

# Geração do mapa de potencial à locação de estações na bacia do rio São Francisco como um produto estratégico de apoio às ações de planejamento de redes fluviométricas, através do uso de SIG e do classificador neural supervisionado

Wougran Soares Galvão<sup>1</sup>  
Paulo Roberto Meneses<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL  
SGAN Quadra 603 / Módulos I e J - 70830-030 - Brasília - DF, Brasil  
wougran@aneel.gov.br

<sup>2</sup> Instituto de Geociências - UnB  
Caixa Postal 04457 – 70919-970 - Brasília - DF, Brasil  
pmeneses@unb.br

**Abstract.** In this study, the proposed methodology was based on the integrated analysis of a set of geo-referenced geo-environment variables and neural network technique for spatial inference. The Geographic Information System (GIS) was used to obtain model for potential location of fluviometric stations that provided the basis for planning and management of fluviometric networks in the São Francisco river basin.

**Palavras-chave:** neural network, geographic information system, streamgaging network, maps of potential location, redes neurais, sistema de informação geográfica, rede fluviométrica, mapas de potencial à locação.

## 1. Introdução

A hidrometria é a parte da hidrologia ligada a medida das variáveis hidrológicas, e tem como objetivo obter dados básicos, tais como precipitações, níveis de água, vazões, entre outros, e a sua variação no tempo e no espaço (Santos et al., 2001).

Em função da variação espacial considerável das variáveis hidrológicas a serem medidas, necessita-se, para caracterizar uma bacia hidrográfica, de várias estações distribuídas sobre a sua superfície, o que leva ao conceito de redes de monitoramento, ou seja, um conjunto de estações pluviométricas, fluviométricas, sedimentométricas e meteorológicas distribuídas sobre uma determinada região.

Uma rede de dados hidrológicos constitui um conjunto de atividades de coleta e processamento de dados, que segue uma planificação anteriormente definida e visa atender a um objetivo específico ou a um conjunto de objetivos compatíveis entre si. Frequentemente, os objetivos associam-se a uma forma particular de utilização dos recursos hidrológicos, sendo que esta definição antecede à efetivação da coleta dos dados.

A determinação do número e a localização de estações de medição de precipitação ou outra variável hidrometeorológica é um problema que surge frequentemente em programas hidrometeorológicos. A densidade e distribuição de estações em uma rede e a frequência de observação necessária dependem da variabilidade temporal e espacial das variáveis meteorológicas ou hidrológicas a serem observadas. A função de uma rede de monitoramento é proporcionar uma densidade e uma distribuição de estações em uma região de modo que, por interpolação entre as séries de dados das diferentes estações, seja possível determinar, com suficiente precisão, as características básicas das grandezas hidrológicas ou meteorológicas em qualquer local da região (Santos et al., 2001).

Segundo dados da Organização Meteorológica Mundial (OMM, 1992) a maioria das redes hidrométricas dos países foram criadas em função das necessidades nacionais e, na

maior parte das vezes, em função de problemas muito particulares. Ela também relata a existência, a nível mundial, de uma documentação abundante sobre o planejamento de redes, todavia, muitos dos aspectos desse planejamento apresentam-se pouco claros, com ausência de exemplos práticos de aplicação real, ausência da definição clara dos objetivos a serem atingidos ou dos critérios que devem ser aplicados, ausência de embasamento técnico, etc. No Brasil, a documentação sobre o planejamento e histórico da evolução da rede hidrométrica nacional é relativamente escassa, refletindo ausência de informações e falta de clareza sobre especificidades desta rede.

A OMM (1965) publicou um Guia de Práticas Hidrometeorológicas, onde foram facilitadas algumas normas relativas ao número de estações (de vários tipos) necessárias para constituir uma rede mínima inicial. Este documento destaca que as redes menos densas do que aquelas ali recomendadas como “mínimas” são, por definição, inadequadas; ainda que, como relatado no guia, não se deva considerar que tais normas sozinhas permitam planificar uma rede eficaz.

Durante as últimas décadas foram produzidas importantes mudanças na forma em que a informação para a representação do ciclo hidrológico em modelos matemáticos é adquirida, armazenada, processada e visualizada. Avanços em sistemas de sensores remotos (particularmente sensores em plataformas orbitais), hardware e software, digitalização e sistemas de armazenamento e distribuição da informação, como os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), permitem ao hidrólogo a adoção de novas formas de representar o ciclo hidrológico e modelar o fluxo de água e sedimentos.

Diante da complexidade e da subjetividade do processo de planejamento de redes hidrométricas torna-se cada vez mais necessária uma análise científica do problema. O presente estudo fará uma abordagem do planejamento de uma rede de estações fluviométricas, procurando solucionar uma das cinco questões mais cruciais no planejamento de uma rede hidrométrica: ONDE SE DEVE OBSERVAR OU LOCAR UMA ESTAÇÃO NUMA BACIA HIDROGRÁFICA?

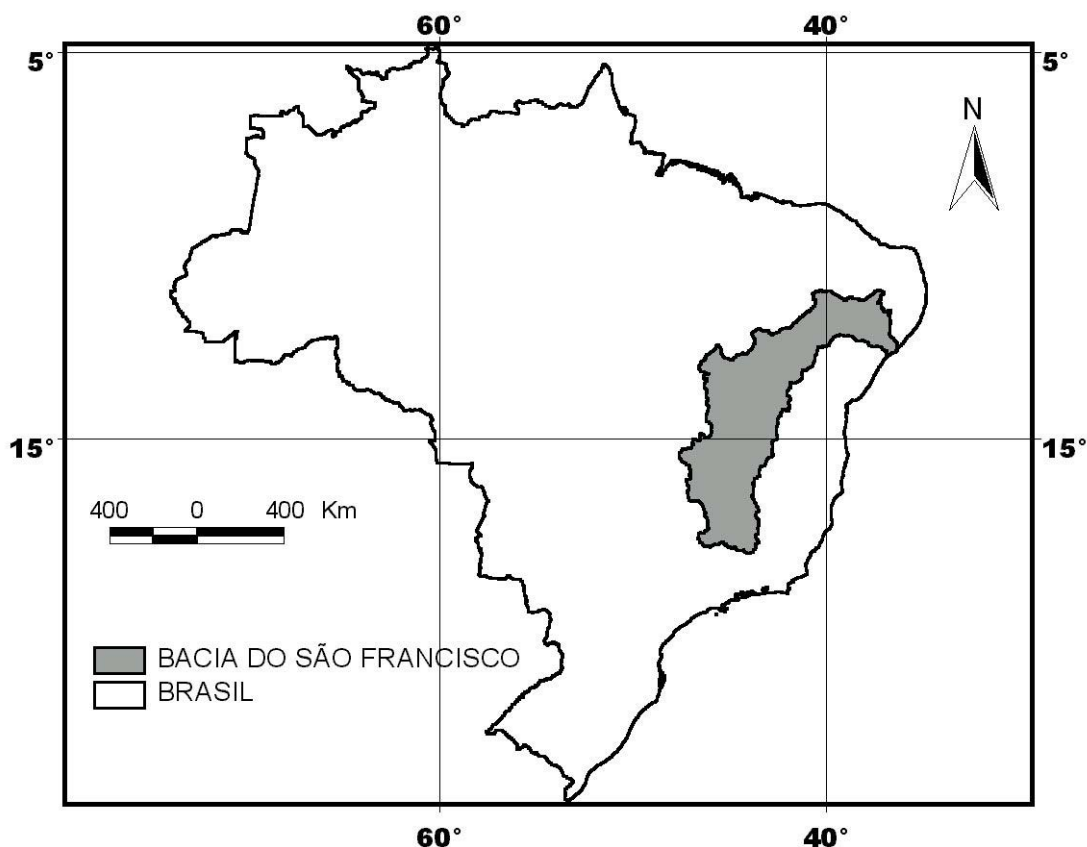
Dada a relevância e atualidade do tema, o objetivo deste trabalho é apresentar um modelo de potencial à locação de estações fluviométricas na bacia do rio São Francisco, gerado a partir da aplicação da técnica estatística de inferência espacial de classificação neural supervisionada, tomando como base a integração de variáveis geoambientais em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG).

## 2. Área de Estudo

O estudo foi realizado na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (**Figura 1**), na escala base de 1:1.000.000 (IBGE, 2003), em função de seu potencial de geração de energia hidrelétrica, pela extensão do rio, pela variedade fisiográfica apresentada pela bacia, pela quantidade de municípios (503) inseridos na bacia e pela existência e disponibilidade de bases cartográficas e temáticas, digitais e georreferenciadas, geradas pela CODEVASF (2003).

O Vale do São Francisco possui uma área de drenagem da ordem de 640.000 Km<sup>2</sup>, abrangendo os Estados de Minas Gerais, Bahia, Goiás, Pernambuco, Sergipe, Alagoas e Distrito Federal, onde aproximadamente 53,8% de sua área (343.784 Km<sup>2</sup>) encontra-se incluída no Polígono das Secas.

O vale é subdividido, fisiograficamente, em quatro regiões principais: Alto (com altitude de 600 a 1.600 m e temperatura média anual de 18 °C), Médio (com altitude de 500 a 1.000 m e temperatura média anual de 27 °C), Submédio (com altitude de 200 a 500 m e temperatura média anual de 27 °C) e Baixo São Francisco (com altitudes que variam de 200 m até o nível do mar e temperatura média anual de 25 °C).



**Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo.**

A Bacia do Rio São Francisco possui 210 estações fluviométricas em operação administradas pela ANA e 255 administradas por outras entidades, segundo dados de inventário do Sistema HIDRO (ANA, 2003).

### **3. Metodologia**

Considera-se, para fins deste estudo, a execução das seguintes atividades realizadas seqüencialmente:

#### **3.1 Identificação e seleção de variáveis geoambientais associadas ao processo de locação de estações fluviométricas.**

O termo “variável geoambiental” foi empregado no presente estudo para caracterizar um dado de natureza fisiográfica, hidrológica, meteorológica e sócio-econômica. Há entre os planejadores de redes divergências na identificação e seleção de variáveis geoambientais prioritárias ao processo de configuração e desenho das mesmas, bem como das técnicas empregadas para a concepção, em função da criação da maioria das redes para atendimento de necessidades nacionais.

A partir da revisão bibliográfica efetuada por Galvão (2004) sobre o planejamento de redes hidrometeorológicas, e a investigação da correlação entre a distribuição espacial da rede fluviométrica e as variáveis geoambientais levantadas, foram selecionadas com base em pesos estatísticos as variáveis mais diretamente relacionadas com o processo de locação de estações fluviométricas na bacia do rio São Francisco.

#### **3.2 Geração da base de dados georreferenciados**

Foi realizada mediante a escanização, georreferenciamento e vetorização de mapas analógicos disponíveis, através da utilização do Sistema de Informações Geográficas

ArcView 3.2. Mapas digitais já existentes foram editados e ajustados para a área de estudo. No presente trabalho, para a integração de variáveis geoambientais, foi utilizado como instrumento de apoio ao planejamento de redes hidrométricas o Sistema de Informações Geográficas (SIG) ArcView 3.2, com vistas à geração de uma base de dados georreferenciados para a Bacia do Rio São Francisco.

### **3.3 Aplicação e avaliação da técnica de inferência espacial para a geração do Modelo de Potencial à Locação de Estações Fluviométricas.**

A técnica de inferência espacial “Classificador Neural Supervisionado – Função de Base Radial (RBF)” foi aplicada ao conjunto de variáveis geoambientais selecionadas como potencialmente preditivas ao processo de locação de estações, visando a geração do mapa de potencial à locação de estações fluviométricas. A aplicação de tal técnica foi conduzida no ambiente do Sistema de Informações Geográficas ArcView 3.2, contando com um conjunto de amostras para treinamento representado pelas 210 estações fluviométricas da ANA em operação na bacia do rio São Francisco. A aplicação desta técnica gerou um mapa de potencial à locação de estações fluviométricas. Seguindo os procedimentos adotados por Kemp et al. (2002), os valores de potencial à locação gerados pelo modelo neural foram reclassificados para sete classes (1 = potencial mínimo; 7 = potencial máximo) com base no critério de quebra natural (“natural breaks”), o qual procura por agrupamentos e padrões inerentes nos dados. As feições do mapa são divididas em classes onde os limites das mesmas são estabelecidos onde há relativamente grandes saltos nos valores observados. A seguir, processou-se a avaliação individual do mapa de potencial à locação de estações fluviométricas, resultante da aplicação do modelo de predição espacial proposto, realizada com base na localização geográfica de cada estação fluviométrica com relação às sete classes de potencial à locação definidas no respectivo modelo.

### **3.4 Validação do modelo de potencial à locação de estações fluviométricas**

Para fins de validação do mapa de potencial à locação de estações fluviométricas gerado, foi conduzida uma bateria de testes aplicados na própria bacia do rio São Francisco:

- Com base em um subconjunto de 80% das amostras de treinamento;
- Com base na distribuição espacial da rede fluviométrica ativa de outras entidades;
- Com base na distribuição espacial da rede fluviométrica ativa associada a Resolução ANEEL nº 396/1998;
- Com base na geração e comparação de modelos empregando todas as estações fluviométricas ativas pertencentes a ANA, instaladas nas 10 sub-bacias hidrográficas da bacia do rio São Francisco e, a partir de subconjuntos de estações fluviométricas ativas da ANA instaladas em 9 delas, com a exclusão das estações instaladas na décima bacia, segundo a classificação de bacias hidrográficas do DNAEE/ANEEL.

## **4. Resultados e Discussão**

Com base nos resultados obtidos por Galvão (2004), treze variáveis (**Tabela 1**) geoambientais apresentaram-se potencialmente preditivas ao processo de locação de estações fluviométricas na bacia do rio São Francisco, a partir dos valores de contraste dos pesos de evidência encontrados para as mesmas.

**Tabela 1 –Variáveis geoambientais preditivas ao processo de locação de estações fluviométricas na bacia do rio São Francisco.**

VARIAVEL GEOAMBIENTAL
HIDROGRAFIA
SEDES MUNICIPAIS
MUNICÍPIOS - ÁREA
GEOLOGIA
RODOVIAS
IDH-M
OTTOBACIAS-PERIMETRO
SOLOS
DENSIDADE DE FRATURAS
HIDROGEOLOGIA
DENSIDADE DEMOGRÁFICA
MODELO NUMÉRICO DE TERRENO
DENSIDADE DE DRENAGEM

A **Figura 2** apresenta o mapa de potencial à locação de estações fluviométricas resultante da aplicação do modelo de classificação neural supervisionada – função de base radial ao conjunto de treze variáveis geoambientais selecionado (**Tabela 1**).

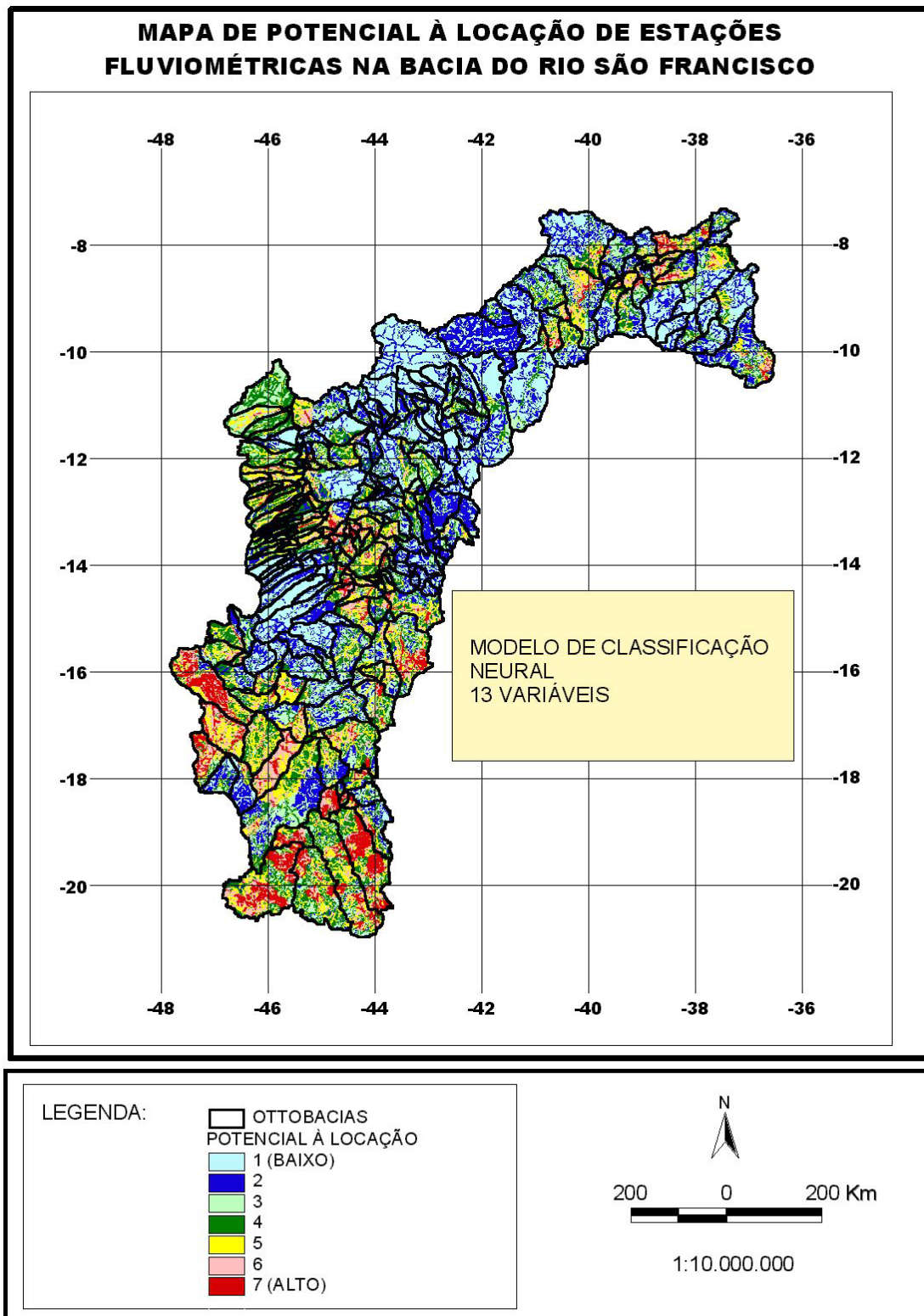
O Modelo de Classificação Neural Supervisionada foi eficiente para representar 162 das 210 estações fluviométricas na classe de potencial à locação “7”, e 206 das 210 estações encontram-se posicionadas espacialmente entre as classes de potencial à locação “5”, “6” e “7”.

A distribuição de 215 das 255 estações fluviométricas de outras entidades de operação de redes, que não fizeram parte do conjunto de amostras de treinamento fornecido ao classificador neural supervisionado, entre as classes de potencial “4” a “7”, atesta a boa performance do Modelo de Classificação Neural Supervisionada - Função de Base Radial (RBF) gerado no presente estudo.

A distribuição de 76 das 82 estações fluviométricas associadas a Resolução ANEEL Nº 396/1998, as quais não fizeram parte do conjunto de amostras de treinamento, entre as classes de potencial “4” a “7”, atesta também a boa performance do Modelo de Classificação Neural Supervisionada - Função de Base Radial (RBF) gerado.

A **Tabela 2** apresenta os resultados da comparação entre os Modelos de Classificação Neural Supervisionada gerados a partir de estações de treinamento distribuídas espacialmente nas 10 sub-bacias e em 9 sub-bacias, segundo a Classificação do DNAEE/ANEEL, através dos cálculos do coeficiente de correlação de Spearman (1904). O ótimo grau de convergência encontrado entre os 10 modelos comparados, conforme estabelecido pelos coeficientes de correlação de Spearman encontrados, atesta a boa performance do Modelo de Classificação Neural Supervisionada - Função de Base Radial (RBF) desenvolvido no presente estudo. Tais resultados evidenciaram que o modelo de potencial à locação de estações fluviométricas gerado não foi dependente dos dados utilizados como amostras de treinamento.

A rede neural de função de base radial, do tipo não linear, com camadas alimentadas adiante, não-lineares, e constituída por três camadas (entrada, intermediária, saída), mostrou-se como uma poderosa ferramenta para ser empregada para realizar uma tarefa complexa de classificação de padrões dispostos não linearmente em um espaço de grande dimensão.



**Figura 2 – Mapa de potencial à locação de estações fluviométricas, resultante da aplicação da técnica estatística de inferência espacial “Classificador Neural” – função de base radial ao conjunto de 13 variáveis geoambientais selecionadas.**

**Tabela 2 – Comparação entre os Modelos de Classificação Neural Supervisionada gerados a partir de estações fluviométricas de treinamento distribuídas espacialmente nas 10 sub-bacias e em 9 sub-bacias do São Francisco, segundo a Classificação do DNAEE/ANEEL.**

MODELO DE CLASSIFICAÇÃO NEURAL CONJUNTO DE 10 SUB-BACIAS		MODELO DE CLASSIFICAÇÃO NEURAL CONJUNTO DE 9 SUB-BACIAS		COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO SPEARMANN
BACIA	Nº EST. DE TREIN.	BACIA EXCLUÍDA	Nº EST. DE TREIN.	
4	210	40	176	0,862
4	210	41	186	0,982
4	210	42	177	0,981
4	210	43	201	0,913
4	210	44	191	0,863
4	210	45	189	0,94
4	210	46	178	0,921
4	210	47	203	0,97
4	210	48	190	0,962
4	210	49	199	0,965

Muitos alertas da necessidade de um planejamento racional e eficiente da rede hidrometeorológica nacional têm sido cada vez mais registrados. Hora et al. (2001) alertaram que é uma constante a preocupação com a implantação de um projeto de monitoramento eficaz, sustentável e de longa duração, que permita um conhecimento técnico profundo das sazonalidades hidrológicas, dos principais usos da água, e dos locais considerados estratégicos para controle/emissão de alertas, quando da ocorrência de eventos extremos, pois o crescimento populacional e industrial tem aumentado a demanda por água e conseqüentemente o recurso hídrico poderá vir a esgotar a sua capacidade de recuperação em termos de quantidade e qualidade. Enquanto que, Soares e Porto (2003), relatam que no caso do Brasil, onde as dificuldades de implantação e gerenciamento de uma rede de monitoramento hidrológico podem ser agravadas pelas suas dimensões continentais ou pela escassez de recursos financeiros para implantação, operação e manutenção, uma metodologia segura de projeto de desenho de redes para bacias hidrográficas com poucos dados, sejam eles fisiográficos, geológicos ou de qualidade da água, bem como uma metodologia para o redimensionamento da rede de monitoramento, torna-se a cada dia mais importante.

A ausência de um planejamento com base na análise científica do problema acarreta o desperdício dos recursos humanos, financeiros (custo anual estimado em R\$ 65.000,00 por estação, ao longo de dez anos de coleta de dados) e logísticos associados ao planejamento e gerenciamento de redes fluviométricas, produzindo um número elevado de locações de estações nas sub-bacias hidrográficas, e a posterior desativação das mesmas por motivos de locação geográfica inadequada, além da geração de dados redundantes e perda da oportunidade de se aumentar o conhecimento do comportamento hidrológico das vazões dos rios nos diferentes trechos da bacia hidrográfica.

## 5. Conclusões

O Modelo gerado pela aplicação da técnica de Classificação Neural Supervisionada - Função de Base Radial (RBF) ao conjunto das 8 variáveis geoambientais (hidrografia, sedes municipais, municípios-área, geologia, rodovias, IDH-M, ottobacias-perímetro e solos), mostrou-se eficiente para a geração do mapa de potencial à locação de estações fluviométricas na bacia do rio São Francisco, com base nos resultados obtidos a partir dos testes de validação do modelo. Este mapa gerado mostrou-se um produto cartográfico de grande potencial para apoiar as ações de planejamento e gerenciamento de redes hidrometeorológicas, por

identificar nas sub-bacias os locais mais potencialmente favoráveis à locação de estações fluviométricas.

Um planejamento eficiente e integrado, para todo o país, de uma rede hidrometeorológica nacional exige cada vez mais um embasamento científico para a concepção do mesmo. A metodologia desenvolvida no presente trabalho para o planejamento de redes fluviométricas, através da utilização de Sistemas de Informações Geográficas integrados a ferramentas de geoestatística, pode ser vista como uma contribuição ao processo de aperfeiçoamento das técnicas de planejamento e gerenciamento de redes.

A metodologia desenvolvida no presente trabalho deverá ser testada e avaliada em outras grandes bacias hidrográficas brasileira, para confirmar a técnica estatística de inferência espacial por Classificação Neural Supervisionada – Função de Base Radial como uma poderosa ferramenta para a geração de modelos de predição à locação de estações fluviométricas, bem como validar o papel das variáveis geoambientais selecionadas como preditivas ao processo de locação.

## Referências

- ANA. Agência Nacional de Águas. **Relatório Estatístico da Rede Básica Hidrometeorológica Nacional**. Agência Nacional de Águas, Superintendência de Informações Hidrológicas – SIH, Brasília, ANA, Março, 2003, 20 p.
- CODEVASF. COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO DO VALE DO SÃO FRANCISCO. **Base de Dados Digitais Georreferenciados da Bacia do São Francisco**. Brasília, CODEVASF, Área de Planejamento, Coordenadoria de Projetos Especiais, Supervisão de Geoprocessamento. Documento publicado em CD-ROM, 2003.
- Galvão, W. S. **Uso de SIG na geração de modelos de potencial à locação de estações fluviométricas e de regiões geoambientais homogêneas na bacia do rio São Francisco**. 2004. 302. p. Tese (Doutorado em Geologia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2004.
- Hora, M. A. G. M.; Carneiro, P. R. F.; Lyra, F. J.; Pelizari, C. S.; Thomas, P. T. In: IV Diálogo Interamericano de Gerenciamento de Águas. Foz do Iguaçu, 02 a 06 de setembro de 2001. **Anais**. Foz do Iguaçu, 2001, 15 p.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Base Cartográfica Integrada Digital do Brasil ao Milionésimo**. Versão 1.0 para ArcGis Desktop/ArcView. 2003. Departamento de Cartografia (DECAR). Documento publicado em CD-ROM, 2003.
- Kemp, L. D.; Bonham-Carter, G. F.; Raines, G. L.; Looney, C.; Yu, H. **Arc-SDM and DataXplore User Guide. Spatial Data Modeller Extension for ArcView and Spatial Analyst**. Geological Survey of Canada, User Guide, 2002. Acesso em: 30/03/2002. Disponível em: <http://gis.nrcan.gc.ca/software/arcview/wofe>.
- OMM. ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL. **Casebook on Hydrometeorological Practices**. OMM, N° 168.TP.82, 1965.
- OMM. ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL. **Proceedings of the International Workshop on Network Design Practices**. 1992. 11-15 de noviembre de 1991, Coblenza, Alemanha.
- Santos, I. dos; Fill, H. D.; Sugai, M. R. V. B.; Buba, H.; Kishi, R. T.; Marone, E.; Lautert, L. F. **Hidrometria Aplicada**. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento. Curitiba, 2001, 372 p.
- Soares, P. F.; Porto, M. F. A. Projeto e avaliação de desempenho de redes de monitoramento de qualidade da água utilizando o conceito de entropia. In: XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Curitiba, 23 a 27 de novembro, 2003. **Anais** (CD-ROM). Curitiba: ABRH, 2003. 20 p.
- Spearman, C. The Proof and Measurement of Association Between Two Things. **American Journal Psychology**, v. 15, p. 72-101, 1904.