**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Avaliação e nova proposta de regionalização hidrológica para o Estado de
São Paulo**

Wagner Wolff

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia
de Sistemas Agrícolas

**Piracicaba
2013**

Wagner Wolff
Engenheiro Florestal

Avaliação e nova proposta de regionalização hidrológica para o Estado de São Paulo

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **SERGIO NASCIMENTO DUARTE**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia
de Sistemas Agrícolas

**Piracicaba
2013**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - ESALQ/USP**

Wolff, Wagner

Avaliação e nova proposta de regionalização hidrológica para o Estado de São Paulo /
Wagner Wolff.- - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - -
Piracicaba, 2013.

111 p: il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2013.

1. Interpolação espacial 2. Momentos-L 3. Outorga 4. Regionalização hidrológica
I. Título

CDD 551.48
W855a

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

OFEREÇO, HOMENAGEIO E DEDICO.

A toda minha família e amigos que fazem parte deste sonho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, pela vida que tenho e pelos dons e graças fornecidas em todos os momentos.

Aos meus pais, Helio Ely Antunes Wolff e Verli Aparecida Rodrigues Wolff, pelo apoio e sacrifício para proporcionar a mim uma educação de qualidade, necessária para concluir os passos almejados nos estudos.

Aos meus irmãos Carmem Lídia, Carmem Lúcia, Helder e Sibele pela amizade e afeto em todos os momentos.

A todos os familiares, parentes e amigos pela ajuda e pelo incentivo.

Ao Prof. Dr. Sergio Nascimento Duarte, pela sua orientação e amizade no caminho desta etapa na vida.

Ao Prof. Dr. Olívio José Soccol, pelos ensinamentos na graduação, ajuda e apoio no seguimento da carreira acadêmica.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, da Universidade de São Paulo, pela oportunidade de estudo.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela concessão da bolsa de estudo.

Aos Professores Fernando Campos Mendonça, Luiz Roberto Moretti e Sílvio Frosini de Barros Ferraz, por suas cooperações, correções e pareceres no exame de qualificação.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Biosistemas da ESALQ/USP que colaboraram de forma expressiva para meu desenvolvimento científico e pessoal.

Aos colegas da Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas pelo agradável convívio durante o curso.

Aos amigos, Francisco Dirceu Duarte Arraes, pelos ensinamentos de programação em linguagem Visual Basic, e Rafael Mingoti pela ajuda e ensinamentos no uso de programas de SIG.

Afinal, a todos que, de alguma forma contribuíram para realização desta dissertação.

“Se pensas que a Alegria emana, apenas ou principalmente, das relações humanas estás errado. Deus colocou tudo á nossa volta. Está presente no tudo e no nada que possamos experimentar. O importante na vida não é necessariamente ser forte, é sentir-se forte”.

Christopher McCandless

SUMÁRIO

RESUMO	13
ABSTRACT	15
LISTA DE FIGURAS	17
LISTA DE TABELAS	19
LISTA DE SIGLAS	21
1 INTRODUÇÃO.....	23
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
2.1 Regionalização hidrológica	25
2.1.1 Conceitos e aplicações	25
2.1.2 Regiões homogêneas	27
2.2 Legislação brasileira sobre águas	28
2.2.1 Resumo dos principais marcos regulatórios	28
2.2.2 A Outorga do direito do uso da água	30
2.3 Momentos-L aplicados a Hidrologia	35
2.3.1 Medida de Discordância – Di	37
2.3.2 Medida de Heterogeneidade – H	39
2.4 Uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) em Hidrologia.....	41
2.5 Imagem do radar SRTM (“ <i>Shuttle Radar Topography Mission</i> ”).....	42
2.6 Geoestatística como ferramenta de análise espacial	42
2.7 Metodologia de regionalização hidrológica do Estado de São Paulo para os parâmetros $Q_{7,10}$, Q_{90} , Q_{95} e $\bar{Q}$	43
2.7.1 Vazão média plurianual	44
2.7.2 Curvas de Permanência.....	47
2.7.3 Vazões mínimas anuais de sete dias consecutivos (Q_7).....	48
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	53
3.1 Material.....	53
3.1.1 Caracterização física, hidrográfica e climatológica da área de estudo	53
3.1.2 Estações hidrométricas	53
3.1.3 Modelo digital de elevação (MDE)	55
3.2 Métodos	55
3.2.1 Fluxograma metodológico	55

3.3	Procedimentos metodológicos e técnicas computacionais utilizadas para geração dos mapas básicos e para a avaliação do modelo de regionalização hidrológica do Estado de São Paulo	57
3.3.1	Delimitação da área de drenagem e mensuração da precipitação média anual das bacias hidrográficas compreendidas pelas estações fluviométricas.....	57
3.4	Preenchimentos de falhas nas séries temporais de vazão.....	58
3.5	Cálculo das vazões estudadas por intermédio das estações fluviométricas	59
3.5.1	Cálculo da $Q_{7,10}$	59
3.5.2	Cálculo da Q_{90} , Q_{95} , $\bar{Q}$	60
3.6	Análise de consistência dos dados	62
3.7	Cálculo das vazões estudadas por intermédio do modelo de regionalização hidrológica do Estado de São Paulo.....	62
3.8	Análise estatística dos modelos.....	63
3.9	Regionalização hidrológica para o Estado de São Paulo, nova proposta.....	64
3.9.1	Interpolação espacial dos parâmetros da distribuição de probabilidade Log-normal 3P.	65
3.9.2	Desenvolvimento do aplicativo computacional para calcular o volume de um reservatório de regularização, vazões mínimas, médias e de permanência para o Estado de São Paulo	65
3.9.3	Delimitação das regiões hidrologicamente semelhantes, segundo a medida de heterogeneidade – H.....	69
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	70
4.1	Delimitação das bacias de drenagem	70
4.1.1	Interpolação espacial da precipitação média anual e cálculo da mesma para as bacias de drenagem	71
4.2	Resultados das vazões $Q_{7,10}$, Q_{90} , Q_{95} e $\bar{Q}$ calculadas por intermédio das estações fluviométricas.....	73
4.2.1	Resultado da $Q_{7,10}$	73
4.2.2	Resultados das vazões Q_{90} , Q_{95} e $\bar{Q}$	74
4.3	Análise de consistência dos dados de vazão	75
4.4	Comparação dos resultados das vazões de permanência por intermédio de dados diários e mensais	76

4.5	Avaliação do modelo de regionalização hidrológica do Estado de São Paulo (LIAZI et al., 1988).....	79
4.6	Nova proposta de regionalização hidrológica do Estado de São Paulo.....	81
4.6.1	Regiões hidrologicamente homogêneas do Estado de São Paulo	84
4.7	Estudo de caso: comparação entre os modelos de regionalização hidrológica para o Estado de São Paulo	86
5	CONCLUSÕES.....	89
	REFERÊNCIAS	91
	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	99
	APÊNDICES	101

RESUMO

Avaliação e nova proposta de regionalização hidrológica para o Estado de São Paulo

A regionalização hidrológica é uma técnica que permite transferir informação entre bacias hidrográficas semelhantes, a fim de calcular em sítios que não dispõem de dados, as variáveis hidrológicas de interesse; assim, a mesma caracteriza-se por ser uma ferramenta útil na obtenção de outorga de direitos de uso de recursos hídricos, instrumento previsto na Lei 9433/97. Devido à desatualização do modelo atual de regionalização hidrológica do Estado de São Paulo, proposto na década de 80, este estudo tem como objetivo geral avaliar se o mesmo está adequado ao uso, de acordo com a atualização de seu banco de dados, e propor um novo que supere as limitações do antigo. O estudo foi realizado no Estado de São Paulo, que tem área de aproximadamente 248197 km², localizado entre as longitudes -44° 9', e -53° 5', e entre as latitudes -22° 40', e -22° 39'. Utilizou-se, inicialmente, dados de 176 estações fluviométricas administradas pelo DAEE e pela ANA, disponíveis em <http://www.sigrh.sp.gov.br>. Determinou-se para as estações, a precipitação média anual da bacia hidrográfica ($\bar{P}$), a vazão média plurianual ($\bar{Q}$), a vazão mínima média de 7 dias seguidos com período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$) e as vazões com 90 e 95% de permanência no tempo (Q_{90} e Q_{95}). Posteriormente, fez-se análise de consistência excluindo as estações inconsistentes do estudo; assim, restaram 172 para serem utilizadas na avaliação do modelo e formulação de um novo. A avaliação do modelo fez-se pelo índice de confiança (c), que é definido pelo produto entre o coeficiente de correlação (r) e o índice de concordância (d), utilizando como valor de estimativa as vazões geradas pelo modelo, e como valor padrão as calculadas por intermédio das estações fluviométricas. Todas as vazões avaliadas foram classificadas como ótimas, com índice de confiança (c) acima de 0,85; assim, o atual modelo rejeitou a hipótese de que a atualização de seu banco de dados pudesse inferir em sua capacidade preditiva; portanto, o mesmo pode ser usado na obtenção das vazões estudadas que são referência na emissão de outorga em diferentes Estados do Brasil. Entretanto, o modelo apresentou algumas limitações, como extrapolação para áreas de bacias de drenagem menores do que as utilizadas para formulá-lo, e problemas em seu aplicativo computacional: o mesmo informa a precipitação média anual na coordenada geográfica do local de captação da água, e não da bacia de drenagem a montante do referido local. Neste enfoque, foi formulado um novo modelo, que superou as limitações e proporcionou capacidade preditiva maior que a do antigo.

Palavras-chave: Regionalização Hidrológica; Outorga; Momentos-L; Interpolação Espacial

ABSTRACT

Evaluation and new hydrologic regionalization proposal for the State of São Paulo

A hydrological regionalization is a technique that allows to transfer information between similar watersheds in order to calculate, in sites where there are no data on the hydrological variables of interest. This technique becomes a useful tool to ensure the rights of water resources use, instrument provided by Law 9433/97. Due to the outdated hydrological regionalization model of São Paulo State, proposed in the 1980's, this study aims to broadly assess whether the current model is appropriate to use, according to an analysis of its update database and to propose a new model to overcome the limitations of the current one. The study was conducted in State São Paulo with area of approximately 248197 km², located between longitudes -44 ° 9', and -53 ° 5', and between latitudes 40 ° -22' and -22 ° 39'. We used data from 176 initially gauged stations administered by ANA and DAEE available at <http://www.sigrh.sp.gov.br>, where it was determined to the stations, the average annual rainfall of the basin ($\bar{P}$) multiannual average streamflow ($\bar{Q}$), streamflow minimum average of 7 consecutive days with a return period of 10 years ($Q_{7,10}$) and streamflows with 90 and 95% of permanence in time (Q_{90} e Q_{95}). Afterwards, we analyzed the consistency excluding the inconsistent stations from the study, thus, remaining 172 to be used in the model evaluation and development of a new model. The model evaluation was made by the confidence index (c), which is the product between the correlation coefficient (r) and the agreement index (d), using as estimate value the streamflows generated by the model and as the standard value, the streamflows calculated through the gauged stations. All streamflows evaluated were classified as optimal, with confidence index (c) above 0.85, therefore, the current model rejected the hypothesis that upgrading the database could infer its predictive ability, so, it can be used to obtain the streamflows studied that refer to use grants in different States of Brazil. However, the model had some limitations, such as extrapolation to areas of smaller watersheds than those used to formulate it, and computer application problems, being that, it reports the average annual precipitation at the geographic coordinate at the local catchment water, not the watershed upstream of that location. A new model was formulated that surpasses the limitations and provides greater predictive ability than the current one.

Keywords: Hydrologic Regionalization; Grant; Moments-L; Spatial Interpolation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Critérios adotados para outorga de captação de águas superficiais pelos órgãos gestores de recursos hídricos. Fonte: adaptado de ANA (2007)	34
Figura 2 - Regiões hidrologicamente semelhantes do Estado de São Paulo. Fonte: (LIAZI et al., 1988).....	44
Figura 3 - Vazão média plurianual: Retas de Regressão. Fonte: (LIAZI et al., 1988).....	45
Figura 4 - Esquema para aplicação do método das isoietas	47
Figura 5 - Regiões semelhantes quanto as médias mínimas de 7 dias consecutivos (Parâmetro C). Fonte: (LIAZI et al., 1988)	50
Figura 6 – Localização das estações hidrométricas utilizadas no estudo	54
Figura 7 - Cenas das imagens de radar SRTM (“ <i>Shuttle Radar Topography Mission</i> ”), necessárias para cobrir a área de estudo. Fonte: (MIRANDA, 2005)	55
Figura 8 - Fluxograma metodológico, enfatizando o objetivo geral e os secundários. ¹ http://www.sigrh.sp.gov.br	56
Figura 9 – Modelo digital de elevação (MDE) do Estado de São Paulo	58
Figura 10 - Representação pela área hachurada em preto do volume a ser regularizado por um reservatório, a partir da Q_f , representada pela linha horizontal	68
Figura 11 – Hidrografia do Estado de São Paulo e bacias de drenagem das estações fluviométricas do DAEE	70
Figura 12 – Semivariograma experimental para a precipitação média anual do Estado de São Paulo	71
Figura 13 - Distribuição espacial para precipitação pluvial média anual no Estado de São Paulo obtida por meio da krigagem ordinária circular	72
Figura 14 – Curvas de permanência das estações fluviométricas 3D-006 e 3D-009	75
Figura 15 - Comparação da Q_{95} com dados mensais e diários, para as estações fluviométricas do Estado de São Paulo, com dados acima de 30 anos.....	78
Figura 16 - Gráficos de dispersão entre vazões calculadas pelo modelo de regionalização (ordenadas) e calculadas por meio das estações fluviométricas (abscissas). Em que $A = Q_{7,10}$, $B = \bar{Q}$, $C = Q_{90}$ e $D = Q_{95}$	80
Figura 17 – Interface do aplicativo computacional desenvolvido para o cálculo das vazões de referência e volume de regularização de um reservatório no Estado de São Paulo	82

Figura 18 - Gráficos de dispersão entre vazões calculadas pelo modelo de regionalização (ordenadas) e calculadas por meio das estações fluviométricas (abcissas). Em que $A = Q_{7,10}$, $B = \bar{Q}$, $C = Q_{90}$ e $D = Q_{95}$ 83

Figura 19 – Regiões hidrologicamente homogêneas, segundo a medida de heterogeneidade – H 85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Definição dos principais índices de vazão utilizados em Hidrologia e no processo de outorga	31
Tabela 2 - Valores Críticos de Di	38
Tabela 3 - Parâmetros Regionais: a e b (vazão média), e valores A e B, X_{10} e Parâmetro C (vazão mínima)	46
Tabela 4 - Classificação por meio do índice de confiança ou de desempenho(c)	63
Tabela 5 - Distribuições de probabilidade que obtiveram melhor ajuste aos valores de Q_7	73
Tabela 6 – Estações fluviométricas inconsistentes quanto à relação deflúvio/precipitação (Dp)	76
Tabela 7 – Teste t de “ <i>Student</i> ” (GOSSET, 1908) para os grupos de Q_{95} obtidos por dados médios mensais e médios diários.....	77
Tabela 8 - Classificação do modelo de regionalização hidrológica do Estado de São Paulo (LIAZI et al., 1988) de acordo com o índice de confiança (c)	79
Tabela 9 - Estatística de regressão e correlação de Spearman (1904) entre as vazões $Q_{7,10}$ e Q_{98}	83
Tabela 10 - Classificação do modelo proposto de acordo com o índice de confiança (c).....	84
Tabela 11 - Regiões hidrologicamente homogêneas, quanto à medida de heterogeneidade – H (HOSKING; WALLIS, 1997)	85
Tabela 12 – Comparação entre os modelos, com relação ao valor padrão calculado por intermédio dos dados da estação fluviométrica de Iporanga	86

LISTA DE SIGLAS

AAGISA - PB - Agência Águas Irrigação Saneamento do Estado da Paraíba;

ANA - Agência Nacional de Águas;

DAEE - SP - Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo;

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária;

GEV - Distribuição Generalizada de Eventos Extremos;

IEMA - ES - Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Espírito Santo;

IGAM - MG - Instituto Mineiro de Gestão das Águas;

MDE - Modelo Digital de Elevação;

MML - Método dos Momentos-L;

MVS - Método da Máxima Verossimilhança;

MPP - Momentos Ponderados por Probabilidade;

NASA - “*National Aeronautics and Space Administration*”;

NATURANTINS – TO - Fundação Natureza do Tocantins;

NERC - “*National Environmental Research Center*”;

NGA - “*National Geospatial Intelligence Agency*”;

PNMA - Política Nacional de Meio Ambiente;

PNRH - Política Nacional de Recursos Hídricos;

PNSB - Política Nacional de Segurança de Barragens;

RH 1.0 - “*software*” Regionalização Hidrológica versão 1.0;

SDS - SC - Secretaria de Estado do Desenvolvimento Sustentável do Estado de Santa Catarina;

SECTMA - PE - Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente do Estado do Pernambuco;

SEMA - RN - Secretaria de Estado dos Recursos Hídricos do Estado do Rio Grande do Norte;

SEMAR - PI - Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado do Piauí;

SEMARH - GO - Secretaria do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos do Estado de Goiás;

SEPLANTEC - SE - Secretaria de Estado do Planejamento de Sergipe;

SINGREH - Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos;

SNIRH - Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos;

SNISB - Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens;

SRH - BA Superintendência de Recursos Hídricos do Estado da Bahia;

SRTM - “*Shuttle Radar Topography Mission*”;

SUDENE - Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste;

SUDERHSA - PR - Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Estado do Paraná;

UTM - Universal Transversa de Mercator.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui cerca de 12% das reservas de água doce do planeta e apresenta avanços significativos na gestão de suas águas, como observado no ano de 2011, quando foram aprovadas e publicadas 907 resoluções referentes a gestão dos recursos hídricos (ANA, 2012). Essas resoluções foram, em sua maioria, relacionadas às concessões de outorgas de direito de uso de recursos hídricos, fundamentais para a adequação da gestão dos cursos d'água.

A principal referência para gestão de recursos hídricos no Brasil é a Lei nº 9433/97, (BRASIL, 1997), que estabelece a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos (SINGREH). Essa Lei firma princípios fundamentais para a gestão democrática das águas, ao considerar, dentre outros, os princípios da participação e descentralização na tomada de decisões. A Lei incorpora o princípio constitucional de que a água é um bem público e elege os planos de recursos hídricos como um dos instrumentos para a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos, prevendo sua elaboração para as bacias hidrográficas, para os estados e para o país.

Dentre os instrumentos estabelecidos pela PNRH, a outorga de direito de uso da água assume como escopo assegurar um controle quali-quantitativo dos usos da água, bem como garantir à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, adequando o padrão de qualidade aos respectivos usos (Lei n.º 9433, art. 11, BRASIL, 1997).

O Estado de São Paulo, por meio da Lei 9034/94 (SÃO PAULO, 1994), estabelece que a vazão de referência para orientar a outorga de direitos de uso de recursos hídricos é calculada com base na média mínima de 7 dias consecutivos e 10 anos de período de retorno ($Q_{7,10}$) e nas vazões regularizadas por reservatórios, descontadas as perdas por infiltração, evaporação ou por outros processos físicos, decorrentes da utilização das águas e das reversões de bacias hidrográficas. Estabelece ainda que, quando a soma das vazões captadas em uma determinada bacia hidrográfica, ou em parte desta, superar 50% da respectiva vazão de referência ($Q_{7,10}$), a mesma será considerada crítica e haverá gerenciamento especial.

Neste contexto, é de suma importância quantificar as vazões que servem de referência para a outorga de direito de uso de recursos hídricos; isto é possível com a coleta de dados das estações fluviométricas, embora as mesmas se localizem em seções específicas da hidrografia. Segundo Tucci (2009), a rede hidrométrica dificilmente cobrirá completamente a hidrografia, o que enfatiza a importância da implementação de métodos que permitam a otimização das informações. A regionalização hidrológica consiste em um conjunto de ferramentas que

exploram ao máximo os dados disponíveis, para estimar variáveis hidrológicas em locais sem dados ou com dados em quantidade insuficiente (TUCCI, 2002).

Desde 1980, o Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE) vem utilizando uma metodologia para estimar a disponibilidade hídrica de bacias hidrográficas do Estado, que não possuem dados hidrológicos observados. Essa metodologia, proposta por Liazi et al. (1988), foi formulada em uma época em que não havia a capacidade computacional que atualmente se dispõe, apresentando algumas limitações, como coeficientes generalizados para extensas áreas e uso de dados antigos, estes da década de 40 a 80. Assim, propõe nesse estudo, testar a hipótese de que o modelo de regionalização hidrológica do Estado de São Paulo (LIAZI et al., 1988), está apto a determinar as vazões de referência para emissões de outorga no Estado, de acordo com a atualização do banco de dados por meio do qual o modelo foi estabelecido. O objetivo geral desse estudo é avaliar a capacidade preditiva do modelo supracitado, inferir sobre suas limitações e sugerir um novo modelo que tenha vantagens de uso. Os objetivos secundários são:

- Determinar a precipitação média anual das bacias de drenagem das estações fluviométricas utilizadas no estudo;
- Analisar a consistência de dados das estações fluviométricas, administradas pelo DAEE e ANA;
- Desenvolver um modelo para regionalização de vazões no Estado de São Paulo; e
- Desenvolver um aplicativo computacional, para calcular as vazões de referência para outorga de direito de uso de recursos hídricos no Estado de São Paulo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Regionalização hidrológica

2.1.1 Conceitos e aplicações

Tem-se utilizado em Hidrologia o termo regionalização para denominar a transferência de informação entre locais com comportamentos hidrológicos semelhantes (TUCCI, 2009). Ainda segundo este autor, os dados hidrológicos passíveis de ser regionalizados são:

- Variáveis: a vazão média de longo termo, a precipitação média anual e a evapotranspiração potencial e real;
- Indicadores que representam o valor médio de dada variável ou uma proporção entre variáveis;
- Funções: curvas de permanência e de regularização, distribuições de probabilidades empíricas e teóricas de chuva, e descarga diárias máximas e mínimas anuais; e
- Parâmetros; sejam eles de modelos ou representantes de características das bacias hidrográficas.

A regionalização tem como princípio basear-se na semelhança espacial dessas informações, que permitam essa transferência. Dalrymple (1960), propôs, inicialmente, que as séries utilizadas necessitam ter períodos comuns de dados. Entretanto, diferentes autores como Hosking e Wallis (1997) defendem o conceito de que se as séries são homogêneas e representativas da variável em análise, é desnecessário o uso de períodos comuns.

Na necessidade de obtenção de informações rápidas, bem como na ausência de dados hidrológicos, usualmente utiliza-se metodologias simplificadas, como o uso de médias aritméticas e médias ponderadas, e simples interpolação linear de valores em pontos próximos de locais desejados para se determinar o valor procurado.

No caso da precipitação, é comum a utilização de médias ponderadas, polígonos de Thiessen ou mapas de isoietas. Em todos estes casos, uma boa cobertura de postos pode fornecer boas estimativas no local desejado. Entretanto, para o caso de vazões, a simples interpolação não fornece bons resultados. Esta variável está sujeita a diversas variáveis explicativas como a área, declividade, comprimento do talvegue principal, precipitação, entre outras.

Tucci (2002), apresenta as etapas recomendadas, para diferentes tipos de informações hidrológicas a serem regionalizadas:

- Definição dos limites da área a ser estudada;
- Determinação das variáveis dependentes e das explicativas envolvidas na regionalização;
- Seleção dos dados e cálculo de todas as variáveis; e
- Elaboração das relações regionais e definição das regiões com comportamento hidrológico semelhante.

No Brasil, tem-se observado um grande avanço nos estudos sobre regionalização hidrológica. Na década de 80 a Eletrobrás elaborou um documento intitulado Metodologia de Regionalização de Vazões, no qual adotou o método da curva adimensional regional, genericamente designado de método da cheia-índice ou “*index-flood*”, para regionalizar vazões (ELETROBRÁS, 1985; TUCCI, 2002). Esse método foi desenvolvido pelo “*National Environmental Research Center*” da Inglaterra na década de 70, baseado em uma extensa revisão sobre métodos estatísticos aplicados à hidrologia (NERC, 1975).

O método da curva adimensional regional foi utilizado por Silva et al. (2003) para a regionalização da curva de permanência, das vazões máximas, médias e mínimas, na bacia do rio Grande, situada no Estado do Paraná, evidenciando que as vazões foram melhor explicadas pela variação da área de drenagem.

Estudando o efeito de diferentes escalas cartográficas na determinação de características físicas da bacia do rio Paraíba do Sul, Baena et al. (2002), recomendaram que o uso da rede de drenagem em modelos de regionalização de vazões deveria ser evitado, devido a existência de uma influência significativa da escala na rede de drenagem, podendo ocasionar grandes incertezas na estimativa das vazões; os autores ilustraram também que a área de drenagem apresentou pequeno erro nas previsões.

Em estudo de regionalização de vazões de algumas sub-bacias do rio São Francisco, Ramech et al. (2003) sugeriram, além das variáveis físico-climáticas usualmente utilizadas em estudos de regionalização de vazões, a inserção de uma variável que representasse a permeabilidade do solo. Esta variável foi obtida por meio de mapas temáticos elaborados pela Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE), e sua inclusão melhorou significativamente o desempenho dos modelos. Assim, os autores chegaram à premissa de que a inserção de variáveis explicativas relacionadas com o processo de formação das vazões nos cursos d’água é relevante para estudos de regionalização.

Chaves et al. (2002) desenvolveram uma metodologia de interpolação e extrapolação de vazões mínimas, em um estudo de caso na bacia do Itapicuru, no Estado da Bahia, com

baixa densidade de postos hidrométricos. Os autores chegaram a conclusão de que este método apresentou um erro médio obtido entre os valores de Q_{90} calculados e os valores observados de 45,1%, o que foi expressivamente inferior ao obtido pelo método da curva adimensional (289,7%). No caso do coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (1970), este foi superior ($E = 0,88$), em comparação ao do método tradicional ($E = 0,73$).

Em contrapartida, no estudo de regionalização de vazões realizado em uma sub-bacia do rio Paraná, feito por Azevedo (2004), comparando diferentes metodologias, entre elas a proposta por Chaves et al. (2002), o autor concluiu que o melhor método foi o que baseia-se na utilização de equações de regressão regionais, com erro relativo médio de 13,58%, e coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (1970) médio de 0,97; enfatizou, assim, a importância de se avaliar a metodologia aplicada, devido a peculiaridade de diferentes bacias.

Euclides (1992), em um estudo realizado na sub-bacia do rio Juatuba, afluente do rio Paraopeba, em Minas Gerais, desenvolveu uma metodologia que regionaliza a vazão com um determinado risco. A partir deste estudo foi possível o desenvolvimento do “*software*” RH 1.0, que se tornou um marco na regionalização hidrológica mineira; a mesma encaminha-se para sua terceira atualização, bem como a do “*software*” RH para a versão 5.0. O Estado de Minas Gerais é, sem dúvida, o mais evoluído no que se refere à gestão de recursos hídricos no Brasil. O Atlas Digital das Águas de Minas, desenvolvido por Euclides et al. (2005) reúne informações sobre os recursos hídricos superficiais das 17 regiões hidrográficas do Estado de Minas Gerais e o mapeamento dos cursos de água com baixa capacidade de regularização natural do Estado.

A etapa relativa ao estabelecimento de regiões hidrologicamente homogêneas não é essencialmente realizada junto ao cálculo das funções regionais, devido à variedade de métodos existentes para tal fim. Conquanto haja diferentes técnicas para regionalização hidrológica, o escopo central é permitir a aquisição e previsão de informações em sítios sem monitoramento fluviométrico e/ou climatológico ordenado.

2.1.2 Regiões homogêneas

O conceito de regionalização está conectado ao de regiões homogêneas, isto é, aquelas que exibem comportamento hidrológico similar, que por sua vez é função da reunião de fatores climáticos e físicos.

Tucci et al. (1995), utilizaram o método dos resíduos, que consiste em avaliar o comportamento dos resíduos de equações de regressão, no intuito de delimitar regiões

homogêneas da bacia hidrográfica do Alto Paraguai e de parte do Rio Grande do Sul. No entanto, Wiltshire (1986) enfatiza que a delimitação de regiões homogêneas por este método apresenta características das bacias hidrográficas não análogas quanto à geomorfologia e aos regimes hidrológicos.

Com o passar dos anos desenvolveram-se inúmeros métodos para definir e delimitar uma região homogênea, a maior parte deles com caráter subjetivo. Naghettini e Pinto (2007) forneceram uma coleção dos mesmos, mostrando que não há conformidade quanto à sua utilização. Entretanto, destaca-se a medida de heterogeneidade – H , proposta por Hosking e Wallis (1997), classificada como uma metodologia objetiva. Esta metodologia visa à constituição de regiões homogêneas a partir do agrupamento de postos de monitoramento em um ou mais grupos, de forma que uma dada estatística local extrapole ou não um valor limite, atribuído de modo a minimizar algum critério de heterogeneidade dentro dos grupos. Essa metodologia fundamenta-se em esperar que todas as áreas contribuintes tenham os mesmos momentos- L populacionais, embora seus momentos- L amostrais sejam diferentes, devido à variabilidade natural.

Como se deve predefinir as regiões homogêneas, a fim de aplicar a medida de heterogeneidade H , Hosking e Wallis (1997) defendem que seja utilizada, de antemão, o método subjetivo, análise de clusters, e fazem em sua obra uma série de recomendações para sua aplicação à análise de frequência.

Em estudos realizados na regionalização de bacias hidrográficas do Estado de Indiana nos Estados Unidos, Rao e Srinivas (2006) utilizaram o algoritmo de agrupamento “*Fuzzy*” (FCA) atrelado a medida de heterogeneidade – H ; esses autores ilustram que os aglomerados difusos derivados da (FCA) geralmente não são hidrológicamente homogêneos, enfatizando o uso da medida de heterogeneidade - H no ajuste das regiões semelhantes.

Mais tarde, Sadri e Burn (2011), utilizando o procedimento “*Fuzzy C-Means*” (FCM) na delimitação de regiões homogêneas nas províncias canadenses de Alberta, Saskatchewan e Manitoba, chegaram à mesma premissa, comprovando a importância desta metodologia no auxílio à delimitação de regiões homogêneas.

2.2 Legislação brasileira sobre águas

2.2.1 Resumo dos principais marcos regulatórios

O primeiro marco legal da Gestão das Águas, o chamado de Código de Águas, surgiu com o Decreto nº 24643 de 10/07/34 (BRASIL, 1934). Apesar de ser antigo, ainda faz parte da legislação fundamental brasileira de águas naquilo que não conflita com a Constituição de 1988 (BRASIL, 1988) ou com a Lei nº 9433 de 08/01/97 (BRASIL, 1997) e Lei nº 9984 de 17/07/2000 (BRASIL, 2000). Dentre seus artigos, vale ressaltar os ainda atuais, art. 43, 46, 48, 49, 52, 109, 110, 111 e 112. Nestes, há a previsão da necessidade de autorização (outorga) para uso da água, com prazo restrito, bem como do pagamento pelo uso, e de situações em que o poluidor necessitará ressarcir pelos danos que causar a terceiros.

Com a promulgação da Constituição Federal de 1988 (BRASIL, 1988), questões básicas relativas à água foram implantadas (todos os corpos d'água passaram a ser de domínio público, sendo considerados como bens do Estado ou da União - artigos 20; 26 e 176); estabeleceu-se o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH) (art. 21, 22, 23, 24, 30, 165, 182 e 225).

A Política Nacional de Meio Ambiente (PNMA), expressa pela Lei nº 6938 de 31/8/81 (BRASIL, 1981), caracteriza a água como recurso ambiental. Esta Lei foi regulamentada pelo Decreto nº 97632 de 10/4/89 (BRASIL, 1989a) e Decreto nº 99274 de 6/6/90 (BRASIL, 1990a) e alterada em sua redação pela Lei nº 7804 de 18/7/89 (BRASIL, 1989b) e Lei nº 8028 de 12/4/90 (BRASIL, 1990b). Nesta Lei, em seus dispositivos regulamentadores, existem pelo menos quatro instrumentos previstos que incidem sobre o uso da água. São eles: Padrões de Qualidade Ambiental, Avaliação de Impacto Ambiental, Zoneamento Ambiental e Licenciamento de atividades efetivas ou potencialmente poluidoras.

A Política Nacional de Irrigação é outro instrumento legal consubstanciado pela Lei nº 6662 de 25/6/79 (BRASIL, 1979), que foi regulamentada pelo Decreto nº 89496 de 29/3/84 (BRASIL, 1984). O art. 21 desta Lei estabelece que: a utilização de águas públicas, para fins de irrigação e atividades decorrentes, dependerá de pagamento a ser fixado de acordo com a sistemática estabelecida em regulamento. (BRASIL, 1979). A Lei nº 9433/97 (BRASIL, 1997), ratificada pelo Presidente da República em 8 de janeiro de 1997, estabelece a Política Nacional de Recursos Hídricos e o SINGREH. Esta constitui um marco para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos no Brasil, por estar embasada em princípios básicos, norteadores da gestão das águas no âmbito mundial. Tais princípios se apresentam de forma resumida:

- A bacia hidrográfica é a unidade de planejamento e gestão dos recursos hídricos;
- Todos os setores usuários de água têm igual acesso ao uso deste recurso;

- A água é um bem finito e vulnerável;
- A gestão dos recursos hídricos deve ser descentralizada e participativa.

Inspirado no modelo francês, a legislação brasileira sobre recursos hídricos é um modelo ambicioso de gestão; de acordo com esta Lei, as decisões sobre os usos dos rios em todo o País serão tomadas pelos Comitês de Bacias Hidrográficas, que são compostos por representantes da sociedade civil, dos estados e dos municípios.

Em seu art. 5º, a Lei nº 9433/97 (BRASIL, 1997) elenca os instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos, quais sejam:

- Os Planos de Recursos Hídricos;
- O enquadramento dos corpos de água em classes, segundo os usos preponderantes da água;
- A outorga dos direitos de uso de recursos hídricos;
- A cobrança pelo uso de recursos hídricos;
- A compensação a municípios;
- O sistema de Informações sobre Recursos Hídricos.

Simultaneamente, os Estados e o Distrito Federal foram estabelecendo suas legislações, em caráter complementar e específico, naquilo que lhes incumbia. O Estado de São Paulo, pioneiro no País, teve aprovado a sua Lei nº 7663, em 30 de dezembro de 1991 (SÃO PAULO, 1991). Posteriormente, pela Lei Estadual nº. 9034 de 1994, criou-se as Unidades Hidrográficas de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI), em que se instituiu a base territorial para o sistema de gerenciamento dos recursos hídricos, repartindo o território do Estado de São Paulo em 22 sub-bacias hidrográficas.

Em 17 de julho de 2000, foi sancionada a Lei nº 9.984 (Brasil, 2000), que criou a Agência Nacional de Águas (ANA), entidade federal responsável pela implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e pela coordenação do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), como parte integrante do SINGREH.

Com a criação da Lei nº 12334/2010 (Brasil, 2010), compete a ANA à atribuição de organizar, implantar e gerir a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), criados pela respectiva Lei.

2.2.2 A Outorga do direito do uso da água

Recentemente, a água se destaca como prioridade dentro do conjunto dos recursos naturais estratégicos, pela maioria dos governos e por grande número de agências

internacionais. O gerenciamento de recursos hídricos visa solucionar conflitos resultantes do uso veemente da água, resultado do crescimento econômico e populacional, assim como certificar que a água, recurso natural, finito e insubstituível à vida, permaneça com oferta apropriada e mantenha as funções hidrológicas, químicas e biológicas dos ecossistemas.

Terceiro dos instrumentos da Lei nº 9433/97 (BRASIL, 1997), a outorga dos direitos do uso dos recursos hídricos visa dar suporte ao gerenciamento do recurso hídrico, posto que, atribui ao usuário o quanto possa derivar, determinando volumes de água para atender suas necessidades. Para a instrução de um processo de outorga, é necessária a confrontação de duas grandezas basais: a disponibilidade hídrica (oferta) e a demanda. A demanda pode ser avaliada a partir do cadastramento de usuários, dinâmico e contínuo no tempo. A disponibilidade hídrica varia no tempo e no espaço, e é estimada a partir da avaliação do regime hidrológico da bacia. Esta é a informação basal de apoio à decisão e possui diversas explanações, função de particularidades ambientais, sociais, jurídicas e econômicas de cada região.

A vazão de referência é o valor de vazão que passa a representar o limite superior de utilização da água em um curso d'água e, também, é um dos principais entraves à implementação de um sistema de outorga (RIBEIRO, 2000; CÂMARA, 2003). A aplicação do critério de vazão de referência, segundo Harris et al. (2000), constitui-se em procedimento adequado para a proteção dos rios, pois as alocações para derivações são feitas, geralmente, a partir de uma vazão de base de pequeno risco. Está resumidamente descrito na Tabela 1, as variáveis de vazões utilizadas para outorga e gestão dos recursos hídricos.

Tabela 1 - Definição dos principais índices de vazão utilizados em Hidrologia e no processo de outorga

(continua)	
Nome	Descrição
Vazão mensal ($\overline{Q}_{\text{mes}}$).	Média mensal das vazões diárias para determinado mês.
Vazão média de longo período ($\overline{Q}$).	Média aritmética dos valores de vazão média anual. Não tem como objetivo o dimensionamento de sistemas de captação de água ou obras hidráulicas, entretanto, é uma das variáveis fundamentais nas funções de regionalização para a estimativa das vazões mínimas.
Vazão específica média ($\overline{Q}_{\text{esp}}$).	Essa é estimada pela relação entre a vazão média de longo período ($\overline{Q}$) e a respectiva área de drenagem (km ²).

Tabela 1 - Definição dos principais índices de vazão utilizados em Hidrologia e no processo de outorga

(conclusão)	
Nome	Descrição
Vazão mínima.	Ocorre nos períodos de estiagem. Nesse período, a vazão dos cursos d'água é mantida pelo lençol freático, por não haver contribuição das chuvas. A tendência das vazões de estiagem é de diminuir continuamente enquanto não houver a recarga das reservas do subsolo pelas chuvas, processo que pode ser acelerado pelas perdas por evaporação na bacia, pela retirada de água para fins de irrigação, para o uso humano, e pela infiltração no leito de escoamento.
Vazões com 95%, 90% e 98% de permanência (Q ₉₅ , Q ₉₀ e Q ₉₈).	Representa a vazão que é superada ou igualada em 95%, 90% e 98% do tempo, respectivamente. É considerada uma vazão de estiagem.
Vazão mínima de 30 dias de duração com dada probabilidade de ocorrência (Q _{30,T}).	Representa o menor valor da média móvel de 30 dias consecutivos ao longo do ano. Esse valor de vazão mínima é associado à probabilidade de ser igualado ou inferiorizado de modo recorrente para um determinado intervalo de tempo (tempo de retorno, T).
Vazão mínima ecológica ou vazões naturais, ou de preservação ambiental (Q _{7,10}).	São as vazões mínimas necessárias para garantir a sobrevivência dos ecossistemas, inclusive o aquático, garantindo à preservação da flora e fauna a jusante nos períodos de estiagem. Atualmente, adota-se como valor dessa vazão mínima a média das menores vazões anuais com 7 dias consecutivos para um período de retorno de 10 anos.

Fonte: Adaptado de Schmidt (2007).

Neste ponto de vista, observam-se as difusas interpretações sobre o conceito de disponibilidade hídrica, uma das muitas variáveis a serem consideradas na atividade de gerenciamento dos recursos hídricos.

No Brasil, cada Estado tem adotado critérios específicos para o estabelecimento das vazões mínimas de referência para a concessão de outorga, sem, entretanto, apresentar justificativas para a adoção desses valores (CRUZ, 2001).

A fragmentação na gestão dos recursos hídricos dificulta a conexão das informações, uma vez que os órgãos gestores seguem distintas vazões de referência (Figura 1), percentuais outorgáveis e formulários para requerimento de outorga, quando a bacia hidrográfica é que deveria ser a unidade de planejamento e gestão, como estabelecido pela Lei nº 9433/97 (BRASIL, 1997).

Apesar da diversificação dos critérios utilizados para avaliação dos pedidos de outorga, tem-se adotado pelos órgãos gestores a vazão mínima com sete dias de duração e recorrência de dez anos ($Q_{7,10}$) ou a vazão associada às permanências de 90% (Q_{90}) ou 95% (Q_{95}) como valores de referência para o processo de outorga, sendo disponibilizado apenas um percentual destas vazões mínima de referência (ANA, 2007).

Figura 1 - Critérios adotados para outorga de captação de águas superficiais pelos órgãos gestores de recursos hídricos. Fonte: adaptado de ANA (2007)

2.3 Momentos-L aplicados a Hidrologia

Os fenômenos hidrológicos podem ser associados a um caráter probabilístico, quando assumidos como aleatórios. Com relação ao seu comportamento, ressalta-se que, continuamente, haverá uma probabilidade de um dado evento hidrológico ser inferior ou superior a um valor histórico já registrado. Para o entendimento das variáveis hidrológicas isto se torna essencial, uma vez que esta é uma das funções basais da Hidrologia, que consiste em observar os eventos e modelar as frequências de ocorrência, permitindo que sejam feitas previsões que assumam determinados riscos.

Na maioria das vezes, as variáveis hidrológicas são consideradas contínuas, ou seja, variáveis que em conceitos físicos existem sucessivamente no tempo. As distribuições são aplicadas em termos estatísticos, sendo que modelam este caráter, trabalhando com cálculos de áreas sob a curva de distribuição de probabilidades, abaixo ou acima de determinado valor de importância prática ou entre valores. Neste caso, é importante determinar a probabilidade de um evento ser maior ou menor que um valor específico, ou estar entre 2 valores específicos. Este entendimento é essencial para aplicação das distribuições de probabilidades aos fenômenos hidrológicos.

O método dos momentos-L (MML) tem sido proposto para o cálculo dos parâmetros das principais distribuições de probabilidades utilizadas em estudos hidrológicos, bem como no auxílio ao tratamento de consistência de dados e à análise regional. O método dos momentos-L produz estimadores de parâmetros análogos, em qualidade, àqueles produzidos pelo método da máxima verossimilhança (MVS), com a vantagem de exigirem um menor esforço computacional para a solução de sistemas de equações menos complexas. Para pequenas amostras, os estimadores MML são, com alguma assiduidade, mais acurados do que os de MVS (NAGHETTINI; PINTO, 2007).

As distribuições de probabilidade de dois e três parâmetros mais indicadas e utilizadas em Hidrologia, no estudo de eventos de valores extremos, são do tipo I. (Gumbel), do tipo II. (Fréchet) e do tipo III. (Weibull), além da distribuição generalizada de eventos extremos (GEV). Segundo Naghettini e Pinheiro (1998), outros modelos não-extremos tem relevância, como a distribuição Log-normal, Pearson Tipo III e Log-Pearson Tipo III, bem como as distribuições de quatro parâmetros, como a Kappa, ou de cinco parâmetros, como as distribuições Wakeby e Boughton.

A estimação de parâmetros pelo método MML consiste em igualar os momentos-L populacionais aos momentos-L amostrais. O resultado dessa operação produzirá as

estimativas dos parâmetros da distribuição de probabilidade desejada. Hosking (1986) empregou a teoria dos momentos ponderados por probabilidade (MPP), introduzida por Greenwood et al. (1979), para determinar os momentos-L.

Os momentos-L de ordem r , denotados por λ_r , podem ser escritos como combinações lineares dos correspondentes MPPs, sendo esses denotados por β_r , e determinados por intermédio da subsequente fórmula matemática:

$$\beta_r = E\{X[F(X)]^r\} \quad (1)$$

Os momentos-L representam medidas de posição, escala e forma das distribuições de probabilidade, similar aos momentos convencionais; entretanto, são estimadas por ajustes lineares da assimetria, da curtose e do coeficiente de variação. Compõem um sistema de medidas estatísticas mais confiáveis para definição das características das distribuições de probabilidades.

Os quatro primeiros estimadores dos momentos-L podem ser calculados em relação aos estimadores de MPP por:

$$\hat{\lambda}_1 = \hat{\beta}_0 \quad (2)$$

$$\hat{\lambda}_2 = 2\hat{\beta}_1 - \hat{\beta}_0 \quad (3)$$

$$\hat{\lambda}_3 = 6\hat{\beta}_2 - 6\hat{\beta}_1 - \hat{\beta}_0 \quad (4)$$

$$\hat{\lambda}_4 = 20\hat{\beta}_3 - 30\hat{\beta}_2 - 12\hat{\beta}_1 - \hat{\beta}_0 \quad (5)$$

Em que $\hat{\beta}_r$ representa um estimador de MPP, não tendencioso, para uma dada amostra ordenada $\{X_n \leq X_{n-1} \leq \dots \leq X_1\}$ de tamanho n . Convencionalmente:

$$\hat{\beta}_r = \frac{1}{r+1} \sum_{j=1}^{n-r} \frac{\binom{n-j}{r}}{\binom{n}{r+1}} \quad (6)$$

Para:

$$r \leq n-1$$

As medidas de forma de uma distribuição de probabilidade podem ser interpretadas pelos momentos-L e suas respectivas razões. Por exemplo: λ_1 é a medida de tendência central, λ_2 uma medida de dispersão, a razão $CV-L = \lambda_2 / \lambda_1$ é análoga ao coeficiente de variação convencional, e as razões $\tau_3 = \lambda_3 / \lambda_2$ e $\tau_4 = \lambda_4 / \lambda_2$ representam medidas de assimetria e curtose, respectivamente. Comparados aos momentos convencionais, os momentos-L, devido à sua própria formulação, fornecem estimativas mais robustas dos parâmetros e quantis de distribuições de uma variável aleatória.

Hosking e Wallis (1997) empregaram o método da cheia índice (“*index-flood*”), proposto por Dalrymple (1960), juntamente com os momentos-L e as razões de momentos-L de vários locais de uma mesma região, para indicar uma série de estatísticas auxiliares para a avaliação dos diversos estágios da análise regional, tais como consistência de dados, e identificação de regiões homogêneas. Essas estatísticas encontram-se descritas nos tópicos a seguir.

2.3.1 Medida de Discordância – Di

Em todas as análises estatísticas, a primeira etapa que se deve considerar é a consistência dos dados disponíveis. Para isso, Hosking e Wallis (1997) descreveram uma estatística baseada em momentos-L, designada medida de discordância - Di. Assim, dado um grupo de estações, o objetivo é identificar as que produzem dados grosseiramente discordantes dos outros observados na região. Em termos formais, as razões de momentos-L de um local i: CV-L, assimetria-L e curtose-L, são considerados como um ponto em um espaço tridimensional. Seja u_i um vetor (3x1) contendo essas razões-L, dado por:

$$u_i = \left(\tau^{(i)} \quad \tau_3^{(i)} \quad \tau_4^{(i)} \right)^T \quad (7)$$

Em que τ , τ_3 e τ_4 denotam CV-L, assimetria-L e curtose-L respectivamente, e T indica matriz transposta. Seja $\bar{u}$ um vetor (3x1), da média aritmética simples, de u_i para todos os postos em estudo:

$$\bar{u} = N^{-1} \sum_{i=1}^N u_i \quad (8)$$

$$\bar{u} = \left(\tau^{(r)} \tau_3^{(r)} \tau_4^{(r)} \right)^T \quad (9)$$

Em que:

N representa o número de locais da região r considerada. Sendo assim, a matriz de covariância amostral é dada por:

$$S = (N-1)^{-1} \sum_{i=1}^N (u_i - \bar{u}) (u_i - \bar{u})^T \quad (10)$$

A medida de discordância D_i foi definida por Hosking e Wallis (1997) para dado local i, como:

$$D_i = \frac{N}{3(N-1)} (u_i - \bar{u})^T S^{-1} (u_i - \bar{u}) \quad (11)$$

Segundo Hosking e Wallis (1997), em regiões com número de locais muito restringidos, a estatística D_i não é informativa. Por exemplo, para $N < 3$, a matriz de covariância S é singular, e o valor de D_i não pode ser calculado. Para $N = 4$, $D_i = 1$ e, para $N = 5$ ou $N = 6$, os valores de D_i , como indicado na Tabela 2, são bastante próximos do seu limite algébrico. Assim, os autores aconselharam o uso de D_i somente quando N for > 7 .

Tabela 2 - Valores Críticos de D_i
(continua)

Nº de locais na região	D_i Crítico.
5	1,333
6	1,648
7	1,917
8	2,140
9	2,329
10	2,491
11	2,632

Tabela 2 - Valores Críticos de Di
(conclusão)

Nº de locais na região	Di Crítico.
12	2,757
13	2,869
14	2,971
≥15	3

Fonte: Hosking e Wallis (1997).

2.3.2 Medida de Heterogeneidade – H

O escopo desta estatística, denominada por H, é verificar o grau de heterogeneidade de uma região. Hosking e Wallis (1997) advertem, entretanto, que uma região deve ser considerada homogênea com base, sobretudo, em suas características de uniformidade física ou geográfica, e não somente com base nos valores de H.

Em outras palavras, a estatística não deve prevalecer sobre os argumentos baseados em dados físicos ou geográficos. De acordo com Hosking e Wallis (1997), em uma região homogênea, todos os postos com as séries de valores de alguma variável hidrológica na forma adimensional dispõem dos mesmos momentos populacionais. Contudo, devido à variabilidade amostral, os seus momentos amostrais diferem. A estatística H compara essa variabilidade amostral observada com uma variabilidade esperada para uma região homogênea.

Hosking e Wallis (1997) aconselham o cálculo da dispersão das regiões, proposta e simulada, por intermédio do coeficiente de variação-L amostral τ . Consideram, portanto, a medida da variância V, como uma medida de dispersão, ponderada pelo tamanho das séries, por meio da seguinte equação:

$$V = \frac{\sum_{i=1}^N n_i (\tau^{(i)} - \bar{\tau})^2}{\sum_{i=1}^N n_i} \quad (12)$$

Para simular a região homogênea, Hosking e Wallis (1997) aconselham a utilização da distribuição Kappa de quatro parâmetros, pela sua maior flexibilidade e, ainda, para desviar-se do comprometimento prévio com uma distribuição particular de dois ou três parâmetros. Por outro lado, se não for possível ajustar essa distribuição aos momentos-L médios regionais, isto

é, se τ_4 for muito maior que τ_3 , recomendam o uso da distribuição Logística Generalizada na simulação, sendo esta distribuição um caso particular da distribuição Kappa.

As equações da função acumulada, da função densidade de probabilidade e de sua inversa, relativas à distribuição Kappa de quatro parâmetros, são apresentadas por Hosking e Wallis (1997), como se segue:

$$F(x) = \left\{ 1 - h \left[1 - \frac{k(x-\xi)}{\alpha} \right]^{\frac{1}{k}} \right\}^{\frac{1}{h}} \quad (13)$$

$$f(x) = \alpha^{-1} \left\{ \left[1 - \frac{k(x-\xi)}{\alpha} \right]^{\frac{1}{k}} [F(x)]^{1-h} \right\} \quad (14)$$

$$x(F) = \xi + \frac{\alpha}{k} \left\{ 1 - \left[\frac{1 - (F(x))^h}{h} \right]^k \right\} \quad (15)$$

Em que, ξ é o parâmetro de posição, α o parâmetro de escala e k e h os parâmetros de forma. Fazendo-se $h = 1$, têm-se as equações da distribuição Logística Generalizada.

Os parâmetros da população Kappa são estimados por intermédio dos momentos-L regionais, ou seja, pela média ponderada dos valores observados, ou $1, \bar{\tau}, \bar{\tau}_3, \bar{\tau}_4$. Na sequencia, são gerados N_{SIM} conjuntos de séries de n_i valores para a variável normalizada em cada local; posteriormente, calculam-se as estatísticas V_j ($j = 1, 2, \dots, N_{SIM}$) para cada conjunto, por meio da Equação (12). Hosking e Wallis (1997) indicam que se faça um número mínimo de simulações, N_{SIM} , igual a 500.

A média aritmética das estatísticas V_j , obtidas por simulação, fornecerá a dispersão média esperada na região:

$$\mu_{sim} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{sim}} V_{sim}}{N_{sim}} \quad (16)$$

A medida de heterogeneidade, H , confronta a dispersão observada com a simulada:

$$H = \frac{V - u_{sim}}{\sigma_{sim}} \quad (17)$$

Em que, σ_{sim} é o desvio padrão entre os N_{sim} valores da medida de dispersão V_{sim} :

$$\sigma_{sim} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_{sim}} (V_{sim} - u_{sim})^2}{N_{sim} - 1}} \quad (18)$$

Hosking e Wallis (1997) indicam o seguinte critério de classificação:

$ H < 1,0 \rightarrow$	Região “aceitavelmente homogênea”
$1,0 \leq H < 2,0 \rightarrow$	Região “possivelmente heterogênea”
$ H > 2,0 \rightarrow$	Região “definitivamente heterogênea”

2.4 Uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) em Hidrologia

Na década de 60 apareceu o primeiro sistema de informações geográficas (SIG), desenvolvido no Canadá (CÂMARA; DAVIS, 2002), por intermédio de um programa governamental, com escopo de criar um inventário de recursos naturais. Contudo, havia grande dificuldade de utilizar este sistema, visto que os computadores desenvolvidos na época eram muito caros, com capacidade de armazenamento e velocidade de processamento muito baixo, não existiam monitores gráficos de alta resolução, e, além disso, a mão-de-obra tinha que ser altamente especializada e era onerosa.

Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) permitem a integração dos dados que caracterizam a variabilidade espacial da bacia hidrográfica num único sistema; por isso, em um plano conceitual, pode afirmar-se que os SIG são capazes de apoiar estudos hidrológicos. Eles facilitam a obtenção, de uma série de informações, estas que serão decisivas para a tomada de medidas durante a fase de planejamento e gestão das atividades inseridas na bacia hidrográfica.

Uma das aplicações principais de um SIG em Hidrologia é a de transformar dados numéricos obtidos em estações meteorológicas com coordenadas conhecidas (georreferenciadas), em mapas contínuos, a partir das informações originais (este processo é denominado interpolação). Transformam-se assim, dados discretos em uma superfície

contínua de valores estimados, gerando informações a respeito do comportamento espacial da variável em escala local, regional ou estadual, variando no tempo (CÂMARA; MEDEIROS, 1998).

2.5 Imagem do radar SRTM (“*Shuttle Radar Topography Mission*”)

As imagens de radar vêm sendo utilizadas cada vez mais em estudos de diferentes áreas, tais como: zoneamentos agrícolas, monitoramento ambiental, análise meteorológica, modelagem hidrológica, programas de manejos de bacias hidrográficas, entre outras. A imagem de radar SRTM é oriunda da missão de mapeamento do relevo terrestre SRTM (“*Shuttle Radar Topography Mission*”), desenvolvido pela NASA (“*National Aeronautics and Space Administration*”) e NGA (“*National Geospatial- Intelligence Agency*”) dos Estados Unidos no ano 2000. Os resultados dessas missões internacionais permitiram a disponibilização de um modelo digital de elevação (MDE) com boa resolução (90 m) para toda a América do Sul (SOUZA FILHO, 2003).

Os MDEs foram gerados por interferometria de radar, a qual se utiliza das respostas espectrais na faixa de micro-ondas do espectro eletromagnético, permitindo a aquisição de informações sobre a estrutura tridimensional dos alvos na imagem; no caso da SRTM, o relevo. Tanto Rabus et al. (2003) como Foni e Seal (2004) apontam que os MDEs gerados pela SRTM apresentam uma boa acurácia, com cerca de 90% de confiança. Atualmente, a EMBRAPA Monitoramento por Satélite desenvolveu uma metodologia para restaurar a base numérica de dados do relevo do Brasil, adquirido pela nave espacial americana na missão conhecida como SRTM. Esse arquivo de base foi tratado matematicamente por intermédio de modelos que visam reconstituir o relevo do país, como nas cartas topográficas, só que de forma homogênea e digital (MIRANDA, 2005). A espacialização da temperatura média do ar, por meio de um sistema de informações geográficas, empregando um modelo digital de elevação, permitiu a obtenção de um mapa com maior fidelidade e riqueza de detalhe, em semelhança ao comportamento dessa variável meteorológica constatada em condição de campo (MEDEIROS et al., 2005).

2.6 Geoestatística como ferramenta de análise espacial

A Geoestatística está agregada a um grupo de técnicas utilizadas que permitem analisar e concluir sobre uma variável distribuída no espaço ou no tempo. Ortiz Valencia et al.

(2004) deliberam sobre a Geoestatística como sendo um conjunto de métodos estatísticos apropriados para avaliar um atributo de um elemento que tem distribuição ininterrupta sobre uma área geográfica. Distintas áreas das Ciências Agrárias têm se favorecido de averiguações científicas com ênfase na Geoestatística.

Tanto Vieira (1997) como Souza et al. (1998) apontam que a Geoestatística permite o mapeamento, a quantificação e a modelagem de fenômenos sucessivos, por intermédio da interpolação dos pontos amostrados; Felgueiras (1999) infere sobre a caracterização dos parâmetros morfológicos, como altimetria e textura; e ainda, Campos et al. (2008) conclui a respeito de recomendações de adubação. Essa técnica facilita o mapeamento de variáveis climatológicas basais como pluviosidade e temperatura (VALERIANO; PICINI, 2003), e o mapeamento de processos hidrológicos (KITANIDIS et al., 1988).

É importante apontar que a Geoestatística não se refere a um tipo especial, diferente ou alternativo, de estatística. A média e desvio-padrão são parâmetros empregados pela Estatística Clássica para representar fenômenos; esta se baseia na hipótese principal de que as modificações de um local para outro são aleatórias e independentes da posição espacial dos valores amostrais (CAMARGO, 1997; GONÇALVES, 1997; FIETZ, 1998). A Geoestatística e a Estatística Clássica estão conectadas, sendo que a segunda antecede a Geoestatística, devido à necessidade de uma rígida avaliação dos dados, tendo como objetivo a supressão de dados discrepantes. (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989).

Reichardt et al. (1986), em um estudo sobre o tema variabilidade espacial de solos, exibiram uma comparação entre a Estatística Clássica e a Geoestatística, garantindo que as duas técnicas se complementam, e que os métodos clássicos não conseguem fornecer respostas que a Geoestatística possibilita; portanto, as duas ciências são importantes e devem ser analisadas mutuamente.

2.7 Metodologia de regionalização hidrológica do Estado de São Paulo para os parâmetros $Q_{7,10}$, Q_{90} , Q_{95} e $\bar{Q}$

A Metodologia de Regionalização Hidrológica do Estado de São Paulo (LIAZI et al., 1988), baseou-se nos totais anuais precipitados em 444 postos pluviométricos; nas séries de descargas mensais observadas em 219 estações fluviométricas e nas séries históricas de vazões diárias de 88 postos fluviométricos.

Por meio da elaboração da carta de isoietas médias anuais para o Estado, e da análise de dados hidrológicos, foram definidas 21 regiões hidrológicamente semelhantes para o Estado de São Paulo, classificadas de “A” a “U”, (Figura 2).

A metodologia permite, por intermédio de ponderações e simulações, avaliar a disponibilidade hídrica para qualquer curso de água do território paulista. A Regionalização Hidrológica permite, também, a avaliação da disponibilidade hídrica em locais onde a extensão da série é pequena, ou inexistente.

A metodologia permite estimar, entre outras, as seguintes variáveis hidrológicas:

- Vazão média de longo período;
- Vazão mínima de sete dias associada a uma probabilidade de ocorrência;
- Curva de permanência de vazões.

Figura 2 - Regiões hidrológicamente semelhantes do Estado de São Paulo. Fonte: (LIAZI et al., 1988)

2.7.1 Vazão média plurianual

A descarga média específica plurianual em uma dada seção de um curso de água pode ser obtida, com boa aproximação, por intermédio da relação linear dessa vazão ($\bar{Q}_{\text{esp}}$) com o total anual médio precipitado na bacia hidrográfica ($\bar{P}$).

$$\bar{Q}_{\text{esp}} = a + b.\bar{P} \quad (19)$$

Em que:

a e b - parâmetros da reta de regressão.

Foram estabelecidas 4 retas de regressão, ou seja, 4 regiões, abrangendo as 21 regiões hidrologicamente homogêneas, conforme abaixo:

- Região 1: Regiões Hidrológicas “B”, “C”, “H”, “I” e “J” ;
- Região 2: Regiões Hidrológicas “A”, “D”, “E” e “F”;
- Região 3: Regiões Hidrológicas “G”, “K”, “L”, “N”, “O”, “P”;
- Região 4: Regiões Hidrológicas “M”, “Q”, “R”, “S”, “T”, “U”.

Está ilustrado na Figura 3 as equações das retas de regressão das regiões de 1 a 4, e os respectivos coeficientes de relação. A Tabela 3 apresenta os valores das constantes para a estimativa das vazões médias (parâmetros a e b) e para vazão mínima (valores A e B e parâmetro C) de cada região hidrológica do Estado.

Figura 3 - Vazão média plurianual: Retas de Regressão. Fonte: (LIAZI et al., 1988)

Tabela 3 - Parâmetros Regionais: a e b (vazão média), e valores A e B, X_{10} e Parâmetro C (vazão mínima)

Região Hidrológica	Média Plurianual		Valores de A e B		Valores de X_T	Valor do parâmetro C
	a	b	A	B	Período de retorno T = 10 anos (X_{10})	C
A	-22,14	0,0292	0,3532	0,0398	0,708	0,85
B	-29,47	0,0315	0,4174	0,0426	0,708	0,75
C	-29,47	0,0315	0,4174	0,0426	0,748	0,75
D	-22,14	0,0292	0,5734	0,0329	0,708	0,85
E	-22,14	0,0292	0,4775	0,033	0,708	0,85
F	-22,14	0,0292	0,6434	0,0252	0,708	0,85
G	-26,23	0,0278	0,4089	0,0332	0,632	0,75
H	-29,47	0,0315	0,4951	0,0279	0,748	0,85
I	-29,47	0,0315	0,6276	0,0283	0,708	0,85
J	-29,47	0,0315	0,4741	0,0342	0,708	0,85
K	-26,23	0,0278	0,4951	0,0279	0,689	0,80
L	-26,23	0,0278	0,6537	0,0267	0,759	0,85
M	-4,62	0,0098	0,6141	0,0257	0,759	0,85
N	-26,23	0,0278	0,4119	0,0295	0,689	0,80
O	-26,23	0,0278	0,3599	0,0312	0,689	0,80
P	-26,23	0,0278	0,3599	0,0312	0,619	0,80
Q	-4,62	0,0098	0,6537	0,0267	0,633	0,85
R	-4,62	0,0098	0,6141	0,0257	0,661	0,85
S	-4,62	0,0098	0,5218	0,0284	0,661	0,80
T	-4,62	0,0098	0,4119	0,0295	0,661	0,80
U	-4,62	0,0098	0,4119	0,0295	0,594	0,80

Fonte: adaptado de (LIAZI et al., 1988).

A precipitação média anual ($\bar{P}$), em cada uma das bacias, é calculada pela média ponderada da precipitação em relação à área de drenagem, interpolada entre duas isoietas consecutivas (P_i), e a área de drenagem (A_i) entre essas mesmas isoietas. Assim:

Figura 4 - Esquema para aplicação do método das isoietas

$$\bar{P} = \frac{\sum (A_i \cdot P_i)}{\sum A_i} \quad (20)$$

Em que:

A_i - área entre as isoietas P_i e P_{i+1} , km²; e

P_i - chuva média na área A_i , obtida por interpolação entre P_i e P_{i+1} , mm.

Para a determinação da Vazão Média Plurianual, basta multiplicar o valor da vazão específica média plurianual pela sua respectiva área da bacia de contribuição.

$$\bar{Q} = \bar{Q}_{\text{esp}} \cdot A \quad (21)$$

Em que:

$\bar{Q}$ - vazão média plurianual, l.s⁻¹;

$\bar{Q}_{\text{esp}}$ - vazão específica média plurianual, l.s⁻¹ . km², e;

A - área da bacia de contribuição, km².

2.7.2 Curvas de Permanência

A curva de permanência de vazões mostra a frequência com que as vazões possam ser superadas ou igualadas em um determinado tempo. As curvas de permanência são obtidas por

meio da padronização das séries originais, dividindo-se as vazões mensais pela média de longo período da série ($\bar{Q}_{esp}$). A variável padronizada é definida por:

$$q = \frac{Q}{\bar{Q}_{esp}} \quad (22)$$

Ordenando-se os valores de q de forma decrescente, estima-se a frequência acumulada, também denominada de permanência (P), por:

$$P = F_{q(q \geq q_i)} = \frac{i}{N} \quad (23)$$

Em que:

i - número sequencial do valor q_i da variável q na série ordenada;

N - número total de elementos na série; e

$F_{q(q \geq q_i)}$ - frequência com que o valor q_i é excedido ou igualado ao longo do traço histórico.

De acordo com as séries ordenadas q_i e i para N de cada posto fluviométrico, foram calculadas, por interpolação linear, os valores (q_p) da variável padronizada, para os distintos valores de permanência (P). Comparando-se os valores de q_p nas diferentes estações fluviométricas estudadas, foram identificadas as regiões com comportamento parecido. Com os valores de q_p e pela Eq. (24) pode-se calcular a vazão média mensal para uma dada permanência P por:

$$Q_p = Q \cdot q_p \quad (24)$$

Em que:

q_p - Parâmetro probabilística regional.

2.7.3 Vazões mínimas anuais de sete dias consecutivos (Q_7)

É comum a utilização deste tipo de vazão como indicador da disponibilidade hídrica natural, pois sofre menor influência de interferências humanas no curso d'água e de erros operacionais do que a vazão mínima diária; além disso é mais detalhada que a vazão mínima

mensal. A função distribuição de probabilidade da variável padronizada (X_n) pode ser definida por:

$$X_n = \frac{Q_n}{\bar{Q}_n} \quad (25)$$

Em que:

X_n - 7, 30, 60... 180 dias;

Q_n - Vazão mínima anual de n dias consecutivos; e

$\bar{Q}_n$ - é a média das mínimas de n dias.

O valor de n independe de Q_n , ou seja, é possível considerar as amostras X_n como derivadas de um mesmo universo e, conseqüentemente, determinar uma única distribuição de probabilidade para a variável padronizada.

Considerou-se que a distribuição de probabilidades das séries de vazões mínimas padronizadas de 1, 2,... 12 meses contínuos X_d é a mesma das séries das vazões mínimas padronizadas X_n de 30, 60,... 180 dias consecutivos. Por conseguinte, supõe-se que os valores de X_T da Eq. (26), estão sob uma variação da função de distribuição acumulada da distribuição extremos tipo III, portanto, pode-se calcular o valor de X_T da variável aleatória X em função do período de retorno T.

$$X_T = \gamma + (\beta - \gamma) \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right]^{\frac{1}{\alpha}} \quad (26)$$

Em que:

α , β e γ , são respectivamente os parâmetros de escala, locação e limite inferior da variável aleatória X.

Sendo assim, as vazões mínimas anuais padronizadas de sete dias consecutivos (X_7), podem ser obtidas pela seguinte equação:

$$Q_{7,10} = X_t \cdot \bar{Q}_7 \quad (27)$$

Dessa forma, para calcular a vazão mínima anual de sete dias consecutivos e período de retorno (T) anos é necessário obter-se a média dessas vazões mínimas de sete dias ($\bar{Q}_7$).

Com esse objetivo foram analisadas as séries diárias de 88 postos fluviométricos, a partir das quais calculou-se o valor de $\overline{Q}_7$.

Passou-se, então, a estudar a relação C entre a média das mínimas anuais de sete dias consecutivos ($\overline{Q}_7$) e a média das mínimas anuais de um mês ($\overline{Q}_m$) definido por:

$$C = \frac{\overline{Q}_7}{\overline{Q}_m} \quad (28)$$

Analisando-se os valores de C para os 88 postos, em que foi possível definir três regiões que aparecem delimitadas na Figura 5.

Figura 5 - Regiões semelhantes quanto as médias mínimas de 7 dias consecutivos (Parâmetro C). Fonte: (LIAZI et al., 1988)

Substituindo-se $\overline{Q}_7 = C \cdot \overline{Q}_m$ na Eq. (27), tem-se:

$$Q_{7,T} = C.X_T (A + B).\overline{Q} \quad (29)$$

Em que o valor de C é obtido a partir da Tabela 2, assim como os valores de X_T , A e B; $\overline{Q}$ é calculada em função da precipitação anual média a partir dos valores a e b, também listados na referida tabela.

A metodologia supracitada está disponível na internet como um aplicativo, no site do Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo (SIGRH), no endereço <http://www.sigrh.sp.gov.br>. Para seu uso necessita-se apenas da inclusão das coordenadas geográficas do ponto de captação da água do rio, ou do centro da bacia hidrográfica e da área de drenagem a montante da mesma.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Material

3.1.1 Caracterização física, hidrográfica e climatológica da área de estudo

O estudo foi realizado no Estado de São Paulo, que possui uma área de aproximadamente 248197 km², e está localizado entre as longitudes -44° 9' e -53° 5', e entre as latitudes -22° 40', e -22° 39'; tem 85% de sua superfície entre 300 e 900 m de altitude.

Dentre os principais rios do Estado de São Paulo destacam-se três: primeiro, o rio Tietê, que percorre todo o território paulista de sudeste a noroeste. Posteriormente há o rio Paraná formado, pela junção dos rios Grande e Paranaíba; nasce em Carneirinho, no extremo oeste do Estado e divide São Paulo de Mato Grosso do Sul. Por último, cita-se o Paranapanema, sendo um divisor entre os Estados de São Paulo e Paraná a partir da região de Ourinhos.

Em geral, a vertente atlântica compreende somente pequenos rios que descem da Serra do Mar e cruzam a planície litorânea em direção ao oceano. Dois rios desse grupo alcançam maiores extensões; são eles o Paraíba do Sul e o Ribeira do Iguape. O primeiro corre em direção ao nordeste e adentra no Estado do Rio de Janeiro, onde está a maior parte de seu curso.

Predomina no estado o regime tropical: os rios enchem no verão e reduzem suas vazões no inverno, que constitui o período de estiagem. Segundo a classificação climática de Köppen e Geiger (1928), pode se afirmar que predominam os tipos climáticos A e C, com os subtipos, Aw, Am, Af, e as variações Cfa, Cfb, Cwa e Cwb. Prevaecem estações úmidas e secas bem definidas na maior parte do Estado, exceto nas encostas da Serra do Mar: próximo à costa, a estação seca é curta.

3.1.2 Estações hidrométricas

A etapa inicial do estudo, constituiu na escolha das estações fluviométricas e pluviométricas a serem utilizadas, para uma melhor amostragem nos dados, foi selecionado estações com períodos superiores a 15 anos, com séries que variam dos anos de 1941 a 2006.

Na avaliação do modelo de Liazi et al., (1988), trabalhou-se com 176 estações fluviométricas, essas administradas pelo DAEE e disponíveis em <http://www.sigrh.sp.gov.br>. Em decorrência, do modelo de Liazi et al., (1988) utilizar a precipitação média anual das bacias hidrográficas, como uma das variáveis de entrada, foi necessário o uso de 403 estações pluviométricas, estas disponibilizadas pelo CPRM - Serviço Geológico do Brasil, em <http://www.cprm.gov.br>.

A metodologia de regionalização proposta nessa dissertação é dependente de interpolação espacial, para evitar a incerteza ocasionada pela extrapolação de valores, entre as estações fluviométricas do Estado de São Paulo; utilizaram-se, também, estações vizinhas ao Estado; essas se encontram, respectivamente, nos Estados de Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Paraná e Rio de Janeiro, são consistidas, administradas pela ANA e disponíveis em. <http://portalsnirh.ana.gov.br/EstaçõesdaANA> . Está representada na Figura 6, a localização de todas as estações hidrométricas utilizadas, as mesmas então nos Apêndices A e B.

Figura 6 – Localização das estações hidrométricas utilizadas no estudo

3.1.3 Modelo digital de elevação (MDE)

Foram adquiridas as imagens do modelo digital de elevação (MDE), originárias da missão de mapeamento do relevo terrestre SRTM (*“Shuttle Radar Topography Mission”*), desenvolvido pela NASA (*“National Aeronautics and Space Administration”*) e NGA (*“National Geospatial-Intelligence Agency”*) no ano de 2000.

Essas imagens encontrar-se no formato GEOTIFF (16 bits), com resolução espacial de 90 metros, em sistema de coordenadas geográficas e Datum WGS-84. São distribuídas gratuitamente por Miranda (2005), no endereço eletrônico, <http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>. Foram obtidas todas as cenas do Estado de São Paulo e as cenas SG-22-X-A e SF-22-X-C, do Estado do Paraná (Figura 7).

Figura 7 - Cenas das imagens de radar SRTM (*“Shuttle Radar Topography Mission”*), necessárias para cobrir a área de estudo. Fonte: (MIRANDA, 2005)

3.2 Métodos

3.2.1 Fluxograma metodológico

Para alcançar todos os objetivos propostos, foram necessárias etapas contínuas que caracterizam o desenvolvimento metodológico. O desenvolvimento de cada uma dessas etapas, e os aplicativos computacionais utilizados em cada uma delas, pode ser visualizado na Figura 6. Nos itens subsequentes será apresentada a metodologia aplicada em cada etapa.

Figura 8 - Fluxograma metodológico, enfatizando o objetivo geral e os secundários. ¹ <http://www.sigrh.sp.gov.br>

3.3 Procedimentos metodológicos e técnicas computacionais utilizadas para geração dos mapas básicos e para a avaliação do modelo de regionalização hidrológica do Estado de São Paulo

Utilizou-se o Datum SIRGAS 2000, como a superfície de referência para as coordenadas geodésicas utilizadas na confecção dos mapas dessa dissertação, sendo que os mapas que não possuíam esse Datum como superfície de referência foram transformados em ambiente SIG, por meio do programa ArcGIS 9.3 (ESRI, 2009), com a ferramenta “*Projections*”.

3.3.1 Delimitação da área de drenagem e mensuração da precipitação média anual das bacias hidrográficas compreendidas pelas estações fluviométricas

O procedimento de delimitação da bacia de drenagem das estações fluviométricas e a mensuração da precipitação média anual se deu no SIG ArcGIS 9.3 (ESRI, 2009).

As imagens “*Raster*” SRTM encontravam-se no formato GEOTIFF (16 bits) e foram unidas em uma única imagem com a ferramenta “*Mosaic to New Raster*”, de resolução espacial igual a 90 m; obteve-se assim os valores médios de altitude para a área em estudo (Figura 9).

A partir do MDE e das coordenadas geográficas das estações fluviométricas utilizou-se a ferramenta computacional “*Watershed Delimitation*”, em que, foi possível delimitar as bacias de drenagem das respectivas estações fluviométricas. Sua mensuração foi realizada na finalidade de comparar com a fornecida pelo site do SIGRH, sendo que, para as áreas com diferença de 5%, ou maior, foi realizada uma delimitação manual, utilizando curvas de nível extraídas desse MDE, com auxílio da ferramenta “*Contour*”.

A partir da precipitação média anual e das coordenadas geográficas das estações pluviométricas, pode-se utilizando a ferramenta “*Geostatistical Analysis*”, interpolar espacialmente e transformar os dados pontuais em uma superfície contínua de dados, estabelecendo uma resolução espacial de aproximadamente 90 m.

Posteriormente, foi analisada a dependência espacial da precipitação média anual e testou-se o interpolador geoestatístico, krigagem ordinária circular. Em que, Avaliou o desempenho do mesmo, de acordo com a metodologia da validação cruzada e do índice de confiança (c) (CAMARGO; SENTELHAS, 1997).

Figura 9 – Modelo digital de elevação (MDE) do Estado de São Paulo

Por fim, exportou-se o arquivo gerado por meio da interpolação para o formato “*Raster*”, com a ferramenta “*Data/Export to Raster*”, e por intermédio da espacialização da precipitação média anual para cada “*pixel*” da imagem; calculou-se a mesma para as bacias hidrográficas compreendidas pelas estações fluviométricas, bem como gerou-se o mapa das isoietas médias anuais, com o uso das ferramentas, “*Zonal Statistics a Table*” e “*Contour*”, respectivamente.

3.4 Preenchimentos de falhas nas séries temporais de vazão

O preenchimento de falhas nas séries temporais de vazão se deu pela técnica de imputação de dados, que consiste em preencher os dados faltantes (ou ausentes, ou perdidos) de um banco de dados, por meio de metodologias estatísticas. O “*software*” utilizado para imputar os dados foi o Statistica 8.0 (STATSOFT, 2007), com a ferramenta “*MD-Imputation*”. Este procedimento utiliza o método do inverso da distância do vizinho mais próximo, que segundo Lacerda (2006), é um método mais direto e autônomo.

O método pode ser descrito da seguinte forma: sejam X_i e X_j ($i, j = 1, 2, \dots, n, i \neq j$) duas séries temporais de estações fluviométricas e $d(X_i, X_j)$ a distância euclidiana entre elas. Esse método baseia-se na menor distância entre uma estação X_i e uma estação X_j , ou seja, $d(X_i, X_j) = \min (d_{ij})$. Assim, os dados faltantes são imputados diretamente com os dados observados da série temporal da estação fluviométrica mais próxima.

3.5 Cálculo das vazões estudadas por intermédio das estações fluviométricas

Após o preenchimento de falhas dos dados das respectivas estações fluviométricas, procedeu-se ao cálculo das vazões a serem avaliadas, quais sejam: $Q_{7,10}$, Q_{90} , Q_{95} e $\bar{Q}$, por intermédio de planilhas eletrônicas, utilizando-se da automatização possibilitada pela programação em linguagem visual basic (macros). A referência temporal foi o ano civil e optou-se por seguir o conceito de Hosking e Wallis (1997); esses autores defendem que se as séries são homogêneas e representativas da variável em análise, é desnecessário o uso de períodos comuns, utilizando as séries completas, ganhando assim em informação.

3.5.1 Cálculo da $Q_{7,10}$

Para calcular a $Q_{7,10}$ utilizou-se os valores de vazões médias diárias, procedendo-se ao cálculo da média móvel de sete dias seguidos, e escolhendo a menor no respectivo ano. Nos anos que apresentaram falta de dados, foi verificado, com base em postos vizinhos, se o período de falha foi chuvoso; quando isso ocorreu, foi possível escolher as vazões mínimas do ano com o restante da série; caso contrário, considerou-se o ano como falho, sendo então preenchido seguindo a técnica demonstrada no item 3.4.

Posteriormente, com os dados dispostos em ordem crescente, ajustou-os a diferentes distribuições de probabilidade, com auxílio do programa EasyFit 5.5 (MATHWAVE, 2010). Dentre as distribuições de probabilidade testadas no programa, destacam-se as usualmente utilizadas em Hidrologia: Weibull, Weibull 3P, Log-normal, Log-normal 3P, Gumbel Mínimo, Gumbel Máximo, Gamma e Generalizada de Valores Extremos (GEV).

O teste de aderência utilizado para escolher a distribuição de probabilidade que melhor se ajustou às Q_7 foi o de Anderson-Darling (ANDERSON; DARLING, 1954), ao nível de significância $\alpha < 0,05$. Este teste se baseia na diferença entre as funções de probabilidades acumuladas, empírica, $F_N(x)$, e teórica, $F_X(x)$, de variáveis aleatórias contínuas. Este ajuste visa dar maior peso às caudas da distribuição, nas quais, as maiores (ou as menores)

observações da amostra podem alterar a qualidade do ajuste (NAGHETTINI; PINTO, 2007). Constitui, assim, uma interessante alternativa aos testes de Kolmogorov-Smirnov e Qui-Quadrado. O teste de Anderson Darling é definido como:

$$A^2 = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (2i-1) [\ln F(X_i) + \ln \left(\frac{n}{i} (1-F(X_{n-i+1})) \right)] \quad (30)$$

Em que:

$\{X_{(1)}, X_{(2)}, X_{(n)}, \dots\}$ representam as observações dispostas em ordem crescente.

Por fim, escolheu-se entre as distribuições de probabilidade candidatas a que apresentou o melhor ajuste, e estimou-se o quantil para um tempo de retorno igual a dez anos, estabelecendo assim o valor da $Q_{7,10}$ para a respectiva amostra.

3.5.2 Cálculo da Q_{90} , Q_{95} , $\bar{Q}$

No escopo de avaliar o modelo no cálculo da Q_{95} , Q_{90} e $\bar{Q}$, utilizaram-se os dados de vazões médias mensais; entretanto, para verificar se o uso de dados mensais são adequados e apresentam segurança no cálculo das vazões de permanência utilizadas para determinar critérios de outorga, determinou-se, para estações com séries maiores de 30 anos, as respectivas vazões com dados médios diários. Para comparar as amostras independentes de dados, primeiramente normalizou as vazões por meio da transformação “Box-Cox” (BOX; COX, 1964), e posteriormente aplicou-se o teste t de “Student” (GOSSET, 1908); o programa utilizado foi o Statistica 8.0 (STATSOFT, 2007), com as ferramentas “Box - Cox Transformation” e “t Test”, respectivamente. Desta forma verificou-se, se ocorreu diferença significativa entre as médias das Q_{95} obtidas por dados mensais e por dados diários, ao nível de probabilidade de 5 %.

Para calcular a $\bar{Q}$, simplesmente fez-se a média aritmética das vazões, e para Q_{95} e Q_{90} obteve-se a curva de permanência de cada uma das estações fluviométricas, procedendo-se da seguinte maneira:

- Para dados mensais: selecionaram-se, dos meses da série histórica, aqueles que apresentavam dados diários completos, descartando os meses que não possuíam.
- Para dados diários: selecionaram-se os anos que apresentavam de 75% de dados.

- Calculou-se o valor da amplitude total de variação das vazões da série histórica pela Eq. (31).

$$\text{Amplitude total} = Q_{\max} - Q_{\min} \quad (31)$$

Em que:

$Q_{\max}$ - vazão máxima da série; e

$Q_{\min}$ - vazão mínima da série.

- Calculou-se o número de classes pela regra de Sturges (1926), Eq. (32); para os dados de vazão diários utilizou-se o número de classes igual a 50.

$$NC = 1 + 3,3 \log_{10}(N) \quad (32)$$

Em que:

N - número de observações (dados) da série.

- Determinou-se a amplitude da classe, sendo a subdivisão das classes feita com base na escala logarítmica, Eq. (33), devido à alta variação na magnitude das vazões envolvidas.

$$\Delta X = \frac{[\ln(Q_{\max}) - \ln(Q_{\min})]}{NC} \quad (33)$$

- Na sequência, utilizou-se a Eq. (34) para calcular os limites dos intervalos.

$$Q_{i+1} = e^{[\ln(Q_i) + \Delta X]} \quad (34)$$

- Determinou-se, com base nos dados de vazão da série histórica de cada estação fluviométrica, o número de vazões classificadas em cada intervalo.
- Posteriormente, calculou-se a frequência f_i associada ao limite inferior de cada intervalo, Eq. (35).

$$f_i = \frac{N_{qi}}{NT} 100 \quad (35)$$

Em que:

Nq_i - número de vazões de cada intervalo; e

NT - número total de vazões.

- Por fim, obteve-se a curva de permanência, plotando-se, nas abcissas as frequências de ocorrência e, nas ordenadas, os limites inferiores dos intervalos de classes de vazão, determinando-se, dessa forma, a Q_{90} e a Q_{95} .

3.6 Análise de consistência dos dados

De posse das variáveis necessárias aos cálculos de consistência de dados, esta foi feita pela relação deflúvio/precipitação – D_p . A mesma visa relacionar a compatibilidade das vazões com as precipitações e o balanço hídrico regional; é um indicador médio da existência de consistência média dos dados. Neste caso ele é determinado pela Eq. (36).

$$D_p = \frac{\bar{Q}}{\bar{P}} \quad (36)$$

Em que:

D_p - Relação deflúvio precipitação, adimensional;

$\bar{Q}$ - Vazão média da bacia, mm; e

$\bar{P}$ - Precipitação média da bacia, mm.

De acordo com as características climáticas do Estado de São Paulo, nesse estudo foram considerados como estações inconsistentes, as que apresentaram o D_p acima de 0,75 e abaixo de 0,1 (TUCCI, 2002).

3.7 Cálculo das vazões estudadas por intermédio do modelo de regionalização hidrológica do Estado de São Paulo

Após o descarte das estações inconsistentes, e de posse da precipitação média anual e da área de drenagem das estações fluviométricas, programou-se em planilha eletrônica Excel (MICROSOFT, 2007) as fórmulas e coeficientes estabelecidos pela metodologia proposta por

Liazi et al. (1988), e assim, calculou-se as vazões $Q_{7,10}$, Q_{90} , Q_{95} e $\bar{Q}$ por intermédio do modelo de regionalização hidrológica do Estado de São Paulo.

3.8 Análise estatística dos modelos

Para avaliar o modelo de interpolação espacial da precipitação média anual, krigagem ordinária circular, e os modelos de regionalização hidrológica do Estado de São Paulo. Comparou-se os valores obtidos por meio dos modelos com os valores padrões medidos, em que, para os modelos de regionalização foram as vazões calculadas mediante aos dados obtidos nas estações fluviométricas do DAEE e ANA, e para o modelo de interpolação espacial foi os próprios valores utilizados inicialmente para interpolar.

Com o objetivo de avaliar o desvio da reta de regressão em relação à reta 1:1, foi calculado o índice d de Willmott et al. (1985), Eq. (37). Esse índice assume o valor máximo de 1,0 quando a reta de regressão coincide com a reta 1:1.

$$d = 1 - \left| \frac{\sum (E_i - P_i)^2}{\sum (|E_i - P| + |P_i - P|)^2} \right| \quad (37)$$

Em que:

E_i - Valor estimado;

P_i - Valor padrão observado; e

P - Média dos valores padrões observados.

O índice de confiança (c), sugerido por Camargo e Sentelhas (1997), foi obtido pelo produto entre o coeficiente de correlação de Spearman (1904), (r), e o índice de concordância (d) de Willmott et al. (1985). Esta combinação de $r \cdot d = c$, agrega a precisão, dada por r, à exatidão, dada por d, expressando assim a acurácia do modelo.

Os critérios de avaliação do desempenho de modelos, quanto ao seu índice de confiança, estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Classificação por meio do índice de confiança ou de desempenho(c)

Desempenho	Ótimo	Muito Bom	Bom	Regular	Ruim	Péssimo
Valor de c	> 0,85	0,76 a 0,85	0,66 a 0,75	0,51 a 0,65	0,41 a 0,50	< 0,40

Fonte: adaptado de (CAMARGO; SENTELHAS, 1997).

3.9 Regionalização hidrológica para o Estado de São Paulo, nova proposta

Por meio das séries de vazões médias mensais e das áreas de drenagem das estações fluviométricas, estabeleceram-se, de acordo com a Eq. (38), séries de vazões específicas médias mensais, em que retirou-se, assim, o efeito da área da bacia sobre os valores das vazões.

$$\bar{Q}_{\text{esp.m}} = \frac{\bar{Q}_m}{A} \quad (38)$$

Em que:

$\bar{Q}_{\text{esp.m}}$ - Vazão específica média mensal, $\text{m}^3.\text{s}^{-1}.\text{km}^{-2}$

$\bar{Q}_m$ - Vazão média mensal, $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$; e

A - Área de drenagem, km^2 .

A partir das séries de vazões específicas médias mensais, fez-se a curva de duração, ajustando-se os dados, por meio do programa EasyFit 5.5 (MATHWAVE, 2010), à distribuição de probabilidade Log-normal 3P, de acordo com o teste de Anderson-Darling (ANDERSON; DARLING, 1954), com nível de significância $\alpha < 0,05$. A função de distribuição cumulativa e inversa da Log-normal 3P é expressa pela Eq. (39) e Eq (40), respectivamente.

$$F(x) = \Phi \left[\frac{\ln(x - \gamma) - \mu}{\sigma} \right] \quad (39)$$

$$x(F) = \gamma + e^{\{\mu + [\sigma \cdot \Phi^{-1}(x)]\}} \quad (40)$$

Em que:

μ - Parâmetro de forma;

σ - Parâmetro de escala;

γ - Parâmetro de escala;

$\Phi^{-1}(x)$ - Inverso da distribuição cumulativa normal associada a uma probabilidade, e;

x (F) - Valor da amostra relacionada à permanência no tempo.

Sendo assim, pode-se representar, para cada bacia hidrográfica, suas características físicas e fluviométricas, por intermédio dos parâmetros de escala (σ) e (γ), e de forma (μ), respectivamente, indicado por meio da forma e da escala da curva de duração das vazões específicas médias mensais.

3.9.1 Interpolação espacial dos parâmetros da distribuição de probabilidade Log-normal 3P

Por intermédio dos parâmetros da distribuição de probabilidade Log-normal 3P, de escala (σ) e (γ), e de forma (μ), para as respectivas estações fluviométricas, utilizou-se o programa de SIG ArcGIS 9.3 (ESRI, 2009) com a ferramenta “*Geostatistical Analysis*”, para analisar, inicialmente, a dependência espacial dos parâmetros, expressa no semivariograma. Sendo assim, optou-se por utilizar o modelo interpolador inverso do quadrado da distância, que desconsidera o padrão da estrutura de dependência espacial, (SILVA et al., 2008). A interpolação, por meio do inverso do quadrado da distância, foi feita da seguinte forma:

$$X_p = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{X_i}{d_i^2} \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^2} \right)} \quad (41)$$

Em que:

X_p - Variável interpolada;

X_i - Valor da variável da i-ésima localidade vizinha; e

d_i - Distância euclidiana entre o i-ésimo ponto de vizinhança e o ponto amostrado.

No presente estudo, trabalhou-se com as 6 estações mais próximas da localidade a ser interpolada, conforme método adotado por Silva et al. (1999).

3.9.2 Desenvolvimento do aplicativo computacional para calcular o volume de um reservatório de regularização, vazões mínimas, médias e de permanência para o Estado de São Paulo

Desenvolveu-se, em linguagem Personal Home Page (PHP), com auxílio do compilador Eclipse, banco de dados My SQL e servidor Apache, um aplicativo

computacional que calcula o volume a ser regularizado por um reservatório e as vazões de referência para emissão de outorga no Estado de São Paulo. De acordo com a metodologia mencionada nos itens anteriores, o mesmo foi ajustado às equações demonstradas a seguir.

Substituindo-se a Eq. (38) na Eq. (40), e considerando que o inverso da distribuição cumulativa normal é associado a uma série crescente, ou seja, refere-se à ocorrência de um evento ser menor ou igual a uma probabilidade p , subtraiu-se 1 da probabilidade de igualdade ou superação da vazão de permanência a ser determinada. Portanto, as vazões de permanência são calculadas por meio da Eq. (42), sendo esta, dependente da área da bacia de drenagem, dos parâmetros da distribuição de probabilidade Log-normal 3P e da probabilidade de permanência.

$$Q_p = \left\{ \gamma + e^{\left\{ \mu + [\sigma \cdot \Phi^{-1}(1-p)] \right\}} \right\} \cdot A \quad (42)$$

Em que:

μ - Parâmetro de forma;

σ - Parâmetro de escala;

γ - Parâmetro de escala;

$\Phi^{-1}(1-p)$ - Inverso da distribuição cumulativa normal associada à probabilidade $(1-p)$;

A - Área da bacia de drenagem, km^2 ; e

Q_p - Vazão de permanência, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Estudos feitos pela WSC (2004) mostraram que a vazão $Q_{7,10}$ possui uma correlação alta positiva com as vazões de permanência; sendo assim, relacionou as vazões mínimas ($Q_{7,10}$) com as vazões de 98% de permanência no tempo (Q_{98}), obtendo analogamente a Eq. (43),

$$Q_{7,10} = 0,829 \cdot Q_{98} \quad (43)$$

A vazão média pode ser avaliada a partir da curva de permanência. Um procedimento simples consiste em determinar a área sob a curva, e dividir este valor por 100. O procedimento de cálculo da vazão média, fundamentado na área sob a curva de permanência, pode ser representado, aproximadamente, pela Eq. (44):

$$\begin{aligned}\bar{Q} = & 0,025(\bar{Q}_0 + \bar{Q}_{100}) + 0,05(Q_5 + Q_{95}) + 0,075(Q_{10} + Q_{90}) \\ & + 0,1(Q_{20} + Q_{30} + Q_{40} + Q_{50} + Q_{60} + Q_{70} + Q_{80})\end{aligned}\quad (44)$$

Em que: na Eq. (44), $\bar{Q}$ - vazão média plurianual, Q_5 , Q_{10} , Q_{20} , Q_{30} , Q_{40} , Q_{50} , Q_{60} , Q_{70} , Q_{80} , Q_{90} e Q_{95} são as vazões de 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 95% de permanência; $\bar{Q}_0$ é uma vazão próxima de 0% de permanência (toma-se qualquer valor inferior a 5%) e $\bar{Q}_{100}$ é uma vazão próxima de 100% de permanência (em qualquer nível superior a 95%).

A partir da geração da curva de permanência, determinou-se o volume sazonal de um possível reservatório destinado a manter no mínimo 50% da $Q_{7,10}$ a jusante da seção fluvial em questão. A vazão firme (Q_f) é a vazão a ser regularizada; a mesma é determinada pela soma, entre a vazão demandada (Q_d), a vazão a jusante (Q_j) e as perdas por evaporação no espelho hidráulico e infiltração no maciço, Q_j é calculada por meio da subtração entre a $Q_{7,10}$ e a vazão outorgada pela DAEE (Q_{out}). Estas relações estão apresentadas na Eq. (45) e (46), respectivamente, desprezando-se as perdas:

$$Q_f = Q_d + Q_j \quad (45)$$

$$Q_j = Q_{7,10} - Q_{out} \quad (46)$$

O volume a ser acumulado durante o período chuvoso foi estimado pela diferença entre a área compreendida por uma linha horizontal que representa a vazão firme (Q_f) e a área sob a curva de permanência, ambas calculadas a partir do ponto da interseção das linhas correspondentes (Figura 9). Este é um método indireto, descrito em Tucci (2002). Segundo o autor, esse método é simplificado, porém, bastante útil quando existirem funções de regionalização. Esta demonstrada pela Eq. (47) e Eq. (48), como se determinou o volume regularizável (V_r) nesses reservatórios para garantir determinada vazão firme (Q_f).

$$pQ_f = 1 - \Phi \left[\frac{\ln \left(\frac{Q_f}{A} - \gamma \right) - \mu}{\sigma} \right] \quad (47)$$

$$V_r = \left[(P - pQ_f) \cdot Q_f - \int_{pQ_f}^P \left\{ \gamma + e^{\left\{ \mu + [\sigma \cdot \Phi^{-1}(1 - pQ_f)] \right\}} \right\} \cdot A \, dpQ_f \right] \cdot \Delta T \quad (48)$$

Em que:

P - Probabilidade de atendimento do reservatório;

pQ_f - Probabilidade da vazão firme na curva de permanência;

Q_f - Vazão firme a ser regularizada, $m^3.s^{-1}$;

μ - Parâmetro de forma;

σ - Parâmetro de escala;

γ - Parâmetro de escala;

$\Phi^{-1}(1-pQ_f)$ - Inverso da distribuição cumulativa normal associada à probabilidade $(1-pQ_f)$;

A - Área da bacia de drenagem, km^2 ;

ΔT - Numero de segundos no ano (31536000), s; e

V_r - Volume de regularização intra-anual, $m^3.10^6$.

Figura 10 - Representação pela área hachurada em preto do volume a ser regularizado por um reservatório, a partir da Q_f , representada pela linha horizontal

Como a integral definida da Eq.(14) não apresenta solução analítica, utilizou-se o método numérico do tipo Newton - Côtes (ABRAMOWITZ; STEGUN, 1972), empregando-

se valores de $f(x)$ para valores de x uniformemente espaçados, pela regra de Simpson (HORWITZ, 2001), cuja fórmula está descrita a seguir:

$$\int_a^b f(x) dx \cong \frac{h}{3} (y_0 + 4y_1 + 2y_2 + 4y_3 + 2y_4 + \dots + 2y_{n-2} + 4y_{n-1} + y_n) \quad (49)$$

O aplicativo divide a área debaixo da curva de permanência, em 100 faixas de mesma largura h .

3.9.3 Delimitação das regiões hidrologicamente semelhantes, segundo a medida de heterogeneidade – H

A medida de heterogeneidade – H compara a variabilidade grupal das características estatísticas dos postos de observação, com a variabilidade esperada dessas mesmas características, em uma região homogênea; sendo assim, utilizou-se essa metodologia para delimitar o Estado de São Paulo em regiões hidrologicamente semelhantes. As etapas são descritas a seguir:

- Primeiramente, utilizou-se o programa ArcGIS 9.3 (ESRI, 2009) com auxílio da ferramenta “*classify/standard deviation*”, para classificar subjetivamente o Estado de São Paulo em regiões semelhantes, afim de, testar posteriormente a medida de heterogeneidade – H. Agrupou-se o Estado em diferentes regiões, de acordo com o desvio padrão dos parâmetros da distribuição de probabilidade Log-normal 3P, ajustada as séries de vazões médias específicas das estações fluviométricas.
- Por intermédio do pacote estatístico nsRFA (VIGLIONE, 2012) do “*software*” R statistical 2.15 (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2012), utilizou-se as vazões médias anuais para calcular a medida de heterogeneidade – H, sendo testadas diferentes combinações, até que o valor de H fosse inferior a 1, indicando assim a homogeneidade da região.
- Por fim, agrupou-se o Estado em regiões hidrologicamente semelhantes, seguindo os critérios de Hosking e Wallis (1997); esses autores apontam que a natureza física deva prevalecer sobre a estatística.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Delimitação das bacias de drenagem

As bacias de drenagem das 176 estações fluviométricas inicialmente estudadas estão ilustradas na Figura 11. A maior área de bacia de drenagem observada foi da estação a 6C-002 com aproximadamente 47795 km²; a mesma localiza-se no município de Borborema e mede a vazão do rio Tietê; por outro lado, a menor foi a estação 4F-010 com 22 km², existente no município de Itariri, no curso d' água Cor das Pedras.

Observa-se que existe uma maior concentração de estações na região leste do Estado e uma defasagem na região oeste, compreendido pelas URGHIs Pontal do Parapanema, Peixe, Aguapeí, Baixo Tietê e São José dos Dourados. Sendo assim, a regionalização dessa região depende de outras e, conseqüentemente, a emissão de outorgas que utilizam vazões regionalizadas fica deficitária, podendo ocasionar problemas no gerenciamento de recursos hídricos na região.

Figura 11 – Hidrografia do Estado de São Paulo e bacias de drenagem das estações fluviométricas do DAEE

4.1.1 Interpolação espacial da precipitação média anual e cálculo da mesma para as bacias de drenagem

O exame do semivariograma para a precipitação média anual (Figura 12) revelou que existe dependência espacial, em que o efeito pepita foi $C_0 = 0,00015$ e o alcance $a = 41,7$ km. O efeito pepita de 0,00015 demonstra que não há continuidade entre valores afastados por distâncias menores do que a usada no intervalo de amostragem. A proporção desse valor para o patamar do semivariograma ($C_0 + C_1$), no caso 2,74%, é um indicativo da quantidade de variação ao acaso de um ponto para outro; quanto menor seu valor, mais parecidos são os valores vizinhos. O alcance (a) de 41,7 km denota que todos os vizinhos dentro desse raio podem ser usados na estimativa de valores em espaçamentos mais próximos.

Figura 12 – Semivariograma experimental para a precipitação média anual do Estado de São Paulo

Na Figura 13 são apresentadas as isoietas médias anuais geradas por meio do interpolador espacial krigagem ordinária circular. Observa-se uma faixa de alta precipitação pluviométrica no litoral do Estado, com pico de aproximadamente 4250 mm, caracterizando uma região singular.

Isso ocorre devido ao relevo concordante (a Serra do Mar segue quase que paralelamente à linha da costa); os ventos úmidos vindo do mar se deparam com a barreira montanhosa e são obrigados a subir. Ao subir, o ar se esfria e se satura, ocorrendo à condensação do vapor de água e a formação de nuvens; consequentemente, sucede à queda de

precipitação do tipo orográfico ou de relevo. As vertentes opostas são mais protegidas pelos ventos, onde o ar é mais seco, e a distribuição de precipitação é mais constante, variando de 1000 a 2000 mm.

Figura 13 - Distribuição espacial para precipitação pluvial média anual no Estado de São Paulo obtida por meio da krigagem ordinária circular

Carvalho e Assad (2005) utilizaram 1027 postos pluviométricos para interpolar espacialmente a precipitação média anual no Estado de São Paulo; os autores utilizaram a krigagem ordinária circular e obtiveram um semivariograma com os valores do efeito pepita (C_0) igual a 0,0002 e alcance (a) igual a 48,5 km; observa-se uma alta similaridade com os dados aqui apresentados, corroborando, assim com o estudo.

O modelo de interpolação espacial; krigagem ordinária circular apresentou um índice de concordância (d) elevado, com valor de 0,99; este índice representa a validação cruzada, ou seja, quanto mais próximo de 1 mais a reta de regressão linear tende a reta 1:1, que é a condição ideal. Com relação à classificação, a krigagem ordinária circular, classificou-se como um modelo muito bom (índice de confiança (c) igual a 0,75).

Sendo assim, escolheu-se, para calcular a precipitação média anual das bacias hidrográficas das estações fluviométricas, o interpolador espacial krigagem ordinária circular.

Em estudos, relacionados a comparação de diferentes interpoladores espaciais, para a pluviosidade média anual, verificou-se que a krigagem foi o melhor método para representar esta variável (BARBOSA, 2006; SILVA et al., 2007; CASTRO, 2008; RIBEIRO, 2009; (YAVUZ; ERDOĞAN, 2011).

Com relação a precipitação média anual das bacias hidrográficas das estações fluviométricas; a maior ocorreu na bacia da estação Embu(3E-095) com valor de 2651 mm, e a menor na estação Ipigua (6B-011), igual a 1260,25 mm.

4.2 Resultados das vazões $Q_{7,10}$, Q_{90} , Q_{95} e $\bar{Q}$ calculadas por intermédio das estações fluviométricas

4.2.1 Resultado da $Q_{7,10}$

Na Tabela 5 são apresentadas as distribuições de probabilidade que melhor se ajustaram às séries de Q_7 . Ao todo foram obtive-se 24 distribuições de probabilidade, em que se destacam as distribuições de Burr, Jonson SB, Cauchy e Dagum; as mesmas são utilizadas para representar tanto eventos de máximo como de mínimo, sendo este último o caso das séries de Q_7 .

Tabela 5 - Distribuições de probabilidade que obtiveram melhor ajuste aos valores de Q_7

Distribuição de probabilidade	Número de estações	Distribuição de probabilidade	Número de estações
Burr	34	Frechet 3P	2
Jonson SB	31	Log-normal	2
Cauchy	21	Pearson 5	2
Dagum	19	Weibull 3P	2
Burr 4P	15	Fatigue life 3P	1
GEV	11	Gama 3P	1
Dagum 4P	7	Generalizada Gamma 4P	1
Log-Logística 3P	7	Hipersecante	1
Laplace	6	Jonson SU	1
Generalizada Pareto	4	Log-normal 3P	1

Tabela 5 - Distribuições de probabilidade que obtiveram melhor ajuste aos valores de Q_7

Distribuição de probabilidade	Número de estações	Distribuição de probabilidade	Número de estações
Gumbel Mínimo	3	Pert	1
Log-Pearson 3	2	Rise	1

Nota: GEV – Generalizada de Valores Extremos; P – Parâmetros.

A maior $Q_{7,10}$ por unidade de área foi observada na cidade de Biritiba Mirim, na estação 3E-007 com valor de $28 \text{ L.s}^{-1}.\text{km}^{-2}$, opostamente na cidade de Pindamonhangaba a estação 2D-005 apresentou o menor valor, sendo igual a $1,2 \text{ L.s}^{-1}.\text{km}^{-2}$. Nesse caso demonstra-se que a vazão mínima não está relacionada quantitativamente com a precipitação média anual, já que as estações possuem valores relativamente semelhantes: na estação 2D-005 a precipitação média anual é de 1396,29 mm, zenquanto que na 3E-007 é de 1481,65 mm.

O principal fator que infere na vazão mínima parece ser a sazonalidade: a precipitação pode se concentrar dentro de alguns meses do ano, com eventos de alta intensidade, gerando vazões altas e pouca infiltração. A estação 3E-007 esta localizada a barlavento da Serra do Mar, e se caracteriza por ser uma região com verão quente, com pouca ocorrência de secas no inverno; em contrapartida, a estação 2D-005 localiza-se a sotavento da Serra do Mar: o ar passa pela mesma, desprovido de umidade, desce e aquece-se adiabaticamente; este é um dos fatores que caracteriza a região com presença de chuvas no verão e seca no inverno.

4.2.2 Resultados das vazões Q_{90} , Q_{95} e $\bar{Q}$

As vazões de permanência Q_{90} e Q_{95} retratam, respectivamente, a parcela de 90 e 95 %, de tempo em que uma determinada vazão é igualada ou superada. Para representar a diferença na forma da curva de permanência, entre duas bacias semelhantes, está apresentadas na Figura 14, as curvas dos rios, Atibaia (estação fluviométrica 3D-006) e Jaguari (estação fluviométrica 3D-009), baseadas em dados mensais de 1931 a 2002.

As duas bacias tem áreas de drenagem de tamanho semelhante, a estação 3D-006 tem aproximadamente 1920 km^2 , e a 3D-009 cerca de 1950 km^2 . O relevo e a precipitação média anual, também são semelhantes. A vazão média da estação 3D-006 é de $27,78 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, e da 3D-009 de $31,22 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, ou seja, são praticamente semelhantes.

Figura 14 – Curvas de permanência das estações fluviométricas 3D-006 e 3D-009

Observa-se que as vazões mínimas são levemente mais altas na estação 3D-006, e as vazões máximas são maiores na estação 3D-009. A estação 3D-009 possui maior variabilidade das vazões, que oscilam rapidamente entre situações de baixa e de alta vazão, enquanto a estação 3D-006, conserva-se mais tempo com vazões próximas da média. Esta diferença ocorre, basicamente, porque a vegetação e a geologia da bacia da estação 3D-006 favorece mais a infiltração da água no solo, sendo que, chega ao rio apenas após um longo período em que fica armazenada no subsolo. A vazão da estação 3D-006 é naturalmente regularizada pelos aquíferos existentes na bacia, enquanto que, na bacia da estação 3D-009 este efeito não é tão observado.

A vazão média ($\bar{Q}$) retrata a disponibilidade hídrica máxima de uma bacia, já que a mesma é a maior vazão que pode ser, teoricamente, regularizada, permitindo a avaliação dos limites superiores do uso da água de um manancial, para as diferentes finalidades. A maior vazão média observada ocorreu na estação 4F-004, que mede a vazão do rio Ribeira do Iguapé, com valor de $433,84 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$.

4.3 Análise de consistência dos dados de vazão

Geralmente as entidades que publicam os dados hidrológicos já realizam a consistência dos mesmos. A Lei nº 9433 de 08/01/97 (BRASIL, 1997), em seu sexto instrumento a respeito do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), atribui às entidades a responsabilidade de reunir, atualizar, dar consistência e divulgar os dados e informações sobre a situação qualitativa e quantitativa dos recursos

hídricos no Brasil, garantindo o acesso e a informação dos dados a toda sociedade. Na Tabela 6 estão apresentadas as estações fluviométricas com valor da relação deflúvio/precipitação (D_p) maior que 0,75, sendo consideradas inconsistentes. Todas estão localizadas no Vale do Ribeira, no litoral sul, caracterizada por ser uma região de maior declividade e precipitação pluviométrica do Estado de São Paulo.

Tabela 6 – Estações fluviométricas inconsistentes quanto à relação deflúvio/precipitação (D_p)

Estação	Área de drenagem (km ²)	$\bar{Q}$ (mm)	$\bar{P}$ (mm)	D_p	I (m.m ⁻¹)	* T_c (h)
3E-114	35	1502,19	1727,28	0,80	0,09	2,44
4F-010	22	2380,62	1843,60	1,32	0,34	1,02
4F-037	380	1753,05	2034,93	1,06	0,20	5,60
4F-038	270	1882,06	1863,87	1,24	0,21	4,61

Nota: * tempo de concentração calculado pela metodologia de Ventura (IEP, 2001).

Em comparação com as demais bacias estudadas, as estações 3E-114, 4F-010, 4F-037 e 4F-038 apresentam pequeno comprimento do talvegue principal, área da bacia de drenagem baixa e alta declividade média (I); isso fez com que se individualizasse essas bacias com baixo tempo de concentração (T_c), segundo a metodologia de Ventura (IEP, 2001), sendo essa aplicável a todos os tamanhos de bacias hidrográficas.

A razão da inconsistência dessas estações pode ser explicada em função das medições diárias, em que somente duas delas por dia podem aumentar o volume escoado nessas bacias consideradas rápidas, bem como a desatualização da curva chave. Portanto, de acordo com o sexto instrumento da Lei nº 9433 de 08/01/97 (BRASIL, 1997), esses dados não deveriam ser disponibilizados sem antes serem consistidos pelos órgãos gestores (DAEE e ANA).

4.4 Comparação dos resultados das vazões de permanência por intermédio de dados diários e mensais

Na Figura 15 é apresentada a comparação da vazão com 95% de permanência no tempo (Q_{95}), calculada por dados mensais e diários, para as estações fluviométricas com séries maiores do que 30 anos. Observa-se que, por meio das séries de dados mensais, há uma superestimativa da Q_{95} em relação às séries de dados diários. A estação com maior desvio foi a 4F-002 com desvio de 12,21 m³.s⁻¹, enquanto que a menor foi a estação 3D-002 com desvio de 0,11 m³.s⁻¹. Este desvio foi proporcional à área da bacia de drenagem.

Aplicando-se o teste t de “*Student*” (GOSSET, 1908), após a normalização das vazões, por meio da transformação “*Box-Cox*” (BOX; COX, 1964), observa-se na Tabela 7 que o valor de p ficou acima de 0,05. Conclui-se, portanto, que em média, a determinação da Q_{95} por intermédio de dados médios mensais não difere de sua determinação por dados médios diários; sendo assim, essa vazão pode ser determinada, com segurança, por meio de dados médios mensais no Estado de São Paulo. Esse resultado é aplicável a outras vazões de permanência que são utilizadas como critério de outorga, bem como, possibilita o uso deste tipo de dado, na aplicação em estudos de regionalização de vazões.

Tabela 7 – Teste t de “*Student*” (GOSSET, 1908) para os grupos de Q_{95} obtidos por dados médios mensais e médios diários

	*Média - dados mensais	*Média - dados diários	t valor	GL**	p valor
Q_{95}	1,95	1,91	0,19	44	0,84

Nota: * média das vazões normalizadas; ** Graus de liberdade.

Figura 15 - Comparação da Q_{95} com dados mensais e diários, para as estações fluviométricas do Estado de São Paulo, com dados acima de 30 anos

4.5 Avaliação do modelo de regionalização hidrológica do Estado de São Paulo (LIAZI et al., 1988)

Com relação ao ajuste dos dados estimados pelo modelo e os observados pelo método padrão, calculado pelas séries históricas das estações fluviométricas, e analisando-se os indicadores estatísticos testados (Tabela 8), verifica-se que, para a $Q_{7,10}$, $\bar{Q}$, Q_{90} e Q_{95} o modelo apresentou ajuste, classificado pelo índice de confiança ou desempenho (c), como ótimo.

Tabela 8 - Classificação do modelo de regionalização hidrológica do Estado de São Paulo (LIAZI et al., 1988) de acordo com o índice de confiança (c)

Vazões	d	r*	c	R ²	Classificação
$Q_{7,10}$	0,97	0,92	0,90	0,87	Ótimo
Q_{90}	0,98	0,96	0,95	0,93	Ótimo
Q_{95}	0,98	0,95	0,94	0,90	Ótimo
$\bar{Q}$	0,99	0,99	0,98	0,98	Ótimo

Nota: * Correlação de Spearman (1904), significativa a $p < 0,05$.

A vazão utilizada como referência para a concessão de uso de recursos hídricos no Estado de São Paulo é a $Q_{7,10}$, sendo permitido a captação, a fio d' água, de até 50% da mesma, deixando a jusante o restante. Além de São Paulo os Estados do Espírito Santo e Minas Gerais utilizam a $Q_{7,10}$ como vazão de referência nos processos de outorga (ANA, 2007).

A $\bar{Q}$ não é utilizada como critério para avaliação dos pedidos de outorga no Brasil; entretanto, sua mensuração é importante em uma bacia, pois representa a disponibilidade hídrica máxima. Ela é, teoricamente, a maior vazão que pode ser regularizada por um reservatório, permitindo a avaliação dos limites superiores do uso da água de um manancial com barramento, para distintas finalidades (TUCCI, 2009).

As vazões referentes à Curva de Permanência Q_{90} e Q_{95} classificaram-se como ótimas, com c igual a 0,95 e 0,94, respectivamente. Devido aos baixos índices de precipitação e a irregularidade do regime hídrico na Região Nordeste do Brasil, aliados a situação hidrogeológica, especialmente no Semiárido brasileiro, ocorrem os reduzidos valores de disponibilidade hídrica. Nesse contexto, os Estados da Região Nordeste utilizam as vazões com 95% e 90% de permanência como sendo referência aos critérios de outorga. Segundo a ANA (2007), os Estados que utilizam a Q_{90} como referência para os critérios de outorga são:

Tocantins, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Sergipe e Bahia; o único que usa a Q_{95} na Região Nordeste como referência é o Piauí, sendo permitido o uso de até 80% da Q_{95} . É importante frisar que para os cursos hídricos federais, a ANA impõe um limite de 70% da Q_{95} .

Figura 16 - Gráficos de dispersão entre vazões calculadas pelo modelo de regionalização (ordenadas) e calculadas por meio das estações fluviométricas (abscissas). Em que A = $Q_{7,10}$, B = $\bar{Q}$, C = Q_{90} e D = Q_{95}

Na Figura 16 está demonstrada, graficamente, a qualidade do modelo. Pode-se verificar que a maioria dos pontos encontra-se na parte inferior da reta 1:1, gerando uma subestima nos valores; assim, o modelo trabalha a favor da conservação dos recursos hídricos; entretanto, em alguns casos essa subestimativa é elevada, e acaba levando os usuários a conflitos com o órgão gestor de recursos hídricos. Dentro deste enfoque, é plausível que se estabeleça critérios de outorga menos conservadores, bem como a adoção de vazões mínimas de referência sazonais, que correspondam às condições trimestrais de maior escassez hídrica, sendo que nos períodos chuvosos uma maior quantidade do recurso estaria passível de ser outorgado.

O modelo sugerido por Liazi et al.(1988) rejeitou a hipótese de que a atualização dos dados fluviométricos pudesse inferir na qualidade do mesmo. Assim, este estudo mostrou que o modelo encontra-se adequado no cálculo das vazões de referência para as bacias que

estejam na faixa de área em que foi testado, podendo, desta forma, ser utilizado como uma ferramenta no auxílio à projetos de outorga e à gestão de recursos hídricos no Estado de São Paulo. Essa metodologia poderia ser aplicada a todos os Estados brasileiros, que utilizam as vazões estudadas como referência para os critérios de outorga, respeitando os diferentes regimes hídricos do país.

No entanto, o modelo utiliza como um dos parâmetros de entrada, a precipitação média anual da bacia em questão, o que pode ocasionar incerteza na estimativa das vazões fornecidas pelo mesmo, isso devida a, escolha do período da série e método utilizado para aferir esta variável.

Outro ponto a considerar, é a respeito do aplicativo disponível no endereço eletrônico <http://www.sigrh.sp.gov.br>, utilizado para efetuar os cálculos do modelo. O modelo proposto por Liazi et al.(1988) utiliza, inicialmente, a precipitação média anual da bacia hidrográfica para efetuar os cálculos, enquanto que o aplicativo sugere o uso da seguinte variável, no ponto onde são inseridas as coordenadas geográficas, podendo ocasionar erros grosseiros em bacias hidrográficas grandes, caracterizadas por diferentes regimes pluviométricos.

4.6 Nova proposta de regionalização hidrológica do Estado de São Paulo

Diante de algumas limitações do modelo de regionalização hidrológica do Estado de São Paulo (LIAZI et al., 1988) utilizado atualmente, bem como do aplicativo para efetuar os cálculos do mesmo, disponível em <http://www.sigrh.sp.gov.br>, considerou-se relevante fazer um novo modelo, utilizando uma metodologia que corrija as limitações do antigo.

Está representada, na Figura 17, a interface do aplicativo computacional para cálculos das vazões de permanência, mínima, média e volume de regularização, para o Estado de São Paulo; observa-se que, para efetuar os cálculos, é necessário apenas a inserção da coordenada geográfica e da área da bacia de drenagem, a montante do ponto em que se deseja conhecer as vazões fornecidas.

A aba de resultados referente a curva de permanência informa as vazões geradas pelo modelo, enfatizando que todas estas são utilizadas nos Estados do Brasil, como referência para determinação da vazão máxima a ser outorgada em um curso da água; por conseguinte, a metodologia utilizada para a obtenção deste modelo tem potencial para ser empregada em outros Estados do País.

Quando a demanda a ser atendida supera a vazão mínima que pode ocorrer em um curso de água, é necessário estimar volumes de armazenamento para atender uma demanda

que supera sazonalmente as disponibilidades hídricas em épocas de estiagem. Neste contexto, a aba de resultados alusiva à curva de permanência possui um botão, que utilizado, regularizará uma vazão firme, após a inserção da vazão outorgada pelo DAEE e da vazão demandada pelo usuário, na respectiva bacia.

Na aba de resultado remanescente a curva de regularização, está representada em forma de tabela o volume necessário para regularizar uma vazão firme, associado a um período de retorno. Evidentemente, o volume afluente durante o período chuvoso, o qual pode ser obtido pela área da curva de permanência acima da linha horizontal, deve ser suficiente para suprir o déficit dos meses de estiagem, ou seja, a vazão firme a ser regularizada por um barramento não pode ser, teoricamente, maior que a vazão média plurianual; na prática, devido à questões técnicas e econômicas da barragem, esse valor varia, geralmente entre, 50 e 80% da vazão média plurianual. O modelo encontra-se disponível no endereço eletrônico: <http://www.leb.esalq.usp.br/wolff/rv/>.

Figura 17 – Interface do aplicativo computacional desenvolvido para o cálculo das vazões de referência e volume de regularização de um reservatório no Estado de São Paulo

Na Tabela 9 está apresentado o modelo de regressão linear simples que o aplicativo utiliza para calcular a $Q_{7,10}$ em função da variável preditora Q_{98} , bem como a correlação entre elas. Observa-se que o modelo gerado consegue explicar 99% da variação da $Q_{7,10}$ pela

variação da Q_{98} , com erro padrão de 2,44%. A correlação foi alta com valor de 0,99; portanto, as vazões correlacionadas são diretamente proporcionais.

Tabela 9 - Estatística de regressão e correlação de Spearman (1904) entre as vazões $Q_{7,10}$ e Q_{98}

Estatística de regressão	R^2 Ajustado	Erro padrão (%)	r^{**}
$Q_{7,10} = 0,829 \cdot Q_{98}$	0,99	2,44	0,99

Nota: * variável significativa a $p < 0,05$, ** Correlação de Spearman (1904), significativa a $p < 0,05$.

Segundo Tucci (2002), a rede hidrológica no Brasil foi instalada em grandes bacias hidrográficas. Portanto, o uso da regionalização para bacias de menor porte gera incertezas na tomada de decisão, caracterizada pela extrapolação de seus resultados. Neste enfoque, esta metodologia apresenta-se vantajosa, já que a mesma foi formulada por intermédio da interpolação espacial dos parâmetros da curva de duração das vazões específicas médias mensais, anulando, assim, o efeito da área da bacia sobre as vazões. Desta forma, o modelo gerado pode ser aplicado para todos os tamanhos de bacia; entretanto, estudos futuros com microbacias devem ser feitos para confirmar esta premissa. Está apresentado na Figura 18 o gráfico de dispersão das vazões geradas pelo modelo proposto.

Figura 18 - Gráficos de dispersão entre vazões calculadas pelo modelo de regionalização (ordenadas) e calculadas por meio das estações fluviométricas (abscissas). Em que A = $Q_{7,10}$, B = $\bar{Q}$, C = Q_{90} e D = Q_{95}

Os resultados da avaliação do modelo proposto neste estudo estão representados na Tabela 10. Assim como no modelo de Liazi et al. (1988), todas as vazões avaliadas foram classificadas como ótimas; entretanto, o novo modelo apresentou índice de confiança (c) superior para $Q_{7,10}$, Q_{90} e Q_{95} e igual para $\bar{Q}$. Assim, este modelo apresenta melhor desempenho do que o utilizado atualmente no Estado de São Paulo. Ainda, pode-se formular um aplicativo que efetue cálculos mais coerentes, já que o mesmo não precisa da inserção da precipitação média anual das bacias de drenagem, sendo esta uma variável difícil de ser fornecida por um programa computacional e que é falha no aplicativo fornecido pelo SIGRH em <http://www.sigrh.sp.gov.br>.

Tabela 10 - Classificação do modelo proposto de acordo com o índice de confiança (c)

Vazões	d	r*	c	R ²	Classificação
$Q_{7,10}$	0,98	0,96	0,94	0,92	Ótimo
Q_{90}	0,99	0,97	0,96	0,94	Ótimo
Q_{95}	0,98	0,96	0,94	0,92	Ótimo
$\bar{Q}$	0,99	0,99	0,98	0,97	Ótimo

Nota: * Correlação de Spearman (1904), significativa a $p < 0,05$.

Para avaliar o modelo, desconsiderou-se nos cálculos de interpolação espacial dos parâmetros da distribuição Log-normal 3P, a estação fluviométrica a ser comparada com seu valor padrão, sendo assim corresponde à validação cruzada. Entretanto, de forma prática, caso se necessite conhecer as vazões de referência em uma estação fluviométrica que foi utilizada na formulação do modelo, o aplicativo utiliza a respectiva estação para efetuar os cálculos. Em que, é imposto uma distância mínima caracterizando um maior peso dessa estação. Consequentemente, o aplicativo estima vazões análogas às vazões calculadas pelas séries históricas das estações; portanto, pode-se desconsiderar o uso do banco de dados para determinar as referentes vazões.

4.6.1 Regiões hidrologicamente homogêneas do Estado de São Paulo

A metodologia proposta por Liazi et al. (1988) divide o Estado de São Paulo em 21 regiões hidrologicamente semelhantes; no entanto, os trabalhos apresentados por esses autores não mencionam como se procedeu à delimitação. Nesse enfoque, delimitou-se o Estado em regiões hidrologicamente homogêneas por meio de uma metodologia considerada objetiva, conhecida como medida de heterogeneidade - H, proposta por Hosking e Wallis (1997).

Inicialmente, foi feito alguns ajustes subjetivos, tais como a remoção e o reagrupamento de postos de uma ou mais regiões, para fazer com que a medida de heterogeneidade se amoldasse aos limites propostos. Após o reagrupamento das estações obteve-se 6 regiões homogêneas individualizadas com valor de H menor que 1, (Tabela 12).

Tabela 11 - Regiões hidrologicamente homogêneas, quanto à medida de heterogeneidade – H (HOSKING; WALLIS, 1997)

Região hidrologicamente homogênea	A	B	C	D	E	F
H	0,16	0,82	0,90	0,87	0,18	0,07

Entretanto, duas regiões ficaram caracterizadas pela presença de um pequeno número de postos “atípicos” (regiões E e F). Nesses casos, Hosking e Wallis (1997) argumentam que, as razões de natureza física devem ter prioridade sobre os de natureza estatística, e advertem que o grupo de postos “atípicos” necessitam permanecer na região originalmente proposta. Tendo em vista essas considerações o Estado de São Paulo foi dividido em 4 regiões hidrologicamente homogêneas (Figura 19).

Figura 19 – Regiões hidrologicamente homogêneas, segundo a medida de heterogeneidade – H

Observa-se na Figura 19 que a delimitação das regiões hidrologicamente homogêneas assemelha-se ao mapa de relevo do Estado de São Paulo (Figura 10). Hosking e Wallis (1997) afirmam que essa é uma das premissas para validar a delimitação, já que os regimes fluviométricos são intrínsecos aos aspectos físicos do relevo.

Esta delimitação não está relacionada ao modelo de regionalização proposto nessa dissertação; diferentes metodologias utilizam, inicialmente, a delimitação de regiões hidrologicamente semelhantes. Assim, para cada região, são geradas melhores estimativas de seus modelos. Pelo fato da metodologia proposta utilizar a interpolação do inverso do quadrado da distância entre as 6 estações fluviométricas mais próximas, afim de obter as variáveis de interesse, o modelo proposto não depende da preliminar delimitação de regiões hidrologicamente homogêneas.

4.7 Estudo de caso: comparação entre os modelos de regionalização hidrológica para o Estado de São Paulo

Escolheu-se uma estação fluviométrica que não foi utilizada para formular os modelos, para assim comparar os resultados dos mesmos. A estação escolhida foi a Iporanga, código 81350000; localiza-se na latitude $-24^{\circ} 35' 8''$ e longitude $-48^{\circ} 35' 30''$, com área de bacia de drenagem igual a 12500 km²; mede a vazão do rio Ribeira do Iguapé e encontra-se em operação, sendo administrada pela ANA. Na Tabela 13 estão apresentados os valores das vazões estudadas obtidas pelos diferentes modelos.

Tabela 12 – Comparação entre os modelos, com relação ao valor padrão calculado por intermédio dos dados da estação fluviométrica de Iporanga

	$\bar{Q}$	Er (%)	Q ₉₀	Er (%)	Q ₉₅	Er (%)	Q _{7,10}	Er (%)
Modelo proposto	157,44	20,3	92,63	9,3	84,3	8,2	63,74	10,8
Modelo de Liazi et al. (1988)	270,61	37,0	151,54	48,3	138	50,2	98,47	37,8
Valores padrões	197,5	---	102,17	---	91,9	---	71,48	---

Nota: vazões em m³.s⁻¹.

O modelo proposto neste estudo apresentou melhores estimativas; a vazão de referência para a outorga de recursos hídricos do Estado de São Paulo (Q_{7,10}), apresentou uma subestima com erro relativo de 10,8%, ao contrário o modelo de Liazi et al.(1988) que proporcionou uma superestima, com erro relativo de 37,8%. Observa-se que, o modelo

proposto, para este caso foi a favor da conservação dos recursos hídricos. Para o modelo proposto as estimativas de Q_{90} e Q_{95} apresentaram erro relativo foi de 9,3 e 8,2%, respectivamente; enquanto que, para a $\bar{Q}$ esse valor foi de 20,3%. Fica evidente, para este caso, a melhor capacidade preditiva do modelo proposto neste estudo.

5 CONCLUSÕES

De acordo com os objetivos propostos inicialmente, a partir da informação e dos conhecimentos adquiridos da análise dos dados, por intermédio da metodologia proposta e da interpretação dos resultados, é possível inferir que:

- O modelo sugerido por Liazi et al.(1988), foi classificado como ótimo pelo índice de confiança (c), (CAMARGO; SENTELHAS, 1997). Rejeitou-se, assim, a hipótese de que a atualização dos dados fluviométricos pudesse interferir na qualidade do mesmo. Portanto, mostrou-se que o modelo encontra-se adequado para cálculo das vazões de referência para as bacias que estejam na faixa de área em que foi testado, podendo, por conseguinte ser utilizado como uma ferramenta no auxílio a projetos de outorga e a gestão de recursos hídricos no Estado de São Paulo.
- Embora possuindo uma classificação ótima, o modelo de Liazi et al. (1988) apresentou tendências a subestimar as vazões. Assim, o modelo trabalha a favor da conservação dos recursos hídricos; entretanto, em alguns casos essa subestimativa é elevada e acaba levando os usuários a conflitos com o órgão gestor de recursos hídricos. Nesse enfoque, é plausível que se estabeleça critérios de outorga menos conservadores, bem como, a adoção de vazões mínimas de referência sazonais, que correspondam às condições trimestrais de maior escassez hídrica, em que nos períodos chuvosos uma maior quantidade do recurso possa ser outorgada.
- O modelo proposto nesse estudo apresenta-se com melhor desempenho quando comparado com o proposto por Liazi et al. (1988), segundo o índice de confiança (c), (CAMARGO; SENTELHAS, 1997); suas principais vantagens são: (i) não é dependente da inserção da precipitação média anual; (ii) não é vinculado à determinação de regiões hidrologicamente homogêneas; e (iii) suspeita-se que o mesmo possa ser aplicado a todos os tamanhos de bacias; estudos futuros devem ser feitos para corroborar com esta última premissa.
- A delimitação de regiões hidrologicamente semelhantes para o Estado de São Paulo feita por Liazi et al. (1988) não está em concordância com a medida de heterogeneidade – H (HOSKING; WALLIS, 1997); esta medida informou a existência de apenas 4 regiões.

- Para este estudo, o cálculo das vazões de 95% de permanência no tempo, com o uso de dados mensais para séries maiores do que 30 anos, não apresentou, diferença significativa, segundo o teste t de “*Student*” (GOSSET, 1909), com relação a uso de dados diários.
- Em relação a interpolação espacial da precipitação média anual, o interpolador geoestatístico, krigagem ordinária circular, apresentou ótima performance; estudos anteriores feitos no Estado de São Paulo corroboram com esta conclusão.
- As estações 3E-114, 4F-010, 4F-037 e 4F-038 mostraram-se inconsistentes, quanto à metodologia da relação deflúvio/precipitação, o que está em desacordo com o sexto instrumento da Lei nº 9433 de 08/01/97 (BRASIL, 1997), pela qual os dados não podem ser disponibilizados sem antes serem consistidos pelos órgãos gestores, DAEE e ANA.

REFERÊNCIAS

ABRAMOWITZ, M.; STEGUN, I. A. **Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables**. New York, Ed. 1972.

ANA. **GEO Brasil recursos hídricos**: componente da série de relatórios sobre o estado e perspectiva do meio ambiente no Brasil. Brasília, 2007. 264 p.

ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil**: informe 2012. Brasília, 2012. 216p.

ANDERSON, T. W.; DARLING, D. A. A test of goodness of Fit. **Journal of the American Statistical Association**, Boston, v.48, p.765-769, 1954.

AZEVEDO, A. A. **Avaliação de metodologias de regionalização de vazões mínimas de referência para a sub-bacia do rio Paranã**. 2004. 116 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2004.

BAENA, L. G. N. **Regionalização de vazões para a bacia do rio Paraíba do Sul, a montante de Volta Redonda, a partir de modelo digital de elevação hidrologicamente consistente**. 2002. 135 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Federal , Viçosa-MG, 2002.

BARBOSA, J. P. M. Utilização de método de interpolação para análise e espacialização de dados climáticos: o SIG como ferramenta. **Caminhos de Geografia**, v. 9, n. 17, p. 85-96, set. 2006. Disponível em: <<http://www.ig.ufu.br/revista/caminhos.html>>. Acesso em: 25 set. 2012.

BOX, G. E. P; COX, D. R. An analysis of transformation. **Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Statistical Methodology)**, Hoboken, v.26, n.2, p.211 - 252, 1964.

BRASIL. Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil**: versão atualizada até a Emenda nº 69/2012. Disponível em: <<http://www2.camara.gov.br>> Acesso em: 3 abr. 2012.

BRASIL. Decreto nº 24693, de 10 de julho de 1934. Decreta o Código de Águas. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Rio de Janeiro, 10 jul. 1934.

BRASIL. Decreto nº 89496, de 29 de março de 1984. Regulamenta a Lei nº 6662, de 25 de junho de 1974, que dispõe sobre a Política Nacional de Irrigação, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 30 mar. 1984.

BRASIL. Decreto nº 97632, de 10 de abril de 1989. Dispõe sobre a regulamentação do artigo 2º, inciso VIII, da Lei nº 6.38, de 31 de agosto de 1981, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 12 abr. 1989a.

BRASIL. Decreto nº 99274, de 6 de junho de 1990. Regulamenta a Lei nº 6902, de 27 de abril de 1981, e a Lei nº 6938, de 31 de agosto de 1981, que dispõem respectivamente sobre a criação de Estações Ecológicas e Áreas de Proteção Ambiental e sobre Política Nacional Meio Ambiente, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 7 jun. 1990a.

BRASIL. Lei nº 12334, de 20 de setembro de 2010. Institui a Política Nacional de Segurança de Barragens, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4º da Lei nº 9984, de 17 de julho de 2000. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Brasília, 20 set. de 2010.

BRASIL. Lei nº 6662 de 25 de junho de 1979. Dispõe sobre a Política Nacional de Irrigação e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 26 jun. 1979.

BRASIL. Lei nº 6938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos da formulação e aplicação e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 2 set. 1981.

BRASIL. Lei nº 7804, de 18 de julho de 1981. Altera a Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, a Lei nº 7735, de 22 de fevereiro de 1989, a Lei nº 6803, de 2 de julho de 1980, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 20 jul. 1989b.

BRASIL. Lei nº 8028, de 12 de abril de 1990 Dispõe sobre a organização da Presidência da República e dos Ministérios, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 13 de abr. 1990b.

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. I da Lei nº 8001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7990, de 28 de dezembro de 1989. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 9 jan. 1997.

BRASIL. Lei nº 9984, de 17 de julho de 2000. Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas - ANA, entidade federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e de coordenação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 18 jul. 2000.

CÂMARA, A. C. F. C. **Análise da vazão máxima outorgável e da introdução simplificada da qualidade da água no processo de outorga da bacia do Rio Gramame (PB)**. 2003. 219p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – UFRGS Porto Alegre, 2003.

CÂMARA, G.; DAVIS, C. **Introdução à Ciência da Geoinformação**. 2002. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/>>. Acesso em: 15 ago. 2012.

CÂMARA, G.; MEDEIROS J. S. de. Princípios básicos em geoprocessamento. In: ASSAD, E. D.; SANO, E. E. (Ed.). **Sistema de Informações Geográficas**. Aplicações na Agricultura. Brasília: Embrapa, 1998. 434.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CAMARGO, E. C. G. **Desenvolvimento, implementação e testes de procedimentos geoestatísticos (Krigagem) no sistema de processamento de informações**

georreferenciadas (Spring). 1997. 106 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 1997.

CAMPOS, M. C. C.; JÚNIOR, J. M.; PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M. DE; BARBIERI, D. M. Aplicação de adubo e corretivo após o corte da cana-planta utilizando técnicas geoestatísticas **Ciência Rural**, Santa Maria, v.38, n.4, p.974-980, 2008.

CARVALHO, J. R. P. de; ASSAD, E. D. Análise espacial da precipitação pluviométrica no Estado de São Paulo: comparação de métodos de interpolação. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.25, n.2, p.377-384, 2005.

CASTRO, F. da S. **Zoneamento agroclimático para a cultura do Pinus no Estado do Espírito Santo.** 2008. 123 p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 2008.

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 informações geográficas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.7, n. 3. p. 43-51. , 2002.

CRUZ, J. C. **Disponibilidade hídrica para outorga: avaliação dos aspectos técnicos e conceituais.** 2001. 199p Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), UFRGS Porto Alegre, 2001.

DALRYMPLE, T. **Flood-frequency analyses, Manual of Hydrology.** Washington: Ed. Government Printing Office, 1960. 80p.

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

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

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

FELGUEIRAS, C. A. **Modelagem ambiental com tratamento de incertezas em sistemas de informação geográfica: o paradigma geoestatístico por indicação.** 1999. 169 p. Tese (Doutorado em Computação Aplicada), INPE, São José dos Campos, 1999.

FIETZ, C. R. **Variabilidade espacial do armazenamento de água no solo visando o manejo da irrigação por aspersão.** 1998. 97 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem). - USP, 1998.

FONI, A.; SEAL, D. Shuttle Radar Topography Mission: an innovative approach to shuttle orbital control. **Acta Astronautica**, Elmsford, v. 54, p. 565-570, 2004.

GONÇALVES, A. C. A. **Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo para fins de manejo da irrigação.** 1997. 118 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - , Piracicaba, 1997.

GOSSET, W. S. The Probable Error of a Mean. **Biometrika**, Oxford, v. 6, n.1, p.1-25, 1908.

- GREENWOOD, J. A.; LANDWEHR, J. M.; MATALAS, N. C.; WALLIS, J. R. Probability weighted moments: definition and relation to parameters expressible in inverse form. **Water Resources Research**, New York, v15, n.5, p1049-1054, 1979.
- HARRIS, N. M.; GURNELL, A. M.; HANNAH, D. M.; PETTS, G. E. Classification of river regimes: a context for hydroecology. **Hydrological Processes**, Hardcover, v.14, p.2831-2848, 2000.
- HORWITZ, A. A Version of Simpson's Rule for Multiple Integrals. **Journal of Computational and Applied Mathematics** North-Holland v.134, n.1, p 1-11, 2001.
- HOSKING, J. R. M. The theory of probability weighted moments. **IBM Research Report RC 12210**, New York, 1986,
- HOSKING, J. R. M.; WALLIS, J. R. Correction to “some statistics useful in regional frequency analysis”. **Water Resources Research**, New York, v31, n.1, p. 251, 1995.
- HOSKING, J. R. M.; WALLIS, J. R. **Regional Frequency Analysis – An Approach Based on L-Moments**. Cambridge: Ed. Cambridge University Press, 1997. 224 p.
- IEP. **Manual de drenagem superficial em vias de comunicação**: Instituto das Estradas de Portugal (IEP). Lisboa, 2001. 274p.
- ISAACS, H. E.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 560 p.
- KITANITIS, P. K.; Prediction by the method of moments of transport in a heterogeneous formation, **Journal of ydrology**, Amsterdam, v. 102, p. 453 – 473, 1988.
- KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Klimate de Erde**. Gotha: Verlag Justus Perthes. 1928. 1 mapa, color., 150 cm x 200 cm. Escala 1: 120.000.000.
- LIAZI, A.; CONEJO, J. L.; PALOS, J. C. F.; CINTRA, P. S. **Regionalização Hidrológica no Estado de São Paulo**. São Paulo: Revista Águas e Energia Elétrica – DAEE, ano 5, n.14. p.4-10. 1988.
- MEDEIROS, S. de. S.; CECILIO, R. A.; MELO JUNIOR, J. C. F. de; SILVA JUNIOR, J. L. C. da. Estimativa e espacialização das temperaturas do ar mínimas, médias e máximas na Região Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 2, p. 247-255, 2005.
- MIRANDA, E. E. de; (Coord.). **Brasil em Relevo**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 26 abr. 2012.
- NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte, Ed. 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, n.3, p.282-290, 1970.
- NERC. **Flood studied report**. London, 1975, 50 .
- ORTIZ, V. L. I.; MEIRELLES, M. S. P.; BETTINI, C. Geoestatística aplicada à agricultura de precisão. In: MACHADO, P. L. O. de A.; BERNARDI, A. C. de C.; SILVA, C. A. (Ed.).

Agricultura de precisão para o manejo da fertilidade do solo em sistema de plantio direto. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004. p. 37 - 56.

PINHEIRO, M. M. G.; NAGHETTINI, M. Análise regional de frequência e distribuição temporal das tempestades na Região Metropolitana de Belo Horizonte - RMBH. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 3, n. 4, p. 73-87, 1998.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. **R Foundation for Statistical Computing**, Vienna. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>. 2012.

RABUS, B.; EINEDER, M.; ROTH, A.; BAMLER, R. The shuttle radar topography mission - a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. **Journal of Photogrammetry & Remote Sensing (ISPRS)**, Amsterdam, v. 57, p. 241-262, 2003.

RAMECH, I. M. B.; FREITAS, V. A. L.; CIRILO, J. A. Importância da escolha das variáveis explicativas na regionalização de vazões em áreas com escassez de dados. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, Curitiba... : Associação Brasileira de Recursos Hídricos- 2003. CD-ROM.

RAO, A. R.; SRINIVAS, V. V. Regionalization of watersheds by fuzzy cluster analysis. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 318, n. 1-4, p. 57-79, mar. 2006.

REICHARDT, K.; VIEIRA, S. R.; LIBARDI, P. L. Variabilidade espacial de solos e experimentação de campo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v.10, n.1, p.1-6, 1986.

RIBEIRO, C. A. D. **Delimitação de zonas agroclimáticas para cultura do Eucalipto no norte do Espírito Santo e sul da Bahia.** 2009. 105 p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 2009.

RIBEIRO, M. M. R. **Alternativas para outorga e a cobrança pelo uso da água: Simulação de um caso.** 2000. 200p. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

SADRI, S.; BURN, D. H. A Fuzzy C-Means approach for regionalization using a bivariate homogeneity and discordancy approach. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 401, n. 3-4, p. 231-239, maio, 2011.

SÃO PAULO. Lei nº 7663, de 30 de dezembro de 1991. Estabelece normas de orientação à Política Estadual de Recursos Hídricos bem como ao Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos. **Diário Oficial do Estado de São Paulo**, São Paulo, 31 dez. 1991.

SÃO PAULO. Lei nº 9034, de 27 de dezembro de 1994. Dispõe sobre o Plano Estadual de Recursos Hídricos - PERH, a ser implantado no período 1994 e 1995, em conformidade com a Lei n. 7663, de 30 de dezembro de 1991, que instituiu normas de orientação à Política Estadual de Recursos Hídricos. **Diário Oficial do Estado de São Paulo**, São Paulo, 27 dez. 1994.

SCHIMITH, W. **Agricultura irrigada e o licenciamento ambiental.** 2007. 127p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - .

SILVA, B. C., TIAGO FILHO, G. L., SILVA, A. P. M., de PAULO, R. G. F. Regionalização de vazões na bacia do Rio Grande. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, Curitiba... Associação Brasileira de Recursos Hídricos- 2003. CD-ROM.

SILVA, C. A. (Ed). **Agricultura de precisão para o manejo da fertilidade do solo em sistema de plantio direto**. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2004. p. 37-56.

SILVA, D.D. da; PEREIRA, S. B.; PRUSKI, F. P.; GOMES FILHO, R. R.; LANA, A. M. Q.; BAENA, L. G. N. Estimativa e espacialização dos parâmetros da equação de intensidade-duração-frequência da precipitação para o Estado de Tocantins. **Revista Engenharia Agrícola**, Campina Grande, v.7, p.70-87, 1999.

SILVA, K. R da; PAIVA, Y. G.; CECÍLIO, R. A.; PEZZOPANE, J. E. M. Avaliação de interpoladores para a espacialização de variáveis climáticas na bacia do rio Itapemirim – ES. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2005. p. 3141-3146.

SILVA, S. A.; LIMA, J. S. de S.; SOUZA, G. S. de; OLIVEIRA, R. B. de. Avaliação de interpoladores estatísticos e determinísticos na estimativa de atributos do solo em agricultura de precisão. **Idesia**, Arica, v. 26, n. 2, p. 75-81, 2008.

SOUZA FILHO, C. R. O relevo das Américas como nunca antes visto. **Infogeo**, Curitiba, v.1, n. 30, p. 54-58, 2003.

SOUZA, L.; COGO, N. P.; VIEIRA, S. R. **Variabilidade espacial de fósforo, potássio, e matéria orgânica no solo em relação a sistema de manejo. P, K, Ca, Mg, H+Al, SB**, Viçosa, 1998. v. 22.

SPEARMAN. C. “General Intelligence”, Objectively Determined and Measured. **The American Journal of Psychology**, Champaign, v. 15, n. 2, p. 201-292, 1904.

STURGES, H. The choice of a class-interval. **Journal American Statistical Association**, Alexandria, v. 21, n. 153, p. 65–66, 1926.

TUCCI, C.E.M.; SILVEIRA, A.; SANCHEZ, J.; ALBUQUERQUE, F. Flow regionalization in the upper Paraguai basin, Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, Wallingford, v. 40, n. 4, p. 485-497, 1995.

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

TUCCI, C.E.M. **Hidrologia: Ciência e aplicação**. Porto Alegre, Ed. ABRH/UFRGS, 2009. 944 p.

VALERIANO, M. M.; PICINI A. G. **Geoprocessamento de informações agroclimatológicas**. São José dos Campos, SP: INPE: Coordenação de Ensino, Documentação e Programas Especiais (INPE-1028-RPQ/751), 2003. 133 p.

VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de argila, silte e atributos químicos em uma parcela experimental de um latossolo roxo de Campinas (SP). **Bragantia**, Campinas, v. 56, n. 1, p. 1-17, 1997.

VIGLIONE, A. nsRFA: Non-supervised Regional Frequency Analysis. **R package version 0.7-3**. <http://CRAN.R-project.org/package=nsRFA> 2012.

WATERSHED SCIENCE CENTRE . **Hydrological low flow and their uses**. WSC Report. 2004. Ontario, 2004. 34p.

WILTSHIRE, S.E. Regional flood frequency analysis 1: Homogeneity statistics. **Hydrological Sciences Journal**, Wallingford, v. 31, n. 3, p. 321-333, Set. 1986.

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R. ; DONNELL, J. O.; ROWE, M. C. Statistics for the Evaluation and Comparison of Models. **Journal of Geophysical Research**, Lawrence, v. 90, n. 5, p. 8995-9005, 1985.

YAVUZ, H.; ERDOĞAN, S. Spatial Analysis of Monthly and Annual Precipitation Trends in Turkey. **Water Resources Management**, New York, v. 26, n. 3, p. 609-621, 25 out 2011.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- BAENA, L. G.; SILVA, D. D. da, PRUSKI, F. F.; CALIJURI, M. L. Espacialização da $Q_{7,10}$, $Q_{90\%}$ e $Q_{95\%}$ visando à gestão dos recursos hídricos: estudo de caso para a bacia do rio paraíba do sul. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v.12, n.1, p. 24-31, 2004.
- FERRARI, G.T. **Imputação de dados pluviométricos e sua aplicação na modelagem de eventos extremos de seca agrícola**. 2011. 71p. Dissertação (Mestrado em Estatística e Experimentação Agronômica– , Piracicaba. 2011.
- JUNQUEIRA JÚNIOR, J. A.; GOMES, N. M.; MELLO, C. R. de; SILVA, A. M. da. Precipitação provável para a região de madre de deus, alto rio grande: modelos de probabilidades e valores característicos. **Ciência e Tecnologia**, Lavras, v. 31, n. 3, p. 842-850, 2007.
- LUCAS, A. A. T. **Impacto da irrigação na bacia hidrográfica do ribeirão dos Marins**. 2007. 102p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – ESALQ/USP, Piracicaba. 1999.
- MARQUEZ, F de A.; SILVA, D. D. da; RAMOS, M. M.; PRUSKY, F. F. AQUORA - Sistema Multi-Usuário para Gestão de Recursos Hídricos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 14, n.4, p. 51-69, 2009.
- MELLO, C. R.; LIMA, J. M.; SILVA, A. M.; MELLO, J. M.; OLIVEIRA, M. S. Krigagem e inverso do quadrado da distância para interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n.1, p. 925-933, 2003.
- MOREIRA, M. C. Sistema integrado para a gestão de recursos hídricos: estudo de caso para a bacia do ribeirão entre ribeiros. **Engenharia na agricultura**, Viçosa - MG, v.18 n.5, p. 419 – 428, 2010.
- MOSLEY, M ,P. Delimitation of New Zealand hydrologic regions. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 49, n.1, p.173 - 192. 1981.
- PINHEIRO, M. M. G.; NAGHETTINI, M. Análise regional de frequência e distribuição temporal das tempestades na região metropolitana de belo horizonte - rmbh. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 3 n.4, p.73-88, 1998.
- PINHEIRO, V.B.; NAGHETTINI, M. Calibração de um modelo chuva-vazão em bacias sem monitoramento fluviométrico a partir de curvas de permanência sintéticas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 15, n. 2, p. 143 - 156, 2010.
- SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance for normality (complete samples). **Biometrika**, Oxford, v. 52, n. 3-4, p. 591–611, 1965.
- SILVA, A. M de; OLIVEIRA, P. M. de; MELLO, C. R. de; PIERANGELI, C. Vazões mínimas e de referência para outorga na região do Alto Rio Grande, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 2, p.374–380, 2006.
- SOUSA, H. T de. **Sistema computacional para regionalização de vazões**. 2009. 99 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – UFV, Viçosa. 2007.

SOUZA , G. S. de. Krigagem ordinária e inverso do quadrado da distância aplicados na espacialização de atributos químicos de um argissolo. **Scientia Agraria**, Curitiba, v.11, n.1, p.73-081, 2010.

VALVERDE, A. E. L.; LEITE, H. G.; SILVA, D. D da; PRUSKI, F. F. Momentos-l: teoria e aplicação em Hidrologia. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.28, n.6, p.927-933, 2004.

VIOLA, M. R. Métodos de interpolação espacial para o mapeamento da precipitação pluvial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, n. 9, p. 970 - 978, 2010.

APÊNDICES

Apêndice A - Dados das estações fluviométricas administradas pelo DAEE e ANA, utilizadas para avaliar o modelo de regionalização hidrológica do Estado de São Paulo (LIAZI et al., 1988), e para formular o novo modelo

(continua)

Latitude	Longitude	Código das EF	Área da BH (km ²)	P (mm)	Valores estimados (m ³ .s ⁻¹)				Valores padrões (m ³ .s ⁻¹)			
					$\bar{Q}$	Q ₉₀	Q ₉₅	Q _{7,10}	$\bar{Q}$	Q ₉₀	Q ₉₅	Q _{7,10}
-22,59	-44,97	1D-008	12075	1519,90	222,26	108,91	96,463	73,908	207,72	146,94	137,83	95,25
-23,08	-44,90	1E-001	93	1929,83	2,9127	1,4272	1,2641	0,9685	2,34	1,11	0,98	0,74
-22,93	-45,44	2D-005	81	1396,29	1,1756	0,576	0,5102	0,3909	0,76	0,15	0,10	0,03
-22,97	-45,52	2D-007	461	1379,00	6,4395	3,1554	2,7948	2,1413	5,65	2,24	1,97	0,90
-22,66	-45,01	2D-013	11411	1523,40	211,3	103,54	91,703	70,261	186,08	118,37	103,93	67,76
-22,87	-45,41	2D-025	9733	1540,21	185,38	90,837	80,456	61,644	161,43	105,56	93,62	65,27
-22,70	-45,12	2D-028	11090	1525,48	206,08	100,98	89,44	68,527	170,99	115,95	108,31	68,28
-22,74	-45,20	2D-037	173	1574,64	3,4827	1,7065	1,5115	1,1581	5,12	1,71	1,45	0,63
-22,83	-45,36	2D-044	116	1574,14	2,3334	1,1434	1,0127	0,7759	2,84	0,82	0,67	0,26
-22,84	-45,25	2D-053	10218	1529,31	191,11	93,643	82,941	63,548	168,41	116,84	108,12	79,00
-22,90	-45,55	2D-054	161	1748,60	4,1234	2,0205	1,7895	1,3711	3,38	1,70	1,15	0,34
-22,70	-45,14	2D-056	37	1333,80	0,4642	0,2274	0,2014	0,1543	0,67	0,25	0,21	0,10
-22,60	-45,04	2D-058	177	1498,30	3,1376	1,5374	1,3617	1,0433	3,98	1,78	1,60	0,94
-22,93	-45,32	2D-059	67	1398,17	0,9763	0,4784	0,4237	0,3247	0,85	0,46	0,43	0,34
-22,67	-45,02	2D-061	38	1333,80	0,4767	0,2336	0,2069	0,1585	0,49	0,18	0,15	0,09
-22,69	-45,48	2D-062	120	1748,60	3,0733	1,5059	1,3338	1,022	3,49	1,85	1,68	1,25
-22,91	-45,47	2D-063	9506	1542,61	181,78	89,07	78,891	60,445	165,96	122,67	115,73	90,57
-23,07	-45,67	2E-016	30	1344,70	0,3866	0,1895	0,1678	0,1286	0,28	0,07	0,05	0,02
-23,15	-45,89	2E-018	7756	1566,27	154,09	75,505	66,876	51,239	126,11	79,91	74,39	44,51
-23,12	-45,21	2E-020	47	1313,90	0,5601	0,2745	0,2431	0,1863	0,67	0,36	0,33	0,20
-23,17	-45,81	2E-023	49	1357,97	0,652	0,3195	0,283	0,2168	0,45	0,13	0,11	0,06

Apêndice A - Dados das estações fluviométricas administradas pelo DAEE e ANA, utilizadas para avaliar o modelo de regionalização hidrológica do Estado de São Paulo (LIAZI et al., 1988), e para formular o novo modelo

(continuação)												
Latitude	Longitude	Código das EF	Área da BH (km ²)	P (mm)	Valores estimados (m ³ .s ⁻¹)				Valores padrões (m ³ .s ⁻¹)			
					$\bar{Q}$	Q ₉₀	Q ₉₅	Q _{7,10}	$\bar{Q}$	Q ₉₀	Q ₉₅	Q _{7,10}
-23,52	-45,86	2E-031	123	1422,83	1,89	0,93	0,82	0,63	1,62	0,83	0,71	0,41
-23,53	-45,84	2E-046	127	1382,03	1,79	0,88	0,78	0,59	1,42	0,69	0,58	0,42
-21,59	-46,90	3C-001	4093	1573,54	71,69	26,81	22,65	15,45	74,19	28,13	24,40	14,98
-21,72	-46,98	3C-012	346	1468,87	5,05	1,89	1,60	1,09	4,90	1,87	1,31	0,31
-22,67	-46,97	3D-001	928	1442,35	12,87	5,40	4,67	3,13	14,22	5,48	4,63	3,03
-22,70	-46,67	3D-002	387	1583,62	6,89	2,89	2,50	1,68	6,94	2,76	2,20	1,39
-22,77	-46,99	3D-003	2490	1492,71	38,02	18,63	16,50	10,96	31,42	13,42	11,00	6,77
-22,37	-46,94	3D-004	3834	1583,08	68,17	28,63	24,74	16,59	68,51	26,51	23,34	14,30
-22,98	-46,83	3D-006	1920	1497,75	29,58	14,50	12,84	8,53	27,79	12,56	9,98	6,71
-22,85	-46,78	3D-009	1950	1569,13	33,91	14,24	12,31	8,25	31,22	11,64	9,46	6,21
-22,91	-46,48	3D-015	1353	1574,62	23,74	9,97	8,62	5,78	19,82	4,94	3,86	3,03
-23,96	-46,66	3E-003	142	1661,66	3,25	1,40	1,20	0,79	6,02	2,44	2,08	1,09
-23,49	-46,44	3E-004	1610	1606,57	29,68	12,46	10,77	6,22	23,35	7,65	6,14	3,43
-23,57	-46,09	3E-007	91	1481,65	1,36	0,57	0,49	0,29	2,03	0,82	0,67	2,59
-23,52	-46,20	3E-008	841	1382,03	10,25	4,31	3,72	2,15	13,25	4,95	3,81	1,74
-23,61	-46,26	3E-014	97	2170,15	3,31	1,39	1,20	0,69	1,73	0,76	0,66	0,46
-23,61	-46,27	3E-015	35	1517,46	0,56	0,23	0,20	0,12	0,48	0,18	0,16	0,12
-23,58	-46,22	3E-016	142	2498,21	6,14	2,58	2,23	1,29	2,46	1,14	0,73	0,44
-23,24	-46,03	3E-018	393	1438,05	6,22	3,05	2,70	2,07	3,41	1,28	1,10	0,63
-23,63	-46,32	3E-021	47	1540,05	0,78	0,33	0,28	0,16	0,68	0,37	0,25	0,15
-23,53	-46,16	3E-036	782	2080,04	24,71	10,38	8,97	5,18	11,89	4,81	3,36	2,31
-23,57	-46,02	3E-048	358	1870,95	9,23	3,88	3,35	1,93	6,05	2,88	2,44	1,12
-23,52	-46,30	3E-052	1337	1732,16	29,31	12,31	10,64	6,14	23,51	9,81	7,75	4,36

Apêndice A - Dados das estações fluviométricas administradas pelo DAEE e ANA, utilizadas para avaliar o modelo de regionalização hidrológica do Estado de São Paulo (LIAZI et al., 1988), e para formular o novo modelo

(continuação)												
Latitude	Longitude	Código das EF	Área da BH (km ²)	P (mm)	Valores estimados (m ³ .s ⁻¹)				Valores padrões (m ³ .s ⁻¹)			
					$\bar{Q}$	Q ₉₀	Q ₉₅	Q _{7,10}	$\bar{Q}$	Q ₉₀	Q ₉₅	Q _{7,10}
-23,46	-46,57	3E-057	110	1490,30	1,67	0,70	0,61	0,35	2,16	1,00	0,85	0,36
-23,54	-46,86	3E-068	242	1404,93	3,10	1,30	1,13	0,65	2,42	0,62	0,46	0,20
-23,56	-46,62	3E-076	311	1550,71	5,25	2,20	1,91	1,10	10,76	5,43	4,89	3,18
-23,05	-46,34	3E-088	404	1537,81	6,67	3,27	2,90	1,92	6,34	1,39	0,48	0,45
-23,17	-46,42	3E-089	340	1493,66	5,20	2,55	2,26	1,50	3,04	1,18	1,00	0,50
-23,53	-46,90	3E-090	133	1429,21	1,80	0,75	0,65	0,38	1,59	0,73	0,65	0,26
-23,83	-46,32	3E-095	57	2650,99	3,08	1,32	1,14	0,75	3,05	1,14	0,87	0,40
-23,21	-46,75	3E-108	100	1472,54	1,47	0,62	0,53	0,31	1,67	0,88	0,72	0,43
-23,33	-46,73	3E-109	465	1884,09	12,16	5,11	4,41	2,55	3,61	1,56	1,38	0,84
-23,55	-46,34	3E-110	66	1758,70	1,50	0,63	0,54	0,31	1,31	0,57	0,49	0,31
-20,51	-47,84	4B-001	4748	1622,29	89,59	33,51	28,31	17,35	75,96	30,86	25,91	13,51
-20,68	-47,62	4B-006	3863	1620,80	72,73	27,20	22,98	14,09	62,95	28,58	25,42	13,27
-20,87	-47,53	4B-014	178	1641,81	3,46	1,29	1,09	0,67	3,42	1,28	1,16	0,51
-20,63	-47,28	4B-015	276	1636,35	5,32	1,99	1,68	1,03	4,87	1,87	1,61	1,08
-20,62	-47,69	4B-016	84	1668,10	1,69	0,63	0,53	0,33	1,63	0,52	0,42	0,18
-20,42	-47,88	4B-017	264	1631,59	5,05	1,89	1,60	0,98	4,48	2,04	1,55	0,96
-21,10	-47,76	4C-001	10679	1532,58	174,88	65,40	55,26	37,70	161,11	69,59	58,56	37,61
-21,91	-47,40	4C-005	9650	1520,01	154,65	64,95	56,14	37,63	145,53	58,37	49,44	26,75
-21,70	-47,81	4C-007	12291	1509,77	193,48	81,26	70,23	47,07	180,84	77,76	66,83	36,68
-21,39	-47,36	4C-009	322	1539,40	5,33	1,99	1,69	1,15	6,60	1,46	1,24	0,49
-21,87	-47,10	4C-011	72	1468,87	1,05	0,39	0,33	0,23	0,80	0,44	0,39	0,31
-21,64	-47,05	4C-012	67	1416,40	0,88	0,33	0,28	0,19	0,68	0,16	0,11	0,05
-22,66	-47,21	4D-001	3394	1428,32	45,74	19,21	16,60	9,59	49,83	19,02	15,79	9,75

Apêndice A - Dados das estações fluviométricas administradas pelo DAEE e ANA, utilizadas para avaliar o modelo de regionalização hidrológica do Estado de São Paulo (LIAZI et al., 1988), e para formular o novo modelo

(continuação)												
Latitude	Longitude	Código das EF	Área da BH (km ²)	P (mm)	Valores estimados (m ³ .s ⁻¹)				Valores padrões (m ³ .s ⁻¹)			
					$\bar{Q}$	Q ₉₀	Q ₉₅	Q _{7,10}	$\bar{Q}$	Q ₉₀	Q ₉₅	Q _{7,10}
-22,68	-47,78	4D-007	10918	1474,55	161,18	67,69	58,51	33,78	135,91	53,85	46,89	28,15
-22,71	-47,32	4D-010	7205	1517,75	115,02	48,31	41,75	24,10	104,73	42,78	34,88	19,71
-22,39	-47,60	4D-018	489	1485,48	7,37	3,09	2,67	1,54	7,09	3,37	3,05	2,25
-22,58	-47,68	4D-021	1581	1420,49	20,96	8,80	7,61	4,39	24,49	8,65	7,95	4,72
-23,03	-47,82	4E-001	5531	1367,06	65,12	27,35	23,64	13,65	47,16	17,87	14,68	8,50
-23,32	-47,78	4E-004	3942	1382,20	48,07	20,19	17,45	10,07	49,38	20,31	16,98	12,09
-23,40	-47,76	4E-006	1542	1394,27	19,32	8,12	7,01	4,05	18,08	5,92	4,87	3,02
-23,94	-47,09	4E-015	236	1803,16	7,20	4,31	4,02	2,90	9,02	4,75	4,21	2,68
-23,11	-47,18	4E-017	803	1430,83	10,88	4,57	3,95	2,28	10,65	4,15	3,65	1,81
-23,52	-47,45	4E-018	1044	1462,48	15,06	6,33	5,47	3,16	12,87	6,94	6,26	4,22
-23,36	-47,62	4E-019	2018	1419,79	26,72	11,22	9,70	5,60	24,66	13,02	11,70	8,80
-23,98	-47,01	4E-025	130	1712,51	3,62	2,17	2,02	1,46	5,47	3,20	2,26	2,10
-23,94	-47,10	4E-026	500	1628,59	12,71	7,60	7,09	5,11	14,19	8,30	7,41	5,28
-24,60	-47,89	4F-001	1317	1660,84	34,71	13,64	12,08	8,21	30,81	11,63	9,57	6,10
-24,49	-47,84	4F-002	20855	1620,05	524,82	206,26	182,64	124,12	455,03	255,88	228,19	180,43
-24,18	-47,62	4F-003	2443	1630,19	62,20	37,20	34,71	25,03	68,07	45,35	41,85	30,62
-24,50	-47,74	4F-004	21055	1621,98	531,05	208,70	184,80	125,60	433,84	258,78	237,33	198,70
-24,11	-47,68	4F-005	410	1731,96	11,66	6,53	5,95	4,25	15,88	8,96	7,93	5,53
-24,31	-47,58	4F-007	1713	1663,47	45,28	22,82	19,92	13,91	52,22	27,20	23,59	16,86
-24,27	-47,17	4F-014	91	1873,78	2,96	1,49	1,30	0,91	3,54	1,73	1,52	0,90
-24,39	-47,93	4F-015	15292	1569,72	362,36	202,92	184,80	132,21	278,45	149,80	133,27	104,60
-24,59	-47,88	4F-016	1325	1742,29	38,07	14,96	13,25	9,00	33,13	12,49	10,59	6,75
-24,15	-47,29	4F-017	556	1833,53	17,46	10,44	9,74	7,02	21,18	11,87	10,24	7,74

Apêndice A - Dados das estações fluviométricas administradas pelo DAEE e ANA, utilizadas para avaliar o modelo de regionalização hidrológica do Estado de São Paulo (LIAZI et al., 1988), e para formular o novo modelo

(continuação)												
Latitude	Longitude	Código das EF	Área da BH (km ²)	P (mm)	Valores estimados (m ³ .s ⁻¹)				Valores padrões (m ³ .s ⁻¹)			
					$\bar{Q}$	Q ₉₀	Q ₉₅	Q _{7,10}	$\bar{Q}$	Q ₉₀	Q ₉₅	Q _{7,10}
-24,32	-47,62	4F-018	4341	1632,90	110,87	66,30	61,87	44,61	123,04	75,07	68,12	52,79
-24,29	-47,62	4F-021	2571	1644,75	66,55	39,80	37,14	26,78	71,12	47,05	42,88	32,49
-24,35	-47,79	4F-022	4633	1633,22	118,37	66,29	60,37	43,19	127,61	79,77	71,34	50,52
-24,66	-47,87	4F-023	110	1656,25	2,88	1,13	1,00	0,68	2,15	0,51	0,40	0,09
-24,21	-47,48	4F-024	66	1661,35	1,74	0,88	0,77	0,53	2,18	1,27	1,14	0,79
-24,17	-47,65	4F-025	634	1670,79	16,89	10,10	9,43	6,80	23,54	13,75	12,48	7,09
-24,25	-47,26	4F-026	356	1678,33	9,56	4,82	4,21	2,94	11,47	4,89	4,10	2,28
-24,13	-47,27	4F-035	142	1772,37	4,21	2,51	2,35	1,69	5,63	3,87	3,62	2,90
-24,26	-47,45	4F-039	1426	1660,57	37,57	18,94	16,53	11,54	45,79	24,15	21,74	14,82
-24,18	-47,37	4F-040	683	1639,73	17,58	8,86	7,74	5,40	25,05	15,26	13,99	10,52
-20,45	-48,45	5B-001	33740	1488,39	511,07	214,65	185,52	124,34	499,64	238,90	204,06	141,72
-20,86	-48,97	5B-004	2068	1440,22	19,63	7,46	6,26	4,12	21,08	7,47	5,94	4,10
-20,20	-48,29	5B-007	6281	1603,61	115,26	43,11	36,42	22,32	111,14	43,74	37,29	22,45
-20,99	-48,71	5B-010	578	1434,61	5,46	2,07	1,74	1,14	6,23	2,20	1,79	1,11
-20,91	-48,09	5B-011	12445	1534,82	204,57	76,51	64,64	44,10	207,31	108,82	100,30	81,95
-20,74	-48,05	5B-012	263	1590,88	4,73	1,77	1,50	1,02	3,93	1,94	1,73	1,06
-20,89	-48,27	5B-013	143	1427,42	1,92	0,81	0,70	0,47	1,75	0,89	0,80	0,51
-20,75	-48,43	5B-014	687	1429,92	9,29	3,90	3,37	2,26	8,75	5,03	4,74	3,22
-20,59	-48,36	5B-016	182	1411,18	2,37	0,99	0,86	0,58	2,49	1,37	1,28	0,94
-21,87	-48,28	5C-013	1867	1479,87	18,45	10,52	9,52	7,62	24,34	15,51	13,91	11,63
-21,20	-48,04	5C-017	918	1459,12	13,16	5,53	4,78	3,20	10,32	5,84	5,12	3,58
-21,08	-48,80	5C-019	620	1350,27	5,34	2,03	1,70	1,12	6,69	2,22	1,93	1,37
-21,81	-48,80	5C-021	3519	1410,51	32,39	18,46	16,71	13,37	46,36	26,86	24,20	19,14

Apêndice A - Dados das estações fluviométricas administradas pelo DAEE e ANA, utilizadas para avaliar o modelo de regionalização hidrológica do Estado de São Paulo (LIAZI et al., 1988), e para formular o novo modelo

(continuação)												
Latitude	Longitude	Código das EF	Área da BH (km ²)	P (mm)	Valores estimados (m ³ .s ⁻¹)				Valores padrões (m ³ .s ⁻¹)			
					$\bar{Q}$	Q ₉₀	Q ₉₅	Q _{7,10}	$\bar{Q}$	Q ₉₀	Q ₉₅	Q _{7,10}
-21,65	-48,87	5C-023	877	1376,87	7,78	4,44	4,02	3,21	11,94	5,97	5,20	3,12
-21,29	-48,26	5C-024	435	1400,05	5,52	2,32	2,00	1,34	5,30	2,33	2,01	1,17
-21,02	-48,18	5C-025	16650	1492,33	254,03	106,69	92,21	61,80	266,63	118,89	107,82	82,03
-21,99	-48,39	5C-027	190	1442,72	1,81	1,03	0,93	0,75	2,60	1,56	1,43	0,95
-21,79	-48,78	5C-028	338	1366,76	2,97	1,69	1,53	1,22	4,08	2,04	1,81	1,21
-21,79	-48,56	5C-029	334	1374,05	2,95	1,68	1,52	1,22	3,82	1,89	1,62	0,98
-21,63	-48,09	5C-031	142	1455,24	2,02	0,85	0,73	0,49	1,72	1,13	0,98	0,67
-22,30	-48,13	5D-008	537	1446,43	5,13	2,92	2,65	2,12	6,86	3,32	3,05	2,15
-22,51	-48,64	5D-012	957	1453,51	9,21	5,25	4,75	3,80	10,70	5,66	4,77	3,93
-22,29	-48,12	5D-028	442	1443,12	4,21	2,40	2,17	1,74	8,61	4,34	3,84	2,29
-22,30	-48,54	5D-029	417	1434,99	3,94	2,24	2,03	1,63	6,37	3,01	2,66	1,83
-23,92	-48,66	5E-001	959	1553,64	18,67	7,84	6,78	7,37	13,26	7,54	6,64	4,82
-23,96	-48,95	5E-002	835	1490,64	14,60	6,13	5,30	5,76	10,41	5,60	4,90	3,71
-23,94	-48,21	5E-003	681	1690,56	16,20	7,48	6,71	4,95	20,21	9,80	8,36	6,05
-24,01	-48,27	5E-004	495	1609,53	10,51	4,86	4,35	3,21	7,46	3,78	3,35	2,51
-23,63	-48,11	5E-006	1524	1443,29	24,37	11,26	10,09	7,46	20,02	8,67	7,36	5,44
-23,80	-48,59	5E-008	2024	1549,64	39,15	18,09	16,21	11,98	23,28	12,97	11,93	9,41
-23,85	-48,21	5E-009	773	1549,64	14,95	6,91	6,19	4,57	11,92	4,94	4,13	2,49
-23,93	-48,55	5E-011	714	1542,42	13,65	5,73	4,95	5,39	10,30	5,48	4,79	3,70
-23,07	-48,15	5E-012	584	1406,97	7,52	3,16	2,73	1,58	6,74	1,72	1,40	0,75
-23,47	-48,42	5E-013	530	1369,54	7,25	3,35	3,00	2,22	7,81	1,06	0,84	0,33
-23,97	-48,28	5E-014	534	1609,53	11,34	5,24	4,69	3,47	9,71	4,47	3,59	2,61
-23,96	-48,99	5E-015	635	1428,04	9,85	4,14	3,58	3,89	7,32	3,56	2,96	1,82

Apêndice A - Dados das estações fluviométricas administradas pelo DAEE e ANA, utilizadas para avaliar o modelo de regionalização hidrológica do Estado de São Paulo (LIAZI et al., 1988), e para formular o novo modelo

(continuação)												
Latitude	Longitude	Código das EF	Área da BH (km ²)	P (mm)	Valores estimados (m ³ .s ⁻¹)				Valores padrões (m ³ .s ⁻¹)			
					$\bar{Q}$	Q ₉₀	Q ₉₅	Q _{7,10}	$\bar{Q}$	Q ₉₀	Q ₉₅	Q _{7,10}
-24,52	-48,11	5F-001	14582	1556,99	340,11	190,46	173,46	124,10	243,92	133,55	117,78	91,43
-24,66	-48,83	5F-004	8013	1430,95	157,40	88,15	80,28	57,43	118,15	60,81	54,20	37,12
-24,67	-48,58	5F-011	2872	1640,18	73,96	41,42	37,72	26,99	52,25	27,05	24,13	16,83
-24,58	-48,65	5F-015	177	1582,83	4,26	2,39	2,17	1,56	4,01	2,16	1,95	1,69
-24,78	-48,17	5F-016	204	1920,06	6,92	2,72	2,41	1,64	4,76	2,10	1,76	3,03
-20,29	-49,64	6B-007	2296	1399,15	20,87	7,93	6,66	4,38	19,43	6,73	5,62	3,97
-20,56	-49,17	6B-009	4838	1429,86	45,44	17,27	14,50	9,53	51,24	20,97	17,63	12,22
-20,16	-49,66	6B-010	9069	1412,94	83,68	31,80	26,69	17,55	91,20	34,39	27,98	22,18
-20,63	-49,36	6B-011	576	1260,25	4,45	1,69	1,42	0,93	8,18	4,29	3,84	2,71
-20,52	-50,00	6B-012	39	1422,08	0,36	0,14	0,11	0,08	0,37	0,19	0,17	0,09
-21,89	-49,23	6C-001	1881	1355,69	16,30	6,19	5,15	3,80	18,95	10,41	9,04	6,63
-21,72	-49,12	6C-002	47795	1429,54	448,77	170,53	141,81	104,75	437,36	209,68	192,63	142,86
-21,78	-49,81	6C-005	1092	1382,19	9,75	4,76	4,09	2,84	11,15	5,20	4,37	3,32
-21,05	-49,06	6C-008	427	1459,80	4,14	1,57	1,32	0,87	4,72	1,68	1,32	0,81
-22,91	-49,62	6D-001	4259	1453,94	60,43	35,23	31,85	26,53	46,97	26,78	23,28	17,36
-22,88	-49,24	6D-002	3407	1459,02	48,82	28,46	25,73	21,43	41,58	22,53	19,76	14,80
-22,75	-49,74	6D-010	720	1394,76	9,03	5,27	4,76	3,96	10,66	6,74	6,33	3,03
-23,10	-49,74	6E-001	27962	1427,54	376,24	219,35	198,28	165,16	290,41	138,28	120,97	93,95
-24,61	-49,05	6F-001	652	1456,73	13,30	7,45	6,78	4,85	11,02	5,02	4,38	3,27
-24,64	-49,01	6F-002	7460	1430,69	146,49	82,03	74,71	53,45	119,05	59,55	53,18	42,72
-19,96	-50,44	7A-001	636	1311,75	5,24	1,99	1,67	1,10	5,19	2,66	2,22	0,96
-20,54	-50,01	7B-006	1287	1371,33	11,35	4,31	3,59	2,65	12,46	3,80	2,81	1,82
-20,52	-50,59	7B-007	3364	1357,10	29,20	11,10	9,23	6,82	29,43	9,81	7,85	6,23

Apêndice A - Dados das estações fluviométricas administradas pelo DAEE e ANA, utilizadas para avaliar o modelo de regionalização hidrológica do Estado de São Paulo (LIAZI et al., 1988), e para formular o novo modelo

(conclusão)												
Latitude	Longitude	Código das EF	Área da BH (km ²)	P (mm)	Valores estimados (m ³ .s ⁻¹)				Valores padrões (m ³ .s ⁻¹)			
					$\bar{Q}$	Q ₉₀	Q ₉₅	Q _{7,10}	$\bar{Q}$	Q ₉₀	Q ₉₅	Q _{7,10}
-20,71	-50,71	7B-009	78	1293,34	0,63	0,24	0,20	0,15	0,60	0,24	0,20	0,09
-21,71	-50,29	7C-002	3670	1411,97	33,83	16,51	14,21	9,84	33,54	14,42	12,51	9,99
-21,65	-50,64	7C-011	6217	1411,97	57,30	27,96	24,07	16,67	66,97	33,39	29,15	22,30
-21,24	-50,44	7C-014	453	1273,40	3,56	1,35	1,13	0,83	3,67	1,48	1,25	0,68
-21,93	-50,66	7C-015	65	1320,65	0,54	0,29	0,25	0,19	0,71	0,52	0,48	0,35
-22,82	-50,31	7D-006	934	1392,89	8,43	4,92	4,44	3,09	12,20	6,70	5,56	5,11
-22,31	-50,03	7D-010	734	1443,55	6,99	3,69	3,24	2,51	8,43	3,73	3,33	2,12
-22,64	-50,20	7D-011	431	1397,75	3,91	2,28	2,06	1,43	5,55	3,45	3,09	2,39
-22,53	-50,91	7D-012	646	1370,77	5,69	3,32	3,00	2,08	6,95	4,86	4,36	3,89
-22,62	-50,68	7D-013	1560	1388,47	14,02	8,17	7,39	5,13	19,28	12,67	11,30	9,06
-21,43	-51,02	8C-004	8643	1319,51	71,83	35,05	30,17	20,90	88,51	40,38	35,82	26,63
-21,88	-51,26	8C-007	700	1301,24	5,69	3,00	2,64	2,05	5,08	1,77	1,55	0,95
-21,00	-51,42	8C-009	398	1295,74	3,22	1,22	1,02	0,75	2,20	0,71	0,60	0,41

Nota: BH – Bacia hidrográfica; EF – Estações fluviométricas.

Apêndice B - Dados das estações fluviométricas dos Estados de Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Paraná e Rio de Janeiro, utilizadas para formulação do modelo proposto

Latitude	Longitude	Área da bacia hidrográfica (km ²)	Nome	Código das estações fluviométrica
-23,22	-44,76	79,00	Parati	59380000
-22,61	-46,04	116,00	Cambuí	61360000
-22,32	-46,32	463,00	Inconfidentes Colônia barro preto	61861000 64231000
-24,03	-49,47	1550,00	Andirá	64370000
-23,08	-50,28	5620,00	Uberaba	61794000
-19,73	-47,98	566,00	Vila silva jardim	64550000
-22,86	-52,08	4490,00	Naviraí	64717000
-23,13	-54,20	8970,00	Ivinhema	64617000
-22,38	-53,53	31900,00	Fazenda Buriti	63970000
-21,66	-52,87	31000,00	Ponte São Domingos Porto	60925001
-19,21	-50,66	3520,00	Galeano	63003100
-20,09	-52,15	19000,00	Cassilândia	60968000
-19,11	-51,72	4700,00		

Apêndice C - Transformação “Box-Cox” (BOX; COX, 1964), da variável Q_{95} por meio de dados mensais (A) e dados diários (B) para posterior aplicação do teste t de “student” (GOSSET, 1908)

A

B

Nota: teste de normalidade de Shapiro e Wilk (1965). A - $p=0,26741$; B - $p=0,26698$.