

ABRAHÃO ALEXANDRE ALDEN ELESBON

**GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS: ANÁLISES ESTATÍSTICAS
MULTIVARIADAS EM SUPORTE À REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES E
PROPOSTA METODOLÓGICA PARA AVALIAÇÃO, REARRANJO E
OTIMIZAÇÃO DE REDES DE MONITORAMENTO HIDROMÉTRICO**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL

2012

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

T

E39g
2012

Elesbon, Abrahão Alexandre Alden, 1978-

Gestão de recursos hídricos : análises estatísticas multivariadas em suporte à regionalização de vazões e proposta metodológica para avaliação, rearranjo e otimização de redes de monitoramento hidrométrico / Abrahão Alexandre Alden Elesbon. – Viçosa, MG, 2012. xii, 148f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Orientador: Demetrius David da Silva.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Recursos hídricos. 2. Bacias hidrográficas. 3. Sistemas de informação geográfica. 4. Sistemas de suporte de decisão.

I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22. ed. 551.48

ABRAHÃO ALEXANDRE ALDEN ELESBON

**GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS: ANÁLISES ESTATÍSTICAS
MULTIVARIADAS EM SUPORTE À REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES E
PROPOSTA METODOLÓGICA PARA AVALIAÇÃO, REARRANJO E
OTIMIZAÇÃO DE REDES DE MONITORAMENTO HIDROMÉTRICO**

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

Aprovada em 11 de abril de 2012.

Prof. Abelardo Antônio de Assunção
Montenegro

Prof. Celso Bandeira de Melo Ribeiro

Prof. Gilberto Chohaku Sedyama
(Coorientador)

Prof. Silvio Bueno Pereira

Prof. Demetrius David da Silva
(Orientador)

À minha esposa
Luciana e a minha filha
Maria, dedico.

AGRADECIMENTOS

À Deus, a quem sempre buscarei em primeiro lugar, fonte de sabedoria e inspiração.

À minha esposa, Luciana Alves Braga Elesbon, por compartilhar comigo todos os momentos de dor e alegria. Sem você, minha vida, esta vitória não seria possível.

Aos meus pais Silvio Elesbon e Ana Roberto de Paula Elesbon, por terem doado todos os dias de suas vidas por nossa família.

Aos meus irmãos Ana Márcia Elesbon Gouvea e Salomão A. Z. S. Elesbon, meus melhores amigos e maiores exemplos.

Aos professores Marco Antonio de Carvalho e José Maria de Souza, por me apresentarem a Universidade Federal de Viçosa.

Ao meu afilhado Hugo Alexandre Soares Guedes e meu amigo Fabrício Serrão Contin, irmãos e companheiros de batalha.

Ao amigo Robertson Fontes Júnior da UFRPE pela ajuda inestimável na condução deste trabalho.

Aos amigos de pós-graduação e Centro de Referência em Recursos Hídricos: Michel Castro Moreira, Caio Leite, Gustavo Dantas, Marcelo Rossi, Breno Lopes, Júlio Baptestini, Luana Lisboa, Samuel Petraccone, Marcelo Rocha, Iara Oliveira, Josiane Oliveira, Felipe Marques, Danilo, Antônio, Rafaela Villar e Raquel Vieira do Amaral.

Aos amigos de Viçosa Zilda Valente, Paulo Sant'Anna, D. Custódia, D. Inês, Tarcísio e família, Marcos Cossi e Danilo Lopes.

Ao professor Demetrius David da Silva, pela confiança e amizade, exemplo de caráter profissional. Muito obrigado pela valiosa ajuda e orientação na condução deste trabalho.

Aos professores Gilberto Chohaku Sediya e Carlos Antonio Álvares Soares Ribeiro, pelas idéias, críticas e sugestões no desenvolvimento deste trabalho.

Aos membros da banca, professores Abelardo Antônio Assunção Montenegro, Celso Bandeira de Melo Ribeiro e Silvio Bueno Pereira, pelas importantes sugestões.

Ao Instituto Federal do Espírito Santo, Campus Colatina, por ter me propiciado a possibilidade de alcançar o nível de doutorado.

À Universidade Federal de Viçosa, por intermédio do Departamento de Engenharia Agrícola, em nome de seus funcionários Francisco Teixeira (Chicão), Eduardo Silva, Edna, Graça, Dênio e Professora Lêda.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG pelas condições para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

Abrahão Alexandre Alden Elesbon, filho de Silvio Elesbon e Ana Roberto de Paula Elesbon, nasceu em Barra de São Francisco, Espírito Santo, em 28 de abril de 1978.

Em março de 1997, iniciou o curso de Engenharia Civil na Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), em Vitória, Espírito Santo, graduando-se em junho de 2002.

Em agosto de 2002, iniciou o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da UFES, em nível de Mestrado, na área de Recursos Hídricos, submetendo-se à defesa de dissertação em outubro de 2004.

Em setembro de 2004, assumiu o cargo de professor no Instituto Federal do Espírito Santo, Campus Colatina.

Em agosto de 2008, iniciou o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da UFV, em nível de Doutorado, na área de Recursos Hídricos e Ambientais.

Em abril de 2012, submete-se à defesa de tese no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da UFV, em nível de Doutorado, na área de Recursos Hídricos e Ambientais.

CONTEÚDO

RESUMO.....	iv
ABSTRACT.....	xi
INTRODUÇÃO GERAL.....	1
REVISÃO DE LITERATURA: MONITORAMENTO HIDROLÓGICO.....	3

ARTIGO I

Análises estatísticas multivariadas de Componentes Principais e de Agrupamento como suporte aos estudos de regionalização de vazões

1. INTRODUÇÃO	36
2. MATERIAL E MÉTODOS	38
2.1. REGIÃO DE ESTUDO	38
2.2. BASE DE DADOS E APLICATIVOS	38
2.3. ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (PCA)	44
2.3.1. Critérios de seleção.....	45
2.4. ANÁLISE DE AGRUPAMENTO (CLUSTER)	46
2.4.1. Medida de similaridade de Mahalanobis.....	46
2.4.2. Métodos de agrupamento.....	46
2.4.3. Critério de seleção	49
2.5. ANÁLISE DE REGRESSÃO MÚLTIPLA.....	51
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
3.1. ANÁLISE DOS COMPONENTES PRINCIPAIS (PCA)	52
3.2. ANÁLISE DE AGRUPAMENTO (CLUSTER).....	54
3.2.1. Método do vizinho mais próximo	54
3.2.2. Método do vizinho mais distante	56
3.2.3. Método de Ward.....	60
3.2.4. Regiões Homogêneas.....	62
3.3. ANÁLISE DE REGRESSÃO MÚLTIPLA.....	65
4. CONCLUSÕES.....	67
5. AGRADECIMENTOS	68
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68

ARTIGO II

Metodologia baseada em sistemas de informações geográficas e análise geoestatística para avaliação, rearranjo e otimização de redes fluviométricas de monitoramento quantitativo em bacias hidrográficas

1. INTRODUÇÃO	75
2. MATERIAL E MÉTODOS	77
2.1. REGIÃO DE ESTUDO	77
2.2. BASE DE DADOS E APLICATIVOS	77
2.3. AVALIAÇÃO DA REDE EXISTENTE	79
2.3.1. Densidade Mínima de Estações Fluviométricas	79
2.3.2. Análise Estatística Descritiva	80
2.4. OTIMIZAÇÃO E REARRANJO DA REDE.....	80
2.4.1. Análise Geoestatística.....	80
2.4.2. Proposta Metodológica para Rearranjo e Otimização da Rede	83
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	85
3.1. AVALIAÇÃO DA REDE EXISTENTE	85
3.1.1. Densidade Espacial de Estações Fluviométricas	85
3.1.2. Análise Estatística Descritiva	86
3.2. OTIMIZAÇÃO E REARRANJO DA REDE.....	89
3.2.1. Análise Geoestatística.....	89
3.2.2. Proposta Metodológica para Rearranjo e Otimização da Rede	106
4. CONCLUSÕES	111
5. AGRADECIMENTOS	111
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111

ARTIGO III

Metodologia baseada em sistemas de informações geográficas e análise geoestatística para avaliação, rearranjo e otimização de redes pluviométricas de monitoramento quantitativo em bacias hidrográficas

1. INTRODUÇÃO	118
2. MATERIAL E MÉTODOS	119
2.1. REGIÃO DE ESTUDO	119

2.2.	BASE DE DADOS E APLICATIVOS	119
2.3.	AVALIAÇÃO DA REDE EXISTENTE	121
2.3.1.	Densidade Espacial de Estações Pluviométricas	121
2.3.2.	Análise Estatística Descritiva	122
2.4.	OTIMIZAÇÃO E REARRANJO DA REDE.....	122
2.4.1.	Análise Geostatística.....	122
2.4.2.	Proposta Metodológica para Rearranjo e Otimização da Rede	124
3.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	127
3.1.	AVALIAÇÃO DA REDE EXISTENTE	127
3.1.1.	Densidade Espacial de Estações Pluviométricas	127
3.1.2.	Análise Estatística Descritiva	128
3.2.	OTIMIZAÇÃO E REARRANJO DA REDE.....	132
3.2.1.	Análise Geoestatística.....	132
3.2.2.	Proposta Metodológica para Rearranjo e Otimização da Rede	140
4.	CONCLUSÕES	144
5.	AGRADECIMENTOS	144
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	144

RESUMO

ELESBON, Abrahão Alexandre Alden, D. Sc., Universidade Federal de Viçosa, abril de 2012. **Gestão de recursos hídricos: análises estatísticas multivariadas em suporte à regionalização de vazões e proposta metodológica para avaliação, rearranjo e otimização de redes de monitoramento hidrométrico.** Orientador: Demetrius David da Silva. Co-orientadores: Gilberto Chohaku Sediyaama e Carlos Antonio Álvares Soares Ribeiro.

Objetivou-se, neste trabalho, fornecer subsídios à gestão de recursos hídricos por meio da utilização de análises estatísticas multivariadas em suporte à regionalização de vazões e proposição de metodologia para avaliação, rearranjo e otimização de redes de monitoramento fluviométrico e pluviométrico. Dividiu-se o trabalho em três artigos científicos, sendo que no Artigo I objetivou-se desenvolver uma metodologia baseada em análises estatísticas multivariadas de componentes principais e de agrupamento com intuito de identificar as variáveis explicativas mais representativas em estudos de regionalização hidrológica e otimizar a obtenção das regiões hidrologicamente homogêneas para a bacia hidrográfica do rio Doce. Neste artigo foram utilizadas 15 variáveis, individualizadas para as 61 estações fluviométricas adotadas, sendo oito variáveis dependentes ($Q_{7,10}$, Q_{90} , Q_{95} , Q_{mld} , Q_{max10} , Q_{max20} , Q_{max50} , Q_{max100}) referentes às vazões características e sete independentes (P_a , P_{ss} , P_{sc} , A_d , L_p , L_t e S_L) referentes às características climáticas e morfométricas da bacia. A partir da análise de componentes principais identificou-se a variável independente S_L (declividade média da bacia) como a menos representativa, sendo excluída do estudo. Os dois primeiros componentes principais, Y_1 e Y_2 , foram responsáveis por 77,92% da variação total dos dados, representando fisicamente as características morfométricas e as precipitações médias, respectivamente. As melhores divisões de regiões hidrologicamente homogêneas, para as oito vazões características estudadas, foram obtidas utilizando-se conjuntamente a matriz de similaridade de Mahalanobis e o método de agrupamento do vizinho mais distante. A análise de agrupamento possibilitou a identificação de quatro regiões hidrologicamente homogêneas na bacia hidrográfica do rio Doce. A metodologia proposta para identificação do número de regiões homogêneas apresentou bons resultados, possibilitando a eliminação da subjetividade nesta fase inicial dos estudos de regionalização de vazões. Nos Artigos II e III

objetivou-se desenvolver uma metodologia baseada em Sistemas de Informações Geográficas e análise geoestatística para subsidiar projetos de redes fluviométricas e pluviométricas de monitoramento quantitativo em bacias hidrográficas, respectivamente. No Artigo II foram utilizadas oito vazões características ($Q_{7,10}$; Q_{90} ; Q_{95} ; Q_{mld} ; Q_{max10} ; Q_{max20} ; Q_{max50} e Q_{max100}) e verificou-se que a rede de monitoramento fluviométrico existente na bacia do rio Doce é quantitativamente satisfatória, porém, espacialmente mal distribuída. O semivariograma teórico do tipo esférico foi o que melhor se ajustou às semivariâncias experimentais, para as variáveis estudadas. A nova abordagem científica permitiu, em quatro etapas de desenvolvimento da metodologia, o reposicionamento de 18 estações e a exclusão de duas estações fluviométricas, totalizando 59 estações de monitoramento. A otimização e o rearranjo espacial da rede fluviométrica possibilitou a redução dos desvios padrão percentuais para sete vazões características analisadas na bacia hidrográfica do rio Doce. No Artigo III utilizou-se três variáveis de precipitação (P_a , P_{ss} e P_{sc}) e verificou-se que a rede de monitoramento pluviométrico da bacia do rio Doce é deficitária em número de estações e espacialmente mal distribuída. O modelo teórico de semivariograma esférico foi o que melhor se ajustou às semivariâncias experimentais para as precipitações estudadas. A nova abordagem científica permitiu, em quatro etapas de desenvolvimento da metodologia o reposicionamento de 12 estações e a inclusão de 67 estações pluviométricas, totalizando 143 estações de monitoramento. O rearranjo e a inclusão das novas estações pluviométricas possibilitou a redução dos desvios padrão percentuais para as três variáveis analisadas em toda a bacia hidrográfica do rio Doce.

ABSTRACT

ELESBON, Abrahão Alexandre Alden, D. Sc., Universidade Federal de Viçosa, april 2012. **Management of water resources: multivariate statistical analysis in support of flow regionalization and methodology for evaluation, rearrangement and optimization of hydrometric monitoring network.** Advisors: Demetrius David da Silva. Co-advisors: Gilberto Chohaku Sedyama and Carlos Antonio Álvares Soares Ribeiro.

The objective of this work was provide information to management and planning of water resources through methodological proposals for regionalization of streamflow and evaluation, rearrangement and optimization of fluviometric and rainfall monitoring networks. Initially it made a brief literature review of hydrological monitoring networks, discussing the main evaluation and design methodologies and the state of the art of international gauging networks. The aim of the review was to present the "status quo" of the monitoring of water resources worldwide and to develop a critical analysis with respect to the Brazilian fluviometric monitoring network. Further, after the literature review, three papers were presented. The first paper aims to develop a methodology using principal components analysis and cluster analysis to identify the most representative variables in hydrological regionalization studies and to optimize the identification of the hydrologically homogeneous regions for the rio Doce basin. Fifteen variables were used, individualized to 61 gauging stations, eight dependent variables ($Q_{7,10}$, Q_{90} , Q_{95} , Q_{mld} , Q_{max10} , Q_{max20} , Q_{max50} and Q_{max100}) and seven independent variables (P_a , P_{ss} , P_{sc} , A_d , L_p , L_t and S_L), concerning climatic and morphometric characteristics of the basin. The results of the principal component analysis pointed out that the variable S_L (average slope of the basin) was the least representative for the study. The first two principal components, Y_1 and Y_2 , were responsible for 77.92% of the total variation of the data, physically representing the morphometric characteristics and average rainfall, respectively. The best divisions of hydrologically homogeneous regions, for the eight studied flow characteristics, were obtained using the similarity matrix of Mahalanobis and the complete linkage clustering method. The Cluster analysis enabled the identification of four hydrologically homogeneous regions in the watershed of the rio Doce. The proposed methodology for identifying the number of homogeneous regions showed good results, allowing the elimination of subjectivity in this early phase in the studies of streamflow regionalization.

The second and third papers aimed to develop a methodology based on Geographic Information Systems and geostatistical analysis to subsidize projects of quantitative fluviometric and rainfall monitoring networks of watersheds, respectively. Eight variables were used in the study for the rio Doce basin: $q_{7, 10}$, q_{90} , q_{95} ; q_{mld} ; q_{max10} ; q_{max20} ; q_{max50} and q_{max100} . Analyzing the existing network was concluded that the fluviometric monitoring of rio Doce basin is quantitatively satisfactory and poorly distributed spatially. The geostatistical analysis indicated the spherical semivariogram model had a best fit to the experimental semivariance for the variables studied. The new scientific approach permits from the generated maps of specific flow rates and standard deviations by the technique of kriging, exclusion, inclusion and rearrangement of gauging stations. In four stages of development of the methodology, 18 stations were repositioned and two stations were deleted in total of 59 monitoring station. The optimization and spatial rearrangement of fluviometric network has reduced the percentage standard deviations for seven variables in rio Doce basin. The third paper aimed to develop a methodology based on Geographic Information System and geostatistical analysis to subsidize projects of quantitative rainfall monitoring networks of watersheds. Three variables were used in the study for the rio Doce basin: P_a , P_{ss} and P_{sc} . Analyzing the existing network was concluded that the pluviometric monitoring of rio Doce basin is deficient in number of monitoring stations and poorly distributed spatially. The geostatistical analysis indicated the spherical semivariogram model had a best fit to the experimental semivariance for the variables studied. The new scientific approach permits, from the generated maps of precipitation and standard deviations by the technique of kriging, the exclusion, inclusion and rearrangement of rainfall stations. In four stages of development of the methodology, nine stations were repositioned and 67 stations were included in total of 143 monitoring station. The spatial rearrangement of network and the addition of new rainfall stations have reduced the percentage standard deviations for all three analyzed variables in rio Doce basin.

1. INTRODUÇÃO GERAL

Há 20 anos a Agenda 21 foi aprovada na Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (ECO-92), afirmando a necessidade da adoção do planejamento e do manejo integrado dos recursos hídricos em nível mundial. Enfatizava-se ali a progressiva degradação do “recurso água” em escala global e as limitações que essa realidade impunha ao desenvolvimento dos países. Uma das premissas da Agenda 21 era: “O manejo holístico da água doce como um recurso finito e vulnerável e a integração de planos e programas hídricos setoriais aos planos econômicos e sociais nacionais”.

Cinco anos após a ECO-92 foi promulgada no Brasil a Lei nº 9433/97, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos e o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos a partir da necessidade de proteção das águas contra diversas formas de poluição e de seu uso inadequado. A “Lei das Águas”, como é conhecida, traduz em normas legais o compromisso brasileiro com seus recursos hídricos com vistas a regular, planejar e controlar sua utilização, de acordo com padrões e critérios definidos.

A Política Nacional de Recursos Hídricos baseia-se nos seguintes fundamentos: i) a água é um bem de domínio público; ii) a água é um recurso natural limitado, dotado de valor econômico; iii) em situações de escassez o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais; iv) a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas; v) a bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos; e vi) a gestão dos recursos hídricos deve ser descentralizada e contar com a participação do Poder Público, dos usuários e da sociedade civil.

Uma das diretrizes gerais de ação da Política Nacional de Recursos Hídricos se baseia na gestão sistemática dos recursos hídricos a partir da coleta de informações por intermédio da instalação e operação de uma rede de estações de monitoramento, a qual deverá ser suficiente para a geração de informações que atendam seus múltiplos usos.

A atual rede fluviométrica nacional, por ter um cunho histórico fundamentalmente baseado no setor hidroelétrico, não fornece informações

hidrológicas capazes de subsidiar uma gestão de recursos hídricos nos moldes previstos na lei nº 9433/97.

Diante do exposto, no presente trabalho optou-se por se fazer inicialmente uma breve revisão de literatura sobre redes de monitoramento hidrológico, discorrendo sobre as principais metodologias de avaliação e dimensionamento e o estado da arte das redes fluviométricas internacionais. O objetivo da revisão foi apresentar o “*status quo*” do monitoramento dos recursos hídricos em nível mundial e desenvolver uma análise crítica com relação à rede fluviométrica de monitoramento quantitativo brasileira. Na sequência, após a revisão de literatura, são apresentados três artigos científicos.

No Artigo I objetivou-se desenvolver uma abordagem científica baseada em análises estatísticas multivariadas de componentes principais e de agrupamento com intuito de identificar variáveis mais representativas em estudos de regionalização hidrológica e otimizar a obtenção das regiões hidrologicamente homogêneas, diminuindo-se a subjetividade no processo. Aplicou-se a metodologia desenvolvida para a bacia hidrográfica do rio Doce.

Por melhor que seja a intenção da gestão integrada dos recursos hídricos, prevista em lei, a mesma não se concretizará baseando-se em informações de má qualidade, tanto no tempo quanto no espaço, priorizando-se certos setores em detrimento de outros. É premente a reorganização da rede hidrológica brasileira, tanto em quantidade quanto em disposição espacial dos postos hidrométricos instalados, visando uma melhor qualidade nas informações fornecidas.

Neste contexto, desenvolveu-se no presente estudo uma nova proposta metodológica baseada em Sistemas de Informações Geográficas – SIG e em Análise Geoestatística com intuito de avaliar, rearranjar e otimizar redes de monitoramento quantitativo em bacias hidrográficas, apresentada nos Artigos II e III para redes de monitoramento fluviométrico e pluviométrico da bacia hidrográfica do rio Doce, respectivamente.

O presente trabalho torna-se de grande aplicabilidade por atender as necessidades fundamentais da Política Nacional de Recursos Hídricos no apoio à gestão e ao gerenciamento de conflitos entre usuários de água, visando à melhoria da disponibilidade e da qualidade das informações hidrológicas.

2. REVISÃO DE LITERATURA: MONITORAMENTO HIDROLÓGICO

A Organização Meteorológica Mundial recomenda que o desenho de redes hidrométricas seja sempre feito de forma integrada, com o intuito de facilitar o desenvolvimento de modelos matemáticos do tipo chuva-vazão, otimizar o aporte dos recursos financeiros por parte dos órgãos e entidades de gestão de recursos hídricos e produzir o máximo de informações hidrológicas de qualidade. As redes deveriam ser desenhadas por etapas e os resultados obtidos com uma configuração de rede deveriam servir de ponto de partida para novos desenhos (OMM, 1994).

2.1. METODOLOGIAS PARA AVALIAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DE REDES HIDROMÉTRICAS

As metodologias mais utilizadas para avaliação e dimensionamento de redes hidrométricas foram desenvolvidas pela Organização Meteorológica Mundial - OMM, pelo Instituto Federal de Hidrologia da Alemanha – IFH e pelo extinto Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica - DNAEE. Destaca-se, ainda, a aplicação da metodologia geoestatística na avaliação e na concepção de projetos de redes hidrométricas.

2.1.1. Metodologia OMM

Segundo OMM (1994) a construção de uma rede para o monitoramento em determinada bacia hidrográfica pode não ser suficiente para embasar todas as decisões em processos de planejamentos integrados dos recursos hídricos. Não se podendo implantar uma rede que atenda a todas as demandas necessárias, deve ser instalada pelo menos uma rede mínima que possa ser ampliada, modificada ou modernizada em processos sucessivos e contínuos, que busquem alcançar a construção de uma rede ótima.

O procedimento proposto pela OMM sugere uma avaliação espacial preliminar na qual são sugeridas densidades mínimas para a locação das estações hidrométricas (estações/km²), considerando diferentes condições fisiográficas de relevo. De modo geral, quanto mais declivosa a região maior deverá ser a quantidade de estações de monitoramento por km².

A OMM define, de forma geral, seis tipos de relevo para a aplicação das normas de densidade espacial: costeiro, montanhoso, planícies interiores, levemente ondulados, pequenas ilhas e regiões polares ou áridas. Nas Tabelas 2.1 e 2.2 são apresentadas, para cada tipo de relevo, as densidades mínimas de estações de monitoramento sugeridas pela OMM (estação/km²) para redes fluviométricas e pluviométricas, respectivamente.

Tabela 2.1 – Densidade mínima de estações de monitoramento fluviométrico

Relevo	Densidade Mínima (estação/km²)
Costeiro	1 : 2.750
Montanhoso	1 : 1.000
Planícies interiores	1 : 1.875
Levemente ondulado	1 : 1.875
Pequenas ilhas	1 : 300
Regiões polares/áridas	1 : 20.000

Fonte: OMM (1994).

Tabela 2.2 – Densidade mínima de estações de monitoramento pluviométrico

Relevo	Densidade Mínima (estação/km²)	
	Pluviômetro	Pluviógrafo
Costeiro	1 : 900	1 : 9.000
Montanhoso	1 : 250	1 : 2.500
Planícies interiores	1 : 575	1 : 5.750
Levemente ondulado	1 : 575	1 : 5.750
Pequenas ilhas	1 : 25	1 : 250
Regiões polares/áridas	1 : 10.000	1 : 100.000

Fonte: OMM (1994).

Segundo OMM (1994), a densidade mínima de estações para uma rede hidrométrica deve auxiliar no gerenciamento dos recursos hídricos proporcionando informações hidrológicas suficientes para o atendimento das necessidades ambientais e econômicas básicas. A OMM sugere que a rede mínima de monitoramento seja revista periodicamente visando a expansão e a sua adequabilidade às demandas regionais de informação.

2.1.2. Metodologia Instituto Federal de Hidrologia da Alemanha

A metodologia de avaliação e dimensionamento das redes hidrométricas alemãs foi criada em virtude das demandas levantadas pelo governo, visando à otimização de custos de manutenção, com o objetivo principal de identificar a significância das estações para a geração das informações hidrológicas e para a gestão dos recursos hídricos naquele país (BELZ & ENGEL, 2003)

A abordagem desse procedimento vem ao encontro da legislação brasileira quanto ao fundamento da garantia dos múltiplos usos da água. A sua premissa principal é que uma rede de monitoramento deve ser compartilhada pelos diversos usuários assim como as informações oriundas dessa rede. A proposta metodológica é descrita, em linhas gerais, a seguir:

- mapeamento dos usos das informações produzidas pela rede de monitoramento, dividido em dois tipos básicos de dados: monitoramento de níveis d'água e vazões;
- elaboração de critérios para avaliação periódica das estações de monitoramento quanto aos seus usos.

Os principais critérios utilizados na avaliação da rede de monitoramento fluviométrico levam em consideração a importância para navegação, a inserção da estação nos sistemas de alerta contra eventos extremos, o compartilhamento de informações na gestão integrada de recursos hídricos com países ou bacias hidrográficas vizinhas, a significância para ações de gerenciamento e tomadas de decisão, localização geográfica estratégica e amplitude do período de observação.

Segundo a metodologia do IFH, as estações de monitoramento são julgadas quanto ao número de critérios atendidos, podendo ser classificadas como: estação com destacada importância hidrológica (atendimento a todos os critérios), estação com importância específica (atendimento a critérios específicos) e estação desnecessária do ponto de vista hidrológico (estação a ser desativada).

Segundo Belz e Engel (2003), uma estação hidrométrica é dispensável sob o ponto de vista hidrológico quando os dados de uma estação vizinha coincidem ou há forte correlação entre os mesmos. Os autores alertam que a

tomada de decisão não deve ser feita somente sob o ponto de vista hidrológico, devendo ser considerados os usos específicos da estação em questão, inclusive quanto ao período a ser contemplado pelo planejamento dos recursos hídricos.

2.1.3. Metodologia DNAEE

Segundo DNAEE (1995), dois métodos expeditos devem ser utilizados para a locação de estações fluviométricas: o primeiro estabelece uma orientação para a locação da estação considerando a área de drenagem a ser monitorada e as condições operacionais para instalação (Tabela 2.3) e o segundo método propõe critérios de hierarquização da rede na locação de estações denominadas primárias e secundárias (Tabela 2.4).

Tabela 2.3 – Locação das estações fluviométricas em função da área de drenagem e das condições para instalação e operação das estações

Condições Relativas à instalação e operação da estação	Área a montante da primeira estação (km²)	Critério para locação das demais estações
Normais	200	Estações a jusante da primeira com o dobro da área de drenagem da estação a sua montante
Díficeis	1.000	
Muito Díficeis	5.000	

Fonte: DNAEE (1995).

Tabela 2.4 – Locação de estações fluviométricas primárias e secundárias

Classificação das estações	Critérios para locação das estações
Primárias	1 – A primeira estação com área de drenagem de 1.000 km ²
	2 – As estações seguintes dobrando-se a área de drenagem da estação a montante (2.000, 4.000, 8.000 km ² , etc.)
	3 – Inclusão de uma estação quando de bifurcação de tributário importante (conceito do nó hidrológico) imediatamente após a confluência
Secundárias	Em função de processos de regionalização

Fonte: DNAEE (1995).

Analisando-se a Tabela 2.3 nota-se que a metodologia proposta pelo DNAEE preocupa-se com a dificuldade de acesso ao local de monitoramento e praticidade de operação da rede.

Na Tabela 2.4 observam-se os critérios utilizados para classificar, em ordem de importância, as estações de monitoramento. Consideram-se estações primárias aquelas permanentes, de longo tempo de observação, entre 25 e 30 anos, localizadas em cursos d'água principais das bacias, e estações secundárias aquelas instaladas por tempo determinado, com período de coleta entre 5 e 10 anos, em cursos d'água secundários com áreas de drenagem inferiores a 1.000 km², com o objetivo de complementar as informações coletadas nas estações principais.

O procedimento proposto pelo extinto DNAEE é estritamente empírico, sendo necessária a incorporação de novas tecnologias para locais de difícil acesso e a adoção de novos critérios que primem pela de gestão integrada de recursos hídricos, para definição mais racional da rede de monitoramento. A rede fluviométrica brasileira baseia-se principalmente nesta metodologia.

2.1.4. Método Geoestatístico

As análises de variância-covariância podem ser utilizadas tanto para estimar quais estações contribuem com pequena quantidade de informação quanto para a ampliação da rede de monitoramento (GUTTORP et al., 1992).

O engenheiro de minas D. G. Krige e o estatístico H. S. Sichel desenvolveram empiricamente uma metodologia própria de estimativa para o cálculo de reservas minerais, denominada geoestatística (KRIGE, 1951). Esta técnica leva em consideração não só as informações fornecidas pela análise de variância, mas também a localização geográfica e a dependência espacial dos dados avaliados.

A partir dos fundamentos da geoestatística, Matheron (1971) desenvolveu a teoria das variáveis com condicionamento espacial ou variáveis regionalizadas. Uma variável regionalizada é uma função numérica com distribuição espacial, que varia de um ponto a outro, com continuidade aparente, mas cujas variações não podem ser representadas por uma função matemática simples.

Segundo Landim (2003), a análise geoestatística possibilita: realizar aproximações matemáticas de fenômenos regionais; estimar valores para variáveis regionalizadas, a partir de um conjunto discreto de amostras em locais não amostrados; avaliar os erros das estimativas e propor padrões ótimos de amostragem. O autor cita que inicialmente a geoestatística foi desenvolvida para aplicação em geologia, mas nos últimos anos tem sido empregada em climatologia, geologia ambiental, geotecnia, hidrogeologia, pedologia, entre outros.

Segundo Mishra e Coulibaly (2009), nas análises geoestatísticas, o estudo das variáveis regionalizadas é feito a partir de duas ferramentas fundamentais: o semivariograma (análise do comportamento espacial das variáveis) e a krigagem (cálculo dos valores preditos com seus erros associados).

Os modelos matemáticos de semivariogramas mais utilizados na literatura são o exponencial, o gaussiano e o esférico (DELHOMME, 1976; ISAACS & SRIVASTAVA, 1989). Na Figura 2.1 é apresentado um semivariograma típico e suas principais características: alcance (a), efeito pepita (C_0), variância espacial (C_1) e patamar (C_0+C_1).

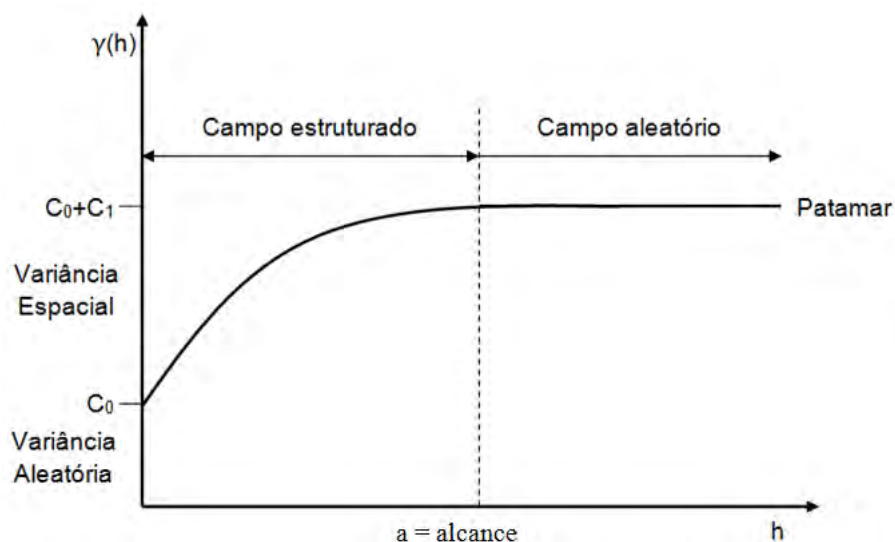


Figura 2.1 – Semivariograma típico e suas principais características.

Fonte: Yamamoto et al., 2011.

O alcance (a) pode ser definido como a distância a partir da qual as amostras passam a ser independentes (YAMAMOTO et al., 2011). Segundo Landim (2003) o alcance fornece o tamanho da zona de influência em torno de

uma amostra. Nesse sentido, segundo Matheron (1971) o semivariograma dá um significado preciso da noção tradicional de zona de influência. O alcance é a distância que separa o campo estruturado (amostras correlacionadas) do campo aleatório (amostras independentes).

Entende-se o efeito pepita (C_0) como o valor da função semivariograma na origem ($h=0$). Teoricamente esse valor deveria ser zero, pois duas amostras tomadas no mesmo ponto ($h=0$) deveriam possuir os mesmos valores. Entretanto, quando esta afirmação não é verdadeira, atribui-se esta diferença, geralmente, a erros de amostragem e/ou análise. O efeito pepita também é chamado de variância aleatória (YAMAMOTO et al., 2011; LANDIM, 2003).

A variância espacial é dada pela diferença entre o patamar (a variância a priori) e o efeito pepita (C_0). O Patamar (C_0+C_1) é o valor no qual o semivariograma estabiliza-se (no campo aleatório), isto é, o ponto a partir do qual as amostras tornam-se independentes devido à grande distância que as separa (YAMAMOTO et al., 2011).

De posse do modelo teórico que explique a dependência espacial das variáveis inicia-se a aplicação da técnica de krigagem. A krigagem baseia-se no número de dados, na qualidade dos dados em cada ponto, na posição da coleta dos dados, na continuidade espacial e na distância entre estes pontos amostrais (JOURNEL e HUIJBREGTS, 1978).

Assim, conhecido o semivariograma e aplicando-se a técnica de krigagem, podem ser estimados os valores da variável hidrológica em questão nos locais não amostrados de uma rede, bem como as incertezas associadas ao mapeamento gerado.

A diferença entre a krigagem e outros métodos de interpolação comumente empregados é a maneira como os pesos são atribuídos às diferentes amostras. Na krigagem o procedimento é semelhante ao de interpolação por média móvel ponderada, exceto que os pesos são determinados a partir de uma análise espacial, baseada no semivariograma experimental. Além disso, a krigagem fornece, em média, estimativas não tendenciosas (a diferença entre valores estimados e verdadeiros para o mesmo ponto, em média, deve ser nula) e com variância mínima.

Nos artigos II e III deste trabalho é apresentada uma proposta metodológica para avaliação, rearranjo e otimização de redes hidrométricas de monitoramento quantitativo baseada em Sistemas de Informações Geográficas e Análise Geoestatística aplicada a redes fluviométricas e pluviométricas, respectivamente.

2.2. ESTADO DA ARTE DAS PRINCIPAIS REDES HIDROMÉTRICAS DE MONITORAMENTO QUANTITATIVO EM NÍVEL INTERNACIONAL

A Organização Meteorológica Mundial gerencia um programa intitulado “Hidrologia e Recursos Hídricos” (HWRP), responsável pela avaliação da quantidade e da qualidade dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos mundiais. Este programa visa a padronização dos aspectos relacionados às observações hidrológicas, a transferência de tecnologias, a confecção de um banco de dados hidrológico mundial e o apoio no desenvolvimento de políticas de gestão integrada dos recursos hídricos (OMM, 2010).

Inserido no HWRP, o Serviço de Informações Hidrológicas de Referência (INFOHYDRO) fornece informações hidrológicas para especialistas, agências e empresas de projetos relacionados à água, avaliação de recursos hídricos, desenvolvimento e gestão dos países membros da OMM.

A partir do INFOHYDRO é possível obter informações relacionadas às organizações governamentais, não governamentais, instituições e agências que lidam com hidrologia em cada país, quais são as atividades hidrológicas relacionadas a estes órgãos e qual a situação da rede de monitoramento hidrológica de cada país (número de estações de monitoramento, duração de registros, tipos de análise e transmissão de dados).

Apesar dos esforços feitos pela OMM, com intuito de integrar, padronizar e agilizar a troca de informações hidrológicas, nem todos os países possuem uma base de dados disponível para consulta, tornando-se muito difícil a obtenção de dados globais para análise hidrológica (GLEICK et al., 2008).

Em 2006 foi publicado o inventário dos sistemas de informações hidrológicas da Europa pela *Flood Awareness & Prevention Policy* – FLAPP, para regiões de fronteira entre os países europeus. Este documento aborda, entre outros temas, a gama de contribuições que os sistemas de informações

hidrológicas, trabalhando de forma integrada, podem fornecer para tomadas de decisão eficientes (FLAPP, 2006).

Apesar de altamente desenvolvidos, os sistemas de informações hidrológicas do continente europeu ainda são nacionalmente independentes e a falta de cooperação entre algumas unidades federativas fica evidente, principalmente em se tratando de bacias hidrográficas de domínios internacionais (FLAPP, 2006).

Para o desenvolvimento do estado da arte do monitoramento hidrométrico global, fez-se necessária uma consulta individual aos sistemas de informações hidrológicas e às bases de dados de instituições e agências responsáveis pela gestão de recursos hídricos de cada país.

Na sequência são apresentadas, de forma sucinta, as principais experiências internacionais no monitoramento de recursos hídricos, destacando-se entre elas os países pertencentes aos continentes asiático, europeu e americano.

2.2.1. Monitoramento Hidrométrico no Continente Asiático

A Ásia é o continente que abriga a maior parte da população mundial. Com a preocupação científica mundial voltada para os efeitos do aquecimento global, muitos trabalhos na área de hidrologia têm sido desenvolvidos recentemente neste continente: Chaudhary & Bawa (2011), Pithan (2010), Fujita & Nuimura (2011) e Kaser et al. (2010).

Segundo Imeerzeel et al. (2010), mais de 1,4 bilhão de pessoas, aproximadamente 20% da população mundial, dependem da água proveniente de cinco bacias hidrográficas asiáticas: rios Indus, Ganges, Brahmaputra, Yangtze e rio Amarelo.

Dois dos países mais ricos em água doce superficial do planeta situam-se no continente asiático: Rússia e China. A situação atual da gestão de recursos hídricos nestes países é muito distinta e será apresentada a seguir.

2.2.1.1. Rússia

Segundo Zhulidov et al. (2001), a Rússia enfrenta problemas políticos, técnicos, institucionais e financeiros, principalmente no que se refere ao monitoramento da qualidade da água. Segundo os autores, o atual modelo russo de monitoramento dos recursos hídricos não vai de encontro às necessidades básicas dos seus principais usos, tendo como enfoque quase exclusivo a geração de energia elétrica e o controle de inundações. Os autores sugerem uma modernização da legislação e do marco institucional objetivando um conjunto de metas nacionais para a gestão das águas.

2.2.1.2. China

Na China, ao contrário da Rússia, o monitoramento e o serviço de informações sobre recursos hídricos são altamente desenvolvidos. A ampla rede de monitoramento hidrológico chinesa serve como base e pré-requisito para todas as atividades que envolvem os recursos hídricos. Segundo Cai (2006), mais de 600 milhões de dados de monitoramento da água são coletados todos os anos. Esses dados oferecem bases confiáveis para controle da seca e inundações, gestão de recursos hídricos, proteção ambiental e plano de desenvolvimento local e nacional.

A China conta com uma rede fluviométrica de monitoramento ampla, integrada e hierarquizada, composta por 1.073 estações de medição de descarga, 3.240 estações de qualidade de água e aproximadamente 7.900 estações de monitoramento de nível de água para o controle de enchentes e operação de hidrelétricas.

A dificuldade de obtenção de dados por parte da comunidade científica internacional é a principal restrição feita ao sistema de informações hidrológicas da China. A não vinculação do banco de dados hidrológico chinês ao INFOHYDRO seguramente deve-se a uma questão política interna do país.

2.2.2. Monitoramento Hidrométrico no Continente Europeu

O continente europeu, sem dúvida, possui o maior número de países com experiências bem sucedidas no gerenciamento dos recursos hídricos,

sendo que a Alemanha e a França se destacam na gestão de recursos hídricos em nível mundial.

A Alemanha foi o primeiro país a contar com uma agência de bacia: a Agência do rio Rhur que remonta ao início do século XX. A principal característica da política de recursos hídricos alemã é a centralização da gestão, limitando o poder de decisão dos organismos de bacia. Já a experiência de gestão de recursos hídricos francesa tem servido de modelo para outros sistemas de gestão, inclusive o brasileiro. O modelo francês baseia-se na gestão descentralizada em organismos de bacia, focando na aplicação da cobrança pelo uso da água e por emissão de efluentes para fins de financiamento do sistema de gestão (RAMOS, 2007).

Neste trabalho será apresentado, de forma particular, o estado da arte do monitoramento fluviométrico da Alemanha, França, Reino Unido, Espanha e Áustria.

2.2.2.1. Alemanha

A Alemanha possui desde a metade do século XIX completa rede de monitoramento dos seus rios, gerando informações praticamente ininterruptas até os dias atuais (BELZ & ENGEL, 2003).

Segundo Kraemer (1998), a diversidade de instituições envolvidas na gestão de recursos hídricos na Alemanha indica a diversidade cultural do país e denota a aplicação fiel do princípio do federalismo. A aplicação deste princípio é a característica mais marcante do sistema alemão, principalmente se comparado com outros países membros da União Européia.

A gestão e proteção dos recursos hídricos alemães são de competência estadual, sendo as responsabilidades distribuídas em vários níveis de governo. Os problemas que extrapolam os limites estaduais são tratados no âmbito do Grupo de Interestadual das Águas (LAWA) onde têm assento as autoridades estaduais da área, e que também tem a função de harmonizar as leis estaduais relativas ao assunto (RAMOS, 2007).

Segundo UBA (2010), no ano 2000 foi traçado um plano de metas para os recursos hídricos alemães para 2015, 2021 e 2027. A sequência de atividades previstas baseia-se na caracterização da situação atual, no

estabelecimento de um programa de monitoramento integrado, na implementação dos planos de bacias hidrográficas e nos programas de fiscalização dos resultados. Ao fim de cada período de seis anos, a partir de 2015, iniciam-se novamente as atividades previstas gerando-se um ciclo contínuo de avaliação e concretização das metas propostas.

A rede de monitoramento de recursos hídricos alemã é bastante densa. Somente para águas superficiais, a Alemanha possui 7.917 estações de monitoramento em operação para uma área territorial de, aproximadamente, 357 mil km².

2.2.2.2. França

A Lei das Águas francesa de 1964 permitiu a implantação de um sólido e pioneiro sistema de gestão que se baseia em Comitês de Bacia ou “parlamento das águas”, onde estão representados: o poder público, os usuários e as associações civis interessadas. O sistema conta, ainda, com a figura das Agências de Bacias, entidades técnicas e financeiras que dão suporte e implementam as decisões dos comitês (RAMOS, 2007).

Integrante ativa da comunidade científica europeia, a França pode ser tratada como um dos países precursores em termos de gestão de recursos hídricos no planeta (ABBOTT et al., 1986).

Atualmente, a gestão de recursos hídricos na França é realizada por seis comitês de bacias (*Adour-Garonne, Artois-Picardie, Loire-Bretagne, Rhin-Meuse, Rhone-Mediterranee-Corse e Seine-Normandie*), vinculados ao Ministério de Ecologia, Energia, Desenvolvimento Sustentável e Gestão Territorial.

O Sistema de Informações Hidrológico francês (SIEAG) atua de forma integrada e fornece em tempo real dados sobre balneabilidade, qualidade de água, boletins hidrológicos, saneamento básico, vigilância meteorológica, estiagem e sistemas de alertas contra inundações. A partir do banco de dados hidrológico francês observa-se que o início do monitoramento fluviométrico data de meados do século XIX, por volta do ano 1860 (EAUFRANCE, 2010).

A rede de monitoramento de recursos hídricos francesa é constituída de 2.400 estações de monitoramento em operação para uma área territorial de,

aproximadamente, 544 mil km². Na Figura 2.2 é apresentada a página do SIEAG para a região hidrográfica de *Adour-Garonne*, indicando no mapa as estações fluviométricas em operação.

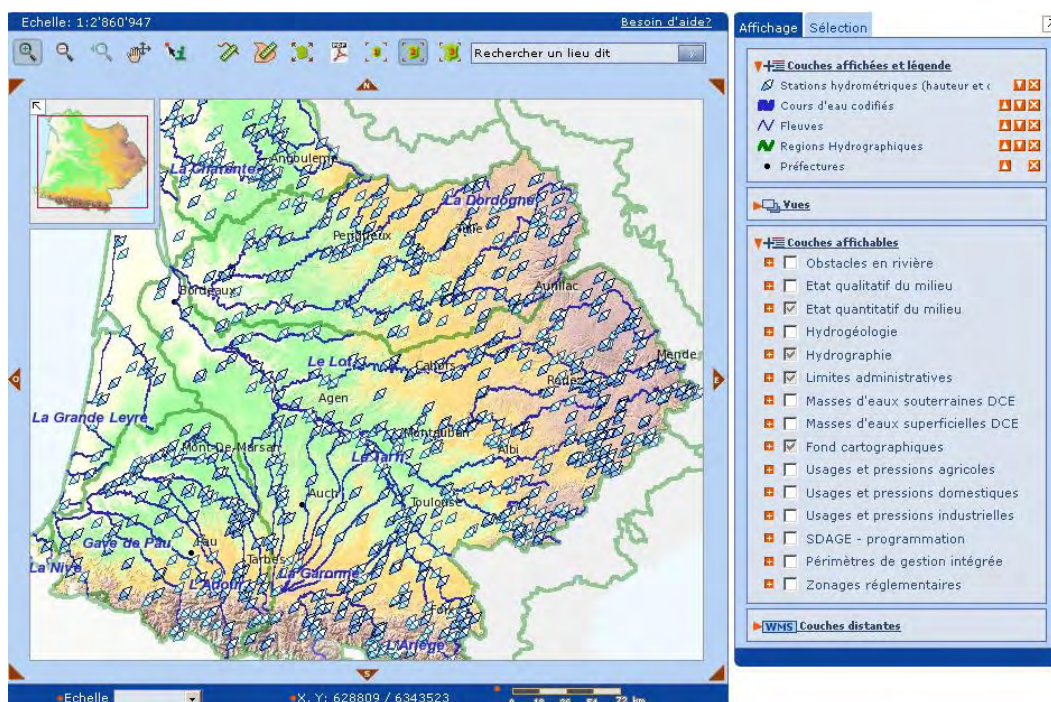


Figura 2.2 – Sistema de informações hidrológico francês: postos fluviométricos em operação na região hidrográfica de *Adour-Garonne*.

Fonte: EAUFRAANCE, 2010.

Observa-se na Figura 2.2 a gama de informações que o sistema hidrológico francês é capaz de apresentar aos usuários e a grande densidade de estações e homogeneidade da distribuição espacial da rede de monitoramento fluviométrico para a região hidrográfica de *Adour-Garonne*.

2.2.2.3. Reino Unido

O Centro de Ecologia e Hidrologia do Reino Unido (CEH), vinculado ao Conselho de Pesquisas Ambientais (NERC), é responsável pelo monitoramento ambiental de todo o Reino Unido (Inglaterra, Escócia, País de Gales e Irlanda do Norte). O CEH trabalha em parceria com a comunidade científica europeia, gestores políticos, indústria e sociedade. A área territorial do Reino Unido é de, aproximadamente, 242 mil km² e segundo LEES (1985) seu monitoramento ambiental originou-se no início do século XIX.

O Reino Unido mantém uma densa rede de estações de medição de vazão que é constantemente reavaliada devido a quatro fatores: desempenho

hidrométrico, duração de registros de fluxo, representatividade da bacia hidrográfica e desastres naturais. Dentre as 2.750 estações fluviométricas de monitoramento quantitativo do Reino Unido, 1.450 são automáticas indicando uma tendência de automatização hidrométrica da rede. Na Figura 2.3 é apresentada a localização das estações de medição de vazão do Sudoeste da Inglaterra e País de Gales.

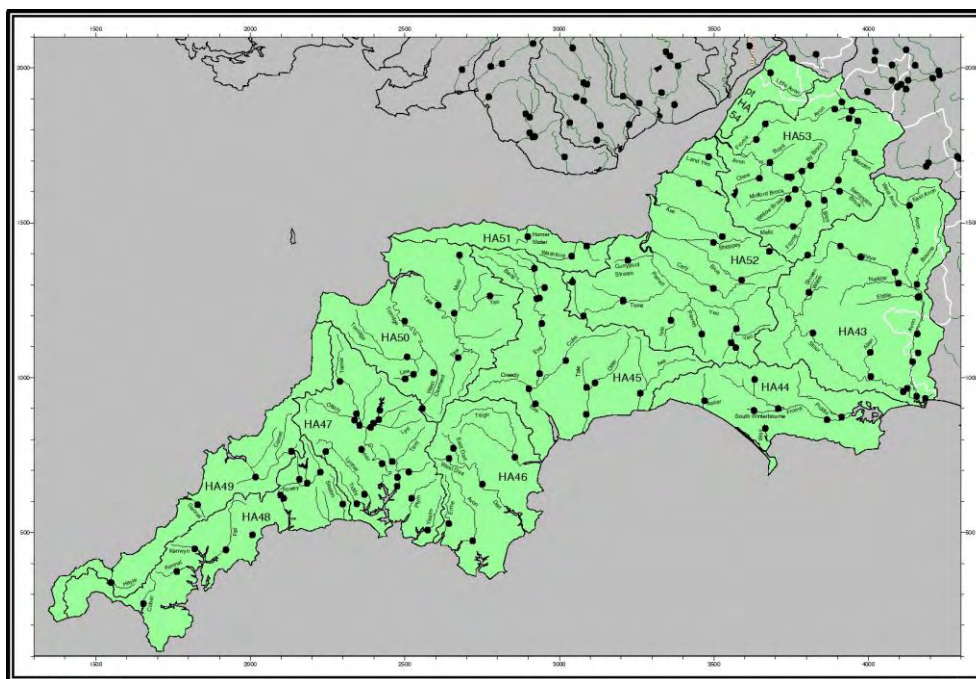


Figura 2.3 – Localização geográfica da rede fluviométrica de monitoramento quantitativo do Reino Unido – Região Sudoeste da Inglaterra e País de Gales.

Fonte: CEH, 2010.

Assim como o sistema de informações francês, o sistema Britânico é muito simples de ser utilizado pelos usuários e um dos mais avançados da Europa. Na Figura 2.3 observa-se grande densidade de estações e homogeneidade da distribuição espacial da rede de monitoramento fluviométrico da região sudoeste da Inglaterra e País de Gales. Este comportamento é semelhante para todas as unidades de gestão e planejamento hidrológico do Reino Unido.

2.2.2.4. Espanha

O monitoramento hidrológico da Espanha é realizado pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA). Sua área territorial é de, aproximadamente, 505 mil km² e o monitoramento hidrométrico é bem distribuído no país, conforme observado na Figura 2.4.

Todas as 1.332 estações da rede de monitoramento hidrométrico espanhola são automáticas, com transferência de dados via telemetria. O sistema de informações hidrológicas espanhol possibilita ao usuário saber a vazão instantânea nos principais cursos d'água do país.

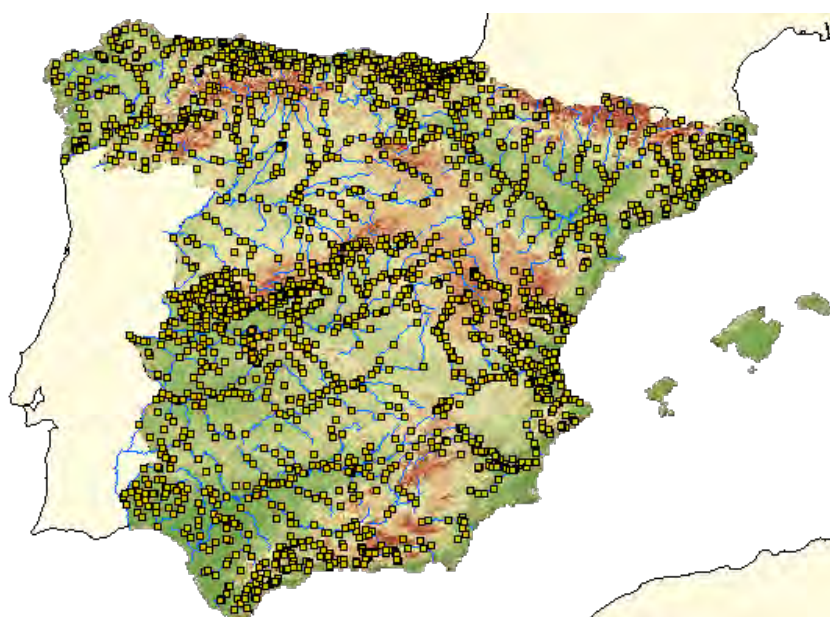


Figura 2.4 – Localização geográfica da rede fluviométrica espanhola.

Fonte: SIA, 2010.

Analisando-se a Figura 2.4 observa-se grande densidade de estações de monitoramento, tendência de automatização dos dados e homogeneidade da rede fluviométrica espanhola, que segue o mesmo padrão apresentado para a rede francesa e britânica.

2.2.2.5. Áustria

O gerenciamento das informações hidrológicas da Áustria é de responsabilidade do Ministério Federal de Agricultura, Floresta, Meio ambiente e Gestão das Águas. O território austríaco abrange uma área de, aproximadamente, 83 mil km². A rede fluviométrica de monitoramento quantitativo é composta por 728 estações fluviométricas e o país tem investido muito em medidas de recuperação dos cursos d'água superficiais e mananciais subterrâneos do país, o que tem melhorado substancialmente a qualidade de seus recursos hídricos.

Segundo a Agência Federal de Meio Ambiente – FEA estima-se que 99% dos recursos hídricos da Áustria (superficiais e subterrâneos) encontram-se dentro dos padrões europeus para as classes I e II.

Na Figura 2.5 é apresentada a distribuição espacial da rede fluviométrica de monitoramento qualitativa e quantitativa da Áustria. Cabe ressaltar que as estações de monitoramento qualitativo contemplam tanto as águas superficiais quanto as subterrâneas.

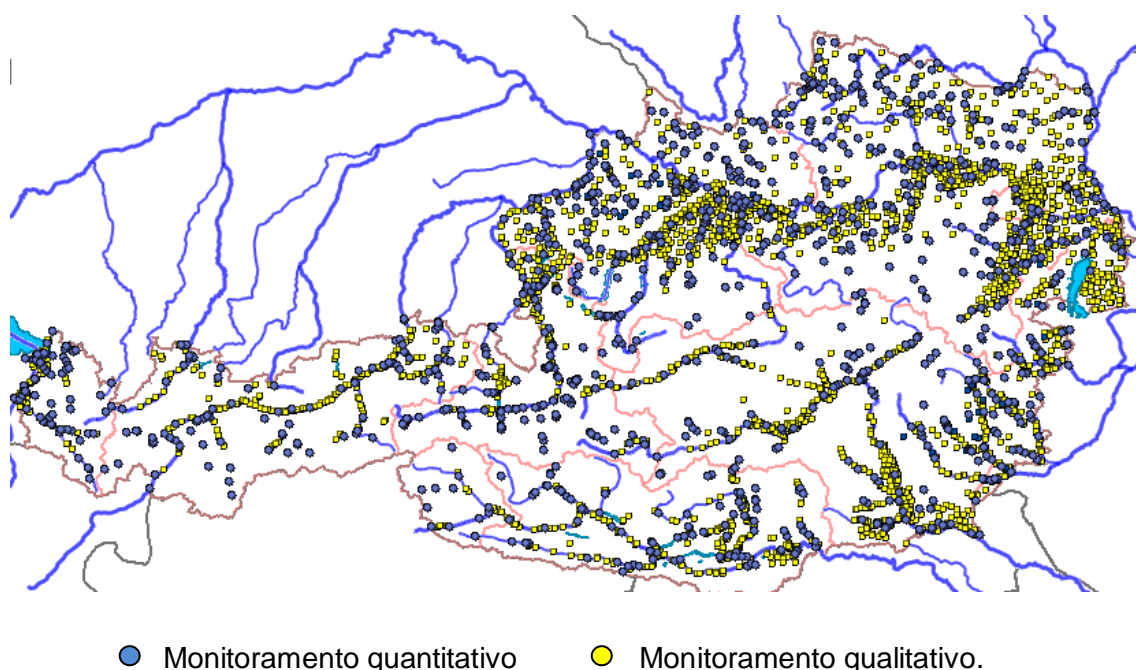


Figura 2.5 – Localização geográfica da rede fluviométrica de monitoramento quantitativo e qualitativo da Áustria.

Fonte: FEA, 2010.

2.2.3. Monitoramento Hidrométrico no Continente americano

O monitoramento hidrométrico do continente americano é bem heterogêneo, alcançando níveis de excelência na América do Norte e pouca representatividade na maioria dos países da América central e América do Sul. Apesar de recente e historicamente de cunho hidroenergético, o monitoramento do Brasil tem se desenvolvido muito nos últimos anos, principalmente devido à sua estruturação legal e institucional.

Serão apresentadas, na sequência, as experiências de monitoramento fluviométrico dos Estados Unidos da América e do Canadá. O estado da arte do monitoramento fluviométrico brasileiro será tratado em pormenores no próximo item.

2.2.3.1. Estados Unidos da América

Segundo Perry (2000), durante o século XX as inundações foram, em termos de mortes e danos materiais, o desastre natural de maior impacto nos Estados Unidos da América. Este é um dos principais motivos que levaram o país a possuir a maior rede fluviométrica de monitoramento quantitativo do mundo.

O Serviço Geológico Americano (USGS), vinculado ao Departamento de Recursos Hídricos norte americano, é a instituição responsável pelo monitoramento fluviométrico do país. A área territorial dos EUA é de, aproximadamente, 9,63 milhões de km², coberta por uma rede fluviométrica de monitoramento ampla, em sua maioria automatizada e tendo algumas estações com mais de 110 anos de coleta de dados.

Segundo USGS (2010), a maior parte da rede fluviométrica de monitoramento quantitativo é automática (7.364 estações telemétricas), capaz de armazenar e enviar dados em tempo real. Na Figura 2.6 pode-se verificar o mapa do país, mostrando as condições de descarga dos cursos d'água superficiais em comparação com a média histórica para o dia 10/03/2010. Cada ponto colorido indica uma estação de monitoramento de vazão.

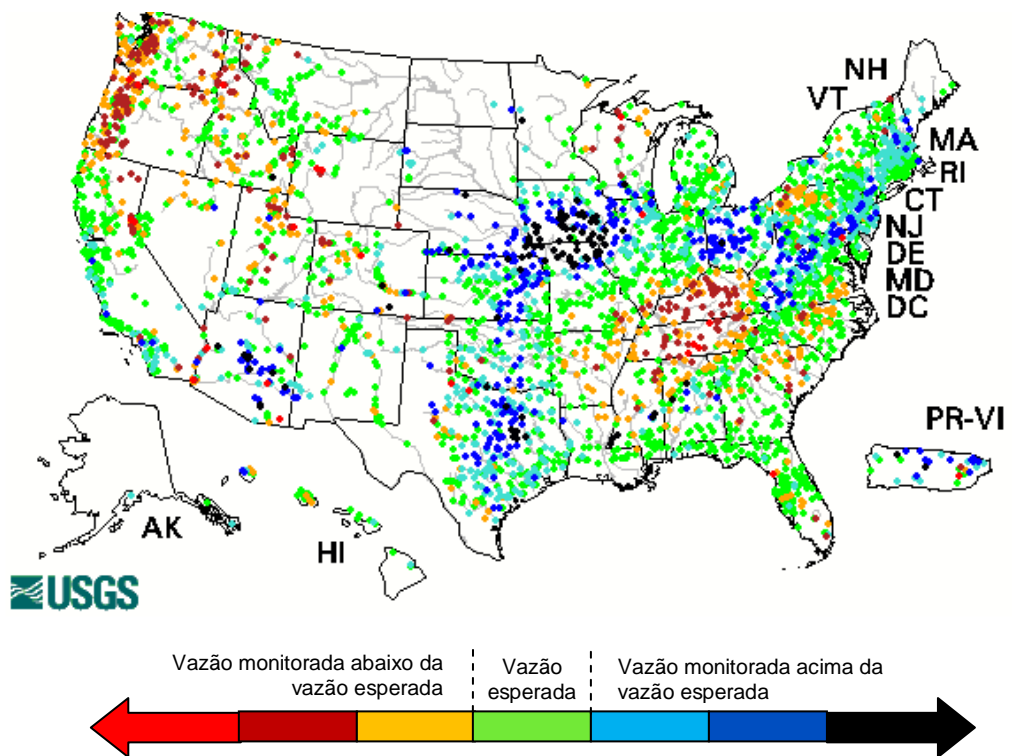


Figura 2.6 – Rede de estações fluviométricas de monitoramento quantitativo em tempo real dos EUA.

Fonte: USGS, 2010.

Analisando-se a Figura 2.6 observa-se que, apesar de possuir uma grande densidade de estações, a rede de monitoramento fluviométrica americana é mal distribuída espacialmente (região central e norte do país com poucas estações de monitoramento). Isto se deve principalmente às diversas condições físicas e climáticas das bacias hidrográficas do país.

O sistema de informações hidrológicas dos Estados Unidos, além de fornecer informações críticas sobre cota e vazão, fornece dados em tempo real possibilitando uma gestão eficaz relacionada aos principais usos: abastecimento doméstico, agrícola e industrial; manutenção da qualidade dos mananciais, proteção do habitat aquático, recreação e fonte de pesquisas hidrológicas (BLACKHURST et al., 2010; MAWDSLEY et al., 2009; STANISLAWSKI, 2009).

2.2.3.2. Canadá

A agência nacional de serviços hídricos do Canadá (Water Survey Canada - WSC), vinculada ao Serviço Meteorológico do Canadá (Meteorological Service of Canada- MSC), é responsável pelo monitoramento fluviométrico do país. A área territorial do Canadá é de, aproximadamente, 9,98 milhões de km², coberta por uma rede fluviométrica de monitoramento quantitativa originada no ano de 1908.

Segundo WSC (2010), a rede de monitoramento fluviométrica do Canadá surgiu da necessidade de coleta de dados hidrológicos para planejamento hidrelétrico, projetos de sistemas de abastecimento de água e irrigação. O planejamento da rede, majoritariamente de caráter empírico, foi impulsionado por pressões econômicas devido ao aumento populacional, principalmente na metade sul do país.

Grande parte das estações de monitoramento quantitativo já está operando de forma automática (1.637 estações telemétricas). Na Figura 2.7 é apresentada a rede de estações fluviométricas automáticas do Canadá, sua distribuição geográfica e seu estado de funcionamento.

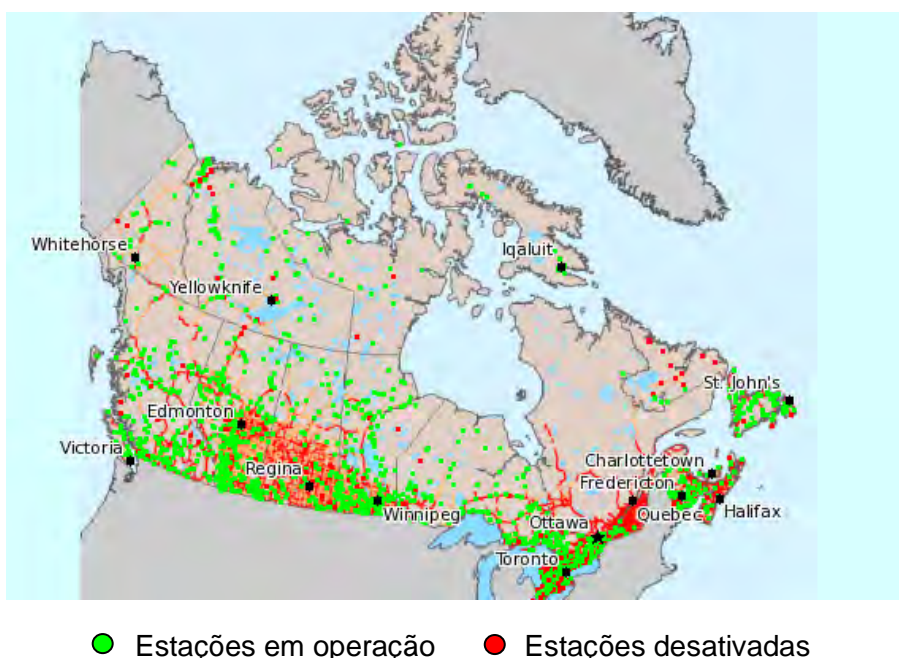


Figura 2.7 – Rede de estações fluviométricas de monitoramento quantitativo do Canadá.

Fonte: WSC, 2010

Analisando-se a Figura 2.7 observa-se que a rede de monitoramento fluviométrica canadense concentra-se exclusivamente no sul do país, onde se tem a maior densidade demográfica. Isto se deve principalmente às condições climáticas muito rigorosas da região norte do país (região de temperaturas muito baixas onde os cursos d'água ficam congelados durante boa parte do ano).

Atualmente o planejamento da rede de monitoramento do Canadá está sendo feito buscando-se, em linhas gerais: reposicionamento, hierarquização, ampliação e automatização total das estações, visando o atendimento integrado dos múltiplos usos dos recursos hídricos canadenses (MISHRA et al., 2009; COULIBALY, 2005; COULIBALY, 2006; MISHRA & COULIBALY, 2009).

2.3. ESTADO DA ARTE DA REDE HIDROMÉTRICA DE MONITORAMENTO QUANTITATIVO BRASILEIRA

A Agência Nacional de Águas – ANA, vinculada ao Ministério do Meio Ambiente (art. 3º, Lei nº 9.984/2000), é a instituição responsável pela gestão compartilhada e integrada dos recursos hídricos brasileiros. O Brasil possui uma área territorial de, aproximadamente, 8,5 milhões de km² e a maior descarga superficial de água doce do planeta.

Os levantamentos hidrológicos no Brasil tiveram início há mais de 100 anos, quando foram instaladas as primeiras estações pluviométricas com medições regulares. Posteriormente, foram instaladas estações com medição de níveis d'água e de vazões líquidas, objetivando fazer face, já naquela época, às necessidades de aproveitamento das forças hidráulicas para geração de energia elétrica.

A partir do início do século passado a hidrometria passou a ser realizada de maneira mais estruturada, evoluindo em aspectos relativos à metodologia operacional, aos equipamentos de medição e observação, assim como ao número de seções monitoradas. Na Tabela 2.5 é apresentado um breve histórico sobre a rede hidrométrica nacional.

Tabela 2.5 – Histórico sobre a rede hidrométrica brasileira

Data	Descrição/Fatos
Início do século XX	Subsidiar estudos do DNOCS e INMET (monitoramento pluviométrico)
Década de 20	Estudos hidrológicos e desníveis hidráulicos (Potencial Hidrelétrico – início da rede Fluviométrica)
Década de 30	Grande revolução no tratamento de recursos hídricos (Código das Águas)
Década de 40	Crescimento expressivo da rede fluviométrica, principalmente da região Sudeste.
Década de 60	Criação do DNAEE (1965) e centralização dos dados hidrométricos. Criação da CPRM (1968) responsável pela operação e manutenção da rede.
Décadas de 70 e 80	Grande expansão da rede fluviométrica.
Década de 90	Criação da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL
2000	Criação da Agência Nacional de Águas - ANA

Fonte: Gontijo Júnior, 2007.

A operação da rede hidrométrica brasileira é descentralizada e tem sido realizada por entidades públicas e privadas. A ANA é responsável pela administração dos recursos necessários para operação de grande parte das estações de monitoramento fluviométrico e tem buscado parcerias com as demais entidades do país no sentido de que haja em seu banco de dados informações suficientes para atender às demandas dos diversos usos.

Nas Tabelas 2.6 e 2.7 observa-se o estágio atual das estações em operação, identificadas por tipo e por região hidrográfica, sob responsabilidade da ANA e de outras entidades, respectivamente. Para simplificar a análise foram utilizadas as regiões hidrográficas que servem de base para a codificação das estações fluviométricas brasileiras (Portaria MME nº 447/1976).

Tabela 2.6 - Tipos de estações em operação sob responsabilidade da ANA

Regiões Hidrográficas	Estações Fluviométricas		Estações Pluviométricas		Total
	OP	DES	OP	DES	
Amazônica	280	166	481	153	1.080
Tocantins	99	51	192	39	381
Atl. Norte/Nordeste	307	87	299	37	730
São Francisco	220	243	327	167	957
Atl. Leste	353	374	451	277	1.455
Paraná	419	390	618	281	1.708
Uruguai	84	109	156	37	386
Atl. Sudeste	141	192	209	78	620
Total	1.903	1.612	2.733	1.069	7.317

Fonte: ANA, 2011.

Legenda: OP – em operação e DES – desativada.

Tabela 2.7 - Tipos de estações em operação sob responsabilidade de outras entidades

Regiões Hidrográficas	Estações Fluviométricas		Estações Pluviométricas		Total
	OP	DES	OP	DES	
Amazônica	266	129	376	357	1.128
Tocantins	130	129	84	24	367
Atl. Norte/Nordeste	345	228	1418	923	2.914
São Francisco	376	227	533	617	1.753
Atl. Leste	647	704	911	957	3.219
Paraná	1.571	754	2.201	1.330	5.856
Uruguai	179	87	118	60	444
Atl. Sudeste	372	279	469	380	1.500
Total	3.886	2.537	6.110	4.648	17.181

Fonte: ANA, 2011.

Legenda: OP – em operação e DES – desativada.

É importante observar nas Tabelas 2.6 e 2.7 que aproximadamente 37% e 42% das estações, sob responsabilidade da ANA e das demais entidades, respectivamente, estão inoperantes, o que pode representar a falta de planejamento na sua locação ou, ainda, a falta de recursos financeiros para sua manutenção e operação.

Na Figura 2.8 observa-se a situação atual da rede fluviométrica de monitoramento quantitativo nacional. É nítida a heterogeneidade da rede brasileira, concentrando-se o maior número de estações na região sudeste do

país (regiões hidrográficas do Atlântico Leste, Atlântico Sudeste e Paraná, conforme Resolução CNRH n° 32/2003).



Figura 2.8 – Rede fluviométrica de monitoramento quantitativo do Brasil.
Fonte: ANA, 2007.

Segundo ANEEL (2002), a capacidade hidrelétrica instalada em MW nas regiões hidrográficas do Atlântico Leste, Atlântico Sudeste e Paraná somam, aproximadamente, 72% da capacidade total do país, mostrando numericamente a forte relação entre o planejamento histórico da rede hidrométrica nacional e a geração de energia elétrica. **Outros fatores que influenciaram o adensamento no monitoramento fluviométrico destas regiões foram a alta densidade demográfica, a concentração de grande parcela do PIB brasileiro e o alto índice de desenvolvimento industrial da região.**

Com o intuito de descrever a situação atual do monitoramento nacional em relação às áreas de drenagem a montante dos postos de medição, elaborou-se a Tabela 2.8 com base nas estações de monitoramento fluviométrico em operação, sob responsabilidade da ANA.

Tabela 2.8 – Número de estações fluviométricas da ANA em operação por faixa de área de drenagem

Região Hidrográfica	Área de Drenagem (km ²)			Total
	Até 500	de 500 a 8.000	> 8.000	
Amazônica	5	72	204	281
Tocantins	6	37	56	99
Atl. Norte/Nordeste	25	143	69	237
São Francisco	41	115	69	225
Atl. Leste	93	206	81	380
Paraná	128	229	93	450
Uruguai	8	61	17	86
Atl. Sudeste	45	81	19	145
Total	351	944	608	1.903

Fonte: Adaptado de ANA, 2011.

A análise da Tabela 2.8, a princípio, pode indicar uma falsa impressão que as estações fluviométricas em operação estão distribuídas uniformemente por faixa de área de drenagem. Cabe ressaltar, entretanto, que existem muito mais áreas de cabeceiras (áreas de drenagem de até 500 km²) que áreas de drenagem intermediárias (de 500 a 8.000 km²) ou áreas de drenagem de maior abrangência (maiores que 8.000 km²).

Esta proporção do número estações por faixa de área de drenagem é de difícil determinação, pois varia para cada bacia hidrográfica. Em recente estudo, a ANA construiu a base hidrográfica ottocodificada (PFAFSTETTER, 1989) para todo Brasil na escala do milionésimo (ANA, 2007). Tomando como estudo de caso a bacia hidrográfica do rio Doce, ottocodificada até o nível 5, foram identificadas todas as sub-bacias para três faixas de área de drenagem (Tabela 2.9).

Tabela 2.9 – Proporção de sub-bacias por faixa de área de drenagem para a bacia do rio Doce ottocodificada no nível 5

Área (km ²)	Nº de Observações	%
Até 500 (cabeceiras)	259	83
De 500 a 8.000	48	15
Maiores que 8.000	5	2
Total	312	100

Analisando-se a Tabela 2.9 observa-se que uma rede de monitoramento fluviométrico deve priorizar as áreas de cabeceira, posteriormente as áreas intermediárias e, por fim, as grandes áreas de drenagem, visando um controle mais homogêneo, eficiente e adequado aos seus diversos usos. Na situação atual do monitoramento brasileiro, apenas 18% das estações encontram-se em regiões de cabeceira, 50% em regiões intermediárias e 32% em bacias com área maior que 8.000 km².

Este é mais um indicativo do privilégio, ao longo da história do Brasil, que foi dado a alguns setores usuários (setor hidroelétrico, principalmente) em detrimento da gestão integrada dos recursos hídricos.

2.4. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS REDES HIDROMÉTRICAS NACIONAL E INTERNACIONAL

Para evitar o efeito de escala (áreas territoriais dos países em análise) procedeu-se a avaliação da densidade de estações fluviométricas por país. Na Figura 2.9, podem ser verificadas as densidades das redes fluviométricas calculadas com base na área territorial dos países.

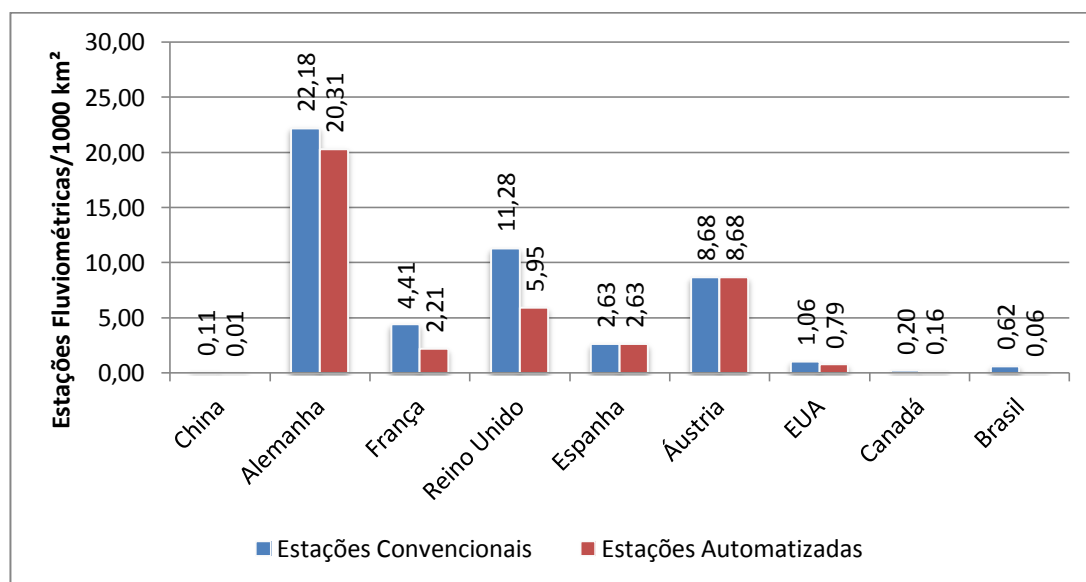


Figura 2.9 – Análise comparativa entre as densidades das redes fluviométricas de diferentes países.

Analisando-se a Figura 2.9 observa-se que as redes de monitoramento fluviométrico da Alemanha, do Reino Unido e da Áustria destacam-se por serem as mais densas dentre os países em análise. Apesar dos EUA possuírem a maior rede de monitoramento fluviométrica, grandes áreas do país

não possuem informações, conforme analisado anteriormente. O mesmo fato ocorre em países com dimensões continentais como a China, o Canadá e o Brasil. Nestes casos as diferentes condições físicas e climáticas dos países implicam numa grande heterogeneidade na distribuição espacial do monitoramento fluviométrico.

Tomando-se a automatização da rede fluviométrica como um bom indicativo do grau de desenvolvimento do sistema de monitoramento de cada país, pode-se concluir que a Alemanha, seguida da Áustria e do Reino Unido são os países com a rede de monitoramento tecnologicamente mais avançada. Neste aspecto, o Brasil necessita melhorar sensivelmente seu monitoramento fluviométrico, tanto em homogeneidade de distribuição de sua rede quanto em avanço tecnológico de suas estações.

Devido à grande necessidade de se atender aos variados usos em todo o seu território, o planejamento das redes de monitoramento dos recursos hídricos vem sendo feito em nível mundial, visando fornecer dados mais confiáveis para viabilização de projetos sustentáveis e de gerenciamento em tempo real.

O Brasil tem avançado muito em termos de gestão de recursos hídricos, mas existe um longo caminho a percorrer até que o padrão nacional, principalmente no que tange ao monitoramento fluviométrico, atinja a qualidade apresentada em países como a Alemanha, Reino Unido, Áustria, França, Espanha e Estados Unidos.

2.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da análise das principais metodologias de avaliação e dimensionamento de redes hidrométricas e do estado da arte das redes hidrométricas de monitoramento quantitativo, nacional e internacional, pode-se inferir que:

- as metodologias de avaliação e dimensionamento de redes apresentadas são majoritariamente empíricas e subjetivas;
- a maioria as redes de monitoramento mundiais foram inicialmente concebidas para atender fins específicos de planejamento, tais como: proteção contra desastres naturais, geração de energia elétrica, navegação, irrigação, qualidade dos corpos d'água, entre outros;
- a Alemanha, dentre os países analisados, possui a rede de monitoramento fluviométrico mais densa e tecnologicamente mais desenvolvida, seguida da Áustria e do Reino Unido;
- o Brasil necessita melhorar sensivelmente seu monitoramento fluviométrico, tanto em homogeneidade de distribuição espacial quanto em avanço tecnológico de sua rede de monitoramento hidrométrico.

2.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBOTT, M. B.; BATRURST, J. C.; CUNGE, J. A.; O'CONNELL, P. E.; RASMUSSEN, J. *An Introduction to the European Hydrological System – Systeme Hydrologique Europeen, "SHE": History and philosophy of a physically-based, distributed modellin system*. Journal of Hydrology, v. 87, p. 45-49, 1986.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. *Evolução da rede hidrometeorológica nacional*. Brasília, 2007.

_____. Brasília. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br/>>. Acesso em agosto de 2011.

_____. *Construção da Base Hidrográfica Ottocodificada ao Milionésimo*. In: XVII SBRH, São Paulo. ANAIS CD-ROM. 2007.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. Atlas de Energia Elétrica do Brasil. Brasília, 153 p. 2002.

BELZ, J. e ENGEL, H. *Optimization of surface water observation networks*. In: *International workshop on hydrological networks for integrated and sustainable water resources management*, Koblenz, Alemanha. Anais. p. 115-122. 2003.

BLACKHURST, M.; HENDRICKSON, C.; VIDAL, J. S. *Direct and Indirect Water Withdrawals for U.S. Industrial Sectors*. *Environment Science Technology*, v. 44, p. 2126-2130, 2010.

CAI, J. *Monitoramento e Serviço de Informação de Água na China*. Escritório de Hidrologia. Ministério dos Recursos Hídricos. China, 2006.

CEH – CENTER FOR ECOLOGY AND HYDROLOGY. *Natural Environment Research Council*. Disponível em: < <http://www.ceh.ac.uk/> >. Acesso em março de 2010.

CHAUDHARY, P.; BAWA, K. S. *Local perceptions of climate change validated by scientific evidence in the Himalayas*. *Journal of Biology Letters*, v. 23, p. 767-770, 2011.

COULIBALY, P. *Spatial and temporal variability of Canadian seasonal precipitation (1900-2000)*. *Adv. Water Resour.*, n. 29, p. 1846-1865, 2006.

COULIBALY, P.; BURN D. H. *Spatial and Temporal variability of Canadian seasonal streamflows*. *J. Clim*, n.18, p. 191-210, 2005.

DELHOMME, J. P. *Applications de la théorie des variables regionalisées dans les sciences de l'eau*. 1976. 130 f. Tese Doutorado - Université Pierre et Marie Curie, Paris. 1976.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA - DNAEE. Rede hidrológica nacional – aspectos relevantes. Brasília: 1995. 6p.

EAUFRANCE – *Portal de entrada do Sistema de Informação hidrológico da França (SIE)*. Disponível em: < <http://www.eaufrance.fr/> >. Acesso em dezembro de 2010.

FEDERAL ENVIRONMENT AGENCY - FEA. Disponível em: <<http://www.lebensministerium.at/>>. Acesso em março de 2010.

FLOOD AWARENESS & PREVENTION POLICY IN BORDER AREAS – FLAPP. *Results of a European Network on Flood Management*. Holanda, 2006.

FUJITA, K.; NUIMURA, T. *Spatially heterogeneous wastage of Himalayan glaciers*. PNAS, USA, v. 108, p. 14011-14014, 2011.

GLEICK, P. H.; COOLEY, H.; MORIKAWA, M.; MORRISON, J.; PALANIAPPAN, M. *The World's Water 2008-2009: The Biennial Report on Freshwater Resources*, 2008. ISBN: 9781597265058.

GONTIJO JÚNIOR, W. C. *Avaliação e Redimensionamento de Redes para o Monitoramento Fluviométrico Utilizando o Método Sharp e o Conceito de Entropia*. 2007. Dissertação de Mestrado, UnB. Brasília, 2007.

GUTTORP P., SAMPSON P. D., NEWMAN K. *Nonparametric estimation of spatial covariance with applications to monitoring network evaluation*. Statistics in the Environmental, Earth Sciences, London, p. 39–51, 1992.

IMMERZEEL, W. W.; Van BEEK, L. P. H.; BEIRKENS, M. F. P. *Climate Change Will Affect the Asian Water Towers*. Science, v. 328, p. 1382-1385, 2010.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. *An Introduction to Applied Geostatistics*. New York, Oxford University Press, 560 p., 1989.

JOURNEL, A. G.; HUIJBREGTS, C. J. *Mining geostatistics*. London: Academic Press, 600p., 1978.

KASER, G.; GROBHAUSER, M.; MARZEION, B. *Contribution potential of glaciers to water availability in different climate regimes*. PNAS, USA, v. 107, p. 20223-20227, 2010.

KRAEMER, A., JÄGER, F., "Country reports: Germany". Water Resources Management in Europe, Rotterdam, p. 183-325, 1998.

KRIGE, D. G. *A statistical approach to some basic mine evaluation problems on the Witwatersrand*. Johannesburg Chemistry Metallurgy Mining Society South African, 52, p. 119-139, 1951.

LANDIN, P. M. B. *Análise geoestatística de dados geológicos*. 2. ed. São Paulo: UNESP, 253 p., 2003.

LEES, M. L. *Inland Water Surveying in the United Kingdom - A Short History*. CEH. United Kingdom, 1985.

MATHERON, G. *The theory of regionalized variables and its applications*. Paris, Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleu, 211 p., 1971

MAWDSLEY, J. R.; O'MALLEY, R.; OJIMA, D. S. *A Review of Climate-Change Adaptation Strategies for Wildlife Management and Biodiversity Conservation*. *Conservation Biology*, v. 23, ed.5, p. 1080-1089, 2009.

MISHRA, A. K.; COULIBALY, P. *Developments in hydrometric network design: a review*. *Reviews of Geophysics*, 47, 2009.

MISHRA, A.; COULIBALY, P. *Hydrometric network evaluation for Canadian watersheds*. *Journal of Hydrology*, n. 380, p. 420-437, 2009.

MISHRA, A.K., OZGER, M., SINGH, V.P. *An entropy based investigation into the variability of precipitation*. *Journal of Hydrology*, n.370, p. 139–154, 2009.

ORGANIZAÇÃO METEOROLÓGICA MUNDIAL - OMM. *Guia para práticas hidrológicas: Aquisição e processamento de dados, análises, estimativas e outras aplicações*. Ed. 15, nº 168, 735 p. 1994.

_____. Genebra, Suíça. Disponível em <http://www.wmo.int/pages/index_en.html>. Acesso em março de 2010.

PERRY, C. A. *Significant Floods in the United States During the 20th Century*. USGS Measures a Century of Floods, 2000.

PFRAFSTETTER, O. *Classificação de bacias hidrográficas: metodologia de codificação*. Rio de Janeiro, RJ: Departamento Nacional de Obras de Saneamento (DNOS), 1989. 19 p. Trabalho não publicado.

PITHAN, F. *Asian Water Towers: More or Monsoons*. *Science*, v. 29, p. 584-585, 2010.

RAMOS, M. *Gestão de Recursos Hídricos e cobrança pelo uso da água*. Fundação Getúlio Vargas. Escola Brasileira de Administração Pública. 61 p. 2007.

SISTEMA INTEGRADO DE INFORMACIÓN DEL AGUA – SAI. Disponível em: <http://www.mma.es/portal/secciones/aguas_continent_zonas_asoc/sia/>. Acesso em março de 2010.

STANISLAWSKI, L. V. *Feature pruning by upstream drainage area to support automated generalization of the United States National Hydrography Dataset*. Computers, Environment and Urban Systems Journal. v. 33, p. 325-333, 2009.

UBA – Umwelt Bundes Amt. *Water Framework Directive: The way towards healthy waters*. Alemanha, 2010.

UNITED STATES OF GEOLOGICAL SURVEY - USGS. Disponível em: <<http://www.usgs.gov/>>. Acesso em março de 2010.

WATER SURVEY OF CANADA - WSC. Disponível em: <http://www.wsc.ec.gc.ca/index_e.cfm>. Acesso em março de 2010.

YAMAMOTO, J. K.; CONDE, R. P.; YOSHIKAWA, P. S.; HUBNER, A. N. *Geoestatística on line*. Disponível em: <<http://www.igc.usp.br/geoestatistica/>>. Acesso em outubro de 2011.

ZHULIDOV, A. V.; KHLOBYSTOV, V. V.; ROBERTS, R. D. e PAVLOV, D. F. *Critical analysis of water quality monitoring in the Russian Federation and former Soviet Union*. Canadian Journal Fisheries and Aquatic Science, Canada, v. 57, p. 1932–1939, 2000.

ARTIGO I

Análises estatísticas multivariadas de Componentes Principais e de Agrupamento como suporte aos estudos de regionalização de vazões

ANÁLISES ESTATÍSTICAS MULTIVARIADAS DE COMPONENTES PRINCIPAIS E DE AGRUPAMENTO COMO SUPORTE AOS ESTUDOS DE REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES

Resumo - Este trabalho teve por objetivo desenvolver uma metodologia baseada em análises estatísticas multivariadas de componentes principais e de agrupamento com intuito de identificar as variáveis explicativas mais representativas em estudos de regionalização hidrológica e otimizar a obtenção das regiões hidrológicamente homogêneas para a bacia hidrográfica do rio Doce. Foram utilizadas 15 variáveis, individualizadas para as 61 estações fluviométricas adotadas, sendo oito variáveis dependentes ($Q_{7,10}$, Q_{90} , Q_{95} , Q_{mld} , Q_{max10} , Q_{max20} , Q_{max50} , Q_{max100}) e sete independentes (P_a , P_{ss} , P_{sc} , A_d , L_p , L_t e S_L) referentes às características climáticas e morfométricas da bacia. A partir da análise de componentes principais identificou-se a variável independente S_L (declividade média da bacia) como a menos representativa, sendo excluída do estudo. Os dois primeiros componentes principais, Y_1 e Y_2 , foram responsáveis por 77,92% da variação total dos dados, representando fisicamente as características morfométricas e as precipitações médias, respectivamente. As melhores divisões de regiões hidrológicamente homogêneas, para as oito vazões características estudadas, foram obtidas utilizando-se conjuntamente a matriz de similaridade de Mahalanobis e o método de agrupamento do vizinho mais distante. A análise de agrupamento possibilitou a identificação de quatro regiões hidrológicamente homogêneas na bacia hidrográfica do rio Doce. A metodologia proposta para identificação do número de regiões homogêneas apresentou bons resultados, possibilitando a eliminação da subjetividade nesta fase inicial dos estudos de regionalização de vazões.

Abstract – This study aims to develop a methodology using principal components analysis and cluster analysis to identify the most representative variables in hydrological regionalization studies and to optimize the identification of the hydrologically homogeneous regions for the rio Doce basin. Fifteen variables were used, individualized to 61 gauging stations, eight dependent variables ($Q_{7,10}$, Q_{90} , Q_{95} , Q_{mld} , Q_{max10} , Q_{max20} , Q_{max50} , Q_{max100}) and seven independent variables (P_a , P_{ss} , P_{sc} , A_d , L_p , L_t and S_L), concerning climatic and morphometric characteristics of the basin. The results of the principal component analysis pointed out that the variable S_L (average slope of the basin) was the least representative for the study. The first two principal components, Y_1 and Y_2 , were responsible for 77.92% of the total variation of the data, physically representing the morphometric characteristics and average rainfall, respectively. The best divisions of hydrologically homogeneous regions, for the eight studied flow characteristics, were obtained using the similarity matrix of Mahalanobis and the complete linkage clustering method. The Cluster analysis enabled the identification of four hydrologically homogeneous regions in the watershed of the rio Doce. The proposed methodology for identifying the number of homogeneous regions showed good results, allowing the elimination of subjectivity in this early phase in the studies of streamflow regionalization.

Palavras chave – Componentes Principais, Análise de Agrupamento e Regionalização de Vazões.

3. INTRODUÇÃO

O comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica depende de suas características geomorfológicas, dos seus aspectos climáticos e do tipo da cobertura vegetal. Desse modo, as diversas variáveis físicas e bióticas de uma bacia possuem papel importante nos processos do ciclo hidrológico. Bacias hidrográficas com grandes áreas de drenagem podem ter comportamentos hidrológicos diferentes em trechos distintos e, por isso, delimitar a homogeneidade hidrológica de uma determinada região é um dos primeiros objetivos a serem alcançados para um correto gerenciamento dos recursos hídricos.

De forma geral, entende-se por regionalização hidrológica qualquer processo de transferência de informações de uma região de comportamento hidrológico conhecido para outros locais, geralmente sem observações. Esta transferência pode se reportar diretamente às séries de dados ou, até mesmo, a determinados parâmetros estatísticos relevantes, tais como: média, variância, eventos máximos e mínimos ou, ainda, equações e parâmetros relacionados com estas estatísticas.

Segundo Kaviski (1992), a importância da realização de estudos e pesquisas de técnicas de análise regional abrange dois grandes campos de aplicação: um de efeito preventivo e outro de efeito curativo. O efeito preventivo diz respeito à concepção e avaliação de desempenho de projetos de redes de monitoramento. Já o efeito curativo trata da orientação na escolha dos métodos de regionalização a serem utilizados em planejamento e gestão de recursos hídricos.

Mishra & Coulibaly (2009) retratam a importância de se possuir informações confiáveis no âmbito de uma bacia hidrográfica devido aos seus inúmeros usos práticos: hidrologia, agronomia, climatologia, hidrogeologia, gestão e planejamento de recursos hídricos, tomada de decisão para implantação de políticas públicas e instalação de plantas industriais.

Segundo Moreira (2010), os métodos comumente utilizados em estudos de regionalização hidrológica (tradicional, proporcionalidade de vazões, conservação de massa e deflúvios superficiais) empregam certa subjetividade na obtenção das regiões homogêneas.

Neste contexto, as análises estatísticas multivariadas podem auxiliar expressivamente na realização dos estudos de regionalização hidrológica, reduzindo o tempo de processamento da base de dados e aumentando a confiabilidade dos resultados obtidos. Em nível internacional pode-se comprovar esta afirmação pelo desenvolvimento de alguns trabalhos visando à regionalização hidrológica (ASSANI et al., 2011; KAHYA et al., 2007; MWALE et al., 2010; SAMUEL et al., 2010; ENGELAND & HISDAL, 2009; CASTIGLIONI et al., 2009).

A análise de componentes principais (PCA) tem como objetivos examinar as correlações entre as variáveis estudadas, resumir um grande conjunto de variáveis em outro menor e de sentido equivalente, avaliar a importância de cada variável e promover a eliminação daquelas que contribuem pouco, em termos de variação, no grupo de indivíduos avaliados (WILKS, 2006). Nos últimos anos, muitas aplicações desta técnica têm sido estudadas em diversas áreas do conhecimento, como por exemplo: genética (PRICE et al., 2006; HAIDER et al., 2008), socioeconomia (VYAS & KUMARANAYAKE, 2006), química (BELLOMARINO et al., 2010), meio ambiente (REID & SPENCER, 2009), entre outras.

A análise estatística multivariada de agrupamento (Cluster) consiste numa ferramenta exploratória dos dados com intuito de classificar grupos homogêneos (WILKS, 2006), a qual tem sido utilizada em inúmeras áreas do conhecimento como, por exemplo, medicina (MEZER et al., 2008), socioeconomia (CABRERA et al., 2008; TOLA et al., 2007), geomorfologia (MELCHIORRE et al., 2008) e engenharia ambiental (PIRES et al., 2007; HATVANI et al., 2011). Em hidrologia, a análise de agrupamento é uma técnica frequentemente utilizada para definir classes ou para agrupar estações em regiões climáticas homogêneas.

Em função do exposto, este trabalho teve por objetivo desenvolver uma metodologia baseada em análises estatísticas multivariadas de componentes principais e de agrupamento com intuito de identificar variáveis mais representativas em estudos de regionalização hidrológica e otimizar a obtenção das regiões hidrologicamente homogêneas para a bacia hidrográfica do rio Doce.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. REGIÃO DE ESTUDO

A bacia do rio Doce situa-se na região Sudeste do Brasil, entre os paralelos 17°45' e 21°15' S e os meridianos 39°30' e 43°45' W, com altitude média de 578 metros. Possui área de drenagem de, aproximadamente, 83.400 km², dos quais 86% pertencem ao estado de Minas Gerais e 14% ao estado do Espírito Santo. A população na bacia é de aproximadamente 3,1 milhões de habitantes, sendo que 70% encontra-se na zona urbana. As principais atividades econômicas desenvolvidas são: mineração, siderurgia, silvicultura e agropecuária (PIRH, 2010).

Na Figura 1 é apresentada a localização geográfica da área de estudo e os 61 postos de monitoramento fluviométrico selecionados.

4.2. BASE DE DADOS E APLICATIVOS

O trabalho foi desenvolvido utilizando-se dados de 61 estações fluviométricas pertencentes à rede hidrometeorológica da Agência Nacional de Águas – ANA. As séries empregadas foram constituídas por dados diários de vazão correspondentes ao período base de 1976 a 2005. Ressalta-se que foi limitada a utilização de dados até o ano de 2005 pelo fato de, no início do trabalho, este constituir o ano mais recente com dados consistidos disponibilizados pela ANA.

Utilizou-se a base vetorial de elevação (curvas de nível e pontos cotados) e de hidrografia da região hidrográfica obtida junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, na escala 1:250.000 (IBGE, 2010). A base vetorial ortocodificada da bacia do rio Doce foi obtida junto ao Instituto Mineiro de Gestão das Águas (MINAS GERAIS, 2010).

As análises estatísticas multivariadas foram realizadas com o aplicativo Statistica® 7.0, desenvolvido pela “StatSoft”.

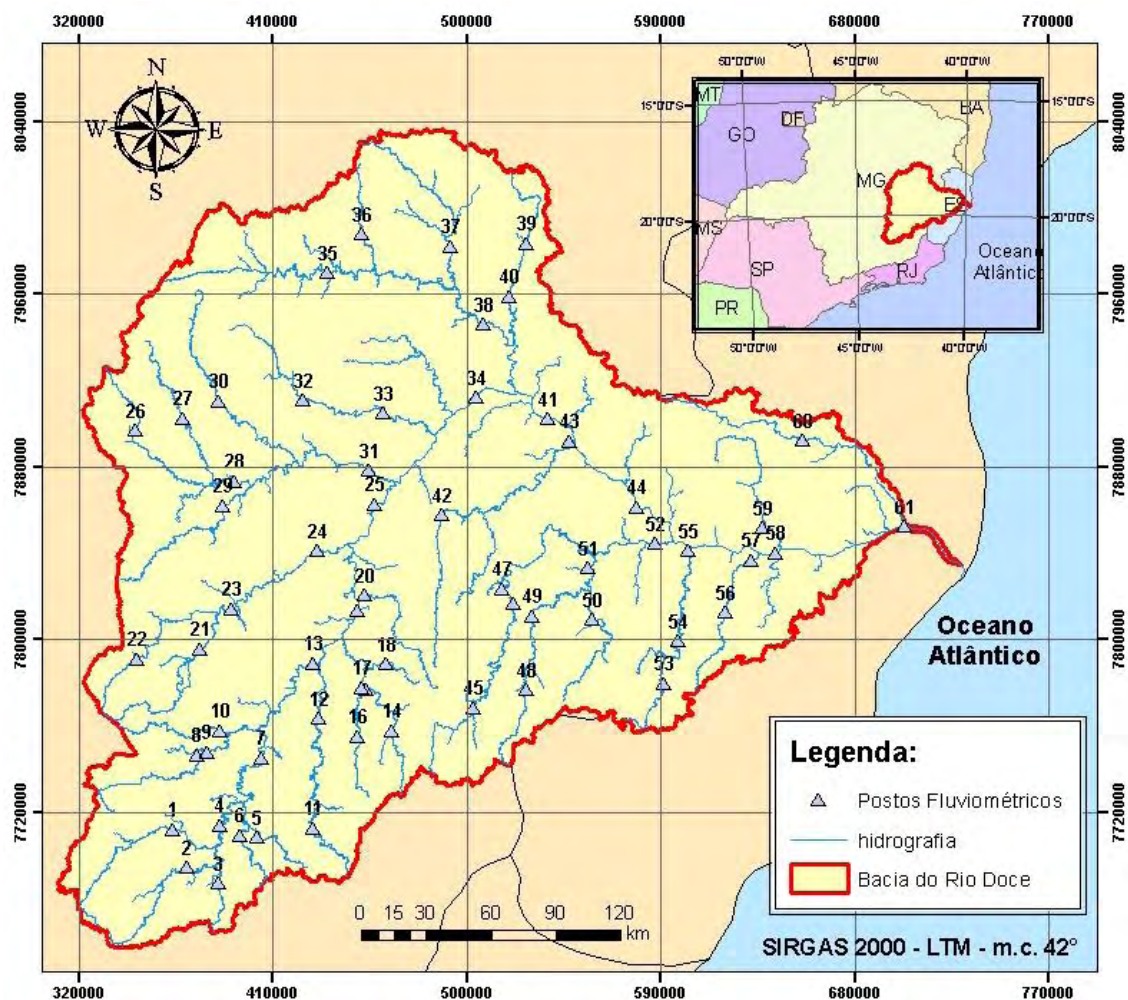


Figura 1 – Localização geográfica da Bacia Hidrográfica do rio Doce e dos postos de monitoramento fluviométrico selecionados.

Para a geração do modelo digital de elevação hidrograficamente condicionado (MDEHC), obtenção automática de variáveis morfométricas, precipitações médias e espacialização dos resultados foi utilizado o Sistema de Informações Geográficas, ArcGIS® 10.0, desenvolvido pelo “Environmental Systems Research Institute – ESRI”, como ferramenta de geoprocessamento dos vetores e representação espacial dos dados.

As equações de regressão múltipla foram obtidas utilizando-se o aplicativo SisCORV 1.0.3 (SOUSA et al. 2008) desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos – GPRH, vinculado ao Departamento de Engenharia Agrícola – DEA da Universidade Federal de Viçosa – UFV.

No presente estudo foram consideradas 15 variáveis, sendo oito variáveis dependentes a serem regionalizadas (vazão mínima média de sete dias consecutivos e com período de retorno de dez anos - $Q_{7,10}$; vazão mínima associada às permanências no tempo de 90% - Q_{90} e 95% - Q_{95} ; vazão média de longa duração - Q_{mld} ; vazão máxima com período de retorno de 10 anos - Q_{max10} , 20 anos - Q_{max20} , 50 anos - Q_{max50} e 100 anos - Q_{max100} , em $m^3 s^{-1}$) e sete variáveis independentes (precipitação total anual - P_a , precipitação total dos semestres seco - P_{ss} e chuvoso - P_{sc} , em mm; área de drenagem da bacia - A_d , em km^2 ; comprimento do rio principal - L_p , em km; comprimento total dos cursos d'água da bacia - L_t , em km e Declividade média da bacia - S_L , em %). Os valores das 15 variáveis correspondentes às 61 estações fluviométricas utilizadas no estudo são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Variáveis dependentes e independentes utilizadas no estudo para cada uma das 61 estações de monitoramento fluviométrico

CÓDIGO	ID	Q_{7,10} (m ³ s ⁻¹)	Q₉₀ (m ³ s ⁻¹)	Q₉₅ (m ³ s ⁻¹)	Q_{mid} (m ³ s ⁻¹)	Q_{max10} (m ³ s ⁻¹)	Q_{max20} (m ³ s ⁻¹)	Q_{max50} (m ³ s ⁻¹)	Q_{max100} (m ³ s ⁻¹)	P_a (mm)	P_{ss} (mm)	P_{sc} (mm)	Ad (km ²)	Lp (km)	Lt (km)	S_L (%)
56028000	1	6,48	9,54	8,24	24,43	386,65	493,35	603,33	685,74	1.549,8	237,2	1.323,6	1.395,7	103,1	919,4	6,01
56055000	2	5,70	8,54	7,46	19,38	152,44	163,92	176,27	184,17	1.536,3	235,9	1.307,6	1.103,5	86,0	914,8	5,07
56065000	3	1,84	2,57	2,22	5,47	30,52	33,36	36,86	39,40	1.360,5	210,6	1.154,1	292,0	32,8	253,0	3,01
56075000	4	21,04	32,37	28,50	74,17	603,36	796,89	961,30	1.084,51	1.484,3	228,9	1.263,5	4.263,1	156,2	3.218,2	5,81
56085000	5	1,29	1,80	1,62	3,76	77,06	86,18	96,55	103,53	1.213,1	208,6	1.010,9	335,5	44,1	204,7	3,67
56090000	6	1,72	2,16	2,01	4,09	26,40	28,40	30,65	32,16	1.293,1	215,7	1.083,0	312,0	45,6	192,7	3,82
56110005	7	29,32	42,05	37,30	100,44	960,92	1.249,21	1.514,85	1.713,91	1.431,2	225,1	1.213,7	6.198,6	258,3	4.419,1	5,38
56240000	8	4,88	8,54	7,54	19,11	285,75	366,10	445,29	504,63	1.510,1	223,6	1.294,7	970,6	95,3	644,6	11,21
56335001	9	11,46	15,60	14,17	31,04	396,10	516,75	629,13	713,34	1.519,8	222,9	1.303,7	1.330,9	108,4	846,8	10,86
56337000	10	5,17	6,32	5,74	13,21	335,58	452,02	563,37	646,81	1.686,6	230,5	1.455,1	546,8	80,7	376,8	10,17
56385000	11	2,33	3,50	3,10	8,22	60,16	66,06	75,64	82,01	1.212,3	208,5	1.010,2	526,5	56,4	360,6	11,36
56415000	12	6,09	10,54	9,23	26,33	265,24	367,87	448,08	508,19	1.267,6	205,2	1.072,3	2.029,1	174,3	1.236,4	9,59
56425000	13	50,58	76,80	67,80	164,22	1.077,87	1.273,37	1.679,49	1.886,02	1.442,6	221,6	1.228,6	10.035,0	352,3	6.936,9	7,14
56460000	14	1,69	2,94	2,46	9,72	93,72	103,68	115,16	122,97	1.258,3	192,1	1.079,6	615,0	43,9	279,5	13,25
56484998	15	3,03	6,16	4,69	19,93	294,34	395,05	486,32	554,71	1.255,4	192,0	1.076,1	1.349,6	88,0	741,1	11,21
56500000	16	0,87	1,46	1,25	4,41	104,42	146,83	183,62	211,20	1.257,6	180,0	1.090,5	257,2	39,2	107,5	15,10
56510000	17	4,52	8,20	6,58	23,56	304,89	436,05	537,92	614,25	1.255,4	188,9	1.079,1	1.871,9	90,5	1.038,6	11,57
56520000	18	0,66	0,91	0,77	2,03	19,55	21,31	24,18	26,05	1.246,4	190,2	1.065,2	165,6	25,3	107,2	8,17
56539000	19	80,72	105,00	97,00	221,89	1.658,84	2.082,02	2.487,02	2.790,51	1.376,5	211,1	1.175,9	15.848,0	390,1	10.451,4	7,79
56570000	20	1,92	3,06	2,65	9,76	138,88	155,00	173,25	185,49	1.213,0	185,9	1.035,0	819,5	86,2	455,1	7,97
56610000	21	4,63	9,10	7,77	26,59	349,41	402,78	514,76	575,70	1.610,9	221,0	1.388,1	1.154,4	94,5	908,7	7,88
56640000	22	2,69	4,24	3,70	12,78	236,77	267,09	302,78	327,53	2.013,7	245,6	1.759,1	423,8	45,8	375,0	18,36
56659998	23	16,83	21,60	19,60	55,56	958,46	1.087,36	1.240,45	1.347,48	1.618,6	217,1	1.401,5	3.055,1	133,7	2.350,4	10,37

Continua...

Tabela 1 – Continuação...

CÓDIGO	ID	Q_{7,10} (m ³ s ⁻¹)	Q₉₀ (m ³ s ⁻¹)	Q₉₅ (m ³ s ⁻¹)	Q_{mid} (m ³ s ⁻¹)	Q_{max10} (m ³ s ⁻¹)	Q_{max20} (m ³ s ⁻¹)	Q_{max50} (m ³ s ⁻¹)	Q_{max100} (m ³ s ⁻¹)	P_a (mm)	P_{ss} (mm)	P_{sc} (mm)	A_d (km ²)	L_p (km)	L_t (km)	S_L (%)
56696000	24	25,96	35,04	31,22	87,29	992,32	1.140,96	1.322,34	1.452,18	1.486,4	208,0	1.293,0	5.280,4	204,6	3.593,2	11,49
56719998	25	104,29	145,00	131,80	320,59	2.957,58	3.559,78	4.891,11	5.537,82	1.376,8	206,6	1.187,0	24.135,6	462,6	15.763,0	8,56
56750000	26	1,05	1,98	1,65	7,02	101,46	108,37	115,65	120,22	1.451,0	195,9	1.259,7	283,4	42,3	209,6	10,39
56765000	27	2,05	3,86	3,23	16,47	282,62	313,55	349,55	374,27	1.358,9	183,4	1.185,0	974,5	95,8	905,2	7,70
56775000	28	10,72	21,50	18,88	83,66	1.125,08	1.339,57	1.744,57	1.962,70	1.455,5	199,6	1.261,1	4.091,0	169,3	2.927,0	10,15
56787000	29	4,50	7,93	6,64	24,46	436,15	634,92	791,60	909,00	1.370,6	194,2	1.179,4	1.277,2	104,0	888,0	10,69
56800000	30	3,54	5,91	5,15	19,01	199,09	224,45	263,56	291,32	1.288,0	172,7	1.123,7	1.519,2	89,8	1.260,2	8,51
56825000	31	36,41	66,41	59,00	167,79	2.264,00	2.595,83	3.001,86	3.861,28	1.355,5	188,3	1.181,0	10.209,3	218,6	7.218,1	11,74
56845000	32	2,46	4,04	3,57	12,33	96,96	113,20	134,84	162,83	1.258,0	166,8	1.094,7	1.064,4	70,5	884,1	5,68
56846000	33	6,93	10,70	9,33	26,77	150,25	169,14	191,81	207,79	1.265,2	176,4	1.114,2	1.961,2	132,0	1.582,6	11,34
56850000	34	178,04	244,00	220,00	562,86	4.054,09	4.836,28	6.280,30	7.051,36	1.347,5	197,3	1.167,8	40.502,3	524,5	27.813,0	9,45
56860000	35	6,71	10,57	9,33	28,83	250,58	281,20	318,02	344,04	1.177,0	145,6	1.038,7	2.578,2	141,7	2.380,5	8,13
56870000	36	1,19	2,05	1,61	6,36	110,87	164,29	205,31	236,05	1.147,7	158,8	991,3	608,7	47,3	554,1	5,88
56880000	37	1,37	3,52	2,82	18,13	195,82	219,52	247,47	266,88	1.137,8	185,2	953,1	2.684,5	111,3	2.037,2	9,53
56891900	38	15,64	25,40	22,00	82,99	708,74	812,46	1.055,65	1.183,68	1.183,4	170,2	1.013,2	9.894,4	297,1	8.301,7	8,52
56900000	39	0,25	0,81	0,40	4,83	51,35	53,80	56,08	57,35	996,3	189,6	778,9	756,6	52,5	480,4	7,94
56915500	40	0,63	1,26	1,00	8,17	100,54	112,96	128,04	149,93	1.004,0	189,5	787,3	1.387,4	82,8	859,5	6,86
56920000	41	217,23	307,48	275,76	706,21	4.647,14	5.407,60	6.234,47	7.198,06	1.289,7	189,9	1.111,8	55.049,3	590,4	39.201,7	8,97
56935000	42	1,93	2,87	2,36	9,62	186,63	220,25	303,48	344,41	1.171,9	178,7	999,2	766,4	84,1	381,7	8,08
56940002	43	5,83	9,11	7,66	31,50	578,81	781,72	969,62	1.110,43	1.078,5	162,9	924,0	3.192,8	214,5	2.013,7	10,23
56948005	44	177,75	250,30	225,00	639,54	5.192,84	6.107,76	7.331,22	8.281,46	1.247,4	184,2	1.074,2	61.956,6	652,2	43.081,5	9,07
56960005	45	0,85	2,60	1,36	14,23	216,32	252,35	297,07	396,74	1.278,5	186,3	1.090,7	1.026,8	59,0	663,8	15,86
56976000	46	8,45	13,00	11,33	40,79	655,09	810,53	1.011,73	1.162,50	1.255,9	184,7	1.067,5	2.272,0	160,6	1.516,9	14,63

Continua...

Tabela 1 – Continuação...

CÓDIGO	ID	Q_{7,10} (m ³ s ⁻¹)	Q₉₀ (m ³ s ⁻¹)	Q₉₅ (m ³ s ⁻¹)	Q_{mid} (m ³ s ⁻¹)	Q_{max10} (m ³ s ⁻¹)	Q_{max20} (m ³ s ⁻¹)	Q_{max50} (m ³ s ⁻¹)	Q_{max100} (m ³ s ⁻¹)	P_a (mm)	P_{ss} (mm)	P_{sc} (mm)	A_d (km ²)	L_p (km)	L_t (km)	S_L (%)
56978000	47	9,46	14,90	12,90	40,81	363,99	428,36	541,59	606,97	1.242,3	184,5	1.054,0	2.356,1	172,3	1.574,9	14,51
56983000	48	1,54	2,28	2,04	6,87	42,51	45,06	48,80	51,21	1.263,4	191,2	1.071,6	387,5	53,8	294,8	18,84
56988500	49	5,20	7,41	6,54	20,40	256,92	291,60	334,53	389,86	1.258,7	189,2	1.067,6	1.420,3	115,7	993,1	14,68
56989001	50	2,37	4,04	3,50	13,98	200,95	235,46	306,93	345,81	1.249,1	161,3	1.036,3	1.179,5	77,9	824,2	14,13
56989400	51	7,47	12,40	10,60	38,98	440,22	510,26	659,23	739,15	1.248,3	175,0	1.047,5	3.207,5	174,9	2.261,5	13,68
56990000	52	21,09	35,20	30,10	99,54	827,52	933,32	1.062,66	1.242,80	1.183,0	175,0	998,2	8.721,9	314,7	5.954,7	13,64
56990990	53	1,20	2,60	2,16	7,58	112,85	125,45	139,97	149,85	1.091,3	170,6	920,1	430,1	44,5	252,1	14,41
56991500	54	4,48	6,58	5,90	17,48	189,41	217,74	252,49	324,73	1.087,4	170,8	916,4	1.325,0	90,2	814,6	15,07
56992000	55	4,86	7,65	6,64	22,12	251,85	277,20	306,01	325,39	1.047,4	167,0	881,4	2.132,4	165,3	1.308,7	14,69
56993002	56	0,20	1,14	0,75	6,18	174,68	260,59	326,39	375,69	1.133,7	192,7	940,5	463,8	52,1	272,4	14,99
56993551	57	0,58	1,51	1,15	8,09	134,16	149,92	168,47	181,32	1.114,7	192,9	921,0	874,9	92,2	497,2	14,23
56994500	58	226,72	335,70	291,60	912,38	5.981,81	6.690,78	7.738,19	8.479,54	1.236,0	184,7	1.059,2	76.378,9	733,1	52.997,7	9,87
56995500	59	0,59	1,62	1,22	10,76	151,17	176,87	230,72	259,93	1.178,7	241,6	931,9	933,6	88,4	636,8	14,25
56997000	60	0,93	3,02	2,17	14,88	159,71	176,58	195,95	209,09	1.127,2	240,6	872,8	1.200,2	91,3	829,8	10,22
56998000	61	273,69	368,20	325,00	979,98	6.031,01	6.767,48	7.841,57	8.608,77	1.233,2	189,9	1.050,4	81.940,6	798,1	56.583,5	9,82

4.3. ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS

Com base na análise de componentes principais transformou-se o conjunto original das variáveis observadas ($Q_{7,10}$, Q_{90} , Q_{95} , Q_{mld} , Q_{max10} , Q_{max20} , Q_{max50} , Q_{max100} , P_a , P_{ss} , P_{sc} , A_d , L_p , L_t e S_L) em um novo conjunto de variáveis, denominados componentes principais, obedecendo às seguintes propriedades (CRUZ, 1990):

a) Considerando que Y_i é um componente principal da matriz de dados, ele será uma combinação linear entre as sete variáveis independentes consideradas:

$$Y_i = a_{i1}P_a + a_{i2}P_{ss} + a_{i3}P_{sc} + a_{i4}A_d + a_{i5}L_p + a_{i6}L_t + a_{i7}S_L \quad (1)$$

b) O somatório do quadrado dos coeficientes a_{ij} é igual a 1:

$$\sum_{j=1}^7 a_{ij}^2 = 1 \quad (2)$$

c) Cada componente principal possui seus próprios coeficientes:

$$Y'_i = a_{i1}'P_a + a_{i2}'P_{ss} + a_{i3}'P_{sc} + a_{i4}'A_d + a_{i5}'L_p + a_{i6}'L_t + a_{i7}'S_L \quad (3)$$

d) Os componentes não são correlacionados, ou seja, são independentes entre si:

$$Cov(Y_i, Y_i') = 0 \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^7 a_{ij}a'_{ij} = 0 \quad (5)$$

e) entre todos os componentes, Y_1 apresenta a maior variância, Y_2 a segunda maior e, assim, sucessivamente:

$$Var(Y_1) \geq Var(Y_2) \geq \dots \geq Var(Y_7) \quad (6)$$

f) o somatório das variâncias de cada componente principal (Y_i) é igual ao somatório das variâncias de cada variável (X_j):

$$\sum_{i=1}^7 Var(Y_i) = \sum_{j=1}^7 Var(X_j) \quad (7)$$

Sendo R uma matriz simétrica de correlação, de dimensão $p \times p$, da qual os autovalores (λ_i) e os autovetores (a_i) são extraídos, a solução foi obtida resolvendo-se o sistema:

$$(R - \lambda_i I)a_i = \phi \quad (8)$$

em que:

λ_i = são as raízes características (ou autovalores) da matriz R . Existem p autovalores correspondentes às variâncias de cada um dos p componentes principais;

I = é a matriz identidade de dimensão $p \times p$;

a_i = autovetor ou vetor característico ou uma matriz $p \times 1$, contendo os p coeficientes para cada autovalor λ_i correspondente ao componente principal Y_i .

Φ = é um vetor nulo, de dimensão $p \times 1$.

Um dos problemas mais comuns, encontrados na aplicação de modelos estatísticos multivariados, é que estes são dependentes das unidades e escalas em que as variáveis foram medidas (NATHAN & MCMAHON, 1990). Solucionou-se este problema padronizando-se os dados das variáveis por meio da equação:

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij} - \bar{X}}{\sigma(X_j)} \quad (9)$$

em que, Z_{ij} , $\sigma(X_j)$ e \bar{X} são, respectivamente, a variável padronizada, o desvio-padrão e a média da j -ésima variável original.

A importância de cada componente principal foi avaliada pela correlação existente com cada variável X_j , ou seja:

$$r_{X_j, Y_i} = a_{ij} \frac{\sqrt{Var(Y_i)}}{\sqrt{Var(X_j)}} = \sqrt{\lambda_i} \frac{a_{ij}}{\sqrt{Var(X_j)}} \quad (10)$$

4.3.1. Critérios de seleção

Utilizou-se como critérios para seleção dos componentes principais:

- a porcentagem acumulada da variância total dos dados originais maior ou igual a 75% (JOLLIFE, 2002); e
- os autovalores maiores ou iguais a média dos autovalores (RENCHER, 2002).

4.4. ANÁLISE DE AGRUPAMENTO

O processo de agrupamento baseou-se em duas etapas: estimativa da medida de similaridade de Mahalanobis entre as 61 estações fluviométricas a serem agrupadas e adoção de uma técnica de agrupamento (método do vizinho mais próximo, vizinho mais distante ou método de Ward) para formação de grupos.

4.4.1. Medida de similaridade de Mahalanobis

A distância Euclidiana entre duas estações fluviométricas i e z foi calculada segundo a equação:

$$d_{iz} = \sqrt{\sum_{j=1}^p (Z_{ij} - Z_{zj})^2} \quad (11)$$

em que, Z_{ij} e Z_{zj} são as observações das i -ésima e z -ésima estações fluviométricas ($i = 1, 2, \dots, n$ e $z = 1, 2, \dots, n$), com referência à j -ésima variável ou frequência absoluta em cada classe ($j = 1, 2, \dots, p$) estudada.

Quando se utiliza a distância Euclidiana para análise de agrupamento deve-se considerar todas as variáveis como não correlacionadas entre si, porém, esta suposição é frequentemente ignorada. Para evitar este problema, comum em estudos de regionalização hidrológica, construiu-se a matriz de similaridades com a distância de Mahalanobis. Na prática, a distância de Mahalanobis se resume na aplicação da distância Euclidiana à matriz padronizada de dados.

4.4.2. Métodos de agrupamento

No presente estudo foram utilizados os métodos de agrupamento do vizinho mais próximo, vizinho mais distante e o método de Ward.

4.4.2.1. Método do vizinho mais próximo

Este método consiste, inicialmente, de uma matriz de distância (dissimilaridade) entre estações fluviométricas (indivíduos). Foram identificados os dois indivíduos mais similares (menor distância entre eles), os quais foram reunidos em um grupo inicial. A seguir, foi calculada a distância daquele primeiro grupo em relação aos demais indivíduos.

A distância entre um grupo e um indivíduo foi fornecida pela expressão (MANLY, 1994):

$$d_{(ab)c} = \min\{d_{ac}; d_{bc}\} \quad (12)$$

ou seja, a distância entre o grupo constituído pelos indivíduos a e b e o indivíduo c foi fornecida pelo menor elemento do conjunto das distâncias dos pares de indivíduos ac e bc.

A partir da identificação das menores distâncias entre o grupo formado e os indivíduos vizinhos, construiu-se uma nova matriz de dissimilaridade, de dimensão menor que a inicial, e identificaram-se os indivíduos e/ou grupos mais similares, incorporando-os ao grupo inicial ou formando um segundo grupo, caso a menor distância da nova matriz de dissimilaridade tivesse sido visualizada entre dois outros indivíduos. Nas etapas seguintes trabalhou-se com matrizes de dissimilaridade com dimensões cada vez menores, finalizando-se o agrupamento de todos os indivíduos em um único grupo, formando um dendrograma ou árvore (LIBERATO, 1995).

4.4.2.2. Método do vizinho mais distante

O método de agrupamento do vizinho mais distante apresenta procedimento semelhante àquele do vizinho mais próximo, com uma diferença importante: a cada estágio a medida de distância foi dada por aquela que proporcionou a maior distância entre dois indivíduos e/ou grupos.

A distância entre um grupo e um indivíduo foi fornecida pela expressão (MANLY, 1994)

$$d_{(ab)c} = \max\{d_{ac}; d_{bc}\} \quad (13)$$

ou seja, a distância entre o grupo constituído pelos indivíduos \underline{a} e \underline{b} e o indivíduo \underline{c} foi fornecida pelo maior elemento do conjunto das distâncias dos pares de indivíduos \underline{ac} e \underline{bc} .

A construção das matrizes de dissimilaridades, de dimensões menores que a inicial, seguiu o mesmo procedimento descrito para o método do vizinho mais próximo. A única diferença foi a formação de grupos a partir das distâncias máximas de separação (vizinho mais distante) e não mais a partir das distâncias mínimas de separação (vizinho mais próximo).

4.4.2.3. Método de Ward

Neste método, para a formação inicial do grupo, consideraram-se aqueles indivíduos que proporcionaram a menor soma de quadrados dos desvios.

O agrupamento foi feito a partir da matriz das somas de quadrados dos desvios (dissimilaridade) entre os indivíduos (estações fluviométricas), isto é, a partir do quadrado da distância Euclidiana:

$$SQD_{iz} = \frac{1}{2} d_{iz}^2 \quad (14)$$

$$SQD_{iz} = \sum_{j=1}^n SQD_{j(iz)} \quad (15)$$

em que:

$SQD_{j(iz)}$ = a soma de quadrado dos desvios, para a j -ésima variável, considerando-se os postos i e z ;

d_{iz}^2 = quadrado da distância euclidiana entre as estações fluviométricas i e z ;

n = número de variáveis avaliadas.

A soma de quadrados dos desvios total é dada por:

$$SQDT = \frac{1}{g} \sum_i^g \sum_z^g d_{iz}^2 \quad (16)$$

em que:

g = número de estações fluviométricas agrupadas.

Na análise de agrupamento identificou-se na matriz S (somadas dos quadrados dos desvios) o par de acessos que proporcionou a menor soma de quadrados dos desvios (WARD JR, 1963). Com esses indivíduos agrupados uma nova matriz de dissimilaridade com dimensão inferior foi recalculada, considerando-se:

$$SQD_{ijk} = \frac{1}{k} d_{(ijk)}^2 \quad (17)$$

$$d_{(ijk)}^2 = d_{(ij)}^2 + d_{(ij)k}^2 = d_{(ij)}^2 + d_{(ik)}^2 + d_{(jk)}^2 \quad (18)$$

em que:

k – número de estações fluviométricas no grupo.

No procedimento realizou-se a análise de agrupamento seguindo-se os (g - 1) passos de agrupamento para que fosse formado o dendrograma.

4.4.3. Critério de seleção

A definição do número de regiões homogêneas das vazões características foi feita a partir do critério de inércia entre saltos, em que a primeira descontinuidade visível do gráfico é definida como o ponto de corte (MELO JÚNIOR et al., 2006; RENCHER, 2002; WILKS, 2006).

Nas Figuras 2 e 3 é apresentado um exemplo ilustrativo para o critério de definição de número de regiões hidrologicamente homogêneas a partir dos gráficos de distâncias de dissimilaridades versus etapas de agrupamentos e dendrograma para as variáveis analisadas.

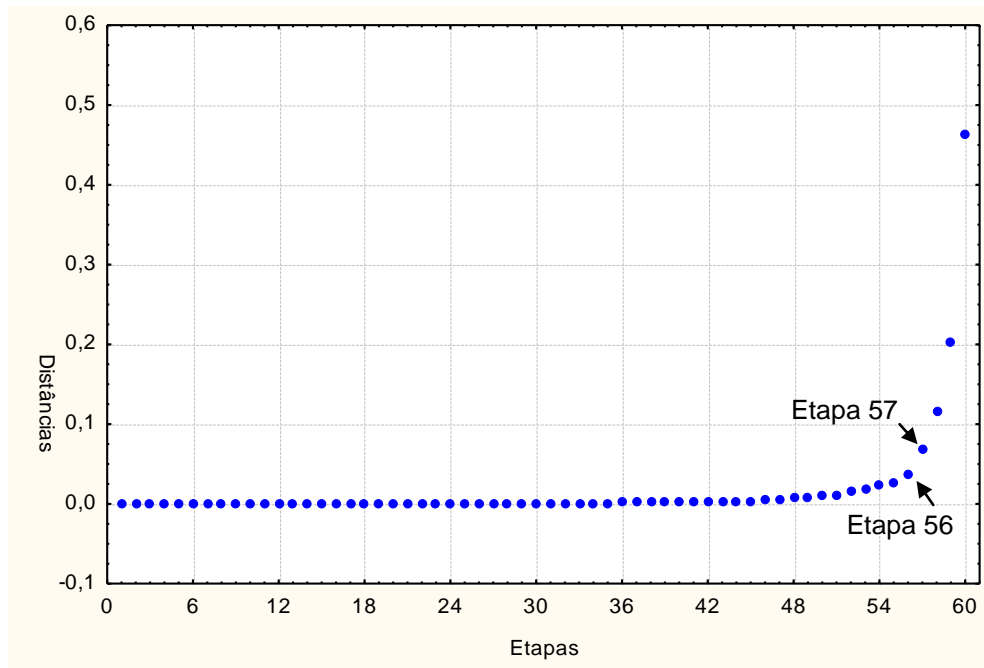


Figura 2 – Distância de dissimilaridade versus etapas de agrupamento.

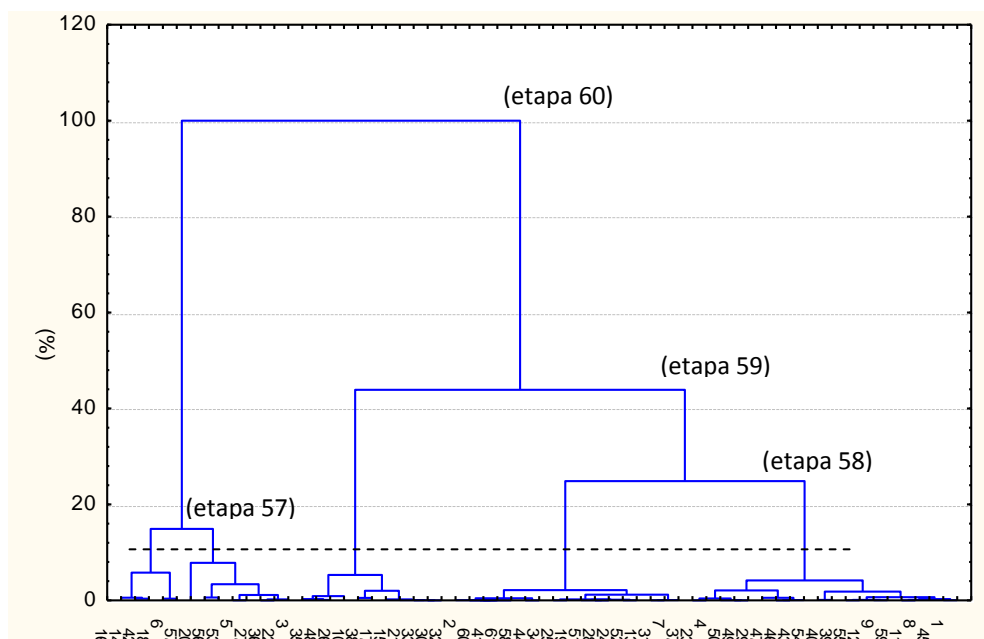


Figura 3 – Exemplo gráfico do critério de seleção no número de agrupamentos.

No exemplo gráfico foram selecionadas cinco regiões homogêneas referentes às linhas verticais do dendrograma cortadas pela linha tracejada entre a etapa 56 e a etapa 57 (Figura 3) onde houve a primeira descontinuidade visível (Figura 2).

4.5. ANÁLISE DE REGRESSÃO MÚLTIPLA

Os modelos de regressão utilizados para fins de obtenção das equações de regionalização para cada região hidrologicamente homogênea são descritos detalhadamente por Draper e Smith (1981):

Modelo Linear

$$Q = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (19)$$

Modelo Potencial

$$Q = \beta_0 \cdot X_1^{\beta_1} \cdot X_2^{\beta_2} \dots X_n^{\beta_n} \cdot \varepsilon \quad (20)$$

Modelo Exponencial

$$Q = \beta_0 \cdot e^{\beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon} \quad (21)$$

Modelo Logarítmico

$$\ln Q = \beta_0 + \beta_1 \ln X_1 + \beta_2 \ln X_2 + \dots + \beta_n \ln X_n + \varepsilon \quad (22)$$

Modelo Recíproco

$$Q = (\beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon)^{-1} \quad (23)$$

em que,

Q = representa a vazão característica de interesse em $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$;

β_i = coeficientes das n variáveis independentes;

X_i = variáveis independentes envolvidas no estudo (variáveis climáticas e morfométricas);

ε = erro de estimativa.

Para verificação do ajuste dos modelos de regressão adotados aos dados utilizou-se o coeficiente de determinação ajustado ($r^2_a \geq 0,70$), o erro-padrão da estimativa menor que 0,5 ($EP < 0,5$) e nível de significância de 5% pelo teste F.

Os modelos resultantes da aplicação das regressões múltiplas consideradas às regiões hidrologicamente homogêneas fornecidas pela análise de agrupamento foram selecionados observando-se:

- equação representativa do evento estudado;

- menor número de variáveis independentes conforme significância relativa fornecida pela análise de componentes principais;
- maiores valores do coeficiente de determinação ajustado;
- menores valores de erro-padrão fatorial;
- resultados significativos pelo teste F;
- continuidade das vazões; e
- facilidade de espacialização geográfica das equações obtidas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. ANÁLISE DOS COMPONENTES PRINCIPAIS

Com base nas sete variáveis independentes utilizadas (P_a , P_{ss} , P_{sc} , A_d , L_p , L_t e S_L) para cada uma das 61 estações fluviométricas adotadas, procedeu-se à análise de componentes principais. A variância total existente no conjunto de dados multivariados analisados é igual ao número de variáveis analisadas, visto que os dados foram padronizados com média e variância igual a 0 e 1, respectivamente.

Na Tabela 2 é apresentada a matriz de correlação entre as variáveis independentes padronizadas. Para avaliar a importância de cada variável e promover a eliminação daquelas que contribuem pouco, em termos de variação, no grupo de indivíduos avaliados na análise de regionalização de vazões, foram encontrados os componentes principais para as variáveis estudadas (Tabela 3).

Tabela 2 – Matriz de correlação R entre as variáveis independentes consideradas

Variáveis	P_a	P_{ss}	P_{sc}	A_d	L_p	L_t	S_L
P_a	1,00	0,65	0,99	-0,04	-0,02	-0,04	-0,06
P_{ss}		1,00	0,57	-0,08	-0,07	-0,08	-0,18
P_{sc}			1,00	-0,02	0,01	-0,02	-0,06
A_d				1,00	0,94	1,00	-0,10
L_p					1,00	0,94	-0,11
L_t						1,00	-0,10
S_L							1,00

Legenda: P_a - precipitação média total anual; P_{ss} - precipitação média total semestre seco; P_{sc} - precipitação média total do semestre chuvoso; A_d - área de drenagem da bacia; L_p - comprimento do rio principal; L_t - comprimento total dos cursos d'água da bacia e S_L - Declividade média da bacia.

Tabela 3 – Componentes principais das variáveis em estudo

CP's	Variância autovalor	% Var.	% acum.	Coeficientes das variáveis padronizadas						
				Z ₁ (P _a)	Z ₂ (P _{ss})	Z ₃ (P _{sc})	Z ₄ (A _d)	Z ₅ (L _p)	Z ₆ (L _t)	Z ₇ (S _L)
Y ₁	2,9628	42,33%	42,33%	0,1216	0,1310	0,1035	-0,5679	-0,5544	-0,5679	0,0700
Y ₂	2,4911	35,59%	77,92%	0,6025	0,4858	0,5889	0,1074	0,1207	0,1072	-0,1286
Y ₃	0,9950	14,21%	92,13%	0,1430	-0,1534	0,1628	0,0519	0,0427	0,0497	0,9605
Y ₄	0,4733	6,76%	98,89%	0,2541	-0,8447	0,4032	-0,0463	-0,0139	-0,0362	-0,2361
Y ₅	0,0755	1,08%	99,97%	0,0222	-0,0123	0,0068	0,3960	-0,8220	0,4082	-0,0124
Y ₆	0,0020	0,03%	99,996%	-0,7317	0,0976	0,6726	0,0369	-0,0144	-0,0330	0,0108
Y ₇	0,0003	0,004%	100,000%	0,0379	-0,0108	-0,0307	0,7092	-0,0066	-0,7032	-0,0039

Segundo Helena et al. (2000), coeficientes de correlação superiores a 0,5 expressam uma forte relação entre as variáveis avaliadas. Verifica-se na Tabela 2 que as variáveis climáticas P_a e P_{sc} são fortemente correlacionadas entre si. Já a variável P_{ss} é moderadamente correlacionada com as variáveis P_a e P_{sc}. As variáveis morfométricas A_d, L_p e L_t são altamente correlacionadas entre si, entretanto, a variável morfométrica S_L possui fraca correlação com as demais variáveis analisadas (R<0,5), indicando a possibilidade de exclusão da mesma do estudo.

Com base nos resultados apresentados na Tabela 3 foram considerados apenas os dois primeiros componentes (Y₁ e Y₂), por atenderem simultaneamente aos dois critérios de seleção adotados (a variância acumulada explicar um valor maior ou igual a 75% da variação total dos dados e os autovalores serem maiores ou iguais a 1). Os demais componentes, que juntos explicaram 22,08% da variação total, foram desconsiderados. Na Tabela 4 são apresentadas as correlações ou fatores de carga entre as sete variáveis padronizadas e os dois primeiros componentes principais.

Tabela 4 - Fatores de carga entre as variáveis padronizadas (VP's) e os componentes principais (CP's), e a variância (λ_i) de cada componente principal (i = 1, 2)

X	VP's	CP's	
		Y ₁	Y ₂
P _a	Z ₁	0,209226	0,950899
P _{ss}	Z ₂	0,225520	0,766821
P _{sc}	Z ₃	0,178086	0,929543
A _d	Z ₄	-0,977547	0,169484
L _p	Z ₅	-0,954338	0,190567
L _t	Z ₆	-0,977535	0,169216
S _L	Z ₇	0,120541	-0,202970
	(%) λ_i	42,33	35,59

Observa-se na Tabela 4 que as variáveis padronizadas Z_4 , Z_5 e Z_6 apresentam maiores correlações com o primeiro componente principal (Y_1), enquanto as variáveis Z_1 , Z_2 e Z_3 indicam maiores correlações com o segundo componente principal (Y_2). A variável Z_7 pode ser descartada do estudo por contribuir pouco, em termos de variação, para o grupo de indivíduos avaliados confirmando o resultado obtido pela análise da matriz de correlação R.

A variável declividade média da bacia (S_L) possui pouca representatividade em relação ao comportamento das vazões características estudadas, representado, por definição, uma superfície uniforme em toda área de drenagem, não representando fisicamente o processo natural do escoamento de canais naturais. Por este motivo era esperada a exclusão da variável S_L do conjunto selecionado.

Em estudos que envolvem grande número de variáveis é interessante diminuir o espaço amostral, uma vez que se economiza tempo e recursos, os quais podem ser alocados em outras etapas importantes do monitoramento dos recursos hídricos (ZENG & RASMUSSEN, 2005).

Fisicamente, o componente principal Y_1 representa as variáveis morfométricas mais representativas e o componente principal Y_2 representa as chuvas médias nas áreas de drenagem a montante de cada posto fluviométrico.

5.2. ANÁLISE DE AGRUPAMENTO

Descartada a variável S_L , a partir dos resultados obtidos na análise dos componentes principais, foram obtidas as regiões homogêneas para as oito vazões, consideradas separadamente, com base nas variáveis padronizadas que apresentaram maiores correlações com os dois primeiros componentes principais (A_d , L_t , L_p , P_a , P_{sc} e P_{ss}) a partir da matriz de distâncias de Mahalanobis.

5.2.1. Método do vizinho mais próximo

O método do vizinho mais próximo apresentou agrupamento irregular para as oito vazões características estudadas e foi descartado. Melo Júnior et al. (2006), Braga et al. (1998) e Ribeiro et al. (1996) se depararam com situação

semelhante, sendo também descartados os agrupamentos obtidos para o método do vizinho mais próximo. Para ilustrar o resultado obtido, nas Figuras 4 e 5, são apresentados, respectivamente, os gráficos de distâncias de dissimilaridades *versus* etapas de agrupamentos e o dendrograma para a variável $Q_{7,10}$, aplicando-se o método do vizinho mais próximo.

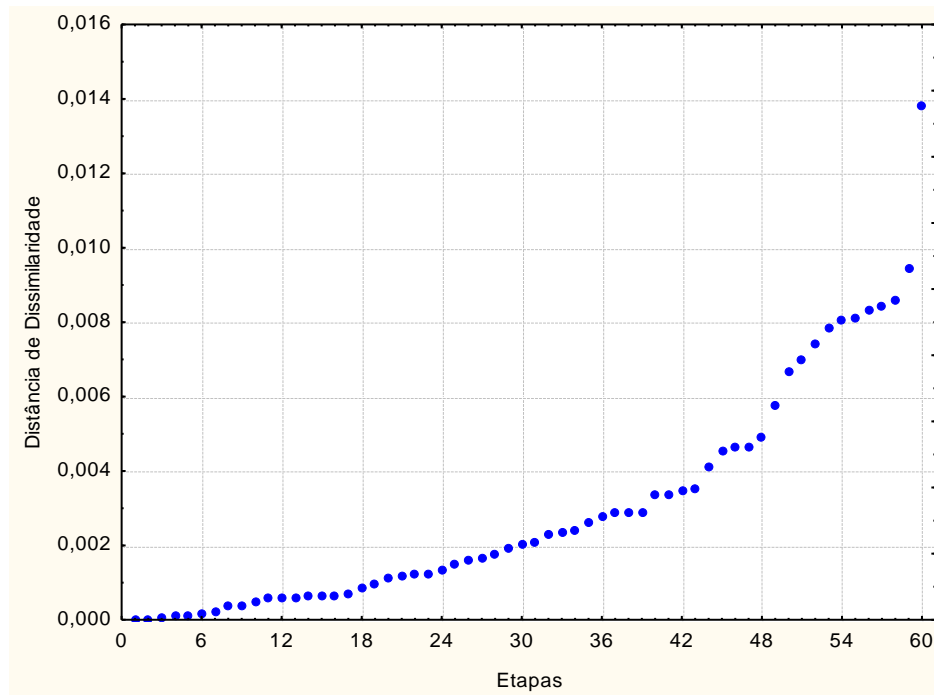


Figura 4 – Distância de dissimilaridades versus etapas de agrupamento para $Q_{7,10}$ a partir do método do vizinho mais próximo.

Analisando-se a Figura 4 observa-se uma dificuldade de interpretação do gráfico de distância de dissimilaridade *versus* etapas de agrupamento. São encontradas no gráfico várias descontinuidades, sendo que a primeira pode ser interpretada entre as etapas de agrupamento 39 e 40 ou entre os as etapas 43 e 44. Este padrão de comportamento da Figura 4 foi o mesmo para as demais vazões características analisadas.

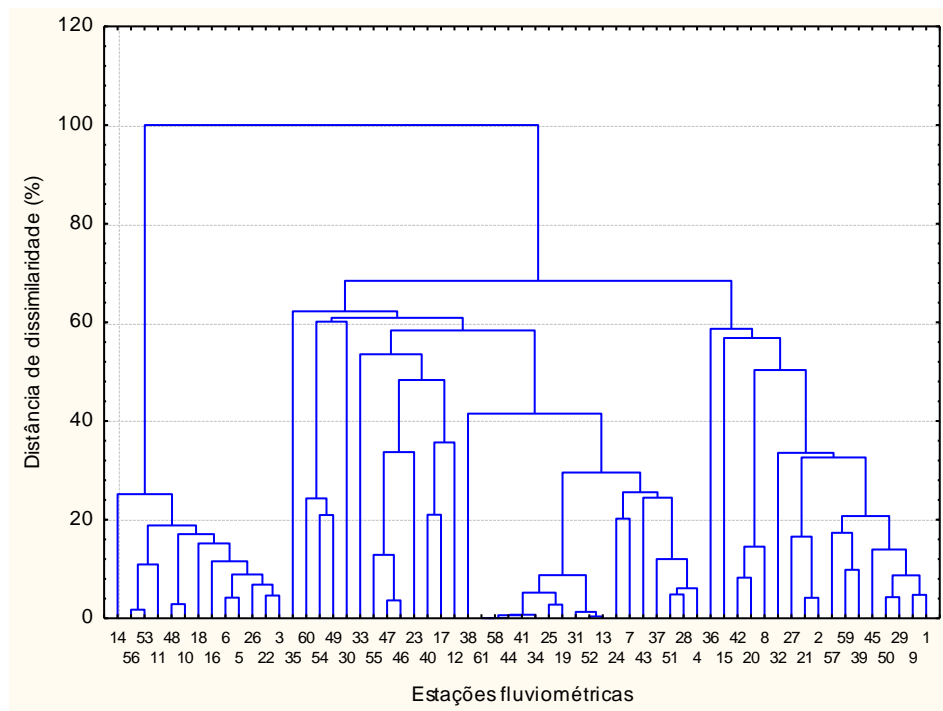


Figura 5 – Dendrograma para $Q_{7,10}$ indicando etapas de agrupamentos a partir do método do vizinho mais próximo.

A dificuldade de interpretação do gráfico apresentado na Figura 4 reflete na interpretação do dendrograma apresentado na Figura 5. O número de regiões hidrológicamente homogêneas depende da linha de corte definida pela descontinuidade entre etapas da Figura 4. Como o critério adotado depende da identificação precisa desta descontinuidade, este método de agrupamento foi desconsiderado.

5.2.2. Método do vizinho mais distante

O método do vizinho mais distante apresentou facilidade de interpretação dos resultados e número de agrupamentos iguais para as oito vazões avaliadas. Para este método a linha de corte pôde ser identificada com a distância aproximada de 19% de dissimilaridade no dendrograma, obtendo-se, para todas as vazões consideradas, a formação de quatro grupos com características homogêneas de vazão. Para ilustrar o resultado obtido, nas Figuras 6 e 7 são apresentados, respectivamente, os gráficos de distâncias de dissimilaridades versus etapas de agrupamentos e dendrograma para a variável $Q_{7,10}$.

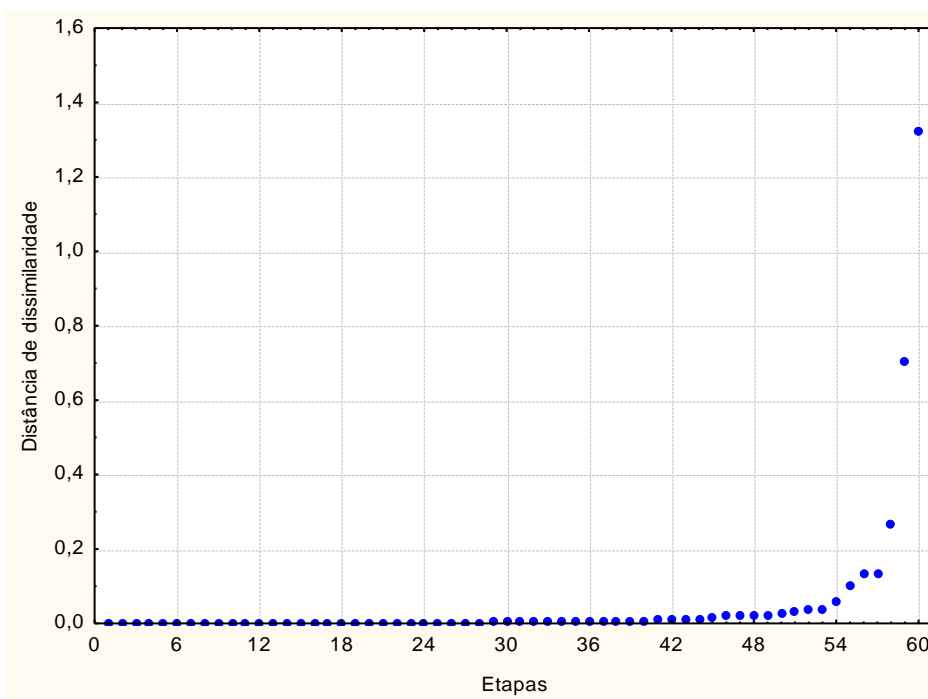


Figura 6 – Distância de dissimilaridades versus etapas de agrupamento para $Q_{7,10}$ a partir do método do vizinho mais distante.

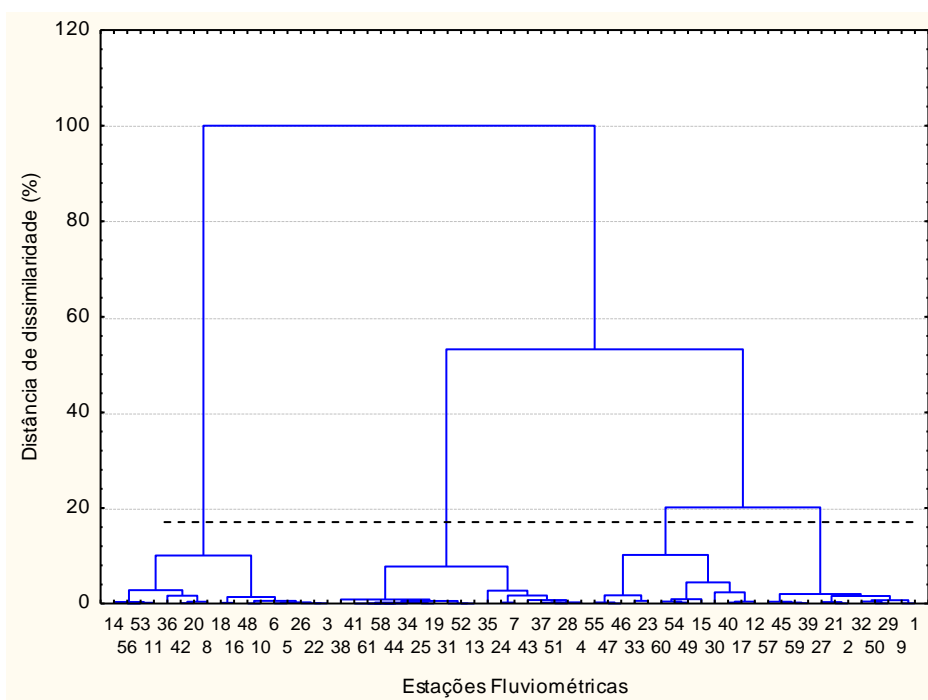


Figura 7 – Dendrograma para $Q_{7,10}$ indicando as etapas de agrupamentos a partir do método do vizinho mais distante.

Analisando-se a Figura 6 observa-se a primeira discontinuidade entre as etapas de agrupamento 56 e 57. A partir deste resultado foram identificadas quatro regiões hidrológicamente homogêneas para as oito vazões características analisadas, que seguiram o mesmo comportamento a partir da aplicação de método de agrupamento (Figura 7).

Na Tabela 5 é apresentada a divisão dos agrupamentos das estações fluviométricas a partir do método do vizinho mais distante.

Tabela 5 – Agrupamento das estações fluviométricas em regiões hidrológicamente homogêneas, identificadas com base no método do vizinho mais distante

CÓDIGO	ID	REGIÕES HOMOGÊNEAS							
		Q _{7,10}	Q _{mld}	Q ₉₀	Q ₉₅	Q _{max10}	Q _{max20}	Q _{max50}	Q _{max100}
56028000	1	II	II	II	II	II	II	II	II
56055000	2	II	II	II	II	II	II	II	II
56065000	3	I	I	I	I	I	I	I	I
56075000	4	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
56085000	5	I	I	I	I	I	I	I	I
56090000	6	I	I	I	I	I	I	I	I
56110005	7	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
56240000	8	I	I	I	I	II	I	I	II
56335001	9	II	II	II	II	II	II	II	II
56337000	10	I	I	I	I	I	I	I	I
56385000	11	I	I	I	I	II	I	I	I
56415000	12	III	III	III	III	III	III	III	III
56425000	13	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
56460000	14	I	I	I	I	II	I	I	I
56484998	15	III	III	III	III	II	II	II	II
56500000	16	I	I	I	I	I	I	I	I
56510000	17	III	III	III	III	III	III	III	III
56520000	18	I	I	I	I	I	I	I	I
56539000	19	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
56570000	20	I	I	I	I	II	I	I	II
56610000	21	II	II	II	II	II	II	II	II
56640000	22	I	I	I	I	I	I	I	I
56659998	23	III	III	III	III	IV	IV	III	III
56696000	24	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
56719998	25	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
56750000	26	I	I	I	I	I	I	I	I
56765000	27	II	II	II	II	II	II	II	II
56775000	28	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
56787000	29	II	II	II	II	II	II	II	II
56800000	30	III	III	III	III	III	II	III	III
56825000	31	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
56845000	32	II	II	II	II	II	II	II	II
56846000	33	III	III	III	III	III	III	III	III
56850000	34	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV

Continua...

Tabela 5 – Continuação...

CÓDIGO	ID	REGIÕES HOMOGÊNEAS							
		Q _{7,10}	Q _{mld}	Q ₉₀	Q ₉₅	Q _{max10}	Q _{max20}	Q _{max50}	Q _{max100}
56860000	35	IV	IV	IV	IV	IV	IV	III	III
56870000	36	I	I	I	I	II	II	II	II
56880000	37	IV	IV	IV	IV	IV	IV	III	III
56891900	38	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
56900000	39	II	II	II	II	II	II	II	II
56915500	40	III	III	III	III	III	III	III	III
56920000	41	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
56935000	42	I	I	I	I	II	I	I	II
56940002	43	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
56948005	44	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
56960005	45	II	II	II	II	II	II	II	II
56976000	46	III	III	III	III	IV	IV	III	III
56978000	47	III	III	III	III	III	III	III	III
56983000	48	I	I	I	I	I	I	I	I
56988500	49	III	III	III	III	III	II	III	II
56989001	50	II	II	II	II	II	II	II	II
56989400	51	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
56990000	52	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
56990990	53	I	I	I	I	II	I	I	I
56991500	54	III	III	III	III	III	II	III	II
56992000	55	III	III	III	III	III	III	III	III
56993002	56	I	I	I	I	II	I	I	I
56993551	57	II	II	II	II	II	II	II	II
56994500	58	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
56995500	59	II	II	II	II	II	II	II	II
56997000	60	III	III	III	III	III	II	III	II
56998000	61	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV

A partir do agrupamento gerado pelo método do vizinho mais distante apresentado na Tabela 5, pode-se concluir que:

- Das 61 estações fluviométricas envolvidas no estudo, 45 se localizaram na mesma região homogênea, para as oito vazões estudadas;
- Das 16 estações restantes, em destaque na Tabela 5, sete modificaram de região apenas para uma vazão característica (56110005, 56385000, 56460000, 56570000, 56800000, 56990990 e 56993002); sete modificaram de região para duas vazões características (56659998, 56880000, 56935000, 56976000, 56988500, 56991500 e 56997000) e duas estações

modificaram de região para as quatro vazões características máximas (56484998 e 56870000);

- Para as vazões características $Q_{7,10}$, Q_{90} , Q_{95} e Q_{mld} , todas as estações fluviométricas seguiram o mesmo comportamento de divisão de grupos com características homogêneas de vazão.

Melo Júnior et al. (2006) e Braga et al.(1998) obtiveram bons resultados com o método de agrupamento do vizinho mais distante, em estudos de precipitação, porém, os autores optaram por utilizar nos seus trabalhos o método de Ward, por ter apresentado melhores resultados em complemento aos obtidos pela análise dos componentes principais.

5.2.3. Método de Ward

O método de Ward também proporcionou facilidade de interpretação dos resultados, mas o número de agrupamentos não foi idêntico para as oito vazões avaliadas. A vazão Q_{max10} apresentou cinco regiões hidrológicas e as demais vazões características apresentaram quatro regiões hidrológicamente homogêneas. Este comportamento hidrológico diferente para apenas uma vazão característica não se justifica. Por este fato, optou-se pelo método do vizinho mais distante por apresentar coerência na divisão de regiões hidrológicas para todas as vazões estudadas.

Nas Figuras 8 a 11 são apresentados os gráficos de distâncias de dissimilaridades versus etapas de agrupamentos e os dendrogramas para as vazões $Q_{7,10}$ e Q_{max10} , respectivamente, utilizando-se o método de agrupamento de Ward. Pode-se verificar a formação de quatro regiões homogêneas para a vazão $Q_{7,10}$ e cinco regiões homogêneas para a vazão Q_{max10} evidenciando a incoerência na divisão de regiões homogêneas entre as vazões estudadas.

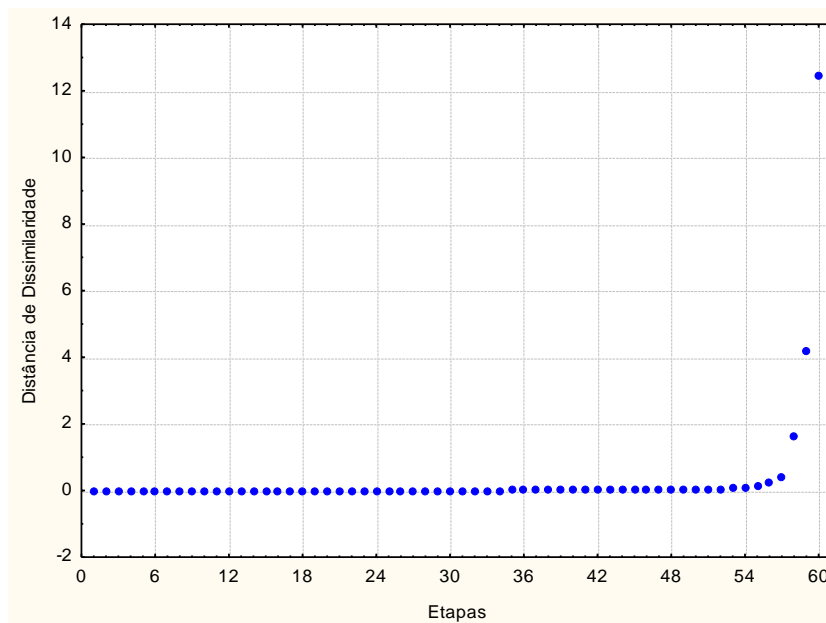


Figura 8 – Distância de dissimilaridades versus etapas de agrupamento para $Q_{7,10}$ a partir do método de Ward.

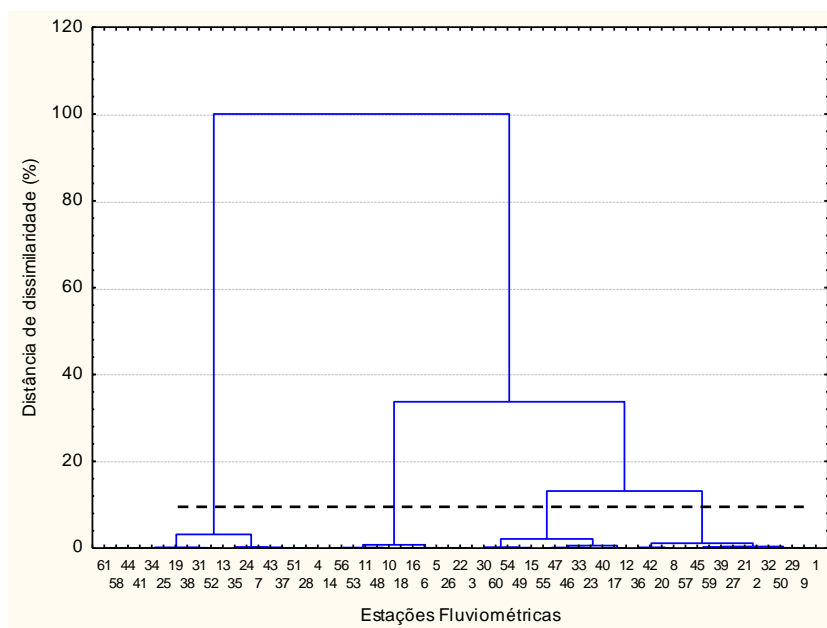


Figura 9 – Dendrograma para $Q_{7,10}$ indicando as etapas de agrupamento a partir do método de Ward.

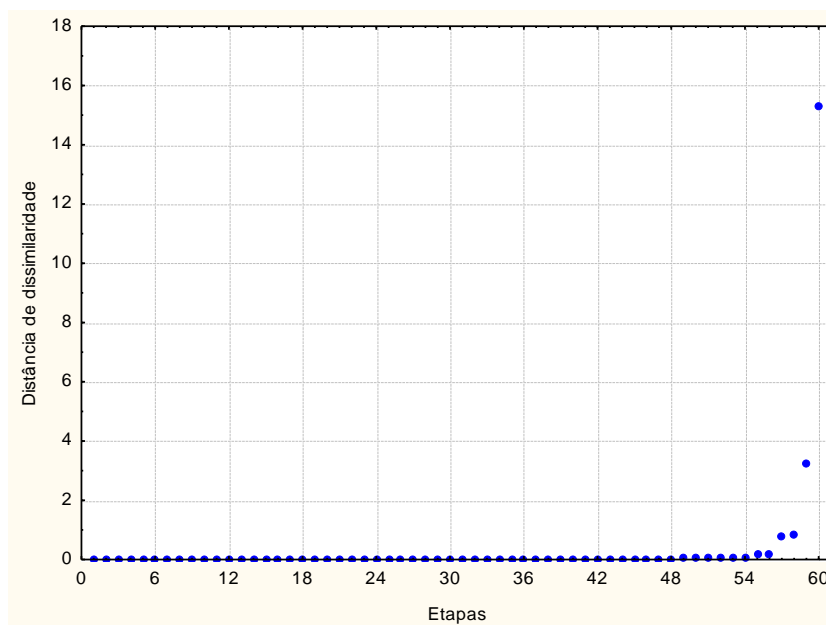


Figura 10 – Distância de dissimilaridades versus etapas de agrupamento para $Q_{\max 10}$ a partir do método de Ward.

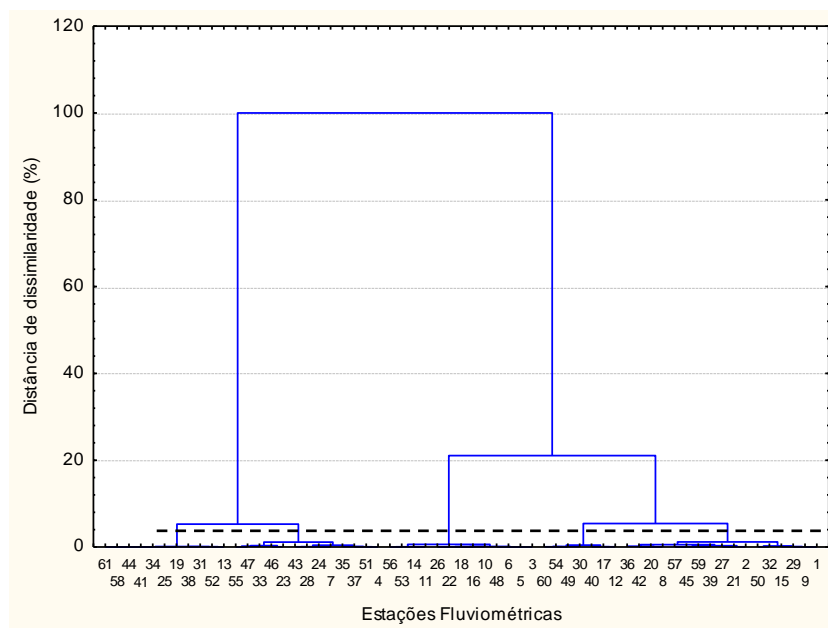


Figura 11 – Dendrograma para $Q_{\max 10}$ indicando as etapas de agrupamento a partir do método de Ward.

5.2.4. Regiões Homogêneas

A partir do método de agrupamento do vizinho mais distante foram obtidas para a bacia hidrográfica do rio Doce quatro regiões com características homogêneas de vazão.

De modo geral, apesar de pequenas variações de posicionamento relativo de algumas estações fluviométricas em relação às vazões estudadas (Tabela 5), as quatro regiões hidrologicamente homogêneas encontradas para a bacia hidrográfica do rio Doce puderam ser assim descritas:

- Região I – composta pelas estações com menores vazões e áreas de drenagem. Espacialmente constituída pelas regiões de cabeceira e pequenos afluentes. O número de estações fluviométricas que a compõem varia de 9 a 17, dependendo da vazão característica estudada. As áreas de drenagem das estações desta região variam de 166 a 970 km².
- Região II – região intermediária entre a região I e III. O número de estações fluviométricas que a compõem varia de 12 a 20 estações dependendo da vazão característica estudada. As áreas de drenagem desta região variam de 757 km² a 1.396 km².
- Região III – região intermediária entre a região II e IV. Espacialmente constituída pelos principais afluentes dos rios de maior vazão da bacia. O número de estações fluviométricas que a compõem varia de 6 a 14, dependendo da vazão característica estudada. As áreas de drenagem das estações desta região variam de 1.200 a 3.055 km².
- Região IV – composta pelas estações com maiores vazões e áreas de drenagem. Espacialmente constituída pela calha principal do rio Doce e seus principais afluentes: Piracicaba, Santo Antônio, Suaçuí e Manhauçu. O número de estações fluviométricas que a compõem varia de 17 a 21 estações dependendo da vazão característica estudada. As áreas de drenagem das estações fluviométricas componentes desta região variam de 2.578 a 81.940 km².

Na Figura 12 é apresentada a configuração espacial das quatro regiões hidrologicamente homogêneas para as vazões $Q_{7,10}$, Q_{mld} , Q_{90} e Q_{95} , que apresentaram comportamento hidrológico recorrente. Para a delimitação das regiões homogêneas, as áreas de influência das estações fluviométricas que as compunham foram estendidas até a seção de deságue no rio de maior ordem, a jusante, conforme descrito por Marques et al. (2009).

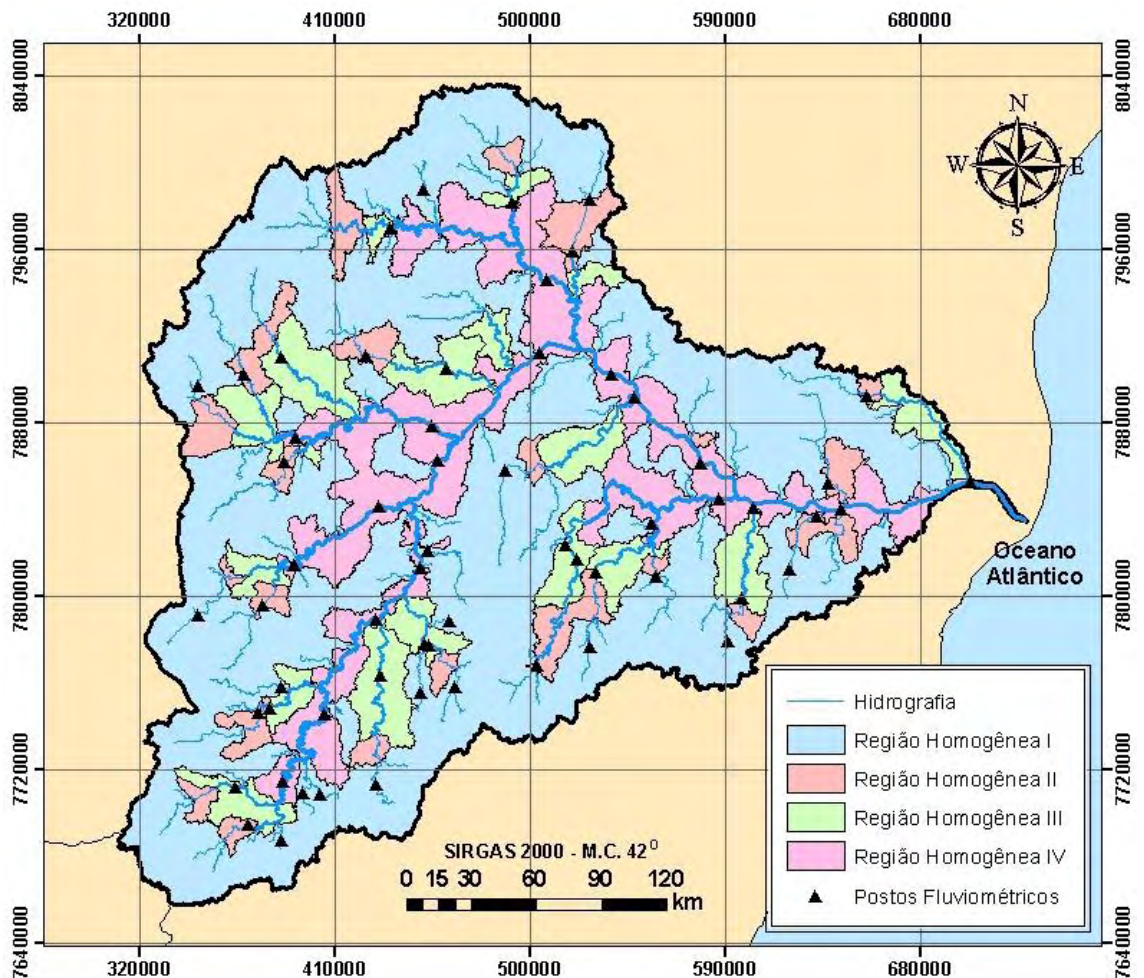


Figura 12 – Regiões hidrológicamente homogêneas obtidas para a bacia hidrográfica do rio Doce.

Analisando-se a Figura 12 percebe-se que a região homogênea de maior abrangência espacial é a região I (Regiões de cabeceira e menores áreas de drenagem), seguida da região IV (calha do rio principal e principais afluentes), região III e região II, respectivamente.

Ressalta-se que áreas de drenagem inferiores a 160 km² e superiores a 82.000 km² foram incluídas nas regiões hidrológicas I e IV, respectivamente. É importante destacar, no entanto, que a maior parte da bacia hidrográfica do rio Doce não possui monitoramento fluviométrico adequado (áreas de drenagem menores que 160 km²), devendo-se adotar outros critérios para extrapolações de resultados nestas regiões.

Ribeiro et al. (2005), trabalhando com vazões mínimas de referência ($Q_{7,10}$, Q_{90} e Q_{95}), obtiveram sete regiões hidrológicamente homogêneas para a bacia hidrográfica do rio Doce. Já Marques et al. (2009), trabalhando com vazões mínimas de referências ($Q_{7,10}$, Q_{90} e Q_{95}) em períodos trimestrais,

obtiveram para a bacia do rio Doce seis regiões hidrologicamente homogêneas. Destaca-se que as regiões consideradas pelos referidos autores são subdivisões e/ou junções espaciais das regiões hidrologicamente homogêneas encontradas pela aplicação da metodologia apresentada no presente trabalho, baseando-se em unidades de gestão de recursos hídricos pré-existentes e sub-bacias representativas da bacia hidrográfica do rio Doce.

É importante ressaltar que a metodologia proposta no presente trabalho é baseada em análise estatística multivariada e os resultados obtidos apontam para um comportamento hidrológico holístico da bacia hidrográfica do rio Doce. O resultado obtido pela metodologia proposta foi complementado pela análise de regressão múltipla, entre as variáveis dependentes (vazões características) e as variáveis independentes (variáveis climáticas e morfométricas), para obtenção das equações regionais para as quatro regiões hidrologicamente homogêneas.

5.3. ANÁLISE DE REGRESSÃO MÚLTIPLA

Considerando-se as regiões hidrologicamente homogêneas obtidas pela aplicação da abordagem científica proposta, foram ajustadas, para as vazões características em estudo, as equações de regressão múltipla do tipo linear, potencial, exponencial, logarítmico e recíproco. Na Tabela 6 são apresentadas, para cada região homogênea, as equações de regressão que melhor se ajustaram às variáveis $Q_{7,10}$, Q_{90} , Q_{95} e Q_{mld} .

Para atender aos critérios de seleção das equações de regressão fez-se necessária a exclusão de três estações fluviométricas para região I (56570000, 56935000, 56993002) e de uma estação fluviométrica para a região 4 (56880000).

Tabela 6 – Modelos de regressão que melhor se ajustaram às vazões características mínimas e média e os ajustes obtidos

Vazão (*)	Região	Modelo	Equação (**)	r ^{2a}	E.P.	F _{0,05}
Q _{7,10}	Região I	Potencial	$Q_{7,10} = (7,71 \times 10^{-8})A_d^{0,87} \times P_{sc}^{1,66}$	0,72	0,313	$3,5 \times 10^{-4}$
	Região II	Potencial	$Q_{7,10} = (1,898 \times 10^{-18})A_d^{5,954}$	0,82	0,491	$0,3 \times 10^{-4}$
	Região III	Potencial	$Q_{7,10} = (3,255 \times 10^{-14})A_d^{1,475} P_{sc}^{2,99}$	0,74	0,455	$4,8 \times 10^{-4}$
	Região IV	Potencial	$Q_{7,10} = (1,79 \times 10^{-3})A_d^{1,066}$	0,92	0,367	0,0
Q ₉₀	Região I	Potencial	$Q_{90} = (3,43 \times 10^{-7})A_d^{0,978} P_{sc}^{1,419}$	0,84	0,228	$0,2 \times 10^{-4}$
	Região II	Potencial	$Q_{90} = (5,46 \times 10^{-14})A_d^{4,581}$	0,83	0,367	$0,2 \times 10^{-4}$
	Região III	Potencial	$Q_{90} = (1,59 \times 10^{-11})A_d^{1,209} P_{sc}^{2,57}$	0,75	0,364	$4,2 \times 10^{-4}$
	Região IV	Potencial	$Q_{90} = (4,39 \times 10^{-3})A_d^{1,015}$	0,93	0,330	0,0
Q ₉₅	Região I	Potencial	$Q_{95} = (1,88 \times 10^{-7})A_d^{0,971} P_{sc}^{1,49}$	0,81	0,259	$0,5 \times 10^{-4}$
	Região II	Potencial	$Q_{95} = (2,04 \times 10^{-16})A_d^{5,346}$	0,82	0,453	$0,4 \times 10^{-4}$
	Região III	Potencial	$Q_{95} = (3,07 \times 10^{-12})A_d^{1,328} P_{sc}^{2,653}$	0,74	0,389	$0,4 \times 10^{-4}$
	Região IV	Potencial	$Q_{95} = (3,57 \times 10^{-3})A_d^{1,023}$	0,92	0,345	0,0
Q _{mid}	Região I	Potencial	$Q_{mid} = (6,89 \times 10^{-7})A_d^{1,019} P_{sc}^{1,42}$	0,88	0,200	0,0
	Região II	Potencial	$Q_{mid} = (7,29 \times 10^{-8})A_d^{2,746}$	0,81	0,234	$0,4 \times 10^{-4}$
	Região III	Potencial	$Q_{mid} = (3,86 \times 10^{-7})A_d^{1,016} P_{sc}^{1,486}$	0,82	0,208	$0,8 \times 10^{-4}$
	Região IV	Potencial	$Q_{mid} = (1,98 \times 10^{-2})A_d^{0,957}$	0,96	0,230	0,0

(*) Vazões em $m^3 s^{-1}$, A_d em km^2 e P_{sc} em mm.

(**) Equações válidas para o intervalo das variáveis independentes das estações fluviométricas que constituem a região hidrologicamente homogênea.

Analisando-se a Tabela 6 pode-se observar que:

- O modelo de regressão que melhor se ajustou aos dados de vazão foi o potencial. O mesmo comportamento para as equações regionais foi encontrado por Ribeiro et al. (2005) e Marques et al. (2009) para a bacia hidrográfica do rio Doce;
- A variável independente mais importante para o estudo foi área de drenagem (A_d) seguida da precipitação média no semestre chuvoso (P_{sc});
- As equações regionais apresentadas para as quatro regiões hidrologicamente homogêneas, definidas pela metodologia proposta no presente trabalho, apresentaram coeficientes de determinação superiores a 0,70, erros padrão de estimativa menor que 0,5 e nível de significância de 5% pelo teste F.

Os resultados obtidos pela análise de regressão múltipla foram considerados satisfatórios, validando a metodologia científica apresentada no presente estudo.

A partir do conhecimento prévio da região, da utilização de ferramentas de análise espacial e da experiência do hidrólogo, as análises estatísticas multivariadas de componentes principais e de agrupamento podem contribuir nas subdivisões das regiões hidrologicamente homogêneas, possibilitando tomadas de decisão mais conscientes, a partir de uma base de dados mais confiável (eliminando variáveis que contribuem pouco para o trabalho) e dos agrupamentos obtidos (verificação do comportamento estatístico das vazões características a partir dos dendrogramas).

6. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos no presente trabalho, pode-se concluir que:

- A análise de componentes principais apresentou resultados satisfatórios para fins de exclusão de variáveis pouco representativas na identificação de regiões hidrologicamente homogêneas.
- Os dois primeiros componentes principais, Y_1 e Y_2 , foram responsáveis por 77,92% da variação total dos dados.
- A matriz de similaridade de Mahalanobis e o método de agrupamento do vizinho mais distante apresentaram bons resultados na identificação de regiões hidrologicamente homogêneas para todas as vazões estudadas.
- Foram obtidas quatro regiões hidrologicamente homogêneas para todas as vazões características estudadas.
- As equações de regionalização obtidas pela análise de regressão múltipla para as vazões características mínimas e vazão média de longa duração foram consideradas satisfatórias, validando a metodologia científica apresentada no presente estudo.
- A metodologia proposta para identificação do número de regiões homogêneas apresentou bons resultados, possibilitando a eliminação da subjetividade na identificação das regiões hidrologicamente homogêneas.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), à Universidade Federal de Viçosa (UFV) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo financiamento deste trabalho.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSANI, A. A.; CHALIFOUR, A.; LÉGARÉ, G.; MANOUANE, C.; LEROUX, D. *Temporal regionalization of 7-day low flows in the St. Laurence watershed in Quebec (Canada)*. *Water Resources Management*, v. 25, p. 3559-3574, 2009.

BELLOMARINO, S. A.; PARKER, R. M.; CONLAN, X. A.; BARNETT, N. W.; ADAMS, M. J. *Partial least squares and principal components analysis of wine vintage by high performance liquid chromatography with chemiluminescence detection*. *Analytica Chimica Acta*, v. 678, p. 34-38, 2010.

BRAGA, C. C.; MELO, M. L. D.; MELO, E. C. S. *Análise de agrupamento aplicada a distribuição da precipitação no Estado da Bahia*. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 10, 1998, Brasília. Anais... Brasília: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 1998. CD-Room.

CABRERA, S. P.; MACIAS, H. M.; RAMIREZ, I. M.; SCHNAAS, L.; ROMIEU, I. *Maternal dietary omega fatty acid intake and auditory brainstem-evoked potentials in Mexicans infants born at term: Cluster analysis*. *Early Human Development*, v. 84, p. 51-57, 2008.

CASTIGLIONI, S.; CASTELLARIN, A.; MONTANARI, A. *Prediction of low-flow indices in ungauged basins through physiographical space-based interpolation*. *Journal of Hydrology*, v. 378, p. 272-280, 2009.

CRUZ, C. D. *Aplicações de algumas técnicas multivariadas no melhoramento de plantas*. 188p. Tese Doutorado, ESALQ, Piracicaba. 1990.

DRAPER, N. R.; SMITH, H. *Applied Regression Analysis*. 2. ed. New York: Oxford, 1981.

- ENGELAND, K.; HISDAL, H. *A comparison of low flow estimates in ungauged catchments using regional regression and the HBV-Model*. Water Resources Management, v. 23, p. 2567-2586, 2009.
- HAIDER, S.; PARKINSON, G. N.; NEIDLE, S. *Molecular dynamics and principal components analysis of Human Telomeric Quadruplex Multimers*. Biophysical Journal, v. 95, p. 296-311, 2008.
- HATVANI, G. I.; KOVÁCS, J.; KOVÁCS, I. S.; JAKUSCH, P.; KORPONAI, J. *Analysis of long-term water quality changes in the Kis-Balaton Water Protection System with time series, cluster analysis and Wilk's lambda distribution*. Ecological Engineering, v. 37, p. 629-635, 2011.
- HELENA, B.; PARDO, R.; VEGA, M.; BARRADO, E.; FERNÁNDEZ, J. M.; FERNÁNDEZ, L. *Temporal evolution of groundwater composition in an alluvial aquifer (Pisuerga River, Spain) by principal component analysis*. Water Research, v.34, p.807-816, 2000.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Disponível em: < <http://www.ibge.gov.br/home/>>. Acesso em julho de 2010.
- JOLLIFE, I. T. *Principal Component Analysis*, 2a Ed. Springer, 487 p., 2002.
- KAHYA, E.; KALAYCI, S.; PIECHOTA, T. C. Streamflow regionalization: case study of Turkey. Journal of Hydrologic Engineering, v. 13. 2008.
- KAVISKI, E. *Métodos de Regionalização de Eventos e Parâmetros Hidrológicos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1992.
- LIBERATO, J. R. *Aplicações de técnicas de análise multivariada em fitopatologia*. 144p, Dissertação Mestrado – UFV, Viçosa, 1995.
- MANLY, B. F. J. *Multivariate statistical methods*. 215p., London: Chapman and Hall, 1994.
- MARQUES, F.A.; SILVA, D. D.; RAMOS, M. M.; PRUSKI, F. F. *Sistema multi-usuário para gestão de recursos hídricos*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 14, n. 4, p. 51-69, 2009.

- MELCHIORE, C.; MATTEUCCI, M.; AZZONI, A.; ZANCHI, A. *Artificial neural networks and cluster analysis in landslide susceptibility zonation*. *Geomorphology*, v. 94, p. 379-400, 2008.
- MELO JR., J. C. F.; SEDIYAMA, G. C.; FERREIRA, P. A.; LEAL, B. G. *Determinação de regiões homogêneas quanto à distribuição de frequência de chuvas no leste do Estado de Minas Gerais*. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental – AGRIAMBI*, v. 10, n. 2, p. 408-416, Campina Grande, PB, 2006.
- MEZER, A.; YOVEL, Y.; PASTERNAK, O.; GORFINE, T.; ASSAF, Y. *Cluster Analysis of resting-state fMRI time series*. *NeuroImage*, v. 45, p. 1117-1125, 2009.
- MINAS GERAIS, Governo do Estado. *Redes e bacias hidrográficas otocodificadas de Minas Gerais*. Belo Horizonte, 2010. Base vetorial. DVD.
- MISHRA, A. K.; COULIBALY, P. *Hydrometric network evaluation for Canadian watersheds*. *Journal of Hydrology*, n. 380, p. 420-437, 2009.
- MOREIRA, M. C. *Gestão e planejamento dos recursos hídricos: Regionalização de vazões e proposição de índices para identificação de conflitos pelo uso da água*. 85f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. 2010.
- MWALE, D.; GAN, T. Y.; DEVITO, K. J.; SILINS, U.; MENDOZA, C.; PETRONE, R. *Regionalization of Runoff Variability of Alberta, Canada, by Wavelet, Independent Component, Empirical Orthogonal Function, and Geographical Information System Analysis*. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 16, 2010.
- NATHAN, R. J., MCMAHON, T. A. *Identification of homogeneous regions for the purposes of regionalization*. *Journal of Hydrology*, 121: 217-238, 1990.
- NORUSIS, M. J. *SPSS Base System User's Guide*. 520p. Chicago, 1990.
- PIRES, J. C. M.; SOUSA, S. I. V.; PEREIRA, M. C.; FERRAZ, M. C. M.; MARTINS, F. G. *Management of air quality monitoring using principal component and cluster analysis: Part II – CO, NO₂ and O₃*. *Atmospheric Environment*, v. 42, p. 1261-1274, 2008.

PLANO INTEGRADO DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA DO RIO DOCE - PIRH. Disponível em <<http://www.pirhdoce.com.br/>>. Acesso em março de 2010.

PRICE, A. L.; PATTERSON, N. J.; PLENGE, R. M.; WEINBLATT, M. E.; SHADICK, N. A.; REICH, D. *Principal components analysis corrects for stratification in genome-wide association studies*. Nature Genetics, v. 38, p. 904–909, 2006.

REID, M. K.; SPENCER, K. L. *Use of principal components analysis (PCA) on estuarine sediment datasets: The effect of data pre-treatment*. Environmental Pollution, v. 157, p. 2275-2281, 2009.

RENCHE, A. C. *Methods os Multivariate Analysis*. Ed. 2. Wiley-Interscience. 708 p. Canada, 2002.

RIBEIRO, A.; VICTORIA, R. L.; PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; MARTINELLI, L. A.; MORTATTI, J. *Análise do regime pluviométrico da região amazônica a partir de dados de onze localidades*. Revista Brasileira de Meteorologia, Brasília, v.11, p.25-35, 1996.

RIBEIRO, C. B. M.; MARQUES F. A.; SILVA D. D. *Estimativa e regionalização de vazões mínimas de referência para a bacia do rio Doce*. Engenharia na Agricultura. Viçosa – MG, v.13, n. 2, p. 103-107, 2005.

SAMUEL, J.; COULIBALY, P.; METCALFE, R. A. *Estimation of Continuous Streamflow in Ontario Ungauged Basins: Comparison of Regionalization Methods*. Journal of Hydrologic Engineering, v. 16. 2011.

SOUSA, H. T., PRUSKI, F. F, SOUSA, J. F., BOF, L. H. N., CECON, P.R. *Sistema Computacional para Regionalização de Vazões – SisCoRV 1.0*. Universidade Federal de Viçosa - UFV, Viçosa-MG, 2008.

TOLA, V.; LILLO, F.; GALLEGATI, M.; MANTEGNA, R. N. *Cluster analysis for portfolio optimization*. Journal of Economic Dynamics and Control, v. 32, p. 235-258, 2008.

VYAS, S.; KUMARANAYAKE, L. *Constructing socio-economic status indices: how to use principal components analysis*. Health Policy Plan, v. 21, p. 459-468, 2006.

WARD, JÚNIOR H. *Hierarchical grouping to optimize an objective function*. Journal of the American Statistical Association, Alexandria, v.58, n.301, p.236-244, 1963.

WILKS, D. S. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Academic Press, 630 p. USA, 2006.

ZENG, X.; RASMUSSEN, T. C. *Multivariate statistical characterization of water quality in Lake Lanier, Georgia, USA*. Journal Environmental Quality, v.34, p.1980-1991, 2005.

ARTIGO II

**Metodologia baseada em sistemas de informações geográficas e análise
geoestatística para avaliação, rearranjo e otimização de redes
fluviométricas de monitoramento quantitativo em bacias hidrográficas**

METODOLOGIA BASEADA EM SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS E ANÁLISE GEOESTATÍSTICA PARA AVALIAÇÃO, REARRANJO E OTIMIZAÇÃO DE REDES FLUVIOMÉTRICAS DE MONITORAMENTO QUANTITATIVO EM BACIAS HIDROGRÁFICAS

Resumo - Esse trabalho teve como objetivo desenvolver uma metodologia baseada em Sistemas de Informações Geográficas e análise geoestatística para subsidiar projetos de redes fluviométricas de monitoramento quantitativo em bacias hidrográficas. Foram utilizadas oito vazões características no estudo, individualizadas para 61 estações fluviométricas da bacia hidrográfica do rio Doce: $q_{7,10}$; q_{90} ; q_{95} ; q_{mld} ; q_{max10} ; q_{max20} ; q_{max50} e q_{max100} . Analisando-se a rede existente concluiu-se que o monitoramento fluviométrico da bacia do rio Doce é quantitativamente satisfatório, porém, espacialmente mal distribuído. A análise geoestatística apontou o modelo teórico de semivariograma esférico como o que melhor se ajustou às semivariâncias experimentais, para as variáveis estudadas. A nova abordagem científica permitiu, a partir dos mapas de vazões específicas e desvios padrão gerados pela técnica de krigagem, a exclusão e o rearranjo de estações fluviométricas. Em quatro etapas de desenvolvimento da metodologia foram reposicionadas 18 estações e excluídas duas estações fluviométricas, totalizando 59 estações de monitoramento. A otimização e o rearranjo espacial da rede fluviométrica possibilitou a redução dos desvios padrão percentuais para sete vazões características analisadas na bacia hidrográfica do rio Doce.

Abstract - This work aimed to develop a methodology based on Geographic Information Systems and geostatistical analysis to subsidize projects of quantitative gauging monitoring networks of watersheds. Eight variables were used in the study, 61 individual gauging stations for the rio Doce basin: $q_{7, 10}$, q_{90} , q_{95} ; q_{mld} ; q_{max10} ; q_{max20} ; q_{max50} and q_{max100} . Analyzing the existing network was concluded that the fluviometric monitoring of rio Doce basin is quantitatively satisfactory but poorly distributed spatially. The geostatistical analysis indicated the spherical semivariogram model had a best fit to the experimental semivariance for the variables studied. The new scientific approach permits from the generated maps of specific flow rates and standard deviations by the technique of kriging, exclusion, inclusion and rearrangement of gauging stations. In four stages of development of the methodology, 18 stations were repositioned and two stations were deleted in total of 59 monitoring station. The optimization and spatial rearrangement of fluviometric network has reduced the percentage standard deviations for seven variables in rio Doce basin.

Palavras chave – SIG, Análise Geoestatística e Rede de Monitoramento Fluviométrico.

1. INTRODUÇÃO

Desde a década de 1930, no impulso de desenvolvimento industrial e de urbanização acelerada, o Brasil tem buscado adotar modelos adequados de gestão dos seus recursos hídricos, condicionados, naturalmente, ao nível de desenvolvimento tecnológico, à cultura político-institucional, às prioridades sociais e aos padrões de sustentabilidade internacionalmente aceitos nessa área em cada época (GEO BRASIL, 2007).

O conhecimento das características do ciclo hidrológico e da variação espaço-temporal da quantidade e qualidade de suas etapas constituintes é de fundamental importância para o desenvolvimento de ações de gestão dos recursos hídricos que visem ao atendimento de seus múltiplos usos. A formação desse conhecimento se faz a partir da coleta de informações relativas às vazões fluviais e qualidade da água durante determinado período, por intermédio da instalação e operação de estações de monitoramento. A rede formada pelas estações deverá ser suficiente para a geração das informações que atendam seus múltiplos usos.

Aspectos científicos importantes estão vinculados a uma rede hidrométrica: previsão climática (MISHRA et al., 2009; ANCTIL et al., 2006; COULIBALY, 2005; COULIBALY, 2006; YILMAZ et al., 2005), base de dados hidrológicos para projetos de engenharia (COULIBALY & EVORA, 2007), simulações e calibração de modelos hidrológicos (BARDOSSY & DAS, 2008; DONG et al., 2005; ROGALU & OGDEN, 2007; STEWART et al., 2005; WESTCOTT et al., 2008), redes de alerta em tempo real contra eventos extremos (GERSTNER & HEINEMANN, 2008), entre outros.

Segundo a Organização Meteorológica Mundial - OMM, uma rede hidrométrica pode ser definida como um conjunto de estações de coleta de dados, para diferentes componentes do ciclo hidrológico, projetada e operada para atender um conjunto de objetivos compatíveis (OMM, 1994). A atual rede fluviométrica nacional, por ter cunho histórico fundamentalmente baseado no setor hidroelétrico, necessita ser revista com intuito de fornecer informações hidrológicas capazes de subsidiar uma gestão de recursos hídricos mais eficaz nos moldes previstos na Lei nº 9433/97.

É de suma importância a reorganização da rede hidrológica brasileira, tanto em quantidade dos postos hidrométricos instalados quanto em qualidade das informações fornecidas.

No dia 20 de outubro de 2010 foi publicado, no Diário Oficial da União, a Resolução conjunta nº 003 da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL e Agência Nacional de Águas – ANA estabelecendo condições e procedimentos a serem observados pelos concessionários e autorizados de geração de energia elétrica para a instalação, operação e manutenção de estações hidrométricas visando ao monitoramento pluviométrico, linimétrico, fluviométrico, sedimentométrico e de qualidade da água associado a aproveitamentos hidrelétricos.

Uma das prerrogativas desta resolução é a ampliação da rede de monitoramento hidrométrico brasileira em relação à área de drenagem incremental (diferença entre a área de drenagem do aproveitamento e o somatório das áreas de drenagem de outros aproveitamentos outorgados localizados imediatamente a montante de cada aproveitamento hidrelétrico existente e a ser outorgado).

A Organização Meteorológica Mundial (OMM, 1994) recomenda a revisão periódica das redes hidrométricas, levando-se em conta a redução das incertezas hidrológicas trazidas desde a última análise da rede, as alterações relacionadas ao orçamento, as necessidades de dados e os usos múltiplos dos recursos hídricos.

Spence e colaboradores (2007) quantificaram o impacto que a redução do número de estações hidrométricas pode causar na previsão de vazões extremas. A importância da qualidade da informação hidrológica apresentada pela OMM pode ser observada no trabalho desenvolvido por Mishra & Coulibaly (2009). Os autores desenvolveram uma ampla revisão sobre técnicas de elaboração de projetos de redes hidrometeorológicas em nível mundial e dentre elas destaca-se a técnica geoestatística. Nour e colaboradores (2006), utilizando a técnica geoestatística, consideraram as implicações que o projeto de uma rede de monitoramento pluviométrico pode acarretar no mapeamento de precipitações.

Um projeto ótimo para a rede hidrométrica será aquele que minimiza a incerteza global associada às variáveis de interesse (HUSAIN, 1987).

Tanto a ampliação da rede de monitoramento hidrométrico, prevista pela Resolução nº 003/2010, quanto as revisões periódicas recomendadas, devem vir acompanhadas de procedimentos técnicos que atendam às demandas nacionais (BRASIL, 1997) e internacionais (OMM, 1994).

Nesse sentido, esse trabalho tem como objetivo principal desenvolver uma metodologia, baseada em Sistemas de Informações Geográficas – SIG e Análise Geoestatística, para subsidiar projetos de redes fluviométricas de monitoramento quantitativo de bacias hidrográficas. Especificamente objetivou-se avaliar a situação atual e propor critérios para inclusão, exclusão ou rearranjo da rede de monitoramento fluviométrico da bacia hidrográfica do rio Doce.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. REGIÃO DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do rio Doce situa-se na região Sudeste do Brasil, entre os paralelos 17°45' S e 21°15' S e os meridianos 39°30' W e 43°45' W com altitude média de 578 metros. Possui área de drenagem de, aproximadamente, 83.400 km², dos quais 86% pertencem ao estado de Minas Gerais e 14% ao estado do Espírito Santo (PIRH, 2010). A população na bacia atinge aproximadamente 3,1 milhões de habitantes, sendo que ao redor de 70% encontra-se na zona urbana. As principais atividades econômicas desenvolvidas na bacia são: mineração, siderurgia, silvicultura e agropecuária.

2.2. BASE DE DADOS E APLICATIVOS

O trabalho foi desenvolvido com base nas séries de dados de 61 estações fluviométricas localizadas na bacia do rio Doce (Figura 1), obtidas junto à Agência Nacional de Águas – ANA. As séries empregadas são constituídas por dados anuais consistidos, correspondentes a um período-base de 30 anos (1976 a 2005). Ressalta-se que foi limitada a utilização de dados até o ano de 2005 pelo fato de, no início do trabalho, este constituir o ano mais recente com dados consistidos disponibilizados pela ANA.

No presente estudo foram consideradas as seguintes variáveis hidrológicas: vazão específica mínima média de sete dias consecutivos e com

período de retorno de 10 anos - $q_{7,10}$, vazão específica mínima com permanência no tempo de 90% - q_{90} , vazão específica mínima com permanência no tempo de 95% - q_{95} , vazão específica média de longa duração - q_{mld} , vazão específica máxima com período de retorno de 10 anos - q_{max10} , vazão específica máxima com período de retorno de 20 anos - q_{max20} , vazão específica máxima com período de retorno de 50 anos - q_{max50} e vazão específica máxima com período de retorno de 100 anos - q_{max100} .

Utilizou-se a base vetorial de elevação (curvas de nível e pontos cotados) e de hidrografia da região hidrográfica obtida junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, na escala 1:250.000 (IBGE, 2010). A base vetorial ortocodificada da bacia do rio Doce foi obtida junto ao Instituto Mineiro de Gestão das Águas (MINAS GERAIS, 2010).



Figura 1 – Localização dos 61 postos de monitoramento fluviométrico selecionados na bacia hidrográfica do rio Doce.

Para a geração do modelo digital de elevação hidrograficamente condicionado (MDEHC) e espacialização dos resultados foi utilizado o Sistema de Informações Geográficas ArcGIS® 10.0, desenvolvido pelo Environmental Systems Research Institute - ESRI.

As análises estatísticas de tendência dos dados (tendência linear, quadrática e cúbica) foram realizadas utilizando-se o aplicativo Statistica® 7.0, desenvolvido pela StatSoft. Para a análise geoestatística utilizou-se a ferramenta GEO-EAS (ENGLUND & SPARKS, 1992).

2.3. AVALIAÇÃO DA REDE EXISTENTE

2.3.1. Densidade Mínima de Estações Fluviométricas

Para fins de obtenção da densidade mínima de estações fluviométricas para a bacia do rio Doce adotou-se a metodologia da OMM (1994), que define seis tipos de relevo para aplicação das normas de densidade espacial: costeiro, montanhoso, planícies interiores, levemente ondulados, pequenas ilhas e regiões polares ou áridas. Na Tabela 1 é apresentada, para cada tipo de relevo, a densidade mínima de estações de monitoramento fluviométrico (estação/km²) sugerida pela OMM (1994).

As características fisiográficas da bacia do rio Doce foram obtidas a partir do mapa de classes de declividade, adaptando-se a divisão proposta pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 1999). A partir da construção do MDEHC e do mapa de declividade, as seis características de relevo (costeiro, montanhoso, planícies interiores, levemente ondulado, pequenas ilhas e regiões polares/áridas) foram derivadas automaticamente para verificação das densidades mínimas de estações de monitoramento fluviométrico na bacia hidrográfica do rio Doce.

Tabela 1 – Densidade mínima de estações de monitoramento fluviométrico

Relevo	Declividade (*) (%)	Densidade Mínima (estação/km²)
Costeiro	0 - 3	1 : 2.750
Montanhoso	≥ 20	1 : 1.000
Planícies interiores	0 - 3	1 : 1.875
Levemente ondulado	3 - 20	1 : 1.875
Pequenas ilhas	-	1 : 300
Regiões polares/áridas	-	1 : 20.000

(*) Adaptado de Embrapa (1999).

Fonte: OMM (1994).

Para facilitar a análise dos resultados, a bacia hidrográfica do rio Doce foi codificada, segundo a metodologia proposta por Pfafstetter (1989), conforme Resolução nº 30, do Conselho Nacional de Recursos Hídricos, de 11 de dezembro de 2002 (MINAS GERAIS, 2010).

2.3.2. Análise Estatística Descritiva

A análise estatística descritiva teve o objetivo de conhecer as variáveis em estudo e resumi-las, baseando-se na construção e interpretação gráfica e em cálculos e interpretação de estatísticas.

A análise estatística descritiva, para as oito variáveis consideradas ($q_{7,10}$, q_{90} , q_{95} , q_{mld} , q_{max10} , q_{max20} , q_{max50} e q_{max100}), foi realizada por meio das seguintes avaliações:

- medidas de tendência central – média e mediana;
- análise de dispersão – análise de *boxplot* (TUKEY, 1977), desvio padrão e coeficiente de variação;
- normalidade dos dados experimentais - aderência à distribuição Normal, segundo o teste de qui-quadrado (χ^2) a um nível de significância de 5% (CATALUNHA et al., 2002);
- superfícies de tendência – ajustes de superfícies de tendência de primeiro, segundo e terceiro graus, aos dados de vazões específicas (LANDIN, 2003).

Segundo Gonçalves & Folegatti (2002), uma forte correlação espacial entre variáveis não pode ser plenamente descrita pela estatística clássica, recomendando-se a adoção de técnicas geoestatísticas.

2.4. OTIMIZAÇÃO E REARRANJO DA REDE

2.4.1. Análise Geostatística

O comportamento das variáveis regionalizadas na análise geoestatística foi verificado a partir de duas ferramentas fundamentais: o semivariograma (análise do comportamento espacial das variáveis) e a krigagem (cálculo dos valores preditos com seus erros associados), conforme Mishra e Coulibaly (2009).

Considerando que as variações espaciais de uma variável hidrológica regionalizada podem ser representadas pela realização $z(x_i)$ de um conjunto $Z(\mathbf{x}) = z_1(\mathbf{x}), z_2(\mathbf{x}), \dots, z_n(\mathbf{x})$, onde $\mathbf{x}_i = (x_i, y_i)$ é o vetor localização da estação, o primeiro momento deste campo aleatório é o valor esperado para um ponto $E[Z(\mathbf{x})]$ e o segundo momento é definido como a covariância para qualquer par \mathbf{x} e \mathbf{x}' (KITANIDIS, 1993), apresentado pela equação 1:

$$R(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = E\{[z(\mathbf{x}) - E[z(\mathbf{x})]][z(\mathbf{x}') - E[z(\mathbf{x}')]]\} \quad (1)$$

A função semivariograma é definida por dois valores separados por uma distância $h = |x_1 - x_2|$ chamada "lag".

$$\gamma(\mathbf{x}, h) = E\{[z(\mathbf{x}) - z(\mathbf{x} + h)]^2\} \quad (2)$$

A equação 2 pode ser estimada pelo semivariograma experimental clássico, assumindo-se estacionariedade:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N [z(x_i) - z(x'_i)]^2 \quad (3)$$

em que N é o número total de pares \mathbf{x} e \mathbf{x}' separados pela distância h .

Foi utilizado o mínimo de 30 pares de pontos por intervalo para uma estimativa adequada da semivariância experimental (JOURNEL e HUIJBREGTS, 1978).

Com base nas semivariâncias experimentais calculadas escolheu-se o modelo de semivariograma que melhor representou a estrutura de variabilidade espacial em análise. Os modelos utilizados no presente trabalho foram: exponencial, gaussiano e esférico (DELHOMME, 1976; ISAACS & SRIVASTAVA, 1989).

A krigagem baseia-se no número de dados, na qualidade dos dados em cada ponto, na posição da coleta dos dados, na continuidade espacial e na distância entre estes pontos amostrais (JOURNEL e HUIJBREGTS, 1978).

Na krigagem os valores estimados de $\hat{z}(x_0)$, identificados por uma localização específica x_0 onde não existem valores, são dados pela equação:

$$\hat{z}(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i z(x_i) \quad (4)$$

em que, λ_i são os pesos do estimador que minimizam a variância (pesos da Krigagem ordinária).

Supondo que $z(x_i)$ satisfaz à hipótese $E[z(x) - z(x + h)] = 0$ e possui semivariograma dado pela equação 2, um sistema de equações lineares de krigagem simples combinando informações de vizinhança pode ser então definido:

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i \gamma(x_i - x_j) = \gamma(x_i - x_0) \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \quad (6)$$

Assim, conhecido o semivariograma e aplicando-se a técnica de krigagem, estimou-se os valores das variáveis $Q_{7,10}$, Q_{90} , Q_{95} , Q_{mld} , Q_{max10} , Q_{max20} , Q_{max50} e Q_{max100} nos locais não amostrados e as incertezas associadas ao mapeamento gerado.

A diferença entre a krigagem e outros métodos de interpolação comumente empregados é a maneira como os pesos são atribuídos às diferentes amostras. Na krigagem o procedimento é semelhante ao de interpolação por média móvel ponderada, exceto que os pesos são determinados a partir de uma análise espacial, baseada no semivariograma experimental. Além disso, a krigagem fornece, em média, estimativas não tendenciosas (a diferença entre valores estimados e verdadeiros para o mesmo ponto, em média, deve ser nula) e com variância mínima.

Para a validação do semivariograma teórico ajustado utilizou-se a técnica de Jack-knifing (VAUCLIN et al., 1983). Nesta técnica, cada um dos valores medidos é interpolado pelo método da krigagem, eliminando-se sucessivamente os valores medidos, substituindo-os pelas estimativas, calculando-se, a seguir, a distribuição dos erros padronizados, que deve apresentar média zero e desvio-padrão unitário (MONTENEGRO & MONTENEGRO, 2006).

2.4.2. Proposta Metodológica para Rearranjo e Otimização da Rede

A partir da seleção do semivariograma teórico ajustado e validado e dos mapas de vazão específica e de erros de estimativa espacializados, obtidos pela técnica de krigagem, para as oito variáveis fluviométricas estudadas, propôs-se a metodologia apresentada na Figura 2 para arranjo e otimização da rede de monitoramento fluviométrico.

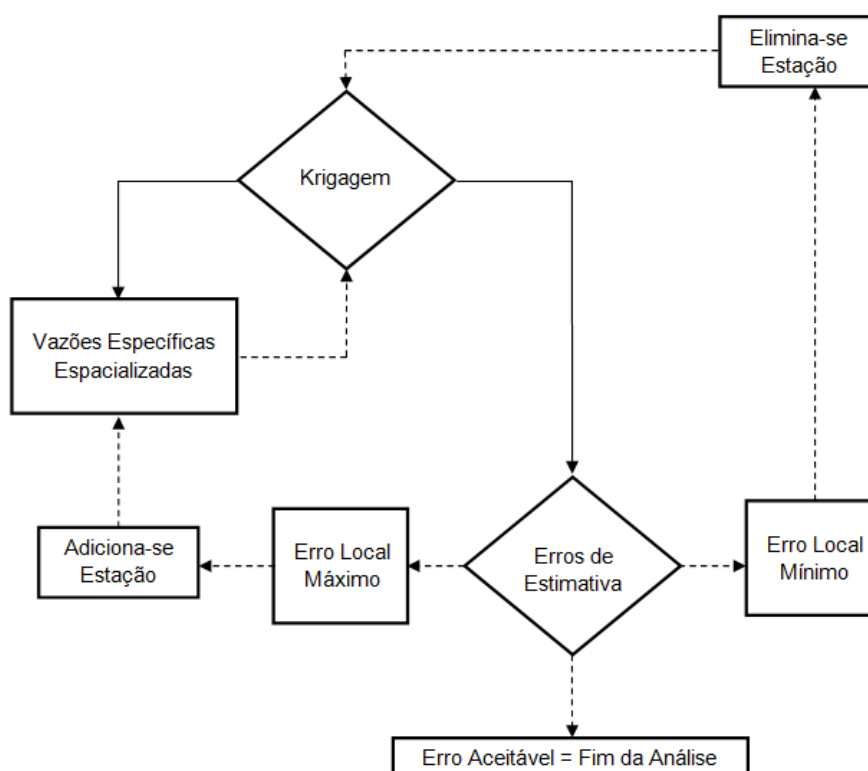


Figura 2 – Fluxograma da metodologia proposta para rearranjo e otimização da rede de monitoramento fluviométrico.

Analisando-se o fluxograma da Figura 2 observa-se que, a partir da aplicação da técnica de krigagem, são gerados dois mapas: o mapa de vazões específicas espacializado e o mapa de erros das estimativas da espacialização. O mapa de erros das estimativas pode apresentar três configurações possíveis: erro local considerável, erro local desprezível e erro aceitável.

O erro local mínimo pode ser encontrado em regiões onde a densidade de estações é maior que a necessária ou em regiões da bacia hidrográfica nas quais a variabilidade espacial dos dados é pequena. Esta configuração espacial indica a possibilidade de exclusão ou reposicionamento de estações de monitoramento. Em bacias hidrográficas onde o número de postos é superior ao previsto pela OMM este processo permite reduzir os custos de

monitoramento sem perder qualidade da informação. Em regiões hidrográficas cuja densidade mínima de estações não é atendida este processo pode ser denominado de rearranjo, devido ao fato de necessariamente estes postos serem reposicionados em locais onde o erro de estimativa é considerável.

O erro local máximo normalmente é encontrado em regiões da bacia hidrográfica onde a densidade de estações é baixa ou a variabilidade dos dados é grande. Neste caso, identifica-se um trecho do curso d'água potencialmente propenso a receber uma estação de monitoramento adicional. Caso existam regiões com erros locais mínimos, os postos inicialmente excluídos serão reposicionados nestas regiões.

Considerando-se a estacionariedade do processo, admitiu-se o valor observado, nos locais de inserção das novas estações fluviométricas propostas, igual ao valor simulado obtido junto ao mapa de vazões específicas.

Após este procedimento inicial, a análise de krigagem para a bacia estudada foi refeita, encontrando-se novos locais onde os erros de estimativa foram máximos, repetindo-se o procedimento até que o erro de estimativa encontrado fosse aceitável. A densidade quantitativa e espacial ótima foi alcançada quando a configuração dos postos reposicionados, incluídos ou excluídos esteve de acordo com a densidade mínima de estações sugerida pela OMM (1994), de forma a obter reduções significativas nos erros de estimativa, a partir da análise geoestatística dos dados.

A escolha de um local para instalação de uma estação de monitoramento fluviométrico deve ser feita com a preocupação de se obter a melhor qualidade de informação possível, considerando as propriedades geométricas e hidráulicas do trecho. Algumas variáveis intervenientes do processo de escolha do novo local para instalação da estação de monitoramento fluviométrico são: acessibilidade (estradas ou pontes), facilidade de operação (operador), geometria do local (seção encaixada), adaptabilidade às medições (seções retilíneas, com escoamento permanente e uniforme, distante de zonas de remanso, lagoas naturais e lagos artificiais), estabilidade da seção (curva-chave) e sensibilidade quanto à variação de nível (instalação de seção de réguas).

Apesar da evolução dos equipamentos de medição indireta de vazão, as condições hidráulicas e de operação das estações de monitoramento fluviométrico deverão sempre ser avaliadas *in loco*, de modo a aumentar a confiabilidade das informações geradas. Ressalta-se, no entanto, que a abordagem científica proposta apenas identifica localizações espaciais de trechos de cursos d'água onde deverão ser identificados locais adequados para instalação de novas seções de monitoramento.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. AVALIAÇÃO DA REDE EXISTENTE

3.1.1. Densidade Espacial de Estações Fluviométricas

Para cada ottobacia considerada identificou-se a área de drenagem, a declividade média, o número de estações fluviométricas em operação e a proposta do número mínimo de estações de monitoramento sugerida pela OMM (1994). A densidade de estações de monitoramento fluviométrico na bacia hidrográfica do rio Doce, em funcionamento e sugerida pela OMM, é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – Densidade de estações de monitoramento fluviométrico por ottobacia

Ottobacia	Ottocódigo	Decl. média (%)	Área (km ²)	Estações em funcionamento	Estações sugeridas pela OMM
Baixo Doce - ES	761	11,28	11.151	9	6
Rio Manhuaçu	762	13,46	8.765	8	5
Caratinga	763	8,68	9.098	4	5
Rio Suaçuí	764	7,98	12.392	6	7
Suaçuí Pequeno	765	9,28	6.079	3	3
Rio Santo Antônio	766	11,57	10.418	6	5
Ipatinga / Santana do Paraíso / Ipaba	767	6,78	1.008	1	1
Rio Piracicaba	768	11,52	5.451	4	3
Piranga	769	7,70	17.903	20	9
Rio Doce	76	9,79	82.265	61	44

Analisando-se a Tabela 2, observa-se que para todas as ottobacias o relevo pôde ser considerado levemente ondulado (EMBRAPA, 1999). A bacia hidrográfica do rio Doce, de forma global, apresenta uma rede de monitoramento fluviométrico com densidade de estações maior que a sugerida

pela OMM, que é de 44 estações fluviométricas, tendo em operação 61 postos de monitoramento. Analisando-se por ottobacia, verifica-se que as ottobacias Caratinga e rio Suaçuí, ottocódigos 763 e 764, respectivamente, possuem uma estação de monitoramento em funcionamento a menos que o número sugerido pela OMM. As demais regiões atendem, quantitativamente, à densidade de estações sugerida.

Este resultado, apesar de preliminarmente satisfatório, aponta a necessidade de uma revisão da rede de monitoramento fluviométrico da bacia hidrográfica do rio Doce, com a finalidade de otimização da rede. Cabe ressaltar que a análise proposta pela OMM é meramente quantitativa, devendo ser levada em consideração a distribuição espacial das estações.

3.1.2. Análise Estatística Descritiva

A análise estatística descritiva dos dados de vazão específica ($q_{7,10}$, q_{90} , q_{95} , q_{mld} , q_{max10} , q_{max20} , q_{max50} e q_{max100}) para as 61 estações de monitoramento fluviométrico, contemplando os valores médios, as medianas, os valores mínimos, máximos, os desvios padrão e o coeficiente de variação, é apresentada na Tabela 3. A unidade de vazão específica apresentada na Tabela 3, $L s^{-1} km^2$, embora não pertencente ao sistema internacional (SI), foi adotada de modo a evitar possíveis problemas na utilização do software GEO-EAS (ENGLUND & SPARKS, 1992) com relação a limitações no uso de casas decimais.

Tabela 3 – Estatística descritiva para as vazões específicas consideradas, em $L s^{-1} km^2$

ESTATÍSTICA	$q_{7,10}$	q_{90}	q_{95}	q_{mld}	q_{max10}	q_{max20}	q_{max50}	q_{max100}
Nº elementos	61	61	61	61	61	61	61	61
Média	3,36	5,26	4,55	14,68	186,81	227,15	272,86	307,46
Mediana	3,38	5,26	4,62	13,65	153,34	181,81	220,83	250,46
Mínimo	0,33	0,91	0,53	5,89	67,87	71,11	74,12	75,80
Máximo	9,46	11,72	10,64	30,16	613,74	826,69	1.030,34	1.182,94
Desvio-padrão	1,84	2,31	2,15	4,58	114,41	151,44	187,43	214,31
CV (%)	54,64	43,97	47,28	31,17	61,24	66,67	68,69	69,70
χ^2 calculado	6,56	3,04	10,99	12,13	21,59	28,01	16,76	33,70
χ^2 tabelado	7,82	9,49	11,07	9,49	9,49	9,49	7,82	9,49

Legenda: $q_{7,10}$ – vazão específica mínima média de sete dias consecutivos e com período de retorno de 10 anos, q_{90} – vazão específica mínima com permanência no tempo de 90%, q_{95} – vazão específica com permanência no tempo de 95%, q_{mld} – vazão específica média de longa duração, q_{max10} – vazão específica máxima com período de retorno de 10 anos, q_{max20} – vazão específica máxima com período de retorno de 20 anos, q_{max50} – vazão específica máxima com período de retorno de 50 anos e q_{max100} – vazão específica máxima com período de retorno de 100 anos.

Baseando-se na proposta apresentada por Warrick & Nielsen (1980), para classificação da variabilidade dos dados a partir do coeficiente de variação (CV), as vazões específicas mínimas e médias, $q_{7,10}$, q_{90} , q_{95} e q_{mld} , apresentaram variabilidade média ($12\% \leq CV < 60\%$) e as vazões específicas máximas, q_{max10} , q_{max20} , q_{max50} e q_{max100} , alta variabilidade ($CV \geq 60\%$) para a bacia hidrográfica do rio Doce.

Utilizando-se o teste de qui-quadrado, a hipótese de normalidade pôde ser aceita para as variáveis $q_{7,10}$, q_{90} e q_{95} a um nível de significância de 5% (Se χ^2 calculado < χ^2 tabelado, aceita-se a hipótese H_0 em que os dados obedecem a uma distribuição normal). Segundo Landim (2003), não sendo satisfeita a condição de normalidade, devem ser testadas transformações das variáveis, especialmente do tipo logarítmica. O autor adverte que após qualquer transformação será preciso realizar, posteriormente, uma transformação inversa, trazendo os resultados para a distribuição original. Realizou-se a transformação logarítmica para as variáveis q_{mld} , q_{max10} , q_{max20} , q_{max50} e q_{max100} , sendo a análise estatística das variáveis transformadas apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 – Estatística descritiva para as vazões específicas média e máximas, em $L s^{-1} km^2$

ESTATÍSTICA	$\log q_{mld}$	$\log q_{max10}$	$\log q_{max20}$	$\log q_{max50}$	$\log q_{max100}$
Nº elementos	61	61	61	61	61
Média	1,146	2,205	2,278	2,353	2,401
Mediana	1,135	2,186	2,260	2,344	2,399
Mínimo	0,770	1,832	1,852	1,870	1,880
Máximo	1,479	2,788	2,917	3,013	3,073
Desvio-padrão	0,137	0,237	0,255	0,265	0,271
CV (%)	11,96	10,75	11,19	11,26	11,29
χ^2 calculado	4,40	3,69	3,77	2,63	4,04
χ^2 tabelado	5,991	11,070	9,488	9,488	11,070

Legenda: $\log q_{mld}$ – logaritmo da vazão específica média de longa duração, $\log q_{max10}$ – logaritmo da vazão específica máxima com período de retorno de 10 anos, $\log q_{max20}$ – logaritmo da vazão específica máxima com período de retorno de 20 anos, $\log q_{max50}$ – logaritmo da vazão específica máxima com período de retorno de 50 anos e $\log q_{max100}$ – logaritmos da vazão específica máxima com período de retorno de 100 anos.

Após a transformação logarítmica houve diminuição da variabilidade dos dados ($CV < 12\%$) e a hipótese de normalidade, segundo o teste de aderência de qui-quadrado a um nível de significância de 5%, pôde ser aceita para as cinco variáveis transformadas: $\log q_{mld}$, $\log q_{max10}$, $\log q_{max20}$, $\log q_{max50}$ e

$\log q_{\max 100}$. Os diagramas de *box-plot* para as oito variáveis hidrológicas estudadas são apresentados nas Figuras 3 e 4.

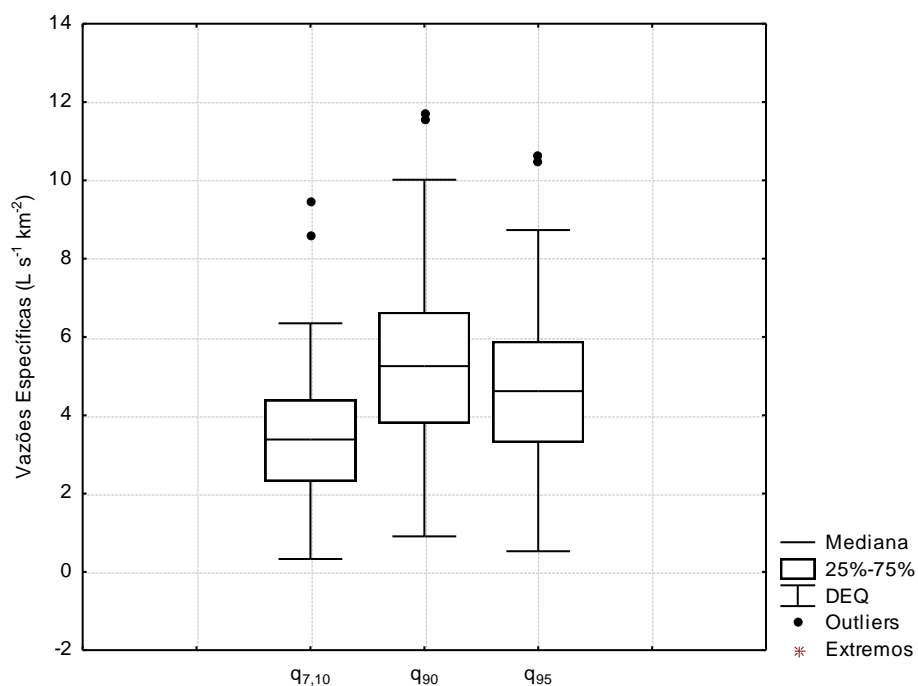


Figura 3 – Box plot para as vazões específicas $q_{7,10}$, q_{90} e q_{95} .

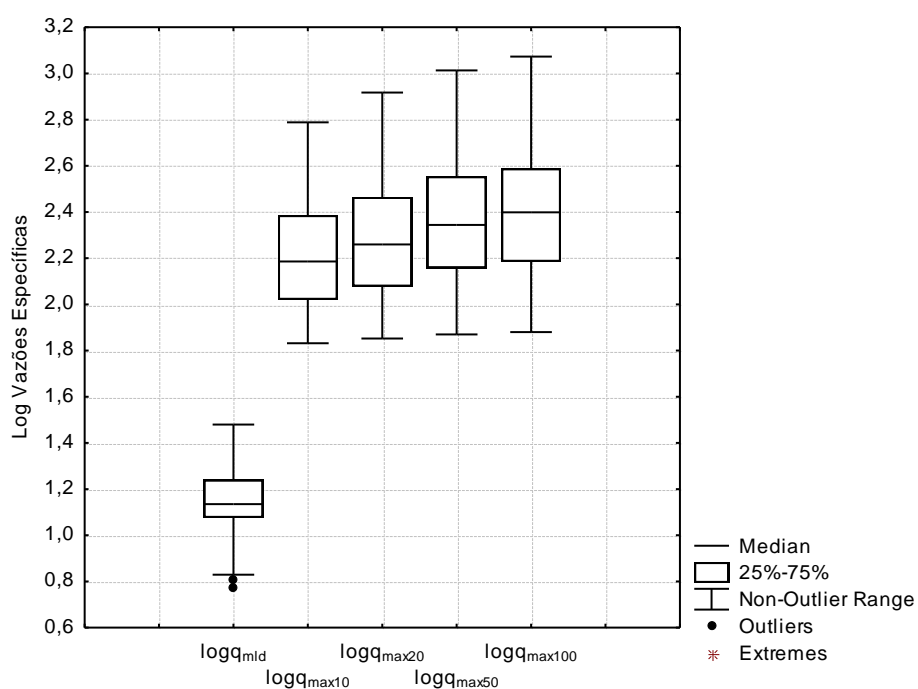


Figura 4 – Box plot para as vazões específicas $\log q_{\text{mld}}$, $\log q_{\max 10}$, $\log q_{\max 20}$, $\log q_{\max 50}$ e $\log q_{\max 100}$.

Nas Figuras 3 e 4 pode-se observar que as variáveis $q_{7,10}$, q_{90} , q_{95} e $\log q_{\text{mld}}$ apresentaram valores discrepantes (outliers). Estes valores discrepantes referem-se às estações de monitoramento 56335001, 56337000,

56900000 e 56155000. Para Draper & Smith (1981) a rejeição automática de valores discrepantes ou extremos não é um procedimento correto e as regras propostas para rejeição dos mesmos devem incluir a reanálise sem essas observações que, dependendo das circunstâncias, podem ser portadoras de informações vitais dos indivíduos de uma população.

Antes da análise geoestatística da rede fluviométrica verificou-se a existência de tendência espacial nos dados avaliados. Estas tendências, em variáveis de vazão, podem ocorrer devido a vários fatores, podendo-se citar: precipitação, declividade, uso e ocupação do solo e disposição geográfica da rede de drenagem. Foram testados os ajustes das superfícies de tendência de 1º, 2º e 3º graus tendo sido descartada a possibilidade de ajuste de tendência linear, quadrática e cúbica para as oito variáveis hidrológicas avaliadas, por terem apresentado coeficientes de determinação (R^2) menores que 0,55 (SANTOS, 2007).

3.2. OTIMIZAÇÃO E REARRANJO DA REDE

3.2.1. Análise Geoestatística

Com base nas 61 estações de monitoramento fluviométrico estimaram-se as semivariâncias experimentais das vazões específicas estudadas ($q_{7,10}$, q_{90} , q_{95} , $\log q_{\text{mld}}$, $\log q_{\text{max}10}$, $\log q_{\text{max}20}$, $\log q_{\text{max}50}$ e $\log q_{\text{max}100}$), utilizando-se o estimador clássico (Equação 3).

Para as variáveis $q_{7,10}$, q_{90} e q_{95} foi utilizado o incremento (lag) de 13 km, distância de separação mínima de 10 km e distância de separação máxima de 100 km. Para a variável $\log q_{\text{mld}}$ houve distinção apenas do alcance máximo, que foi de 120 km. Já para as variáveis $\log q_{\text{max}10}$, $\log q_{\text{max}20}$, $\log q_{\text{max}50}$ e $\log q_{\text{max}100}$ foi utilizado o incremento de 17 km, alcance mínimo de 10 km e o alcance máximo de 140 km. O alcance mínimo observado deve-se principalmente à descontinuidade existente entre pontos de monitoramento próximos (distâncias menores que 10 km), localizados em cursos d'água adjacentes, cujas características hidrológicas diferem consideravelmente.

Após a obtenção dos semivariogramas experimentais procurou-se ajustar os modelos teóricos através dos quais fosse mais bem caracterizado o comportamento espacial das variáveis estudadas. Assumiu-se a isotropia do

domínio no tocante à estrutura de dependência espacial. As variáveis, os parâmetros dos modelos e os modelos ajustados podem ser visualizados na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros dos modelos de semivariogramas teóricos ajustados aos dados experimentais de $q_{7,10}$, q_{90} , q_{95} , $\log q_{\text{mld}}$, $\log q_{\text{max}10}$, $\log q_{\text{max}20}$, $\log q_{\text{max}50}$ e $\log q_{\text{max}100}$

Parâmetros	$q_{7,10}$	q_{90}	q_{95}	$\log q_{\text{mld}}$	$\log q_{\text{max}10}$	$\log q_{\text{max}20}$	$\log q_{\text{max}50}$	$\log q_{\text{max}100}$
Efeito Pepita (C_0)	0,400	0,100	0,150	0,001	0,025	0,032	0,036	0,040
Patamar (C_0+C_1)	2,300	3,150	2,900	0,011	0,047	0,054	0,058	0,062
Alcance (m)	60000	60000	60000	100000	100000	100000	100000	100000
$C_0 / (C_0+C_1)^*$	17,39	3,17	5,17	9,09	53,19	59,25	62,07	64,52
Modelo	Esférico	Esférico	Esférico	Esférico	Esférico	Esférico	Esférico	Esférico

Legenda: $q_{7,10}$ – vazão específica mínima média de sete dias consecutivos e com período de retorno de 10 anos, q_{90} – vazão específica mínima com permanência no tempo de 90%, q_{95} – vazão específica com permanência no tempo de 95%, $\log q_{\text{mld}}$ – logaritmo da vazão específica média de longa duração, $\log q_{\text{max}10}$ – logaritmo da vazão específica máxima com período de retorno de 10 anos, $\log q_{\text{max}20}$ – logaritmo da vazão específica máxima com período de retorno de 20 anos, $\log q_{\text{max}50}$ – logaritmo da vazão específica máxima com período de retorno de 50 anos e $\log q_{\text{max}100}$ – logaritmo da vazão específica máxima com período de retorno de 100 anos.

* $C_0 / (C_0+C_1)$ – grau de dependência espacial de Cambardella et al. (1994), em (%).

Analisando-se a Tabela 5, observa-se que modelo do tipo esférico foi o que melhor se ajustou, para todas as variáveis, às semivariâncias experimentais. Verifica-se, ainda, nos ajustes dos semivariogramas teóricos obtidos, alcances de 60 km para as vazões características mínimas e 100 km para as vazões características médias e máximas. Segundo Landim (2003) os alcances fornecem o tamanho da zona de influência em torno de uma amostra.

Segundo relação entre efeito pepita e patamar proposta por Cambardella e colaboradores (1994), as variáveis $q_{7,10}$, q_{90} , q_{95} e $\log q_{\text{mld}}$ apresentaram forte dependência espacial (menores que 25%), com graus de 17,39%, 3,17%, 5,17% e 9,09%, respectivamente. Já as variáveis $\log q_{\text{max}10}$, $\log q_{\text{max}20}$, $\log q_{\text{max}50}$ e $\log q_{\text{max}100}$ apresentaram, segundo os autores, dependência espacial moderada (entre 25% e 75%) com graus de 53,19%; 59,25%; 62,07% e 64,52%, respectivamente.

A verificação do modelo teórico ajustado (Esférico) foi feita a partir do método de validação cruzada (VAUCLIN et al., 1983). Na Tabela 6 são apresentadas as médias e os desvios padrão dos resíduos produzidos pela validação cruzada para as variáveis estudadas.

Tabelas 6 – Estatísticas dos resíduos produzidos pela validação cruzada

Resíduos	$q_{7,10}$	q_{90}	q_{95}	$\log q_{mld}$	$\log q_{max10}$	$\log q_{max20}$	$\log q_{max50}$	$\log q_{max100}$
Média	0,021	0,005	0,014	-0,022	-0,021	-0,014	-0,005	-0,001
Desv. Pad.	1,068	1,056	1,049	0,973	0,960	0,972	0,975	0,968

Legenda: $q_{7,10}$ – vazão específica mínima média de sete dias consecutivos e com período de retorno de 10 anos, q_{90} – vazão específica mínima com permanência no tempo de 90%, q_{95} – vazão específica com permanência no tempo de 95%, $\log q_{mld}$ – logaritmo da vazão específica média de longa duração, $\log q_{max10}$ – logaritmo da vazão específica máxima com período de retorno de 10 anos, $\log q_{max20}$ – logaritmo da vazão específica máxima com período de retorno de 20 anos, $\log q_{max50}$ – logaritmo da vazão específica máxima com período de retorno de 50 anos e $\log q_{max100}$ – logaritmo da vazão específica máxima com período de retorno de 100 anos.

Analisando-se os resultados apresentados na Tabela 6 observou-se que as médias e os desvios padrão dos resíduos puderam ser considerados suficientemente próximos de zero e um, respectivamente, validando os modelos teóricos ajustados para as variáveis consideradas.

Nas Figuras 5 a 12 são apresentadas as semivariâncias experimentais e os ajustes dos modelos teóricos dispostos na Tabela 6 para as variáveis $q_{7,10}$, q_{90} , q_{95} , $\log q_{mld}$, $\log q_{max10}$, $\log q_{max20}$, $\log q_{max50}$ e $\log q_{max100}$, respectivamente.

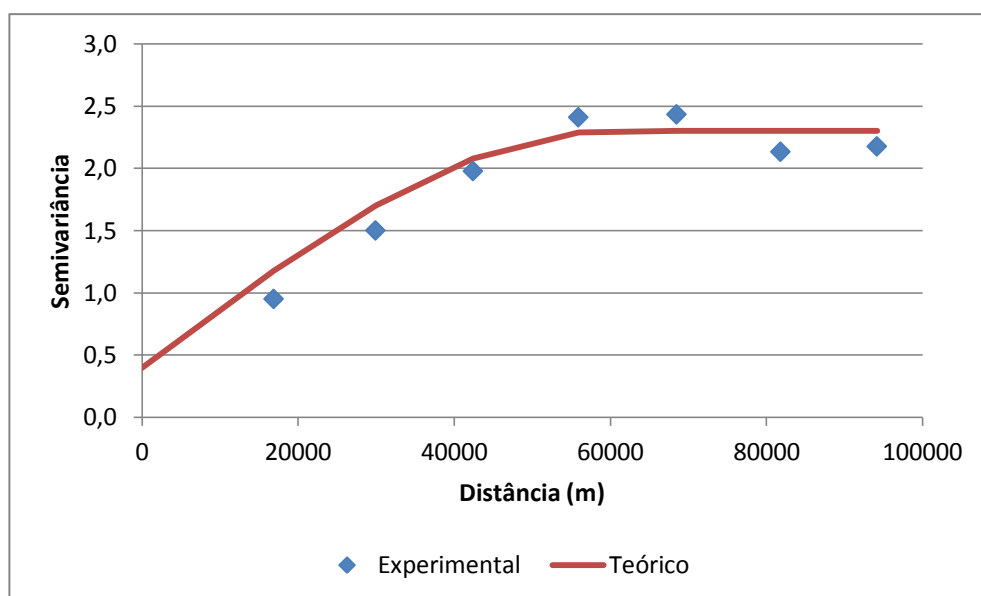


Figura 5 – Semivariograma experimental e teórico para $q_{7,10}$.

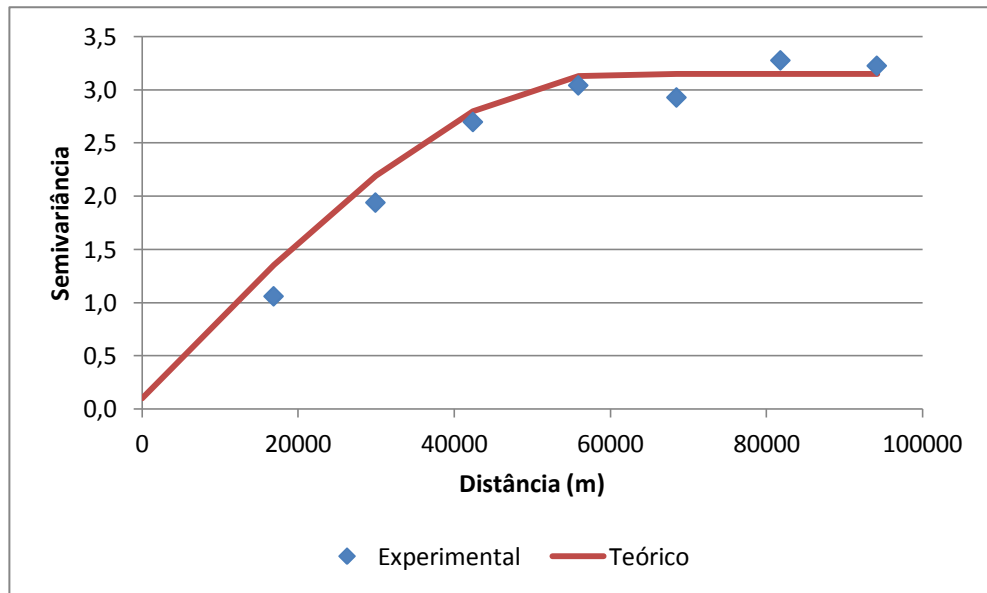


Figura 6 – Semivariograma experimental e teórico para q_{90} .

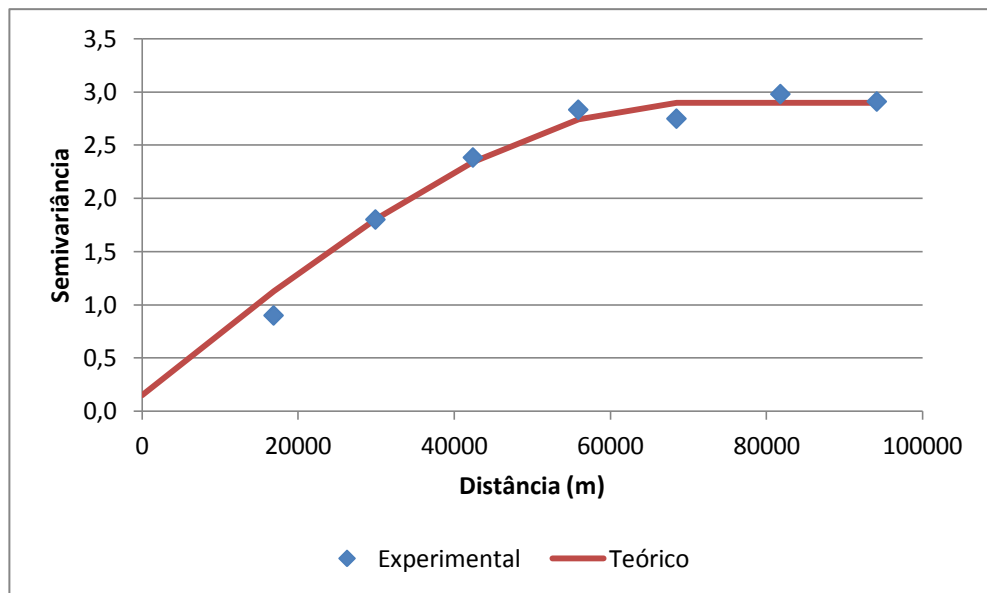


Figura 7 – Semivariograma experimental e teórico para q_{95} .

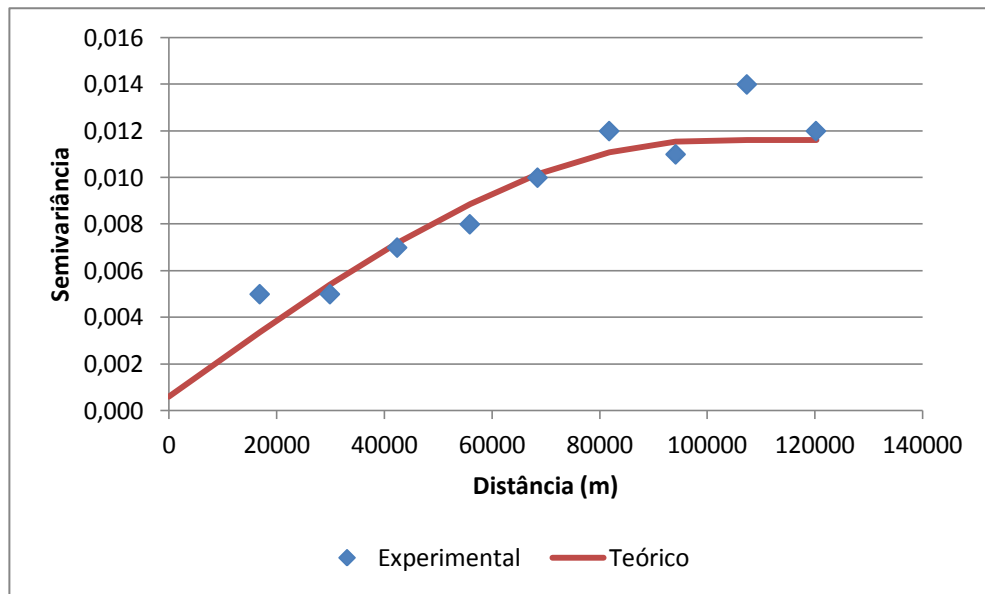


Figura 8 – Semivariograma experimental e teórico para $\log q_{mld}$.

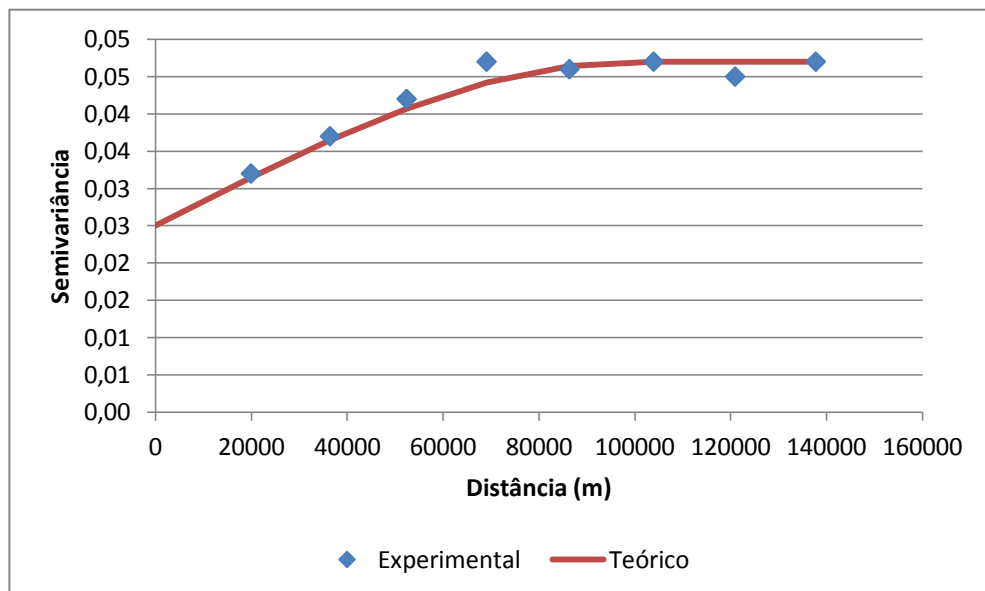


Figura 9 – Semivariograma experimental e teórico para $\log q_{max10}$.

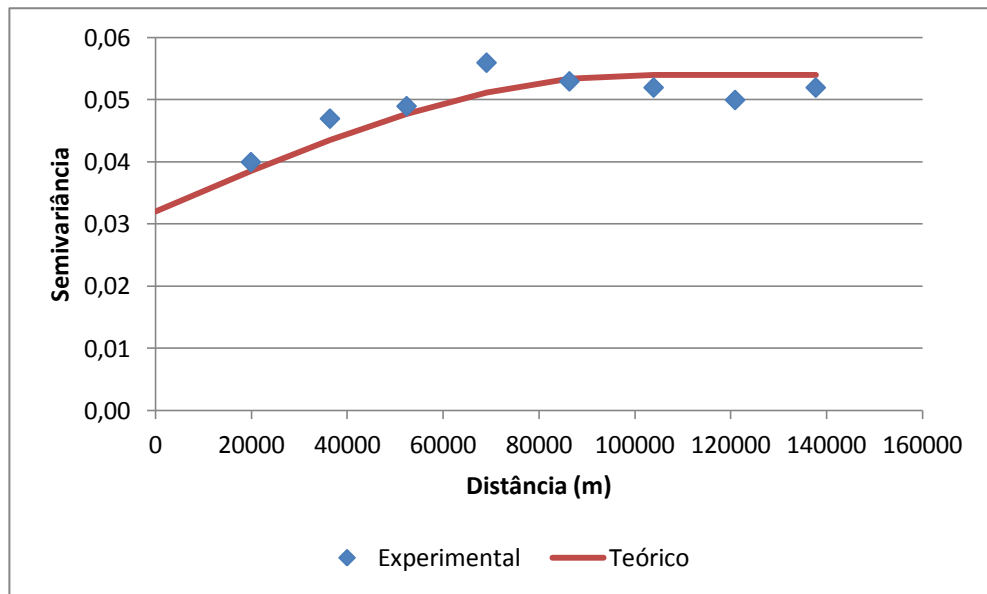


Figura 10 – Semivariograma experimental e teórico para $\log q_{\max 20}$.

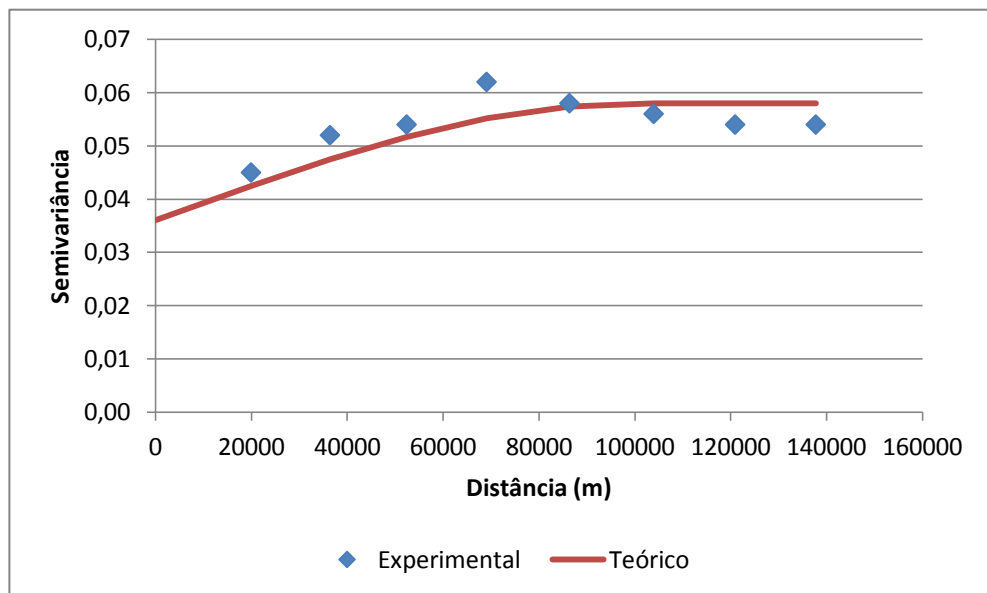


Figura 11 – Semivariograma experimental e teórico para $\log q_{\max 50}$.

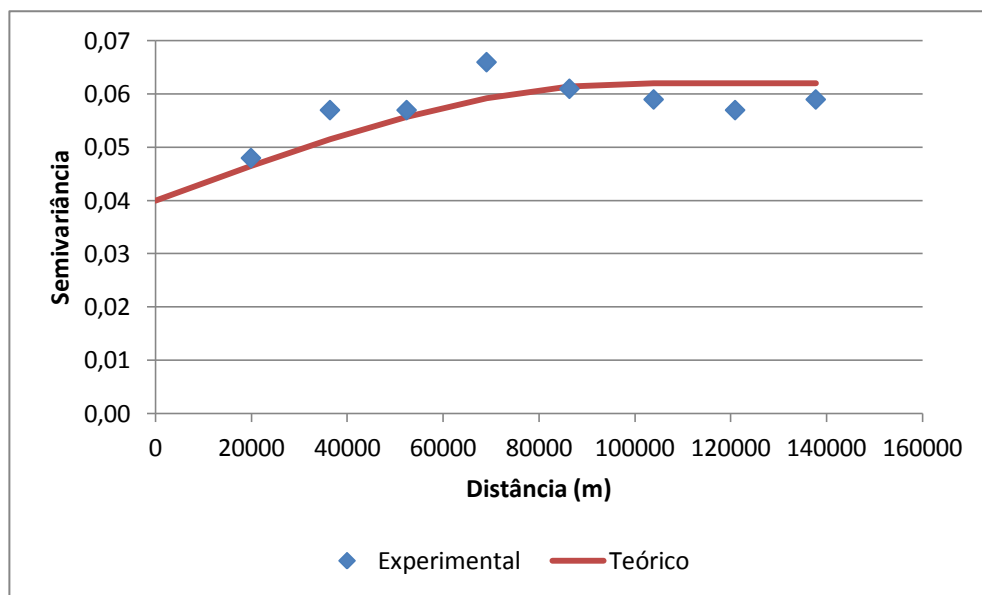


Figura 12 – Semivariograma experimental e teórico para $\log q_{\max 100}$.

Analisando-se as Figuras 5 a 12 pode-se observar graficamente o ajuste do modelo teórico tipo esférico às semivariâncias experimentais e a diferença dos graus de dependência espacial entre as variáveis $q_{7,10}$, q_{90} , q_{95} e $\log q_{\text{mld}}$ (forte dependência espacial) e as variáveis $\log q_{\max 10}$, $\log q_{\max 20}$, $\log q_{\max 50}$ e $\log q_{\max 100}$ (dependência espacial moderada).

Aplicando-se a técnica de interpolação de krigagem, a partir dos semivariogramas teóricos ajustados, foram obtidos os mapas espacializados de vazões específicas (Figuras 13 a 20) e os respectivos mapas de desvio padrão das estimativas (Figuras 21 a 28), para as oito variáveis hidrológicas em análise, na bacia hidrográfica do rio Doce. É importante ressaltar que aplicou-se a transformação logarítmica inversa para apresentação dos dados espacializados das variáveis q_{mld} , $q_{\max 10}$, $q_{\max 20}$, $q_{\max 50}$ e $q_{\max 100}$.

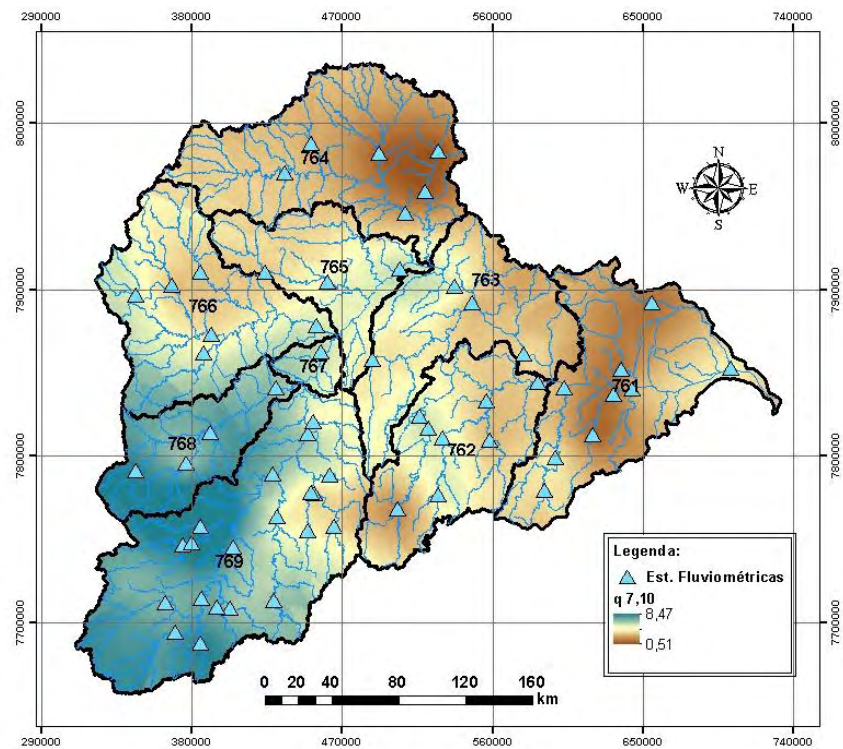


Figura 13 – Mapa de vazão específica $q_{7,10}$ espacializada, em $L s^{-1} km^{-2}$.

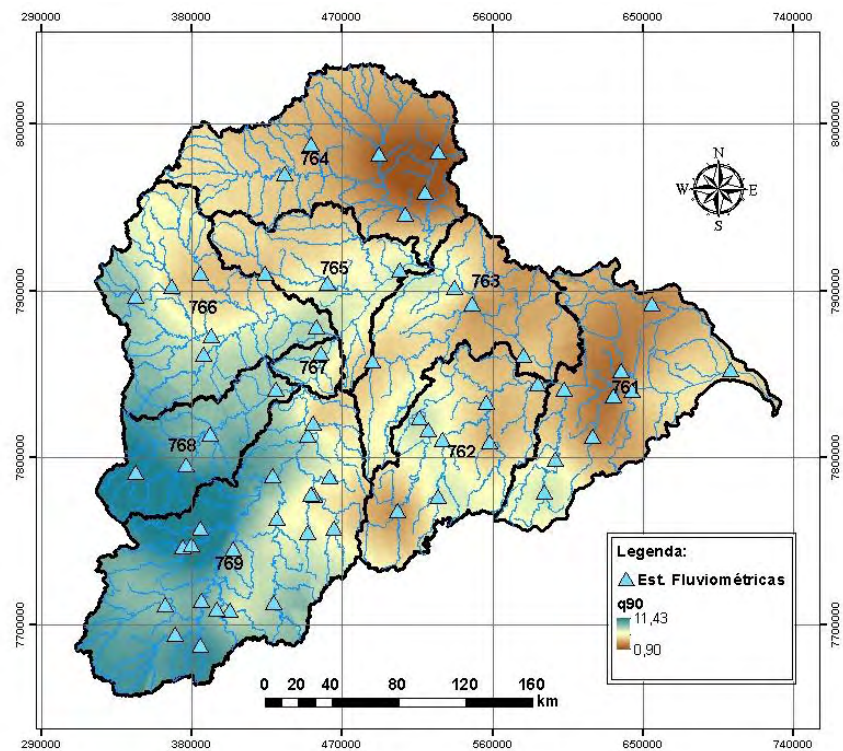


Figura 14 - Mapa de vazão específica q_{90} espacializada, em $L s^{-1} km^{-2}$.

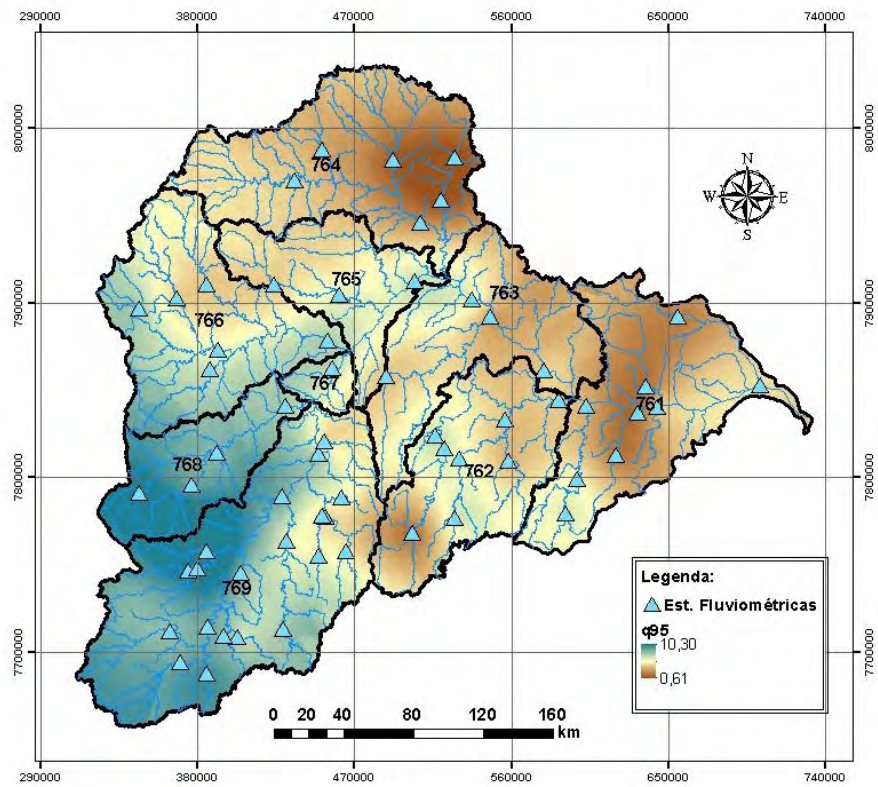


Figura 15 – Mapa de vazão específica q_{95} espacializada, em $L s^{-1} km^{-2}$.

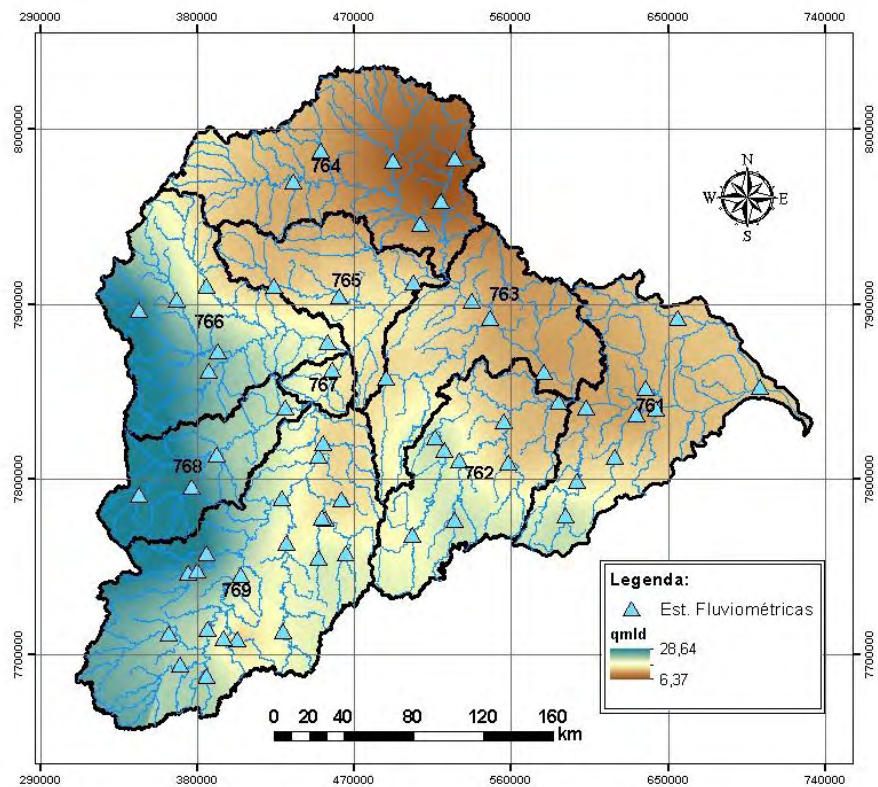


Figura 16 – Mapa de vazão específica q_{mld} espacializada, em $L s^{-1} km^{-2}$.

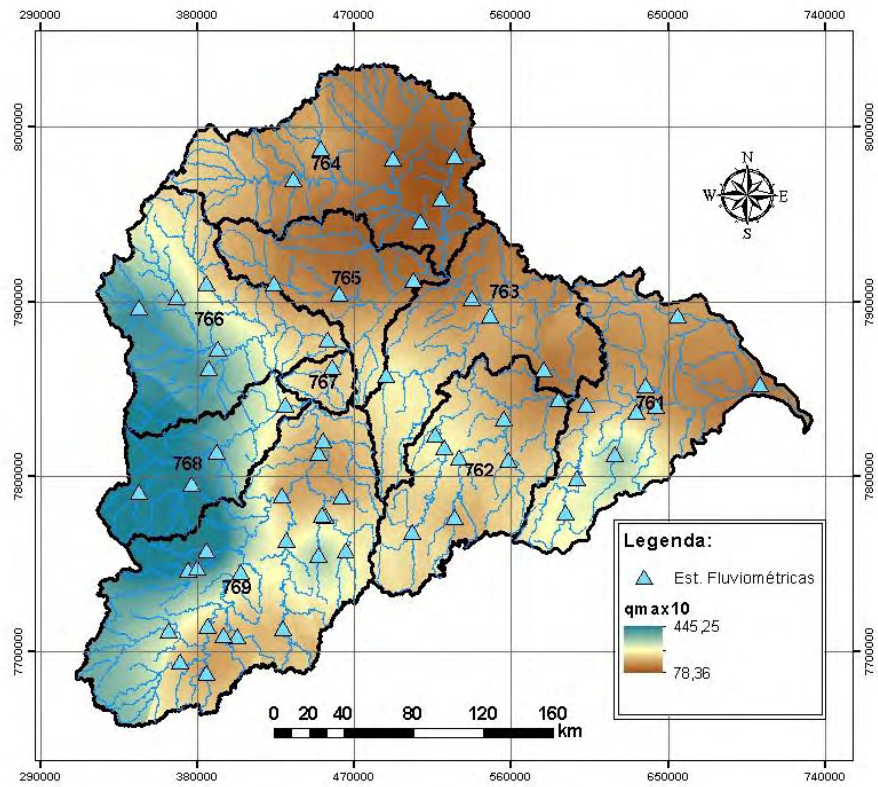


Figura 17 – Mapa de vazão específica $q_{\max10}$ espacializada, em $L s^{-1} km^{-2}$.

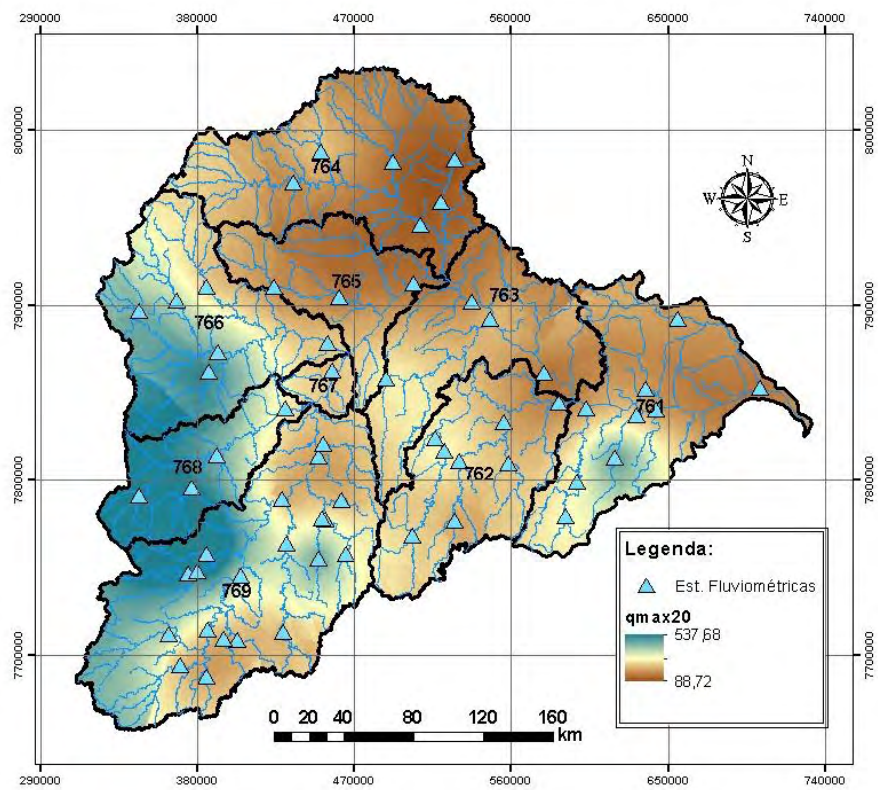


Figura 18 – Mapa de vazão específica $q_{\max20}$ espacializada, em $L s^{-1} km^{-2}$.

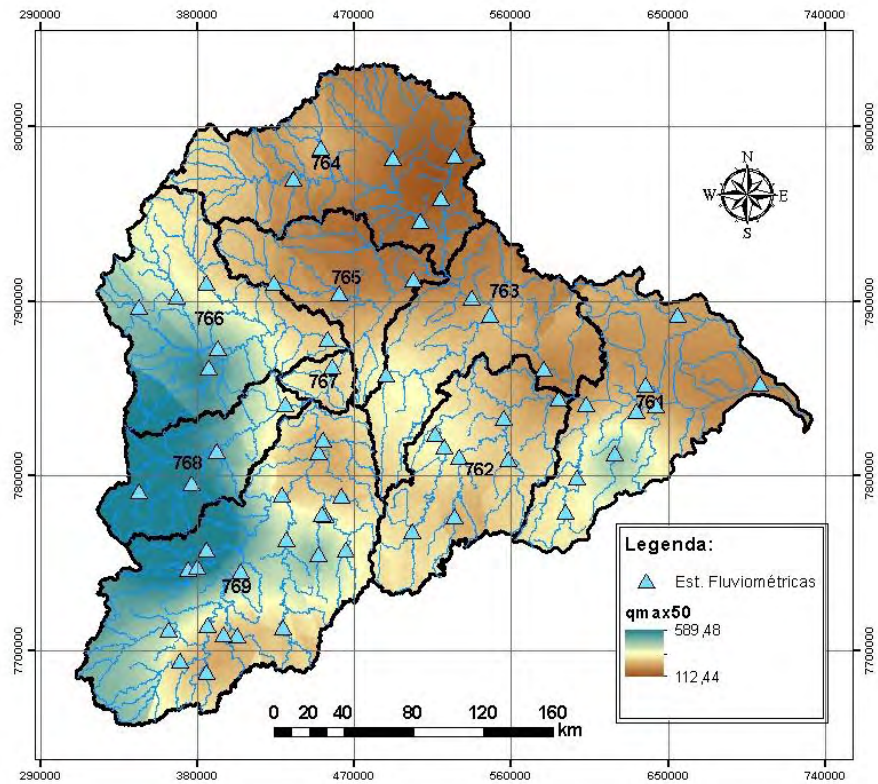


Figura 19 – Mapa de vazão específica $q_{\max 50}$ espacializada, em $L s^{-1} km^{-2}$.

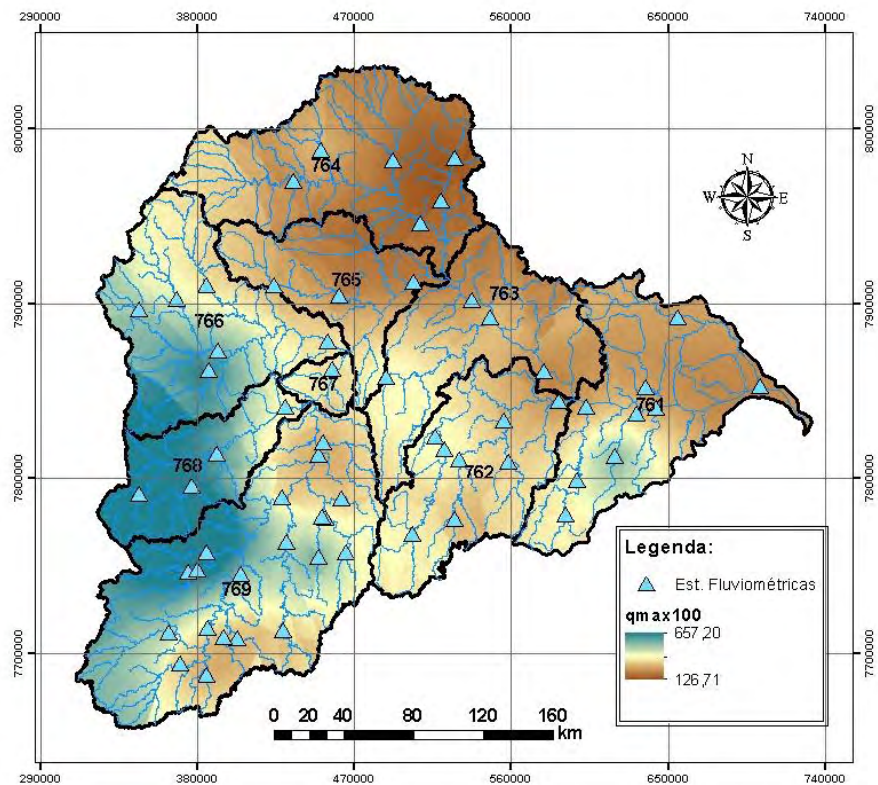


Figura 20 – Mapa de vazão específica $q_{\max 100}$ espacializada, em $L s^{-1} km^{-2}$.

Analisando-se os mapas de vazões específicas de todas as variáveis estudadas verifica-se um padrão de comportamento na bacia hidrográfica do

rio Doce que, de forma geral, diminuem de oeste para leste, das regiões mais declivosas e com índices de precipitação anual maiores para as regiões menos declivosas e com índices de precipitação anual menores.

As estimativas de vazões específicas, em $L s^{-1} km^{-2}$, na bacia do rio Doce variaram de 0,51 a 8,47 para $q_{7,10}$; de 0,90 a 11,43 para q_{90} ; de 0,61 a 10,30 para q_{95} ; de 6,37 a 28,64 para q_{mld} ; de 78,36 a 445,25 para q_{max10} ; de 88,72 a 537,68 para q_{max20} ; de 112,44 a 589,48 para q_{max50} e de 126,71 a 657,20 para q_{max100} .

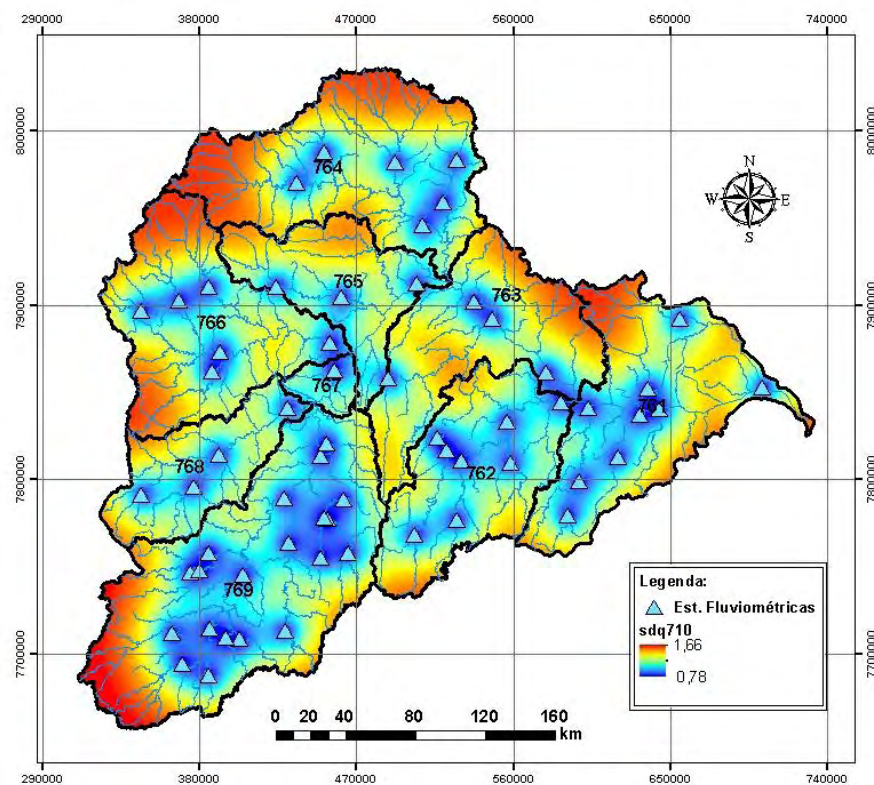


Figura 21 – Mapa de desvio padrão da estimativa de $q_{7,10}$, em $L s^{-1} km^{-2}$.

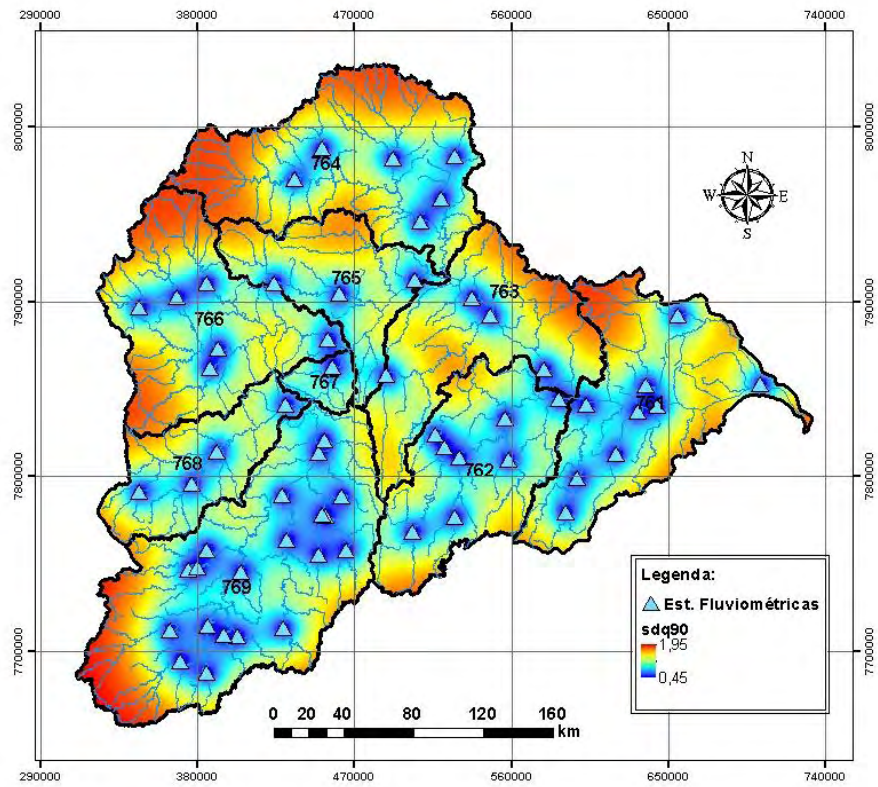


Figura 22 – Mapa de desvio padrão da estimativa de q_{90} , em $L s^{-1} km^{-2}$.

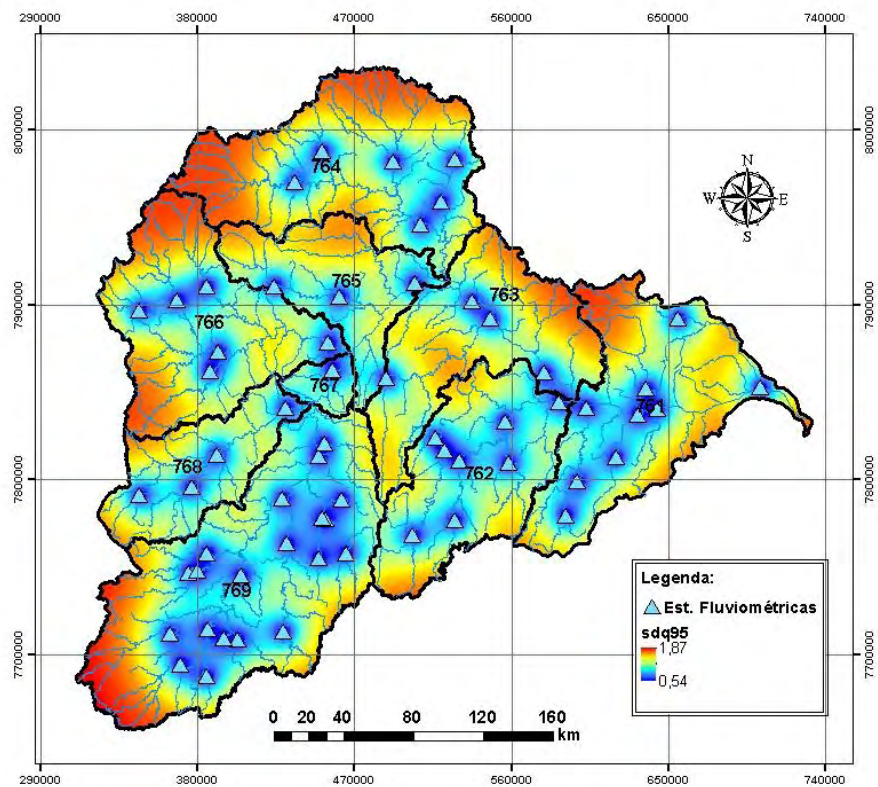


Figura 23 – Mapa de desvio padrão da estimativa de q_{95} , em $L s^{-1} km^{-2}$.

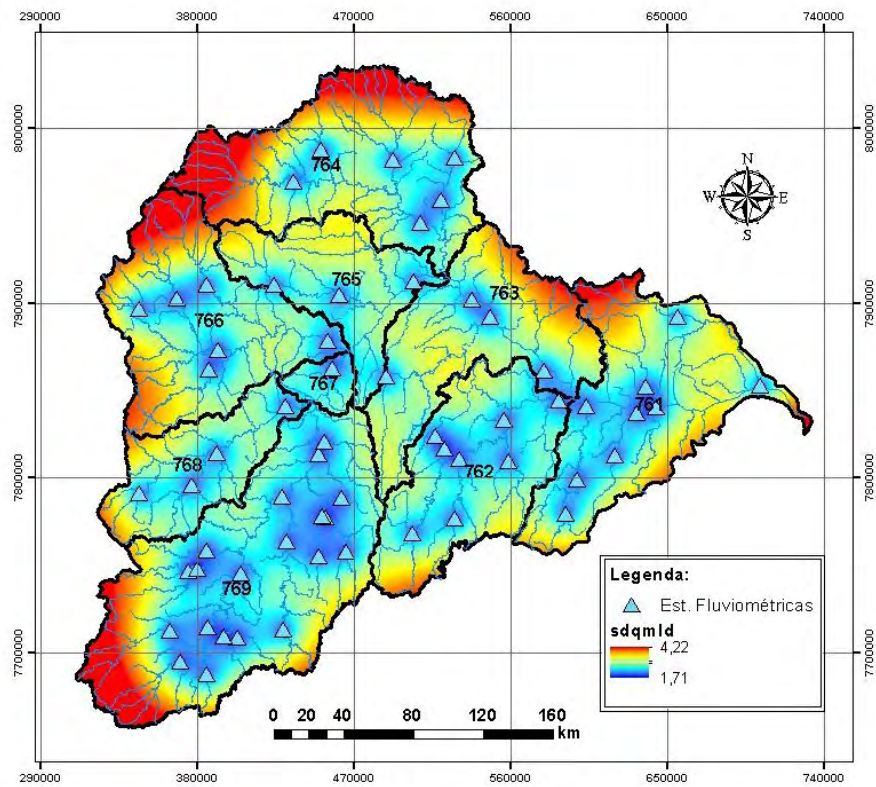


Figura 24 – Mapa de desvio padrão da estimativa de q_{mld} , em $L s^{-1} km^{-2}$.

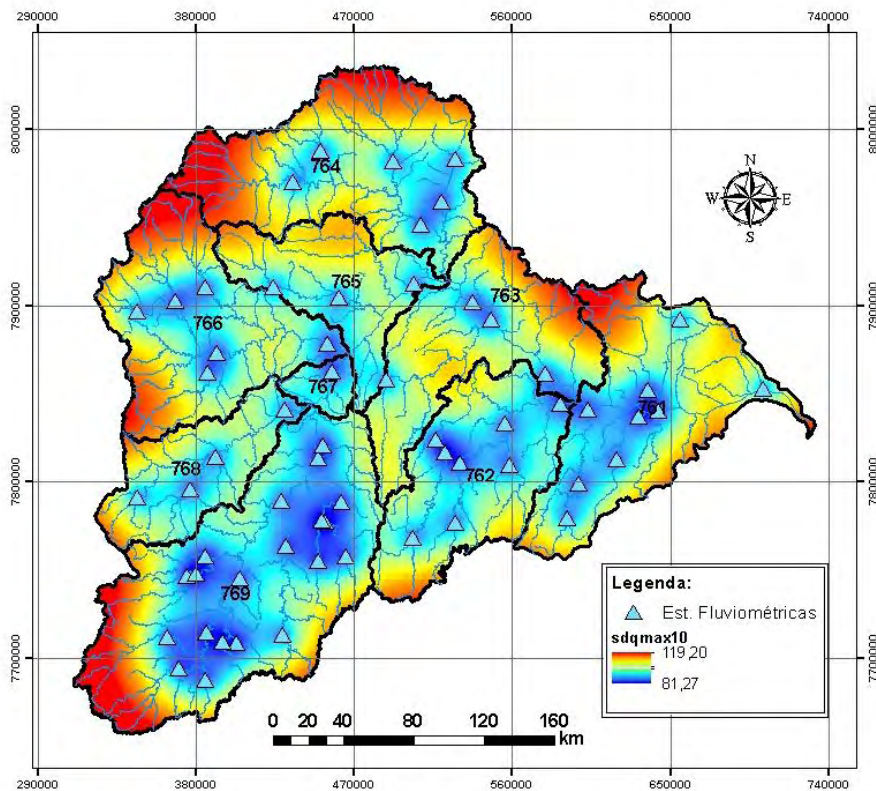


Figura 25– Mapa de desvio padrão da estimativa de q_{max10} , em $L s^{-1} km^{-2}$.

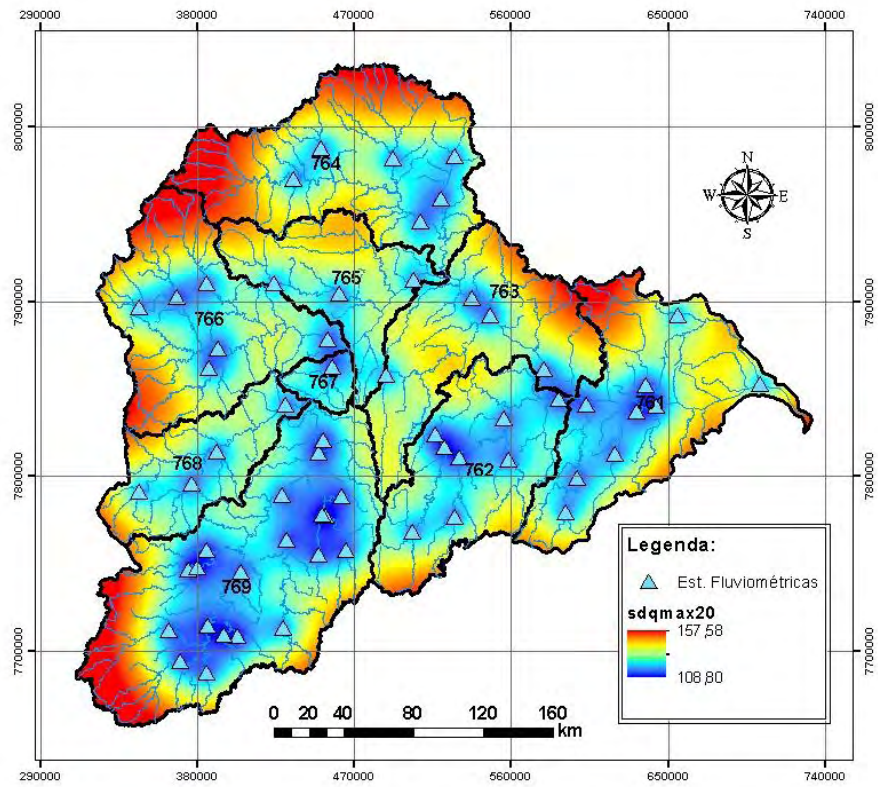


Figura 26 – Mapa de desvio padrão da estimativa de $q_{\max 20}$, em $L s^{-1} km^{-2}$.

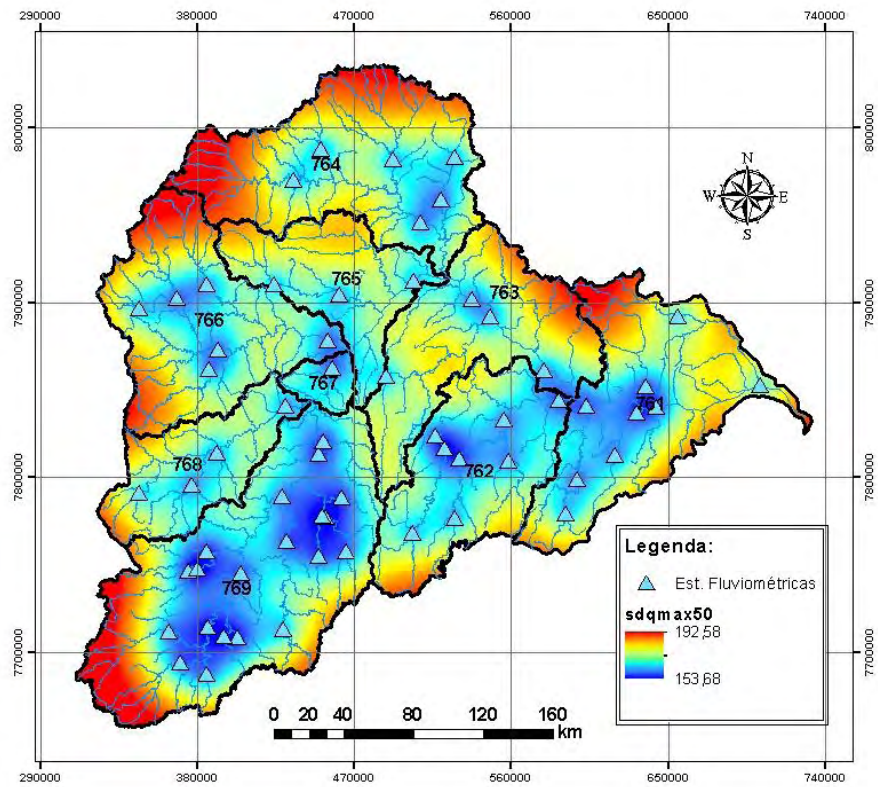


Figura 27 – Mapa de desvio padrão da estimativa de $q_{\max 50}$, em $L s^{-1} km^{-2}$.

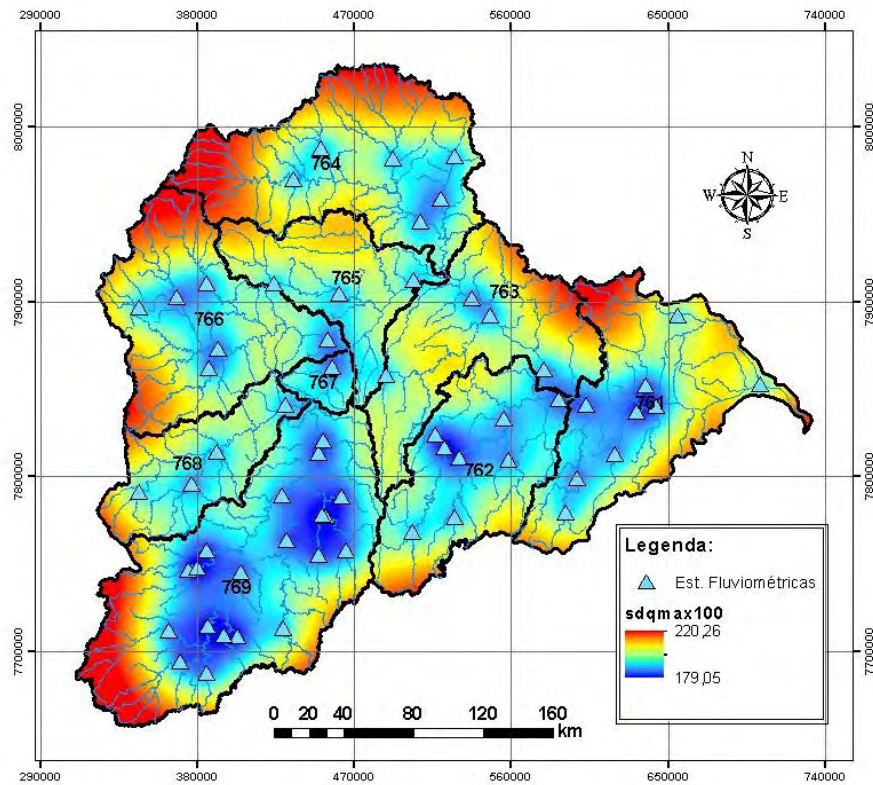


Figura 28 – Mapa de desvio padrão da estimativa de $q_{\max 100}$, em $L s^{-1} km^{-2}$.

Os mapas de desvio padrão das estimativas, obtidos pela técnica de krigagem, também apresentaram padrão de comportamento semelhante para as variáveis estudadas. As regiões de coloração laranja/vermelha (maiores erros) indicaram regiões propensas a receberem novas estações de monitoramento. Analisando-se as Figuras 21 a 28 fica claro que os maiores erros de estimativa, para todas as variáveis em estudo, situam-se nas regiões de cabeceira, evidenciados nas ottobacias 761 (rio São José), 764 (rio Suaçuí Grande), 766 (rio Santo Antônio) e 769 (rio Piranga).

Os desvios padrão associados às estimativas das vazões específicas, em $L s^{-1} km^{-2}$, variaram de 0,78 a 1,66 para $q_{7,10}$; de 0,45 a 1,95 para q_{90} ; de 0,54 a 1,87 para q_{95} ; de 1,71 a 4,22 para q_{mld} ; de 81,27 a 119,20 para $q_{\max 10}$; de 108,80 a 157,58 para $q_{\max 20}$; de 153,68 a 192,58 para $q_{\max 50}$ e de 179,05 a 220,26 para $q_{\max 100}$.

Com o objetivo de comparar os resultados obtidos para as variáveis em análise, dividiu-se a matriz de desvio padrão pela sua respectiva matriz de estimativas, obtendo-se o desvio padrão percentual para a área em estudo. Na Tabela 7 são apresentadas as estatísticas dos desvios padrão percentuais

obtidos para a rede de monitoramento fluviométrico existente na bacia hidrográfica do rio Doce, dividida por ottobacias.

Tabela 7 – Desvios padrão percentuais para a rede de monitoramento existente

Vazão	Estatística	Desvio Padrão Percentual									
		761	762	763	764	765	766	767	768	769	76
Q _{7,10}	Mínimo	28	22	24	32	21	23	21	15	10	10
	Médio	70	45	50	79	43	40	30	24	27	48
	Máximo	116	71	85	219	67	59	40	33	60	219
Q ₉₀	Mínimo	9	8	9	11	9	7	8	5	4	4
	Médio	40	29	36	50	30	26	21	16	19	31
	Máximo	64	43	61	123	49	41	33	23	36	123
Q ₉₅	Mínimo	12	11	12	15	11	10	11	7	6	6
	Médio	48	34	41	60	33	29	23	18	21	36
	Máximo	76	57	70	177	54	46	36	26	48	177
Q _{mid}	Mínimo	11	11	14	17	14	8	13	7	8	7
	Médio	21	17	23	30	21	15	16	12	15	20
	Máximo	35	23	37	44	28	28	19	16	21	44
Q _{max10}	Mínimo	33	41	44	59	47	28	48	20	21	20
	Médio	67	58	74	92	84	44	54	32	48	62
	Máximo	100	82	111	120	119	74	58	54	73	120
Q _{max20}	Mínimo	32	44	50	58	53	29	52	23	21	21
	Médio	75	66	81	101	95	50	61	36	52	69
	Máximo	112	93	124	140	133	83	67	61	81	140
Q _{max50}	Mínimo	43	54	57	72	58	36	57	29	27	27
	Médio	80	70	84	107	95	54	65	40	55	73
	Máximo	115	96	130	149	131	83	72	65	81	149
Q _{max100}	Mínimo	44	56	58	73	60	37	58	31	28	28
	Médio	82	70	86	108	95	56	66	42	57	74
	Máximo	118	96	133	154	131	82	74	66	83	154

Legenda: Q_{7,10} – vazão específica mínima média de sete dias consecutivos e com período de retorno de 10 anos, Q₉₀ – vazão específica mínima com permanência no tempo de 90%, Q₉₅ – vazão específica com permanência no tempo de 95%, Q_{mid} – vazão específica média de longa duração, Q_{max10} – vazão específica máxima com período de retorno de 10 anos, Q_{max20} – vazão específica máxima com período de retorno de 20 anos, Q_{max50} – vazão específica máxima com período de retorno de 50 anos e Q_{max100} – vazão específica máxima com período de retorno de 100 anos.

Analisando-se a Tabela 7 observa-se que os desvios padrão percentuais máximos, ocorreram na ottobacia 764 (Suaçuí), para todas as vazões características analisadas, elevando o valor do erro máximo para toda a bacia (bacia 76). Esta observação deve-se principalmente ao número reduzido de estações de monitoramento na região (menor que o sugerido pela OMM) e à má distribuição espacial da rede fluviométrica nesta sub-bacia.

As ottobacias 761 (Baixo Doce), 763 (Caratinga) e 765 (Suaçuí Pequeno) também apresentaram altos desvios padrão percentuais, para todas

as vazões consideradas, tendo como principal motivo a má distribuição espacial da rede. A ottobacia 763, além de possuir uma rede de monitoramento espacialmente má distribuída, possui uma estação de monitoramento a menos que o número sugerido pela OMM.

Os menores erros padrão percentuais foram encontrados na ottobacia 769 (Piranga) devido principalmente ao fato desta possuir o maior número de estações de monitoramento de toda a bacia do rio Doce (onze estações fluviométricas a mais que o número sugerido pela OMM). Apesar de densamente monitorada a ottobacia 769 apresenta erros consideráveis na região de cabeceira do rio principal.

Considerando-se os resultados obtidos pela análise geoestatística dos dados de vazão específica, constata-se que apesar de quantitativamente a rede de monitoramento fluviométrico da bacia do rio Doce, em grande parte, atender às condições de densidade mínima de estações sugerida pela OMM (1994), a distribuição espacial da mesma pode ser consideravelmente aprimorada, visando a obtenção de uma melhor qualidade nas estimativas geradas.

3.2.2. Proposta Metodológica para Rearranjo e Otimização da Rede

De acordo com a análise quantitativa apresentada na Tabela 2, a bacia hidrográfica do rio Doce possui 17 estações a mais do que a densidade mínima de 44 estações de monitoramento proposta pela Organização Meteorológica Mundial. Conforme a proposta metodológica, a partir dos mapas de desvio padrão obtidos identificou-se os pontos onde os erros locais foram consideráveis ou desprezíveis, partindo-se, na sequência, para a exclusão, inclusão ou reposicionamento dos postos de monitoramento fluviométrico. Como o diagnóstico inicial da rede de monitoramento foi favorável em relação à análise quantitativa, fez-se o reposicionamento ou exclusão de estações da rede, visando a otimização da mesma.

O trabalho foi feito em etapas, iniciando-se pela exclusão de estações em regiões densamente monitoradas (etapa 1) e prosseguindo-se com o reposicionamento de estações em regiões que apresentavam os maiores erros de estimativa (etapas seguintes). Após cada etapa refez-se a análise geoestatística, gerando novos mapas de desvios. Os semivariogramas e as

configurações adotadas para a análise espacial a partir da técnica de krigagem foram preservados até a conclusão da metodologia proposta.

Na Tabela 8 é disposto, para cada etapa, e por região de análise, o número de estações excluídas e incluídas até a conclusão da rede proposta. É importante ressaltar que o número de etapas do trabalho pode variar muito, dependendo de uma série de fatores de cunho estratégico e gerencial, por parte dos órgãos responsáveis pela rede, tais como: previsão orçamentária, ordens de prioridade na gestão da bacia hidrográfica, propósito da rede, número de profissionais envolvidos, entre outros.

Tabela 8 – Densidade de estações de monitoramento fluviométrico por ottobacia

Ottobacia	OttoCódigo	Número de estações					
		Existente	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 4	Proposta
Baixo Doce - ES	761	9	-3	1	1	1	9
Rio Manhuaçu	762	8	-3	1	-	-	6
Caratinga	763	4	-2	2	1	1	6
Rio Suaçuí	764	6	-1	1	1	1	8
Suaçuí Pequeno	765	3	-	1	1	-	5
Rio Santo Antônio	766	6	-2	1	1	-	6
Ipatinga / Santana do Paraíso / Ipaba	767	1	-	-	-	-	1
Rio Piracicaba	768	4	-	-	-	-	4
Piranga	769	20	-9	1	1	1	14
Rio Doce	76	61	-20	8	6	4	59

Analisando-se a Tabela 8 pode-se observar a exclusão de 20 estações na primeira etapa, sendo três na região do Baixo Doce, três na região do rio Manhuaçu, duas na região do rio Caratinga, uma na região do rio Suaçuí, duas na região do rio Santo Antônio e nove na região do rio Piranga. Apenas duas das 20 estações excluídas foram identificadas como valores discrepantes na análise estatística descritiva inicial.

Na etapa dois foram incluídas oito estações (primeiro reposicionamento das estações excluídas anteriormente). As etapas três e quatro foram responsáveis pela inclusão de seis e quatro estações respectivamente, finalizando o procedimento de rearranjo e otimização da rede de monitoramento fluviométrico da bacia hidrográfica do rio Doce. A disposição espacial das estações existentes e a configuração espacial proposta para a

nova rede de monitoramento, após quatro etapas avaliadas, são apresentadas na Figura 29, tomando-se como exemplo a vazão específica $q_{7,10}$.

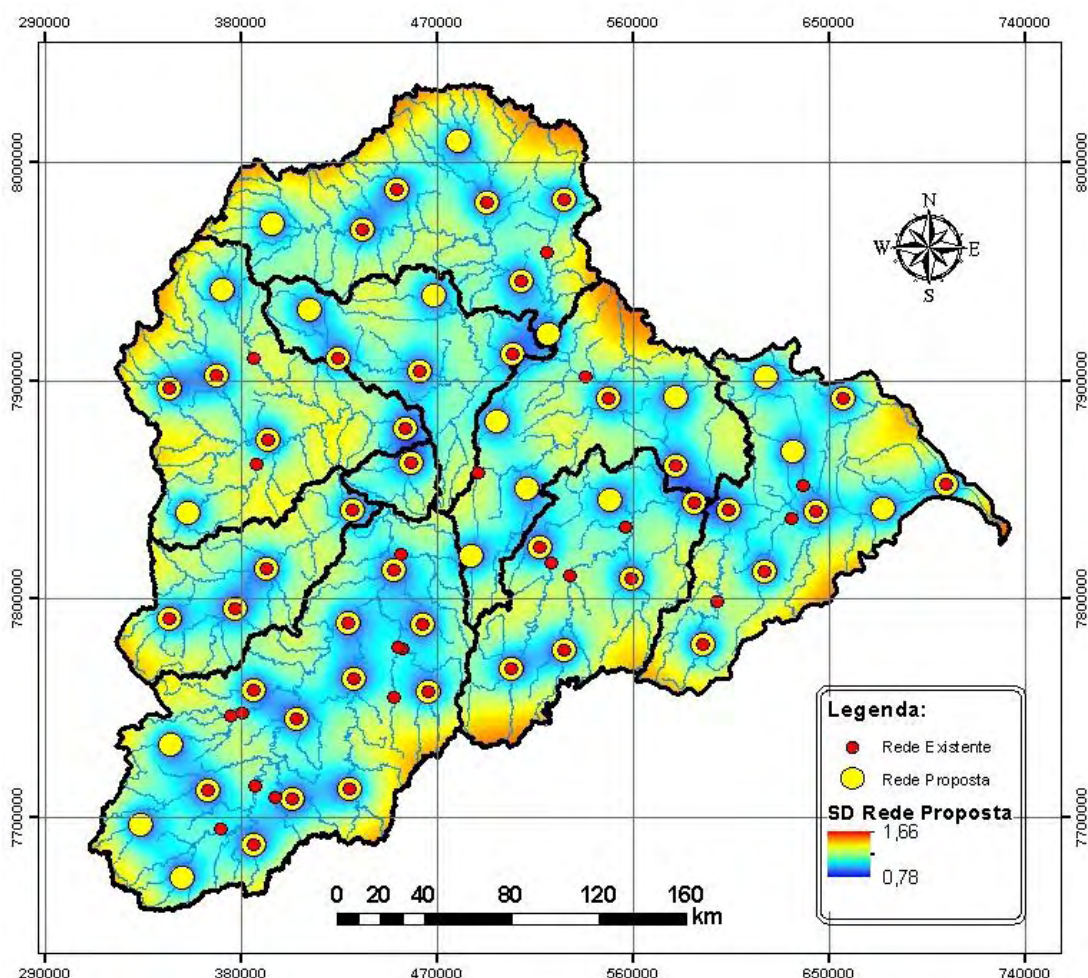


Figura 29 – Mapa de desvio padrão da estimativa para $q_{7,10}$ em $L s^{-1} km^{-2}$, rede fluviométrica existente e proposta para a bacia hidrográfica do rio Doce.

Comparando-se a distribuição espacial dos desvios padrão observada para a rede de monitoramento proposta (Figura 29) e para a rede existente (Figura 21), utilizando-se a mesma paleta de cores e o mesmo intervalo de desvios encontrados inicialmente, fica nítida a diminuição dos erros de estimativa, principalmente nas regiões de cabeceira das ottobacias 761, 763, 764, 766 e 769. As regiões onde se encontravam os maiores erros de estimativa (regiões de coloração vermelha) desapareceram e as regiões onde se encontravam os menores desvios padrão (regiões de coloração azul escuro) ficaram mais distribuídas pela área de drenagem da bacia hidrográfica do rio Doce.

Com intuito de se avaliar quantitativamente os resultados observados, na Tabela 9 são apresentados os desvios padrão percentuais obtidos para a rede de monitoramento fluviométrico proposta na bacia hidrográfica do rio Doce.

Tabela 9 – Desvios padrão percentuais para a rede de monitoramento proposta

Vazão	Estatística	Desvio Padrão Percentual									
		761	762	763	764	765	766	767	768	769	76
q _{7,10}	Mínimo	28	23	25	25	21	18	20	15	10	10
	Médio	64	46	46	71	39	39	28	23	26	45
	Máximo	112	69	72	171	57	54	33	34	56	171
q ₉₀	Mínimo	9	8	10	10	9	7	8	5	5	5
	Médio	35	29	32	45	25	24	20	16	18	28
	Máximo	51	40	52	101	38	37	26	24	36	101
q ₉₅	Mínimo	12	11	13	13	11	9	11	7	6	6
	Médio	42	34	36	53	28	27	21	18	20	33
	Máximo	62	55	59	141	43	41	28	26	48	141
q _{mld}	Mínimo	12	11	13	15	14	8	13	7	8	7
	Médio	20	17	21	27	19	14	16	11	15	18
	Máximo	29	23	35	43	24	21	18	16	21	43
q _{max10}	Mínimo	32	45	49	54	53	28	50	20	20	20
	Médio	65	62	70	90	81	44	58	32	49	62
	Máximo	88	81	109	120	107	73	64	58	76	120
q _{max20}	Mínimo	30	50	55	59	60	31	57	23	21	21
	Médio	72	70	77	98	91	49	66	36	54	68
	Máximo	102	92	121	139	121	83	72	65	85	139
q _{max50}	Mínimo	41	58	63	66	66	36	62	29	27	27
	Médio	78	75	83	104	94	55	71	41	58	73
	Máximo	101	93	123	141	121	86	77	71	90	141
q _{max100}	Mínimo	43	60	65	68	67	38	63	30	28	28
	Médio	80	75	84	106	94	57	72	43	59	75
	Máximo	104	94	125	146	123	85	78	73	93	146

Legenda: q_{7,10} – vazão específica mínima média de sete dias consecutivos e com período de retorno de 10 anos, q₉₀ – vazão específica mínima com permanência no tempo de 90%, q₉₅ – vazão específica com permanência no tempo de 95%, q_{mld} – vazão específica média de longa duração, q_{max10} – vazão específica máxima com período de retorno de 10 anos, q_{max20} – vazão específica máxima com período de retorno de 20 anos, q_{max50} – vazão específica máxima com período de retorno de 50 anos e q_{max100} – vazão específica máxima com período de retorno de 100 anos.

Na Tabela 9 foram destacados os erros padrão percentuais que tiveram maiores reduções relativas em comparação com os resultados apresentados na Tabela 7 (reduções maiores que 15%). Analisando-se a Tabela 9 e comparando-se com os resultados apresentados nas Tabelas 7 e 8 e na Figura 29, pode-se observar que:

- as vazões específicas q_{7,10}, q₉₀, q₉₅ e q_{mld} apresentaram reduções mais significativas nos erros padrão percentuais para as ottobacias 761, 763, 764, 765, 766 e 767 e conseqüentemente para a bacia do rio Doce (76);
- as ottobacias 761, 766 e 767 apesar de não terem recebido nenhuma estação de monitoramento a mais tiveram seus erros

padrão percentuais reduzidos apenas pelo reposicionamento espacial das estações de monitoramento em suas ottobacias (761 e 766) ou nas regiões vizinhas (767);

- as ottobacias 762 e 769, que tiveram, respectivamente, duas e seis estações de monitoramento excluídas, apresentaram pouco aumento nos erros padrão percentuais, observados apenas para as vazões específicas máximas $q_{\max 10}$, $q_{\max 20}$, $q_{\max 50}$ e $q_{\max 100}$, pela redistribuição espacial de suas redes de monitoramento iniciais.

É importante destacar alguns fatores em relação à proposta final apresentada:

- em relação à rede de monitoramento existente, a rede proposta possui duas estações a menos e 18 estações reposicionadas espacialmente, totalizando 59 estações de monitoramento fluviométrico para a bacia do rio Doce;
- para as ottobacias 763, 764 e 765 houve a necessidade de ampliação do número de estações fluviométricas para minimização dos erros de estimativa; e
- foram realizadas apenas quatro etapas de desenvolvimento da metodologia. Pode-se desenvolver o raciocínio apresentado por esta nova abordagem científica até ser alcançado o nível de precisão da estimativa que se desejar. O critério de precisão, conforme citado anteriormente, depende de uma série de fatores de responsabilidade dos órgãos gestores da rede de monitoramento.

Esta proposta metodológica aplica-se a qualquer bacia hidrográfica que possua rede de monitoramento fluviométrico instalada. No caso de inexistência de uma rede de monitoramento preliminar pode-se utilizar, inicialmente, estações de bacia ou regiões hidrologicamente homogêneas vizinhas.

Cabe ressaltar que as normas de instalação e de operação das estações de monitoramento fluviométrico (OMM, 1994) deverão ser respeitadas na implantação da nova rede proposta.

4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- A bacia hidrográfica do rio Doce possui uma rede de monitoramento fluviométrico quantitativamente satisfatória, porém, espacialmente mal distribuída.
- O modelo teórico de semivariograma que melhor se ajustou às semivariâncias experimentais, para as oito vazões características, foi o esférico.
- A aplicação da metodologia proposta resultou no reposicionamento de 18 estações e na exclusão de duas estações, totalizando 59 estações de monitoramento fluviométrico para a bacia do rio Doce.
- A nova configuração espacial proposta para a rede de monitoramento apresentou melhoras nos desvios padrão percentuais para as vazões $q_{7,10}$, q_{90} , q_{95} e q_{mld} em seis das nove sub-bacias da bacia hidrográfica do rio Doce.
- A proposta metodológica aplica-se a qualquer bacia hidrográfica que possua rede de monitoramento fluviométrico instalada.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), à Universidade Federal de Viçosa (UFV) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo financiamento deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANCTIL, F.; LAUZON, N.; ANDRÉASSIAN V.; OUDIN, L.; PERRIN, C. *Improvement of rainfall-runoff forecasts through mean areal rainfall optimization*. Journal of hydrology, n. 328, p. 717-725, 2006.

BARDOSSY, A.; DAS T. *Influence of rainfall observation network on model calibration and application*. Hydrol. Earth Syst. Sci., n.12, p. 77-89, 2008.

BRASIL, *Política Nacional de Recursos Hídricos*. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. [S. l.]: MMA/ SRH, 1997.

CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B; NOVACK, J.M; PARKIN, T.B; KARLEN, D.L; TURCO R.F.; KNOPKA, A.E. *Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils*. Soil Science Society America Journal, Medison, v.58, p.1240-1248, 1994.

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

COULIBALY, P. *Spatial and temporal variability of Canadian seasonal precipitation (1900-2000)*. Adv. Water Resour., n. 29, p. 1846-1865, 2006.

COULIBALY, P., EVORA, D.N.. *Comparison of neural network methods for infilling missing daily weather records*. Journal of Hydrology, n. 341, p. 27–41, 2007.

COULIBALY, P.; BURN D. H. *Spatial and Temporal variability of Canadian seasonal streamflows*. J. Clim, n.18, p. 191-210, 2005.

DELHOMME, J. P. *Applications de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau*. 130p. Tese Doutorado. Université Pierre ET Marie Curie. Paris, 1976.

DONG, X.; DOHMEN-JANSSEN, M.; BOOIJ, M. J. *Appropriate spatial sampling of rainfall for flow simulation*. Hydrol. Sci. J., n. 50, p. 279-298, 2005.

DRAPER, N. R.; SMITH, H. *Applied regression analysis*. 2.ed. New York: John Wiley, 1981. 709 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 412p., Rio de Janeiro, 1999.

ENGLUND, E.; SPARKS, A. *Geo-EAS: Geostatistical Environmental Assessment Software*. Las Vegas: International Ground Water Modeling Center. 1992. CD-Rom.

GEO Brasil. *Recursos Hídricos: Componente da série de relatórios sobre o estado e perspectivas do meio ambiente no Brasil*. Ministério do Meio Ambiente; Agência Nacional de Águas; Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. Brasília: MMA; ANA. 264 p., 2007

GERSTNER, E. M.; HEINEMANN, G. *Real-time areal precipitation determination from radar by means of statistical objective analysis*. J. Hydrol., n. 352, 296-308, 2008.

GONÇALVES, A. C. A; FOLEGATTI, M. V. *Correlação espacial entre retenção de água e textura do solo, para fins de manejo de irrigação*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.22, n.3, p.296-303, 2002.

GUTTORP P., SAMPSON P. D., NEWMAN K. *Nonparametric estimation of spatial covariance with applications to monitoring network evaluation*. In Statistics in the Environmental, Earth Sciences, p. 39–51, London, 1992.

HUSAIN T. *Hydrologic network design formulation*. Canadian Water Resources Journal, v. 12, p. 44–59, 1987

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Disponível em: < <http://www.ibge.gov.br/home/>>. Acesso em julho de 2010.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. *An Introduction to Applied Geostatistics*. New York, Oxford University Press, 560 p., 1989.

JOURNEL, A. G.; HUIJBREGTS, C. J. *Mining geostatistics*. London: Academic Press, 600p., 1978.

KRIGE, D. G. *A statistical approach to some basic mine evaluation problems on the Witwatersrand*. Johannesburg Chemistry Metallurgy Mining Society South African, v. 52, p. 119-139, 1951.

LANDIN, P. M. B. *Análise geoestatística de dados geológicos*. 2. ed., 253 p., São Paulo: UNESP, 2003.

MATHERON, G. *The theory of regionalized variables and its applications*. Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleu, 211 p., Paris, 1971.

MINAS GERAIS, Governo do Estado. *Redes e bacias hidrográficas otocodificadas de Minas Gerais*. Belo Horizonte, 2010. Base vetorial. DVD.

MISHRA, A. K.; COULIBALY, P. *Developments in hydrometric network design: a review*. *Reviews of Geophysics*, v. 47, 2009.

_____. *Hydrometric network evaluation for Canadian watersheds*. *Journal of Hydrology*, n. 380, p. 420-437, 2009.

MISHRA, A.K., OZGER, M., SINGH, V.P. *An entropy based investigation into the variability of precipitation*. *Journal of Hydrology*, n.370, p. 139–154, 2009.

MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L. *Variabilidade espacial de classes de textura, salinidade e condutividade hidráulica de solos em planície aluvial*. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.10, n.1, p.30-37, 2006.

NOUR, M. H.; SMIT, D. W.; EL-DIN, M. G. *Geoestatistical mapping of precipitation: Implications for rain gauge network design*. *Water Sci. Technol.* N.53, p. 101-110, 2006.

ORGANIZAÇÃO METEOROLÓGICA MUNDIAL - OMM. *Guia para práticas hidrológicas: Aquisição e processamento de dados, análises, estimativas e outras aplicações*. 15 ed., nº 168, 735 p., 1994.

PFAFSTETTER, O. *Classificação de bacias hidrográficas: metodologia de codificação*. Rio de Janeiro, RJ: Departamento Nacional de Obras de Saneamento (DNOS), 19 p., 1989. Trabalho não publicado.

PINTO, N. L. de S.; HOLTZ, A. C. T.; MARTINS, J. A.; GOMIDE, F. L. S. *Hidrologia básica*. São Paulo: Edgard Blücher, 278p., 1976.

PLANO INTEGRADO DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA DO RIO DOCE - PIRH. Disponível em <<http://www.pirhdoce.com.br/>>. Acesso em março de 2010.

ROGALUS, M. J.; OGDEN, F. L. *Comparison of GCIP and stage III radar-rainfall estimate over the Mississippi River Basin for 1997*. *J. Hydrol.*, n. 341, p. 177-185, 2007.

- SKOK, G. *Analytical and practical examples of estimating the average nearest-neighbor distance in a rain gauge network*. Meteorol. Z., n. 15, p. 565-573, 2006.
- SPENCE, C.; SASO, P.; RAUSCH J. *Quantifying the impact of hydrometric network reductions on regional stream-flow prediction in northern Canada*. Can. Water Resour. J., n. 32, p. 1-20, 2007.
- STEWART, I. T.; CAYAN, D. R.; DETTINGER, M. D. *Changes toward earlier stream-flow timing across western North America*. J. Clim., n. 18, p. 1136-1155, 2005.
- TUKEY, J. W. *Exploratory Data Analysis*. Addison-Wesley, 1977.
- VAUCLIN, M.; VIEIRA, S. R.; VACHAUD, G.; NIELSEN, D. R. *The use of cokriging with limited field soil observations*. Soil Science Society of America Journal, Madison, v. 47, n.1, p.175-184, 1983.
- WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. *Spatial variability of soil physical properties in the field*. Applications of soil physics. New York: Academic Press, 1980.
- WESTCOTT, N. E.; KNAPP, H. V.; HILBERG, S. D. *Comparison of gauge and multi-sensor precipitation estimates over a range of spatial and temporal scales in the Midwestern United States*. J. Hydrol., n. 35, p. 1-12, 2008.
- YILMAZ, K. K.; HOGUE, T. S.; HSU, K. L.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, H. V.; WAGENER, T. *Intercomparison of rain gauge, radar and satellite-based precipitation estimates with emphasis on hydrologic forecasting*. J. Hydrometeorol., n. 6, p. 497-517, 2005.

ARTIGO III

**Metodologia baseada em sistemas de informações geográficas e análise
geoestatística para avaliação, rearranjo e otimização de redes
pluviométricas de monitoramento quantitativo em bacias hidrográficas**

MODELAGEM HIDROLÓGICA BASEADA EM SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS E ANÁLISE GEOESTATÍSTICA PARA AVALIAÇÃO, REARRANJO E OTIMIZAÇÃO DE REDES PLUVIOMÉTRICAS

Resumo – Esse trabalho teve como objetivo desenvolver uma metodologia baseada em Sistemas de Informações Geográficas e análise geoestatística para subsidiar projetos de redes pluviométricas de monitoramento quantitativo de bacias hidrográficas. Foram utilizadas três variáveis no estudo (precipitação média anual – P_a ; precipitação média do semestre seco – P_{ss} e precipitação média do semestre chuvoso – P_{sc}), individualizadas para 76 estações pluviométricas da bacia hidrográfica do rio Doce. Analisando-se a rede existente concluiu-se que o monitoramento pluviométrico da bacia do rio Doce é deficitário em número de estações e espacialmente mal distribuído. A análise geoestatística apontou o modelo teórico de semivariograma esférico como o que melhor se ajustou às semivariâncias experimentais, para as variáveis estudadas. A nova abordagem científica permitiu, a partir dos mapas de precipitações e de desvios padrão espacializados gerados pela técnica de krigagem, a exclusão, inclusão e rearranjo de estações de pluviométricas. Em quatro etapas de desenvolvimento da metodologia foram reposicionadas 12 estações e incluídas 67 estações pluviométricas, totalizando 143 estações de monitoramento. O rearranjo e a inclusão das novas estações pluviométricas possibilitou a redução dos desvios padrão percentuais para as três variáveis analisadas na bacia hidrográfica do rio Doce.

Abstract - This work aimed to develop a methodology based on Geographic Information System and geostatistical analysis to subsidize projects of quantitative rainfall monitoring networks of watersheds. Three variables were used in the study (average annual rainfall - P_a ; average rainfall of dry semester - P_{ss} and the average rainfall of rainy semester - P_{sc}), for 76 rainfall stations for the rio Doce basin. Analyzing the existing network was concluded that the pluviometric monitoring of rio Doce basin is deficient in number of monitoring stations and poorly distributed spatially. The geostatistical analysis indicated the spherical semivariogram model had a best fit to the experimental semivariance for the variables studied. The new scientific approach permits, from the generated maps of precipitation and standard deviations by the technique of kriging, the exclusion, inclusion and rearrangement of rainfall stations. In four stages of development of the methodology, 12 stations were repositioned and 67 stations were included in total of 143 monitoring station. The spatial rearrangement of network and the addition of new rainfall stations have reduced the percentage standard deviations for all three analyzed variables in rio Doce basin.

Palavras chave – SIG, Análise Geoestatística e Rede de Monitoramento Pluviométrico.

1. INTRODUÇÃO

A Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), instituída pela Lei 9.433/97, foi um marco legal no tratamento dos recursos hídricos do país. Um dos instrumentos de gestão de recursos hídricos previstos pela PNRH é o Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos (SINGREH), sendo um dos seus objetivos atualizar permanentemente as informações sobre disponibilidade e demanda de recursos hídricos em todo o território nacional. O SINGREH só alcançará este objetivo se dispuser de uma rede de monitoramento hidrológico confiável.

Segundo o Banco Mundial (1998), este adequado monitoramento deve ser considerado como um dos pré-requisitos para o sucesso de qualquer sistema de gestão das águas, permitindo a obtenção do arcabouço de informações necessárias, o acompanhamento das medições efetivadas, a atualização dos bancos de dados e a avaliação das decisões tomadas.

Aspectos científicos importantes estão vinculados a uma rede hidrométrica de qualidade: previsão climática (MISHRA et al., 2009; ANCTIL et al., 2006; COULIBALY, 2005; COULIBALY, 2006; YILMAZ et al., 2005), base de dados hidrológicos para projetos de engenharia (COULIBALY & EVORA, 2007), simulação e calibração de modelos hidrológicos (BARDOSSY & DAS, 2008; DONG et al., 2005; ROGALU & OGDEN, 2007; STEWART et al., 2005; WESTCOTT et al., 2008), redes de alerta em tempo real contra eventos extremos (GERSTNER & HEINEMANN, 2008), entre outros.

A Organização Meteorológica Mundial (OMM, 1994) recomenda a revisão periódica das redes hidrométricas, levando-se em conta a redução das incertezas hidrológicas trazidas desde a última análise da rede, redução de custo de operação e manutenção da rede, as necessidades de dados e os usos múltiplos dos recursos hídricos. Aplicando-se estes quesitos à rede hidrológica brasileira, urge reorganizá-la, tanto em quantidade dos postos hidrométricos instalados quanto em qualidade das informações fornecidas.

Vários trabalhos têm sido desenvolvidos, em nível mundial, tanto para avaliar a densidade da rede existente quanto para projetar, aumentar ou racionalizar as redes hidrometeorológicas (MISHRA & COULIBALY, 2009; NOUR et al., 2006; SKOK, 2006 e SPENCE et al., 2007). Um projeto ótimo

para a rede hidrométrica será aquele que minimiza a incerteza global associada às variáveis de interesse (HUSAIN, 1987).

Nesse sentido, esse trabalho tem como objetivo principal desenvolver uma metodologia, baseada em Sistemas de Informações Geográficas – SIG e Análise Geoestatística, com intuito de subsidiar projetos de redes pluviométricas de monitoramento quantitativo de bacias hidrográficas. Especificamente, objetivou-se avaliar a situação atual e propor critérios para inclusão, exclusão ou rearranjo da rede de monitoramento pluviométrico da bacia hidrográfica do rio Doce.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. REGIÃO DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do rio Doce situa-se na região Sudeste do Brasil, entre os paralelos 17°45' S e 21°15' S e os meridianos 39°30' W e 43°45' W com altitude média de 578 metros. Possui área de drenagem de, aproximadamente, 83.400 km², dos quais 86% pertencem ao estado de Minas Gerais e 14% ao estado do Espírito Santo. A população na bacia atinge aproximadamente 3,1 milhões de habitantes, sendo que ao redor de 70% encontra-se na zona urbana. As principais atividades econômicas desenvolvidas na bacia são: mineração, siderurgia, silvicultura e agropecuária (PIRH, 2010).

2.2. BASE DE DADOS E APLICATIVOS

O trabalho foi desenvolvido com base nas séries de dados de 105 estações pluviométricas pertencentes à rede da Agência Nacional de Águas – ANA e sete estações pluviométricas da rede do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (Figura 1). As séries empregadas são constituídas por dados anuais consistidos, correspondentes a um período-base de 30 anos (1976 a 2005). Ressalta-se que foi limitada a utilização de dados até o ano de 2005 pelo fato de, no início do trabalho, este constituir o ano mais recente com dados consistidos disponibilizados pela ANA.

No presente estudo foram consideradas as seguintes variáveis hidrológicas: precipitação total anual – P_a ; precipitação total do semestre seco – P_{ss} e precipitação total do semestre chuvoso – P_{sc} .

Utilizou-se a base vetorial de elevação (curvas de nível e pontos cotados) e de hidrografia da região hidrográfica obtida junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, na escala 1:250.000 (IBGE, 2010). A base vetorial ortocodificada da bacia do rio Doce foi obtida junto ao Instituto Mineiro de Gestão das Águas (MINAS GERAIS, 2010).



Figura 1 – Localização dos 112 estações de monitoramento pluviométrico selecionadas na bacia hidrográfica do rio Doce.

Para a geração do modelo digital de elevação hidrograficamente condicionado (MDEHC) e espacialização dos resultados foi utilizado o Sistema de Informações Geográficas ArcGIS® 10.0, desenvolvido pelo Environmental Systems Research Institute – ESRI.

As análises estatísticas de tendência nos dados (tendência linear, quadrática e cúbica) foram realizadas utilizando-se o aplicativo Statistica® 7.0, desenvolvido pela StatSoft. Para a análise geoestatística utilizou-se a ferramenta GEO-EAS (ENGLUND & SPARKS, 1992).

2.3. AVALIAÇÃO DA REDE EXISTENTE

2.3.1. Densidade Espacial de Estações Pluviométricas

Para fins de obtenção da densidade mínima de estações pluviométricas para a bacia do rio Doce adotou-se a metodologia da OMM (1994), que define seis tipos de relevos para aplicação das normas de densidade espacial: costeiro, montanhoso, planícies interiores, levemente ondulados, pequenas ilhas e regiões polares ou áridas. Na Tabela 1 é apresentada, para cada tipo de relevo, a densidade mínima de estações de monitoramento pluviométrico (estação/km²) sugerida pela OMM (1994).

As características fisiográficas da bacia do rio Doce foram obtidas a partir do mapa de classes de declividade, adaptando-se a divisão proposta pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 1999). A partir da construção do MDEHC e do mapa de declividade, as seis características de relevo (costeiro, montanhoso, planícies interiores, levemente ondulados, pequenas ilhas e regiões polares/áridas) foram derivadas automaticamente para verificação das densidades mínimas de estações de monitoramento pluviométrico na bacia hidrográfica do rio Doce.

Tabela 1 – Densidade espacial de estações de monitoramento pluviométrico

Relevo	Declividade (*) (%)	Densidade Sugerida (estação/km ²)	
		Pluviômetro	Pluviógrafo
Costeiro	0 - 3	1: 900	1: 9.000
Montanhoso	≥ 20	1: 250	1: 2.500
Planícies interiores	0 - 3	1: 575	1: 5.750
Levemente ondulado	3 - 20	1: 575	1: 5.750
Pequenas ilhas	-	1: 25	1: 250
Regiões polares/áridas	-	1: 10.000	1: 100.000

(*) Adaptado de Embrapa (1999).

Fonte: OMM (1994).

Para facilitar a análise dos resultados, a bacia hidrográfica do rio Doce foi codificada segundo a metodologia proposta por Pfafstetter (1989), conforme Resolução n^o 30, do Conselho Nacional de Recursos Hídricos, de 11 de dezembro de 2002 (MINAS GERAIS, 2010).

2.3.2. Análise Estatística Descritiva

A análise estatística descritiva, para as três variáveis consideradas (P_a , P_{ss} e P_{sc}), foi realizada por meio das seguintes avaliações:

- medidas de tendência central – média e mediana;
- análise de dispersão – análise de *boxplot* (TUKEY, 1977), desvio padrão e coeficiente de variação;
- normalidade dos dados experimentais - aderência à distribuição Normal, segundo o teste de qui-quadrado (χ^2) a um nível de significância de 5% (CATALUNHA et al., 2002);
- superfícies de tendência – ajustes de superfícies de tendência de primeiro, segundo e terceiro graus, aos dados de vazões específicas (LANDIN, 2003).

Segundo Gonçalves & Folegatti (2002), uma forte correlação espacial entre variáveis pode não ser plenamente descrita pela estatística clássica, recomendando-se a adoção de técnicas geoestatísticas.

2.4. OTIMIZAÇÃO E REARRANJO DA REDE

2.4.1. Análise Geostatística

O comportamento das variáveis regionalizadas na análise geoestatística foi feito a partir de duas ferramentas fundamentais: o semivariograma (análise do comportamento espacial das variáveis) e a krigagem (cálculo dos valores preditos com seus erros associados), conforme Mishra e Coulibaly (2009).

Considerando que as variações espaciais de uma variável hidrológica regionalizada podem ser representadas pela realização $z(x_i)$ de um conjunto $Z(\mathbf{x}) = z_1(\mathbf{x}), z_2(\mathbf{x}), \dots, z_n(\mathbf{x})$, onde $\mathbf{x}_i = (x_i, y_i)$ é o vetor localização da estação, o primeiro momento deste campo aleatório é o valor esperado para um ponto $E[Z(\mathbf{x})]$ e o segundo momento é definido como a covariância para qualquer par \mathbf{x} e \mathbf{x}' (KITANIDIS, 1993), apresentado pela equação 1:

$$R(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = E\{[z(\mathbf{x}) - E[z(\mathbf{x})]][z(\mathbf{x}') - E[z(\mathbf{x}')]]\} \quad (1)$$

A função semivariograma é definida por dois valores separados por uma distância $h = |x_1 - x_2|$ chamada “lag”.

$$\gamma(\mathbf{x}, h) = E\{[z(\mathbf{x}) - z(\mathbf{x} + h)]^2\} \quad (2)$$

A equação 2 pode ser estimada pelo semivariograma experimental clássico, assumindo-se estacionariedade:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N [z(x_i) - z(x'_i)]^2 \quad (3)$$

em que N é o número total de pares x e x' separados pela distância h.

Foi utilizado o mínimo de 30 pares de pontos por intervalo para uma estimativa adequada da semivariância experimental (JOURNEL e HUIJBREGTS, 1978).

Com base nas semivariâncias experimentais calculadas escolheu-se o modelo de semivariograma que melhor representou a estrutura de variabilidade espacial em análise. Os modelos utilizados no presente trabalho foram: exponencial, gaussiano e esférico (DELHOMME, 1976; ISAACS & SRIVASTAVA, 1989).

A krigagem baseou-se no número de dados, na qualidade dos dados em cada ponto, na posição da coleta dos dados, na continuidade espacial e na distância entre estes pontos amostrais (JOURNEL e HUIJBREGTS, 1978).

Na krigagem os valores estimados de $\hat{z}(x_0)$, identificados por uma localização específica x_0 onde não existem valores, foram dados pela equação:

$$\hat{z}(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i z(x_i) \quad (4)$$

em que, λ_i são os pesos do estimador que minimizam a variância (pesos da Krigagem ordinária).

Supondo que $z(x_i)$ satisfaz à hipótese $E[z(\mathbf{x}) - z(\mathbf{x} + h)] = 0$ e possui semivariograma dado pela equação 2, um sistema de equações lineares de krigagem simples combinando informações de vizinhança foi assim definido:

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i \gamma(x_i - x_j) = \gamma(x_i - x_0) \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \quad (6)$$

Assim, conhecido o semivariograma e aplicando-se a técnica de krigagem, estimou-se os valores das variáveis P_a , P_{ss} e P_{sc} nos locais não amostrados e as incertezas associadas ao mapeamento gerado.

A diferença entre a krigagem e outros métodos de interpolação comumente empregados é a maneira como os pesos são atribuídos às diferentes amostras. Na krigagem o procedimento é semelhante ao de interpolação por média móvel ponderada, exceto que os pesos são determinados a partir de uma análise espacial, baseada no semivariograma experimental. Além disso, a krigagem fornece, em média, estimativas não tendenciosas (a diferença entre valores estimados e verdadeiros para o mesmo ponto, em média, deve ser nula) e com variância mínima.

Para a validação do semivariograma teórico ajustado utilizou-se a técnica de Jack-knifing (VAUCLIN et al., 1983). Nesta técnica, cada um dos valores medidos é interpolado pelo método da krigagem, eliminando-se sucessivamente os valores medidos, substituindo-os pelas estimativas, calculando-se, a seguir, a distribuição dos erros padronizados, que deve apresentar média zero e desvio-padrão unitário (MONTENEGRO & MONTENEGRO, 2006).

2.4.2. Proposta Metodológica para Rearranjo e Otimização da Rede

A partir da seleção do semivariograma teórico ajustado e validado e dos mapas de precipitação e erros de estimativa espacializados, obtidos pela técnica de krigagem, para as três variáveis pluviométricas estudadas, propôs-se a metodologia apresentada na Figura 2 para rearranjo e otimização da rede de monitoramento pluviométrico.

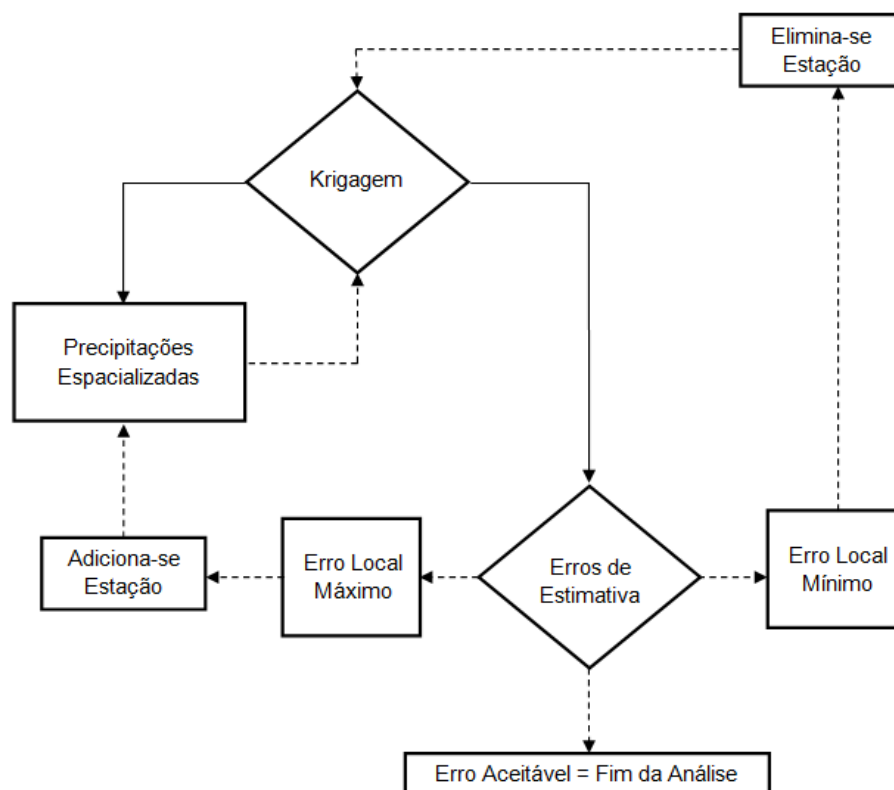


Figura 2 – Fluxograma da metodologia proposta para rearranjo e otimização da rede de monitoramento pluviométrico.

Analisando-se o fluxograma da Figura 2 observa-se que, a partir da aplicação da técnica de krigagem, são gerados dois mapas: o mapa de precipitação espacializado e o mapa de erros das estimativas da espacialização. O mapa de erros das estimativas pode apresentar três configurações possíveis: erro local considerável, erro local desprezível e densidade quantitativa e espacial ótima.

O erro local mínimo pode ser encontrado em regiões onde a densidade de estações é maior que a necessária ou em regiões da bacia hidrográfica nas quais a variabilidade espacial dos dados é pequena. Esta configuração espacial indica a possibilidade de exclusão ou reposicionamento de estações de monitoramento. Em bacias hidrográficas nas quais o número de postos é superior ao previsto pela OMM este processo permite reduzir os custos de monitoramento sem perder qualidade da informação. Em regiões hidrográficas cuja densidade mínima de estações não é atendida este processo pode ser denominado rearranjo, devido ao fato de necessariamente estes postos serem reposicionados em locais onde o erro de estimativa é considerável.

O erro local máximo normalmente é encontrado em regiões da bacia hidrográfica onde a densidade de estações é baixa ou a variabilidade dos dados é grande. Neste caso, identifica-se uma região potencialmente propensa a receber uma estação de monitoramento adicional. Caso existam regiões com erros locais mínimos, os postos inicialmente excluídos serão reposicionados para estas regiões.

Considerando-se a estacionariedade do processo, admitiu-se o valor observado, nos locais de inserção das novas estações pluviométricas propostas, igual ao valor simulado obtido junto ao mapa de precipitação de cada variável analisada.

Após este procedimento inicial, a análise de krigagem para a bacia estudada foi refeita, encontrando-se novos locais onde os erros de estimativa foram máximos, repetindo-se o procedimento até que a densidade quantitativa e espacial ótima fosse alcançada. A densidade quantitativa e espacial ótima foi alcançada quando a configuração dos postos reposicionados, incluídos ou excluídos esteve de acordo com a densidade mínima de estações sugerida pela OMM (1994), de forma a obter reduções significativas nos erros de estimativa, a partir da análise geoestatística dos dados.

A escolha de um local para instalação de uma estação de monitoramento pluviométrico deve ser feita com a preocupação de se obter a melhor qualidade de informação possível, considerando as propriedades físicas e climáticas da região de instalação. Algumas variáveis intervenientes do processo de escolha do novo local para instalação da nova estação de monitoramento pluviométrico são: direção e intensidade do vento, obstáculos que impeçam a circulação natural da precipitação e altura do coletor. Ressalta-se, no entanto, que a abordagem científica proposta apenas identifica regiões da bacia hidrográfica onde deverão ser identificados locais adequados para instalação de novas estações de monitoramento segundo as orientações específicas da OMM.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. AVALIAÇÃO DA REDE EXISTENTE

3.1.1. Densidade Espacial de Estações Pluviométricas

Para cada ottobacia considerada, identificou-se a área de drenagem, a declividade média, o número de estações pluviométricas em operação separadas por tipo e a proposta do número mínimo de estações de monitoramento sugerida pela OMM (1994). A densidade de estações de monitoramento pluviométrico na bacia hidrográfica do rio Doce, em funcionamento e sugerida pela OMM, é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – Densidade de estações de monitoramento pluviométrico por ottobacia

Ottobacia	Ottocód.	Área (km ²)	Decl. média (%)	n° Estações		n° Estações (OMM)	
				Pluviométrica	Pluviográfica	Pluviométrica	Pluviográfica
Baixo Doce - ES	761	11.151	11,28	19	1	19	2
Rio Manhuaçu	762	8.765	13,46	8	1	15	2
Caratinga	763	9.098	8,68	7	1	16	2
Rio Suaçuí	764	12.392	7,98	8	0	22	2
Suaçuí Pequeno	765	6.079	9,28	3	0	11	1
Rio Santo Antônio	766	10.418	11,57	6	3	18	2
Ipatinga / Santana do Paraíso / Ipaba	767	1.008	6,78	1	0	2	0
Rio Piracicaba	768	5.451	11,52	5	0	9	1
Piranga	769	17.903	7,70	19	5	31	3
Rio Doce	76	82.265	9,79	76	11	143	14

Analisando-se a Tabela 2 observa-se que, para todas as ottobacias, o relevo pôde ser considerado levemente ondulado (EMBRAPA, 1999). A bacia hidrográfica do rio Doce, de forma global, apresenta uma considerável deficiência de estações de monitoramento pluviométrico, tendo em operação apenas 76 das 143 estações sugeridas pela OMM (1994). Além do número insuficiente de estações, a distribuição espacial das mesmas é bastante irregular, sendo a rede mais densa nas regiões do baixo Doce (761) e Piranga (769) e menos densa nas regiões do Caratinga (763), Suaçuí (764), Suaçuí Pequeno (765) e Santo Antônio (766). Além disso, a OMM recomenda que para cada 10 estações pluviométricas se deva ter pelo menos uma estação pluviográfica e, neste contexto, apenas a região hidrográfica do Piranga (769) atende a esta premissa.

Este resultado, por si só, evidencia a necessidade de uma revisão da rede de monitoramento pluviométrico da bacia hidrográfica do rio Doce. Cabe ressaltar, entretanto, que esta análise é meramente quantitativa, devendo ser levada em consideração a distribuição espacial das estações.

3.1.2. Análise Estatística Descritiva

A análise estatística descritiva dos dados de precipitação (P_a , P_{ss} e P_{sc}) utilizando-se as 112 estações de monitoramento pluviométrico selecionadas (estações pluviométricas internas e externas à área de drenagem da bacia hidrográfica do rio Doce), contemplando os valores médios, as medianas, os valores mínimos, máximos, os desvios padrão e o coeficiente de variação, é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – Estatística descritiva para as precipitações consideradas

ESTATÍSTICA	P_a (mm)	P_{ss} (mm)	P_{sc} (mm)	$\log P_a$	$\log P_{ss}$
Nº elementos	112	112	112	112	112
Média	1247,61	198,13	1053,02	3,091	2,288
Mediana	1245,87	190,63	1057,32	3,095	2,280
Mínimo	866,55	129,25	682,21	2,938	2,111
Máximo	2060,02	461,55	1800,01	3,314	2,664
Desvio-padrão	195,52	44,04	179,69	0,068	0,087
CV (%)	15,67	22,23	17,06	2,20	3,80
χ^2 calculado	12,25	11,88	4,48	9,27	2,83
χ^2 tabelado	9,48	11,07	9,48	9,48	3,84

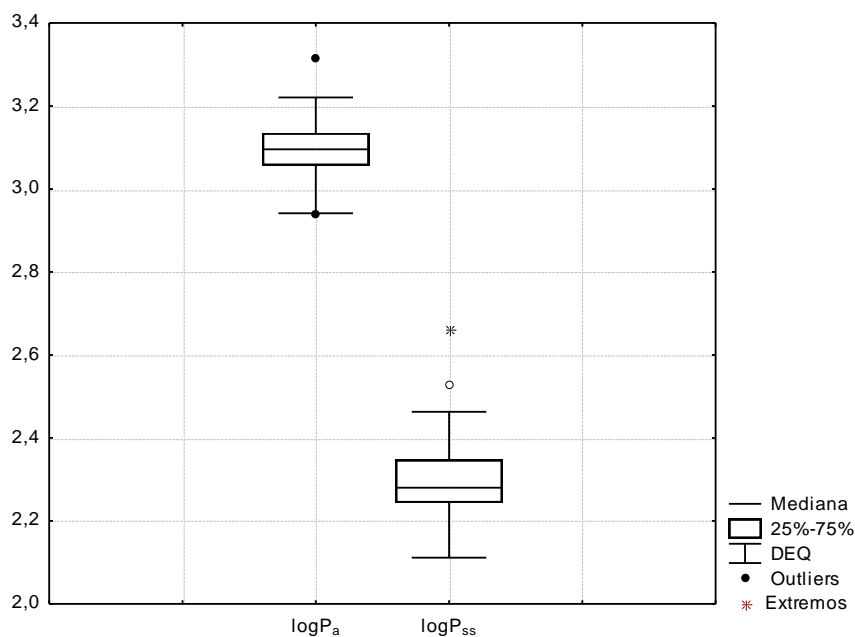
Legenda: P_a – precipitação total anual, P_{ss} – precipitação total do semestre seco, P_{sc} – precipitação total do semestre chuvoso, $\log P_a$ – logaritmo da precipitação total anual e $\log P_{ss}$ – logaritmo da precipitação total do semestre seco.

Baseando-se na proposta apresentada por Warrick & Nielsen (1980) para a classificação da variabilidade dos dados a partir do coeficiente de variação (CV), as precipitações P_a , P_{ss} e P_{sc} apresentaram variabilidade média ($12\% \leq CV < 60\%$) para a bacia hidrográfica do rio Doce.

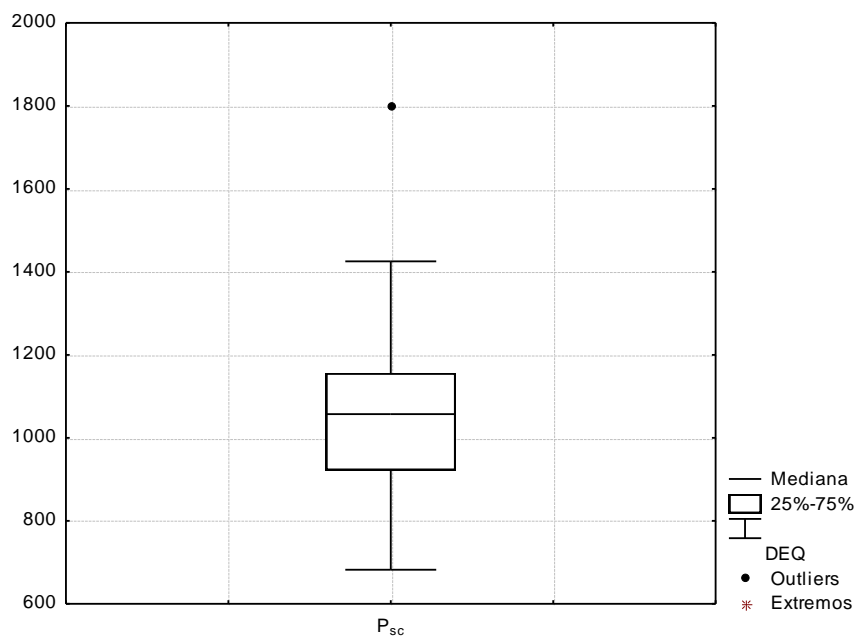
Utilizando-se o teste de qui-quadrado, a hipótese de normalidade pôde ser aceita para a variável P_{sc} a um nível de significância de 5% (Se χ^2 calculado $<$ χ^2 tabelado, aceita-se a hipótese H_0 em que os dados obedecem a uma distribuição normal). Segundo Landim (2003), não sendo satisfeita a condição de normalidade, devem ser testadas transformações das variáveis, especialmente do tipo logarítmica. O autor adverte que após qualquer

transformação será preciso realizar, posteriormente, uma transformação inversa, trazendo os resultados para a distribuição original.

Realizou-se a transformação logarítmica para as variáveis P_a e P_{ss} . Após a transformação logarítmica houve diminuição da variabilidade dos dados ($CV < 12\%$) e a hipótese de normalidade, segundo o teste de aderência de qui-quadrado a um nível de significância de 5%, pôde ser aceita para as duas variáveis transformadas: $\log P_a$ e $\log P_{ss}$. A análise de *box-plot* para as variáveis $\log P_a$, $\log P_{ss}$ e P_{sc} é apresentada na Figura 3.



(a)



(b)

Figura 3 – Box plot das variáveis: $\log P_a$, $\log P_{ss}$ (a) e P_{sc} (b).

Na Figura 3 observa-se que a variável $\log P_a$ apresentou dois valores discrepantes, a variável $\log P_{ss}$ apresentou um valor discrepante e um valor extremos e a variável P_{sc} apresentou um valor discrepante. Estes valores discrepantes e extremo referem-se às estações 2043003, 1941012, 1940005 e 1939002. Para Draper & Smith (1981), a rejeição automática de valores discrepantes e/ou extremos não é um procedimento correto e as regras propostas para rejeição dos mesmos devem incluir a reanálise sem essas observações que, dependendo das circunstâncias, podem ser portadoras de informações vitais dos indivíduos de uma população.

Antes da análise geoestatística da rede pluviométrica verificou-se a existência de tendência espacial nos dados avaliados. Estas tendências, em variáveis de precipitação, podem ocorrer devido a vários fatores, podendo-se citar: altitude, vegetação e temperatura. Foram testados os ajustes das superfícies de tendência de 1º, 2º e 3º graus. Na Tabela 4 são apresentados os resultados obtidos para os ajustes das superfícies de tendências do tipo linear, quadrática e cúbica, para as variáveis $\log P_a$, $\log P_{ss}$ e P_{sc} .

Tabela 4 – Ajustes das superfícies de tendências às variáveis $\log P_a$, $\log P_{ss}$ e P_{sc}

Variável		$\log P_a$			$\log P_{ss}$			P_{sc}		
Superfície (*)		Linear	Quadr.	Cúbica	Linear	Quadr.	Cúbica	Linear	Quadr.	Cúbica
Coeficientes	β_{00}	5,433	35,77	1.157	5,140	46,30	-3.303	6.500	29.867	$5,5 \times 10^{+06}$
	β_{01}	$-2,8 \times 10^{-07}$	$-8,4 \times 10^{-06}$	$-5,2 \times 10^{-04}$	$-3,7 \times 10^{-07}$	$-1,1 \times 10^{-05}$	$1,3 \times 10^{-03}$	$-6,4 \times 10^{-04}$	$-7,4 \times 10^{-03}$	-2,328
	β_{02}		$5,5 \times 10^{-13}$	$7,5 \times 10^{-11}$		$6,8 \times 10^{-13}$	$-1,6 \times 10^{-10}$		$5,0 \times 10^{-10}$	$3,3 \times 10^{-07}$
	β_{03}			$-3,6 \times 10^{-18}$			$6,7 \times 10^{-18}$			$-1,5 \times 10^{-14}$
	β_{10}	$-2,7 \times 10^{-07}$	$6,7 \times 10^{-06}$	$1,4 \times 10^{-03}$	$5,7 \times 10^{-08}$	$-1,2 \times 10^{-06}$	$2,3 \times 10^{-04}$	$-8,8 \times 10^{-04}$	$1,4 \times 10^{-02}$	4,009
	β_{11}		$-1,1 \times 10^{-12}$	$-3,6 \times 10^{-10}$		$-3,0 \times 10^{-13}$	$-5,1 \times 10^{-11}$		$-2,4 \times 10^{-09}$	$-1,0 \times 10^{-06}$
	β_{12}			$2,3 \times 10^{-17}$			$2,9 \times 10^{-18}$			$6,7 \times 10^{-14}$
	β_{20}		$2,1 \times 10^{-12}$	$2,6 \times 10^{-11}$		$3,6 \times 10^{-12}$	$-6,0 \times 10^{-11}$		$3,8 \times 10^{-09}$	$1,3 \times 10^{-07}$
	β_{21}			$-4,3 \times 10^{-18}$			$5,8 \times 10^{-18}$			$-1,7 \times 10^{-14}$
	β_{30}			$6,6 \times 10^{-18}$			$1,2 \times 10^{-17}$			$9,8 \times 10^{-15}$
R²		0,42	0,56	0,62	0,16	0,40	0,45	0,48	0,55	0,60

Legenda: $\log P_a$ – logaritmo da precipitação total anual, $\log P_{ss}$ – logaritmo da precipitação total do semestre seco.e P_{sc} – precipitação total do semestre chuvoso.

(*) Superfícies de tendência ajustadas:

- Linear = $\beta_{00} + \beta_{01}Y + \beta_{10}X$

- Quadrática = $\beta_{00} + \beta_{01}Y + \beta_{02}Y^2 + \beta_{10}X + \beta_{11}XY + \beta_{20}X^2$

- Cúbica = $\beta_{00} + \beta_{01}Y + \beta_{02}Y^2 + \beta_{03}Y^3 + \beta_{10}X + \beta_{11}XY + \beta_{12}XY^2 + \beta_{20}X^2 + \beta_{21}X^2Y + \beta_{30}X^3$

sendo X e Y as coordenadas UTM, em metros.

Adotou-se como critério de seleção o ajuste da superfície de tendência cujo coeficiente de determinação (R^2) fosse maior ou igual a 0,55 (SANTOS, 2007).

Por este critério, analisando-se os dados apresentados na Tabela 4, descartou-se a existência de tendências nos dados da variável $\log P_{ss}$. Com intuito de se avaliar, entre as superfícies consideradas, qual a que melhor se ajustou aos dados de $\log P_a$ e P_{sc} , efetuou-se a análise de variância para verificação da contribuição do incremento polinomial conforme proposta de Davis (1986), apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 – Análise de variância para verificação da contribuição do incremento polinomial

Variável	Fontes de Variação	SQ	g.l.	MQ	F	F(.05)
$\log P_a$	Total	0,5	112			
	Regressão linear	0,2	2	0,107	40,600	3,99
	Desvios da linear	0,3	110	0,003		
	Regressão quadrática	0,3	5	0,056	27,028	2,36
	Desvios da quadrática	0,2	107	0,002		
	Regressão cúbica	0,3	9	0,035	18,795	2,10
	Desvios da cúbica	0,2	103	0,002		
	Incremento 1 - 2	0,1	3	0,023	10,769	2,76
	Incremento 2 - 3	0,0	4	0,008	4,316	2,53
P_{sc}	Total	3.584.211,9	112	32.001,9		
	Regressão linear	1.709.612,9	2	854.806,5	50,159	3,99
	Desvios da linear	1.874.598,9	110	17.041,8		
	Regressão quadrática	1.945.545,5	5	389.109,1	25,408	2,36
	Desvios da quadrática	1.638.666,3	107	15.314,6		
	Regressão cúbica	2.147.478,2	9	238.608,7	17,106	2,10
	Desvios da cúbica	1.436.733,6	103	13.948,9		
	Incremento 1 - 2	235.932,6	3	78.644,2	5,135	2,76
	Incremento 2 - 3	201.932,7	4	50.483,2	3,619	2,53

Legenda: $\log P_a$ – logaritmo da precipitação total anual, P_{sc} – precipitação total do semestre chuvoso, SQ – soma dos quadrados, g.l. – graus de liberdade, MQ – média quadrática e F – razão entre as médias quadráticas.

Ao se aplicar a análise de variância (Tabela 5), para as variáveis $\log P_a$ e P_{sc} , constatou-se pelo teste F que:

- as superfícies de tendências lineares, quadráticas e cúbicas apresentaram probabilidade de ocorrência ao nível de 95%;
- os incrementos polinomiais da superfície de tendência linear para superfície quadrática (incremento 1 – 2) e da superfície de tendência quadrática para superfície cúbica (incremento 2 – 3) apresentaram probabilidade de ocorrência ao nível de 95%;

A partir desta análise concluiu-se que os dados de precipitação das variáveis $\log P_a$ e P_{sc} apresentaram tendência. Eliminou-se, portanto, a

tendência cúbica nos dados originais destas variáveis, por ter apresentado maiores coeficientes de determinação e probabilidade de ocorrência ao nível de 95% pelo Teste F.

A partir da constatação da existência de tendências nos dados originais das variáveis $\log P_a$ e P_{sc} , optou-se pela análise geoestatística a partir da aplicação da krigagem universal (JOURNEL, 1969) ou krigagem para um modelo com tendência (DEUTSCH & JOURNEL, 1998), conforme sugerido por Landim (2003), para estas variáveis. Neste caso particular, o autor apresenta a necessidade de se remover a tendência dos dados originais e se trabalhar com os resíduos para se evitar discrepâncias nos mapas gerados. Para os dados da variável P_{ss} , por não terem apresentado tendência nos dados, optou-se pela aplicação da krigagem ordinária (JOURNEL, 1969).

3.2. OTIMIZAÇÃO E REARRANJO DA REDE

3.2.1. Análise Geoestatística

Com base nas 112 estações de monitoramento pluviométrico estimaram-se as semivariâncias experimentais das precipitações estudadas, utilizando-se o estimador clássico (Equação 3), para os dados de $\log P_{ss}$ e a partir dos resíduos gerados pela diferença entre os dados originais e as estimativas das superfícies de tendência cúbicas que melhor se ajustaram às variáveis $\log P_a$ e P_{sc} .

Para as variáveis $\text{reslog}P_a$ e $\text{res}P_{sc}$ foi utilizado o incremento (lag) de 24 km e a distância de separação máxima de 190 km. Já para a variável $\log P_{ss}$, para a mesma distância de separação máxima, foi utilizado o incremento de 21 km. Após a obtenção dos semivariogramas experimentais procurou-se ajustar os modelos teóricos através dos quais fosse mais bem caracterizado o comportamento espacial das variáveis estudadas. Assumiu-se a isotropia do domínio no tocante à estrutura de dependência espacial. Os parâmetros obtidos para os modelos teóricos ajustados podem ser visualizados na Tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros dos modelos de semivariogramas teóricos ajustados às variáveis reslogP_a , logP_{ss} e resP_{sc}

Parâmetros	Resíduo logP_a	logP_{ss}	Resíduo P_{sc}
Efeito Pepita (C_0)	0,001	0,0027	10.000
Patamar (C_0+C_1)	0,0008	0,0038	2.500
Alcance (m)	49.000	120.000	40.000
$C_0/(C_0+C_1)^*$	55,56	41,54	80,00
Modelo	Esférico	Esférico	Esférico

Legenda: logP_a – logaritmo da precipitação total anual, logP_{ss} – logaritmo da precipitação total do semestre seco e P_{sc} – precipitação total do semestre chuvoso.

* $C_0/(C_0+C_1)$ – grau de dependência espacial de Cambardella et al. (1994), em (%).

Analisando-se a Tabela 6 observa-se que modelo do tipo esférico foi o que melhor se ajustou às semivariâncias experimentais das três variáveis em estudo. Verifica-se, ainda, nos ajustes dos semivariogramas teóricos obtidos, alcances de 49 km para a precipitação média anual (reslogP_a), 120 km para a precipitação média do semestre seco (logP_{ss}) e 40 km para a precipitação média do semestre chuvoso (resP_{sc}).

Segundo relação entre efeito pepita e patamar proposta por Cambardella e colaboradores (1994), as variáveis reslogP_a e logP_{ss} apresentaram dependência espacial moderada (entre 25% e 75%) com graus de dependência de 55,56% e 41,54%, respectivamente. Já a variável resP_{sc} apresentou dependência espacial fraca (maior que 75%) com grau de dependência de 80%.

A verificação do modelo teórico ajustado (esférico) foi feita a partir do método de validação cruzada (VAUCLIN et al., 1983). Na Tabela 7 são apresentadas as estatísticas dos resíduos produzidos pela validação cruzada para as variáveis estudadas.

Tabelas 7 – Estatísticas dos resíduos produzidos pela validação cruzada

Resíduos	resLogP_a	LogP_{ss}	resP_{sc}
Média	0,013	0,014	0,060
Desvio Padrão	1,008	1,090	1,030

Legenda: logP_a – logaritmo da precipitação total anual, logP_{ss} – logaritmo da precipitação total do semestre seco e P_{sc} – precipitação total do semestre chuvoso.

Analisando-se os resultados apresentados na Tabela 7 observou-se que as médias e os desvios padrão dos resíduos produzidos puderam ser considerados suficientemente próximos de zero e um, respectivamente, validando os modelos teóricos ajustados para as variáveis consideradas.

Nas Figuras 4 a 6 são apresentadas as semivariâncias experimentais e os ajustes dos modelos teóricos considerados para os resíduos das variáveis em estudo.

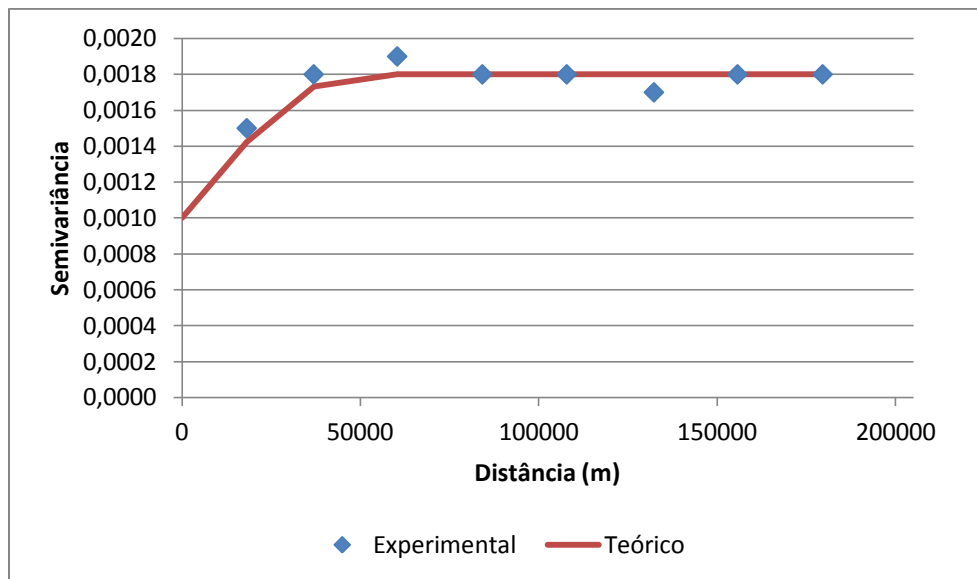


Figura 4 – Semivariogramas experimental e teórico ajustados para os resíduos de logP_a.

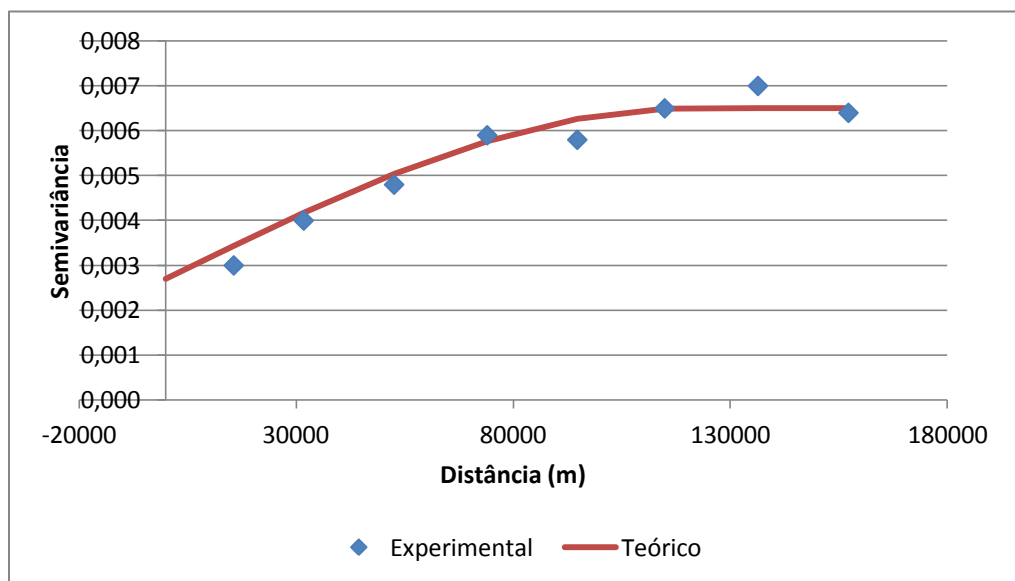


Figura 5 – Semivariogramas experimental e teórico ajustados para logP_{ss}.

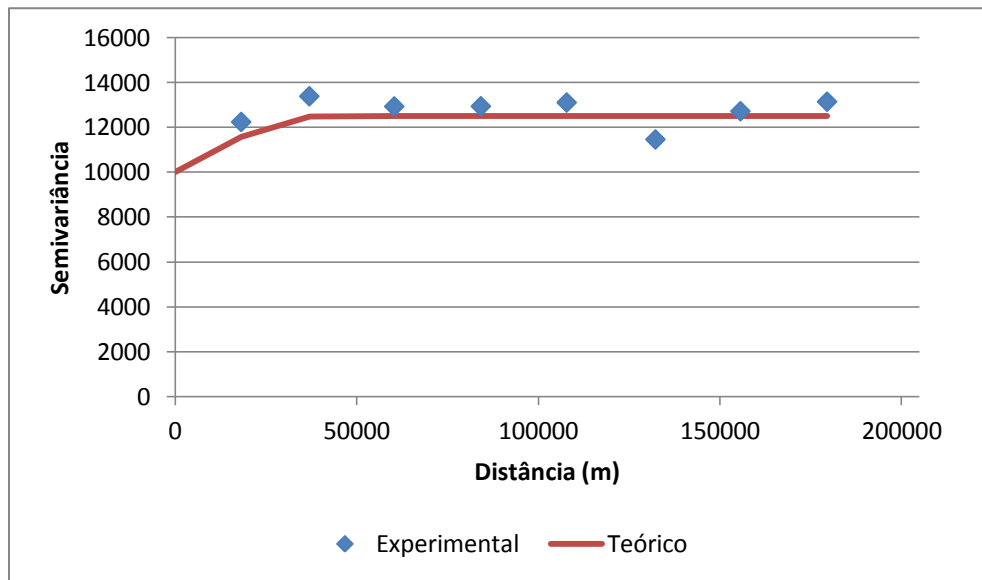


Figura 6 – Semivariogramas experimental e teórico ajustados para os resíduos de P_{ss} .

Analisando-se as Figuras 4 a 6 pode-se observar graficamente o ajuste do modelo teórico tipo esférico às semivariâncias experimentais e a diferença dos graus de dependência espacial entre as variáveis $\text{reslog}P_a$ e $\text{log}P_{ss}$ (dependência espacial moderada) e a variável $\text{res}P_{sc}$ (fraca dependência espacial).

Aplicando-se a técnica de krigagem, a partir dos semivariogramas teóricos ajustados, foram obtidos os mapas de precipitação (Figuras 7 a 9) e os respectivos mapas de desvio padrão das estimativas (Figuras 10 a 12) para as três variáveis hidrológicas em análise, na bacia hidrográfica do rio Doce. É importante ressaltar que aplicou-se a transformação logarítmica inversa e a reintegração das superfícies de tendência suprimidas para apresentação dos dados espacializados das variáveis P_a , P_{ss} e P_{sc} .

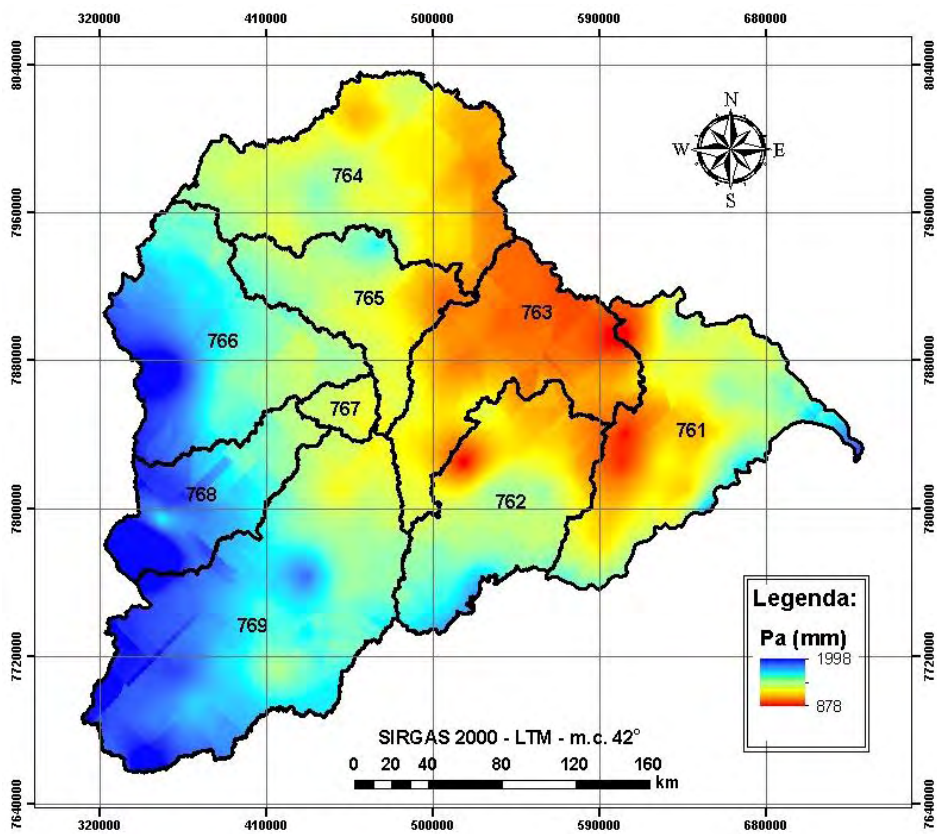


Figura 7 – Mapa de precipitação média anual (P_a) espacializada para a bacia do rio Doce, em mm.

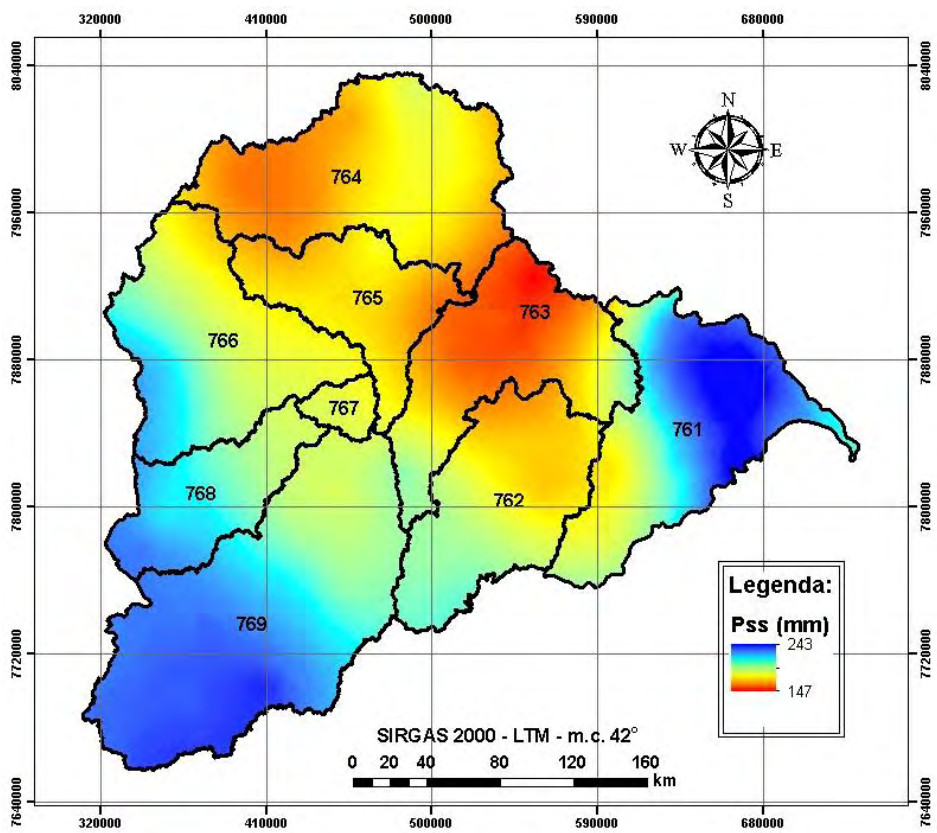


Figura 8 – Mapa de precipitação média do semestre seco (P_{ss}) espacializada para a bacia do rio Doce, em mm.

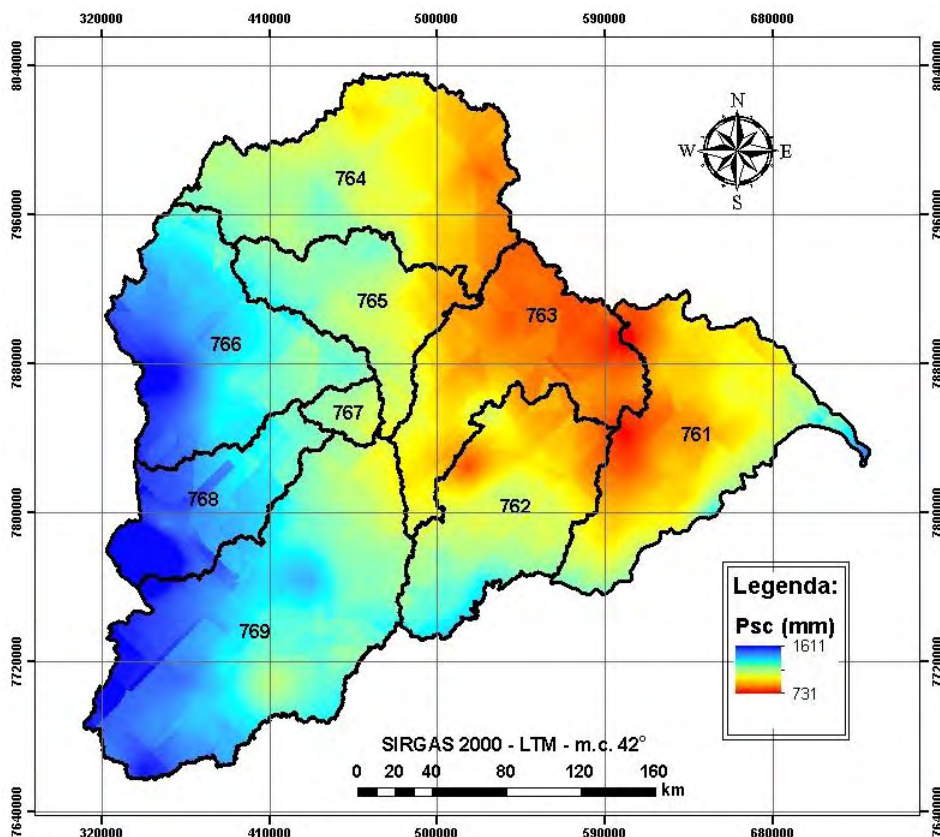


Figura 9 – Mapa de precipitação média do semestre chuvoso (P_{sc}) espacializada para a bacia do rio Doce, em mm.

As estimativas de precipitação, em mm, na bacia do rio Doce variaram de 879 a 1.998 para P_a , de 147 a 243 para P_{ss} e de 731 a 1.611 para P_{sc} .

Analisando-se os mapas de precipitação para as variáveis P_a e P_{sc} verifica-se um padrão de comportamento na bacia hidrográfica do rio Doce que, de forma geral, apresenta precipitação máxima nas cabeceiras das sub-bacias dos rios Piranga, Piracicaba e Santo Antônio (ottocódigos 766, 768 e 769, respectivamente) e precipitações mínimas na região do médio e baixo rio Doce (ottocódigos 761, 762, 763 e 764).

A variável P_{ss} apresenta comportamento distinto das demais, indicando maiores valores na região do baixo rio Doce e cabeceira do rio Piranga (ottocódigos 761 e 769) e precipitações mínimas mais evidenciadas na região central da bacia do rio Doce (ottocódigos 763, 764 e 765).

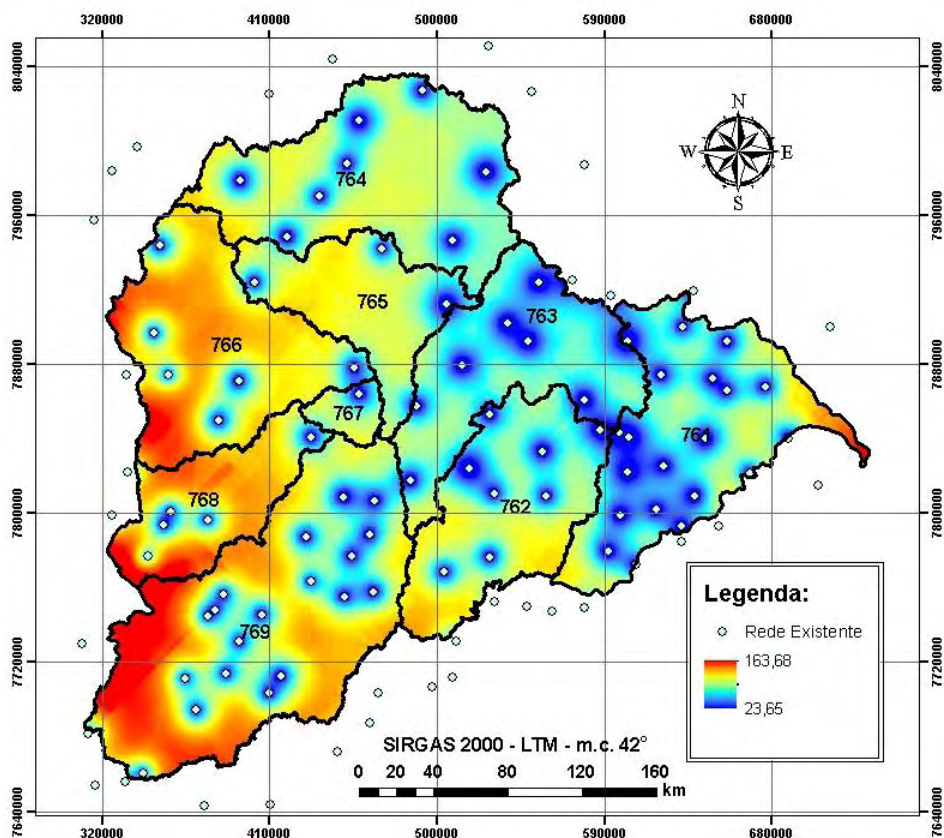


Figura 10 - Mapa de desvio padrão para precipitação média anual (P_a) espacializada para a bacia do rio Doce, em mm.

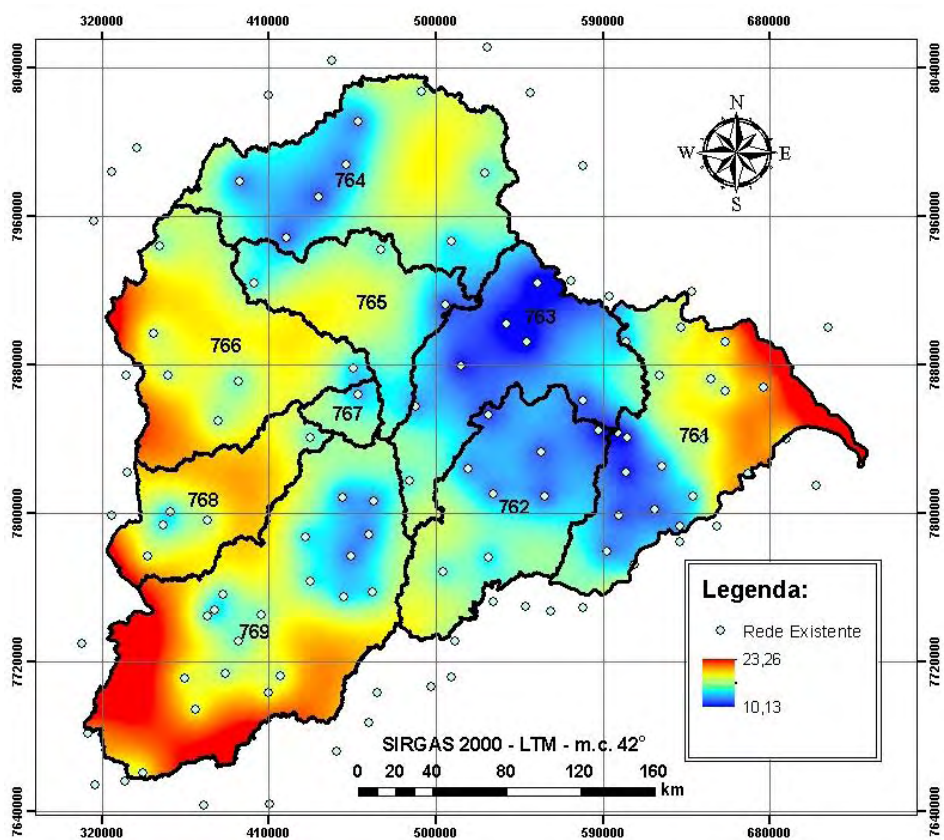


Figura 11 – Mapa de desvio padrão para precipitação média do semestre seco (P_{ss}) espacializada para a bacia do rio Doce, em mm.

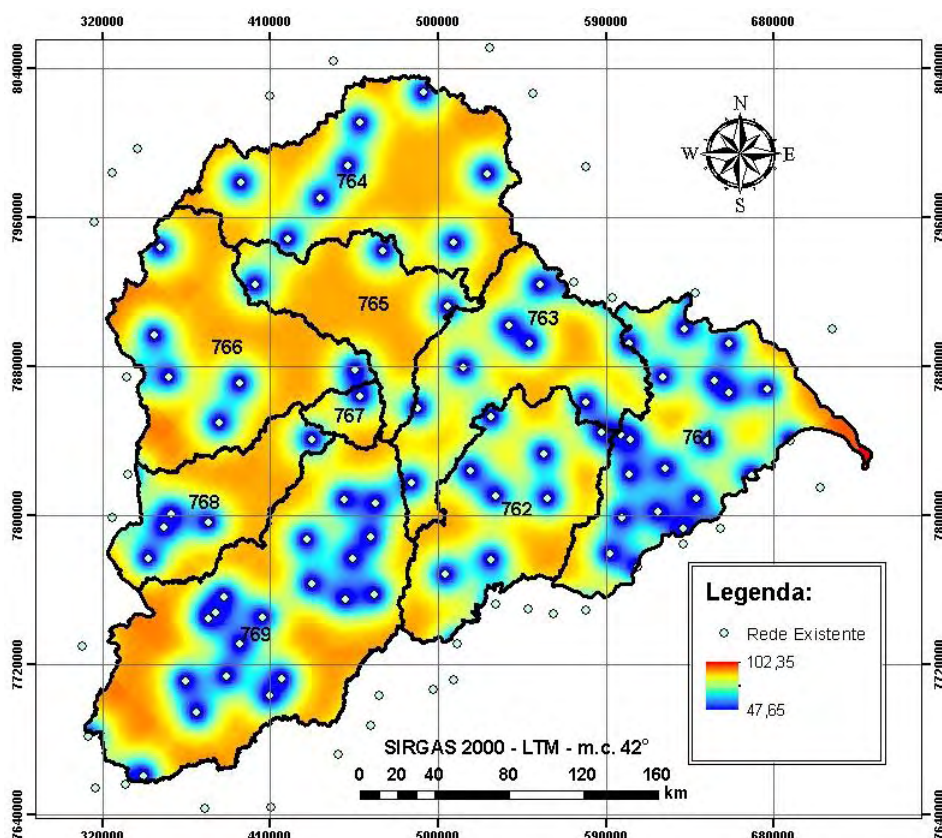


Figura 12 – Mapa de desvio padrão para precipitação média do semestre chuvoso (P_{sc}) espacializada para a bacia do rio Doce, em mm.

Os mapas de desvio padrão das estimativas, obtidos pela técnica de krigagem, apresentaram padrão de comportamento semelhante para as três variáveis estudadas. Analisando-se as Figuras 10 a 12 observou-se que as áreas mais deficientes de monitoramento pluviométrico da bacia do rio Doce, são as regiões de cabeceiras das ottobacias 766, 768 e 769, as regiões centrais das ottobacias 764 e 764 e a região próxima à foz na ottobacia 761.

Os desvios padrão associados às estimativas das precipitações, em mm, variaram de 23,65 a 163,68 para P_a ; de 10,13 a 23,26 para P_{ss} e de 47,65 a 112,35 para P_{sc} .

Com o objetivo de comparar os resultados obtidos para as variáveis em análise, dividiu-se a matriz de desvio padrão pela sua respectiva matriz de estimativas, obtendo-se o desvio padrão percentual para a área em estudo. Na Tabela 8 são apresentadas as estatísticas dos desvios padrão percentuais obtidos para a rede de monitoramento pluviométrico existente na bacia hidrográfica do rio Doce, separada por ottobacias.

Tabela 8 – Desvios padrão percentuais para a rede de monitoramento existente

Precipitação	Estatística	Desvio Padrão Percentual									
		761	762	763	764	765	766	767	768	769	76
P _a	Mínimo	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	Médio	8	8	8	9	9	9	8	9	8	9
	Máximo	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
P _{ss}	Mínimo	6	6	6	7	7	7	7	6	6	6
	Médio	7	7	7	8	8	8	8	8	7	8
	Máximo	11	8	9	9	9	10	8	9	9	11
P _{sc}	Mínimo	5	5	6	5	5	4	5	3	4	3
	Médio	9	9	10	9	9	8	8	7	7	8
	Máximo	11	11	12	12	10	9	10	9	10	12

Legenda: P_a –precipitação total anual, P_{ss} –precipitação total do semestre seco e P_{sc} – precipitação total do semestre chuvoso.

Analisando-se a Tabela 8 observa-se que os desvios padrão percentuais, obtidos a partir dos dados da rede de monitoramento pluviométrico existente, variaram de 3% (P_a) a 7%(P_{ss}) para os desvios mínimos, de 7% (P_{ss}) a 10% (P_{ss}) para os desvios médios e de 8% (P_a) a 12% (P_{ss}) para os desvios máximos.

Considerando-se os resultados obtidos pela análise geoestatística dos dados de precipitação, constatou-se que além de quantitativamente a rede de monitoramento pluviométrico da bacia do rio Doce não atender às condições de densidade mínima de estações sugerida pela OMM (1994), a distribuição espacial da mesma pode ser aprimorada, principalmente pelo rearranjo das estações localizadas em regiões densamente monitoradas para locais com monitoramento deficitário.

3.2.2. Proposta Metodológica para Rearranjo e Otimização da Rede

A partir dos mapas de desvio-padrão obtidos identificaram-se as regiões onde os erros locais eram consideráveis e desprezíveis, incluindo ou reposicionando postos de monitoramento pluviométrico até que a densidade quantitativa e espacial das estações estivesse de acordo com o proposto pela OMM (1994). Para os três mapas de desvio-padrão apresentados (Figuras 10 a 12) ficou evidenciada a necessidade de um rearranjo espacial da rede (regiões densamente monitoradas em azul e regiões com monitoramento deficitário em vermelho/laranja).

O trabalho foi feito em etapas, iniciando-se pela exclusão de estações em regiões densamente monitoradas (etapa 1) e prosseguindo-se com o

reposicionamento de estações em regiões que apresentavam os maiores erros de estimativa (etapas seguintes). Após cada etapa refez-se a análise geoestatística, gerando-se novos mapas de desvios, considerando-se a hipótese de estacionariedade. Os semivariogramas e as configurações adotadas para a análise espacial a partir da técnica de krigagem foram preservados até a conclusão da metodologia proposta.

Na Tabela 9 é disposto, para cada etapa e por região de análise, o número de estações excluídas e incluídas até a conclusão da rede proposta. É importante ressaltar que o número de etapas do trabalho pode variar muito, dependendo de uma série de fatores de cunho estratégico e gerencial, por parte dos órgãos responsáveis pela rede, tais como: previsão orçamentária, ordens de prioridade na gestão da bacia hidrográfica, propósito da rede, número de profissionais envolvidos, entre outros.

Tabela 9 – Densidade de estações de monitoramento pluviométrico por ottobacia

Ottobacia	OttoCódigo	Número de estações					
		Exist.	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 4	Proposta
Baixo Doce - ES	761	19	-4	3	1	0	19
Rio Manhuaçu	762	8	0	2	4	1	15
Caratinga	763	7	-2	4	2	5	16
Rio Suaçuí	764	8	0	5	4	5	22
Suaçuí Pequeno	765	3	0	1	1	6	11
Rio Santo Antônio	766	6	0	3	1	8	18
Ipatinga / Santana do Paraíso / Ipaba	767	1	-1	0	1	1	2
Rio Piracicaba	768	5	-1	2	1	2	9
Piranga	769	19	-4	5	6	5	31
Rio Doce	76	76	-12	25	21	33	143

Analisando-se a Tabela 9 observa-se a exclusão de 12 estações na primeira etapa, sendo quatro na região do Baixo Doce (761), duas na região do Caratinga (763), uma na região de Ipatinga, Santana do Paraíso e Ipaba (767), uma na região do rio Piracicaba (768) e quatro na região do rio Piranga (769). Nenhuma das 12 estações excluídas foi identificada como valor discrepante na análise estatística descritiva inicial. Cabe ressaltar que estas estações foram excluídas por estarem situadas em regiões de erros locais mínimos.

Na etapa dois foram incluídas 25 estações (reposicionamento das 12 estações excluídas anteriormente e inclusão de 13 novas estações). As etapas 3 e 4 foram responsáveis pela inclusão de 21 e 33 estações, respectivamente,

finalizando-se o procedimento de rearranjo e otimização da rede de monitoramento pluviométrico da bacia hidrográfica do rio Doce. Estas estações foram reposicionadas e/ou incluídas em regiões de erros locais máximos.

A disposição espacial das estações existentes e a configuração espacial proposta para a nova rede de monitoramento, após quatro etapas avaliadas, são apresentadas na Figura 13, tomando-se como exemplo a precipitação P_a .

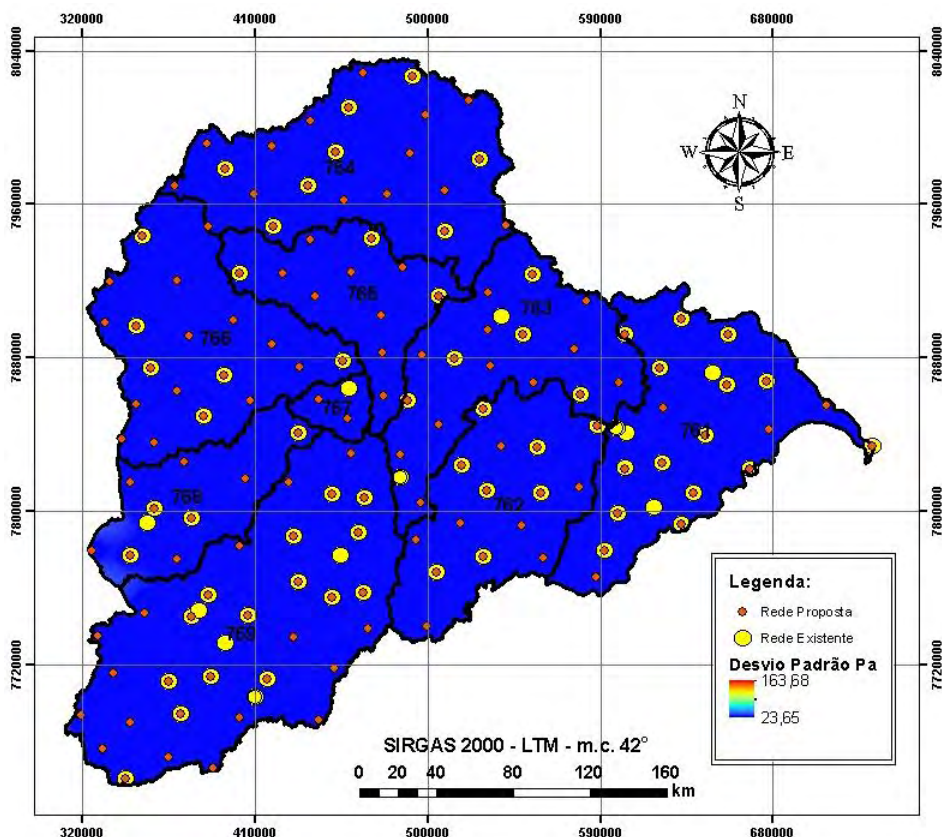


Figura 13 – Mapa de desvio padrão da estimativa para P_a em mm, rede fluviométrica existente e proposta para a bacia hidrográfica do rio Doce.

Comparando-se a distribuição espacial dos desvios padrão observada para a rede de monitoramento proposta (Figura 13) e para a rede existente (Figura 10), utilizando-se a mesma paleta de cores e o mesmo intervalo de desvios encontrados inicialmente, fica nítida a diminuição dos erros de estimativa para toda a bacia hidrográfica do rio Doce. As regiões onde se encontravam os maiores erros de estimativa (regiões de coloração vermelha) desapareceram e as regiões onde se encontravam os menores desvios padrão (regiões de coloração azul escuro) ficaram mais distribuídas pela área de drenagem da bacia.

Com intuito de se avaliar quantitativamente os resultados observados, na Tabela 10 são apresentados os desvios padrão percentuais obtidos para a rede de monitoramento fluviométrico proposta na bacia hidrográfica do rio Doce.

Tabela 10 – Desvios padrão percentuais para a rede de monitoramento proposta

Precipitação	Estatística	Desvio Padrão Percentual									
		761	762	763	764	765	766	767	768	769	76
P _a	Mínimo	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	Médio	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4
	Máximo	5	5	4	5	4	4	4	4	4	5
P _{ss}	Mínimo	0,4	0,3	0,3	1	0,5	0,4	1	1	0,4	0,3
	Médio	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	Máximo	6	5	4	5	4	4	4	4	4	6
P _{sc}	Mínimo	2	2	2	2	2	2	2	1	2	1
	Médio	3	3	3	3	3	2	3	2	3	3
	Máximo	4	4	4	4	4	3	3	3	3	4

Legenda: P_a –precipitação total anual, P_{ss} –precipitação total do semestre seco e P_{sc} – precipitação total do semestre chuvoso.

Na Tabela 10 foram destacados os erros padrão percentuais que tiveram maiores reduções relativas em comparação com os resultados apresentados na Tabela 8 (reduções maiores que 35%).

É importante ressaltar que os erros padrão percentuais obtidos para a rede existente já eram considerados pequenos antes da aplicação da metodologia proposta. A inclusão de 67 novas estações de monitoramento pluviométrico, conforme sugerido pela OMM (1994), é muito onerosa e difícil de ser implementada em curto prazo. No entanto, a metodologia proposta aplicada em somente quatro etapas de desenvolvimento foi responsável por melhoras significativas nas estimativas de precipitação em toda a bacia do rio Doce.

Pode-se desenvolver o raciocínio apresentado por esta nova abordagem científica até ser alcançado o nível de precisão da estimativa que se desejar. O critério de precisão, conforme citado anteriormente, depende de uma série de fatores de responsabilidade dos órgãos gestores da rede de monitoramento.

Esta proposta aplica-se a qualquer bacia hidrográfica que possua rede de monitoramento pluviométrico instalada. No caso da inexistência de uma rede de monitoramento preliminar pode-se utilizar, estações de bacias ou regiões hidrologicamente homogêneas vizinhas.

Cabe ressaltar que as normas de instalação e de operação das estações de monitoramento pluviométrico (OMM, 1994) deverão ser respeitadas na implantação da nova rede proposta.

4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- A bacia hidrográfica do rio Doce possui uma rede de monitoramento pluviométrico deficitária em número de estações de monitoramento e mal distribuída geograficamente.
- O modelo teórico de semivariograma que melhor se ajustou às semivariâncias experimentais, para as três variáveis de precipitação analisadas, foi o esférico.
- A metodologia proposta indicou o reposicionamento de 12 postos e a inclusão de 67 estações de monitoramento pluviométrico na rede hidrométrica da bacia do rio Doce.
- O rearranjo e a inclusão das novas estações pluviométricas possibilitou a redução dos desvios padrão percentuais para a precipitação média anual e dos semestres seco e chuvoso em toda a bacia hidrográfica do rio Doce.
- A metodologia proposta permite alcançar o nível de precisão desejado para a rede hidrométrica, sendo aplicável a qualquer bacia hidrográfica com rede de monitoramento pluviométrico instalada.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), à Universidade Federal de Viçosa (UFV) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo financiamento deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANCTIL, F.; LAUZON, N.; ANDRÉASSIAN V.; OUDIN, L.; PERRIN, C. *Improvement of rainfall-runoff forecasts through mean areal rainfall optimization*. Journal of hydrology, n. 328, p. 717-725, 2006.

BANCO MUNDIAL (1998) *Gerenciamento de Recursos Hídricos*. RODRIGUES, F. (Coord.) Brasília; SRH, Bsb p. 24-107.

BARDOSSY, A.; DAS T. *Influence of rainfall observation network on model calibration and application*. Hydrol. Earth Syst. Sci., n.12, p. 77-89, 2008.

BRASIL, *Política Nacional de Recursos Hídricos*. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. [S. l.]: MMA/ SRH, 1997.

CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B; NOVACK, J.M; PARKIN, T.B; KARLEN, D.L; TURCO R.F.; KNOPKA, A.E. *Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils*. Soil Science Society America Journal, Medison, v.58, p.1240-1248, 1994.

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

COULIBALY, P. *Spatial and temporal variability of Canadian seasonal precipitation (1900-2000)*. Adv. Water Resour., n. 29, p. 1846-1865, 2006.

COULIBALY, P., EVORA, D.N.. *Comparison of neural network methods for infilling missing daily weather records*. Journal of Hydrology, n. 341, p. 27–41, 2007.

COULIBALY, P.; BURN D. H. *Spatial and Temporal variability of Canadian seasonal streamflows*. J. Clim, n.18, p. 191-210, 2005.

COULIBALY, P.; BURN D. H. *Spatial and Temporal variability of Canadian seasonal streamflows*. J. Clim, n.18, p. 191-210, 2005.

DAVIS, J. C. *Statistics and data analysis in geology*. 2. ed. John Willey and Sons, 1986.

DELHOMME, J. P. *Applications de la théorie des variables regionalisées dans les sciences de l'eau*. 130p. Tese Doutorado - Université Pierre ET Marie Curie. Paris. 1976.

DEUTSCH, C. V.; JOURNEL, A. G. *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide*. 2. Ed. Oxford University Press, 1998.

DONG, X.; DOHMEN-JANSSEN, M.; BOOIJ, M. J. *Appropriate spatial sampling of rainfall for flow simulation*. Hydrol. Sci. J., n. 50, p. 279-298, 2005.

DRAPER, N. R.; SMITH, H. *Applied regression analysis*. 2.ed. New York: John Wiley, 1981. 709 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 412p., Rio de Janeiro, 1999.

ENGLUND, E.; SPARKS, A. *Geo-EAS: Geostatistical Environmental Assessment Software*. Las Vegas: International Ground Water Modeling Center. 1992. CD-Rom.

GEO Brasil. *Recursos Hídricos: Componente da série de relatórios sobre o estado e perspectivas do meio ambiente no Brasil*. Ministério do Meio Ambiente; Agência Nacional de Águas; Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. Brasília: MMA; ANA. 264 p., 2007

GERSTNER, E. M.; HEINEMANN, G. *Real-time areal precipitation determination from radar by means of statistical objective analysis*. J. Hydrol., n. 352, 296-308, 2008.

GONÇALVES, A. C. A; FOLEGATTI, M. V. *Correlação espacial entre retenção de água e textura do solo, para fins de manejo de irrigação*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.22, n.3, p.296-303, 2002.

GUTTORP P., SAMPSON P. D., NEWMAN K. *Nonparametric estimation of spatial covariance with applications to monitoring network evaluation*. In Statistics in the Environmental, Earth Sciences. Edward Arnold: London; p. 39–51, 1992.

HUSAIN T. *Hydrologic network design formulation*. Canadian Water Resources Journal, v. 12, p. 44–59, 1987

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Disponível em: < <http://www.ibge.gov.br/home/>>. Acesso em julho de 2010.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. *An Introduction to Applied Geostatistics*. New York, Oxford University Press, 560 p., 1989.

JOURNEL, A. G. *Etude sur l'Estimation d'une Variable Regionalisée-Application à la Cartographie Sous-Marine*. Service Central Hydrographique de la Marine, 1969.

JOURNEL, A. G.; HUIJBREGTS, C. J. *Mining geostatistics*. London: Academic Press, 600p., 1978.

KRIGE, D. G. *A statistical approach to some basic mine evaluation problems on the Witwatersrand*. Johannesburg Chemistry Metallurgy Mining Society South African, v. 52, p. 119-139, 1951.

LANDIN, P. M. B. *Análise geoestatística de dados geológicos*. 2. ed., 253 p., São Paulo: UNESP, 2003.

MATHERON, G. *The theory of regionalized variables and its applications*. Paris, Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathematique d Fontainebleu, 211 p., 1971,

MINAS GERAIS, Governo do Estado. *Redes e bacias hidrográficas otocodificadas de Minas Gerais*. Belo Horizonte, 2010. Base vetorial. DVD.

MISHRA, A. K.; COULIBALY, P. *Developments in hydrometric network design: a review*. Reviews of Geophysics, v. 47, 2009.

_____. *Hydrometric network evaluation for Canadian watersheds*. Journal of Hydrology, n. 380, p. 420-437, 2009.

MISHRA, A.K., OZGER, M., SINGH, V.P. *An entropy based investigation into the variability of precipitation*. Journal of Hydrology, n.370, p. 139–154, 2009.

MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L. *Variabilidade espacial de classes de textura, salinidade e condutividade hidráulica de solos em planície aluvial*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.10, n.1, p.30-37, 2006.

NOUR, M. H.; SMIT, D. W.; EL-DIN, M. G. *Geoestatistical mapping of precipitation: Implications for rain gauge network design*. Water Sci. Technol. N.53, p. 101-110, 2006.

ORGANIZAÇÃO METEOROLÓGICA MUNDIAL - OMM. *Guia para práticas hidrológicas: Aquisição e processamento de dados, análises, estimativas e outras aplicações*. 15 ed., nº 168, 735 p., 1994.

PFRAFSTETTER, O. *Classificação de bacias hidrográficas: metodologia de codificação*. Rio de Janeiro, RJ: Departamento Nacional de Obras de Saneamento (DNOS), 19 p., 1989. Trabalho não publicado.

PINTO, N. L. de S.; HOLTZ, A. C. T.; MARTINS, J. A.; GOMIDE, F. L. S. *Hidrologia básica*. São Paulo: Edgard Blücher, 278p., 1976.

PLANO INTEGRADO DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA DO RIO DOCE - PIRH. Disponível em <<http://www.pirhdoce.com.br/>>. Acesso em março de 2010.

ROGALUS, M. J.; OGDEN, F. L. *Comparison of GCIP and stage III radar-rainfall estimate over the Mississippi River Basin for 1997*. J. Hydrol., n. 341, p. 177-185, 2007.

SANTOS, C. *Estatística descritiva - Manual de auto aprendizagem*. 1.ed., 264p. Lisboa, 2007.

SKOK, G. *Analytical and practical examples of estimating the average nearest-neighbor distance in a rain gauge network*. Meteorol. Z., n. 15, p. 565-573, 2006.

SPENCE, C.; SASO, P.; RAUSCH J. *Quantifying the impact of hydrometric network reductions on regional stream-flow prediction in northern Canada*. Can. Water Resour. J., n. 32, p. 1-20, 2007.

STEWART, I. T.; CAYAN, D. R.; DETTINGER, M. D. *Changes toward earlier stream-flow timing across western North America*. J. Clim., n. 18, p. 1136-1155, 2005.

TUKEY, J. W. *Exploratory Data Analysis*. Addison-Wesley, 1977.

VAUCLIN, M.; VIEIRA, S. R.; VACHAUD, G.; NIELSEN, D. R. *The use of cokriging with limited field soil observations*. Soil Science Society of America Journal, Madison, v. 47, n.1, p.175-184, 1983.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. *Spatial variability of soil physical properties in the field*. Applications of soil physics. New York: Academic Press, 1980.

WESTCOTT, N. E.; KNAPP, H. V.; HILBERG, S. D. *Comparison of gage and multi-sensor precipitation estimates over a range of spatial and temporal scales in the Midwestern United States*. H. Hydrol., n. 35, p. 1-12, 2008.

YILMAZ, K. K. et al. *Intercomparison of rain gauge, radar and satellite-based precipitation estimates with emphasis on hydrologic forecasting*. J. Hydrometeorol., n. 6, p. 497-517, 2005.