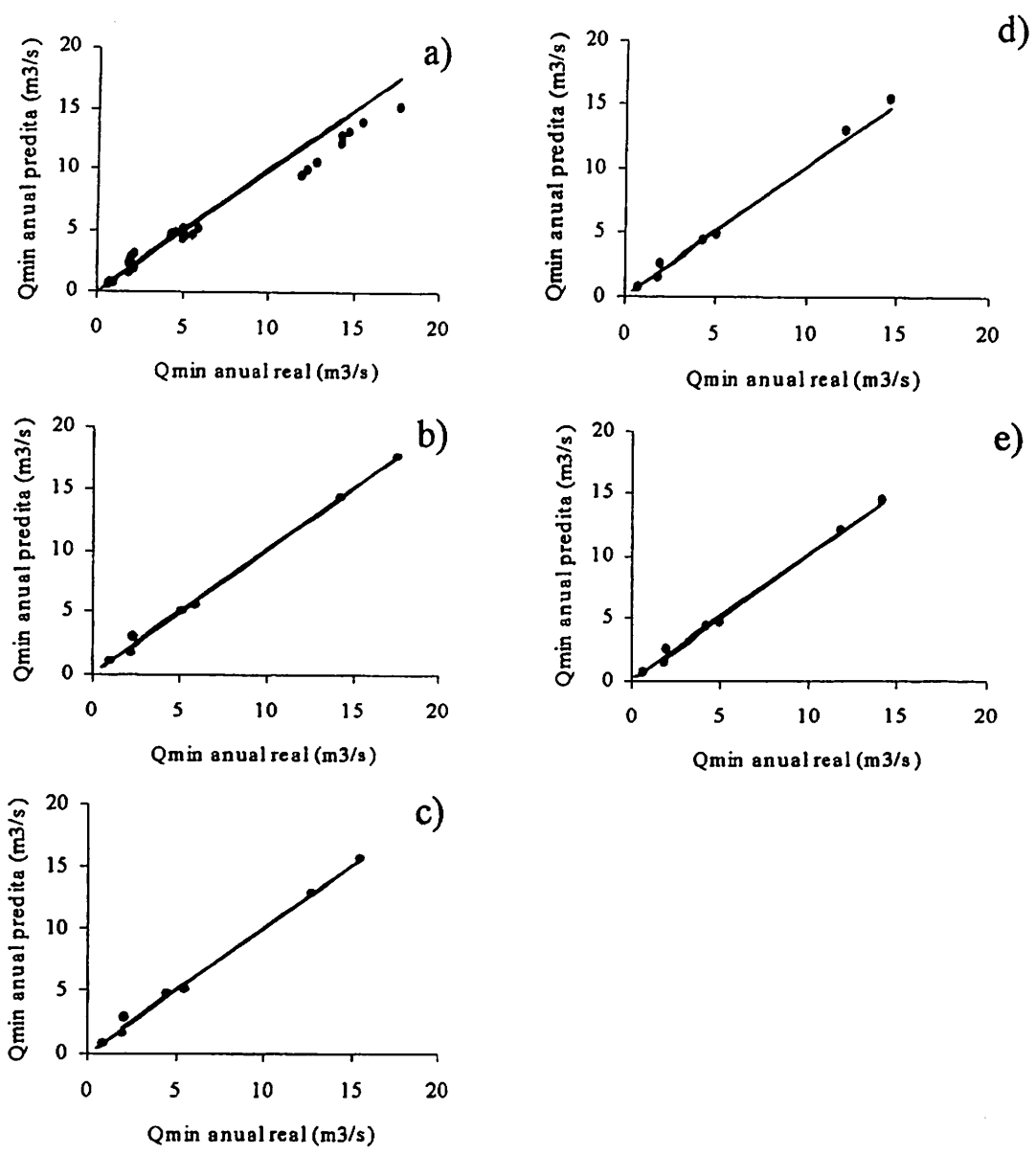


FIGURA 12. Dispersão dos valores de vazão mínima diária, preditos e reais em torno da reta 1:1 produzidos pelos modelos ajustados (a – modelo geral; b – TR = 5 anos; c – TR = 20 anos; d - TR = 50 anos; e – TR = 100 anos).

TABELA 10. Modelos potenciais ajustados para dados de vazões diárias máximas anuais e diárias mínima média de 7 dias, em função da área, para sub-bacias hidrográficas à montante da represa UHE/Camargos-CEMIG.

Variável		TR = 5 anos
Q <sub>mínima 7 dias</sub>		$Q_{\min}=0,0112xA^{0,973}, R^2 = 0,889$
Q <sub>máxima</sub>		$Q_{\max}=0,265xA^{0,919}, R^2 = 0,828$
Q <sub>mínima anual</sub>		$Q_{\min}=0,0095xA^{0,992}, R^2 = 0,904$
Variável		TR = 20 anos
Q <sub>mínima 7 dias</sub>		$Q_{\min}=0,0052xA^{1,034}, R^2 = 0,876$
Q <sub>máxima</sub>		$Q_{\max}=0,338xA^{0,919}, R^2 = 0,816$
Q <sub>mínima anual</sub>		$Q_{\min}=0,0072xA^{1,02}, R^2 = 0,909$
Variável		TR = 50 anos
Q <sub>mínima 7 dias</sub>		$Q_{\min}=0,001778xA^{1,1528}, R^2 = 0,872$
Q <sub>máxima</sub>		$Q_{\max}=0,3382xA^{0,9199}, R^2 = 0,804$
Q <sub>mínima anual</sub>		$Q_{\min}=0,00621xA^{1,0315}, R^2 = 0,916$
Variável		TR = 100 anos
Q <sub>mínima 7 dias</sub>		$Q_{\min}=0,00611xA^{1,0389}, R^2 = 0,921$
Q <sub>máxima</sub>		$Q_{\max}=0,389xA^{0,9339}, R^2 = 0,796$
Q <sub>mínima anual</sub>		$Q_{\min}=0,005668xA^{1,0414}, R^2 = 0,918$

#### 4.8 Comparação dos valores extraídos das séries históricas com os obtidos por Souza (1998)

Nas Tabelas 11 e 12, apresentam-se os valores de vazão mínima de 7 dias de duração e tempo de retorno de 10 anos e vazão máxima para tempo de retorno de 10 anos extraídos pela metodologia apresentada por Souza (1998) e calculadas por este trabalho. A análise destas tabelas permite constatar que os desvios entre os valores fornecidos pelas duas metodologias estão dentro de um intervalo aceitável em hidrologia, principalmente, para as vazões medidas médias de 7 dias. Para o caso dos valores máximos, o desvio produzido pela comparação das metodologias é superior, sendo, no entanto, de comportamento esperado. Isto revela que a metodologia proposta por Souza (1998) pode ser aplicada, com menor rigor, para estimativa de vazões máxima e mínima média de 7 dias para a região de estudo.

TABELA 11. Comparação dos valores de vazão mínima média de 7 dias de duração e 10 anos de recorrência calculados com base em série histórica e extraídos de Souza (1998).

Estações	Souza (1998)		Valor calculado	Desvio
	Re (Min. Mens;10)	RE (7,10)		
	-----l/s.km <sup>2</sup> -----			%
Aiuruoca	9	8,18	10,78	24,10
Andrelândia	7	6,37	7,81	18,43
Bom Jardim	8,3	7,55	9,72	22,39
Carvalhos	8,4	7,64	9,33	18,16
Faz Laranjeiras	7,7	7,01	8,28	15,33
Faz Paraíba	7	6,37	6,12	4,17
Madre de Deus	7	6,37	10,72	40,57
			Média	20,45

TABELA 12. Comparação dos valores de vazão máxima diária anual, para 10 anos de recorrência, calculados com base em série histórica e extraídos de Souza (1998).

Estações	Souza (1998)		Valor calculado	Desvio
	Re (Max. Mens;10)	RE	RE	
	-----l/s.km <sup>2</sup> -----			%
Aiuruoca	95	106,25	300,71	64,67
Andrelândia	57,5	64,25	151,09	57,47
Bom Jardim	67,5	75,49	171,04	55,86
Carvalhos	66	73,81	266,48	72,30
Faz Laranjeiras	65	72,63	154,02	52,84
Faz Paraíba	57	63,70	93,46	31,85
Madre de Deus	75	83,81	133,01	36,99
			Média	53,14



## 5 CONCLUSÕES

- a) O modelo de probabilidades log-normal a 3 parâmetros adequou-se melhor aos dados de vazões mínima diária anual e mínima média de 7 dias;
- b) O modelo de probabilidades de Gumbel foi o que melhor se adequou aos dados de vazão máxima diária anual;
- c) Os modelos de regionalização para vazões mínimas diárias e mínimas médias de 7 dias apresentaram boas qualidades estatísticas (elevados coeficientes de determinação, baixos erros médios e significância das variáveis), sendo aplicáveis às sub-bacias da região Alto Rio Grande, necessitando apenas da área e da precipitação total anual. Os modelos ajustados para cada tempo de retorno apresentaram qualidade estatística superior ao modelo geral, produzindo resultados mais precisos;
- d) Os modelos ajustados para vazão máxima diária anual basearam-se na área, no comprimento e declividade do talvegue principal e precipitação máxima diária anual, apresentando boas qualidades que permitem sua aplicação à região. Para esta variável hidrológica, os modelos para cada tempo de retorno apresentaram qualidade inferior ao modelo geral, recomendando-se o modelo geral;
- e) A comparação entre os valores de vazão máxima e mínima de 7 dias, gerados com o emprego da metodologia proposta por Souza (1998) e valores calculados com base em modelos de probabilidades, mostrou desvios de pequena magnitude na escala de avaliação hidrológica.;
- f) Os modelos ajustados para o processo de regionalização devem ser utilizados preferencialmente dentro da região de estudo e para áreas de drenagem dentro dos limites de 105 km<sup>2</sup> e 2226 km<sup>2</sup>.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTUNES, F.Z.; SANTANA, D.P.; BOUÇADA, A.V. et al. **Atlas climatológico do Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: EPAMIG, 1982. s.p.

CATALUNHA, M. J.; SEDIYAMA, G. C.; LEAL, B. G.; SOARES, C. P. B.; RIBEIRO, A. Aplicação de cinco funções densidade de probabilidade a séries de precipitação pluvial no estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 10, n. 1, p. 153-162, maio 2002.

CHAVES, H. M. L.; ROSA, J. W. C.; VADAS, R. G.; OLIVEIRA, R. V. T. 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. 43-52, jul./ago. 2002.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1988. 572 p.

COPASA - MG, 1998. Belo Horizonte. 264 p.

DAEE. **Regionalização hidrológica no Estado de São Paulo**. São Paulo: Águas e Energia Elétrica, 1988.

ELETROBRÁS. **Centrais Elétricas Brasileira. Metodologia para regionalização de vazões**. Rio de Janeiro, 1985. 2 v.

EUCLYDES, H. P. **Regionalização de vazões máximas e mínimas para a bacia do rio Juatuba-MG**. 1992. 66 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

EUCLYDES, H. P.; FERREIRA, P. A.; RUBERT, O. A. SANTOS, R. M. Regionalização hidrológica na bacia do Alto São Francisco a montante da barragem de Três Marias, MG. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 6, n. 2, p. 81-105, abr./jun. 2001.

FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS - CETEC.  
**Diagnóstico ambiental do estado de Minas Gerais.** Belo Horizonte: Cetec,  
1983. 158 p.

HAAN, C. T. **Statistical methods in hidrology.** 2. ed. Ames: The Iowa State  
University Press, 1979. 377 p.

KARAMOUZ, M.; SZIDAROVSKY, F. **Water resources systems analysis.**  
Boca Raton: CRC Company, 2003. 576 p.

KAVISKI, E. Vazões de estiagens em pequenas bacias hidrográficas do estado de  
Santa Catarina. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE HIDROLOGIA E  
RECURSOS HÍDRICOS, 5., 1983. Florianópolis. **Anais ...** Florianópolis:  
Associação Brasileira de Hidrologia e Recursos Hídricos, 1983. p. 43-67.

KONECNY, F.; NACHTNEBEL, H. P. Extreme value processes and the  
evaluation of risk in flood analysis. **Applied Mathematical Modelling**, Woburn,  
v. 9, n. 1, p. 11-15, 1985.

LANNA, A. E. Elementos de estatística e probabilidades. In: TUCCI, C. E. M.  
(Org.) **Hidrologia: ciência e aplicação.** 2. ed. Porto Alegre: ABRH/Editora  
UFRGS, 2001. p. 79-176.

LINSLEY, R. K.; FRANZINI, J. B. **Engenharia de recursos hídricos.** São  
Paulo: McGraw-Hill/USP, 1978. 798 p.

MATTOS, A. Método de previsão de estiagem em rios perenes . In: SIMPÓSIO  
BRASILEIRO DE HIDROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS , 5., 1983,  
Blumenau. **Anais...** Blumenau: Associação Brasileira de Recursos Hídricos,  
1983. p. 193-215.

RIGHETTO, A. M. **Hidrologia e recursos hídricos.** São Carlos: EESC/USP,  
1998. 840 p.

SILVA, J. T. N.; NOVO, V. L. T. Contribuição para o conhecimento das vazões  
mínimas na bacia hidrográfica do rio Capivari. In: CONGRESSO NACIONAL  
DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 8., 1988, Florianópolis. **Anais...**  
Florianópolis: ABID, 1988. p. 1069-1084.

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

SOUZA, S. M. T. de. *Deflúvios superficiais no estado de Minas Gerais*. Belo Horizonte: HIDROSISTEMAS, 1998. 264 p.

STATISTICAL ANALYSES SYSTEM. *Language guide for personal computers*. 6. ed. Cary: SAS Instituto, 1985. 429 p.

STRUPCZEWSKI, W. G.; SINGH, V. P.; MITOSEK, H. T. Non-stationary approach to at-site flood frequency modeling. III. Flood analysis of Polish rivers. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v. 249, n. 1/4, p. 152-167, Aug. 2001.

TUCCI, C. E. M. *Modelos hidrológicos*. Porto Alegre: Ed. Universidade, UFRGS/ABRH, 1998. 669 p.

TUCCI, C. E. M. Regionalização de vazões. In: TUCCI, C. E. M. (Org.) *Hidrologia: ciência e aplicação*. 2. ed. Porto Alegre: ABRH/Editora UFRGS, 2001. p. 573-620.

TUCCI, C. E. M.; ALBUQUERQUE, A. L.; SILVEIRA, G. L.; SANCHEZ, J. E. Estudo regional de vazões máximas e médias do Alto Paraguai. In: *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE HIDROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS*, 5., 1983, Florianópolis. *Anais...* Florianópolis: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1983. p.17-42.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. *Hidrologia aplicada*. São Paulo: McGraw Hill, 1975. 250 p.