

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

GIZELLA CARNEIRO IGREJA

**APLICAÇÃO DO MÉTODO GEOESTATÍSTICO NO DIMENSIONAMENTO DE
REDES PLUVIOMÉTRICAS CONSIDERANDO A PRECISÃO DA
ESTIMATIVA E O CUSTO DE OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DAS
ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO**

VITÓRIA
2006

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

GIZELLA CARNEIRO IGREJA

APLICAÇÃO DO MÉTODO GEOESTATÍSTICO NO DIMENSIONAMENTO DE REDES PLUVIOMÉTRICAS
CONSIDERANDO A PRECISÃO DA ESTIMATIVA E O CUSTO DE OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DAS
ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO

DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO PROGRAMA DE
PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO,
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENÇÃO DO
GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA AMBIENTAL.

ORIENTADOR: DR. EDMILSON COSTA TEIXEIRA

CO-ORIENTADOR: DR. VALDÉRIO ANSELMO
REISEN.

VITÓRIA

2006

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

I24a Igreja, Gizella Carneiro, 1979-
Aplicação do método geoestatístico no dimensionamento de redes pluviométricas considerando a precisão da estimativa e o custo de operação e manutenção das estações de monitoramento / Gizella Carneiro Igreja. – 2006.

99 f. : il.

Orientador: Edmilson Costa Teixeira.

Co-Orientador: Valdério Anselmo Reisen.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Precipitação (Meteorologia). 2. Custo. 3. Geoestatística. I. Teixeira, Edmilson Costa. II. Reisen, Valdério Anselmo. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 628

GIZELLA CARNEIRO IGREJA

**APLICAÇÃO DO MÉTODO GEOESTATÍSTICO NO DIMENSIONAMENTO DE REDES
PLUVIOMÉTRICAS CONSIDERANDO A PRECISÃO DA ESTIMATIVA E O CUSTO DE
OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DAS ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisição parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Ambiental.

Aprovada em 21 de fevereiro de 2006.

COMISSÃO EXAMINADORA

PROF. DR. EDMILSON COSTA TEIXEIRA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
ORIENTADOR

PROF. DR. VALDÉRIO ANSELMO REISEN
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CO-ORIENTADOR

PROF. DR. ANTÔNIO SÉRGIO FERREIRA MENDONÇA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PROFª. DRª. SUZANA MARIA GICO LIMA MONTENEGRO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Wertes e Maria Margareth, e às minhas irmãs, Rachel e Mariana, agradeço as palavras de incentivo, além de todo o amor, carinho e respeito.

Ao meu marido Wayne, pelo apoio, companheirismo e paciência pela ausência.

Ao Professor Edmilson Costa Teixeira por todos os ensinamentos transmitidos, pela oportunidade e orientação.

Ao Professor Valdério Anselmo Reisen pelo incentivo e ensinamentos dedicados a mim durante o desenvolvimento da pesquisa.

Ao Diego Lemos Coutinho, pelo auxílio nas horas difíceis, dedicação e amizade que sempre demonstrou durante toda a pesquisa.

À Joseany Trarbach, pelos momentos de ensinamento prestados e pelas trocas de conhecimento sobre o tema durante a pesquisa.

A todos os colegas e professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (PPGEA) especialmente a Marisleide, Fernando, Elene, Ednéia, Vanuza, Mirian, Tatiana, Aline, Julimara, Érica, Silvia, Ana Paula e Wesley pela amizade consolidada neste período.

E a todos, que de alguma forma me auxiliaram nesta caminhada.

RESUMO

O adequado gerenciamento dos recursos hídricos é dependente, dentre outros, de informações hidroclimatológicas, provenientes de redes de monitoramento, incluindo as redes pluviométricas. A precisão das informações fornecidas pelas redes, por exemplo, a estimativa da precipitação num ponto não amostrado ou a precipitação média numa área está diretamente associada ao número e distribuição das estações que as compõem. Deste modo, o dimensionamento adequado das redes pluviométricas consiste em etapa fundamental para a obtenção de dados precisos de precipitação, importantes para projetos, estudos e planejamento na área de recursos hídricos. A Geoestatística, que pode ser utilizada em estudos de dimensionamento de rede pluviométrica, tem se destacado perante os métodos convencionais, pois fornece as melhores estimativas de precipitação, uma vez que considera o aspecto aleatório e o espacial, característicos deste e de muitos outros fenômenos naturais. O presente trabalho teve como principal objetivo a proposição e simulação de procedimentos que possibilitem o adequado dimensionamento de redes pluviométricas, utilizando-se o método da Geoestatística. Como objetivos específicos da aplicação do método para a referida finalidade têm-se: considerar de forma conjunta, a precisão das estimativas de precipitação média sobre uma área e o custo de operação e manutenção da rede pluviométrica; e avaliar o redimensionamento da rede pela relocação ou inserção de estações na rede. A área de estudos foi a bacia hidrográfica do rio São Mateus, pertencente ao estado do Espírito Santo. A rede de precipitação utilizada é composta por 18 estações com série histórica de 30 anos de dados. Para realizar as análises geoestatísticas foram utilizados os programas R, por meio do pacote geoestatístico *geoR*, e o programa REDE-GEO que possibilita verificar a precisão nas estimativas de precipitação num ponto e numa área, calcular a variância da estimativa associada a todas as possíveis combinações de um dado número de estações pluviométricas, realizar estimativas através da krigagem, auxiliar no procedimento de modelagem pela validação cruzada. Assim, foi possível avaliar o redimensionamento da rede considerando aspectos de muita relevância, principalmente em países onde existe a escassez de recursos financeiros destinados a esta finalidade. Os resultados das análises mostram que quando existem limitações de recursos financeiros a rede pode ser dimensionada de forma a fornecer a melhor precisão possível com os recursos disponíveis e também que é possível redimensionar a rede pela relocação ou inserção de estações de forma a melhorar a estimativa de precipitação média sobre uma área.

ABSTRACT

The adequate management of hydric resources depends, among others, on the information of hydro climatology, coming from monitoring nets, including the pluviometric nets. The accuracy of the information given by the nets, for instance, the precipitation estimative in a non sampled point or the average perception in an area is directly associated to the number and distribution of the stations that are part of them. This way, the adequate dimension measurement of pluviometric nets consists in fundamental stage for the collection of precise data of precipitation, important for projects, studies and planning in the hydric resources area. The Geostatistics, which can be used in studies of dimension measurement of the pluviometric net, stands out toward the conventional methods, because it offers better precipitation estimative, once it considers the aleatory and the space aspect, characteristics of those and many other natural phenomenon. The present study aimed mainly at the proposition and simulation of procedures that make possible the adequate dimension measurement of pluviometric nets, using the Geostatistics method. The specific goals of application method were: considering as a group the estimative accuracy of the average precipitation related to an area and cost of operation and maintenance of the pluviometric net; reevaluating the dimensions of the net through relocation or inversion of the stations in the net. The study area was the hydrographic bay of São Mateus river, in the state of Espírito Santo. The precipitation net used is composed of 18 stations with historical series of 30 year old data. To do the Geostatistics analysis it was used the R program, through the Geostatistics package *geoR*, and the REDE-GEO program that makes possible the verification of the accuracy in the precipitation estimative in a certain point and area, the calculation of the variance of the estimative associated to all possible combinations of a certain number of the pluviometric stations, the accomplishment of estimative through Krigagem, the auxiliary in the modeling procedure by the crossed validation. This way, it was possible to reevaluate the net dimension taking into consideration the high relevant aspects, especially in countries where there is a lack of financial resources designated to such aim. The analyses results show that when there are limitations of financial resources the net may be dimensioned in a way to provide the best possible accuracy with the available resources and also that it is possible to do a new measurement dimension of the net through the relocation or insertion of stations in order to improve the average precipitation estimative related to an area.

SUMÁRIO

1	Introdução	14
2	Objetivos.....	17
2.1	Objetivo geral	17
2.2	Objetivos específicos	17
3	Fundamentação Teórica e Revisão Bibliográfica	19
3.1	Fundamentação teórica	19
3.1.1	Método geoestatístico	19
3.1.2	Otimização.....	35
3.2	Revisão bibliográfica.....	37
3.2.1	Técnicas utilizadas na análise de quantidade e distribuição da precipitação associada ao dimensionamento de redes pluviométricas	37
3.2.2	Dimensionamento de redes pluviométricas através do método geoestatístico.....	41
4	Material e Métodos.....	49
4.1	Aplicação do método geoestatístico	49
4.2	Caracterização da área de estudo.....	50
4.3	Análise exploratória dos dados.....	51
4.4	Modelagem e validação do semivariograma	55
4.5	Otimização da rede pluviométrica através da análise da precisão de estimativa da precipitação média total anual e sazonal x custo.....	56
5	Resultados e Discussões.....	60
5.1	Modelagem automatizada do semivariograma e validação	60
5.1.1	Média total anual	60
5.1.2	Dados mensais	64
5.2	Configurações ótimas considerando precisão e custo de operação e manutenção das estações pluviométricas na região estudada	71
5.2.1	Configurações ótimas considerando apenas a precisão.....	72
5.2.2	Configurações ótimas considerando a precisão e o custo.....	74
5.3	Procedimento para redimensionamento da rede pluviométrica.....	77

SUMÁRIO

5.3.1	Procedimento para redimensionamento da rede através da relocação de estações	78
5.3.2	Procedimento para redimensionamento da rede através da inserção de estações	80
6	Conclusões e recomendações	84
6.1	Conclusões.....	84
6.2	Recomendações	85
7	Referências bibliográficas.....	88
ANEXO		95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados obtidos no estudo de dimensionamento realizado por Sorman & Balkan (1983).....	40
Tabela 2 - Erros percentuais relativos da estação 2 nos anos em que foram preenchidas falhas na série	53
Tabela 3 - Identificação, código, coordenadas e precipitação média total anual das 18 estações	54
Tabela 4 - Estatística descritiva dos dados observados e estimados de precipitação média total anual.....	62
Tabela 5 - Estatística descritiva dos erros percentuais relativos (%) referentes às estimativas de precipitação média total anual das 18 estações.....	63
Tabela 6 - Estatística descritiva dos dados observados e estimados de precipitação no período seco.....	66
Tabela 7 - Estatística descritiva dos erros percentuais relativos (%) referentes às estimativas de precipitação no período seco das 18 estações.....	67
Tabela 8 - Estatística descritiva dos dados observados e estimados de precipitação no período chuvoso.....	70
Tabela 9 - Estatística descritiva dos erros percentuais relativos (%) referentes às estimativas de precipitação no período chuvoso das 18 estações.....	70
Tabela 10 – Tabela comparativa entre valores de VE das configurações encontradas por Trarbach (2004) e os do presente trabalho para os períodos anual, seco e chuvoso.....	73
Tabela 11 - Tabela das configurações obtidas para custo máximo de 20 unidades	75
Tabela 12 – Variância e desvio padrão dos períodos seco e chuvoso para as configurações de custo até 20 unidades.....	76
Tabela 13 - Tabela das configurações obtidas para custo máximo de 20 unidades	76
Tabela 14 - Tabela com valores de VE das configurações ótima e configuração com estações relocadas.....	80
Tabela 15 - Tabela com valores de VE das configurações ótimas e configurações com estações inseridas.....	82

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de semivariograma com os parâmetros	26
Figura 2 - Curva transformação semelhante a mostrada por Bras & Rodriguez-Iturbe (1974).	41
Figura 3 - Variância da estimativa versus custo para subgrupos de até 5 estações.....	45
Figura 4 - Rede pluviométrica na Bacia hidrográfica do rio São Mateus.	46
Figura 5 - Configuração com 9 estações encontrada para os períodos seco e anual.....	47
Figura 6 - Configuração com 9 estações encontrada para o período chuvoso.	47
Figura 7 - Bacia hidrográfica do rio São Mateus com a rede pluviométrica estudada.....	49
Figura 8 - Localização da bacia do rio São Mateus no estado do Espírito Santo (ES).	50
Figura 9 - Malha utilizada para a realização dos cálculos na Bacia do rio São Mateus/ES.....	58
Figura 10 - Região hidrográfica do Rio São Mateus/ES com a rede pluviométrica estudada com os custos de manutenção e operação das estações: (+) 4 unidades, (■) 3 unidades, (▲) 2 unidades e (●) 1 unidade	72
Figura 11 - Mapa de variância sobre a área(VE) gerado com 5 estações, utilizado para estimar o local da 6ª estação	78
Figura 12 - Mapa de variância com localização da 1ª estação relocada.....	78
Figura 13 - Mapa de variância sobre a área(VE) gerado com 6 estações, utilizado para estimar o local da 7ª estação	79
Figura 14 - Mapa de variância com localização da 2ª estação relocada.....	79
Figura 15 - Mapa de variância sobre a área(VE) gerado com 7 estações, utilizado para estimar o local da 8ª estação	79
Figura 16 - Mapa de variância com localização da 3ª estação relocada.....	79
Figura 17 - Mapa da rede com as 5 estações existentes e a localização proposta para relocação da 6ª, 7ª e 8ª estações.....	80
Figura 18 - Mapa de variância gerado pelas 5 estações que compõem a rede	81
Figura 19 - Mapa de variância gerado pelas 5 estações existentes com o local de inserção da 6ª estação	81
Figura 20 - Mapa de variância gerado pelas 6 estações com localização da 7ª estação	81
Figura 21 - Mapa de variância gerado pelas 7 estações com o local de inserção da 8ª estação	81
Figura 22 - Mapa da rede com as 5 estações existentes e a localização proposta para inserção da 6ª, 7ª e 8ª estações.....	81

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Gráfico da variância de estimação x número de estações para os períodos anual, seco e chuvoso.....	46
Gráfico 2 - Desvio da estimativa de precipitação média em relação à malha com 100 divisões	57
Gráfico 3 - Semivariograma isotrópico para precipitação média total anual	61
Gráfico 4 - Semivariograma do período anual na direção $0^\circ \pm 22,5$	61
Gráfico 5 - Semivariograma do período anual na direção $90^\circ \pm 22,5$	61
Gráfico 6 - Precipitação observada x estimada: valores obtidos da validação cruzada dos dados de precipitação média total anual	62
Gráfico 7 - Gráficos de distribuição dos resíduos entre os valores observados e estimados de precipitação média total anual.....	63
Gráfico 8 - Gráfico de BoxPlot da precipitação média total dos meses de Janeiro a Dezembro para as 18 estações na região estudada	64
Gráfico 9 - Semivariograma isotrópico para precipitação no período seco.....	65
Gráfico 10 – Semivariograma do período seco na direção $0^\circ \pm 22,5$	65
Gráfico 11 - Semivariograma do período seco na direção $90^\circ \pm 22,5$	65
Gráfico 12 - Precipitação observada x estimada: valores obtidos da validação cruzada para o período seco.....	66
Gráfico 13 - Gráficos de distribuição dos resíduos referentes a diferença entre os valores observados e estimados de precipitação média total anual.....	67
Gráfico 14 - Semivariograma isotrópico para precipitação no período chuvoso	68
Gráfico 15 - Semivariograma do período chuvoso na direção $0^\circ \pm 22,5$	69
Gráfico 16 - Semivariograma do período chuvoso na direção $90^\circ \pm 22,5$	69
Gráfico 17 - Precipitação observada x estimada: valores obtidos da validação cruzada para o período chuvoso	69
Gráfico 18 -Gráficos de distribuição dos resíduos referentes a diferença entre os valores observados e estimados de precipitação no período chuvoso.....	71

Introdução

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a busca por informações hidrológicas vem aumentando principalmente após a criação da Política Nacional de Recursos Hídricos, Lei nº 9433/97, a qual exige um adequado gerenciamento dos usos múltiplos dos recursos hídricos e controle de eventos hidrológicos extremos (secas e enchentes), tomando-se a bacia hidrográfica como o espaço geográfico para a implantação da referida Política.

O adequado gerenciamento de recursos hídricos é dependente, dentre outros, da disponibilidade de uma série de dados e informações hidroclimatológicas, incluindo-se dados brutos de precipitação e as informações geradas destes.

A precipitação é um fenômeno natural que apresenta grande variabilidade espacial e temporal, e sofre influência de uma variedade de fatores como topografia, altitude, temperatura, velocidade e direção dos ventos, sazonalidade, entre outros.

A determinação da distribuição espacial da precipitação média temporal (anual, sazonal, etc.) comumente se baseia na interpolação e extrapolação de dados monitorados por redes de estações pluviométricas. Dentre os métodos mais recomendados para a interpolação e extrapolação de dados de precipitação tem-se o geoestatístico, que, além de permitir a estimação da precipitação num ponto, fornece a precisão com que a estimação é feita.

Vários trabalhos vêm sendo desenvolvidos nas últimas décadas sobre o emprego da geoestatística no dimensionamento de redes de precipitação para fins diversos, incluindo-se aquele voltado para a determinação da precipitação média temporal numa área ou num ponto, objetos da presente dissertação, informação esta de grande relevância para o gerenciamento de recursos hídricos (Bastin et al.; 1984, Tabios & Salas (1985); Phillips, Dolph & Marks, 1992; Bacchi & Kottegoda (1995), Pardo-Igúzquiza (1998), Holawe & Dutter (1999), Goovaerts (2000); Trarbach (2004)).

O trabalho de Trarbach (2004), desenvolvido no âmbito do Grupo de Pesquisa no qual esta dissertação está vinculada, teve como principais objetivos analisar o comportamento da precisão da estimativa da precipitação média numa área em função da variação da distribuição espacial de um conjunto de estações e avaliar a influência da configuração da rede na precisão da estimativa de precipitação. Entre os pontos não considerados por Trarbach em sua pesquisa incluem-se:

- O custo de operação e manutenção da rede. Bras & Rodriguez – Iturbe (1976) afirmam que o dimensionamento ótimo de uma rede pluviométrica com vistas à determinação da precipitação média numa área consiste em se obter uma configuração (número de estações e a suas localizações) que forneça a melhor estimativa desta informação, considerando os recursos disponíveis para sua operação e manutenção. Esta consideração é de significativa importância, principalmente em países onde existe a escassez de recursos financeiros destinados a esta finalidade.

- Inserção de novas estações pluviométrica e relocação de estações existentes. Alguns trabalhos, como os de Sorman & Balkan (1983) e Bastin et al. (1984), sobre redimensionamento de redes, mostram como a inserção e a relocação de estações pluviométricas podem melhorar as estimativas de precipitação numa região. No Brasil, por exemplo, estes tópicos são de muita relevância, uma vez que as redes de monitoramento de precipitação existentes foram, no geral, dimensionadas em épocas anteriores à promulgação da Lei 9433/97, requerendo hoje o seu redimensionamento com vistas a garantir precisão de estimação de dados de precipitação na escala de bacia hidrográfica.

Trarbach (2004) empregou o aplicativo REDE-GEO, desenvolvido na Universidade Federal do Espírito Santo (Coutinho et al., 2004), para o desenvolvimento de diversas etapas relacionadas ao emprego do método geostatístico no dimensionamento de redes de precipitação, como a krigagem, a validação cruzada, a estimação da variância num ponto e numa área, bem como a definição de configurações ótimas de redes. Alguns dos procedimentos foram realizados de forma automática enquanto outros foram executados de forma interativa usuário – aplicativo, tornando estes procedimentos mais lentos que o automatizado, bem como podendo interferir na precisão dos resultados do dimensionamento.

Com base nas considerações apresentadas acima, foram definidos os objetivos do presente trabalho, que são apresentados no capítulo a seguir, Capítulo 2.

Objetivos

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo geral contribuir para a prática do dimensionamento de redes pluviométricas através da utilização do método geoestatístico, visando o adequado gerenciamento de recursos hídricos e de bacias hidrográficas, através do aperfeiçoamento do aplicativo REDE-GEO.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Automatizar o procedimento de modelagem do semivariograma experimental, considerado pelo REDE-GEO, buscando o conjunto de parâmetros do modelo que forneça as melhores estimativas de precipitação.

Para uma região hidrográfica piloto:

Implementar rotinas que possibilitem o dimensionamento de redes pluviométricas considerando:

- precisão da estimativa de precipitação e o custo de operação e manutenção da rede;
- relocação de estações da rede existente;
- inserção de estações na rede existente.

*Fundamentação
Teórica e Revisão
Bibliográfica*

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1.1 MÉTODO GEOESTATÍSTICO

A metodologia geoestatística desenvolvida por Daniel G. Krige foi formulada para tratamento de dados geológicos. Avaliando dados de concentração de ouro da África do Sul, Krige só encontrou sentido nas variâncias quando considerava a distância entre amostras. Baseado nas observações de Daniel G. Krige, o engenheiro de minas Georges Matheron formalizou a Teoria das Variáveis Regionalizadas, contendo fundamentos da geoestatística.

A geoestatística é um método que utiliza o modelo probabilístico associado à posição espacial das amostras permitindo que as características essenciais dos fenômenos naturais, o aspecto aleatório e o espacial, sejam analisadas por uma imagem da variabilidade dos dados e da medida de correlação existente entre os valores em diversas posições. Uma ferramenta chamada semivariograma permite a realização desse tipo de análise além de estimar valores da variável para locais não amostrados através da krigagem, com variância mínima e sem tendenciosidade.

No início dos anos 80 a geoestatística apresentou-se como uma disciplina híbrida sendo utilizada pela engenharia de minas, geologia, matemática e estatística (Cressie,1993).

Diversas ciências que trabalham com dados coletados em diferentes posições no espaço necessitam desenvolver modelos que indicam quando existe dependência entre as medições nas diferentes localizações (Cressie,1989).

Autores como Bastin et all. (1984), Delhomme (1978), Goovaerts (2000), Holawe & Dutter (1985), Phillips, Dolph & Marks (1992), Ashraf et al. (1997) e Trarbach (2004) têm demonstrado que o método de predição geoestatístico, realizado através da krigagem, fornece melhores estimativas de precipitação do que métodos convencionais como o inverso da distância, o inverso do quadrado da distância, polígonos de Thiessen, entre outros.

3.1.1.1 VARIÁVEL REGIONALIZADA

Na geoestatística, as variáveis são dependentes da posição espacial e possuem diferentes probabilidades de ocorrência, diferente da estatística clássica onde as variáveis apresentam igual probabilidade de ocorrência e são independentes, ou seja, observações vizinhas não exercem influências umas sobre as outras.

O termo regionalizado foi proposto para descrever um fenômeno que é espalhado sobre uma área e apresenta certa estrutura de correlação espacial (Delhomme, 1978).

Conforme Matheron (1963), a variável regionalizada é uma função espacial numérica que descreve o valor de alguma variável no espaço ou no tempo, e varia de um local para outro com continuidade aparente.

A precipitação, como a maioria das variáveis abordadas pelas ciências naturais, pode ser considerada como variável regionalizada. O fenômeno da precipitação está relacionado com a posição espacial, variando consideravelmente de um local para outro. Apesar dessa aleatoriedade os valores observados podem apresentar certa continuidade, mostrando que a distribuição das variáveis depende da distância entre os pontos.

A variável regionalizada $z(x)$ é simplesmente uma realização da função aleatória $Z(x)$ que fornece o valor no ponto x_i (num espaço uni, bi ou tri-dimensional) de uma característica z do fenômeno natural estudado em uma área A .

$$z(x) = \{Z(x_i), \forall x \in A\} \quad (3.1)$$

A correlação espacial existente entre as variáveis regionalizadas pode ser analisada através da utilização de ferramentas que avaliam a continuidade espacial dando a possibilidade de investigar a magnitude da correlação entre as amostras dependendo da distância em que elas se encontram umas das outras.

3.1.1.2 HIPÓTESES CONSIDERADAS

Dados amostrais que estão próximos no espaço ou tempo são mais parecidos que aqueles afastados, portanto pode se dizer que quanto mais próximos estão os dados, mais correlacionados eles estarão.

A separação entre dois pontos amostrais no espaço pode ser representada por um vetor. Dessa forma, vários pontos geram um conjunto de vetores que são caracterizados por uma função de distribuição. O conjunto de todas as funções de distribuição constitui a lei espacial da função aleatória. Na geoestatística, somente os dois primeiros momentos dessa lei são utilizados. Em outras palavras, pode-se dizer que não existe distinção entre duas funções aleatórias que possuem os mesmos momentos de primeira e segunda ordem e as duas funções são consideradas pertencentes ao mesmo modelo (Journel & Huijbregts, 1978).

A hipótese geralmente considerada ao se analisar a estrutura da variável regionalizada é a de estacionaridade. Um processo é dito estacionário se o seu desenvolvimento no tempo ou espaço ocorre de maneira mais ou menos homogênea, com oscilações aleatórias contínuas em torno de um valor médio, e sem que a amplitude média e as oscilações mudem bruscamente no tempo ou no espaço.

Uma função aleatória pode ser definida como estacionária, se todos os momentos estatísticos são invariantes para toda mudança de origem. Se o processo é estacionário de ordem K , então:

$$E[Z(x)] = m_1 = \text{constante}, \forall x \in \mathfrak{R}^p \quad (3.2)$$

$$E[Z^2(x)] = m_2 = \text{constante}, \forall x \in \mathfrak{R}^p$$

⋮

$$E[Z^K(x)] = m_K = \text{constante}, \forall x \in \mathfrak{R}^p$$

Um processo estacionário de ordem K é também estacionário para as ordens inferiores. No entanto, para estudos de geoestatística exige-se no máximo a estacionaridade de segunda ordem, ou seja, necessita-se como restrição máxima que o primeiro e o segundo momentos em relação à origem sejam constantes.

Com isso, uma variável é chamada de estacionária de segunda ordem, quando:

(i) a esperança existe e independe do ponto x , portanto a média será a mesma para todo o processo, o que caracteriza a estacionaridade de primeira ordem:

$$E[Z(x)] = m, \forall x \in \mathfrak{R}^p \quad (3.3)$$

(ii) o segundo momento existe:

$$E[Z(x)]^2 < \infty \quad (3.4)$$

(iii) para cada par de variáveis aleatórias $\{Z(x), Z(x+h)\}$ a função de covariância existe e depende apenas do vetor $h \in \mathfrak{R}^p$:

$$C(x, x+h) = E[Z(x+h)] = E[Z(x+h)Z(x)] - m^2 = C(h), \quad \forall x \in \mathfrak{R}^p \quad (3.5)$$

A estacionaridade da covariância ou de segunda ordem implica em estacionaridade da variância:

$$Var[Z(x)] = E\{[Z(x) - m]^2\} = C(0) \quad (3.6)$$

Implica também na estacionaridade do variograma que é definido como:

$$\begin{aligned} 2\gamma(x, h) &= E\{[Z(x) - Z(x+h)]^2\} = \\ &= E\{[Z(x)]^2\} + E\{[Z(x+h)]^2\} - 2E\{[Z(x) \cdot Z(x+h)]\} = \\ &= E\{[Z(x)]^2\} + E\{[Z(x+h)]^2\} - 2m^2 = \\ &= E\{[Z(x)]^2\} - m^2 + E\{[Z(x+h)]^2\} - m^2 = \\ &= C(0) - C(h) \end{aligned} \quad (3.7)$$

Esta hipótese supõe a existência de uma variância finita dos valores medidos, fato que não pode ser suposto para determinados fenômenos físicos e naturais que possuem uma capacidade ilimitada de dispersão para o qual nenhuma variância ou covariância pode ser definida, como a concentração de ouro em minas da África do Sul estudadas por Krige (1951). Nesse caso, a hipótese de estacionaridade pode ser considerada através de hipótese intrínseca que não apresenta restrição quanto a existência de variância finita.

O processo estocástico estacionário intrínseco apresenta as seguintes características:

(i) a esperança existe e independe do ponto x:

$$E[Z(x)] = m, \quad \forall x \in \mathfrak{R}^p \quad (3.8)$$

(ii) para todo $h \in \mathfrak{R}^P$, a variância da diferença $[Z(x+h) - Z(x)]$ existe e não depende do ponto x :

$$\text{Var}[Z(x+h) - Z(x)] = E\{[Z(x+h) - Z(x)]^2\} = 2\gamma(h), \quad \forall x \in \mathfrak{R}^P \quad (3.9)$$

Dessa forma, observa-se que a estacionaridade de segunda ordem implica em hipótese intrínseca, porém o inverso nem sempre é verdadeiro (Journel & Huijbregts, 1978).

Por ser menos restritiva, a hipótese intrínseca é a hipótese mais freqüentemente usada em geoestatística e o semivariograma é a ferramenta mais difundida na geoestatística porque exige apenas a hipótese intrínseca, enquanto o autocorrelograma exige a estacionaridade de segunda ordem.

3.1.1.3 CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO ESTOCÁSTICO E DO SEMIVARIOGRAMA

Um processo é dito estocástico quando possui comportamento descrito por leis probabilísticas, caracteriza-se como uma família de variáveis aleatórias $Z(\dots)$ que podem ser função de outras variáveis como tempo e/ou espaço. Cada variável aleatória é caracterizada por uma determinada distribuição de probabilidade, sendo estacionária quando não varia no tempo.

Sendo $Z(x_1), Z(x_2), \dots, Z(x_n)$ o conjunto de variáveis aleatórias, para todo inteiro n e $x_\alpha \in \mathfrak{R}^P$, $\alpha = 1, 2, \dots, n$, a média do processo estocástico $m(x)$ é a média de todas as possíveis realizações de $Z(x)$ representada por:

$$m(x) = E[Z(x)] \quad (3.10)$$

A dependência entre os valores x_1 e x_2 assumidos pelo processo estocástico $Z(x)$ dentro de uma área, pode ser representada pela função de covariância definida como:

$$C(x_1, x_2) = \text{cov}[Z(x_1), Z(x_2)] = E\{[Z(x_1) - m(x_1)][Z(x_2) - m(x_2)]\} \quad (3.11)$$

Se x_1 e x_1 são coincidentes, então para $x \in \mathfrak{R}^P$ tem-se:

$$C(x, x) = E\{[Z(x) - m(x)]^2\} = \text{Var}[Z(x)] \quad (3.12)$$

Considerando dois valores numéricos $z(x)$ e $z(x+h)$, separados pelo vetor h , a variabilidade entre eles é caracterizada pela função variograma:

$$2\gamma(x, h) = E\{[Z(x) - Z(x+h)]^2\} \quad (3.13)$$

Onde h é a distancia de separação.

O variograma 2γ é uma forma de quantificar a variabilidade do processo espacial estocástico em termos de seus incrementos $Z(x) - Z(x+h)$. Ele reflete o fato de que amostras próximas serão mais parecidas do que amostras afastadas (Pohlmann, 1993).

A função γ é chamada de semivariograma, que pode ser estimado a partir de dados analisados (Delhomme, 1978), da seguinte forma:

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (3.14)$$

Onde $N(h)$ é o número de pares experimentais $[z(x_i), z(x_i + h)]$ separados pelo vetor distância h .

O semivariograma é então uma função do módulo $|h|$, distância entre dois pontos, e do ângulo polar α . Quando os pontos estão irregularmente espaçados no plano, todos os pares possíveis de vetores podem ser agrupados em classes de distâncias e ângulos aproximadamente iguais.

3.1.1.4 PARÂMETROS DO SEMIVARIOGRAMA

O semivariograma é uma ferramenta estatística de suporte às técnicas de krigagem permitindo investigar a magnitude da correlação entre as amostras, através da análise da sua estrutura e dos parâmetros do modelo de correlação que governa o fenômeno na área em estudo.

Em geral, o grau de correlação entre duas variáveis diminui à medida que elas se afastam. Dessa forma a função de covariância, $C(0)$, diminui o seu valor a partir da origem, ao contrário do semivariograma, $\gamma = C(0) - C(h)$, que aumenta o seu valor a partir da origem, $\gamma(0) = 0$.

O semivariograma cresce a partir da origem e geralmente após certa distância torna-se aproximadamente estável ao redor de um valor limite $\gamma(\infty)$ chamado de patamar, em inglês “sill”.

O patamar é um parâmetro do semivariograma que marca o valor da variância total da variável em estudo, é representado pela letra C:

$$\gamma(\infty) = \text{Var}[Z(x)] = C(0) \quad (3.15)$$

Um outro parâmetro do semivariograma é o alcance, em inglês “range”, representada pela letra a , que indica a distância em que o semivariograma atinge o patamar. O alcance marca a distância dentro da qual as amostras apresentam-se correlacionadas espacialmente. Esta distância representa a transição entre a existência da correlação espacial ($|h| < a$) e a ausência dela ($|h| > a$), ou seja, mostra a extensão da zona de influência de um ponto experimental.

Idealmente, conforme a equação do cálculo do semivariograma, para $h = 0$ $\gamma(0) = 0$, porém na prática à medida que h tende a zero $\gamma(h)$ se aproxima de um valor positivo chamado de Efeito Pepita (C_0), em inglês “nugget”, que revela a descontinuidade do semivariograma para as menores distâncias entre amostras. Essa descontinuidade pode representar erros de medida ou reflete informações insuficientes das classes de distância em menor escala, dificultando a determinação adequada da forma do variograma (Myers, 1991).

Um outro possível motivo dessa descontinuidade no semivariograma seria a natureza dos dados de precipitação, observado a um longo período de tempo por vários meteorologistas (Delhomme, 1978).

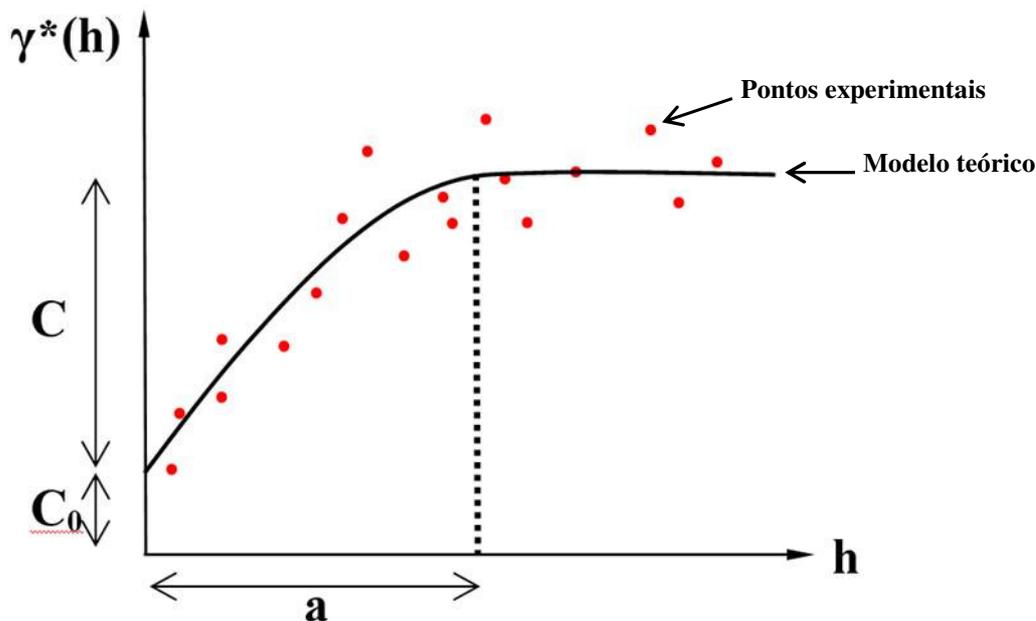


Figura 1 - Exemplo de semivariograma com os parâmetros

Quando o Efeito Pepita for aproximadamente igual ao patamar denomina-se Efeito Pepita Puro ou Ruído Branco, em inglês “white noise”. Esse efeito com total falta de estrutura de correlação pode ser encontrado na sucessão de alturas de precipitações anuais em uma determinada estação meteorológica (Delhomme, 1978).

3.1.1.5 SEMIVARIOGRAMA EXPERIMENTAL

O semivariograma experimental é aquele obtido a partir das amostras de campo. Sua determinação consiste no primeiro passo do processo de estimativa através da geoestatística. Eles são comparados com alguns modelos de referência, os modelos teóricos.

Esses modelos de referência são superpostos à seqüência de pontos obtidos no semivariograma experimental, de modo que a curva melhor ajustada represente a magnitude, alcance e intensidade da variabilidade espacial da variável estudada.

O semivariograma é dito não direcionado ou isotrópico, quando para descrever a variabilidade da variável no campo é utilizado um único semivariograma com os valores dos parâmetros constantes para várias direções diferentes.

No entanto, se os semivariogramas não são iguais em todas as direções, a distribuição é denominada anisotrópica, sendo que a variabilidade da variável não é a mesma em todas as

direções. Quando a anisotropia é observada e os semivariogramas do mesmo modelo possuem o mesmo patamar e diferentes alcances, então ela é denominada Geométrica. Porém, se os semivariogramas apresentam alcances iguais e patamares diferentes a anisotropia é chamada de zonal, pouco freqüente nos fenômenos naturais. (Camargo, 1998)

Não existem motivos para se esperar que um fenômeno natural apresente o mesmo comportamento em todas as direções. No espaço bidimensional, x representa as coordenadas (x_u, x_v) e h representa um vetor de módulo $|h|$ e direção α . Resumidamente, $\gamma(h)$ representa o conjunto de semivariogramas $\gamma(|h|, \alpha)$ para cada direção α (Journel & Huijbregts, 1978).

Em torno de uma posição existe uma vizinhança que é utilizada para realizar o cálculo de uma estimativa e somente as observações que caem dentro dessa região são utilizadas. Essa região pode ser circular com o raio igual ao alcance, no caso de semivariogramas isotrópicos ou pode ser elíptica no caso de semivariogramas anisotrópicos, onde seus dois alcances e ângulos irão definir o formato da elipse.

3.1.1.6 MODELOS TEÓRICOS

O estudo geoestatístico começa com a construção de um modelo que caracteriza a estrutura espacial da variável regionalizada em estudo.

A análise e o ajuste do semivariograma experimental a um teórico denomina-se Análise Estrutural, consiste em uma etapa fundamental, já que todos os cálculos geoestatísticos dependem do tipo de modelo.

Os principais modelos de semivariograma com patamar são:

Modelo esférico

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & , |h| = 0 \\ C_0 + C \left(\frac{3|h|}{2a} - \frac{|h|^3}{2a^3} \right) & , 0 < |h| \leq a \\ C_0 + C & , |h| \geq a \end{cases} \quad (3.16)$$

Onde: h = distância, a = alcance

Apresenta comportamento linear próximo à origem e o patamar é alcançado a uma distância finita.

Modelo exponencial

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & , |h| = 0 \\ C_0 + C \left[1 - \exp\left(-\frac{|h|}{a}\right) \right] & , |h| \neq 0 \end{cases} \quad (3.17)$$

Onde: h = distância, a = alcance

Esse modelo apresenta comportamento linear próximo à origem, atinge o patamar assintoticamente e apresenta um alcance de $3a$.

Modelo gaussiano

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & , |h| = 0 \\ C_0 + C \left[1 - \exp\left(-\frac{|h|}{a}\right) \right] & , |h| \neq 0 \end{cases} \quad (3.18)$$

Onde h = distância, a = alcance

O modelo apresenta comportamento parabólico próximo à origem, atinge o patamar assintoticamente e apresenta um alcance efetivo de $a\sqrt{3}$.

3.1.1.7 ESTIMATIVA ATRAVÉS DA KRIGAGEM

Krigagem é uma técnica de estimação local que fornece o melhor estimador linear não tendencioso de uma variável desconhecida (Journel & Huijbregts, 1978).

A diferença entre a krigagem e outros métodos de interpolação é a maneira com que os pesos são determinados para as diferentes amostras. Na krigagem, os pesos são atribuídos às variáveis a partir de uma análise espacial, baseada no modelo ajustado ao semivariograma experimental, para que em qualquer ponto dentro da área em estudo seja possível realizar estimativas sem tendência e com variância mínima.

A estimação da precipitação pode ser realizada por meio de métodos uni-variados, que utilizam apenas as observações disponíveis com suas respectivas coordenadas, ou através de métodos multi-variados, que além da informação do valor da variável e sua localização

espacial permite incorporar variáveis auxiliares, tais como altitude, velocidade e direção do vento, que poderão contribuir para melhorar a estimativa da precipitação (Nicolau, 2002).

A krigagem é classificada como um método de interpolação exato, pois são utilizadas as observações pontuais para ajustar a função de interpolação, por tanto quando um ponto estimado coincidir com um dos pontos amostrados, os valores deverão ser os mesmos.

O método se baseia no número de pontos, na quantidade de dados em cada ponto, na distância entre os pontos, na orientação e na continuidade espacial. A krigagem pode se apresentar sob várias formas, sendo algumas delas: krigagem simples, krigagem ordinária, krigagem universal e co-krigagem.

A krigagem assume que os alcances dos semivariogramas direcionais formam um desenho elíptico, sendo necessário apenas considerar os modelos de maior e menor alcance (Englund & Sparks, 1991).

O valor interpolado z^* para um local não amostrado $(x_0) \in \mathfrak{R}^p$ pode ser estimado por:

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i z(x_i) \quad (3.19)$$

Onde N é o número de valores medidos $z(x_i)$ envolvidos na estimativa e λ_i é o peso associado a cada valor medido. Considerando $z(x_i)$ uma realização da função aleatória $Z(x_i)$, tem-se que:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i) \quad (3.20)$$

A krigagem foi encontrada ser superior a outras técnicas mais comuns de interpolação como polígonos de Thiessen, inverso da distância e inverso do quadrado da distância, através de um estudo de estimação de precipitação desenvolvido em Nebraska e Kansas por Tabios e Salas (1985).

Assim como Tabios & Salas (1985), Goovaerts (2000), Creutin & Obled (1982) também mostram a krigagem como a melhor técnica de predição, fornecendo melhores estimativas de precipitação do que os métodos convencionais.

Além da comparação entre a krigagem e outros métodos, alguns autores comparam técnicas diferentes de krigagem na tentativa de encontrar a mais adequada para determinada situação.

Phillips et al. (1992) compararam três técnicas na estimação da precipitação média anual para determinar qual seria a mais eficaz em terrenos montanhosos. Foram analisadas a krigagem ordinária, a krigagem ordinária sobre os resíduos resultantes da regressão linear entre a precipitação e a altitude (Elevation Detrended Kriging) e a co-krigagem utilizando a altitude com variável auxiliar. As técnicas de interpolação que utilizaram a altitude como informação auxiliar, apresentaram-se superiores à krigagem ordinária, pois os erros absolutos e médios tanto da krigagem desenvolvida sobre os resíduos quanto da co-krigagem apresentaram-se inferiores.

A estimação por krigagem pode ser realizada para um local sendo denominada krigagem pontual, ou pode ser realizada para uma área sendo chamada de krigagem em bloco (Trarbach, 2004).

Anteriormente foi dito que a krigagem se apresenta sob várias formas, e essas diversas variantes se distinguem através do modelo adotado para a função aleatória que é usualmente decomposta em duas componentes aditivas, uma residual e a outra designada por tendência, assumindo que a primeira tem média nula o valor esperado da função aleatória será a componente tendência. O modelo adotado para a componente tendência permite distinguir técnicas da geoestatística como a krigagem simples e a ordinária (Nicolau, 2002).

a) Krigagem Simples

A krigagem simples assume que o valor esperado da função aleatória é conhecido e constante em todo o domínio espacial.

O estimador linear da krigagem simples é dado por:

$$Z^*_{KS}(x_0) = \sum_{a=1}^N \lambda_a Z(x_a) + \left[1 - \sum_{a=1}^N \lambda_a \right] m \quad (3.21)$$

Os pesos λ_a são determinados para minimizar a variância da estimativa, tal minimização resulta no conjunto de equações normais:

$$\sum_{\beta=1}^N \lambda_{\beta} C(x_{\beta} - x_{\alpha}) = C(x - x_{\alpha}) \quad \alpha = 1, \dots, n \quad (3.22)$$

A variância da krigagem simples ou variância da estimativa é representada por:

$$V_E = C(0) - \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} C(x - x_{\alpha}) \geq 0 \quad (3.23)$$

b) Krigagem Ordinária

A krigagem ordinária assume que o valor esperado da função aleatória é constante mais desconhecido e possibilita a existência de flutuações locais desde que se verifique a condição de estacionaridade da média para cada vizinhança local.

O estimador pontual da krigagem ordinária é dado por:

$$Z^*_{KO}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (3.24)$$

A variância do erro ($Var[Z_{x_0} - Z^*_{x_0}]$) pode ser minimizada sob a condição de que $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$.

O conjunto de pesos ótimos é obtido a partir do seguinte sistema de equações:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n \lambda_j \gamma(x_i - x_j) - \mu &= \gamma(x_i - x_0) \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j &= 1 \end{aligned} \quad \text{para } i = 1, \dots, n \quad (3.25)$$

Onde:

$\gamma(x_i, x_j)$ e $\gamma(x_i, x_0)$ são as semivariâncias entre os pontos x_i e x_j e entre os pontos x_i e x_0 , respectivamente.

μ é o multiplicador de Lagrange necessário para a minimização da variância do erro.

A variância de estimativa (V_E) da krigagem é dada por:

$$V_E = \mu + \sum_{i=1}^N \lambda_i \gamma(x_i, x_0) \quad (3.26)$$

A escolha do modelo de semivariograma, o número de vizinhos utilizados para a estimação, a estrutura e variabilidade dos dados podem influenciar significativamente na obtenção dos ponderadores otimizados que serão utilizados para estimar valores pontuais ou em bloco.

A representatividade das amostras e a maneira como é feita a sua coleta, determina se a krigagem será calculada de forma pontual ou em bloco. A krigagem pontual é indicada quando a coleta de amostras é simples, ou seja, não foram misturadas várias amostras para compor uma outra, sendo que neste caso é indicado a krigagem em bloco que irá representar uma área.

O sistema de krigagem pode se apresentar em notação matricial da seguinte forma:

$$[\gamma][\lambda] = [b] \quad (3.27)$$

E para atender a equação (3.22):

$$[\lambda] = [\gamma]^{-1}[b] \quad (3.28)$$

Onde:

$[\lambda]$ é a matriz dos pesos procurados λ_i ;

$[\gamma]$ é a matriz semivariância e $[\gamma]^{-1}$ é sua matriz inversa;

$[b]$ corresponde as semivariâncias entre os pontos x_i e x_0 .

A equação da semivariância da estimativa (3.25) em notação matricial é:

$$V_E = [\lambda]^t \cdot [b] \quad (3.29)$$

A matriz $[\gamma]$ de um conjunto com n amostras é escrito:

$$[\lambda] = \begin{vmatrix} \gamma(x_1, x_1) & \gamma(x_1, x_2) & \gamma(x_1, x_3) & \cdots & \gamma(x_1, x_n) & 1 \\ \gamma(x_2, x_1) & \gamma(x_2, x_2) & \gamma(x_2, x_3) & \cdots & \gamma(x_2, x_n) & 1 \\ \gamma(x_3, x_1) & \gamma(x_3, x_2) & \gamma(x_3, x_3) & \cdots & \gamma(x_3, x_n) & 1 \\ \vdots & & & & & \\ \gamma(x_n, x_1) & \gamma(x_n, x_2) & \gamma(x_n, x_3) & \cdots & \gamma(x_n, x_n) & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} \quad (3.30)$$

A matriz $[\lambda]$:

$$[\lambda] = \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ -\mu \end{pmatrix} \quad (3.31)$$

A matriz $[b]$:

$$[b] = \begin{pmatrix} \gamma(x_1, x_0) \\ \gamma(x_2, x_0) \\ \gamma(x_3, x_0) \\ \vdots \\ \gamma(x_n, x_0) \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.32)$$

A precipitação média sobre uma área é definida da seguinte forma:

$$P(A) = \frac{1}{|\Omega|} \int_{\Omega} P(z) dz \quad (3.33)$$

Um estimador ótimo da precipitação média espacial, segundo Journel & Huijbregts (1978), pode ser obtido pelo conjunto de dados observados:

$$\hat{P}(A) = \sum_{i=1}^N \lambda_i P(z_i) \quad (3.34)$$

Sendo $P(z_i)$ a precipitação na estação de coordenada (x_i, y_i) e onde os coeficientes λ_i são soluções do sistema de krigagem:

$$\sum_{j=i}^N \lambda_j \gamma(d_{ij}) + \mu = \frac{1}{|\Omega|} \int_{\Omega} \gamma(z_i, \zeta) d\zeta \quad (3.35)$$

3.1.1.8 VIZINHANÇA DE ESTIMATIVA

A seleção adequada da vizinhança a ser utilizada na estimativa é de fundamental importância, pois serão estes vizinhos utilizados nos cálculos das estimativas através da krigagem.

Enquanto os métodos tradicionais utilizam distâncias Euclidianas, a krigagem tem vantagem de usar não só a distância como também a geometria entre as amostras, relação de isotropia ou anisotropia.

Se a estrutura de correlação espacial é uniforme em toda a área pesquisada, o semivariograma é chamado isotrópico, tendo o círculo da pesquisa, que define a vizinhança de estimativa, um raio menor do que o alcance obtido no semivariograma, pois os pesos associados aos vizinhos com distâncias maiores que o alcance não apresentam contribuição significativa. Se a estrutura de correlação espacial varia no espaço, o semivariograma é chamado anisotrópico, e a área de influência da amostra deve formar uma elipse de acordo com os alcances máximos e mínimos e ângulo de anisotropia (Trarbach, 2004).

3.1.1.9 VALIDAÇÃO CRUZADA

A validação cruzada (no inglês “*cross-validation*”) é um método de verificação dos dados estimados, ou seja, é uma técnica de “validar” o modelo geoestatístico, pois é importante que se tenha um meio de checar se o modelo ajustado é satisfatório ou não.

Através dessa técnica, as estimativas são comparadas com as observações originais a fim de testar se o modelo de semivariograma hipotético e os parâmetros da vizinhança utilizados reproduzem com precisão a variabilidade espacial das observações amostradas (Silva & Mingoti, 1995)

O processo de validação cruzada é bastante simples: remove-se um dado do conjunto de dados amostrais e, estima-se o valor retirado, utilizando apenas as amostras remanescentes. Têm-se dessa forma dois valores para o mesmo ponto, o real e o estimado. O erro da estimação pode ser calculado pela diferença entre o valor real e o estimado, sendo repetido para cada local amostrado (Zimback, 2003).

Myers (1991) sugere os seguintes critérios para testar se o modelo do semivariograma adotado é adequado:

- a distribuição dos erros deverá ser simétrica, centrada, com média zero e com mínimo de dispersão;
- o modelo escolhido deverá apresentar o menor erro quadrático médio (EQM) dentre os modelos analisados;
- o modelo escolhido deverá apresentar a maior correlação entre os valores estimados e observados;
- a correlação entre os valores estimados e os erros de estimação deverá ser zero.

Para ajustar os modelos matemáticos aos semivariogramas, também podem ser utilizadas as técnicas de mínimos quadrados ponderados e máxima verossimilhança. Sendo que a última requer o padrão de normalidade dos dados (Myers, 1991).

3.1.2 OTIMIZAÇÃO

Na análise de um sistema, quando existe o interesse em otimizar o processo decisório de acordo com uma valoração estabelecida por uma função objetivo, devem ser aplicadas técnicas de otimização. Em geral, o modelo de otimização é constituído pela função objetivo que se quer maximizar ou minimizar. Dessa forma, o problema pode ser posto como determinação do zero de uma função.

Problemas práticos em hidrologia e recursos hídricos envolvem geralmente mais de uma variável de decisão. Uma forma de se encontrar solução para problemas com n variáveis é através da aplicação de métodos de busca direta constituída pelos métodos iterativos.

A idéia básica no método iterativo é partir de um vetor inicial e caminhar sucessivamente através de iterações até encontrar o mínimo ou máximo, dependendo do objetivo, da função que se quer otimizar.

3.1.2.1 FUNÇÃO OBJETIVO

Cada um dos aspectos do problema sujeitos ao processo de decisão é mensurado através de uma função objetivo. Não há necessidade de que estas funções utilizem a mesma unidade de mensuração. A principal decorrência desta mudança é que a solução ótima não mais será única como ocorre nos casos clássicos de otimização. Haverá sim um conjunto de alternativas que satisfazem de formas diferentes a função objetivo. O conceito de otimizar um vetor exige uma mudança do conceito de “valor ótimo”, pois neste caso não haverá uma única alternativa ótima, mas diversas alternativas potencialmente elegíveis.

Serão apresentados nos tópicos 3.2.1 e 3.2.2 trabalhos que utilizam função objetivo com variáveis conflitantes por natureza e por isso, a idéia de uma única solução deixa de ser aplicável.

O problema de dimensionamento de uma rede pluviométrica consiste em se determinar o número e o local das estações que fornecem a melhor estimativa de precipitação média sobre uma área (Pardo-Igúzquiza, 1998).

Na avaliação da precisão da rede, a variância da estimativa (V_E) é adotada como parâmetro de análise por ser uma função tanto do número de estações quanto da localização espacial delas. Dessa forma o dimensionamento adequado é alcançado pela minimização da função objetivo:

$$FO = \delta(N, x_i) \quad (3.36)$$

A variância da estimativa da média espacial pode ser escrita da seguinte forma:

$$V_E = \mu + \frac{1}{M} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \lambda_i \gamma(z_i, z_{N+j}) - \frac{1}{M^2} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \gamma(z_{N+i}, z_{N+j}) \quad (3.37)$$

Além da variância da estimativa outros parâmetros também podem ser incluídos na função objetivo influenciando na configuração da rede de monitoramento ideal. O custo pode ser considerado nos dimensionamentos das redes, pois ele vai limitar o número de estações, a posição espacial e o custo econômico da rede que melhor atende a condição econômica disponível para o monitoramento (Bras & Rodriguez-Iturbe, 1974; Pardo-Igúzquiza, 1998).

A função objetivo é então ampliada para considerar o custo de manutenção e operação da rede.

$$FO = \delta(N, x_i) + C_{\Delta} \cdot C(N, x_i) \quad (3.38)$$

O termo de custo é considerado como uma combinação linear dos custos das estações e seus locais.

$$C(N, x_i) = \sum_{i=1}^N Q(x_i) \quad (3.39)$$

Sendo $Q(x_i)$ o custo no local x_i .

A questão de dimensionamento da rede consiste em determinar um número ótimo de estações e suas localizações que minimizam a função objetivo, considerando apenas a variância da estimativa ou também o custo de manutenção das estações (Pardo-Igúzquiza, 1998). A forma com que os autores, Bras & Rodriguez-Iturbe, 1974 e Pardo-Igúzquiza, 1998, consideram a precisão e o custo na função objetivo, resulta em um conjunto de soluções elegíveis que são plotadas em um ábaco de tomada de decisões.

3.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.2.1 TÉCNICAS UTILIZADAS NA ANÁLISE DE QUANTIDADE E DISTRIBUIÇÃO DA PRECIPITAÇÃO ASSOCIADA AO DIMENSIONAMENTO DE REDES PLUVIOMÉTRICAS

O trabalho desenvolvido por NWA (1977) apresenta uma análise da variabilidade da precipitação sobre uma pequena bacia tropical e também examina os erros envolvidos em medidas de precipitação sobre pequenas áreas.

A bacia estudada por NWA apresenta cinco estações distribuídas sobre uma área de 44,30 ha com variação total de altitude de 32 metros.

Diante das variações observadas nas precipitações totais das várias estações, foi decidido examinar o coeficiente de variação que existe quando diferentes números de estações são

usados para determinar a precipitação média sobre uma bacia. Com isso poderá se indicar o número de estações adequado para determinar a precipitação média sobre uma área.

Para realizar esta avaliação vários tipos de equações foram experimentados e as três que tiveram os melhores ajustes foram:

$$\ln C_v = a_1 + b_1 \ln P + b_2 \ln N \quad (3.40)$$

$$\ln C_v = a_2 + b_2 \ln P + b_3 \ln G \quad (3.41)$$

$$\ln C_v = a_3 + b_3 P^{1/2} + b_4 \ln G \quad (3.42)$$

Essas equações expressam a relação entre o coeficiente de variação em porcentagem (C_v), o número de estações, a densidade de estações (G) em ha/estações e os coeficientes a e b .

A obtenção dos coeficientes a , b e os coeficientes de correlação R^2 para as três equações foi conseguida através de um programa computacional, apresentando os seguintes resultados:

$$C_v = 3,710 P^{-0,396} N^{-0,689} \quad R^2 = 0,82 \quad (3.43)$$

$$C_v = 1,096 P^{-0,396} G^{0,689} \quad R^2 = 0,82 \quad (3.44)$$

$$C_v = 0,90 e^{-0,206 P^{1/2}} G^{0,689} \quad R^2 = 0,77 \quad (3.45)$$

Onde e é a constante Neperiana.

Os erros médios, em milímetros, foram calculados pelas equações:

$$E = -1,826 P^{0,557} N^{-0,758} \quad R^2 = 0,90 \quad (3.46)$$

$$E = -4,70 P^{0,557} G^{0,758} \quad R^2 = 0,90 \quad (3.47)$$

$$E = -4,50 e^{0,3085 P^{1/2}} G^{0,755} \quad R^2 = 0,92 \quad (3.48)$$

Os resultados do estudo mostraram que uma densidade de estações que fornece um certo nível de precisão em uma região pode não fornecer necessariamente o mesmo nível de precisão em outra região geográfica, pois estudos desenvolvidos em outras bacias concluíram que para uma região deste tamanho seria necessária apenas uma estação para determinação da precipitação média.

Foi observado que o coeficiente de variação C_v aumenta com o decréscimo da quantidade de precipitação diária sobre a bacia.

Os valores de C_v foram muito parecidos para redes com 3 e 4 estações, por isso somente uma curva foi ajustada para os dados dessas redes, indicando que tanto 3 quanto 4 estações podem ser usadas para determinação de precipitação média sobre a bacia.

O resultado da análise dos erros mostrou que também para as redes com 3 e 4 estações os valores foram muito parecidos.

Sorman & Balkan (1983) redimensionaram uma rede pluviométrica na bacia de Kizilirmak para se encontrar o nível de precisão requerido por usuários de dados de precipitação. Foram aplicadas três técnicas para dimensionamento, o método de interpolação ótimo, a variância da precipitação média sobre uma área e análise de variância em uma bacia de 38400 Km² de área em que a média da raiz quadrada do erro quadrático médio seja ≤ 32 mm e que até 10% da área da bacia apresente a raiz quadrada do erro quadrático médio > 36 mm.

Foi definida uma rede de configuração básica com 20 estações considerando a uniformidade da distribuição e tamanho do registro dos dados. Dessa forma a rede definida apresentou regiões onde a distribuição das estações não era uniforme, diante disso a rede foi aumentada de 10 estações selecionadas da rede existente.

A rede ainda estava longe de atender os critérios requeridos, então o número de estações foi aumentado para 45, sendo 10 já existentes e 5 foram novas estações adicionadas à rede. Apesar de ter se aproximado das exigências propostas para o dimensionamento ótimo, a rede ainda não apresentava os resultados esperados, por isso 8 novas estações foram adicionadas a rede para que fossem cumpridas as exigências para o dimensionamento.

A rede proposta com 53 estações apresentou a raiz quadrada do erro quadrático médio de 31,2 mm e a porcentagem da área com raiz quadrada do erro quadrático médio maior 36 mm foi de 6%. Estas áreas com raiz quadrada do erro quadrático médio maior que 36 mm estavam localizadas próximas dos limites da bacia porque as estações adjacentes à área em estudo não foram consideradas durante o processo de interpolação.

Os autores concluíram neste trabalho que houve aumento no nível de precisão da rede proposta em relação à rede existente apesar de ambas apresentarem praticamente o mesmo número de estações, como pode ser observado na tabela a seguir.

Tabela 1 – Resultados obtidos no estudo de dimensionamento realizado por Sorman & Balkan (1983).

Rede	Nº de estações	Rmse(médio)	% Área > 36mm
Básica	20	41,2	82
1	30	36,9	52
2	45	32,3	20
Proposta	53	31,2	6
Existente	52	33,4	28

Fonte: Sorman & Balkan (1983).

A rede proposta apresentava uma distribuição mais uniforme das estações sobre a área, fato que explica o resultado obtido.

Bras & Rodriguez-Iturbe (1974) utilizaram uma metodologia para otimização de redes de monitoramento para estimar a precipitação média sobre uma área, considerando os seguintes aspectos: incerteza espacial e correlação do processo, erros em técnicas de medidas e suas correlações e custos não homogêneos. Segundo os autores, o dimensionamento ótimo consiste em obter o número das estações e as suas localizações que fornecem a melhor estimativa da precipitação média sobre uma área, de acordo com o custo de operação e manutenção envolvido, podendo a identificação da configuração ótima ser feita através da minimização de uma função que associa a variância de estimação com o custo de manutenção e operação das estações envolvidas. A função apresenta a seguinte forma:

$$\min 0[\delta(m, x_i)] = \delta(m, x_i) + C_{\Delta} \cdot C(m, x_i) \quad (3.49)$$

para todo m e $x_i, i = 1, 2, 3, \dots, m$, onde $\delta(m, x_i)$ é a medida de precisão que é função de m , número de estações, e $x_i (i = 1, 2, 3, \dots, m)$, o local das estações. O parâmetro $C(m, x_i)$ é o custo de m estações nos locais $x_i (i = 1, 2, 3, \dots, m)$, e C_{Δ} é a medida equivalente a uma mudança unitária no custo.

A equação 3.49 supõe que a medida de precisão possui uma relação inversa com o custo e a precisão, ou seja, quando o custo aumenta a medida de precisão diminui.

Para um determinado coeficiente (C_{Δ}) “trade-off”, o processo de dimensionamento consiste em encontrar a melhor combinação de m e x_i que compõem a rede desejada. No entanto, o

valor de C_{Δ} não era conhecido com precisão. Dessa forma, foi necessária a construção de uma curva transformação, onde todos os seus pontos representam os valores de custo e precisão associados a uma rede que minimiza a função 3.49 para um determinado valor de C_{Δ} . A figura a seguir representa o comportamento da curva transformação.

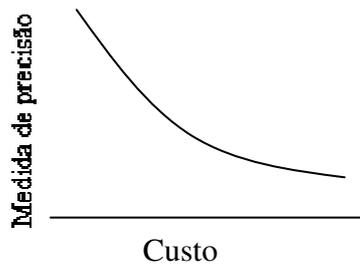


Figura 2 - Curva transformação semelhante a mostrada por Bras & Rodriguez-Iturbe (1974).

Com a construção da curva, os autores demonstram que esta ferramenta pode auxiliar os tomadores de decisão em situações restritas de precisão e custo.

Vários valores para o coeficiente C_{Δ} foram escolhidos considerando a ordem de grandeza dos parâmetros da função objetivo, erro quadrático médio e custo, de forma que eles ficassem compatíveis em magnitude.

Os autores concluíram que o procedimento apresentado neste trabalho se mostra eficiente tanto do ponto de vista técnico quanto econômico, pois o procedimento apresentado combina precisão e custo de forma flexível, cabendo ao tomador de decisões considerar características e restrições particulares da rede avaliada.

3.2.2 DIMENSIONAMENTO DE REDES PLUVIOMÉTRICAS ATRAVÉS DO MÉTODO GEOESTATÍSTICO

O método geoestatístico vem sendo utilizado por diversos autores no desenvolvimento de trabalhos que visam na maioria das vezes encontrar a configuração ideal de uma rede de monitoramento através de comparações com outros métodos também aplicados nos dimensionamentos, comparações entre diferentes tipos de krigagem, entre outros.

Bárdossy & Bogárdi (1983) tinham neste trabalho o propósito de apresentar uma metodologia de dimensionamento para variáveis ambientais anisotrópicas e correlacionadas espacialmente. A geoestatística e a análise de decisão envolvendo múltiplos critérios, o MCDM, foram

associadas, observando-se as vantagens e desvantagens de cada método, visando analisar precisão de estimativa e esforço de observação.

Bastin et al. (1984) propuseram um procedimento para estimar a precipitação média sobre uma área utilizando o método geoestatístico. A precipitação sobre a área de estudo foi modelada como um campo aleatório bi-dimensional, sendo a sazonalidade e a variabilidade do fenômeno consideradas. O estimador da precipitação média sobre a área é um do tipo linear não tendencioso e de variabilidade mínima, obtido pelo método da krigagem. A variância da estimativa da krigagem (V_E) foi utilizada para selecionar o conjunto de estações que fornecesse melhores informações para estimar a precipitação média sobre a área, ou para selecionar um local mais apropriado para instalação de uma estação adicional. Os autores concluíram que a variância da estimativa é uma eficiente ferramenta destinada a identificar melhores locais para instalação de estações pluviométricas.

Zlate-Podani (1991) estimou a precisão do uso combinado de dados de radar com os dados de estações pluviométricas. Os dados de radar representam valores médios de precipitação sobre uma área de apenas 1 Km². A área investigada possui 1,2 Km² com seis estações de medição. A estimação foi feita através do método de krigagem ordinária que apresentou um erro padrão de 10% e por comparação direta dos dados estimados e observados o erro obtido foi de 8%. Uma outra forma de estimação da precipitação média espacial foi realizada a partir de registros de precipitação em intervalos de tempo variando de 10 a 150 minutos. Sendo que nos resultados, quanto menor o intervalo de tempo, maior é o erro. O autor concluiu que esta metodologia não é adequada para áreas pequenas, da ordem de 1 Km², e também para intervalos muito curtos de registro de dados.

Pohlmann (1993) comenta sobre o uso da geoestatística na análise de dados ambientais, e fala da possibilidade de se modelar uma estrutura de autocorrelação entre as amostras baseando-se na teoria do processo estocástico espacial. A maioria das informações ambientais são medidas de forma pontual, porém, em muitos casos é necessário que se conheça o valor da variável distribuída sobre uma área. Em geoestatística, isto pode ser feito através das técnicas de interpolação da krigagem. O autor concluiu no estudo que o semivariograma se mostra ser uma ferramenta apropriada para determinar a variabilidade espacial de dados ambientais e que o estimador da krigagem tem a vantagem de minimizar a variância da estimativa, especialmente se existe forte correlação entre os dados.

Bacchi & Kottegoda (1995) analisaram na função de correlação espacial a distribuição da precipitação sobre uma área com seus efeitos, utilizando a função variograma adotada em geoestatística. Foi realizada uma análise detalhada dos modelos de variogramas teóricos, dos efeitos meteorológicos, orográficos e escalas de agregação espaço-temporal para dimensionamento de rede e estimação da precipitação média espacial. Variogramas empíricos e técnicas de validação foram examinadas.

Ashraf et al. (1997) estudaram o dimensionamento de uma rede climatológica, em que informações fornecidas por 17 estações foram utilizadas para comparar métodos de interpolação e configurações alternativas para a rede. Foram avaliadas estações completas, ou seja, estações que monitoram todas as variáveis climáticas utilizadas na equação modificada de Penman e estações parciais que monitoram algumas destas variáveis. A raiz do erro quadrático médio da interpolação foi utilizada como critério de avaliação das estimativas e performance da rede. Dos três métodos aplicados o que apresentou menores erros foi o da krigagem seguido pelo inverso do quadrado da distância e inverso da distância. Dois tipos de krigagem foram testados, a co-krigagem que utiliza além da precipitação uma variável de auxílio e a krigagem ordinária que utiliza apenas a precipitação. Destas a que apresentou melhores estimativas foi a co-krigagem. Dentre as configurações de redes testadas, as de melhores resultados foram as de oito estações e a de quatro distribuídas na diagonal. Outra conclusão importante dos autores foi que a mistura entre estações de monitoramento completas e parciais pode ser economicamente mais vantajosa do que rede com somente estações completas, podendo ser aplicadas em países onde recursos financeiros são limitados.

Pardo-Igúzquiza (1998) apresentou um método para estimar com maior precisão a precipitação média sobre uma área através do dimensionamento ótimo de uma rede pluviométrica, considerando o número e a localização das estações. Foi utilizado o método geoestatístico associado à técnica de krigagem para que se pudesse encontrar o valor mínimo da função objetivo, que inclui o custo econômico da coleta de dados e a precisão da estimação expressa pela variância de krigagem, e dessa forma se obtém uma configuração ótima para a rede pluviométrica.

O dimensionamento foi apresentado quando somente a precisão é considerada (equação 3.50) e também quando a precisão e o custo são considerados (equação 3.51) por meio das respectivas funções objetivo, conforme mostrado a seguir.

$$OF = \delta(N, x_i) \quad (3.50)$$

$$OF = \delta(N, x_i) + C_{\Delta} \cdot C(N, x_i) \quad (3.51)$$

onde $\delta(N, x_i)$ é a medida de precisão representada pela variância de estimação da Krigagem, N representa o número de estações e x_i a suas localizações. O parâmetro $C(m, x_i)$ é o custo de N estações nos locais x_i , e C_{Δ} é a medida equivalente a uma mudança unitária no custo.

A função objetivo utilizada pelo autor (equação 3.51), é a mesma apresentada por Bras & Rodriguez-Iturbe (1974).

O algoritmo utilizado por Pardo-Igúzquiza (1998) para minimizar a função objetivo é o chamado “simulated annealing”, conhecido como processo de recozimento. Este método, que foi proposto para se procurar o mínimo global de uma função, se baseia no processo utilizado na fabricação mais eficiente do vidro. O processo consiste em aquecer o vidro a altas temperaturas (energia alta) até que ele se torne líquido para que os átomos se movimentem de forma livre, então é lentamente resfriado para que em cada estágio os átomos procurem a orientação mais estável (energia baixa). Então a energia mais baixa encontrada representa um valor muito próximo do mínimo global da função objetivo.

Esta metodologia foi aplicada numa região com uma rede de 25 estações e a cada estação foi atribuído um custo arbitrário, com valores variando de 1 a 5 de forma aleatória.

As soluções ótimas encontradas para o problema foram apresentadas tanto para o problema que considera apenas a precisão das estimativas quanto para o que considera também o custo.

Ao considerar apenas a precisão o autor encontrou para cada subgrupo de estações uma solução ótima, ou seja, quando foi testado um subgrupo com 5 estações, o algoritmo selecionou as 5 dentre as 25 estações que melhor representavam a precipitação média sobre a área. Este procedimento foi efetuado para subgrupos de até 10 estações.

Já no caso em as variáveis precisão e custo foram consideradas, não foram encontradas soluções ótimas para cada subgrupo de estações, mas sim algumas soluções ótimas por subgrupo que foram apresentadas através de um ábaco, que é apresentado a seguir.

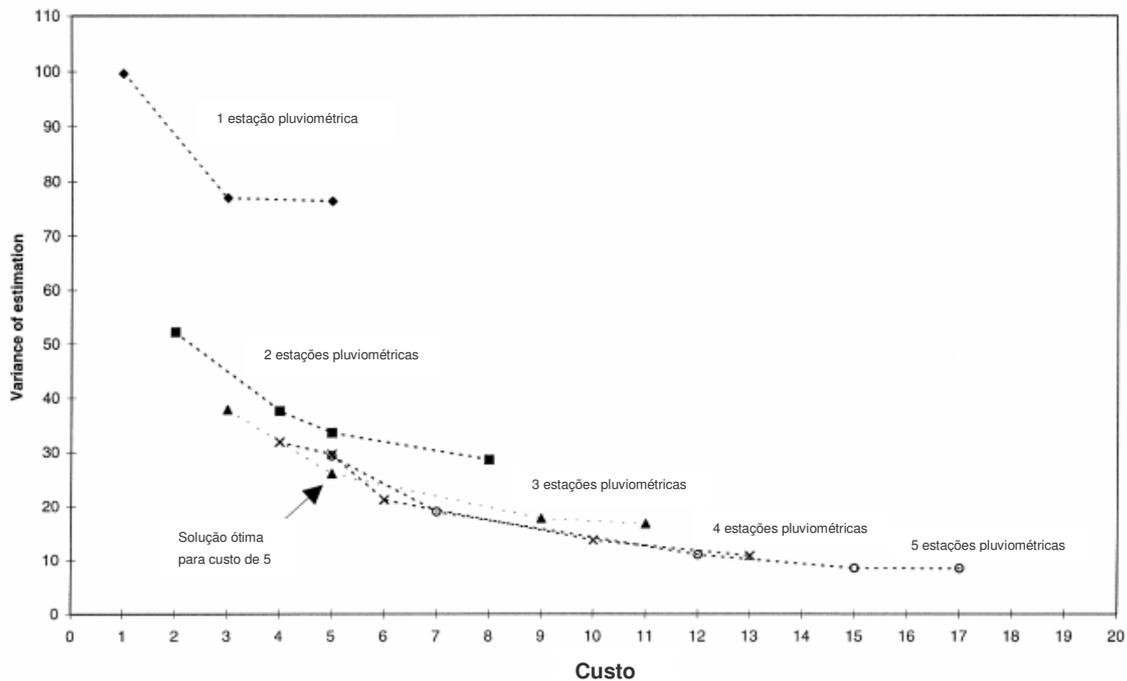


Figura 3 – Variância da estimativa versus custo para subgrupos de até 5 estações.

Fonte: Alterado de Pardo-Igúzquiza (1998).

Dessa forma, o autor demonstrou como as duas análises podem ser aplicadas ao dimensionamento de redes pluviométricas, sendo que a última não apresenta uma solução ótima e sim um ábaco onde a melhor decisão pode ser escolhida.

Trarbach (2004) analisou o comportamento da precisão da estimativa da precipitação média total anual e nos períodos seco e chuvoso, em função da variação da distribuição espacial de um conjunto de estações pluviométricas e também avaliou a influência da configuração da rede na precisão da estimativa da precipitação sobre uma área.

A modelagem dos semivariogramas realizada por Trarbach (2004), utilizou como critério de ajuste o menor Erro Quadrático Médio.

O método de ajuste foi por tentativa e erro, ou seja, a critério do observador, associado à avaliação do modelo pela técnica de validação cruzada. Para cada modelo testado, foi calculado o EQM, sendo este valor comparado com o EQM de outro modelo testado, e ao final de várias tentativas foi escolhido o modelo que apresentou o menor EQM.

A rede utilizada para o estudo foi a localizada na bacia do rio São Mateus contendo 18 estações pluviométricas, conforme mostra a figura 4.

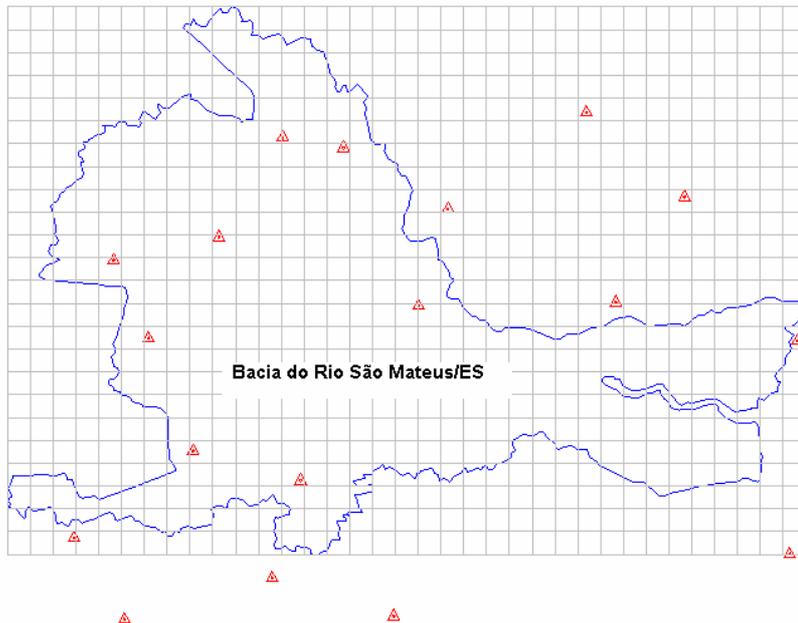


Figura 4 – Rede pluviométrica na Bacia hidrográfica do rio São Mateus.

Fonte: Trarbach (2004).

Foi observado que o número de estações que formam a rede pode diminuir sem que haja perda na precisão da estimativa da precipitação média sobre a área. Este fato foi verificado através dos dados obtidos como pode ser visto no gráfico 1.

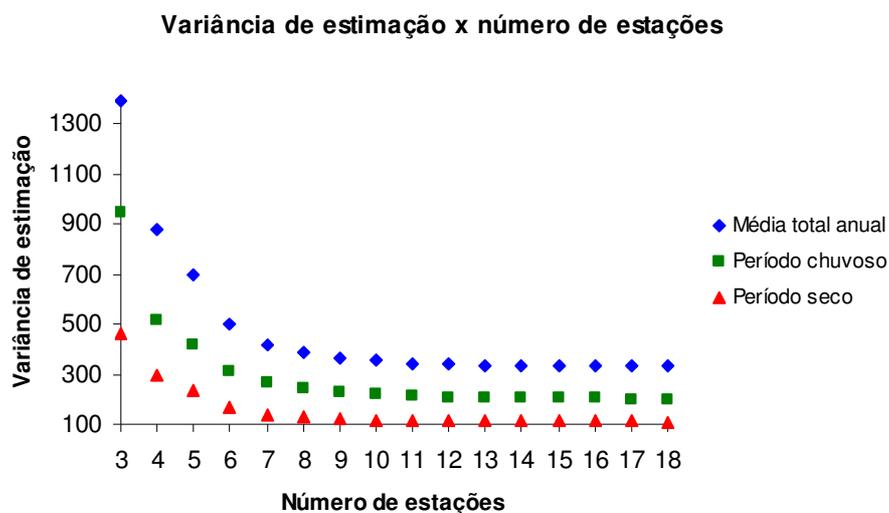


Gráfico 1 – Gráfico da variância da estimativa x número de estações para os períodos anual, seco e chuvoso.

Fonte: Trarbach (2004).

No gráfico 1 é mostrado que a variância da estimativa a partir de um determinado número de estações praticamente não muda, tanto para o período anual quanto para os períodos seco e chuvoso. Dessa forma, Trarbach (2004) conclui que é possível encontrar qual configuração de rede pluviométrica, com um menor número de estações, que fornece estimativas tão boas quanto as fornecidas pela rede existente naquele local.

Outra observação importante foi que ao analisar a sazonalidade do fenômeno, foram encontradas configurações ótimas idênticas para os períodos seco e total anual (figura 5). Porém, no período chuvoso (figura 6) uma diferente configuração foi encontrada, o que demonstra a relevância de se considerar o efeito da sazonalidade no dimensionamento de redes pluviométricas.

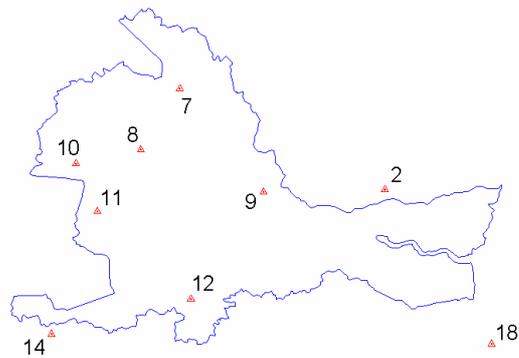


Figura 5 - Configuração com 9 estações encontrada para os períodos seco e anual.

Fonte: Trarbach (2004).

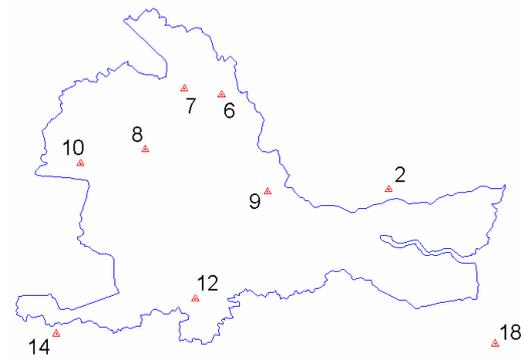


Figura 6 - Configuração com 9 estações encontrada para o período chuvoso.

Fonte: Trarbach (2004).

*Material e
Métodos*

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 APLICAÇÃO DO MÉTODO GEOESTATÍSTICO

A aplicação do método geoestatístico neste trabalho se deu na mesma região utilizada por Trarbach (2004), que foi escolhida considerando o número de estações existentes, o registro histórico dos dados e a importância desta área no contexto do estado do Espírito Santo e do Grupo de Estudos e Ações em Recursos Hídricos (GEARH/UFES), grupo ao qual esta pesquisa também está vinculada.

A região em estudo situa-se na parte norte do Espírito Santo e apresenta uma rede pluviométrica com 18 estações localizadas na bacia hidrográfica do rio São Mateus e em seu entorno.

Abaixo estão representadas (figura 7) as dezoito estações utilizadas neste trabalho.

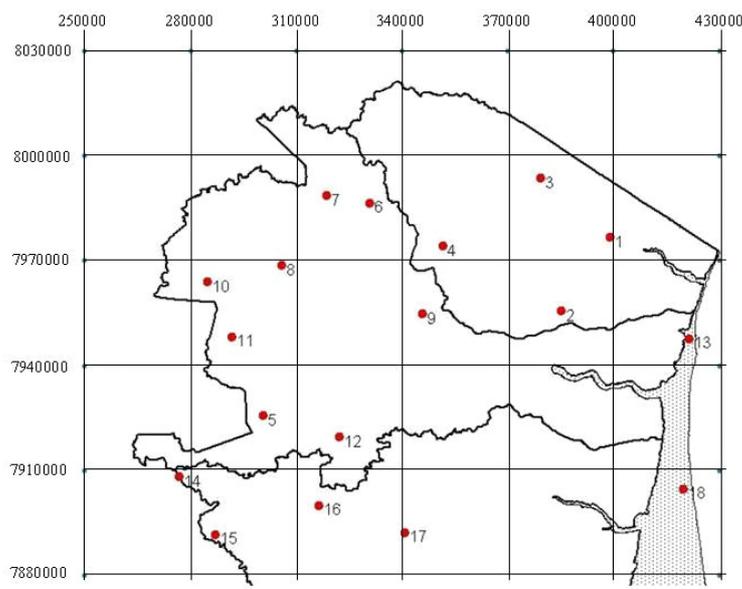


Figura 7 - Bacia hidrográfica do rio São Mateus com a rede pluviométrica estudada.

Os dados foram obtidos através da Agência Nacional de Águas (ANA), que é responsável pela operação e manutenção da rede hidrometeorológica na área em estudo.

As estações utilizadas possuíam um registro de precipitação com trinta anos de coleta de dados, do período de 1970 a 2000. Como passo inicial para aplicação do método geoestatístico, efetuou-se a análise exploratória dos dados, ou seja, os dados foram analisados com o objetivo de se identificar ausência de registro de dados de precipitação em determinados anos da série histórica utilizada. Estes valores ausentes foram preenchidos pela técnica de krigagem.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área do presente estudo corresponde a uma parte bacia hidrográfica do Rio São Mateus, que se localiza na porção norte do estado do Espírito Santo (figura 8), abrange 8 municípios e apresenta suas nascentes no estado de Minas Gerais, por isso é considerada pela Política Nacional de Recursos Hídricos uma bacia hidrográfica de domínio da União.



Figura 8 - Localização da bacia do rio São Mateus no estado do Espírito Santo (ES).

A formação geológica da área baseia-se em afloramentos de arenitos feldspáticos, com argilitos verdes nas encostas dos tabuleiros recobertos pelas barreiras.

A bacia compreende uma área de aproximadamente 7.590,25 Km² e possui, de acordo com o censo de 2000 -IBGE, uma população pouco maior do que 270.000 habitantes.

A área de estudo apresenta basicamente três tipos de relevo:

1 – Litoral – Faixa retilínea ao longo do litoral, apresenta regiões inundáveis de topografia plana.

2 – Tabuleiros – Região dos chapadões terciários que se aproximam do litoral, exceto em alguns trechos. Esses chapadões são levemente inclinados na direção litorânea, geralmente apresenta altitude em torno de 30 metros próximo à costa, no entanto podem alcançar altitudes de até 350 metros nas regiões de encontro com o cristalino.

3 – Cristalino – As rochas deste complexo são bastante modeladas, tornando o relevo desta região acidentado. Apresenta uma região ondulada com altitudes variando em torno de 400 metros.

A temperatura da região varia de 25 a 30° C no verão e de 19 a 21° C no inverno.

Na região noroeste o clima predominante é o tropical, com verões úmidos e quentes e inverno ameno e pouco seco.

Com isso, pode-se considerar na região de estudo dois climas predominantes, o sub-úmido e o tropical.

4.3 ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS

Entre o grupo das 18 estações selecionadas, existem algumas em que a série apresenta algumas falhas de registro dos dados. No entanto, para preencher estas falhas na série, foi utilizada a técnica de krigagem. Desta forma, as estações com ausência de dados em determinado ano tiveram seus valores estimados a partir dos valores das estações vizinhas daquele mesmo ano.

Neste trabalho, o preenchimento das falhas na série de determinadas estações gerou um resultado diferente daquele encontrado por Trarbach. Este fato ocorreu porque neste trabalho mais estações tiveram suas séries preenchidas. Outro possível motivo desta diferença seria devido ao programa utilizado para executar tal procedimento. O programa utilizado para realizar as estimativas dessa pesquisa foi o REDE-GEO.

As estações pluviométricas das quais houve o preenchimento das falhas foram: 4, 5, 9, 13, 17 e 18, nos seguintes anos: 1970, 1972, 1982, 1983, 1984, 1986, 1989, 1990, 1994, 1995, 1996, 1998 e 1999.

Os valores estimados de precipitação anual para estes pontos utilizaram a seguinte equação:

$$\hat{P}(a) = \sum_{i=1}^N \lambda_i p(a) \quad (4.1)$$

Onde o valor de precipitação estimado na estação faltante é $\hat{P}(a)$, em um determinado ano a , e o valor de precipitação nas estações vizinhas é $p(a)$.

Como forma de analisar a validade desta metodologia, o mesmo procedimento foi realizado para uma estação que não possuía falha na série histórica. Com os valores reais e estimados dessa estação foi possível calcular o erro percentual relativo associado a essa estimativa da seguinte forma:

$$e_r(\%) = \frac{P_e - P_0}{P_0} \times 100 \quad (4.2)$$

Onde $e_r(\%)$ é o erro percentual relativo, P_e é a precipitação estimada e P_0 é a precipitação observada.

São apresentados na tabela 2 os valores dos erros percentuais relativos para os anos em que foram preenchidas as falhas.

Tabela 2 – Erros percentuais relativos da estação 2 nos anos em que foram preenchidas falhas na série.

Ano	Valor observado	Valor estimado	Erro percentual relativo (%)
1970	1249,6	1208,2	-3,31
1972	859,2	887,73	3,32
1982	1107,1	1064,79	-3,82
1983	1072,2	1160,17	8,20
1984	1041,8	1018,18	-2,27
1986	785,7	748,40	-4,75
1989	1038,3	954,97	-8,03
1990	836,8	826,74	-1,20
1994	1089,6	998,80	-8,33
1995	930,5	824,83	-11,36
1996	845,0	804,13	-4,84
1998	739,3	719,34	-2,70
1999	1177,8	1010,51	-14,20

Com mostrou a tabela anterior, os erros relativos obtidos na maioria dos anos são menores do que 10%, sendo maiores apenas nos anos de 1995 e 1999, onde esses valores não ultrapassam 15%.

A metodologia apresentou erros baixos para estimativas dos valores de precipitação, satisfazendo as expectativas. Então, da mesma forma foram preenchidas as falhas na série para que o conjunto de dados utilizados no estudo estivesse completo.

A seguir é apresentada uma tabela com informações de cada estação envolvida nesse estudo. A tabela 3 identifica cada uma das 18 estações com seu respectivo código, coordenadas UTM e valor de precipitação média total anual.

Tabela 3 – Identificação, código, coordenadas e precipitação média total anual das 18 estações.

Identificação da estação	Código da estação	Direção X (leste/oeste)	Direção Y (norte/sul)	P(mm)
1	1839000	398683,63	7976393,58	964,76
2	1840003	384863,33	7955290,15	1055,21
3	1840012	378993,21	7993309,81	1074,89
4	1840017	351338,18	7973965,44	1068,95
5	1840004	300368,96	7925348,09	1085,90
6	1840015	330439,84	7986306,29	1065,63
7	1840011	318255,31	7988317,47	1046,36
8	1840013	305524,78	7968329,9	1235,06
9	1840016	345417,12	7954488,56	1004,90
10	1841010	284494,51	7963646,18	1154,60
11	1840007	291388,41	7948007,88	1155,56
12	1840010	321840,05	7919352,8	1132,33
13	1839001	421146,55	7947421,57	1030,79
14	1841009	276523,81	7907886,56	908,31
15	1941012	286637,39	7891366,63	866,90
16	1840000	316176,05	7899833,31	1276,61
17	1940016	340434,12	7892063,83	1146,43
18	1839006	419513,25	7904473,86	1090,37

As médias dos totais mensais de cada estação foram agrupadas com a finalidade de se verificar a sazonalidade do fenômeno de precipitação na área em estudo. Com este agrupamento de dados, foi construído um gráfico em que cada mês reunia valores médios do total mensal de precipitação para as 18 estações. Assim distinguiram-se dois períodos, um seco do mês de Abril até Outubro e outro chuvoso do mês de Novembro a Março.

A verificação da consistência dos dados foi realizada pelo método das Duplas Massas, que consiste na construção de uma curva duplo-acumulativa, na qual são comparados valores acumulados de precipitação total mensal de uma determinada estação com os valores acumulados de um grupo de estações que estejam sob condições meteorológicas semelhantes.

Nesta verificação de anormalidade no registro dos dados foram encontrados coeficientes de ajuste entre a curva dos dados e a reta de regressão acima de 0,98, sendo que na maioria das vezes o valor encontrado foi de 0,99.

4.4 MODELAGEM E VALIDAÇÃO DO SEMIVARIOGRAMA

A confecção dos semivariogramas foi realizada através do R, que consiste em um programa disponibilizado de forma gratuita na INTERNET, capaz de realizar diversos tipos de cálculos.

Desenvolvido por Paulo J. Ribeiro Jr. E Peter J. Diggle em 2001, o *geoR* é um pacote extra que utiliza este programa para executar alguns métodos de análise geoestatística de dados.

O pacote inclui funções e métodos para leitura e preparação de dados, análise exploratória, inferência de parâmetros de modelos incluindo variogramas e interpolação espacial. Também implementa métodos clássicos de krigagem como a simples e ordinária, entre outras.

Os dados de entrada podem ser preparados em arquivo de leitura com extensão txt. Os comandos são todos digitados na tela principal do programa.

Os variogramas empíricos são calculados utilizando a função *variog*, que permite a escolha entre variogramas com dados agrupados em classes de distância ou não. Os variogramas teóricos podem ser representados graficamente junto aos empíricos para que a comparação seja feita visualmente. Os variogramas direcionais podem ser construídos por esta mesma função utilizando os argumentos de direção e tolerância.

Conforme descrito na seção 3.2.2, o ajuste do semivariograma é um procedimento que pode ficar a critério do pesquisador, podendo o ajuste inicial feito visualmente. Diante da subjetividade e morosidade encontradas por tal procedimento, foi implementada uma rotina no REDE-GEO para automatizar esta etapa.

O modelo ideal de semivariograma é encontrado utilizando-se a técnica de validação cruzada.

A Validação Cruzada utiliza a estratégia de deixar um de fora, ou seja, pontos de dados são removidos um a um e estimados por krigagem através dos dados remanescentes. Têm-se dessa forma dois valores para o mesmo ponto, o real e o estimado.

Uma vez que se tem o conjunto de N valores medidos e estimados através de um modelo ajustado, $Z(x_i)$ e $Z^*(x_i)$, então pode se definir o Erro Quadrático Médio (EQM) como:

$$EQM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [z(x_i) - z^*(x_i)]^2 \quad (4.3)$$

Onde N é o número de amostras, $z(x_i)$ valores observados e $z^*(x_i)$ valores estimados.

A partir do ajuste visual, vários modelos foram testados e dentre os modelos propostos foi selecionado aquele proporcionou a maior correlação entre os valores observados e estimados, correlação zero entre os valores estimados e os erros, distribuição dos erros simétrica, centrada, com média zero e dispersão mínima e menor valor de Erro Quadrático Médio (EQM).

Os procedimentos de Validação Cruzada e Krigagem Ordinária foram executados através do programa REDE-GEO (Coutinho, 2004) desenvolvido em linguagem Pascal 7.0.

A variância da estimativa, parâmetro de análise aplicada à otimização da rede pluviométrica, foi também fornecida pela Krigagem Ordinária.

4.5 OTIMIZAÇÃO DA REDE PLUVIOMÉTRICA ATRAVÉS DA ANÁLISE DA PRECISÃO DE ESTIMATIVA DA PRECIPITAÇÃO MÉDIA TOTAL ANUAL E SAZONAL X CUSTO

A avaliação da configuração da rede neste trabalho, considerou além da precisão o custo de operação e manutenção das estações. Tal procedimento foi realizado por meio de restrições de custo, ou seja, o custo disponível para ser aplicado à rede pluviométrica foi considerada como fator limitante no dimensionamento, uma vez que, existindo restrições de recursos financeiros a serem destinados às redes pluviométricas possivelmente algumas estações poderão ficar sem operar, ocasionando falhas nas séries históricas de dados.

Após estabelecido o limite de custo a ser aplicado à rede, foram estabelecidas as melhores configurações, em termos de precisão, que atendem ao custo disponível. Dessa forma, foram encontrados subgrupos de configurações da rede com melhor precisão, dentro do limite de custo disponível a ser aplicado à rede.

Foram realizadas algumas simulações de dimensionamento na rede pluviométrica da bacia hidrográfica do rio São Mateus, nos períodos anual e sazonal, que serão apresentadas no próximo capítulo. O resultado desta análise encontra um grupo de soluções viáveis em termos de custo. Porém, cabe ao tomador de decisões escolher qual das configurações apresentadas lhe trará mais benefícios.

O programa REDE-GEO (Coutinho, 2004) desenvolvido a princípio para avaliar a configuração da rede pluviométrica considerando apenas a precisão da estimativa de precipitação média total anual e sazonal, está sendo implementado para considerar o custo de operação e manutenção das estações.

Dessa forma, o REDE-GEO executará cálculos de precipitação média e variância da estimativa para todas as configurações possíveis identificando as que fornecem as menores variâncias relacionadas com os custos disponíveis.

O REDE-GEO também é capaz de fazer estimativas pontuais e estimativas da precipitação média sobre uma região, através da Krigagem Ordinária, criando uma malha sobre a região analisada e estimando valores para cada célula da grade criada. A utilização da malha no presente estudo foi a definida por Trarbach (2004), que estudou diversos tamanhos de malha até encontrar aquele que apresentava a melhor relação entre: precisão na determinação da precipitação média x esforço computacional, conforme mostra o gráfico 2.

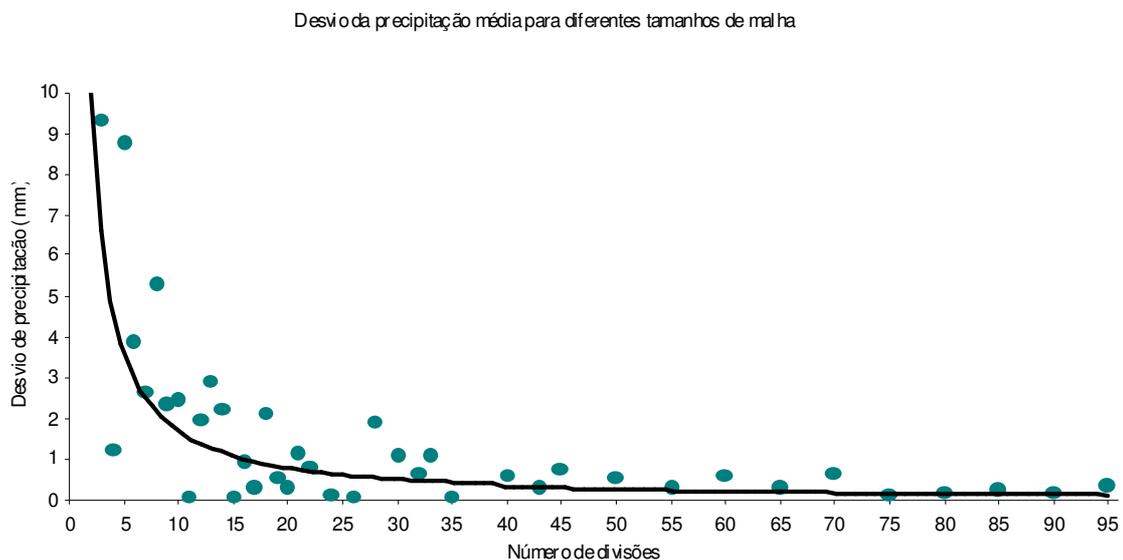


Gráfico 2 – Desvio da estimativa de precipitação média em relação à malha com 100 divisões.

Fonte: Trarbach (2004).

Usando como referência uma malha fina com 100 divisões no maior eixo, foram efetuadas as estimativas de precipitação média sobre a área de estudo para diversos tamanhos de malha inferiores. Conforme pode ser observado no gráfico 2, a partir de 35 divisões não existe um acentuado ganho de precisão além do tempo gasto para a determinação da precipitação média

sobre a área ser menor quando comparado com uma malha mais fina, portanto suficiente para a estimação.

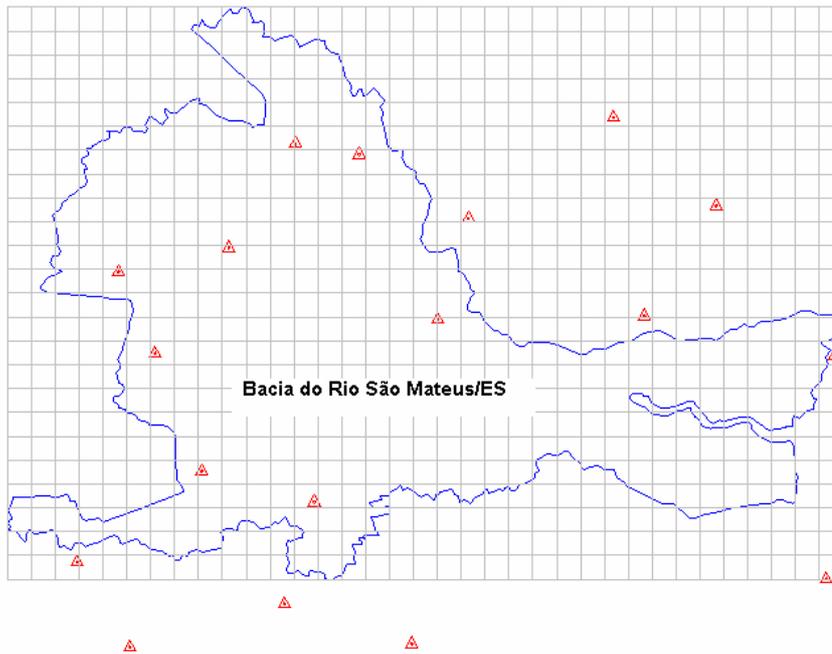


Figura 9 – Malha utilizada para a realização dos cálculos na Bacia do rio São Mateus/ES.

Fonte: Trarbach (2004).

A grade acima apresenta células com 4.344,6 m x 4.370,8 m, sendo que apenas as com o centro no interior da região foram consideradas.

Foram efetuadas a krigagem média sobre a região a partir das diferentes configurações da rede, considerando a grade definida anteriormente, juntamente com a variância das estimativas da krigagem e o custo envolvido.

*Resultados e
Discussões*

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 MODELAGEM AUTOMATIZADA DO SEMIVARIOGRAMA E VALIDAÇÃO

Nesta seção serão apresentados os modelos de semivariograma experimental que melhor representam o fenômeno nos períodos anual e sazonal.

A partir de dados amostrais, os dezoito postos que compõem a rede, é construído o semivariograma e por meio da validação cruzada é definido o melhor modelo.

Na pesquisa realizada por Trabach (2004) o procedimento de definição dos parâmetros ainda não estava automatizado, tendo sido feito primeiramente o ajuste visual e posteriormente o ajuste dos parâmetros, de forma gradativa. Assim, a cada novo valor estabelecido de um parâmetro, a validação era calculada e o EQM comparado com o obtido anteriormente. Como tal procedimento requeria um tempo considerável, um dos objetivos deste trabalho foi avaliar a modelagem automatizada pelo programa REDE-GEO.

O programa REDE-GEO encontra o menor valor de EQM no intervalo entre dois valores pré-estabelecidos do parâmetro analisado. Dessa forma, foram inclusive analisados tipos diferentes de modelos como linear, esférico, gaussiano e exponencial.

5.1.1 MÉDIA TOTAL ANUAL

Através da modelagem dos dados de precipitação média total anual das 18 estações que compõem a rede analisada, foi obtido o modelo tipo esférico. O semivariograma apresentou efeito pepita zero, patamar de 11.000 mm² e alcance de 60.000 m (Gráfico 3).

Semivariograma - Precipitação Média Total Anual

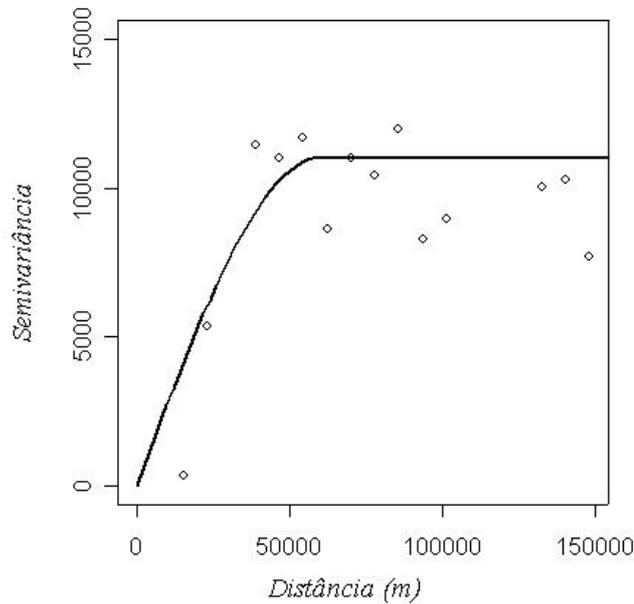


Gráfico 3– Semivariograma isotrópico para precipitação média total anual.

A modelagem também foi realizada em diferentes direções a fim de avaliar a existência de anisotropia no fenômeno. Nos semivariogramas direcionais foi revelada anisotropia nas direções 0° e 90°, com alcances de 45.000 m e 102.000 m, respectivamente (Gráficos 4 e 5).

Semivariograma - Precipitação Média Total Anual

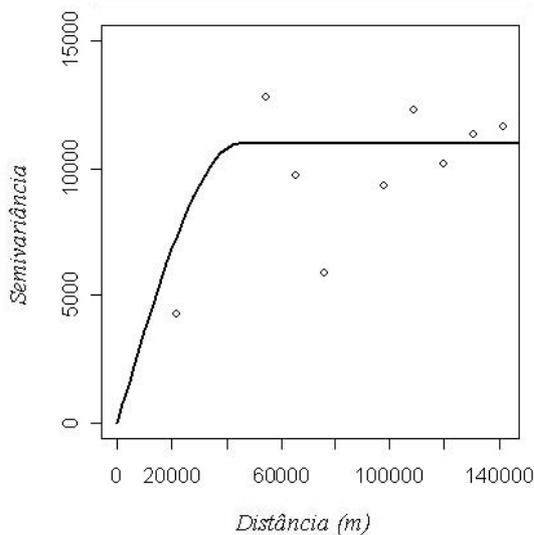


Gráfico 4 – Semivariograma do período anual na direção 0° ± 22,5.

Semivariograma - Precipitação Média Total Anual

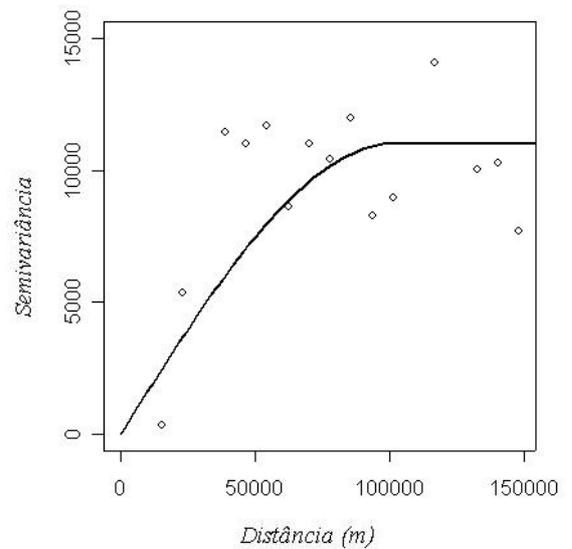


Gráfico 5 – Semivariograma do período anual na direção 90° ± 22,5.

A validação cruzada foi realizada a partir da modelagem do semivariograma, sendo escolhido o modelo que apresentou menor Erro Quadrático Médio (EQM) com valor igual a 5314,28.

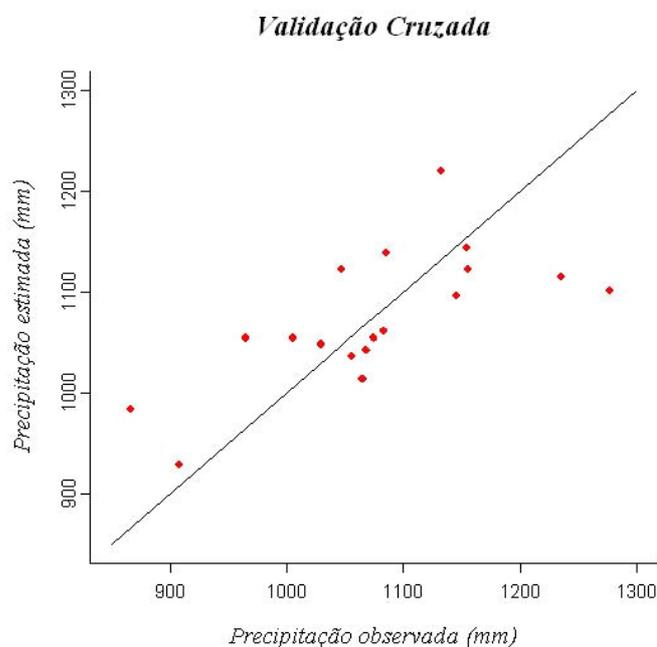


Gráfico 6 – Precipitação observada x estimada: valores obtidos da validação cruzada dos dados de precipitação média total anual.

Tendo em vista o número de amostras e o esforço computacional, optou-se por utilizar o procedimento de vizinhança única, ou seja, todos os valores medidos serão utilizados na estimativa. Esta técnica reduz o esforço computacional já que os vizinhos separados por distâncias maiores do que o alcance, não contribuem de forma significativa no valor estimado. Foram calculadas as estatísticas descritivas para os dados estimados através da krigagem e para os valores observados das 18 estações pluviométricas, conforme apresentado a seguir.

Tabela 4 – Estatística descritiva dos dados observados e estimados de precipitação média total anual.

	Observados	Estimados
Mínimo	866,9	929,3
1° Quartil	1033,8	1043,1
Mediana	1071,9	1058,4
3° Quartil	1142,9	1120,7
Máximo	1276,61	1220,4
Média	1075,3	1074,3
Desvio Padrão	102,68	66,70
Variância	10543,58	4449,13

A tabela 5 apresenta a estatística descritiva dos erros percentuais relativos das estimativas de precipitação média total anual.

Tabela 5 – Estatística descritiva dos erros percentuais relativos (%) referentes às estimativas de precipitação média total anual das 18 estações.

Mínimo	-13,70
1° Quartil	-2,75
Mediana	-1,45
3° Quartil	4,90
Máximo	13,40
Média	0,38
Desvio Padrão	6,79
Variância	46,08

Valores estimados x Resíduos

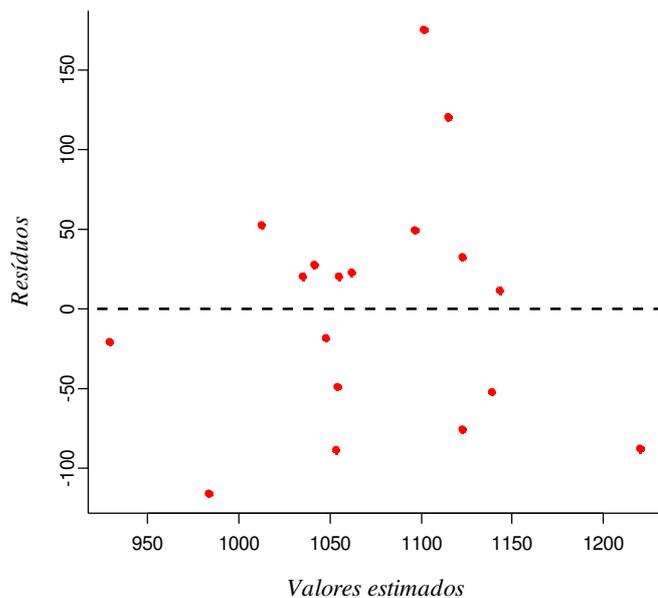


Gráfico 7 – Gráficos de distribuição dos resíduos entre os valores observados e estimados de precipitação média total anual.

Conforme mostrado no gráfico 7, não é observada tendência na distribuição dos erros encontrados entre os valores observados e estimados.

Para verificar a correlação existente entre os valores observados e estimados, foi realizada a análise de correlação de Pearson. Considerando o nível de significância de 5% o teste apresentou-se significativo, pois o valor de correlação encontrado foi $r = 0,69$ e $p = 0,002$ indicando dessa forma que a hipótese nula (H_0) de não correlação pode ser rejeitada.

Também foi realizada a mesma análise entre os valores estimados e os resíduos, só que neste caso, como era esperado, não foi verificado a existência de correlação. O valor de correlação encontrado foi $r = 0,208$ e $p = 0,407$, com o nível de significância em 5% a hipótese nula de não correlação não pode ser rejeitada.

5.1.2 DADOS MENSAIS

A presença da sazonalidade na precipitação foi verificada através do gráfico Box-plot conforme apresentado na próxima figura. Os dados das estações de toda a série histórica foram agrupados em valores totais mensais. Assim, puderam ser definidos dois períodos, o seco do mês de abril a outubro e o chuvoso do mês de novembro a março.

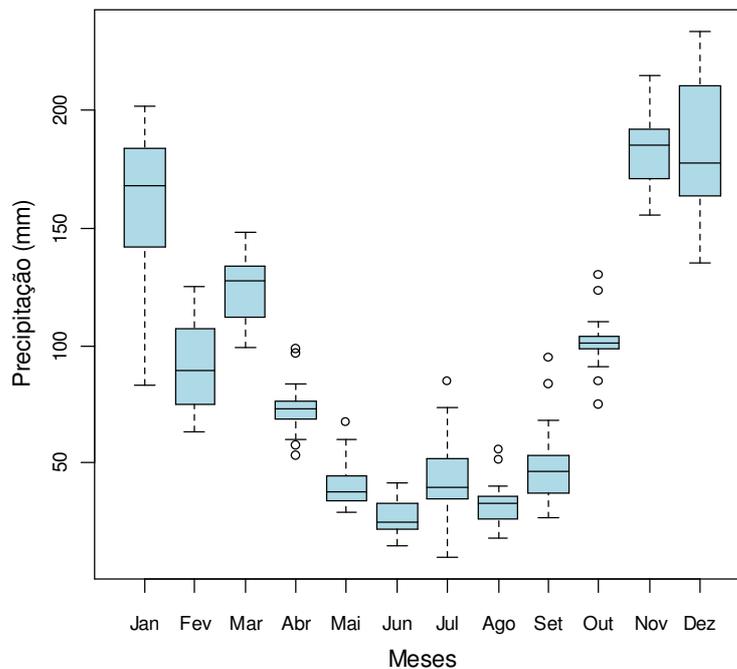


Gráfico 8 – Gráfico de BoxPlot da precipitação média total dos meses de Janeiro a Dezembro para as 18 estações na região estudada.

5.1.2.1 PERÍODO SECO

Através da análise estrutural dos dados do período seco obteve-se o modelo de semivariograma tipo esférico com efeito pepita zero, patamar de 5.500 mm^2 e alcance de 95.000 m (Gráfico 9).

Semivariograma - Precipitação Período Seco

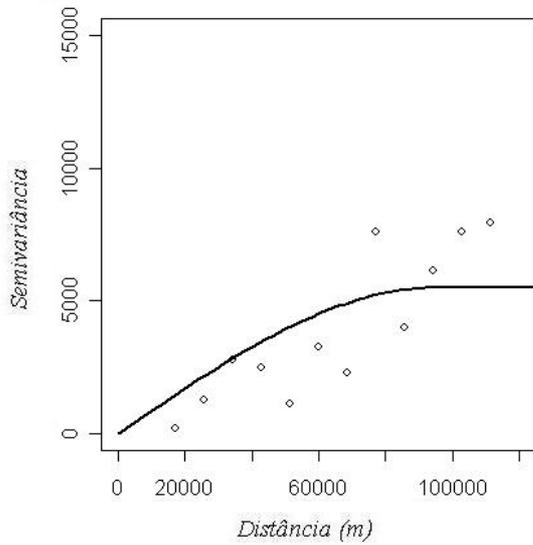


Gráfico 9 – Semivariograma isotrópico para precipitação no período seco.

Analisando a anisotropia do fenômeno verificou-se que as direções de 0° e 90° apresentaram os respectivos alcances de 55.000 m e 145.000 m (Gráficos 10 e 11).

Semivariograma - Precipitação Período Seco

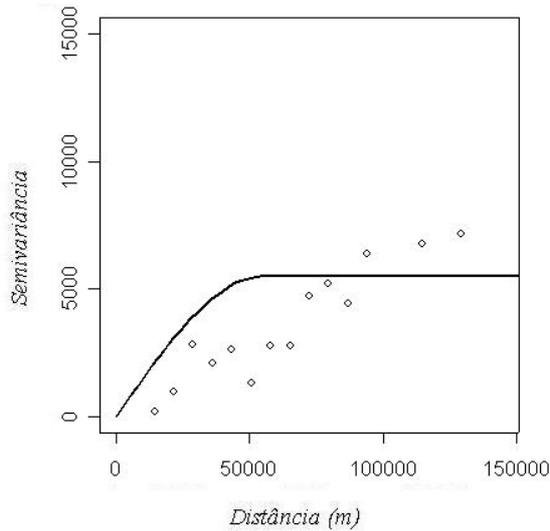


Gráfico 10 – Semivariograma do período seco na direção 0° ± 22,5.

Semivariograma - Precipitação Período Seco

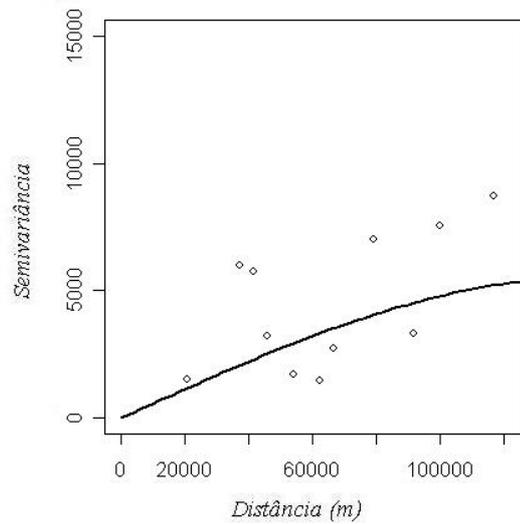


Gráfico 11 – Semivariograma do período seco na direção 90° ± 22,5.

A validação cruzada foi realizada a partir da modelagem do semivariograma, sendo escolhido o modelo que apresentou menor Erro Quadrático Médio (EQM) com valor igual a 1572,05.

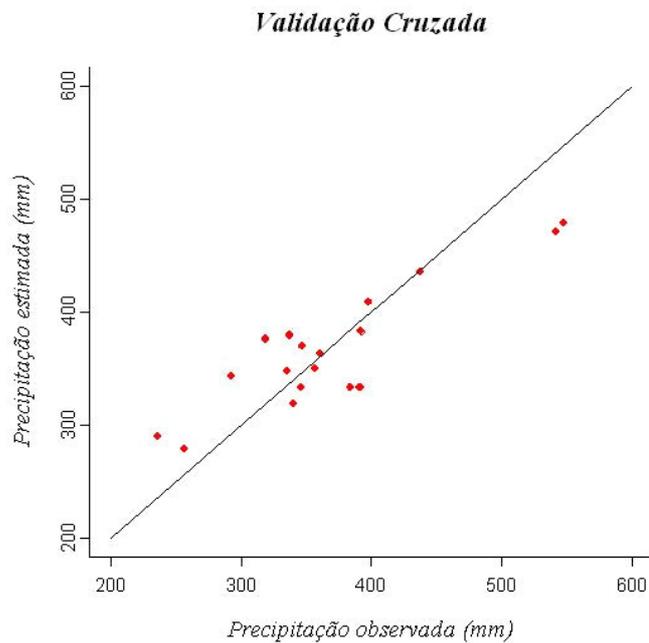


Gráfico 12 – Precipitação observada x estimada: valores obtidos da validação cruzada para o período seco.

A seguir é apresentada a estatística descritiva dos dados do período seco e dos valores estimados através da krigagem observados para as 18 estações.

Tabela 6 – Estatística descritiva dos dados observados e estimados de precipitação no período seco.

	Observados	Estimados
Mínimo	235.8	279.0
1° Quartil	335.3	333.4
Mediana	351.5	356.4
3° Quartil	391.8	381.7
Máximo	547.3	479.0
Média	367.5	366.4
Desvio Padrão	81.02	54.88
Variância	6564.94	3011.51

A tabela 7 apresenta a estatística descritiva dos erros percentuais relativos das estimativas de precipitação no período seco.

Tabela 7 – Estatística descritiva dos erros percentuais relativos (%) referentes às estimativas de precipitação no período seco das 18 estações.

Mínimo	-14,90
1° Quartil	-5,60
Mediana	0,25
3° Quartil	8,28
Máximo	23,1
Média	1,45
Desvio Padrão	11,39
Variância	129,82

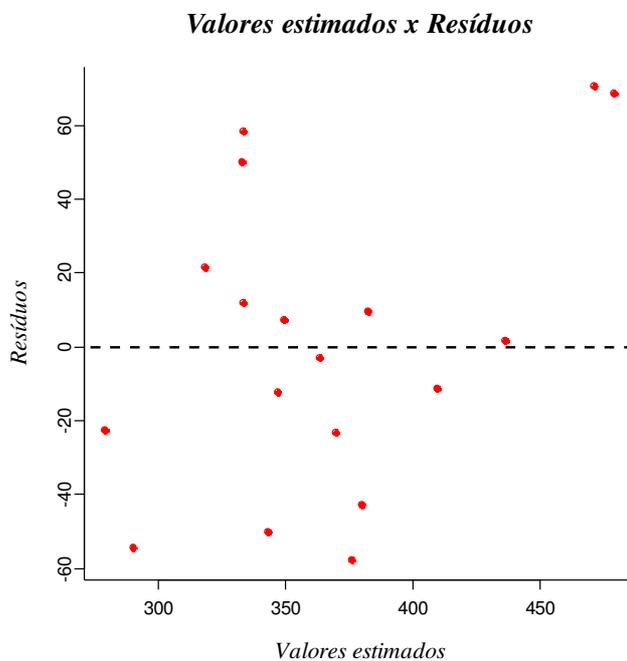


Gráfico 13 – Gráficos de distribuição dos resíduos referentes a diferença entre os valores observados e estimados de precipitação média total anual.

O gráfico 13 mostra que não existe nenhuma tendência entre os valores estimados e os erros encontrados entre os valores observados e estimados.

Através da análise de correlação de Pearson, o valor de correlação encontrado foi $r = 0,69$ e $p = 0,002$, indicando dessa forma que a hipótese nula (H_0) de não correlação é rejeitada.

Também foi realizada a mesma análise entre os valores estimados e os resíduos, só que neste caso, como era esperado, não foi verificada a existência de correlação. O valor de correlação encontrado foi $r = 0,195$ e $p = 0,436$, com o nível de significância em 5% a hipótese nula de não correlação não pode ser rejeitada.

5.1.2.2 PERÍODO CHUVOSO

Para o período chuvoso, o modelo de semivariograma obtido através da análise estrutural foi o tipo gaussiano com efeito pepita zero, patamar de 10.600 mm² e alcance de 75.000 m (Gráfico 14).

Semivariograma - Precipitação Período Chuvoso

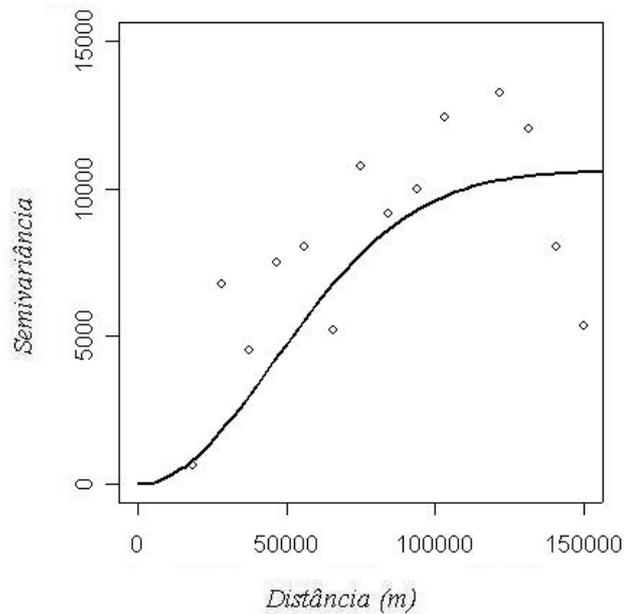


Gráfico 14 – Semivariograma isotrópico para precipitação no período chuvoso.

Analisando a anisotropia do fenômeno verificou-se que as direções de 0° e 90° apresentaram os respectivos alcances de 47.500 m e 105.000 m (Gráficos 15 e 16).

Semivariograma - Precipitação Período Chuvoso

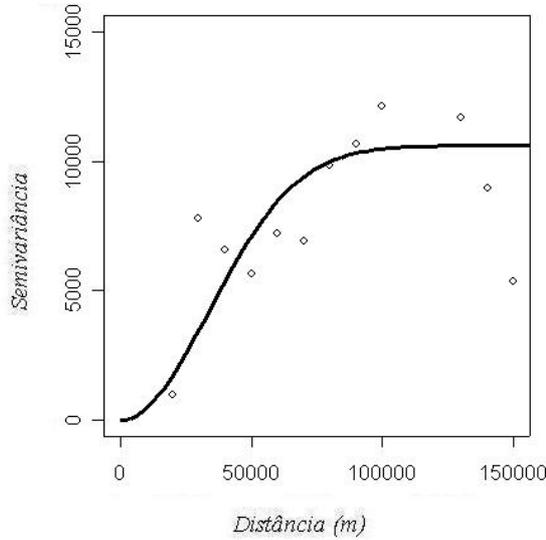


Gráfico 15 – Semivariograma do período chuvoso na direção $0^\circ \pm 22,5$.

Semivariograma - Precipitação Período Chuvoso

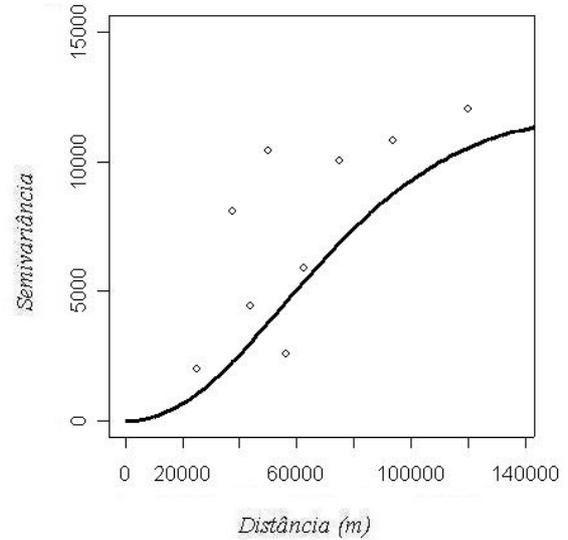


Gráfico 16 – Semivariograma do período chuvoso na direção $90^\circ \pm 22,5$.

O modelo do semivariograma escolhido foi o que apresentou o menor Erro Quadrático Médio (EQM) fornecido pela técnica de validação cruzada.

Validação Cruzada

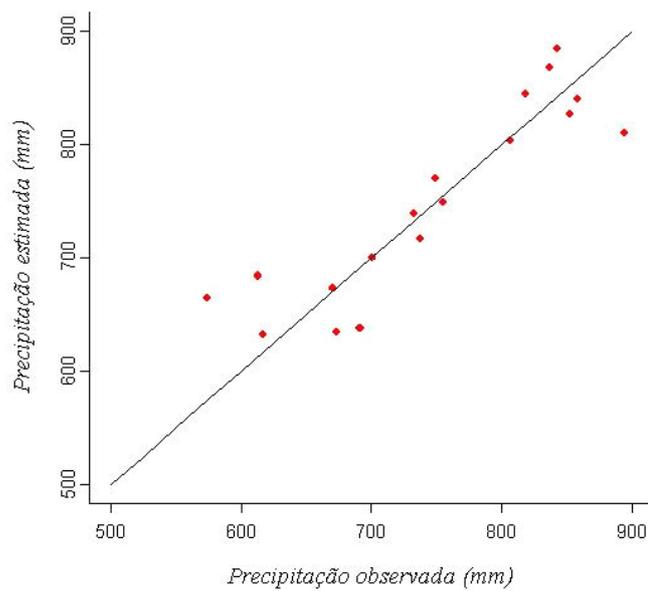


Gráfico 17 – Precipitação observada x estimada: valores obtidos da validação cruzada para o período chuvoso.

A seguir é apresentada a estatística descritiva dos dados do período chuvoso e dos valores estimados através da krigagem observados para as 18 estações.

Tabela 8 – Estatística descritiva dos dados observados e estimados de precipitação no período chuvoso.

	Observados	Estimados
Mínimo	574.2	631.4
1° Quartil	677.3	675.9
Mediana	743.8	743.9
3° Quartil	832.2	822.3
Máximo	893.5	884.2
Média	745.7	748.7
Desvio Padrão	94.73	85.06
Variância	8973.49	7236.09

A tabela 9 apresenta a estatística descritiva dos erros percentuais relativos das estimativas de precipitação no período chuvoso.

Tabela 9 – Estatística descritiva dos erros percentuais relativos (%) referentes às estimativas de precipitação no período chuvoso das 18 estações.

Mínimo	-9,30
1° Quartil	-2,55
Mediana	0,20
3° Quartil	3,00
Máximo	15,70
Média	0,76
Desvio Padrão	6,12
Variância	37,45

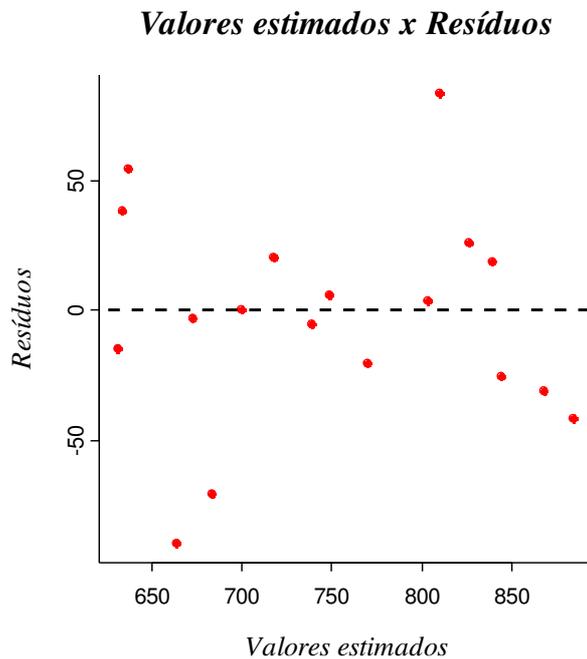


Gráfico 18 – Gráficos de distribuição dos resíduos referentes a diferença entre os valores observados e estimados de precipitação no período chuvoso.

O gráfico 18 mostra que também para o período chuvoso não existe tendência entre os valores estimados e os resíduos.

Através da análise de correlação de Pearson, o valor de correlação encontrado foi $r = 0.896$ e $p = 0,000$, indicando dessa forma que a hipótese nula (H_0) de não correlação é rejeitada.

Também foi realizada a mesma análise entre os valores estimados e os resíduos, só que neste caso, como era esperado, não foi verificado a existência de correlação. O valor de correlação encontrado foi $r = 0.102$ e $p = 0,687$, com o nível de significância em 5% a hipótese nula de não correlação não pode ser rejeitada.

5.2 CONFIGURAÇÕES ÓTIMAS CONSIDERANDO PRECISÃO E CUSTO DE OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DAS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS NA REGIÃO ESTUDADA

Baseada no trabalho de Pardo-Igúzquiza (1998), a determinação dos custos de operação e manutenção das estações que compõem a rede pluviométrica estudada foi realizada de forma

aleatória utilizando valores arbitrários. Os valores escolhidos são unitários e variam de 1 até 4 conforme mostrado na figura 10.

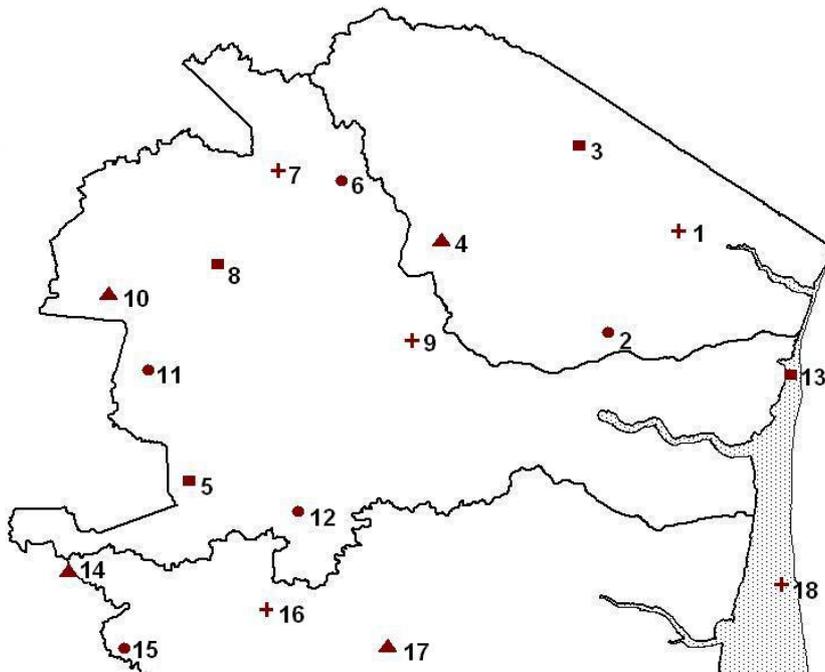


Figura 10 - Região hidrográfica do Rio São Mateus/ES com a rede pluviométrica estudada como custos de manutenção e operação das estações: (+) 4 unidades, (■) 3 unidades, (▲) 2 unidades e (●) 1 unidade.

Através do programa REDE-GEO foram obtidas as melhores configurações para os sub-grupos das 18 estações que compõem a rede, considerando a variância de estimativa da krigagem. O programa, que está sendo implementado, também permitirá que sejam feitas as análises das configurações considerando o custo das estações, através do estabelecimento de valores destinados ao dimensionamento da rede.

5.2.1 CONFIGURAÇÕES ÓTIMAS CONSIDERANDO APENAS A PRECISÃO

As configurações selecionadas foram aquelas que apresentaram maior precisão da estimativa, sendo representadas por aqueles sub-grupos de estações com menor média de variância de estimativa na região, para isso foram calculadas as médias das variâncias de estimativa de precipitação da região para todas as possíveis combinações.

Os resultados encontrados neste trabalho após a implementação desta rotina foram comparados com os encontrados por Trarbach (2004) e estão representados na tabela 10 a seguir.

Tabela 10 – Tabela comparativa entre valores de VE das configurações encontradas por Trarbach (2004) e os do presente trabalho para os períodos anual, seco e chuvoso.

N° de estações	Anual – VE (mm ²)		Seco – VE (mm ²)		Chuvoso – VE (mm ²)	
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
3	1391,9	1374,3	466,1	551,5	946,3	576,2
4	881,3	928,85	295,3	385,5	518,4	330,8
5	694,9	620,8	233,0	247,4	415,7	148,6
6	501,9	483,9	168,3	196,3	315,1	118,1
7	419,5	404,3	140,8	167,8	269,1	89,9
8	390,3	353,9	130,9	145,6	244,5	73,0
9	366,5	321,8	123,1	127,6	230,9	61,6
10	353,7	309,0	118,8	117,9	220,1	57,0
11	344,7	299,2	115,8	112,6	211,8	52,7
12	338,1	290,9	113,6	109,3	207,9	50,1
13	335,2	285,7	112,6	107,5	204,0	48,4
14	333,5	282,9	112,0	106,3	202,7	46,5
15	332,9	280,1	111,9	105,2	202,3	45,3
16	332,5	279,4	111,7	105,1	202,1	44,6
17	332,0	279,0	111,5	105,1	201,9	44,5

(1) Resultados de variância média sobre a região encontrados por Trarbach (2004).

(2) Resultados de variância média sobre a região encontrados nesta pesquisa.

O procedimento automatizado da modelagem, realizado neste trabalho pelo REDE-GEO, resultou em modelos diferentes do definido por Trarbach (2004). Conseqüentemente as estimativas também foram diferentes.

Ao comparar os resultados encontrado nesta pesquisa com os de Trarbach (2004), apresentados na tabela 10, observa-se que as diferenças podem ser significativas, como ocorreu no período chuvoso. No período anual também houve diferenças consideráveis em alguns subgrupos.

As diferenças encontradas devido à modelagem podem interferir de forma negativa nos resultados, uma vez que o modelo servirá de referência para diversos cálculos e análises. Por isso, esta etapa deve ser realizada de forma criteriosa.

A automatização vem a contribuir neste sentido, pois permite que seja realizado um número maior de testes pela busca do melhor modelo.

5.2.2 CONFIGURAÇÕES ÓTIMAS CONSIDERANDO A PRECISÃO E O CUSTO

A seguir, serão apresentadas análises de configurações considerando a precisão da estimativa com restrições de custo. Um problema hipotético será apresentado de forma a exemplificar uma análise considerando as variáveis precisão e custo de operação e manutenção das estações.

5.2.2.1 DETERMINAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO ÓTIMA ATRAVÉS DO CUSTO DISPONÍVEL NO PERÍODO ANUAL

Quando o fator limitante para o dimensionamento da rede pluviométrica é o custo, a configuração escolhida pode não ser a melhor em termos de precisão. No entanto, com um determinado custo disponível é possível que se identifique qual a melhor configuração em termos de precisão.

Como apresentado anteriormente, o custo de manutenção e operação de cada estação utilizado neste trabalho foi igual a 1, 2, 3 ou 4, atribuídos de forma arbitrária, portanto o custo da rede pode variar de 2 até 44 quando subgrupos de 2 à 17 estações são analisados.

Sendo assim, considerando um custo disponível para manutenção e operação da rede de até 20, a escolha da configuração pode ser feita analisando aquela que apresentar a menor variância de estimação.

Para este valor observou-se que os subgrupos de 12 até 17 estações estariam ultrapassando o valor de custo disponível para o dimensionamento. As demais configurações foram analisadas e identificadas aquelas que oferecem melhor precisão na estimativa da precipitação.

A tabela a seguir mostra os menores valores de variância e respectivos desvios padrões encontrados para as configurações que atendem ao custo disponível para o dimensionamento.

Tabela 11 – Variâncias e desvios padrões das configurações de custo máximo de 20 unidades.

N° de Estações	VE (mm ²)	Desvio Padrão (mm)	Custo	Configurações
11	403,78	20,09	20	2,4,6,8,9,10,11,12,14,15,17
10	355,36	18,85	20	2,6,7,8,9,10,11,12,15,17
9	345,06	18,57	20	2,6,7,8,9,10,11,12,13
8	367,81	19,17	19	2,5,6,7,8,9,10,12
7	404,26	20,10	18	2,5,7,8,9,10,12
6	483,94	21,99	15	2,7,8,9,10,12
5	620,8	24,91	11	2,7,9,11,12
4	928,85	30,47	9	2,8,9,12
3	1374,31	37,07	8	2,8,9

Considerando que as configurações apresentadas na tabela anterior atendem em termos de custo disponível, e que o principal objetivo do dimensionamento ótimo é a precisão da informação, o ideal seria a escolha da configuração que apresentasse o menor desvio padrão.

No item 5.2.1 foi apresentado através de gráficos a relação entre número de estações e variância de estimação, quando o número de estações aumenta, a variância da estimativa diminui. No entanto, este comportamento não é observado quando existe a restrição de custo na análise, como pode ser observado na tabela 11. Nas configurações de 3 até 9 estações os desvios padrões diminuem, porém de 9 até 11 estes valores aumentam.

Neste caso, podemos verificar que podem existir redes de tamanhos diferentes que apresentam o mesmo custo de manutenção e operação, por isso a decisão final pode ser tomada observando aspectos como a precisão e a localização das estações que poderão ser utilizadas para gerar informações para alguma bacia vizinha.

Dessa forma, como não existe apenas uma configuração ótima, o dimensionamento da rede pluviométrica ficará a critério do tomador de decisões.

5.2.2.2 DETERMINAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO ÓTIMA ATRAVÉS DO CUSTO DISPONÍVEL NO PERÍODO SAZONAL

Analisando os períodos seco e chuvoso separadamente, pode-se definir uma rede que atenda em termos de custo a esses dois períodos, fornecendo a melhor precisão possível.

Considerando também o custo de 20, disponível para o dimensionamento, foram encontradas para os dois períodos as configurações apresentadas na tabela 9.

Tabela 12 – Variância e desvio padrão dos períodos seco e chuvoso para as configurações de custo até 20 unidades.

N° de Estações	SECO			CHUVOSO		
	VE	Desvio Padrão	Custo	VE	Desvio Padrão	Custo
11	156,25	12,50	20	101,57	10,08	20
10	136,93	11,70	20	74,77	8,65	20
9	135,52	11,64	20	75,1	8,67	19
8	147,27	12,14	19	80,38	8,97	20
7	167,75	12,95	18	89,85	9,48	17
6	196,27	14,01	12	118,06	10,87	14
5	247,35	15,73	11	148,56	12,19	11
4	385,49	19,63	9	330,76	18,19	9
3	551,45	23,48	8	576,23	24,00	8

A tabela 13 apresenta as configurações encontradas para os períodos seco e chuvoso com destaque para as estações que aparecem apenas nas configurações daquele período.

Tabela 13 – Tabela das configurações obtidas para custo máximo de 20 unidades.

N° de Estações	Configurações do Período Seco	Configurações do Período Chuvoso
11	2,4,6,8,9,10,11,12,14,15,17	2,4,6,8,9,10,11,12,14,15,17
10	2,6,7,8,9,10,11,12,15,17	2,3,6,8,9,10,11,12,13,15
9	2,6,7,8,9,10,11,12,13	2,3,6,8,9,10,12,13,15
8	2,5,6,7,8,9,10,12	2,3,7,8,9,11,12,13
7	2,5,7,8,9,10,12	2,7,8,9,11,12,13
6	2,6,8,9,10,12	2,7,9,11,12,13
5	2,7,9,11,12	2,7,9,11,12
4	2,8,9,12	2,8,9,12
3	2,8,9	2,8,9

Com os resultados das configurações é possível saber se a rede que atende ao período seco também atende ao chuvoso, por exemplo.

5.3 PROCEDIMENTO PARA REDIMENSIONAMENTO DA REDE PLUVIOMÉTRICA

O número de estações que compõem uma rede de monitoramento pode ser reduzido sem comprometer as estimativas fornecidas por ela. Porém, além de reduzir o número de estações de uma rede densa, uma ou mais estações podem ser relocadas na tentativa de melhorar a estimativa da rede.

Através da utilização da variância da estimativa da krigagem (V_E) foram feitas proposições sobre o redimensionamento da rede estudada, por meio da relocação e inserção de estações

A definição dos locais para a relocação e inserção foi baseada em um mapa de VE sobre a área estudada. Através do mapa puderam ser identificados os possíveis locais de instalação de estações.

Após a análise do mapa de VE, foram realizadas simulações considerando novos locais para as estações.

O melhor local para relocação ou inserção de estações foi definido com sendo aquele que proporcionava a rede uma menor variância média sobre a área.

O procedimento realizado seguiu a seqüência mostrada a seguir:

- 1° passo: escolha da configuração da rede que terá estações relocadas ou inseridas;
- 2° passo: confecção do mapa de VE sobre a área estudada considerando a configuração escolhida no 1° passo;
- 3° passo: escolha dos possíveis locais para instalação da estação com base no mapa de VE sobre a área;
- 4° passo: estimação da precipitação no local sugerido utilizando estações da rede existente;
- 5° passo: calcular o valor de VE médio sobre a área encontrado pela rede proposta e comparar com o valor de VE médio da configuração ótima da rede existente.

Se o valor de VE encontrado pela nova configuração for maior do que o da rede existente, um novo local é sugerido, então o 3°, 4° e 5° passos são repetido até que seja encontrado um local que proporcione a redução do valor de VE médio sobre a área.

5.3.1 PROCEDIMENTO PARA REDIMENSIONAMENTO DA REDE ATRAVÉS DA RELOCAÇÃO DE ESTAÇÕES

Com o objetivo de avaliar o procedimento desenvolvido para redimensionamento de rede, foram realizadas algumas simulações com relocação de até 3 estações.

Conforme mostrado anteriormente, a rede estudada composta por 18 estações poderia ser reduzida em até 8 estações sem que houvesse uma significativa perda de precisão. Então, a configuração ótima de 5 estações foi analisada com relocação de uma, duas e três estações.

A partir da configuração ótima de 5 estações foi gerado o mapa de variância. Com este mapa foram identificadas algumas possíveis localizações para a 6ª estação. No entanto, com a distribuição apresentada, não foi possível encontrar uma posição para a nova estação de forma que melhorasse a precisão de rede, por isso, foi necessário estabelecer uma outra rede de 5 estações e gerar outro mapa de variância (figura 14) para efetuar as simulações.

Os mapas de cores e isolinhas apresentados, mostram as variações da variância sobre a bacia estudada, as cores mais escuras representam os maiores valores de variância e as mais claras os menores.

No mapa de VE, as regiões mais escuras são as favoráveis para instalação de estações

As simulações mostraram que existe um local para relocação da 6ª estação, dentro da região estudada, que melhora a precisão das estimativas fornecidas pela rede (figura 12).

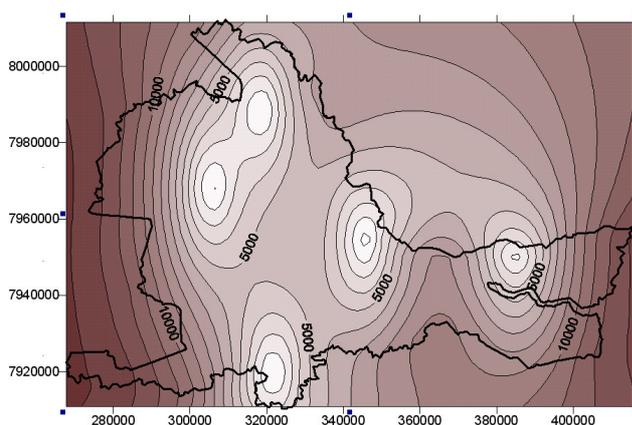


Figura 11 – Mapa de variância sobre a área(VE) gerado com 5 estações, utilizado para estimar o local da 6ª estação.

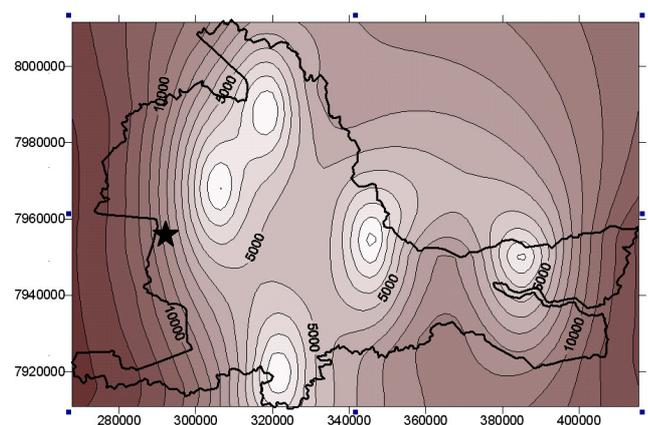


Figura 12 – Mapa de variância com localização da 1ª estação relocada.

Após a simulação com relocação da 6ª estação, foi avaliada a relocação da 7ª estação. Porém, para estimar mais um novo local, foi utilizada a configuração anteriormente obtida (figura 12) e confeccionado um novo mapa de VE (figura 13). O mapa de variância utilizado para escolha dos locais de simulação é mostrado a seguir.

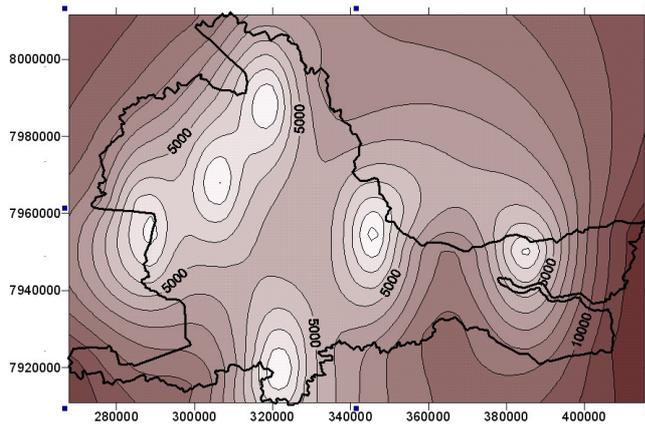


Figura 13 – Mapa de variância sobre a área(VE) gerado com 6 estações, utilizado para estimar o local da 7ª estação

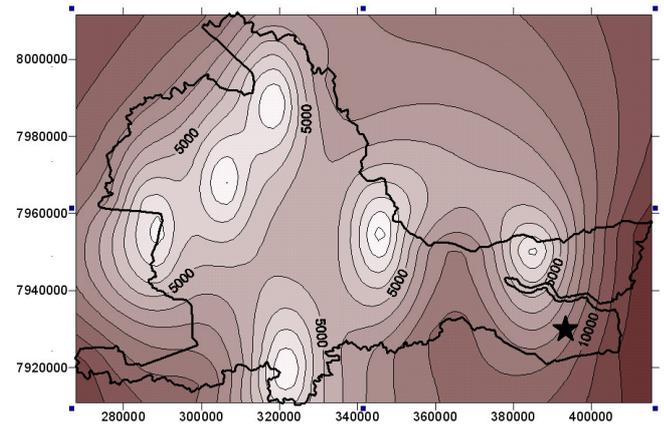


Figura 14 – Mapa de variância com localização da 2ª estação relocada..

Por último, foi avaliada a relocação da 8ª estação. O mapa de variância foi gerado através da configuração anterior, ou seja, configuração de 7 estações sendo duas delas relocadas, é mostrado a seguir.

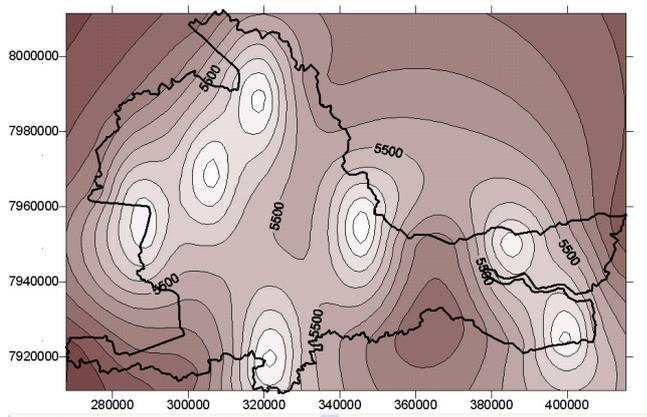


Figura 15 – Mapa de variância sobre a área(VE) gerado com 7 estações, utilizado para estimar o local da 8ª estação

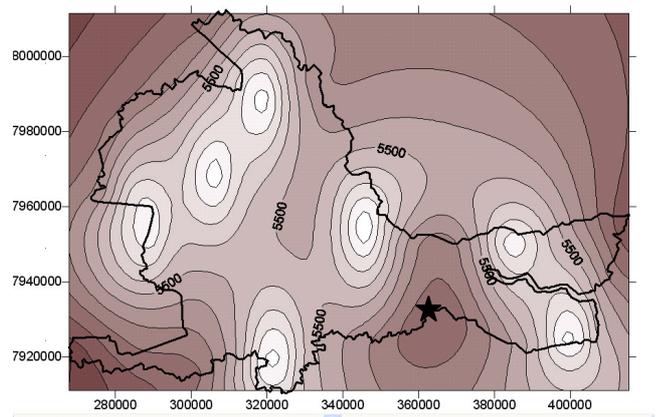


Figura 16 – Mapa de variância com localização da 3ª estação relocada.

Dessa forma, três estações foram relocadas para formar uma rede com 8 estações.

As novas redes formadas pelas configurações de 6, 7 e 8 estações são representadas a seguir pela figura 17.

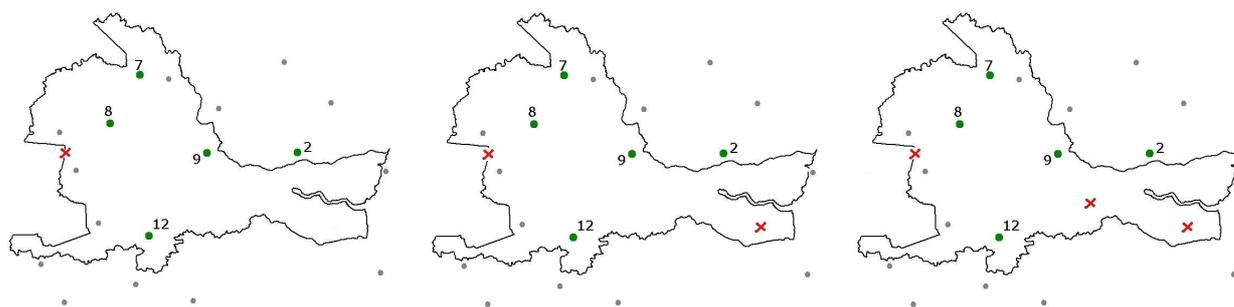


Figura 17 – Mapa da rede com as 5 estações existentes e a localização proposta para relocação da 6ª, 7ª e 8ª estações.

A tabela 14 apresenta os valores das variâncias médias sobre a área fornecidas pelas configurações ótimas da rede existente e pelas configurações da rede com estações relocadas. Os resultados mostram que é possível reduzir a variância média pela relocação de estações.

Tabela 14 – Tabela com valores de VE das configurações ótima e configuração com estações relocadas.

Configuração	VE médio sobre a área fornecido pela configuração ótima da rede existente	VE médio sobre a área fornecido pelas estações relocadas
6	483,94	476,38
7	404,26	384,25
8	353,92	327,46

5.3.2 PROCEDIMENTO PARA REDIMENSIONAMENTO DA REDE ATRAVÉS DA INSERÇÃO DE ESTAÇÕES

Uma outra situação pode ser considerada no dimensionamento de redes pluviométricas, a inserção de estações. Nem sempre as redes pluviométricas apresentam configuração capaz de fornecer as melhores estimativas de precipitação devido ao reduzido número de estações. Por isso, alguns autores sugerem a inserção de estações em determinadas redes com o objetivo de melhorar a precisão fornecida por ela.

Para testar a inserção, foi utilizada uma configuração de 5 estações da rede estudada.

Foi utilizada uma rede menor do que a original, pois o objetivo era testar se as estimativas fornecidas pela rede pouco densa seriam suficientes para se propor locais adequados de inserção.

A figura 18 mostra o mapa de variância gerado pela rede com 5 estações e as figuras 19, 20 e 21 mostram as melhores posições para inserção de uma, duas e três estações respectivamente.

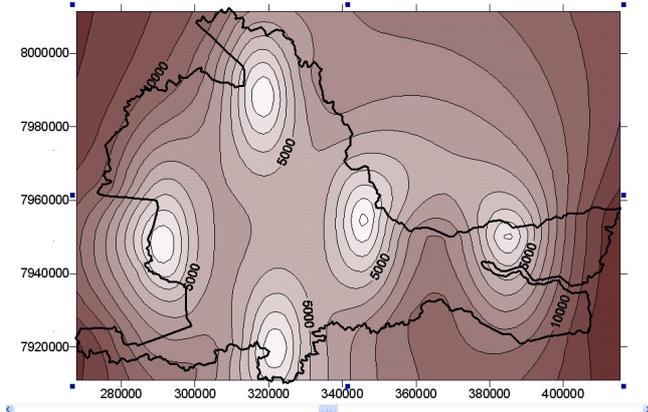


Figura 18 – Mapa de variância gerado pelas 5 estações que compõem a rede.

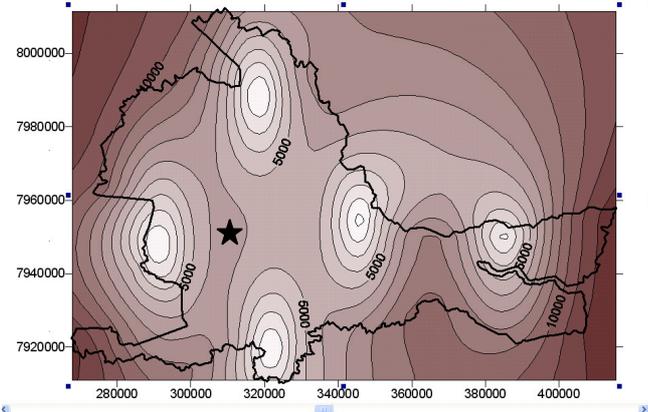


Figura 19 – Mapa de variância gerado pelas 5 estações existentes com o local de inserção da 6ª estação.

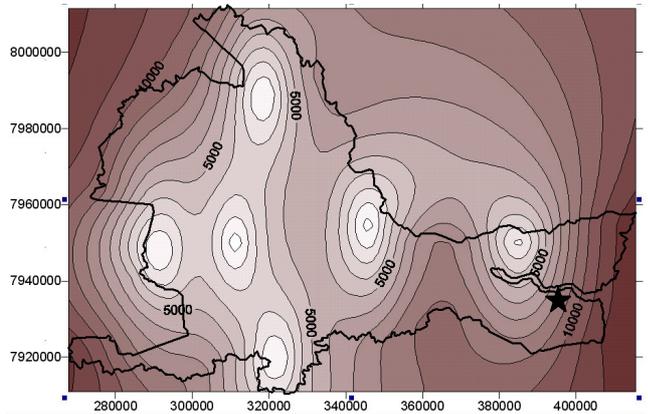


Figura 20 – Mapa de variância gerado pelas 6 estações com localização da 7ª estação

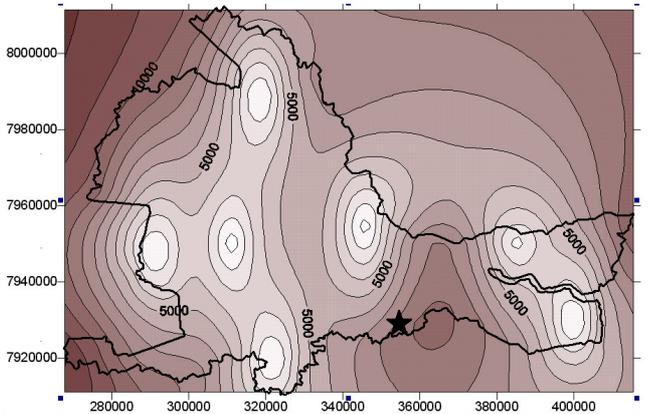


Figura 21 – Mapa de variância gerado pelas 7 estações com o local de inserção da 8ª estação.

O procedimento desenvolvido para inserção de estações foi igual ao da relocação, ou seja, após a inserção de uma estação, a nova configuração era utilizada para gerar o mapa de variância que seria utilizado para identificar novos locais de inserção.

A proposição das redes com 6, 7 e 8 estações é mostrado na figura 22.

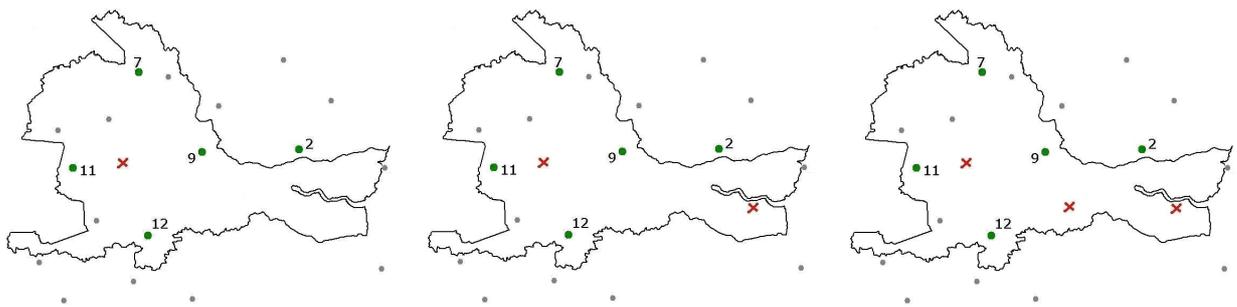


Figura 22 – Mapa da rede com as 5 estações existentes e a localização proposta para inserção da 6ª, 7ª e 8ª estações.

A tabela 15 mostra os resultados de variância média sobre a área obtidos pela rede com estações inseridas e também mostra os valores das configurações ótimas da rede estudada com 18 estações.

A comparação entre os valores mostra que mesmo a rede pouco densa pode fornecer estimativas capazes de melhorar a variância média sobre a região.

Tabela 15 – Tabela com valores de VE das configurações ótimas e configurações com estações inseridas

Configuração	VE médio sobre a área fornecido pela configuração ótima da rede existente	VE médio sobre a área fornecido pelas estações inseridas
6	483,94	474,94
7	404,26	401,64
8	353,92	332,02

*Conclusões e
Recomendações*

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As principais conclusões obtidas através do desenvolvimento desta pesquisa são apresentadas neste capítulo. E para que seja dado seguimento à mesma, foram feitas algumas sugestões e recomendações visando o adequado dimensionamento de redes pluviométricas com o propósito de auxiliar gestores ambientais e de recursos hídricos.

6.1 CONCLUSÕES

Os procedimentos para dimensionamento de redes pluviométricas, através da aplicação do método Geoestatístico, sugeridos nesta pesquisa, consideram de forma conjunta a precisão das estimativas de precipitação média sobre uma área e o custo de manutenção e operação das estações, bem como o redimensionamento da rede pela inserção ou relocação de estações. Estes procedimentos desenvolvidos foram testados através de estudo de caso, na bacia hidrográfica do rio São Mateus.

A modelagem do semivariograma foi automatizada visando proporcionar maior agilidade e precisão das estimativas de precipitação, obtidos pelo modelo que conseqüentemente interferem no resultado do dimensionamento da rede.

As conclusões conseqüentes do desenvolvimento deste trabalho são as seguintes:

- Através dos resultados da automatização para modelagem dos semivariogramas, observou-se que as diferenças encontradas entre a forma automatizada e a não automatizada, podem ser significativas, comprometendo as estimativas obtidas pelo modelo.
- O estudo simulado sobre o procedimento para dimensionamento da rede considerando a precisão da estimativa de precipitação média sobre a área e o custo de operação e manutenção das estações, se mostra importante pois, as melhores configurações em termos de precisão podem ser obtidas atendendo a um determinado custo disponível a ser aplicado na rede.

- As simulações realizadas neste trabalho, mostraram que é possível a redução da variância da estimativa média sobre uma área através do redimensionamento da rede pluviométrica pela relocação de estações.
- Observou-se que através de uma rede pouco densa pode ser possível a identificação de locais apropriados para inserção de estações de forma a melhorar a variância média sobre a área. Tal procedimento poderá ser muito útil na atual fase de implementação da política de gestão de recursos hídricos, podendo ser muito demandada por gestores.
- O presente trabalho demonstra a importância de se considerar para o dimensionamento da rede tanto a precisão da estimativa quanto o custo para manutenção e operação, pois em regiões onde os recursos financeiro são limitados tal consideração torna-se extremamente relevante.

6.2 RECOMENDAÇÕES

Algumas recomendações são feitas com a intenção de que o tema discutido, dimensionamento de redes pluviométricas, seja no futuro analisado através de novas pesquisas, visando o adequado gerenciamento de recursos hídricos e de bacias hidrográficas.

As recomendações sugeridas decorrentes do presente trabalho são as seguintes:

- Sugere-se que na análise de validação do modelo, também sejam estabelecidas restrições no ajuste do modelo, por meio de limites máximos de erro entre os valores estimados e observados.
- Sugere-se que sejam utilizadas diferentes técnicas de krigagem como a co-krigagem para incorporar à avaliação do dimensionamento de redes pluviométricas, outros fenômenos que influenciam na precipitação como, por exemplo, a altitude.
- Verificar a modelagem em uma região considerando a associação entre modelos distintos de semivariograma experimental, através da divisão desta área em regiões menores.

- Recomenda-se que sejam realizadas implementações de rotinas no REDE-GEO, visando a definição de locais mais adequados para implantação de estações, através da adição e/ou relocação e também oferecendo maior agilidade e precisão para a proposição.
- Sugere-se que sejam definidos mais períodos de análise para que as configurações sejam comparadas, objetivando a determinação daquela que atenda da melhor forma em todos os períodos analisados, podendo os períodos serem mensais ou, até mesmo, serem escolhidos com base na série histórica que esteja sendo utilizada.
- Sugere-se que sejam utilizados outros critérios de seleção do melhor modelo de semivariograma empírico, tais como, mínimos quadrados ponderados e máxima verossimilhança, conforme sugerido por Myers em 1991.
- Recomenda-se ainda o estudo espaço-temporal com o objetivo de modelagem e previsão em dados de redes pluviométricas.

*Referências
Bibliográficas*

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-ZAHRANI, M. & HUSAIN, T. *An algorithm for designing a precipitation network in the south-western region of Saudi Arabia*. Journal of Hydrology, v. 205, p. 205-216, 1998.

ASHRAF, M.; LOFTIS, C. J. & HUBBARD, K. G. *Application of geostatistics to evaluate partial weather station networks*. Agricultural and Forest Meteorology, v. 84, p. 255-271, 1997.

BACCHI, B. & KOTTEGODA, N. T. Identification and calibration of spatial correlation patterns of rainfall. Journal of Hydrology, v. 165, p. 311-348, 1995.

BÁRDOSSY, A. & BOGÁRDI, I. Network design for the spatial estimation of environmental variables. Applied Mathematics and Computation, v. 12, p. 339-365, 1983.

BASTIN, G.; LORENT, B.; DUQUÉ C. & GEVERS M.. Optimal estimation of the average areal rainfall and optimal selection of rain gauge locations. Water Resources Research, v. 20, n. 4, p. 463-470, 1984.

BOGÁRDI, I.; BÁRDOSSY, A. & DUCKSTEIN, L. Multicriterion network design using geostatistics. Water Resources Research, v. 21, n. 2, p. 199-208, 1985.

BRAS, R. L. & RODRIGUEZ-ITURBE, I. Network design for the estimation of areal mean of rainfall events. Water Resources Research, v. 12, n. 6, p. 1185-1195, 1976.

CAMARGO, E. C.G.. Geoestatística: Fundamentos e Aplicações. Geoprocessamento para Projetos Ambientais, 2ª ed., cap 5, p. 5-1 – 5-36, 1998.

COSTA, R. B. Espírito Santo: aspectos físicos. Vitória : Instituto Histórico e Geográfico do Espírito Santo, 2001.

- COUTINHO, D.L. Uso do Método Geoestatístico como ferramenta de dimensionamento de redes pluviométricas com base em dados de precipitação média total anual de longo termo. Projeto de Iniciação Científica – Departamento de Hidráulica e Saneamento, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2004.
- CRESSIE, N. Geostatistics. *The American Statistician*, v. 43, n. 4, p. 197-202, 1989.
- CRESSIE, N. *Statistics for spatial data - revised edition*. Wiley, New York, 1993.
- DAVID, M. The geostatistical estimation of porphyry-type deposits and scale factor problems. *Proc. Pribram Mining Congress*, p. 91-109, Praga, 1970.
- DELHOMME, J. P. Kriging in the Hydrosociences. *Advances in Water Resources*, v. 1, n. 5, p. 251-266, 1978.
- DIRKS, K. N. ; HAY, J.E.; STOW, C.D. & HARRIS, D.. High-resolution studies of rainfall on Norfolk island Part II: interpolation of rainfall data. *Journal of Hydrology*, v. 208, p. 187-193, 1998.
- DOWD, P. A. A review of recent developments in geostatistics. *Computers & Geosciences*, v. 17, n. 10, p. 1481-1500, 1992.
- GOOVAERTS, P. Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *Journal of Hydrology*, n. 228, p. 113-129, 2000.
- GRIMES, D. I. F.; PARDO-IGÚZQUIZA, E. & BONIFACIO, R. Optimal areal rainfall estimation using raingauges and satellite data. *Journal of Hydrology*, v. 222, p. 93-108, 1999.
- GUIMARÃES, C. E. *Geoestatística Básica e Aplicada*. Universidade Federal de Uberlândia – Faculdade de Matemática, Núcleo de Estudos Estatísticos e Biométricos. Disponível em: <<http://solos.ufmt.br/docs/geoestatistica/apgeo1.pdf>>. Acesso em : 29 de maio de 2005.
- HAJRASULIHA, S. et al. Spatial variability of soil sampling for salinity studies in southwest Iran. *Irrigation Science*, v. 1, p. 197-208, Berlin, 1980.

- HENDRICK, R. L. & COMER, G. H. Space variations of precipitation and implications for raingage network design. *Journal of Hydrology*, v. 10, p. 151-163, 1970.
- HOLAWÉ, F. & DUTTER, R. Geostatistical study of precipitation series in Austria: time and space. *Journal of Hydrology*, n. 219, p. 70-82, 1999.
- JONES, D. A.; GURNEY, R. J. & O'CONNELL, P. E. Network design using optimal estimation procedures. *Water Resources Research*, v. 15, n. 6, p. 1801-1812, 1979.
- JOURNAL, A. G. & HUIJBREGTS, C. J. *Mining Geostatistics*. London : Academic Press, 1978.
- KRIGE, D. G. A statistical approach to some basic mine evaluation problems on the witwatersrand. *J. Chem. Metall. Min. Soc. S. Afri.*, Johannesburg, v. 52, p. 151-163, 1951.
- MATHERON, G. Principles of geostatistics. *Econ. Geology*, v. 58, p. 1246-1266, 1963.
- MATHERON, G. *Les variables regionalisées et leur estimation-une application de la théorie des fonctions aleatoires aux sciences de la nature*. Paris : Masson et Cie, 1965.
- MERZ, B. & BÁRDOSSY, A. Effects of spatial variability on the rainfall runoff process in a small loess cathment. *Journal of Hydrology*, v. 212-213, p. 304-317, 1998.
- MINGOTI, S. A. & GLÓRIA, F. A. A. *PrevGeo – A geoestatística aplicada em estudos de séries temporais: uma comparação com métodos de Holt-Winters e Box e Jenkins*. *Produto & Produção*, v. 6, n. 1, p. 24-32, 2002.
- MYERS, D. E. Interpolation and estimation with spatially located data. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, v. 11, p. 209-228, 1991.
- NWA, E. U. Variability and error in rainfall over a small tropical watershed. *Journal of Hydrology*, v. 34, p. 161-169, 1977.

- O'CONNELL, P. E.; GURNEY, R.J.; JONES, D.A.; MILLER, J.B.; NICHOLASS, C.A. & SENIOR, M.R.. A case study of rationalization of a rain gage network in southwest England. *Water Resources Research*, v. 15, n. 6, p. 1813-1822, 1979.
- OLEA, R.A. Optimum mapping techniques using regionalized variable theory. *Kansas Geol. Survey*, University of Kansas, Lawrence, Kansas, 1975.
- OLEA, R.A. Measuring spatial dependence with semivariograms. *Kansas Geol. Survey*, University of Kansas, Lawrence, Kansas, 1977.
- PARDO-IGÚZQUIZA, E. Optimal selection of number and location of rainfall gauges for areal rainfall estimation using geostatistics and simulated annealing. *Journal of Hydrology*, v. 210, p. 206-220, 1998.
- PHILLIPS, D. L.; DOLPH, J. & MARKS, D. A comparison of geostatistical procedures for spatial analysis of precipitation in mountainous terrain. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 58, p. 119-141, 1992.
- POHLMANN, H. Geostatistical modeling of environmental data. *Catena*, v. 20, p. 191-198, Cremlingen, 1993.
- PRUDHOMME C. Mapping a statistic of extreme rainfall in a mountainous region. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, v. 24, n. 1-2, p. 79-84, 1999.
- RIBEIRO JR, P. J. & DIGGLE, P. J. geo-R: A package for geostatistics analysis. *R-NEWS*, v. 1, n. 2, ISSN 1609-3631, 2001.
- RODRIGUES, A. A. & SILANS, A. M. B. P. Metodologia para otimização de rede de monitoramento pluviométrico baseada na geoestatística. In: *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, 15, 2003, Curitiba, PR. Anais... Curitiba: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003, 1 CD-Rom.

SEVRUK, B. & NESPOR, V. Empirical and theoretical assessment of the wind induced error of rain measurement. *Water Science & Technology*, v. 37, n. 11, p. 171-178, 1998.

SEVRUK, B. & NEVENIC, M. The geography and topography effects on the areal pattern of precipitation in a small prealpine basin. *Water Science & Technology*, v. 37, n. 11, p. 163-170, 1998.

SHIH, S. F. Rainfall variation analysis and optimization of gauging systems. *Water Resources Research*, v. 18, n. 4, p. 1269-1277, 1982.

SORMAN, U. & BALKAN, G. An application of network design procedures for redesigning Kizilirmak river basin raingauge network, Turkey. *Hydrological Sciences Journal des Sciences Hydrologiques*, Turquia, v. 28, n. 2, p. 233-246, 1983.

SZIDAROVSKY, F. Optimal observation network in geostatistics and underground hydrology. *Applied Mathematical Modelling*, v. 7, p. 25-32, 1983.

TRARBACH, J. Aplicação do método geoestatístico para avaliação da precisão de redes pluviométricas na estimativa de precipitação média total anual e sazonal numa área. In: *Dissertação de Mestrado*, Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, UFES, 2004.

UGARTE, A. Ejemplos de modelos de estimación a corto e largo plazos. *Bol. Geostatist.*, nº 4:3-22, 1972.

UZUMAKI, E. T. Geoestatística multivariada: estudo de métodos de predição. In *Dissertação de mestrado*. Campinas (SP), UNICAMP. 1994.

VAUCLIN, M. et al. Spatial variability two transects of a bare soil. *Water Resources Research*, v. 18, n. 6, p. 1677-1686, 1982.

VIEIRA, S.R. & HATFIELD, J.L. Temporal variability of air temperature and remotely sensed surface temperature for bare soil. *International Journal of Remote Sensing*, v. 5, n. 3, p. 587-596, 1984.

VILLELA, S. M. & MATTOS, A. Hidrologia aplicada. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975.

ZIRSCHKY, J. Geostatistics for environmental monitoring and survey design. *Environmental International*, v. 11, p 515-524, 1985.

ZLATE-PODANI, I. Error of areal precipitation estimates for small dense networks and time intervals. *Atmospheric Research*, Amsterdam, v. 27, p. 55-59, 1991.

Anexo

As três tabelas a seguir, contêm os totais anuais do período de 1970 até 2000 das 18 estações utilizadas neste trabalho, os espaços marcados com x representam as falhas na série.

Nº Est	Código da Estação	PRECIPITAÇÃO TOTAL ANUAL									
		1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979
1	1839000	1411,0	1333,5	X	1268,3	1157,4	987,4	1027,4	1084,7	1545,7	1191,6
2	1840003	1249,6	1090,0	859,2	936,7	470,0	750,2	691,7	939,7	1477,1	1155,6
3	1840012	1171,8	1201,4	945,6	1037,2	1046,8	866,1	879,9	1119,1	1299,1	1469,2
4	1840017	884,5	1370,1	X	978,9	903,6	1048,3	954,9	977,4	1311,9	1269,5
5	1840004	1127,0	1502,4	1042,3	896,3	1012,4	1078,0	980,2	961,6	1173,6	1483,3
6	1840015	965,2	1441,2	960,7	989,3	967,8	957,1	802,1	1270,6	1248,6	1292,8
7	1840011	899,0	1151,4	1090,4	935,8	801,1	864,5	823,0	1259,8	1210,3	1184,6
8	1840013	1239,2	1445,5	903,0	1172,1	1111,0	1357,9	805,6	1264,4	1627,2	1490,0
9	1840016	770,7	1260,2	X	1015,9	980,1	1214,3	920,2	1151,9	1713,5	1409,0
10	1841010	1026,8	996,3	848,8	952,5	1192,6	934,4	908,7	1249,8	1541,3	1802,2
11	1840007	1209,6	1199,6	1048,2	1000,1	1131,6	714,2	972,3	859,0	1369,2	1282,0
12	1840010	1437,8	1179,8	1047,0	687,6	842,4	1170,2	1072,6	712,8	1322,0	1290,9
13	1839001	1457,9	2197,1	840,9	1179,9	942,9	1183,1	895,4	1036,3	1175,6	440,4
14	1841009	865,0	993,5	730,2	853,1	856,4	771,8	886,4	712,3	686,4	1087,5
15	1941012	988,7	1029,9	1102,4	1040,4	1368,5	1040,9	833,7	602,7	237,7	1081,4
16	1840000	1813,3	1292,4	1144,4	1087,3	1211,2	1484,8	1427,4	949,3	1477,7	1569,1
17	1940016	1074,4	965,4	1171,3	1113,3	953,1	1108,9	1202,2	1228,4	1310,8	1503,8
18	1839006	X	1349,2	492,4	1280,8	1170,6	1212,8	1382,4	1318,7	1494,8	1731,4

Nº Est	Código da Estação	PRECIPITAÇÃO TOTAL ANUAL									
		1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989
1	1839000	1237,5	1411,1	1065,0	1060,8	754,2	1108,2	562,4	795,1	867,7	639,5
2	1840003	1046,6	1301,2	1107,1	1072,2	1041,8	1563,2	785,7	1014,2	826,5	1038,3
3	1840012	1208,2	1315,9	773,7	1348,2	984,8	1444,4	1102,1	949,8	643,7	1032,7
4	1840017	1288,9	1142,0	937,0	1189,3	1416,0	1789,6	829,4	507,6	840,0	X
5	1840004	1341,9	1462,7	1067,3	1626,4	679,2	1503,6	840,0	569,4	798,0	X
6	1840015	1106,2	1422,4	1156,2	1403,4	1288,3	1156,5	874,2	778,6	936,9	1018,4
7	1840011	959,0	1365,3	875,2	1321,7	1008,8	1501,8	819,2	754,0	775,2	956,0
8	1840013	1520,7	1759,5	1157,7	1551,1	950,0	1287,6	652,7	1116,1	811,0	1120,2
9	1840016	722,6	577,8	909,0	909,0	806,9	1344,3	742,5	748,6	837,0	1006,8
10	1841010	1321,3	1674,6	1255,2	1464,1	900,1	1440,3	976,6	1032,8	877,0	1162,4
11	1840007	1307,2	1735,2	1078,2	1422,0	1112,4	1402,2	981,5	1133,0	1024,2	1188,0
12	1840010	1599,9	1401,4	1022,0	1773,2	1282,0	1447,8	858,1	1131,4	612,2	955,8
13	1839001	490,0	697,7	X	X	X	318,5	X	440,2	665,7	960,7
14	1841009	762,8	1244,7	686,7	1176,4	1142,6	1349,7	667,1	1053,0	1030,2	888,3
15	1941012	1160,7	1413,5	878,8	1565,8	839,9	1226,0	838,2	948,8	402,3	255,2
16	1840000	1785,4	1675,9	1156,8	1919,2	1254,2	1474,7	815,7	1113,1	1236,5	1207,4
17	1940016	1509,5	1513,8	1125,1	1515,0	991,0	1467,7	706,4	845,8	1042,9	X
18	1839006	1418,0	1855,0	1478,5	1581,3	917,3	1094,7	785,6	287,6	1261,3	1236,5

Nº Est	Código da Estação	PRECIPITAÇÃO TOTAL ANUAL										
		1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
1	1839000	836,8	561,4	1168,0	660,1	1089,6	440,8	387,6	696,5	476,8	579,5	1631,9
2	1840003	836,8	1371,3	2115,0	918,9	1089,6	930,5	845,0	799,8	739,3	1177,8	1470,9
3	1840012	951,5	1508,0	1562,7	866,0	981,6	821,1	538,4	786,0	820,6	1055,5	1590,4
4	1840017	866,5	1501,3	1742,6	818,2	994,8	838,4	731,1	848,1	769,0	1089,3	1337,6
5	1840004	680,5	1405,5	1958,4	906,8	958,5	1190,8	680,8	906,9	586,5	967,6	1264,1
6	1840015	851,2	1252,6	1696,6	786,0	838,1	895,5	757,0	1098,0	680,3	968,6	1174,2
7	1840011	975,0	1606,4	1786,5	732,4	727,6	1111,7	819,2	1196,7	704,9	1115,8	1104,9
8	1840013	871,8	1630,5	2368,9	1054,3	995,0	1119,1	943,7	1311,2	888,2	1217,1	1544,6
9	1840016	876,6	1052,9	1762,6	891,4	1103,0	949,6	847,9	974,7	727,7	571,4	1394,0
10	1841010	636,4	1493,1	2229,1	784,4	1029,1	1046,3	845,9	1025,6	767,1	1177,0	1200,9
11	1840007	896,3	1855,9	1794,9	1091,8	1175,1	1265,2	905,1	684,6	639,1	992,8	1351,9
12	1840010	933,9	1371,2	2010,6	837,6	762,0	1082,0	868,7	1026,4	852,0	1224,1	1286,7
13	1839001	701,2	889,7	2116,4	889,4	1013,5	1125,7	1074,6	909,5	844,3	1209,7	1879,5
14	1841009	798,9	807,7	1072,3	696,2	765,2	1099,8	857,0	1159,3	613,0	916,3	927,8
15	1941012	271,8	415,3	622,5	592,4	768,2	954,2	959,4	666,4	706,2	883,2	1178,8
16	1840000	854,8	1769,6	1632,8	#####	814,0	1201,4	1205,8	1173,4	624,8	1154,7	1357,5
17	1940016	1051,0	1386,9	1663,8	712,4	748,4	1292,7	979,2	918,8	827,2	1145,7	1390,5
18	1839006	383,0	612,9	916,8	407,9	394,0	1292,7	979,2	816,0	827,2	1145,7	1381,7

As três tabelas a seguir, contêm os totais anuais do período de 1970 até 2000 das 18 estações utilizadas neste trabalho, com o preenchimento das falhas na série.

Nº Est	Código da Estação	PRECIPITAÇÃO TOTAL ANUAL									
		1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979
1	1839000	1411,00	1333,50	892,50	1268,30	1157,40	987,40	1027,40	1084,70	1545,70	1191,60
2	1840003	1249,60	1090,00	859,20	936,70	470,00	750,20	691,70	939,70	1477,10	1155,60
3	1840012	1171,80	1201,40	945,60	1037,20	1046,80	866,10	879,90	1119,10	1299,10	1469,20
4	1840017	884,50	1370,10	946,20	978,90	903,60	1048,30	954,90	977,40	1311,90	1269,50
5	1840004	1127,00	1502,40	1042,30	896,30	1012,40	1078,00	980,20	961,60	1173,60	1483,30
6	1840015	965,20	1441,20	960,70	989,30	967,80	957,10	802,10	1270,60	1248,60	1292,80
7	1840011	899,00	1151,40	1090,40	935,80	801,10	864,50	823,00	1259,80	1210,30	1184,60
8	1840013	1239,20	1445,50	903,00	1172,10	1111,00	1357,90	805,60	1264,40	1627,20	1490,00
9	1840016	770,70	1260,20	959,70	1015,90	980,10	1214,30	920,20	1151,90	1713,50	1409,00
10	1841010	1026,80	996,30	848,80	952,50	1192,60	934,40	908,70	1249,80	1541,30	1802,20
11	1840007	1209,60	1199,60	1048,20	1000,10	1131,60	714,20	972,30	859,00	1369,20	1282,00
12	1840010	1437,80	1179,80	1047,00	687,60	842,40	1170,20	1072,60	712,80	1322,00	1290,90
13	1839001	1457,90	2197,10	840,90	1179,90	942,90	1183,10	895,40	1036,30	1175,60	440,40
14	1841009	865,00	993,50	730,20	853,10	856,40	771,80	886,40	712,30	686,40	1087,50
15	1941012	988,70	1029,90	1102,40	1040,40	1368,50	1040,90	833,70	602,70	237,70	1081,40
16	1840000	1813,30	1292,40	1144,40	1087,30	1211,20	1484,80	1427,40	949,30	1477,70	1569,10
17	1940016	1074,40	965,40	1171,30	1113,30	953,10	1108,90	1202,20	1228,40	1310,80	1503,80
18	1839006	1265,50	1349,20	492,40	1280,80	1170,60	1212,80	1382,40	1318,70	1494,80	1731,40

Nº Est	Código da Estação	PRECIPITAÇÃO TOTAL ANUAL									
		1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989
1	1839000	1237,50	1411,10	1065,00	1060,80	754,20	1108,20	562,40	795,10	867,70	639,50
2	1840003	1046,60	1301,20	1107,10	1072,20	1041,80	1563,20	785,70	1014,20	826,50	1038,30
3	1840012	1208,20	1315,90	773,70	1348,20	984,80	1444,40	1102,10	949,80	643,70	1032,70
4	1840017	1288,90	1142,00	937,00	1189,30	1416,00	1789,60	829,40	507,60	840,00	1015,40
5	1840004	1341,90	1462,70	1067,30	1626,40	679,20	1503,60	840,00	569,40	798,00	1011,00
6	1840015	1106,20	1422,40	1156,20	1403,40	1288,30	1156,50	874,20	778,60	936,90	1018,40
7	1840011	959,00	1365,30	875,20	1321,70	1008,80	1501,80	819,20	754,00	775,20	956,00
8	1840013	1520,70	1759,50	1157,70	1551,10	950,00	1287,60	652,70	1116,10	811,00	1120,20
9	1840016	722,60	577,80	909,00	909,00	806,90	1344,30	742,50	748,60	837,00	1006,80
10	1841010	1321,30	1674,60	1255,20	1464,10	900,10	1440,30	976,60	1032,80	877,00	1162,40
11	1840007	1307,20	1735,20	1078,20	1422,00	1112,40	1402,20	981,50	1133,00	1024,20	1188,00
12	1840010	1599,90	1401,40	1022,00	1773,20	1282,00	1447,80	858,10	1131,40	612,20	955,80
13	1839001	490,00	697,70	1254,80	1304,60	1021,70	318,50	797,50	440,20	665,70	960,70
14	1841009	762,80	1244,70	686,70	1176,40	1142,60	1349,70	667,10	1053,00	1030,20	888,30
15	1941012	1160,70	1413,50	878,80	1565,80	839,90	1226,00	838,20	948,80	402,30	255,20
16	1840000	1785,40	1675,90	1156,80	1919,20	1254,20	1474,70	815,70	1113,10	1236,50	1207,40
17	1940016	1509,50	1513,80	1125,10	1515,00	991,00	1467,70	706,40	845,80	1042,90	1073,90
18	1839006	1418,00	1855,00	1478,50	1581,30	917,30	1094,70	785,60	287,60	1261,30	1236,50

Nº Est	Código da Estação	PRECIPITAÇÃO TOTAL ANUAL										
		1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
1	1839000	854,50	561,40	1168,00	660,10	1049,50	440,80	387,60	696,50	476,80	579,50	1631,90
2	1840003	836,80	1371,30	2115,00	918,90	1089,60	930,50	845,00	799,80	739,30	1177,80	1470,90
3	1840012	951,50	1508,00	1562,70	866,00	981,60	821,10	538,40	786,00	820,60	1055,50	1590,40
4	1840017	866,50	1501,30	1742,60	818,20	994,80	838,40	731,10	848,10	769,00	1089,30	1337,60
5	1840004	680,50	1405,50	1958,40	906,80	958,50	1190,80	680,80	906,90	586,50	967,60	1264,10
6	1840015	851,20	1252,60	1696,60	786,00	838,10	895,50	757,00	1098,00	680,30	968,60	1174,20
7	1840011	975,00	1606,40	1786,50	732,40	727,60	1111,70	819,20	1196,70	704,90	1115,80	1104,90
8	1840013	871,80	1630,50	2368,90	1054,30	995,00	1119,10	943,70	1311,20	888,20	1217,10	1544,60
9	1840016	876,60	1052,90	1762,60	891,40	1103,00	949,60	847,90	974,70	727,70	571,40	1394,00
10	1841010	636,40	1493,10	2229,10	784,40	1029,10	1046,30	845,90	1025,60	767,10	1177,00	1200,90
11	1840007	896,30	1855,90	1794,90	1091,80	1175,10	1265,20	905,10	684,60	639,10	992,80	1351,90
12	1840010	933,90	1371,20	2010,60	837,60	762,00	1082,00	868,70	1026,40	852,00	1224,10	1286,70
13	1839001	701,20	889,70	2116,40	889,40	1013,50	1125,70	1074,60	909,50	844,30	1209,70	1879,50
14	1841009	798,90	807,70	1072,30	696,20	765,20	1099,80	857,00	1159,30	613,00	916,30	927,80
15	1941012	271,80	415,30	622,50	592,40	768,20	954,20	959,40	666,40	706,20	883,20	1178,80
16	1840000	854,80	1769,60	1632,80	690,40	814,00	1201,40	1205,80	1173,40	624,80	1154,70	1357,50
17	1940016	1051,00	1386,90	1663,80	712,40	748,40	1292,70	979,20	918,80	827,20	1145,70	1390,51
18	1839006	383,00	612,90	916,80	407,90	394,00	1195,90	1167,90	816,00	734,60	1176,50	1381,70

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)