

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL**

**CONTRIBUIÇÃO AOS ESTUDOS DE REGIONALIZAÇÃO
DE VAZÕES A PARTIR DO CONHECIMENTO DO MEIO
FÍSICO – ESTUDO DE CASO: BACIA DO RIO SÃO
FRANCISCO**

AUTORA: IONÁ MARIA BELTRÃO RAMEH BARBOSA

ORIENTADOR: JOSÉ ALMIR CIRILO

RECIFE, DEZEMBRO DE 2002.

**CONTRIBUIÇÃO AOS ESTUDOS DE REGIONALIZAÇÃO
DE VAZÕES A PARTIR DO CONHECIMENTO DO MEIO
FÍSICO – ESTUDO DE CASO: BACIA DO RIO SÃO
FRANCISCO**

IONÁ MARIA BELTRÃO RAMEH BARBOSA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIA EM ENGENHARIA CIVIL.

APROVADA POR:

Prof. José Almir Cirilo (Presidente), D. Sc.

Prof. Rubem La Laina Porto, D. Sc.

Profa. Ana Lúcia Bezerra Candeias, D. Sc.

Prof. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral, Ph. D

RECIFE, DEZEMBRO DE 2002.

**A André, meu esposo e a
Ana Letícia, minha filha.**

AGRADECIMENTOS

Expresso meus agradecimentos a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para realização desta pesquisa, em especial:

Ao professor Almir Cirilo, pela orientação e carinho.

À todos os docentes do Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, por compartilhar conhecimentos e em especial à professora Suzana Montenegro, pela atenção dispensada nos momentos de dificuldade.

Aos colegas de turma, em especial a Karina e Vaneza, pelo aprendizado.

A Breno, Helder, Igor e Cristyanne, bolsistas do Laboratório de Geoprocessamento do Grupo de Recursos Hídricos, pela colaboração e amizade.

Às funcionárias da Secretaria do Laboratório de Hidráulica, em especial Suely, pela disponibilidade e eficiência.

Ao doutorando Marcelo Asfora e ao consultor da Agência Nacional de Energia Elétrica- ANEEL, Luziel Ahy, pelas contribuições e discussões necessárias à elaboração desta pesquisa;

Agradecimento especial à ANEEL, pelo financiamento e acompanhamento dos resultados da pesquisa, à Agência Nacional de Águas- ANA e ao Dr. Marcos Freitas, que, à frente das duas instituições, seqüencialmente, estimulou a cooperação com as universidades brasileiras para realização deste tipo de estudo.

RESUMO

A estimativa dos valores de vazões nos cursos d'água fornece subsídios às ações de tomada de decisão para o gerenciamento dos recursos hídricos. Esta estimativa nem sempre é viável, devido à falta de registros de vazões em consequência da deficiência da rede hidrométrica do país. Neste sentido, a regionalização de vazões surge como alternativa para fornecer informações para regiões desprovidas de dados.

A pesquisa que deu origem a essa dissertação abordou o relacionamento de registros de vazão com as características físicas das bacias hidrográficas. Com o objetivo de obter modelos de regionalização de vazões mais ajustados ao comportamento das bacias nos aspectos hidrológicos, foram utilizadas novas variáveis explicativas na formulação dos modelos. A área de estudo foi parte substancial da bacia do rio São Francisco, da Bahia à foz.

Os resultados mostraram que o desnível específico e a fração de solo segundo a classificação hidrológica inferiram melhoria nos modelos e retrataram melhor o comportamento das vazões nos rios.

Visando contemplar com modelos de regionalização, regiões que não tinham sido incluídas no estudo por não se dispor de dados de vazão em quantidade adequada, adotou-se a divisão da área estudada em regiões fisicamente homogêneas. Para isso, utilizou-se a precipitação, vegetação e classificação hidrológica dos solos como critérios para a divisão.

As bacias foram agrupadas segundo o percentual de área inserida nas regiões físicas definidas. Dessa forma, obteve-se região formada por bacias geograficamente distantes e pôde ser avaliada a extrapolação dos modelos de regionalização para áreas desprovidas de séries de vazões, porém com características físicas semelhantes.

ABSTRACT

The estimate of flow rate offers subsidence for the actions taken concerning the management of water resources. This estimation is not always feasible due to the lack of flow records as a consequence of the country hydrometrical net deficit. Thus, flow regionalization comes out as a mean to provide information to the regions lacking data.

The research which originated this dissertation broached the relation of the flow register with physical characteristics of the river basin. Aiming at getting flow regional models better adjusted to the basin reality, new explanatory variables were used in models formulation. The study area considered a substantial part of São Francisco river basin, from Bahia to the estuary.

Results showed that the specific difference level and the soil fraction according to the hydrological classification inferred models improvement and were more faithful to the river flows behaviour.

Bearing in mind feed regions not included in the study with regionalization models, it was decided to divide the area in study into physically homogeneous regions according to the precipitation, vegetation and hydrological classification of the soil.

The basins were grouped according to the area percentage inserted in the defined physical regions. Thus, it resulted in a region formed by basins geographically far away. The regionalization models extrapolation could also be evaluated for the areas lacking series of flow, notwithstanding showing similar physical characteristics.

ÍNDICE GERAL

1	Introdução	6
1.1	Aspectos gerais	6
1.2	Disponibilidade de dados para estudos e projetos	8
1.3	Objetivo da pesquisa	10
2	Revisão da literatura	11
3	Metodologia para a regionalização de vazões	19
3.1	Modelos de regionalização	19
3.2	Regiões homogêneas	22
3.3	Variáveis explicativas	24
3.4	Ajuste dos modelos de regressão	28
3.5	Contribuição desse estudo aos processos de regionalização	31
4	Descrição da Área de estudo	35
4.1	Geopolítica	38
4.2	Recursos hídricos superficiais	38
4.3	Geomorfologia	39
4.4	Clima e vegetação	40
4.5	Solos	41
5	Regionalização de vazões em bacias afluentes do Rio São Francisco	43
5.1	Dados descritivos	43
5.2	Análise e seleção de dados hidrológicos	43
5.3	Caracterização física e hidrológica das bacias utilizadas na regionalização de vazões	50

5.3.1	Variáveis explicativas principais _____	51
5.3.2	Novas variáveis explicativas _____	55
5.3.3	Efeito de escala cartográfica _____	62
5.4	Determinação das regiões homogêneas _____	63
5.4.1	Expansão da área regionalizada _____	65
5.5	Obtenção dos modelos de regionalização de vazões _____	71
6	Resultados e discussões _____	72
6.1	Regiões homogêneas e os modelos de regionalização _____	72
6.1.1	Regiões homogêneas baseadas nos aspectos hidrológicos _____	72
6.1.2	Regiões homogêneas baseadas nos aspectos físicos _____	83
6.2	Verificação dos modelos de regionalização propostos _____	94
6.2.1	Regiões homogêneas segundo aspectos hidrológicos _____	95
6.2.2	Regiões fisicamente homogêneas _____	99
7	Conclusões _____	104
8	Recomendações _____	106
	Referências bibliográficas _____	107

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1: Regiões fisiográficas e as sub-bacias do rio São Francisco. -----	36
Figura 4.2: Bacia do rio São Francisco em relação ao Polígono das Secas -----	37
Figura 5.1: Disponibilidade de dados fluviométricos para a região em estudo-----	46
Figura 5.2: Distribuição espacial dos postos fluviométricos selecionados -----	47
Figura 5.3: Distribuição espacial dos postos pluviométricos selecionados -----	48
Figura 5.4: Bacias contribuintes aos postos fluviométricos selecionados -----	49
Figura 5.5: Polígono de Thiessen definido pelo software ArcView- estação fluviométrica Abreus -----	53
Figura 5.6: Classificação hidrológica dos solos nas sub-bacias 46 a 49 segundo PLIRHINE/ SUDENE -----	58
Figura 5.7: Classificação hidrológica dos solos nas sub-bacias 46 a 49 segundo os grupos predominantes-----	59
Figura 5.8: Distribuição de precipitação nas sub-bacias 46, 47, 48 e 49 do rio São Francisco -----	68
Figura 5.9: Distribuição de vegetação nas sub-bacias 46, 47, 48 e 49 do rio São Francisco -----	69
Figura 5.10: Classificação hidrológica solos nas sub-bacias 46, 47, 48 e 49 do rio São Francisco com tipos A-B e C-D -----	70
Figura 6.1: Regiões homogêneas segundo análise dos dados de vazões e proximidade espacial das bacias hidrográficas -----	74
Figura 6.2: Regiões fisicamente homogêneas em relação a precipitação, vegetação e classificação hidrológica dos solos-----	85
Figura 6.3: Regiões fisicamente homogêneas e os contornos das bacias utilizadas na formulação dos modelos de regionalização de vazões -----	86
Figura 6.4: Contornos da bacias utilizadas na verificação dos modelos de regionalização de vazões para as regiões homogêneas definidas -----	96
Figura 6.5: Regiões fisicamente homogêneas e os contornos das bacias utilizadas na verificação dos modelos de regionalização de vazões.-----	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1: Valores de precipitações, vazões mínimas de 7 dias, máximas e médias nas bacias contribuintes aos postos fluviométricos.	54
Tabela 5.2: Tabela com a classificação hidrológica dos solos, segundo PLIRHINE (1978).	56
Tabela 5.3: Características físicas das bacias contribuintes aos postos fluviométricos selecionados.	60
Tabela 5.4: Parâmetros físicos de algumas bacias hidrográficas pertencentes a sub-bacia 48 e 49 extraídos de mapas na escala 1: 1.000.000	63
Tabela 6.1: Resumo dos melhores resultados obtidos com modelos de regressão para a vazão mínima de 7 dias, máxima e média - região homogênea I – RH I .	75
Tabela 6.2: Resumo dos melhores resultados obtidos com modelos de regressão para a vazão mínima de 7 dias, máxima e média - região homogênea II – RH II	76
Tabela 6.3: Resumo dos melhores resultados obtidos com modelos de regressão para a vazão máxima e média - região homogênea III – RH III	77
Tabela 6.4: Vazões médias observadas e estimadas para a RH I	79
Tabela 6.5: Vazões médias observadas e estimadas para a RH II	81
Tabela 6.6: Vazões médias observadas e estimadas para a RH III	82
Tabela 6.7: Resumo dos melhores resultados obtidos com modelos de regressão para a vazão mínima de 7 dias, máxima e média - região fisicamente homogênea 1- RFH 1	87
Tabela 6.8: Resumo dos melhores resultados obtidos com modelos de regressão para a vazão máxima e média - região fisicamente homogênea 2- RFH 2	88
Tabela 6.9: Resumo dos melhores resultados obtidos com modelos de regressão para a vazão máxima e média - região fisicamente homogênea 3- RFH 3	89
Tabela 6.10: Vazões médias observadas e estimadas para a RFH I	91
Tabela 6.11: Vazões médias observadas e estimadas para a RFH II	92
Tabela 6.12: Vazões médias observadas e estimadas para a RFH III	93

Tabela 6.13: Código, nome, período de observações, área de drenagem e região homogênea dos postos utilizados na verificação dos modelos de regionalização.	94
Tabela 6.14: Vazões mínimas de 7 dias, máximas e médias de longo período para bacias inseridas na região homogênea 1- RH I: verificação do modelo.....	97
Tabela 6.15: Vazões mínimas de 7 dias, máximas e médias de longo período para bacias inseridas na região homogênea II- RH II: verificação do modelo.....	98
Tabela 6.16: Vazões mínimas de 7 dias, máximas e médias de longo período para bacias inseridas na região fisicamente homogênea 1- RFH 1: verificação do modelo	101
Tabela 6.17: Vazões máximas e médias de longo período para bacias inseridas na região fisicamente homogênea 2- RFH 2: verificação do modelo	102

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 ASPECTOS GERAIS

A água é um recurso natural fundamental à vida. Além da necessidade física inerente aos seres vivos, ela está presente em todas as atividades humanas. A água é utilizada para transporte, geração de energia, nas atividades agrícolas e industriais, para lazer, dentre outras, fazendo com que se torne um bem de alto valor econômico e que dela dependa inteiramente o desenvolvimento das regiões.

O crescimento populacional, as incertezas quanto às mudanças climáticas e o aumento da poluição dos recursos hídricos geram preocupação quanto ao suprimento das demandas atuais de água do planeta e, principalmente, quanto às demandas futuras.

A escassez de água torna-se, cada vez mais, assunto presente em discussões em todas as esferas da sociedade. O receio da falta deste líquido precioso amedronta a população e ao mesmo tempo desperta para a necessidade de usá-lo de forma racional.

No Brasil este assunto tomou grande vulto em especial e a partir da década de 90, quando por diminuição nos níveis de água nos reservatórios que abastecem algumas metrópoles, a população teve que passar por programas de racionamento de água, ficando, muitas vezes, em algumas delas, até cinco dias sem água nas torneiras das residências. Mais recentemente, todo o país participou do programa nacional de racionamento de energia elétrica, decorrente da baixa acumulação, em quase todo o país, nos reservatórios que suprem as usinas hidrelétricas.

Por outro lado, águas em excesso, no processo natural e cíclico das cheias, continuam a ocasionar sérios prejuízos e até perda de vidas humanas. A construção de moradias em locais inadequados, os sistemas de drenagem mal dimensionados e em péssimas condições de funcionamento, aliados à crescente impermeabilização do solo, à falta de controle através de obras hidráulicas para contenção de enchentes, dentre outras razões, agravam ainda mais os problemas ocasionados pelas inundações.

Tanto as cheias como a escassez de água podem destruir empreendimentos agrícolas e industriais, causando prejuízo econômico e social, gerando desemprego, aumentando o êxodo rural e submetendo a população a viver em situações de calamidade pública.

Por estas e outras razões, é preciso impulsionar em todo o país a adoção de medidas institucionais corretas, ou seja, a adoção de um modelo de gestão dos recursos hídricos que considere a realidade sócio-econômica das regiões, embasado em leis e instituições que garantam seu cumprimento e fundamentalmente a participação da sociedade, para decidir da forma mais justa a distribuição e uso racional dos nossos recursos hídricos.

E isso vem acontecendo: os conflitos gerados em torno dos recursos hídricos levaram o poder público a instituir no Brasil a política nacional para gerenciamento dos recursos hídricos, criando leis capazes de fornecer instrumentos legais para disciplinar a apropriação e os usos múltiplos das águas no país. A partir daí, muitos estados brasileiros instituíram seus planos estaduais de recursos hídricos e estão implantando comitês de bacias hidrográficas visando à participação social no processo decisório.

Garantir o atendimento das demandas de água nos seus usos múltiplos é uma das tarefas mais difíceis na gestão dos recursos hídricos. Para a outorga do direito de uso da água se faz necessário o conhecimento da disponibilidade hídrica e uma avaliação de impactos que este uso causará no fluxo de água na bacia hidrográfica.

1.2 DISPONIBILIDADE DE DADOS PARA ESTUDOS E PROJETOS

No planejamento, projeto e operação de sistemas de controle e utilização dos recursos hídricos tais como abastecimento de água potável, projetos hidroagrícolas, abastecimento industrial, controle de cheias e enchentes, geração de energia elétrica, navegação fluvial, assimilação e diluição de esgotos sanitários e efluentes industriais e preservação ecológica, o conhecimento da quantidade e qualidade da água utilizada é fator primordial para alcançar êxito no empreendimento (PAIVA e PAIVA, 2001).

O comportamento hidrológico em bacias hidrográficas é retratado através das observações dessas variáveis ao longo do tempo, as quais são obtidas por meio de uma rede hidrometeorológica distribuída em seu território. A disponibilidade de séries históricas de dados hidrológicos confiáveis faz com que sejam projetados adequadamente reservatórios, diques, canais, eclusas, estações elevatórias e outras estruturas hidráulicas.

A maioria das técnicas utilizadas em estudos hidrológicos requer uma base de dados confiáveis a respeito da quantidade e qualidade dos recursos hídricos. No Brasil, pela sua extensão territorial e devido ao alto custo de implantação e manutenção das redes hidrometeorológicas, a quantidade de postos de observações ainda é reduzida, fazendo com que existam vazios de dados hidrológicos em grande parte das bacias hidrográficas brasileiras.

A escassez de dados é uma realidade muito encontrada em estudos hidrológicos, sendo necessário para convivência com este problema a extrapolação dos dados existentes. Em se tratando de dados de vazões, a quantidade de postos fluviométricos é muito reduzida, muitas vezes com registros curtos ou falhos, fazendo com que não seja retratada de forma adequada a realidade da bacia estudada.

Para solução deste problema, já que os dados de vazões são necessários para a maioria dos estudos, a Hidrologia Aplicada sugere a estimativa de dados de vazão a partir de modelos hidrológicos e modelos de regionalização.

Os modelos hidrológicos simulam o processo chuva-vazão numa bacia hidrográfica necessitando de um suporte de dados físicos bem maior para sua formulação e, algumas vezes, de parâmetros nem sempre de fácil obtenção.

A regionalização é feita por modelos de base matemática que utilizam as técnicas estatísticas para relacionar a variável dependente, no caso a vazão, com variáveis independentes. Estas últimas podem ser representadas por variáveis climáticas ou parâmetros fisiográficos da bacia hidrográfica em questão. Tais modelos são caracterizados pela sua facilidade e simplicidade de obtenção, quando comparados com modelos hidrológicos. Observe-se, no entanto, que fornecem apenas parâmetros como vazões médias, máximas e mínimas, e não séries diárias ou mensais, como é o caso dos modelos hidrológicos.

A regionalização hidrológica consiste num conjunto de ferramentas que exploram ao máximo as informações existentes, visando a estimativa das variáveis hidrológicas em locais sem dados ou com poucos dados (TUCCI, 1993) e o seu princípio se baseia nas similaridades espaciais de algumas funções, variáveis e parâmetros que permitem esta transferência (TUCCI, 2002).

Deste modo, as lacunas vazias de informações de vazões podem ser preenchidas com base na metodologia da regionalização hidrológica e assim, minimizar os efeitos do não conhecimento da variabilidade temporal e espacial das séries históricas de vazões, fazendo com que as ações de tomadas de decisão no planejamento, projeto e operação de sistemas e obras hídricas sejam bem sucedidas.

1.3 OBJETIVO DA PESQUISA

Neste estudo foram gerados modelos de regionalização de vazões mínimas com 7 dias de permanência, máximas e médias de longo período para afluentes do rio São Francisco localizados nas sub-bacias 46, 47, 48 e 49.

O objetivo principal desta pesquisa foi a introdução de novas variáveis explicativas para que possam ser formulados modelos de regionalização de vazões mais ajustados à “resposta hidrológica” das bacias estudadas.

Para isso, foram comparados os coeficientes de ajuste dos modelos propostos com as variáveis convencionais e com as novas variáveis estudadas, inclusive analisando a verificação dos resultados por meio de alguns postos cujos dados não foram incluídos na geração dos modelos.

No capítulo 2 deste trabalho é feita uma revisão bibliográfica sobre o assunto, citando desenvolvimento metodológico e estudos de regionalização realizados para bacias hidrográficas brasileiras e de outros países. No capítulo 3 são mostradas as etapas seguidas para este tipo de estudo: modelos de regionalização, divisão em regiões homogêneas, variáveis explicativas utilizadas e os coeficientes estatísticos utilizados para aceitação dos modelos de regressão, ressaltando-se as contribuições específicas deste estudo. No capítulo 4 é descrita em detalhes a parte da bacia do rio São Francisco estudada. O capítulo 5 trata da obtenção de dados e estruturação dos modelos. A seguir, no capítulo 6, são descritos e analisados os resultados obtidos. Finalmente, nos capítulos 7 e 8 apresentam as conclusões do estudo e recomendações para uso dos resultados obtidos e desenvolvimento de estudos futuros.

Capítulo 2

REVISÃO DA LITERATURA

O conhecimento da variabilidade no tempo e no espaço do regime de vazões nos cursos d'água tem sido uma preocupação constante de pesquisadores na tentativa de fornecer subsídios para a gestão de bacias hidrográficas.

Neste sentido, os modelos de regionalização, utilizados para suprir demandas de informações hidrológicas em locais onde não se dispõe de dados, têm contribuído para os estudos de aproveitamento dos recursos hídricos.

A definição de regiões homogêneas quanto às características físicas e hidrológicas tem sido considerada etapa fundamental para definição de modelos de regionalização e, sendo assim, várias pesquisas foram desenvolvidas no intuito de propor modelos mais ajustados às realidades locais.

Vários autores obtiveram êxito com aplicação de modelos de regionalização para diversas regiões do mundo e relataram suas experiências na obtenção, assim como, na incorporação de variáveis que interferem no processo de formação de vazões.

Algumas destas experiências estão relatadas a seguir.

NOUVELOT (1974), baseado nas características físicas do Nordeste brasileiro, propôs a divisão desta região em zonas hidrológicas teoricamente homogêneas. Esta divisão foi realizada com o objetivo de escolher bacias representativas dentro de cada zona homogênea, como projeto piloto, e através da exploração racional resolver problemas de disponibilidade hídrica para pequenas bacias do Nordeste brasileiro. Em seus estudos utilizou para definição de zonas hidrológicas homogêneas os fatores clima, características do solo e do sub-solo e relevo,

qualificando-os como fatores primários e de determinação relativamente fácil e rápida.

Para caracterizar o clima utilizou a altura pluviométrica anual; considerou a permeabilidade para as características do solo e sub-solo e o desnível específico para o relevo. O exame dos outros fatores físico-climáticos, principalmente a pluviosidade, levou a considerar a vegetação como fator secundário na determinação das regiões. Com isso, o autor chegou a definição de 383 setores unitários distribuídos em 229 zonas homogêneas para o Nordeste do Brasil.

PATTON e BAKER (1976) estudaram a influência de variáveis morfométricas em bacias com alto potencial e baixo potencial de vazão localizadas nos Estados Unidos. Dados morfométricos e de descarga foram analisados através de técnicas estatísticas, permitindo as correlações entre essas variáveis e as vazões observadas. Foram identificados parâmetros que possuem alta correlação, como por exemplo, a área e o comprimento da bacia, assim como aqueles que podem ser utilizados em modelos de regressão por exercerem influência no regime de vazões dos rios.

ACREMAN e SINCLAIR (1986) identificaram cinco regiões homogêneas para 168 bacias na Escócia. Para identificar o grupo de bacias com características hidrológicas semelhantes utilizaram parâmetros fisiográficos, sendo consideradas a área, fração da bacia coberta por reservatórios e chuva média anual as mais expressivas para a região estudada.

WILTSHIRE (1986) obteve regiões homogêneas na Inglaterra a partir das séries de vazões e as características físicas das bacias. A proposta de formação dos grupos se deu pela análise das características das bacias hidrográficas, sendo a área, precipitação média anual e a fração urbanizada da bacia adotadas para a definição dos grupos. Testes estatísticos foram aplicados às séries de vazões de cada posto, observando seu comportamento dentro do grupo e entre os grupos

formados para verificar a veracidade dos agrupamentos definidos pelas características físicas.

NATHAN e McMAHON (1990) testaram diferentes agrupamentos para 184 bacias hidrográficas localizadas na Austrália com área variando 1 a 250 km² e média de 17 anos de observações de vazões. Destas bacias foram escolhidas dezenove características físicas e climáticas, considerando ser potencialmente úteis na previsão de vazões. Formaram-se cinco diferentes grupos, adotando-se algumas das dezenove características. Os autores citam que se a similaridade entre bacias for definida apenas por duas ou três variáveis, um simples gráfico bidimensional ou tridimensional pode mostrar os agrupamentos existentes. Quando são requeridos mais de três parâmetros para definir a semelhança entre bacias fica difícil a representação de dados multidimensionais. Como alternativa para determinação dos grupos, já que cada um foi formado por mais de três parâmetros, utilizaram a função de Andrews e de acordo com o comportamento desta função para cada bacia estudada foi possível identificar qual dos cinco agrupamentos foi o que melhor subdividiu a região. Desta forma, bacias que por técnicas estatísticas eram pertencentes a uma região puderam ser alocada para outra, pela semelhança entre características físicas.

CAMPANA et al. (1992) apresentou uma metodologia para estimar áreas impermeáveis na bacia do Arroio Dilúvio em Porto Alegre, visando a predição de vazões. Com a classificação de imagens digitais do satélite SPOT, obteve-se parâmetros com rapidez e precisão de resultados, evidenciando a necessidade do uso das técnicas de geoprocessamento para caracterização fisiográfica de bacias hidrográficas.

EID e SOUZA (1995) quantificaram o escoamento superficial para cada evento pluviométrico (ocorrido no período de aproximadamente dois meses) na bacia do Ribeirão do Gama no Distrito Federal através do modelo proposto pelo Soil Conservation Service-SCS dos Estados Unidos. Este modelo utiliza na sua formulação a altura precipitada e a diferença potencial máxima entre a

precipitação e a vazão no início da precipitação (S), o qual é obtido em função da curva N. Utilizaram para identificação do uso do solo na bacia a imagem de satélite Landsat 5-TM, sendo empregadas as bandas 3, 4 e 5, definindo-se cinco classes e o mapa de tipo de solo, agrupando-se em três classes. Cruzando-se esses dois planos de informações, obteve-se treze classes de número de curva N, cujo valor foi retirado de bibliografia especializada. O método do polígono de Thiessen foi utilizado para obter a precipitação média (P) para cada classe de curva N. Com os valores de N e P foi possível determinar e comparar os valores de vazão para cada período de chuva estudado.

FERREIRA (1996) apresentou uma proposta metodológica para regionalização de pequenas bacias hidrográficas que não dispõem de dados hidrométricos aplicada à bacia Ribeirão do Feijão, localizada na porção centro-oeste do estado de São Paulo. Ele baseia-se no levantamento e integração espacial entre o coeficiente de cobertura vegetal (Cv) obtido através de classificação de imagens do satélite TM-Landsat (bandas 3 e 4), o coeficiente médio de impermeabilidade (Ci), calculado a partir do índice de impermeabilidade da unidade pedológica e o percentual que a unidade ocupa na bacia hidrográfica e o fator topográfico (Ft) determinado por meio de análise morfométrica das bacias utilizando cartas topográficas 1/50.000. O autor identificou quatro grupos de sub-bacias com propriedades físicas similares e pôde agrupá-las em regiões hidrológicamente homogêneas.

OBREGON et al. (1999) utilizaram um modelo mensal de transformação de precipitação em vazão para extensão de séries de vazões, de modo a posteriormente realizar a regionalização da curva de regularização e da curva de permanência para bacias afluentes à Lagoa Mirim no Rio Grande do Sul. Eles observaram que os resultados estatísticos apresentaram-se melhor para a regionalização com séries estendidas a partir de valores de precipitação do que a realizada simplesmente com séries históricas. Destacaram ainda que as curvas regionais, tanto para curva de permanência como para curva de regularização a partir de séries históricas, tendem a superestimar as vazões se comparada àquelas curvas regionais obtidas através de séries estendidas.

ALVES et al. (1999) determinaram zonas hidrologicamente homogêneas na região das bacias dos rios Jacu e Curimatau, na Paraíba, utilizando a metodologia apresentada por NOUVELOT (1974). Os autores se basearam em mapas topográficos e geológicos na escala 1/500.000 e no mapa de isoietas anuais elaborado a partir de pluviômetros disponíveis. Eles concluíram que para as regiões estudadas, a precipitação foi fator determinante das zonas hidrológicas visto que nessas bacias apresentam-se apenas uma classe para o relevo e solo. Em comparação com o trabalho realizado pela SUDENE/ORSTOM, os autores concluíram que devido a este englobar toda área sob jurisdição da SUDENE os resultados da caracterização das zonas hidrologicamente homogêneas apresentaram-se diferentes da realizada nas bacias dos rios Jacu e Curimatau, devido as informações cartográficas utilizadas estarem em escala maior de detalhamento.

PEDROLLO e GERMANO (1999) realizaram regionalização de vazões para a bacia do rio Tubarão em Santa Catarina. O modelo de regressão linear utilizado foi do tipo potencial e as variáveis independentes nos modelos foram a área de drenagem e a precipitação média dos totais anuais, sendo esta última pouco expressiva nas equações, podendo até ser excluída quando não for possível sua determinação. A vazão média de longo período e a vazão com permanência de 50% foram as que apresentaram melhores resultados.

VEIGA e KRÜGER (1999) compararam os resultados obtidos por modelo chuva-vazão (IPH2SL) e método de regionalização hidrológica (H77) para caracterização do comportamento de vazões no rio São Jerônimo, no Paraná. O modelo de regionalização utiliza como entrada as coordenadas do posto fluviométrico, a área da bacia e as coordenadas do ponto do divisor de águas da bacia mais a montante. Concluíram que os valores de vazões calculadas por ambos os modelos apresentaram-se próximas.

ZUCARELLI e PARIS (1999) fizeram regionalização da curva de permanência na bacia hidrográfica do Rio da Plata, na Argentina, previamente seguida da divisão

da região em zonas hidrologicamente homogêneas utilizando método estatístico de agrupamento. Concluíram que a bacia é formada por seis diferentes grupos de bacias e sugerem a divisão em regiões homogêneas para modelagem da curva de permanência.

ALBIZURI (1999) obteve bons coeficientes de ajustamento para regressões entre os momentos lineares (L-moments) de primeira e quarta ordens das séries disponíveis e as áreas de drenagem dos postos correspondentes nos rios Uruguai e Iguazu. Adotando-se as curvas de regressão como curvas regionais foi possível obter valores de vazões máximas em locais da bacia onde não possuíam dados observados.

ANDRADE e HAWKINS (2000) aplicaram a função de Andrews para avaliar a regionalização de sessenta bacias hidrográficas localizadas em regiões áridas e semi-áridas em três países (Austrália, Brasil e nos Estados Unidos). Após a divisão em regiões homogêneas, os grupos formados foram avaliados para identificar as bacias discrepantes existentes. Com a aplicação desta metodologia houve a alocação de bacias anteriormente consideradas pertencentes a um grupo homogêneo, por técnicas estatísticas, para outro. Esta redefinição foi possível pela análise da tendência da função de Andrews nos dois grupos de bacias estudados.

GÓES (2001) incorporou variáveis representativas das modificações no uso e ocupação do solo em modelos de regionalização de vazões para bacias hidrográficas no Distrito Federal. As variáveis utilizadas foram percentuais de áreas impermeáveis, solo exposto e áreas irrigadas obtidas a partir de classificação de imagens do satélite Landsat TM-5 em diferentes anos. A introdução desses parâmetros contribuiu para melhorar os modelos de regionalização, sendo a fração de áreas impermeáveis a mais expressiva para os modelos da vazão média e máxima e para a vazão mínima a fração de áreas irrigadas foi a que apresentou melhores ajustes. A autora ressalta a necessidade de avaliar previamente a evolução das mudanças ocorridas quanto ao uso e

ocupação do solo na bacia e caso sejam relevantes precisam ser consideradas para uma melhor resposta nos modelos de predição de vazões.

ANDRADE et al. (2001) agruparam dezesseis sub-bacias hidrográficas do litoral cearense em regiões hidrológicas assumindo a hipótese de que regiões semelhantes independem da continuidade geográfica. Definiram-se dois grupos, o primeiro com onze sub-bacias com áreas inferiores a 3.000 km² e o segundo com cinco sub-bacias com áreas entre 3.000 e 11.000 km², todas oriundas de diferentes áreas da região litorânea. A metodologia aplicada concluiu que grupos homogêneos podem ser delimitados independentemente da sua posição geográfica. O parâmetro fisiográfico que apresentou maior peso na definição das regiões foi a área de contribuição das bacias hidrográficas.

FINZI et al. (2001) realizaram a regionalização de vazões para as bacias hidrográficas dos rios Corrente e Carinhanha, correspondente à sub-bacia 45 da bacia do rio São Francisco. A região estudada foi dividida em duas regiões homogêneas, baseando-se na posição geográfica e nos valores das séries de vazões. Utilizaram o programa RH 3.a (Euclides et al., 1999) para regionalizar as vazões médias e máximas e obtiveram equações baseadas em variáveis hidrológicas como a chuva média no semestre mais chuvoso, precipitação máxima diária anual e a média do total anual. Parâmetros fisiográficos também foram utilizados para obtenção das curvas regionais e o mais expressivo deles foi a área da bacia. Não obtiveram as equações para as vazões mínimas por se tratar de uma área cárstica com solo altamente permeável, explicando a incidência de rios intermitentes, ou seja, com os valores nulos de vazões em boa parte do ano.

EUCLYDES et al. (2001) realizaram regionalização hidrológica na bacia do São Francisco a montante da barragem de Três Marias, em Minas Gerais, utilizando o programa RH 3.a. A regionalização das vazões médias, mínimas e máximas foi desenvolvida sob dois enfoques. No primeiro aplicou-se regressão múltipla das vazões observadas com as características físicas e climáticas das sub-bacias da

região e regionalizou-se as vazões com base em estatísticas dos resultados e no segundo método a regionalização das vazões foi feita a partir da precipitação pluvial espacializada na bacia hidrográfica. Estabeleceram regiões hidrologicamente homogêneas para estas vazões, assim como para as vazões com permanência de 50 e 95 % e também para as curvas de regularização de volumes. Os autores concluíram que para etapa de planejamento, a regionalização hidrológica seguindo a primeira metodologia é a mais indicada.

KJELDTSEN et al. (2002) regionalizaram vazões para rios da província de KwaZulu-Natal, na África do Sul. Regiões homogêneas foram identificadas baseando-se nas características locais e na análise da frequência regional. Foram obtidas por meio do Modelo Digital do Terreno características médias para as bacias definidas e a concentração das chuvas foi a característica utilizada para dividir a área em duas regiões. As distribuições teóricas Normal, Pearson tipo III e Pareto puderam ser utilizadas para representar a frequência regional na região 1, enquanto que na região 2, por apresentar poucos eventos extremos, não se obteve uma função que representasse a frequência regional das vazões.

Capítulo 3

METODOLOGIA PARA A REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES

3.1 MODELOS DE REGIONALIZAÇÃO

A regionalização de vazões consiste na transferência de informações de locais medidos para outros com pouca ou nenhuma informação. Através da análise de similaridade entre as bacias envolvidas são definidas regiões homogêneas e, posteriormente, aplicada regressão entre os valores de vazões e suas características físicas e climáticas (TUCCI, 2002).

A regionalização de vazões pode ser usada para melhor explorar as amostras pontuais e como consequência melhorar as estimativas das variáveis, verificar a consistência das séries hidrológicas e identificar a falta de postos de observações.

Várias são as etapas seguidas para que a informação antes restrita a um ponto numa seção qualquer de um rio passe a representar uma região.

Segundo TUCCI (1993) a regionalização pode ser elaborada para:

- Funções estatísticas de variáveis hidrológicas: curva de probabilidade de vazões máximas, médias ou mínimas, curva de probabilidade de precipitações máximas, entre outras;
- Funções específicas que relacionam variáveis: curva de regularização, curva de infiltração, curva de permanência;
- Parâmetros de modelos hidrológicos: características do hidrograma unitário, parâmetros de outros modelos hidrológicos.

Entre os métodos usados para regionalização de funções estatísticas existem três tipos básicos de procedimentos:

- Métodos que regionalizam parâmetros de uma distribuição estatística- este procedimento considera que uma distribuição estatística ajusta bem os dados dos postos da região escolhida. Inicialmente, é ajustada uma distribuição estatística aos dados das diferentes bacias. Sendo μ e σ os parâmetros de média e desvio padrão, obtém-se as estimativas $\hat{\mu}_1; \hat{\sigma}_1; \hat{\mu}_2, \hat{\sigma}_2; \dots; \hat{\mu}_n, \hat{\sigma}_n$, onde n é o número de bacias ou postos.

Em seguida os parâmetros obtidos são relacionados com as características físicas e meteorológicas das bacias, resultando na seguinte equação:

$$\mu = f1(A,P,S,\dots) \quad (3.1)$$

$$\sigma = f2(A,P,S,\dots) \quad (3.2)$$

onde μ e σ são representados pelas funções $f1$ e $f2$ dependentes de A , P e S , sendo A = área, P = precipitação, S = declividade, ou seja, são as características físicas e climáticas das bacias.

Para os postos sem dados ou com dados insuficientes, os parâmetros μ e σ são estimados com base nas equações 3.1 e 3.2. Conhecidos os parâmetros da distribuição estatística, as vazões com um risco desejado são determinadas para o local em estudo.

- Métodos que regionalizam a vazão com um determinado risco- como no caso anterior, são ajustadas distribuições às vazões de diferentes postos. A vazão de alguns tempos de retorno de interesse são obtidas das distribuições ajustadas a cada posto, ou seja,

$$Q_{T1}^1 = g_1(\mu_1, \sigma_1, T1);; Q_{T2}^1 = g_1(\mu_1, \sigma_1, T2); \dots Q_{Tm}^1 = g_1(\mu_1, \sigma_1, Tm) \quad (3.3)$$

$$Q_{T1}^2 = g_2(\mu_2, \sigma_2, T1);; Q_{T2}^2 = g_2(\mu_2, \sigma_2, T2); \dots Q_{Tm}^2 = g_2(\mu_2, \sigma_2, Tm) \quad (3.4)$$

.....

$$Q_{T1}^n = g_n(\mu_n, \sigma_n, T1);; Q_{T2}^n = g_n(\mu_n, \sigma_n, T2); \dots Q_{Tm}^n = g_n(\mu_n, \sigma_n, Tm) \quad (3.5)$$

onde m é o número de tempos de retorno escolhidos. O índice superior indica o posto ou bacia e o inferior o tempo de retorno; $g_i(\mu_i, \sigma_i, T_j)$ é a solução da equação

$$\int_{g_i}^{\infty} p(x_i) dx_i = \frac{1}{T}, \text{ onde } p(x) \text{ é a função de distribuição de probabilidade do posto } i$$

com parâmetros μ_i e σ_i .

Com base nas equações para diferentes tempos de retorno obtidas de cada posto, a regressão para toda a região é estabelecida entre os valores de vazões com um determinado tempo de retorno e as características físicas e climáticas das bacias, obtendo-se as seguintes relações:

$$Q_{T1} = G_1(A, P, S, \dots) \quad (3.6)$$

$$Q_{T2} = G_2(A, P, S, \dots) \quad (3.7)$$

.....

$$Q_{Tm} = G_m(A, P, S, \dots) \quad (3.8)$$

onde $G_1 = (A, P, S, \dots)$ é a equação de regressão regional para o tempo de retorno T_j . Para bacias sem dados compreendidas na área regionalizada são utilizadas diretamente as equações acima.

Sendo assim, pode-se ajustar diferentes modelos de distribuição de probabilidades de vazões para os postos.

- Métodos que regionalizam uma curva de probabilidade adimensional e o fator de adimensionalização- esse método adimensionaliza as curvas individuais de probabilidade com base no seu valor médio e estabelece uma curva adimensional regional média dos postos com a mesma tendência, que pode ser expressa por:

$$F_1(Q_m / Q_T) = \frac{1}{T} \quad (3.9)$$

onde T= tempo de retorno; Q_m = valor médio da vazão em estudo; Q_T = valor da vazão com tempo de retorno T. O valor médio é regionalizado em função das características fisiográficas e climáticas das bacias, por meio de uma equação de regressão:

$$Q_m = F_2(A, P, S, \dots) \quad (3.10)$$

onde $F_2(A, P, S, \dots)$ é a equação de regressão.

3.2 REGIÕES HOMOGÊNEAS

A regionalização de vazões é aplicada a um conjunto de bacias que possuam algumas características semelhantes e a definição de uma região homogênea está relacionada com um determinado tipo de comportamento do sistema hídrico.

A sud-divisão em regiões homogêneas é prevista em estudos de regionalização na tentativa de se obter modelos mais adequados às realidades física e hidrológica das bacias, devendo esta divisão seguir alguns critérios de similaridade.

TUCCI (1993) considera alguns aspectos que poderiam ser utilizados na subdivisão em regiões:

- Tamanho das bacias hidrográficas - podem ser agrupadas bacias segundo suas áreas, podendo ser analisadas regiões formadas por pequenas, médias e grandes bacias;
- Rios principais - podem ser agrupadas bacias segundo seus rios principais, sendo importante verificar se não ocorrem mudanças significativas nas características físicas e meteorológicas dos rios de montante para jusante;
- Geografia - a similaridade das características geográficas pode ser utilizada para divisão da área em sub-regiões, sendo muito conveniente para o uso futuro dos resultados e pode ser aplicado para grandes áreas.

Um dos procedimentos para determinação de regiões homogêneas pelo critério geográfico refere-se à análise da tendência da curva adimensional de frequência das vazões em conjunto com a análise da equação de regressão dos valores médios de vazões com as características físico-climáticas das bacias.

TUCCI (1993) sugere a determinação da curva adimensional de probabilidade e a equação de regressão das vazões com as características físicas e climáticas dos postos para subdivisão da região.

Segundo o autor deve-se determinar o resíduo da regressão ($Q_o - Q_c$), colocá-los em mapas com o seu respectivo sinal, tentando formar agrupamentos. Postos com mesmo sinal tendem a agrupar-se numa mesma região. Daí, deve-se tentar compatibilizar as regiões da curva de frequência com a região da equação de regressão, procurando com que esta defina uma mesma região da curva de frequência ou que englobe regiões inteiras.

Uma outra forma de divisão em regiões homogêneas é descrita por NOUVELOT (1974). Quando não é conhecido o comportamento hidrológico da região a estudar é necessário determinar fatores climato-físicos susceptíveis de terem relação, mais ou menos estreita com as características hidrológicas, e admitir

como hipótese que uma zona climato-física homogênea corresponde a uma zona hidrológica teoricamente homogênea.

Esses fatores deverão ser classificados segundo sua maior ou menor influência no escoamento superficial e exprimem apenas ligações puramente qualitativas, mesmo no caso em que as diversas características do meio físico-climático possam ser definidas quantitativamente, não podendo ser feita avaliação quantitativa das relações que ligam os constituintes do balanço hídrico através desses fatores (NOUVELOT, 1974).

No estudo desenvolvido por J. Nouvelot intitulado por “Planificação da Implantação de Bacias Representativas” teve-se como objetivo propor a implantação de uma exploração racional de um grupo de bacias hidrográficas representativas a fim de resolver os problemas de disponibilidade hídrica em áreas de pequena superfície (menos de 1.000 km²) do Nordeste brasileiro.

Nouvelot lembra que os fatores condicionantes do regime hidrológico são numerosos e que a maior parte dos fatores estão ligados entre si de acordo com relações mais ou menos estreitas ou complexas.

Para qualquer dos três métodos de regionalização de funções estatísticas citados anteriormente, a equação de regressão é estabelecida entre a vazão média de adimensionalização e as características físicas e climáticas das bacias com dados, sendo dessa forma, a escolha destas variáveis independentes ponto fundamental em estudos de regionalização.

3.3 VARIÁVEIS EXPLICATIVAS

Vários aspectos fisiográficos da bacia, tais como área, perímetro, forma, densidade de drenagem, declividade do rio, cobertura vegetal, uso e ocupação do solo, entre outros, permitem estabelecer relações com as vazões observadas nos cursos d'água. Esses aspectos exercem influência direta no comportamento hidrometeorológico da bacia (ELETROBRÁS, 2002).

As variáveis adotadas para definição de modelos de regionalização devem explicar a variação da vazão no local de interesse. Vários autores citam que as variáveis explicativas devem ser de fácil obtenção para que não seja dificultado o uso do modelo proposto, devendo-se também evitar métodos indiretos na quantificação dessas variáveis, pois podem gerar incertezas nos modelos (TUCCI, 2002).

Segundo NATHAN e McMAHON (1990) a seleção das variáveis é a etapa mais importante nos estudos de regionalização. A exclusão de variáveis importantes pode conduzir a interpretações errôneas. As variáveis físicas comumente utilizadas em estudos de regionalização de vazões são a área de drenagem, o comprimento e a declividade do rio principal, o desnível e a densidade de drenagem da bacia.

Esses dados são determinados para cada bacia contribuinte ao posto fluviométrico selecionado e, posteriormente, segue-se a obtenção das outras características citadas.

Vale ressaltar a facilidade, rapidez e precisão na obtenção desses parâmetros por intermédio do uso das técnicas de geoprocessamento, tornando-se, cada vez mais, uma ferramenta de grande importância em trabalhos que exijam agilidade e segurança nas informações obtidas.

A área de drenagem de uma bacia pode ser facilmente obtida por geoprocessamento, quando for disponibilizada a base cartográfica digital, ou com planímetro quando os mapas estão em meio analógico.

Uma alternativa bastante usual para traçado automático de bacias de drenagem é a utilização de rotinas de programas. O *Hydro* e o *CRWR- PrePro* (Olivera, 2000) são exemplos de *scripts* utilizados no software ArcView para delimitação de bacias hidrográficas e de rede de drenagem através do uso do Modelo Digital do Terreno- MDT.

O MDT é uma matriz de números que representam a distribuição geográfica de elevações (Moore et al. citado em Mendes e Cirilo, 2001), que são derivados de levantamentos topográficos e podem ser representados pelo TIN- *Triangular Irregular Network*. A representação da superfície do terreno por meio do TIN é conseguida por meio de uma rede de triângulos não sobrepostos onde cada vértice representa um ponto do levantamento.

O comprimento do rio principal também é uma variável utilizada em estudos de regionalização de vazões, sendo bastante correlacionada com a área da bacia. TUCCI (2002) define o rio principal como aquele que drena a maior área no interior da bacia hidrográfica.

Para a declividade do rio principal TUCCI (2002) sugere para locais onde não se dispõe de mapa em escala adequada para determinação da topografia e principalmente para bacias planas obtenção da declividade média a partir da seguinte forma:

$$S_m = \frac{H(0,85) - H(0,10)}{0,75L} \quad (3.11)$$

onde $H(0,85)$ é a cota a 85% do comprimento L do rio no sentido de jusante para montante e $H(0,10)$ a 10% do comprimento do rio no mesmo sentido.

O MDT é bastante útil quando se deseja extrair informações fisiográficas. Havendo dados altimétricos, o MDT pode ser obtido por geoprocessamento utilizando as cotas de diversos pontos na bacia.

Atualmente estão disponibilizadas bases de dados de todo o globo terrestre através dos bancos de dados GTOPO30 e HYDRO1K (USGS, 2000). O primeiro, com uma precisão de 1 km, disponibiliza dados de MDT e o segundo, além de MDT, permite geração de outras informações como direção de fluxo, fluxo acumulado, declividades, etc.

MULLER e GARCIA (2001) utilizaram Modelos Digitais do Terreno em escalas globais disponibilizados pelo United States Geological Survey- USGS e as rotinas

computacionais *Hydro* e *CRWR-PrePro* para delimitar bacias hidrográficas e definir rede de drenagem em 27 bacias distribuídas no estado do Paraná. Os autores observaram que, para bacias com dimensões maiores que 2.000 km², as bases oferecem resultados satisfatórios, podendo servir de fonte de dados para modelagem de grandes bacias hidrográficas.

Segundo TUCCI (2002), a densidade de drenagem é um bom indicador do relevo superficial e das características geológicas da bacia, sendo definida pela razão entre o somatório dos comprimentos dos cursos d'água e a área da bacia.

O desnível da bacia (D) representa a diferença de cota entre o ponto mais alto e a seção de saída da bacia hidrográfica.

A caracterização hidrológica se faz mediante a determinação de valores característicos de precipitação, evaporação ou qualquer outro fator climático que venha a exercer influência no regime de vazões dos cursos d'água dessas bacias.

TUCCI (2002) apresenta a precipitação média anual, a máxima diária, a média do trimestre mais seco, a evaporação potencial anual, a evaporação potencial do trimestre mais seco e a relação entre evaporação potencial e precipitação como sendo algumas das variáveis explicativas que podem ser utilizadas em estudos de regionalização.

O método do Polígono de Thiessen é uma das formas utilizadas para determinação de precipitações médias e consiste em atribuir um fator de peso aos totais precipitados em cada posto, proporcional à área de influência de cada um. Estas áreas de influência (pesos) são determinadas em mapa da bacia com a plotagem dos postos pluviométricos, unindo-se os postos adjacentes por linhas retas e, em seguida, traçando-se as mediatrizes dessas retas formando polígonos. Os lados dos polígonos definidos são os limites da área de influência de cada estação (VILLELA E MATOS, 1975).

3.4 AJUSTE DOS MODELOS DE REGRESSÃO

Os modelos de regionalização são processos de base matemática que relacionam a variável dependente, neste caso a vazão, com características físicas e climáticas das bacias hidrográficas envolvidas na sua determinação. Sendo assim, são utilizados vários indicadores para verificar a qualidade do ajuste da função matemática aos dados. Dentre esses indicadores, os mais adotados são o coeficiente de determinação e o desvio padrão, também chamado de erro padrão da estimativa, definidos por:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{(t=1)}^N (\hat{Q}_t - Q_t)^2}{\sum_{(t=1)}^N (Q_t - \bar{Q})^2} \quad (3.12)$$

$$EP = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{n=1}^n (\hat{Q}_t - Q_t)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3.13)$$

onde:

\hat{Q}_t = valor calculado da vazão para o intervalo de tempo t;

Q_t = valor observado da vazão no intervalo de tempo t;

\bar{Q} = média dos valores observados da vazão;

n = número de observações.

O coeficiente de determinação representa a proporção com que o modelo consegue explicar a variabilidade da função y e quanto mais próximo de 1 maior é a parcela explicada.

O erro padrão da estimativa quantifica a dispersão dos valores observados da variável independente em torno da função ajustada e um valor baixo indica um bom ajuste.

Para interpretar o coeficiente de determinação, particularmente ao lidar com modelos de regressão linear múltipla, alguns pesquisadores sugerem que seja calculado um coeficiente de determinação ajustado (R^2_a) para refletir tanto o número de variáveis explicativas no modelo quanto o tamanho da amostra (LEVINE et al., 2000).

$$R^2_a = 1 - \left[(1 - R^2) \frac{n-1}{n-2} \right] \quad (3.14)$$

Para seleção do modelo que melhor se ajusta aos dados de vazões observadas nas regiões homogêneas devem ser analisados, além dos valores do coeficiente de determinação (R^2_a) e do erro padrão da estimativa (EP), o coeficiente de variação (CV) e o teste da função F (%F).

Segundo TUCCI (2002), a vazão média não é representativa das ocorrências das vazões ao longo do tempo e a principal característica para representar esta variabilidade é o desvio padrão, calculado por:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}{n-1}} \quad (3.15)$$

O coeficiente de variação sintetiza a relação entre a média e o desvio padrão num resultado adimensional.

$$CV = \frac{\bar{Q}}{\sigma} \quad (3.16)$$

O teste de significância da função F é utilizado para verificar o grau de associação entre a variável dependente e as independentes.

O teste de significância de F estabelece a seguinte relação:

$$F = \frac{(n - p - 1)R^2}{p(1 - R^2)} \quad (3.17)$$

com $(n-p-1)$ graus de liberdade , onde n é o número de pontos usados no ajuste e p é o número de parâmetros estimados na regressão.

Quando o valor calculado de F é maior que o F tabelado para um nível de confiança de $100 (1-\alpha)\%$, a hipótese de que os coeficientes da equação de regressão são nulos pode ser rejeitada e a regressão é aceita a este nível de confiança. O valor de α representa o nível de significância, sendo utilizado para calcular o nível de confiança, ou seja, um alfa de 0,01 indica um nível de confiança de 99%.

Para o modelo de regressão adotado deve-se verificar se o modelo permite estimar com confiança os valores de vazões em qualquer curso d'água dentro da região considerada hidrológicamente homogênea e se o mesmo utiliza o menor número possível de variáveis independentes para reduzir o custo e o tempo na obtenção dos parâmetros.

A melhor equação de regressão deve apresentar maior valor do coeficiente de determinação, menor erro padrão e menor coeficiente de variação, e ainda resultado positivo para o teste da função F (TUCCI, 2002).

Um fator fundamental para escolha do modelo de regressão mais indicado para representar as vazões é o grau de liberdade da equação.

O grau de liberdade é a amostra real estatística utilizada na correlação e quando o número de parâmetros utilizados na equação aumenta, reduz-se o grau de liberdade da equação para o mesmo tamanho da amostra. É definido por:

$$G_l = n - p - 1 \quad (3.18)$$

onde:

n = número de observações;

p = número de parâmetros utilizados no modelo;

O percentual de desvio relativo dá uma idéia de quanto variam os valores de vazões estimadas das observadas nas séries históricas.

$$\%dr = \left[\frac{(Q_{obs} - Q_{est})}{Q_{obs}} * 100 \right] \quad (3.19)$$

onde:

Q_{obs} = média dos valores de vazões observadas;

Q_{est} = média dos valores de vazões estimadas pelo modelo.

Além dos métodos estatísticos e matemáticos citados anteriormente o modelo deve apresentar coerência hidrológica, ou seja, as tendências de variação das grandezas deve ser coerente com a realidade (por exemplo, área maior implica em maior vazão).

3.5 CONTRIBUIÇÃO DESSE ESTUDO AOS PROCESSOS DE REGIONALIZAÇÃO

Outras características físicas podem ser utilizadas para estabelecer correlação com os dados de vazões observadas, desde que estas sejam representativas do fenômeno que se deseja estimar através dos modelos e, como citado anteriormente, de fácil medição (TUCCI, 2002).

Sendo assim, deve-se buscar parâmetros físicos ou variáveis hidrológicas/climáticas que representem a influência no regime de vazões para que sejam incorporadas nas equações, gerando modelos mais próximos da realidade hidrológica das bacias em questão.

Segundo NOUVELOT (1974) para um determinado tipo de terreno a distribuição das precipitações entre o escoamento superficial e a infiltração é devida essencialmente ao relevo da bacia hidrográfica.

Neste sentido, alguns estudiosos propuseram índices que retratassem a declividade média na bacia, fazendo uso de variáveis de difícil quantificação. Com intuito de eliminar estas dificuldades G. GUISCAFRE e P. DUBREUL citado em NOUVELOT (1974) propuseram uma classificação a partir do desnível específico, sendo este definido por:

$$D_s = D.L^{-1}.A^{1/2} \quad (3.20)$$

onde D é o desnível calculado em metros, que separa as altitudes H_5 e H_{95} , que correspondem aproximadamente às altitudes para as quais 5% da área da bacia está abaixo desta e 5% da área da bacia está acima, respectivamente, e L o comprimento do retângulo equivalente da bacia em questão, ou seja, o retângulo com o mesmo perímetro, mesmo índice de compacidade e mesma distribuição hipsométrica que a bacia em estudo.

O desnível (D) pode ser obtido pela subtração das respectivas altitudes (H_5 e H_{95}), determinadas por intermédio do TIN de cada sub-bacia traçada e o retângulo equivalente pela expressão:

$$L = \frac{CA^{1/2}}{1,128} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{C} \right)^2} \right] \quad (3.21)$$

onde C é índice de compacidade, dados por:

$$C = 0,282.P.A^{-1/2} \quad (3.22)$$

sendo P é o perímetro da bacia hidrográfica.

Desta forma, com base no desnível específico calculado para cada bacia hidrográfica, adota-se a seguinte classificação:

R1	Relevo muito suave	$D_s < 10$ m
R2	Relevo bastante suave	$10 < D_s < 25$ m
R3	Relevo suave	$25 < D_s < 50$ m
R4	Relevo moderado	$50 < D_s < 100$ m

R5	Relevo forte	$100 < Ds < 250$ m
R6	Relevo bastante forte	$250 < Ds < 500$ m
R7	Relevo muito forte	$Ds > 500$ m

Segundo NOUVELOT (1974) uma região climatologicamente homogênea depende, essencialmente, da aptidão do terreno de deixar penetrar as precipitações e o principal critério para diferenciar as características do solo e do sub-solo é o conhecimento da permeabilidade.

As características dos solos podem também ser incorporadas aos modelos de regionalização, tendo em vista a relação existente com o escoamento superficial. Essas características podem ser muito bem retratadas através da permeabilidade e profundidade dos solos que compõem a bacia hidrográfica.

Para o Nordeste brasileiro, a SUDENE desenvolveu estudo em que caracterizou os solos quanto às características acima citadas. Este estudo resultou no mapa temático de classificação hidrológica dos solos, na escala 1: 2.500.000 confeccionado por ocasião do Plano de Aproveitamento Integrado dos Recursos Hídricos do Nordeste do Brasil-PLIRHINE, em 1978.

Para definição dos grupos hidrológicos de solos foram utilizadas as normas do "Bureau of Reclamation", que preconizam o uso da permeabilidade e da profundidade dos solos como parâmetros básicos. O estudo destas propriedades foi realizado com base nas características dos perfis representativos de classes de solos apresentadas nos relatórios de levantamento realizados na região Nordeste. O fator profundidade do solo, também decisivo para o estabelecimento dos grupos hidrológicos, foi considerado segundo o Manual de Método de Trabalho de Campo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo-SBCS (SUDENE, 1978).

Considerando os dois fatores, permeabilidade e profundidade dos solos, em conjunto, foram estabelecidos os grupos e sub-grupos hidrológicos dos solos, segundo as definições abaixo:

Grupo A- solos com potencial mínimo de escoamento superficial (muito profundos, de permeabilidade muito rápida a rápida);

Grupo B- solos com potencial moderado de escoamento superficial (medianamente profundos, de permeabilidade rápida a moderadamente rápida);

Grupo C- solos com potencial elevado de escoamento superficial (profundo a rasos, com permeabilidade moderada a moderadamente lenta);

Grupo D- solos com potencial máximo de escoamento superficial (rasos a muito rasos, com permeabilidade lenta a muito lenta).

Nestes estudos as frações de solo tipo A, B, C e D existentes nas bacias hidrográficas foram correlacionadas com os valores de vazões observadas e assim foi possível utilizar a variável solo nos modelos de regionalização.

Capítulo 4

DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL divide a bacia do rio São Francisco em nove sub-bacias, sendo a região estudada a que compreende as sub-bacias 46, 47, 48 e 49, localizada entre os paralelos 36°17'24'' e 46°35'24'' de latitude sul e os meridianos 7°16'12'' e 14°06'00'' de longitude WGr.

Com aproximadamente 320 mil km², o que corresponde a 50% da área da bacia do rio São Francisco, estas sub-bacias pertencem às regiões fisiográficas do Médio Inferior (sub-bacia 46 e parte da 47), Submédio (parte da sub-bacia 47 e sub-bacia 48) e Baixo São Francisco (sub-bacia 49), estando situada completamente na região Nordeste e abrangendo os estados da Bahia, Pernambuco, Alagoas e Sergipe. Na Figura 4.1 apresentam-se as regiões fisiográficas e as sub-bacias estudadas.

É importante salientar que grande parte da área estudada está inserida no Polígono das Secas e por esta razão apresenta períodos críticos de prolongadas estiagens.

As sub-bacias 47, 48 e 49 estão totalmente inseridas neste Polígono, além de parte da sub-bacia 46, situada à margem direita do rio São Francisco. Estas áreas apresentam diferentes índices de aridez, indo desde características de estritamente seca, com paisagem de semi-deserto a áreas com balanço hídrico positivo. A região fora do Polígono apresenta características físicas e hidrológicas bem diferente do restante da área de estudo.

A Figura 4.2 é apresentada a bacia do rio São Francisco em relação aos estados brasileiros e ao Polígono das Secas (CODEVASF, 2002).

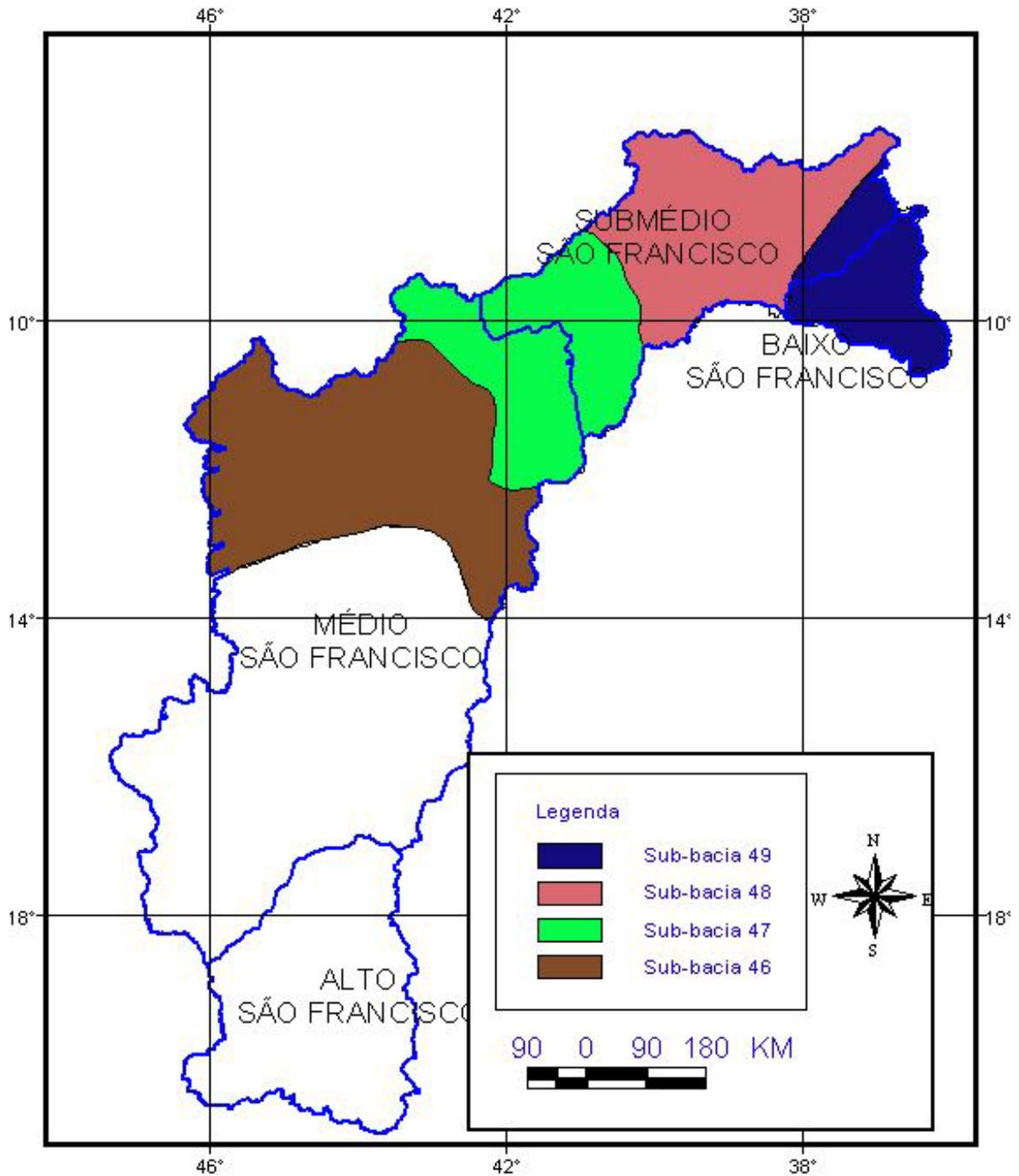


Figura 4.1: Regiões fisiográficas e as sub-bacias do rio São Francisco.

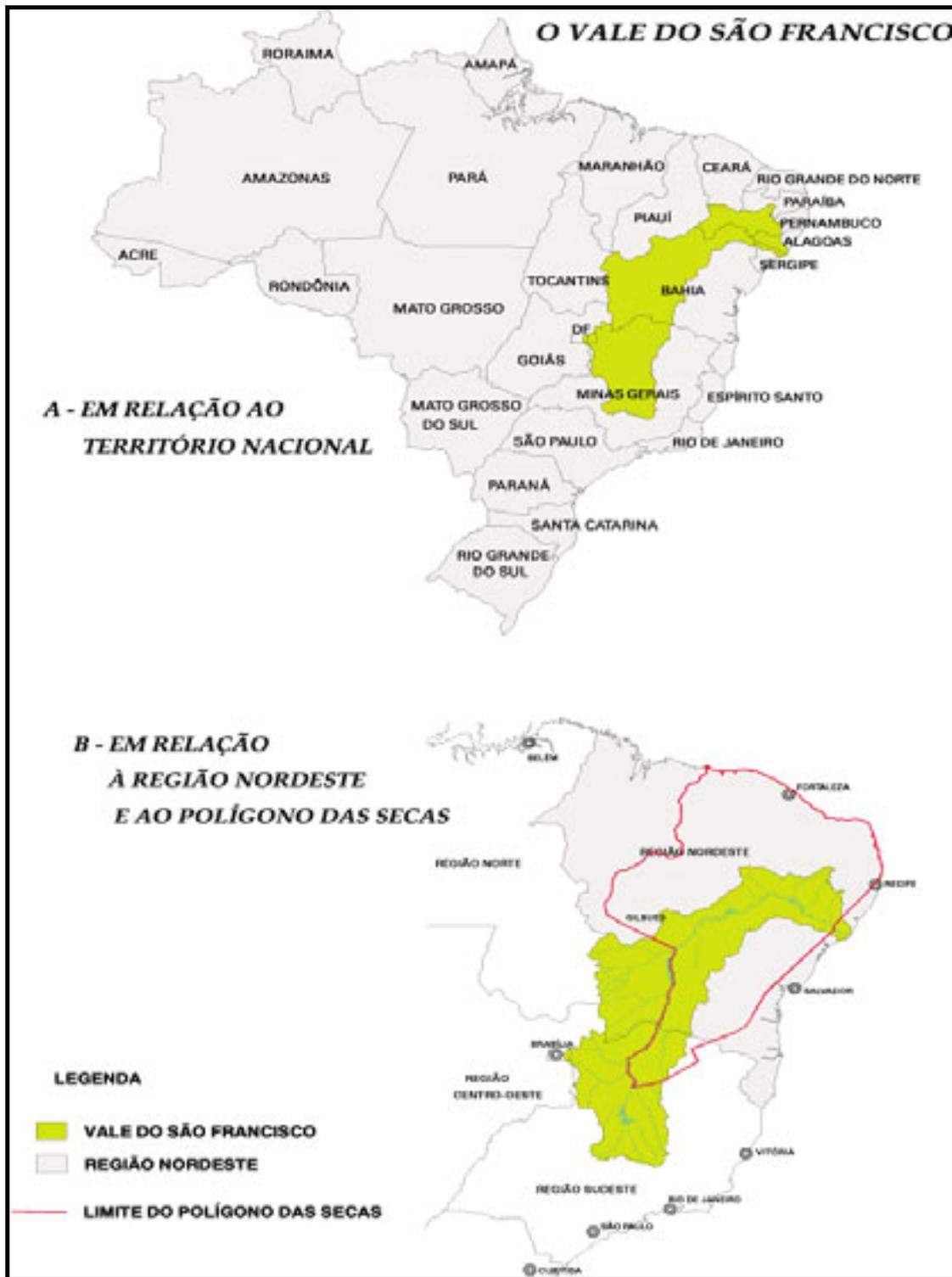


Figura 4.2: Bacia do rio São Francisco em relação ao Polígono das Secas

A seguir são descritas as principais características da região estudada (CODEVASF, 2002; ANA, 2002).

4.1 GEOPOLÍTICA

Como citado anteriormente, dentro da área que abrange as sub-bacias 46 a 49 da bacia do rio São Francisco estão os estados da Bahia, Pernambuco, Alagoas e Sergipe.

Suas respectivas áreas, populações e municípios dentro da região estudada são apresentados na Tabela 4.1 (CODEVASF, 2002).

Tabela 4.1: Área do estado na bacia do rio São Francisco, população e municípios dentro das sub-bacias 46,47, 48 e 49.

Estado	Área total do estado (km ²)	Área do estado na bacia (km ²)	População do estado nas sub-bacias	Municípios dentro das sub-bacias
Bahia	567.295,3 ⁽¹⁾	331.724,7 ⁽¹⁾	2.711.800 ⁽¹⁾	114 ⁽¹⁾
Pernambuco	98.937,8	71.973,8	1.625.110	65
Alagoas	27.933,1	16.225,2	1.010.743	49
Sergipe	22.050,3	8.689,8	296.137	27

Fontes: FIBGE - 1997, Malha Municipal do Brasil - 1997 e SUDENE – 1999.

(1) nos dados apresentados estão incluídos os valores de outras sub-bacias do rio São Francisco.

4.2 RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIAIS

Na região do *Médio Inferior* o rio Grande é o principal afluente do São Francisco e o único com regime permanente de vazão dentro da região estudada, sendo todos os outros tributários a jusante deste considerados praticamente rios intermitentes. Recebendo contribuição do rio Preto e de outros de porte menor,

ele percorre uma extensão de aproximadamente 480 km, drenando mais da metade da área desta sub-bacia 46.

Na região fisiográfica do *Submédio* está localizada a represa de Sobradinho com sua usina hidroelétrica (UHE), além da UHE de Itaparica, Moxotó e Paulo Afonso, todas no rio São Francisco. Destacam-se nesta região os rios intermitentes do Polígono das Secas que secam e produzem grandes torrentes, condicionadas pela pluviosidade. Dentre estes, os rios Jacaré e Salitre, no estado da Bahia, na margem direita do rio São Francisco e os pernambucanos Pajeú e Moxotó, na margem esquerda, podem ser destacados pela extensão que percorrem dentro da bacia.

No *Baixo São Francisco* localiza-se a UHE de Xingó e nesta área destaca-se o rio Ipanema, pela margem esquerda do São Francisco.

Segundo o Projeto Áridas, citado em KYRILLOS (2000), a disponibilidade hídrica da região Nordeste é de 97,3 bilhões de m³/ano, sendo 92,9 oriundos de águas superficiais e desses, 87,4 bilhões devidos a rios perenes, sendo o rio São Francisco responsável por 73% da disponibilidade superficial garantida ao Nordeste, face à sua perenidade. Ainda segundo o Áridas, da capacidade de acumulação total de água superficial, 59,8% se localizam no rio São Francisco, através dos lagos de Sobradinho (34,1 bilhões), Itaparica (11,8 bilhões), Xingó (3,8 bilhões) e Moxotó (1,2 bilhões).

4.3 GEOMORFOLOGIA

Do *Médio Inferior* até à divisa com o Maranhão e o Piauí, os chapadões constituem as feições predominantes, com vertentes sulcadas por vales profundos. As altitudes situam-se entre 800 e 900m.

Na Bahia, a Planície Sertaneja torna-se mais larga e neste trecho o rio São Francisco passa a apresentar meandros ao percorrer extensas planícies aluviais. À altura de Remanso, o curso torna-se encaixado, com cachoeiras, resultado das formações acentuadas de altitudes.

Ao norte, no *Sub-médio*, diversas chapadas em Alagoas e Pernambuco dividem suas águas com as dos rios que descem para o litoral daqueles Estados.

No Baixo Curso, aproximando-se da foz e do nível de base, o rio perde a velocidade e dá origem a depósitos sedimentares.

4.4 CLIMA E VEGETAÇÃO

A região do *Médio Inferior* caracteriza-se por chuvas que caem de novembro a abril, com precipitação média anual de 600 a 1.400 mm, a temperatura média anual é de 24°C e a evapotranspiração é de 2.900 mm anuais. A vegetação é do tipo cerrado e caatinga, salvo algumas matas serranas. É bastante marcante a diferenciação de características da margem esquerda do São Francisco, bem mais úmida, com rios permanentes e vegetação perenifólia e a margem direita, com precipitação menor, rios intermitentes e vegetação típica de caatinga. Nesta região suas condições climáticas vão se tornando mais características de uma região tropical semi-árida, pela proximidade do Polígono das Secas.

No *Submédio* a precipitação média anual chega a 350 mm na região de Juazeiro/Petrolina e a máxima é de 800 mm, nas serras divisórias com o Ceará. A temperatura média é de 27°C, a evapotranspiração é da ordem de 3.000 mm anuais, a caatinga predomina em quase toda a área e o clima é tipicamente semi-árido.

O semi-árido é uma das seis grandes zonas climáticas do Brasil e se caracteriza-se por apresentar escassez de chuvas, irregularidade e concentração das precipitações pluviométricas num curto período de três meses, durante o qual ocorrem com grande intensidade e pequena duração. Nesta zona as temperaturas são elevadas, a caatinga predomina em áreas com isoietas anual de 800 mm, situando-se, majoritariamente, na região Nordeste e estendendo-se até o norte de Minas Gerais, até o que foi legalmente definido como Polígono das Secas, mas não correspondendo a ele.

No *Baixo São Francisco* a temperatura média anual varia em torno de 25°C, a evapotranspiração é de 2.300 mm anuais e a precipitação média anual varia de 800 a 1.300 mm, ocorrendo chuvas no período de março a setembro, ou seja, no inverno, enquanto no restante da bacia as chuvas se verificam no verão, sendo que nas proximidades do oceano se distribuem por todo o ano, embora mais concentradas no outono e inverno. A vegetação é de dois tipos: caatinga no trecho mais alto e mata na região costeira. Nesta região o clima é considerado tropical semi-úmido.

Em todas as sub-bacias em estudo predomina o trimestre mais chuvoso nos meses de novembro a janeiro, contribuindo com 55 a 60% da precipitação ocorrida no ano. O trimestre mais seco ocorre nos meses de junho a agosto.

4.5 SOLOS

No *Médio Inferior* dentro da região estudada os latossolos apresentam-se como predominantes. Verifica-se ainda, a presença de areias quartzosas e solos litólicos, sendo apenas os latossolos que apresentam boa aptidão agrícola.

Na região do *Submédio*, assim como ocorre mudança no clima e vegetação, os solos também se modificam bruscamente. Na parte superior do Submédio verificam-se como solos predominantes os latossolos e os cambissolos, mas em seguida predominam os brunos não cálcicos (concentrado na sub-bacia 48), os podzólicos, regossolos e as areias quartzosas. É neste trecho que os recursos de solos são mais escassos, pois os brunos não cálcicos são pouco profundos e muito susceptíveis à erosão e as areias quartzosas e os regossolos apresentam textura muito grosseira, com altas taxas de infiltração e baixa fertilidade.

No *Baixo São Francisco* ainda se apresentam os regossolos, os brunos não cálcicos e as areias quartzosas, sendo esse contexto modificado no curso inferior do rio São Francisco, onde surgem diferentes potenciais em recursos de solos. Neste trecho predominam podzólicos, latossolos, litossolos, areias quartzosas e hidromórficos. Os agricultáveis desta zona são os latossolos, podzólicos e

hidromórficos. Estes últimos se constituem no maior potencial agrícola do Baixo São Francisco, excetuando-se as unidades que apresentam problemas químicos.

Margeando todo o rio e seus afluentes encontra-se a faixa de solos aluviais, cuja utilização agrícola requer estudos detalhados devido à possibilidade de inundação.

Capítulo 5

REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES EM BACIAS AFLUENTES DO RIO SÃO FRANCISCO

Considerando a extensão da área objeto de estudo e o grande volume de informações disponíveis e necessárias à pesquisa, procurou-se seguir algumas etapas apontadas em bibliografias existentes (TUCCI, 1993; TUCCI, 2002) como fundamentais para o desenvolvimento do trabalho.

5.1 DADOS DESCRITIVOS

Nesta etapa determinou-se para as sub-bacias 46, 47, 48 e 49 as regiões fisiográficas pertencentes, a variação quanto ao clima, vegetação, relevo e solos. Além disso, foi possível a caracterização da hidrografia regional, observando os maiores afluentes do rio São Francisco, o regime de vazões e localização dos maiores reservatórios da bacia. Também foi possível avaliar a abrangência do Polígono das Secas e sua repercussão nas características físicas e hidrológicas da região estudada.

A descrição da área de estudo foi apresentada no Capítulo 4.

5.2 ANÁLISE E SELEÇÃO DE DADOS HIDROLÓGICOS

Os dados pluviométricos foram disponibilizados pela Secretaria de Recursos Hídricos do Estado de Pernambuco – SRH/PE, através de inventário cedido pelo extinto Departamento Nacional de Energia Elétrica- DNAEE (SRH/ 2000), e os dados de fluviométrica pela Agência Nacional de Energia Elétrica- ANEEL (ANEEL, 2001) e posteriormente, pela Agência Nacional de Águas- ANA (ANA, 2002).

As ferramentas computacionais utilizadas foram os programas HIDRO (ANEEL, 2000) e o programa RH 3.a (EUCLYDES et al., 1999), produto de um convênio entre o Ministério do Meio Ambiente e da Amazônia Legal- Secretaria de Recursos Hídricos com a Fundação Rural Mineira- RURALMINAS e a Universidade Federal de Viçosa-UFV.

O programa HIDRO 1.0.4 foi utilizado para selecionar as estações fluviométricas e pluviométricas disponíveis e o RH 3.a foi utilizado para o estudo de regionalização de vazões.

Os postos fluviométricos foram selecionados a partir dos seguintes critérios:

- estações localizadas em afluentes do Rio São Francisco que apresentassem séries com o mínimo de cinco anos de observações;
- estações que apresentassem postos pluviométricos associados.

Diante disto, foram selecionados 31 postos localizados nos afluentes do rio São Francisco entre as sub-bacias 46 e 49, com séries de vazões variando de 10 a 61 anos de observações.

Em relação aos postos pluviométricos foram selecionados aqueles que:

- apresentassem séries históricas de pelo menos 15 anos de registros;
- estivessem situados no interior ou nas proximidades das sub-bacias contribuintes aos postos fluviométricos selecionados.

Diante dos critérios estabelecidos foram utilizados 384 postos pluviométricos de 691 existentes na área compreendida entre as sub-bacias 46 e 49 do rio São Francisco.

A partir da definição dos postos fluviométricos a serem utilizados na regionalização foi possível a delimitação de suas respectivas bacias de drenagem e a determinação dos parâmetros fisiográficos e hidrológicos a serem utilizados nos modelos de regressão.

A Figura 5.1 apresenta a disponibilidade de dados fluviométricos para a região em estudo. Na Figura 5.2 e na Figura 5.3 são apresentadas a distribuição espacial dos postos fluviométricos e pluviométricos na área em estudo, respectivamente.

Na Figura 5.4 observa-se as bacias contribuintes aos postos fluviométricos selecionados.

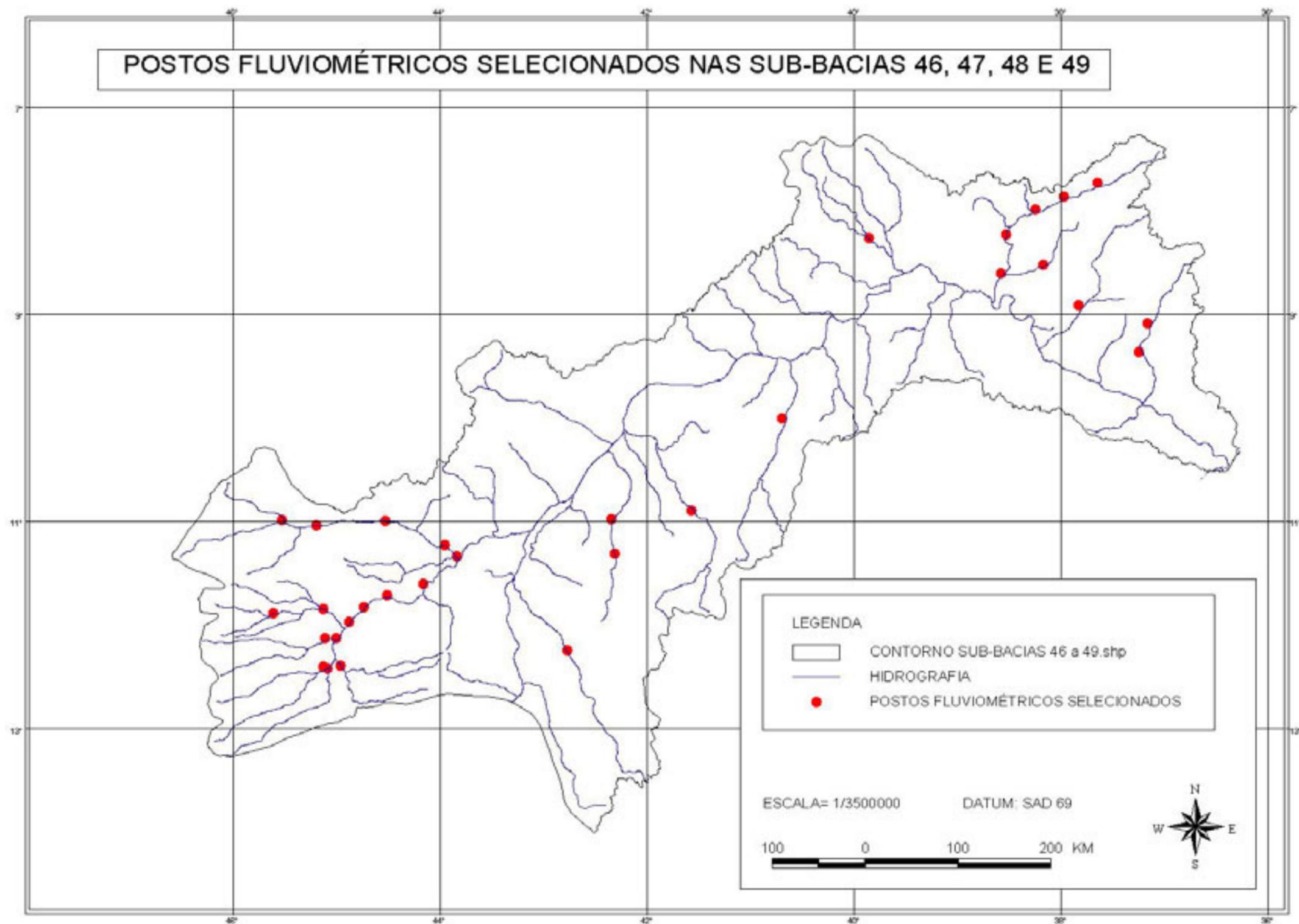


Figura 5.2: Distribuição espacial dos postos fluviométricos selecionados

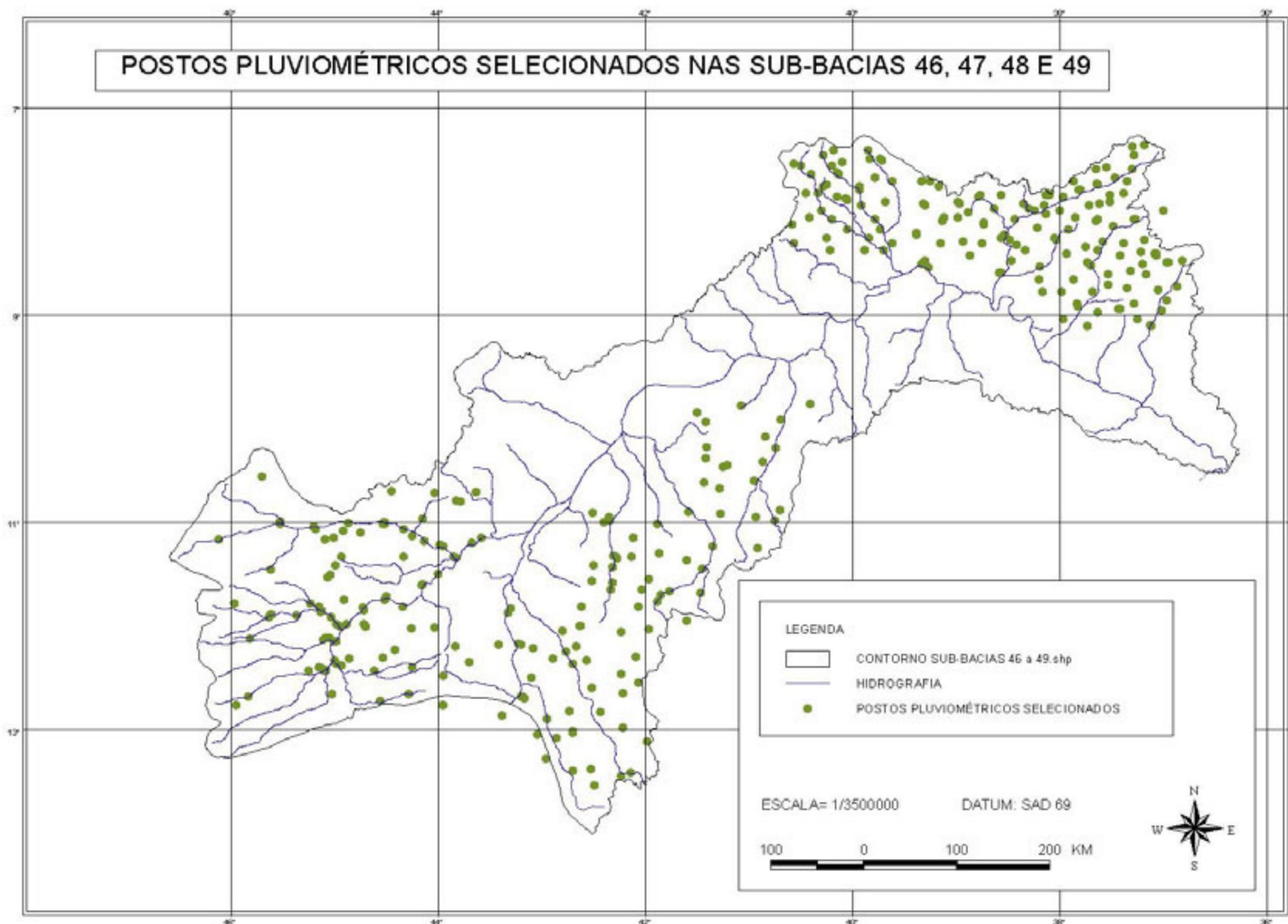


Figura 5.3: Distribuição espacial dos postos pluviométricos selecionados

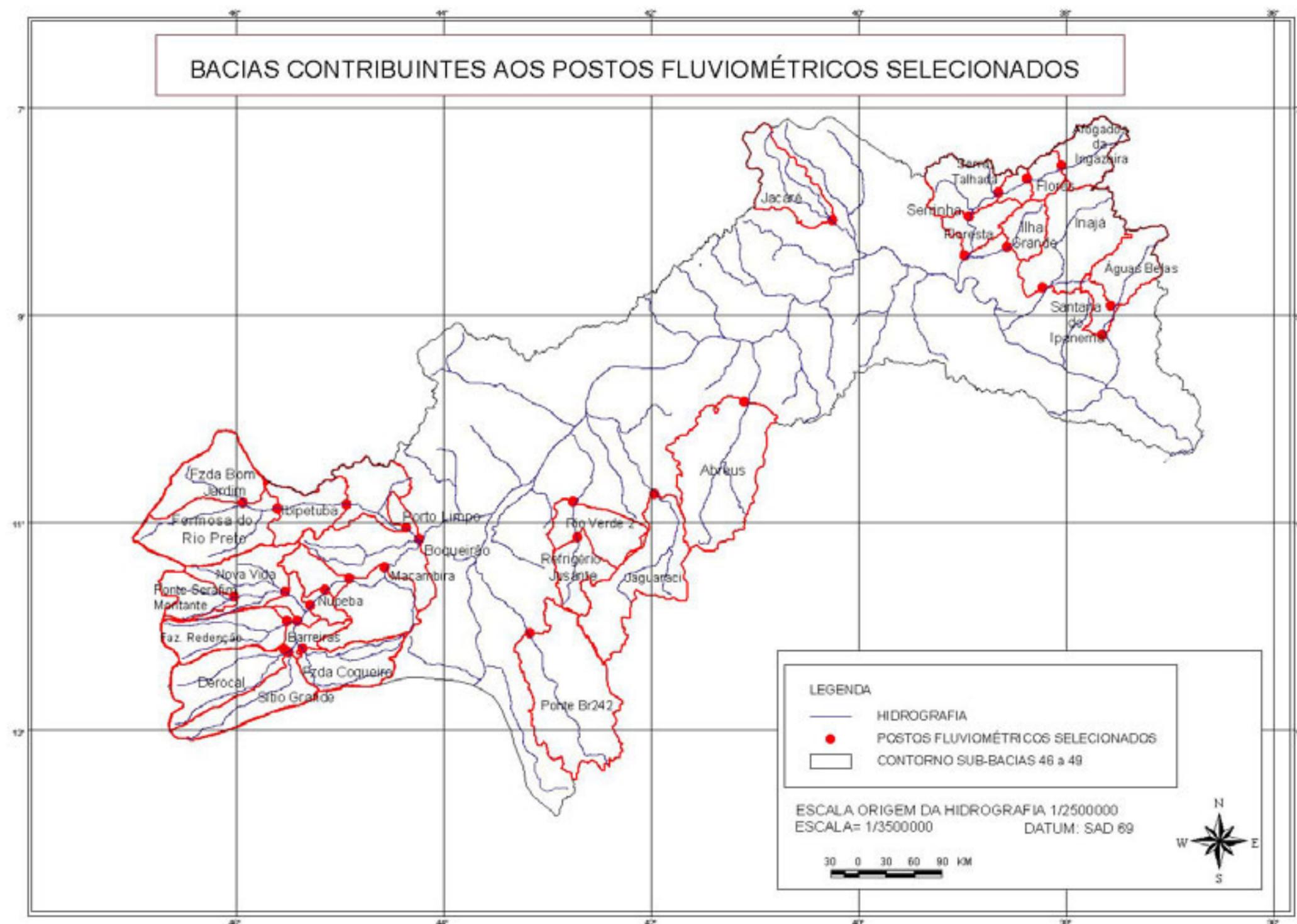


Figura 5.4: Bacias contribuintes aos postos fluviométricos selecionados

Como pode ser observado, alguns postos fluviométricos localizados na sub-bacia 46 possuem dados a partir da década de 30, mas a maioria inicia seu período de observações em 1977, enquanto os das sub-bacia 47, 48 e 49 possuem séries históricas iniciando na década de 60 e 70. Além disso, há uma maior concentração destes postos a oeste da bacia 46, enquanto que nas outras este número é bem mais reduzido.

Quanto aos postos pluviométricos verifica-se o inverso, ou seja, existe menor densidade a oeste da sub-bacia 46 e maior no restante das bacias estudadas. É importante salientar que os postos pluviométricos apresentados na Figura 5.3 foram selecionados para áreas onde existem postos de vazão, o que explica a ausência destes na grande parte da área estudada.

Após seleção dos postos fluviométricos e a análise das séries históricas de cada posto passou-se para a etapa de preenchimento de falhas e extensão das séries. Esta etapa foi realizada no RH 3.a, onde para o preenchimento de falhas de vazão mínima, máxima e média anuais o programa utiliza a regressão simples (linear ou potencial) entre as estações, sendo escolhida a com maior coeficiente de correlação (R^2) para a extensão/preenchimento da série (EUCLYDES et al., 1999).

5.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E HIDROLÓGICA DAS BACIAS UTILIZADAS NA REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES

A caracterização fisiográfica das bacias contribuintes aos postos fluviométricos selecionados foi feita com o suporte de técnicas de geoprocessamento, em especial do Sistema de Informações Geográficas-SIG e o Modelo Digital do Terreno- MDT. Para isso foi utilizado o software GIS versão 3.2a, suas extensões ArcView 3D Analyst e Spatial Analyst da Environmental Systems Research Institute- ESRI (ESRI, 1996a e 1996b).

Para compor a hidrografia e hipsometria das bacias 46 a 49 foram processadas 292 cartas na escala 1:100.000, fornecidas pela Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba- CODEVASF.

5.3.1 Variáveis explicativas principais

As variáveis explicativas foram determinadas para cada bacia contribuinte ao posto fluviométrico selecionado e, posteriormente, procedeu-se a obtenção das outras características citadas no item 3.3.

A partir da rede hidrográfica e das curvas de nível foi possível determinar para cada posto fluviométrico selecionado: a área da bacia contribuinte (A), o comprimento (Cr) e a declividade média (Dr) do rio principal, a densidade de drenagem (Dd) e o desnível (D).

As áreas das bacias contribuintes aos postos fluviométricos selecionados (A) foram calculadas no software ArcView, assim como o perímetro das mesmas, pela análise da hidrografia e da hipsometria da região estudada.

O comprimento do rio principal (Cr) de cada bacia traçada foi elaborado a partir da análise da rede hidrográfica na escala 1: 100.000, tomando como referência a hidrografia em escala menor (ANEEL, 2000/CD-ROM) e obedecendo a definição descrita em TUCCI (2002).

Como o mapa de hipsometria utilizado apresenta curvas de nível de 40 em 40 metros foi possível a obtenção da declividade média do rio principal pela média de cada trecho.

A partir do Modelo Digital do Terreno- MDT calculou-se a diferença de nível entre duas curvas consecutivas, dividindo-a pelo comprimento plano do segmento. Dessa forma, a declividade média do rio principal foi obtida pela média ponderada das declividades de todos os trechos que o compõem.

Os comprimentos de todos os rios contribuintes das bacias foram calculados por operações de geoprocessamento, sendo posteriormente feito o somatório e a divisão pela respectiva área de drenagem da bacia correspondente, obtendo-se a densidade de drenagem das bacias contribuintes.

O desnível das bacias em questão foi obtido levando em consideração o exposto por NOUVELOT (1974). A obtenção do desnível da bacia é feita por subtração das curvas de nível H_5 e H_{95} , que representam aproximadamente as altitudes para as quais 5% da área da bacia está abaixo e 5% acima, como já explicado.

Para a caracterização hidrológica das bacias contribuintes aos postos fluviométricos selecionados trabalhou-se com as séries de valores diários de precipitação nos postos pluviométricos inseridos nas bacias contribuintes, determinando-se a precipitação média de longo período a partir dos totais anuais e a precipitação máxima como sendo a média dos valores máximos diários em cada ano em cada posto.

Por operações de geoprocessamento espacializou-se por intermédio dos polígonos de Thiessen a precipitação média e máxima para cada bacia contribuinte ao posto fluviométrico selecionado.

A Figura 5.5 mostra como exemplo o Polígono de Thiessen definido pelo software ArcView 3.2a para determinação da precipitação média numa sub-bacia controlada por um posto fluviométrico em estudo.

Além de compreender os dados de precipitação, a caracterização hidrológica envolve o comportamento das vazões ao longo do tempo. As vazões médias das mínimas (Q_{\min}), a média das máximas (Q_{\max}) e a média de longo período (Q_{med}) foram estimadas no software RH 3.a, após à extensão e preenchimento de falhas das séries históricas.

Na prática pouca utilidade tem a vazão mínima diária. Deve-se então estabelecer período onde se observam os menores valores de vazões. Normalmente,

durações com 7 ou 30 dias consecutivos de valores mínimos tem mais interesse, visto que a seqüência dessas vazões representa situação desfavorável para o atendimento de demanda ou para condições de conservação ambiental.

Utilizou-se a opção de cálculo do Q_7 - vazão mínima anual para 7 dias consecutivos, sendo esta a média dos 7 menores valores diários consecutivos de vazão em cada ano, determinando-se a vazão média das mínimas (EUCLYDES, et al., 1999). Daí, é possível estabelecer posteriormente, associação com o tempo de retorno e obter o Q_{7-10} , por exemplo, relativo ao tempo de retorno de 10 anos.

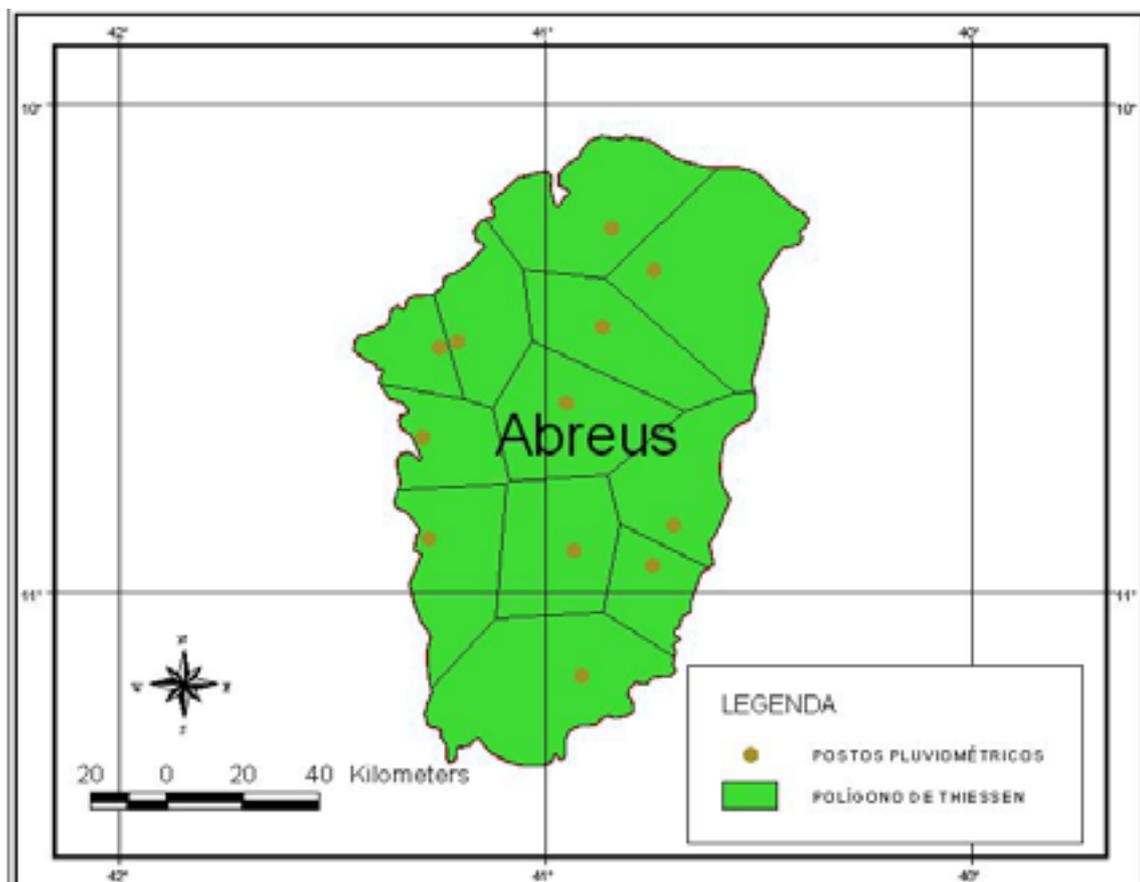


Figura 5.5: Polígono de Thiessen definido pelo software ArcView- estação fluviométrica Abreus

A Tabela 5.1 mostra os valores das precipitações médias dos totais anuais e a precipitação máxima diária em cada bacia, assim como os valores de vazões mínimas, máximas e médias observadas nos postos fluviométricos.

Tabela 5.1: Valores de precipitações, vazões mínimas de 7 dias, máximas e médias nas bacias contribuintes aos postos fluviométricos.

Código	Estação	Pta (mm)	Pmd (mm)	Q ₇ (m ³ /s)	Q _{med} (m ³ /s)	Q _{max} (m ³ /s)
46295000	Ponte BR-242	760	152	0	7,49	294
46415000	Sítio Grande	1019	168	18	34,54	104
46455000	Derocal	1023	106	29,86	57,73	214
46490000	Fazenda Coqueiro	913	150	0	4,67	72
46543000	Fazenda Redenção	930	120	26,57	50,25	136
46550000	Barreiras	1064	138	51,43	109	372
46570000	Ponte Serafim -montante	1029	102	5,00	11,94	56
46590000	Nova Vida montante	841	101	35,86	47,46	176
46610000	São Sebastião	1042	124	116	191	450
46620000	Nupeba	1035	124	108	177	442
46650000	Taguá (Campo Largo)	1023	122	103	180	624
46675000	Fazenda Macambira	1014	126	106	184	456
46770000	Fazenda Bom Jardim	900	101	24,86	31,84	66
46790000	Formosa do Rio Preto	891	155	50,00	93,19	308
46830000	Ibipetuba	883	206	44,29	91,18	368
46870000	Fazenda Porto Limpo	909	162	64,00	91,65	475
46902000	Boqueirão	969	138	159	272	1044
47236000	Fazenda Refrigério	741	164	0	1,38	134
47249000	Fazenda Rio Verde II	671	158	0	3,45	301
47480000	Jaguaraci	568	131	0	0,44	43
47900000	Abreus	388	159	0	0,38	16

Código	Estação	Pta (mm)	Pmd (mm)	Q ₇ (m ³ /s)	Q _{med} (m ³ /s)	Q _{max} (m ³ /s)
48460000	Jacaré	550	160	0	3,26	220
48820000	Afogados da Ingazeira	546	151	0	2,87	628
48830000	Flores (DNOCS)	545	134	0	8,77	1495
48840000	Serra Talhada	595	135	0	13,08	1995
48850000	Serrinha	632	132	0	13,36	2506
48860000	Floresta	614	136	0	19,41	2521
48880000	Ilha Grande	467	112	0	1,4	858
49160000	Inajá	456	162	0	3,26	714
49480000	Águas Belas	567	133	0	2,54	244
49490000	Santana do Ipanema	581	172	0	3,45	444

Legenda: Q₇ - vazão mínima observada com 7 dias de permanência; Q_{med} - vazão média de longo período; Q_{max} - vazão máxima observada; Pta - precipitação média dos totais anuais e Pmd - precipitação máxima diária.

Vale ressaltar que, a maioria dos rios que cortam as sub-bacias 47, 48 e 49 é intermitente, apresentando longos períodos com valores nulos de vazão. Ao contrário, na sub-bacia 46 os rios são permanentes e possuem um regime contínuo.

5.3.2 Novas variáveis explicativas

Objetivando alcançar melhores resultados para as equações de regionalização buscou-se a introdução de outras variáveis explicativas.

O desnível específico (Ds) e a fração de solos (% solo A, % solo B, % solo C e % solo D), segundo a classificação hidrológica, foram as duas novas variáveis explicativas introduzidas nos modelos de regionalização.

Para determinação do desnível específico (NOUVELOT, 1974) das bacias foi utilizado o Modelo Digital do Terreno- MDT e por técnicas de geoprocessamento foram extraídas informações necessárias ao seu cálculo. No item 3.5 é mostrado como esta variável pode ser obtida.

Visando contemplar características do solo e sub-solo nos modelos de regionalização de vazões buscou-se a extração de informações a partir do mapa temático de classificação hidrológica dos solos elaborado pela SUDENE em 1978, na escala 1: 2.500.000 por ocasião do Plano de Aproveitamento Integrado dos Recursos Hídricos do Nordeste do Brasil- PLIRHINE.

Diversas combinações destes quatro tipos de solos foram apresentadas dentro das unidades mapeadas e a denominação do grupo foi feita de acordo com os percentuais existentes em cada unidade.

Na Figura 5.6 é apresentado o mapa de classificação hidrológica dos solos para as sub-bacias 46 a 49. Este mapa mostra o trabalho original da SUDENE com todos os grupos de solos encontrados nas unidades mapeadas.

Para melhor entendimento deste mapa, segue abaixo a Tabela 5.2 com a definição dos grupos.

Tabela 5.2: Tabela com a classificação hidrológica dos solos, segundo PLIRHINE (1978).

Grupos isolados- estimativa de ocorrência do grupo em mais de 75% da área	
A	Solos com potencial mínima de escoamento superficial
B	Solos com potencial moderado de escoamento superficial
C	Solos com potencial elevado de escoamento superficial
D	Solos com potencial máximo de escoamento superficial
Grupos associados	
A-D; B-C; C-D; D-A; D-B; D-C	Cada componente ocupando de 40 a 55% da área

A-(B); A(C); B(A); B(C); B(D); D(A); D(B); D(C)	Cerca de 60 a 75% para o primeiro componente e de 40 a 25% para o segundo
A-B(D); A-C(D); B-C(D); C-D(B); D-C(B)	Cerca de 35 a 45% para cada um dos dois primeiro componentes e de 15 a 25% para o último
B(D-C)	Cerca de 55 a 65% para o primeiro componente e de 15 a 25% para cada um dos dois últimos componentes

Como a classificação hidrológica dos solos sugerida pelo referido trabalho é bastante minuciosa, acarretando em várias combinações com percentuais muito pequenos, houve a necessidade de classificá-los segundo o grupo predominante. Sendo assim, apenas solos do tipo A, B, C e D permaneceram nesta nova apresentação do mapa, que pode ser verificada através da Figura 5.7.

Em ambiente de SIG este mapa temático permitiu a interseção com os polígonos das bacias contribuintes, possibilitando o cálculo dos percentuais de cada tipo de solo encontrado nas bacias em questão.

Todas as características físicas e hidrológicas das bacias utilizadas na definição dos modelos de regionalização foram introduzidas no RH 3.a, avaliando-se o parâmetro que mais influência exerce no modelo.

Na Tabela 5.3 são relacionadas as características físicas das bacias contribuintes aos postos fluviométricos selecionados.

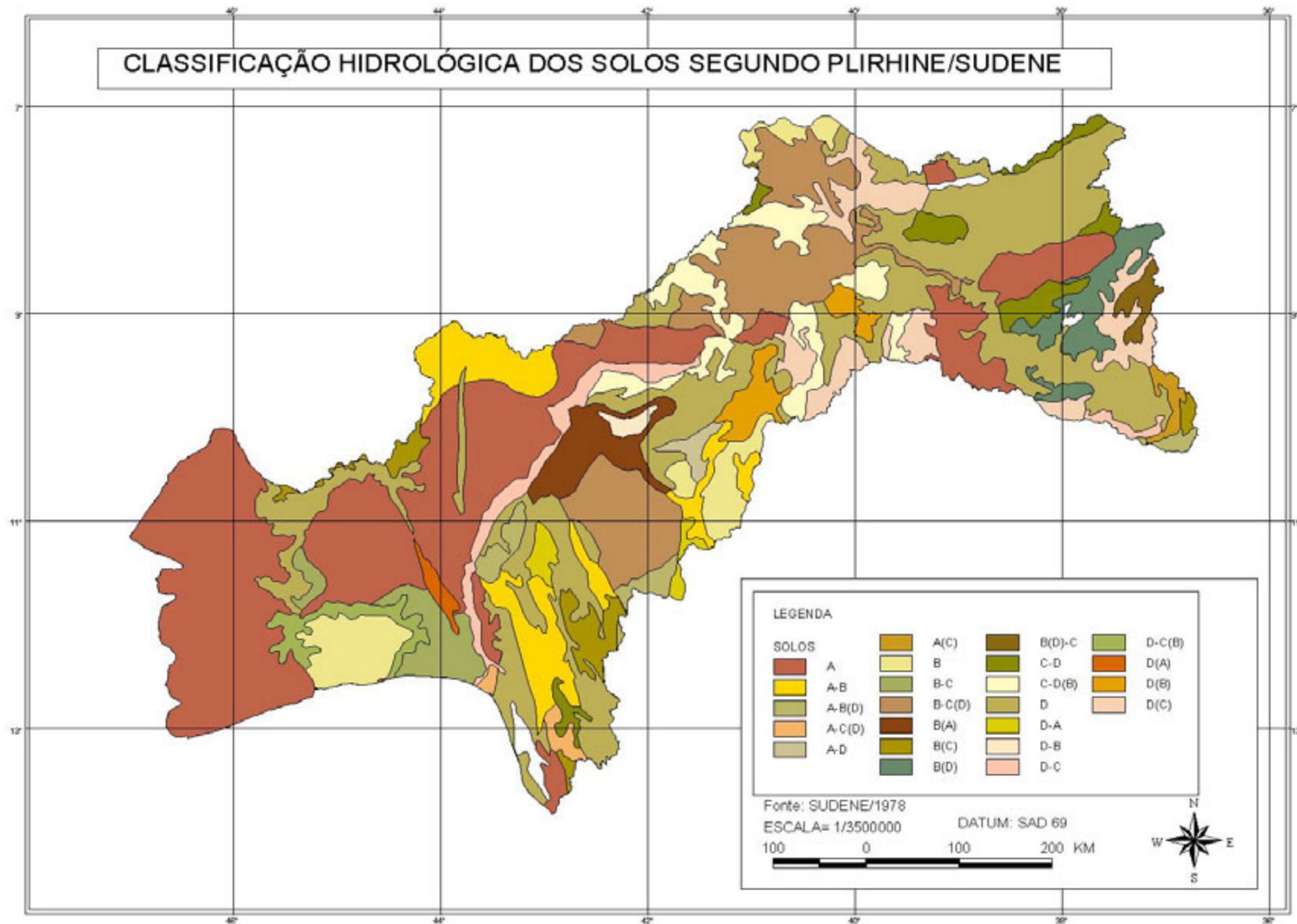


Figura 5.6: Classificação hidrológica dos solos nas sub-bacias 46 a 49 segundo PLIRHINE/ SUDENE

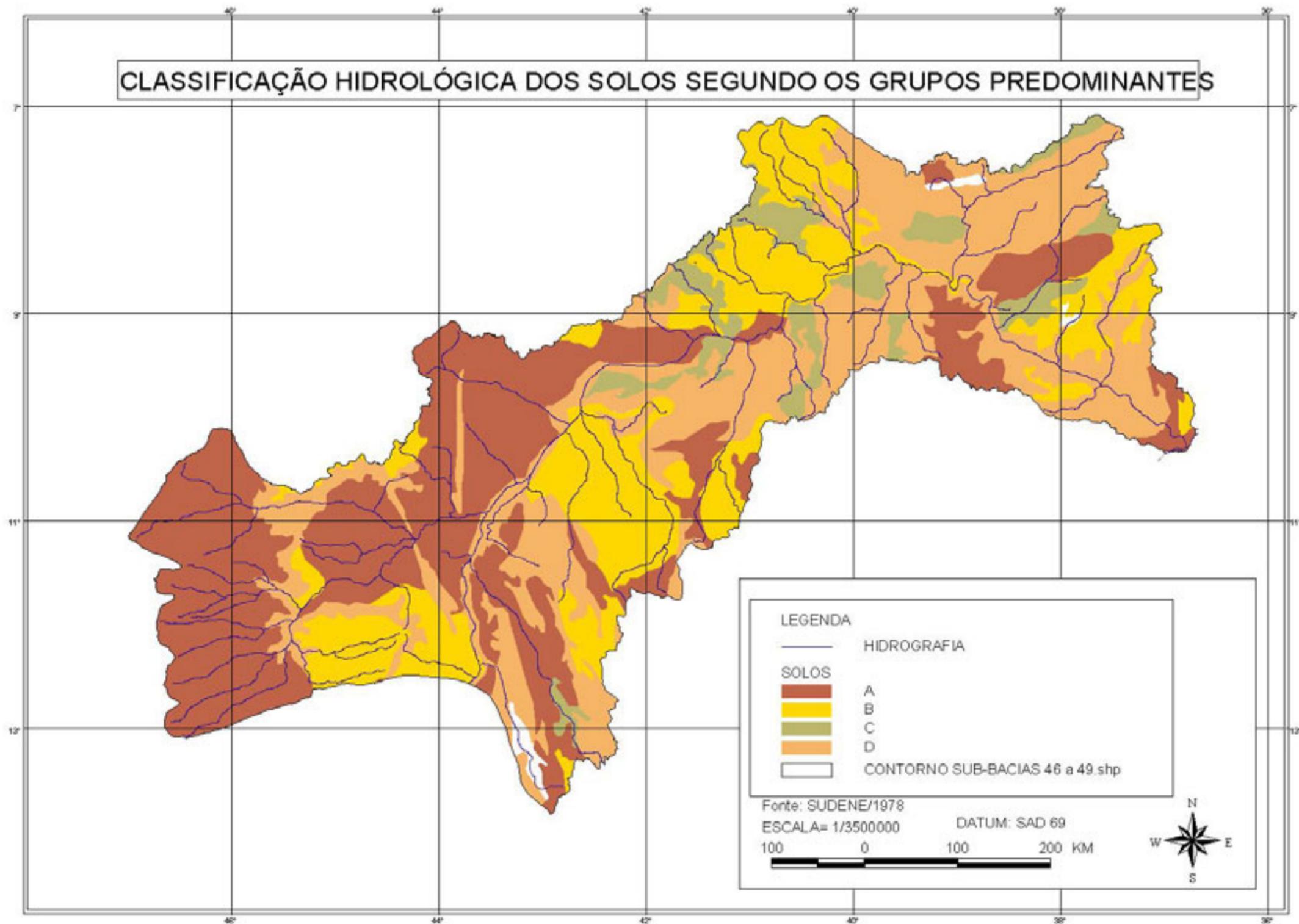


Figura 5.7: Classificação hidrológica dos solos nas sub-bacias 46 a 49 segundo os grupos predominantes

Tabela 5.3: Características físicas das bacias contribuintes aos postos fluviométricos selecionados.

Sub-bacia	Código posto fluviométrico	Nome da bacia Contribuinte ao posto	A (km ²)	Cr (km)	Dr (m/km)	Dd (km/km ²)	D m	Ds (m)	FRAÇÃO Solo A	FRAÇÃO Solo B	FRAÇÃO Solo C	FRAÇÃO Solo D
46	46295000	Ponte Br-242	12 681,01	222,84	4,713	0,700	776	324,99	0,44	0,11	0,08	0,37
	46415000	Sítio Grande	4 652,33	192,58	1,953	0,234	182	73,38	0,98	0	0	0,02
	46455000	Derocal	5 951,20	152,23	2,685	0,203	222	116,90	0,98	0	0	0,02
	46490000	Fazenda Coqueiro	4 407,52	149,82	2,132	0,269	148	78,15	0,04	0,88	0	0,08
	46543000	Fazenda Redenção	5 148,83	160,22	2,249	0,278	251	133,38	0,96	0	0	0,04
	46550000	Barreiras	21 697,76	239,81	1,888	0,266	225	93,11	0,72	0,21	0	0,07
	46570000	Ponte Serafim- montante	2 590,01	74,52	1,092	0,148	90	47,82	1	0	0	0
	46590000	Nova Vida- montante	7 298,02	142,66	2,562	0,225	314	148,87	0,94	0	0	0,06
	46610000	São Sebastião	30 264,04	273,57	1,675	0,271	290	114,45	0,75	0,16	0	0,09
	46620000	Nupeba	31 267,77	312,20	1,448	0,402	331	134,51	0,74	0,16	0	0,1
	46650000	Taguá	33 243,08	354,22	1,337	0,296	373	165,73	0,71	0,18	0	0,11
	46675000	fazenda Macambira	38 817,07	417,46	1,339	0,319	369	209,63	0,66	0,22	0	0,12
	46770000	Fazenda Bom Jardim	5 629,60	114,31	2,207	0,220	195	109,73	1	0	0	0
	46790000	Formosa do Rio Preto	13 420,91	213,01	1,356	0,272	257	183,27	0,96	0	0	0,04
	46830000	Ibipetuba	17 402,10	329,14	1,464	0,410	320	164,06	0,81	0,02	0	0,17
	46870000	Fazenda Porto Limpo	21 122,05	437,87	1,211	0,448	352	127,28	0,77	0,03	0	0,2
46902000	Boqueirão	67 170,36	498,84	0,907	0,376	376	188,40	0,72	0,14	0	0,14	
47	47236000	Faz. Refrigério- Jusante	3 096,45	100,54	5,410	0,717	741	316,80	0,22	0,16	0	0,62

Sub-bacia	Código posto fluviométrico	Nome da bacia Contribuinte ao posto	A (km ²)	Cr (km)	Dr (m/km)	Dd (km/km ²)	D m	Ds (m)	FRAÇÃO Solo A	FRAÇÃO Solo B	FRAÇÃO Solo C	FRAÇÃO Solo D
	47249000	Fazenda Rio Verde II	7 355,31	155,36	3,867	0,502	695	345,01	0,11	0,47	0	0,42
	47480000	Jaguaraci	9 018,22	250,61	13,746	0,370	497	176,97	0,22	0,64	0	0,14
	47900000	Abreus	11 871,97	276,98	2,122	0,325	457	230,39	0,35	0,39	0	0,26
48	48460000	Jacaré	5 051,60	192,97	2,790	0,436	390	172,32	0	0,72	0,24	0,04
	48820000	Afogados da Ingazeira	3 544,58	99,82	2,610	0,960	230	108,22	0	0	0,21	0,79
	48830000	Flores	4 990,69	154,39	2,141	1,026	281	119,06	0	0	0,3	0,7
	48840000	Serra Talhada	5 933,40	207,18	1,660	1,030	312	118,14	0	0	0,29	0,71
	48850000	Serrinha	9 952,04	265,09	1,477	0,971	314	93,56	0,07	0	0,22	0,68
	48860000	Floresta	12 318,34	326,75	1,552	0,922	351	107,30	0,05	0	0,27	0,65
	48880000	Ilha Grande	2 253,80	81,26	6,537	0,844	226	138,48	0,02	0	0,36	0,62
49	49160000	Inajá	8 248,06	170,63	1,871	0,800	381	164,16	0,4	0,02	0,2	0,38
	49480000	Águas Belas	3 910,93	119,71	2,255	0,740	489	226,91	0,05	0,70	0	0,25
	49490000	Santana do Ipanema	5 154,20	163,73	2,852	0,844	507	202,36	0,05	0,68	0,02	0,25

Legenda: A- área de drenagem; Cr - comprimento do rio principal; Dr- declividade média do rio principal; Dd- densidade de drenagem D- desnível da bacia; Ds- desnível específico e % solo A, B, C e D- percentuais de solos hidrológicos existentes na bacia.

5.3.3 Efeito de escala cartográfica

Evidentemente, a escala dos mapas utilizados para caracterização física das bacias utilizadas no estudo de regionalização determina a ordem de grandeza dos valores obtidos.

EUCLYDES et al. (2001) utilizou mapas na escala 1: 250.000 para obter informações fisiográficas de bacias localizadas no Alto São Francisco, a montante da represa de Três Marias. Neste estudo a área a regionalizar era em torno de 51.000 km².

NOUVELOT (1974) cita que para estudos de regionalização abrangendo grandes áreas (centenas de milhares de quilômetros quadrados) é suficiente um mapa na escala 1:500.000 para que possam ser extraídas informações necessárias ao estudo, não devendo ser levado em conta as nuances locais. No entanto, é importante que todos os mapas utilizados estejam na mesma escala cartográfica.

A indicação da escala dos mapas utilizados para quantificação das variáveis físicas explicativas foi obtida a partir da extensão da área de estudo (aproximadamente 320.000 km²) e em função da disponibilidade destes. Como nem todos os mapas na escala de 1: 500.000 estavam disponibilizados, optou-se por utilizar os mapas cedidos pela CODEVASF em escala maior (1:100.000), obtendo-se maior detalhamento da região estudada.

Para estudo comparativo de ajuste de modelos de regionalização com características físicas extraídas em escalas diferentes foram obtidos os mesmos parâmetros físicos em mapas na escala 1: 1.000.000 como mostrado na Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Parâmetros físicos de algumas bacias hidrográficas pertencentes a sub-bacia 48 e 49 extraídos de mapas na escala 1: 1.000.000

Código do posto fluviométrico	Nome da bacia do posto	A (km ²)	Cr (km)	Dd (km/km ²)
48820000	Afogados da Ingazeira	3486,23	84,07	0,232
48830000	Flores	4933,5	128,10	0,233
48840000	Serra Talhada	5877,8	170,6	0,230
48850000	Serrinha	9838,9	240,4	0,242
48860000	Floresta	12162,2	300,8	0,246
48880000	Ilha Grande	2228,6	75,09	0,298

Comparando-se estes valores com os obtidos a partir de mapas em escala maior 1: 100.000 apresentados na Tabela 5.3 verifica-se uma melhor estimativa para aqueles anteriormente apresentados.

Diferença maior é verificada na densidade de drenagem das bacias, onde se chega a um aumento de 75% do valor obtido, quando extraída em mapas na escala de 1: 100.000.

No tocante à área e ao comprimento do rio principal, não se verifica uma diferença significativa, mas pode ser observado que os obtidos na Tabela 5.3 são maiores do que os obtidos na Tabela 5.4, em razão da escala adotada.

5.4 DETERMINAÇÃO DAS REGIÕES HOMOGÊNEAS

Para definição das regiões homogêneas foram adotadas duas metodologias descritas a seguir.

A primeira é baseada na análise da tendência da distribuição de frequência, em papel probabilístico, das vazões adimensionalizadas de cada posto pelo seu valor médio e no ajuste de um modelo de regressão aos valores médios de vazões e as características físico-climáticas das bacias envolvidas (EUCLYDES et al., 1999).

Utilizando o Programa RH 3.a tornou-se possível a avaliação das curvas de frequência de cada posto, assim como das equações de regressão.

No programa as distribuições de frequência das séries de vazões são representadas por distribuições teóricas, dentre as quais pode ser escolhida a distribuição Normal, Log-normal, Normal-T (Distribuição Normal com Transformação Generalizada), Gumbel e L-Gumbel (Distribuição Log-Gumbel), possibilitando que o gráfico formado pelos pontos representativos dos valores de vazões adimensionalizadas pelo seu valor médio, anotados em papel probabilístico adequado, seja ajustado a uma reta.

Na definição das regiões consideradas hidrologicamente homogêneas foi necessário a avaliação do comportamento das vazões adimensionalizadas de cada posto, onde aquelas que apresentaram-se mais ajustadas a equação da reta do tipo $y = a + bx$, ou seja, coeficiente angular “b” próximos, puderam ser consideradas pertencentes a uma mesma região homogênea.

Além disso, deve existir, para a combinação de bacias definidas na primeira condição, uma regressão simples ou múltipla, entre os valores de vazões médias observadas nos postos e suas respectivas características físico-climáticas, que apresente os coeficientes de ajuste dentro de uma faixa de variação considerada estatisticamente aceitável (EUCLYDES et al., 1999).

Desta forma, as regiões homogêneas definidas na primeira metodologia aqui seguida foram determinadas, fundamentalmente com base nos valores de vazões observadas e na proximidade espacial das sub-bacias. Uma segunda metodologia adotada nesse estudo será explicada posteriormente.

Com os modelos propostos para cada região homogênea podem ser estimadas vazões em bacias inseridas nestas regiões e com área de drenagem dentro da faixa de variação das bacias utilizadas na sua formulação. Sendo assim, estes modelos não são válidos para bacias hidrográficas que estejam fora da área regionalizada.

A grande extensão territorial da área em estudo (sub-bacias 46 a 49) e o reduzido número de estações fluviométricas distribuídas nessa região fez com que apenas 27% dessa área fosse regionalizada, ficando uma área de 73% sem nenhum modelo de regionalização para que sejam estimadas vazões características.

5.4.1 Expansão da área regionalizada

Com o objetivo de expandir os modelos de regionalização para regiões com carência de postos fluviométricos tentou-se a divisão da área estudada de acordo com as características físicas extraídas de mapas temáticos existentes.

O intuito desta divisão foi agrupar bacias com semelhanças físicas, verificando a possibilidade de formação de regiões fisicamente homogêneas. NOUVELOT (1974) menciona que cada zona fisicamente homogênea representa uma zona hidrológica teoricamente homogênea, ou seja, bacias com semelhanças físicas podem apresentar semelhanças quanto ao comportamento hidrológico.

Baseado neste princípio e em função das semelhanças físicas foram agrupadas bacias segundo o percentual de área inserida nas regiões definidas e, posteriormente, aplicou-se regressões aos valores de vazões observadas e as suas características físico-climáticas.

Neste estudo, para que fosse possível a divisão em regiões homogêneas segundo as semelhanças físicas da região estudada utilizou-se técnicas de geoprocessamento, executando-se superposição de mapas temáticos e consultas em banco de dados.

Os mapas temáticos utilizados em escala 1:2.000.000 foram elaborados por diversas entidades e adaptadas ao trabalho desenvolvido pela EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias, denominado ZANE – Zoneamento Agroecológico do Nordeste (EMBRAPA, 2000/CD-ROM). Além

deste, o mapa de classificação hidrológica dos solos elaborado pela SUDENE em 1978 citado no item 3.5 também foi utilizado para definição das regiões.

Vários temas foram estudados na tentativa de caracterizar a área em estudo: clima, relevo, vegetação, precipitação e classificação hidrológica dos solos. Alguns foram abandonados por levarem a um número muito grande de regiões homogêneas, o que impossibilitaria o trabalho de regionalização.

Portanto, apenas os fatores vegetação, precipitação e a classificação hidrológica dos solos foram selecionados para caracterizar fisicamente a região com vistas a explicar o regime de vazões nos cursos d'água.

NOUVELOT (1974) cita que, efetuada a escolha dos fatores a considerar na definição de áreas homogêneas, pode-se definir um certo número de classes representativas para cada um destes fatores, sendo este número, na medida do possível, limitado para que o trabalho de regionalização não seja inviável.

Para a divisão em um número suficiente de regiões homogêneas capaz de representar as características gerais sem que haja muitas divisões fez-se necessário uma redefinição das classes dos fatores.

A precipitação foi definida em três faixas: 0-600 mm, de 600-1000 mm e maior que 1000 mm. A vegetação, antes subdividida em dezenas de classes, passou a ser expressa apenas por três: cerrado, caatinga e floresta. A classificação hidrológica dos solos foi representada pelas classes predominantes, sendo agrupado em duas classes: os mais permeáveis com potencial mínimo de escoamento superficial, ou seja, solos tipo A e B e os solos mais impermeáveis, com potencial máximo para o escoamento, caracterizados pelos tipos C e D.

Com essa classificação reduziu-se bastante o número de combinações possíveis entre as diversas classes dos fatores considerados.

Ainda puderam ser agrupadas algumas regiões que possuíam mesma vegetação, tipo de solo e com faixa de variação de precipitação de 0-600 mm e 600-1000 mm, tornando-se uma única com precipitação 0-1000 mm.

Nas figuras que seguem são apresentados os mapas temáticos da região estudada sob os aspectos físicos considerados para definição das regiões fisicamente homogêneas.

A Figura 5.8 apresenta a distribuição da precipitação, a Figura 5.9 a vegetação e a Figura 5.10 os solos segundo classificação hidrológica.

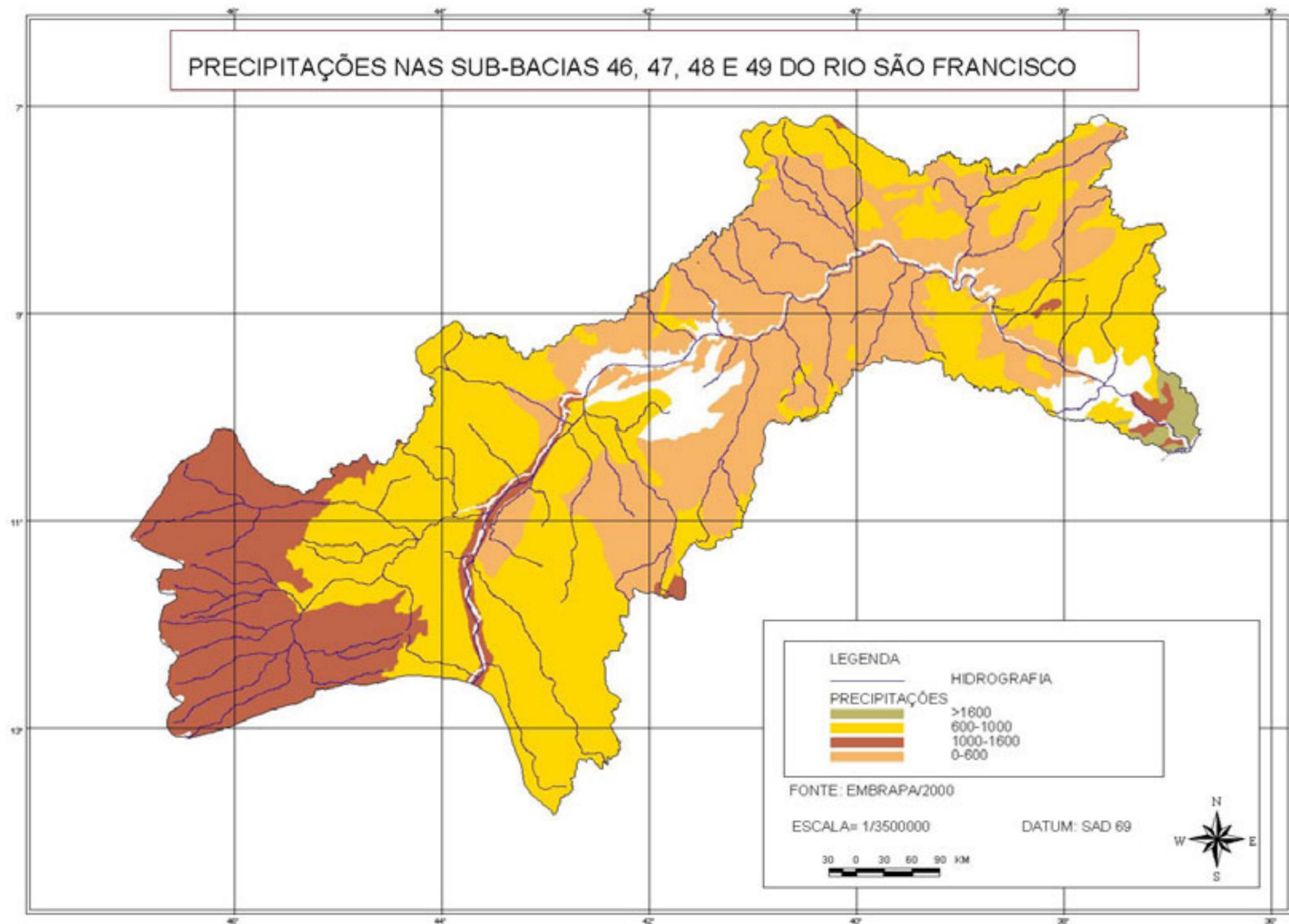


Figura 5.8: Distribuição de precipitação nas sub-bacias 46, 47, 48 e 49 do rio São Francisco

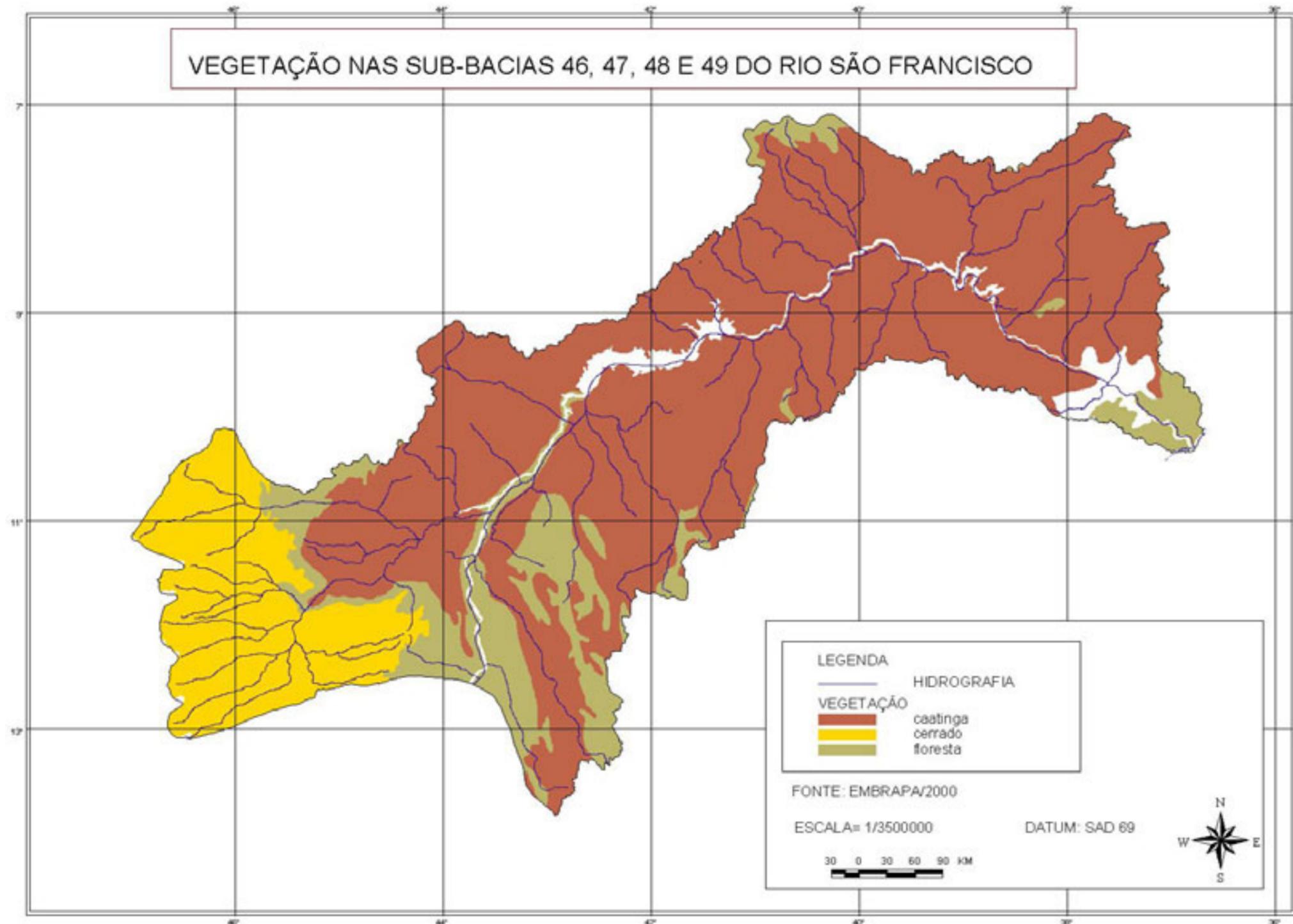


Figura 5.9: Distribuição de vegetação nas sub-bacias 46, 47, 48 e 49 do rio São Francisco

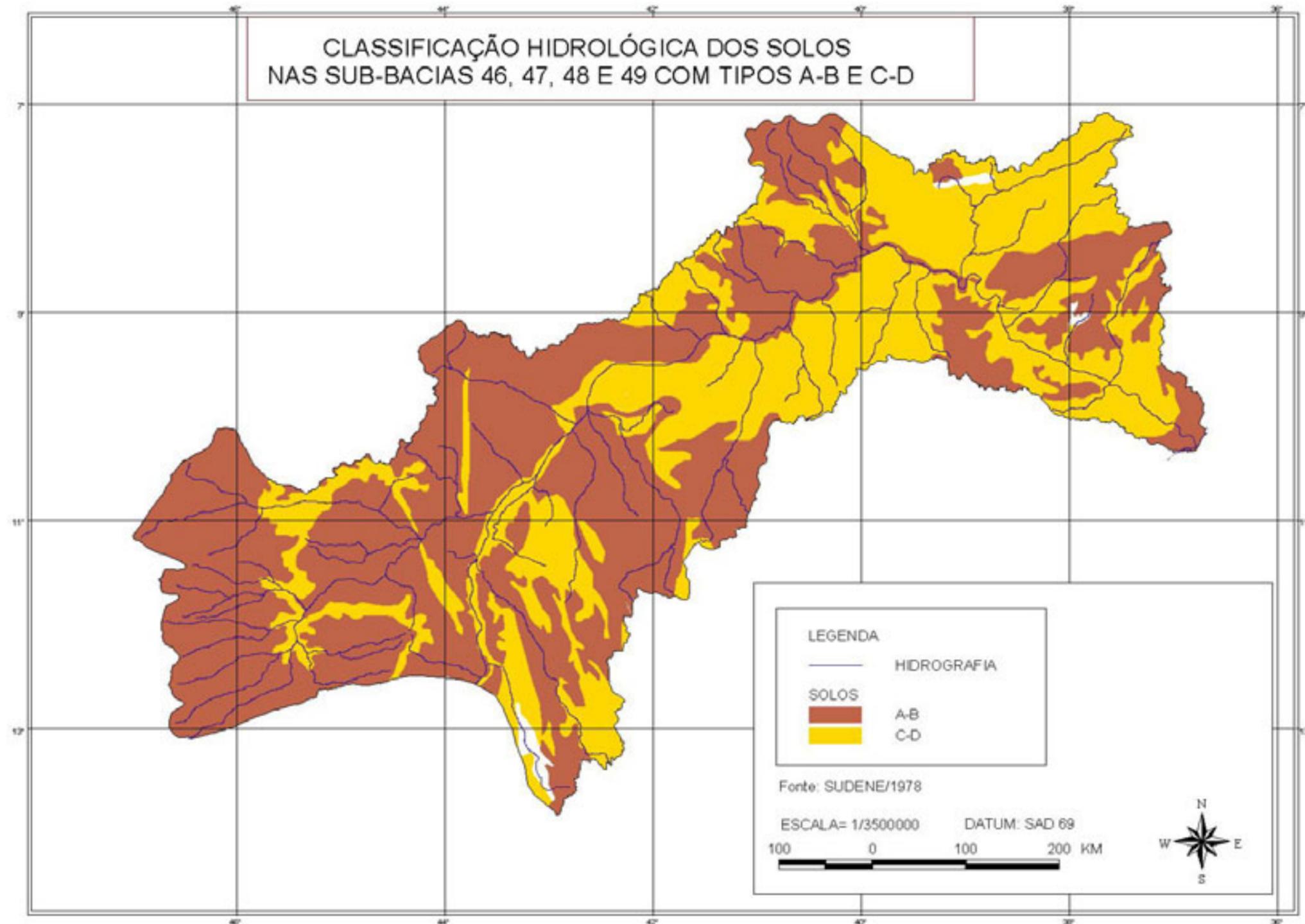


Figura 5.10: Classificação hidrológica solos nas sub-bacias 46, 47, 48 e 49 do rio São Francisco com tipos A-B e C-D

5.5 OBTENÇÃO DOS MODELOS DE REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES

Utilizando o software RH 3.a foi possível aplicar regressões aos valores de vazões observadas nos postos fluviométricos selecionados e às características físicas e climáticas das bacias contribuintes a cada um,, determinando modelos de regionalização de vazões mínimas, máximas e médias para cada região homogênea definida.

Para seleção do modelo que melhor se ajusta aos dados de vazões observadas nas regiões homogêneas foram analisados, além dos valores do coeficiente de determinação (R^2) e do erro padrão da estimativa (EP), o coeficiente de variação (CV) e o teste da função F (%F) como descritos no item 3.4 .

Também foram analisados quais parâmetros exercem maior influência na descrição do regime fluvial nas bacias contribuintes. Para isso, verificou-se o valor do percentual T-Student para cada variável incluída no modelo. Adotaram-se aquelas variáveis cujos valores deste coeficiente não ultrapassaram a 15%, ou seja, a variável possui pelo menos 85% de significância no modelo proposto.

O valor do percentual de desvio relativo (%dr) também foi adotado para avaliação dos ajustes. Adotou-se o valor variando entre -15% a 15%, podendo chegar até -30% e 30%, se o valor do percentual de T-Student for muito baixo para as variáveis adotadas.

Em todos os modelos adotou-se como premissa grau de liberdade mínimo de três.

A coerência hidrológica também foi analisada nos modelos, pois uma equação poderá apresentar excelentes coeficientes de ajuste, mas se o modelo não descrever a variação da vazão como ela realmente ocorre, não deverá ser adotado (por exemplo, a vazão média deve ser diretamente, proporcional à área da bacia e não inversamente).

Capítulo 6

RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 REGIÕES HOMOGÊNEAS E OS MODELOS DE REGIONALIZAÇÃO

6.1.1 Regiões homogêneas baseadas nos aspectos hidrológicos

Na primeira etapa da pesquisa, de acordo com os valores de vazões observadas e a proximidade espacial entre as bacias hidrográficas, definidas a partir dos postos fluviométricos selecionados na área em estudo, foram determinadas três regiões homogêneas, conforme ilustra a Figura 6.1.

A sub-bacia 46 do rio São Francisco foi a única que, devido à maior concentração de postos fluviométricos, pôde ser subdividida em duas regiões. Esta subdivisão forneceu modelos de regionalização de vazões mínimas de 7 dias, máximas e médias mais ajustados aos valores de vazões observadas nos postos, com um menor número de variáveis independentes no modelo, porém com grau de liberdade bem menor do que quando considerada uma única região.

Para análise dos modelos de regressão são mostrados na Tabela 6.1,

Tabela 6.2 e Tabela 6.3 os resultados dos coeficientes obtidos no ajuste das vazões às características físico-climáticas das bacias nas três regiões consideradas.

Nas tabelas que seguem considere-se as seguintes abreviaturas para as variáveis explicativas:

A= área de drenagem em km^2 ;

Dd= densidade de drenagem (km/km^2);

C_r = comprimento do rio principal (km);

D_r = declividade do rio (m/km^2);

D = desnível (m);

D_s = desnível específico (m);

% solo A= fração de solo A na bacia;

% solo B= fração de solo B na bacia;

% solo C= fração de solo C na bacia;

% solo D= fração de solo D na bacia.

As outras variáveis são coeficientes estatísticos para verificação de ajuste da função proposta aos dados de vazões observadas nos postos fluviométricos e foram descritas no item 3.4.

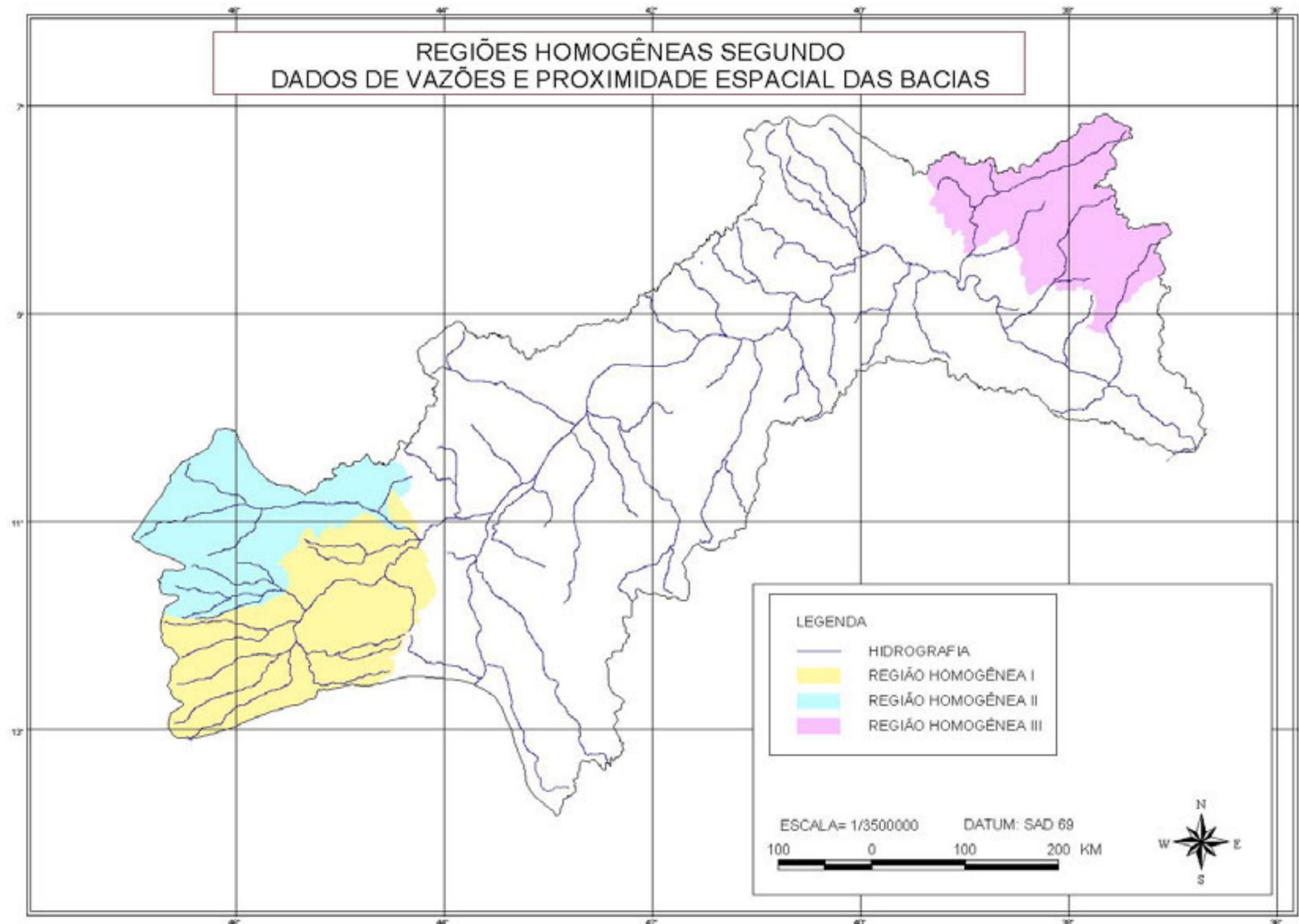


Figura 6.1: Regiões homogêneas segundo análise dos dados de vazões e proximidade espacial das bacias hidrográficas

Tabela 6.1: Resumo dos melhores resultados obtidos com modelos de regressão para a vazão mínima de 7 dias, máxima e média - região homogênea I – RH I

Vazão Mínima- Qmin de 7 dias										
Regressão	Coeficientes das variáveis explicativas		Constante	R ²	R ² a	EP(%)	CV(%)	%dr	G _L	
	A	% solo A								
Potencial	0,9909	-	0,0040	0,7242	0,6897	1,9662	16,6256	-403,6 a 49,533	8	
Potencial	0,8016	0,6920	0,0359	0,9950	0,9935	1,1026	2,4021	-9,367 a 2,200	7	
Exponencial	0,0001	2,4642	0,8009	0,9800	0,9734	1,2176	5,0053	-31,40 a 25,277	6	
Vazão Máxima- Qmax										
Regressão	Coeficientes das variáveis explicativas			Constante	R ²	R ² a	EP(%)	CV(%)	%dr	G _L
	A	% solo A	% solo B							
Potencial	0,7872	-	-	0,0860	0,8836	0,8690	1,3715	6,1129	-106,4 a 30,892	8
Exponencial	0,0001	-	-1,2230	4,3058	0,9581	0,9442	1,2230	3,9782	-34,66 a 23,437	6
Vazão Média- Qmed										
Regressão	Coeficientes das variáveis explicativas		Constante	R ²	R ² a	EP(%)	CV(%)	%dr	G _L	
	A	% solo A								
Potencial	1,0040	-	0,0050	0,7345	0,7013	1,9490	15,1004	-386,6 a 47,155	8	
Potencial	0,8186	0,6778	0,0431	0,9912	0,9887	1,1388	2,9418	-23,42 a 13,732	7	
Exponencial	0,0001	2,4221	1,1617	0,9759	0,9678	1,2441	5,0932	-37,59 a 23,663	6	

Tabela 6.2: Resumo dos melhores resultados obtidos com modelos de regressão para a vazão mínima de 7 dias, máxima e média - região homogênea II – RH II

Vazão Mínima- Qmin de 7 dias														
Regressão	Coeficientes das variáveis explicativas			Constante da equação	R ²	R ² a	EP(%)	CV(%)	%dr	G _L				
	A	D	Ds											
Potencial	1,0741	-	-	0,0022	0,9274	0,9092	1,3051	7,3020	-32,20 a 22,734	4				
Potencial	0,6581	0,7228	-	0,0019	0,9630	0,9383	1,2453	6,0174	-15,02 a 24,636	3				
Potencial	0,6830	-	0,7825	0,0018	0,9897	0,9829	1,1226	3,1713	-16,20 a 8,7383	3				
Vazão Máxima- Qmax														
Regressão	Coeficientes das variáveis explicativas					Constante da equação	R ²	R ² a	EP(%)	CV(%)	%dr	G _L		
	A	Cr	D	Ds	% solo D									
Potencial	0,8779	-	-	-	-	0,0363	0,9111	0,8889	1,2748	5,1940	-34,28 a 27,496	4		
Potencial	-	0,0027	-	0,0095	-	2,8449	0,9643	0,9405	1,1945	3,8026	-25,42 a 15,605	3		
Potencial	0,6581	-	0,3819	-	-	0,0335	0,9258	0,8763	1,2921	5,4812	-39,05 a 18,863	3		
Exponencial	0,0001	-	-	0,0078	-	3,0023	0,9581	0,9301	1,2124	4,1204	-24,53 a 19,848	3		
Potencial	0,4302	-	-	-	0,0855	3,3833	0,9871	0,9785	1,1128	2,2856	-8,173 a 14,0334	3		
Vazão Média- Qmed														
Regressão	Coeficientes das variáveis explicativas			Constante da equação	R ²	R ² a	EP(%)	CV(%)	%dr	G _L				
	A	D	Ds											
Potencial	1,0096	-	-	0,0050	0,9489	0,9361	1,2307	5,3307	-27,10 a 20,928	4				
Potencial	0,7827	0,3941	-	0,0046	0,9612	0,9352	1,2324	5,3661	-23,19 a 24,955	3				
Potencial	0,6948	-	0,6297	0,0043	0,9956	0,9927	1,0726	1,8002	-5,390 a 9,0343	3				

Tabela 6.3: Resumo dos melhores resultados obtidos com modelos de regressão para a vazão máxima e média - região homogênea III – RH III

Vazão Máxima- Qmax										
Regressão	Coeficientes das variáveis explicativas			Constante da equação	R ²	R ² a	EP(%)	CV(%)	%dr	G _L
	Cr	Dd	Dr							
Exponencial	0,0070	4,3257	-	0,1903	0,968	0,957	1,187	3,2151	-31,290 a	6
Potencial	1,6319	3,9576	0,5405	0,0504	0,963	0,941	1,223	3,7827	-37,05 a	5
Vazão Média- Qmed										
Regressão	Coeficientes das variáveis explicativas			Constante da equação	R ²	R ² a	EP(%)	CV(%)	%dr	G _L
	Cr	Dd	Ds							
Potencial	1,5673	3,1481	-	0,0026	0,957	0,943	1,244	13,068	-29,19 a	6
Exponenci	0,0092	5,7131	0,0056	-5,9244	0,972	0,955	1,214	11,604	-36,89 a	5

Analisando os resultados apresentados na Tabela 6.1, referentes ao ajuste das equações de regressão para vazão mínima com duração de 7 dias na região homogênea I, verifica-se melhores coeficientes de ajuste para o modelo que utiliza a área e o percentual de solo A.

$$Q_{\min} = 0,0359.A^{0,8016}.\%soloA^{0,6920} \quad (6.1)$$

A inserção da fração de solo tipo A inferiu melhoria no modelo, no que diz respeito à qualidade do ajuste, e apresenta coerência, pois a vazão mínima é afetada pela fração deste tipo de solo, caracterizado por ser profundo e possuir alta permeabilidade.

A inclusão da variável tipo de solo permitiu a inclusão dos dados da estação fluviométrica Fazenda Coqueiro (posto 46490000), antes rejeitados pelo modelo. Este é exatamente o posto que mais difere quanto à classificação hidrológica do solo presente na bacia.

Pode-se também considerar uma segunda equação que também apresenta bons coeficientes de ajustamento. Esta tem a vantagem de ser aplicável a algum segmento da região que não contenha solo tipo A:

$$Q_{\min} = e^{(0,8009+0,0001.A+2,4642.\%soloA)} \quad (6.2)$$

Para a vazão máxima na RH I o modelo do tipo exponencial apresenta melhores coeficientes de ajuste e utiliza a área e a fração de solo tipo B:

$$Q_{\max} = e^{(4,3058+0,000051.A-1,2230.\%soloB)} \quad (6.3)$$

Para a vazão média nesta região, o modelo que utiliza a área de drenagem e o tipo de solo A apresenta melhores coeficientes de ajuste:

$$Q_{med} = 0,0431.A^{0,8186}.\%soloA^{0,6778} \quad (6.4)$$

Uma outra opção é a equação do tipo exponencial, que não se anula caso na área em análise não houver solo tipo A:

$$Q_{med} = e^{(1,1617+0,0001.A+2,4221.\%soloA)} \quad (6.5)$$

Estes modelos podem ser utilizados para estimar vazões mínimas, máximas e médias de longo período em bacias que estejam inseridas na região homogênea I e que possuam área de drenagem compreendida entre 4410 e 38800 km².

Observou-se que as frações de solo segundo a classificação hidrológica introduziram melhoria nos modelos, como se constatou na análise dos coeficientes de ajuste da função escolhida aos dados observados.

Na Tabela 6.4 são apresentadas as vazões médias observadas e estimadas pelos modelos (6.1), (6.3) e (6.4), respectivamente para vazões mínimas de 7 dias, máximas e médias, no caso da região homogênea I.

Tabela 6.4: Vazões médias observadas e estimadas para a RH I

Estação fluviométrica	Q _{mínima 7 dias}		Q _{máxima}		Q _{média}	
	Observada	Estimada	Observada	Estimada	Observada	Estimada
Fazenda Redenção	37,53	32,95	104,01	96,56	50,25	45,67
São Sebastião	130,54	114,91	315,18	228,34	190,92	164,70
Taguá (Campo Largo)	127,09	119,28	334,51	327,88	179,77	171,37
Nupeba	121,41	116,86	335,99	303,58	177,36	167,63
Fazenda Coqueiro	3,22	3,23	30,81	31,68	4,67	4,67
Fazenda Macambira	124,63	128,41	308,69	415,68	184,01	185,16
Derocal	34,96	37,54	102,14	100,62	57,73	52,15
Sítio Grande	28,40	30,82	73,96	94,13	34,54	42,63
Barreiras	78,23	85,55	228,18	174,70	109,49	122,01

Analisando-se, desta feita, os resultados apresentados na Tabela 6.2 relativos ao ajuste das equações de regressão para vazão mínima com duração de 7 dias na região homogênea II, observa-se que os melhores coeficientes são obtidos com modelos do tipo potencial, com área de drenagem e o desnível específico como variáveis independentes.

$$Q_{\min} = 0,0018.A^{0,6830}.Ds^{0,7825} \quad (6.6)$$

Para a vazão máxima nesta região, o modelo com área e percentual de solo tipo D apresenta melhores resultados quanto aos coeficientes de ajustamento.

$$Q_{\max} = 3,3888.A^{0,4302}.\%soloD^{0,0855} \quad (6.7)$$

Para bacias que não possuam este tipo de solo recomenda-se o uso da equação do tipo exponencial com comprimento do rio e desnível específico:

$$Q_{\max} = e^{(2,8449+0,0027.Cr+0,0095.Ds)} \quad (6.8)$$

Em relação à vazão média, os melhores coeficientes também foram obtidos com a equação que utiliza a área e o desnível específico:

$$Q_{med} = 0,0043.A^{0,6948}.Ds^{0,6297} \quad (6.9)$$

Os modelos selecionados para estimativa de vazões mínimas, máximas e médias na RH II poderão ser utilizados em bacias que apresentem área de drenagem entre 2600 e 21100 km² e que estejam inseridas na região homogênea definida.

Em todas as análises, a utilização das novas variáveis introduzidas nesse estudo: desnível específico e tipo de solos, trouxeram ganho significativo à qualidade dos ajustes.

Na Tabela 6.5 são apresentadas as vazões médias observadas e estimadas pelos modelos (6.6), (6.7) e (6.9), respectivamente para vazões mínimas de 7 dias, máximas e médias, para a região homogênea II.

Tabela 6.5: Vazões médias observadas e estimadas para a RH II

Estação fluviométrica	Q _{mínima 7 dias}		Q _{máxima}		Q _{média}	
	Observada	Estimada	Observada	Estimada	Observada	Estimada
Fazenda Porto Limpo	78,87	71,98	198,08	214,27	91,65	92,35
Fazenda Bom Jardim	28,23	25,97	52,98	52,04	31,84	33,56
Formosa do Rio Preto	71,15	70,24	178,71	153,63	93,19	84,77
Nova Vida Montante	39,70	39,38	123,24	122,38	47,46	48,71
Ponte Serafim Montante	7,63	7,98	35,71	37,26	11,94	11,60
Ibipetuba	66,19	76,92	183,98	194,41	91,18	94,71

Analisando os resultados apresentados na Tabela 6.3 referentes ao ajuste das equações de regressão para vazão máxima na região homogênea III, observa-se que a equação de regionalização com comprimento do rio principal e densidade de drenagem é a que apresenta melhores coeficientes de ajustamento.

$$Q_{\max} = e^{(0,1903+0,0070.Cr+4,3257.Dd)} \quad (6.10)$$

Em relação à vazão média, o modelo que apresenta melhor coeficiente de determinação é o que utiliza comprimento do rio, densidade de drenagem e desnível específico, porém a variação do percentual do desvio relativo ultrapassa um pouco os limites estatísticos considerados, além de ser observado menor grau de liberdade em relação ao segundo modelo proposto.

Neste caso, a vazão média poderá ser estimada com a equação que utiliza comprimento do rio e densidade de drenagem como variáveis explicativas.

$$Q_{med} = 0,0026.Cr^{1,5673}.Dd^{3,1481} \quad (6.11)$$

Os modelos acima mencionados poderão estimar a vazão máxima e média na RH III para bacias que possuam área de drenagem no intervalo de 2260 a 12300 km². Para esta região as variáveis explicativas que mais influenciaram no modelo de regionalização foram o comprimento do rio principal e densidade de drenagem. Verifica-se que, uma grande parte das bacias desta região são constituídas pelo mesmo rio principal, possivelmente a razão da importância dessa variável.

Por ser verificado nas bacias desta região significativa homogeneidade quanto as frações de solo segundo a classificação hidrológica, com predominância de solos tipo C e D, estas variáveis não levaram a melhoria nos modelos propostos.

Na Tabela 6.6 são apresentadas as vazões médias observadas e estimadas pelos modelos (6.10) e (6.11), respectivamente para vazões máximas e médias, para a região homogênea III.

Tabela 6.6: Vazões médias observadas e estimadas para a RH III

Estação Fluviométrica	Q _{máxima}		Q _{média}	
	Observada	Estimada	Observada	Estimada
Ilha Grande	105,19	82,22	1,40	1,49
Flores	334,61	301,13	8,77	7,51
Serra Talhada	480,71	443,13	13,08	12,06
Floresta	678,17	640,69	19,41	17,38
Águas Belas	70,28	68,57	2,54	1,80
Serrinha	479,47	514,55	13,36	14,73
Santana do Ipanema	135,94	146,24	3,45	4,45
Inaja	114,94	126,87	3,26	4,01
Afogados da Ingazeira	117,71	154,54	2,87	3,07

6.1.2 Regiões homogêneas baseadas nos aspectos físicos

A segunda metodologia utilizada para determinação das regiões homogêneas e conseqüentemente dos modelos de regionalização de vazões é baseada nas semelhanças quanto a vegetação, precipitação e comportamento dos solos sob o ponto de vista hidrológico das bacias hidrográficas utilizadas. A determinação destas regiões está descrita no item 5.4.

De acordo com estes fatores foram selecionadas bacias hidrográficas cujas áreas de drenagem estavam completamente ou em grande parte inseridas nas regiões definidas como fisicamente homogêneas. Foram aplicadas regressões aos valores de vazões e às características físico-climáticas e escolhido o modelo que apresentou melhores coeficientes de ajuste.

Nove regiões fisicamente homogêneas foram determinadas, das quais três são mais expressivas em termos de área e estão descritas a seguir:

- **Região fisicamente homogênea I**

Na porção oeste da sub-bacia 46 determinou-se a região fisicamente homogênea 1- RFH 1 onde a vegetação predominante é o cerrado, a precipitação média anual é maior que 1000 mm e os solos predominantes são do tipo A e B, solos com potencial alto e moderado para a permeabilidade.

- **Região fisicamente homogênea II**

Em grande parte da sub-bacia 48 foi identificada a região fisicamente homogênea 2- RFH 2 onde a vegetação predominante é a caatinga, a precipitação média anual varia de 0 a 1000 mm e a maior parte dos solos é caracterizado como tipo C e D, ou seja, solo com potencial médio a alto para o escoamento superficial.

- **Região fisicamente homogênea III**

A terceira região fisicamente homogênea identificada foi a que abrange a parte leste da sub-bacia 46, boa parte da bacia 47 e pequena parcela da bacia 49. Esta área, denominada região fisicamente homogênea 3- RFH 3, é caracterizada por

apresentar vegetação de caatinga, precipitação média anual entre 0 e 1000 mm e solo tipos A e B.

As regiões fisicamente homogêneas definidas podem ser visualizadas na Figura 6.2.

Na Figura 6.3 são mostradas as regiões fisicamente homogêneas e os contornos das bacias utilizadas para determinação dos modelos de regionalização de vazões mínimas, máximas e médias nestas regiões.

A Tabela 6.7, Tabela 6.8 e a Tabela 6.9 mostram os melhores modelos selecionados para essas regiões e seus respectivos coeficientes de ajustamento.

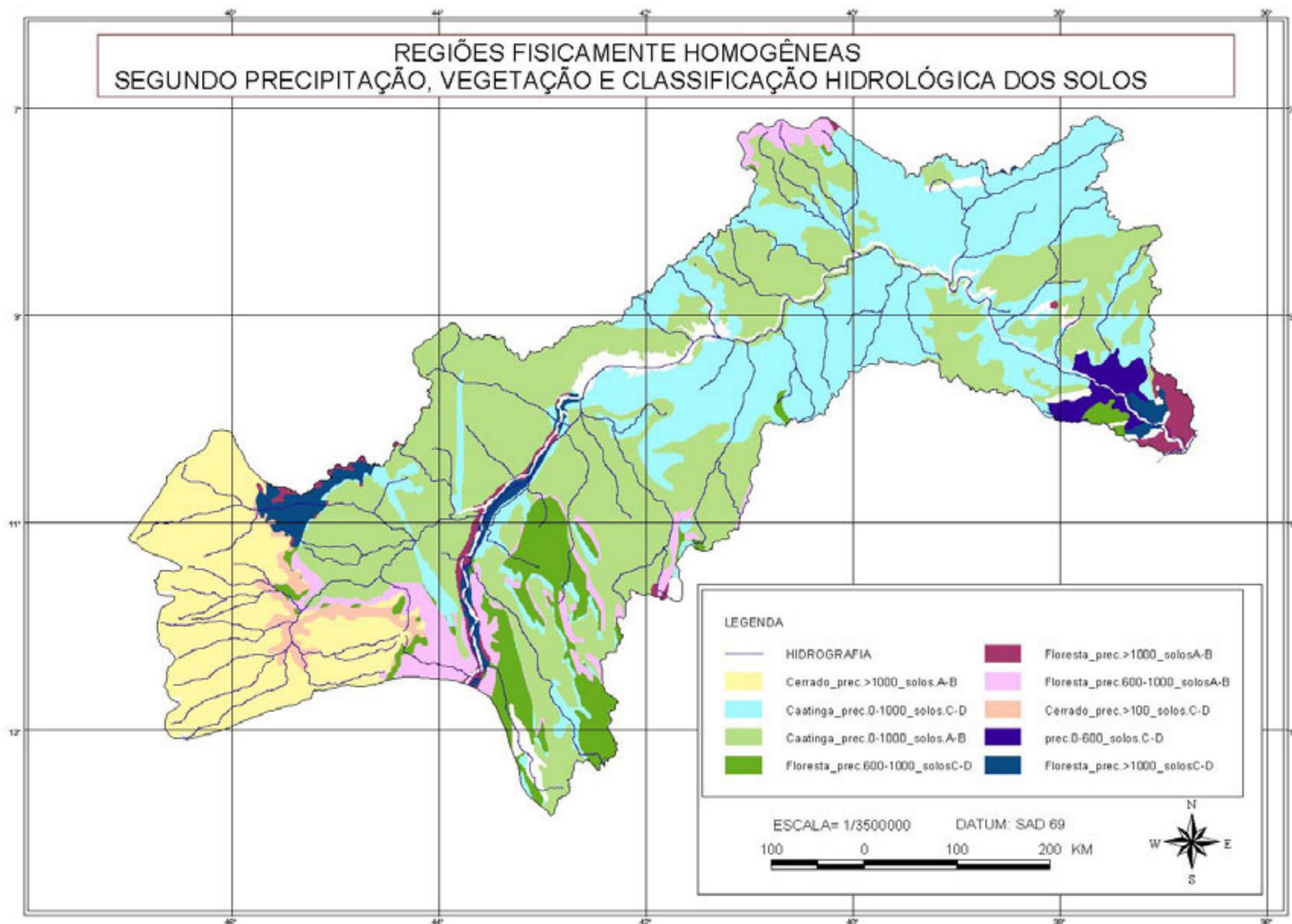


Figura 6.2: Regiões fisicamente homogêneas em relação a precipitação, vegetação e classificação hidrológica dos solos

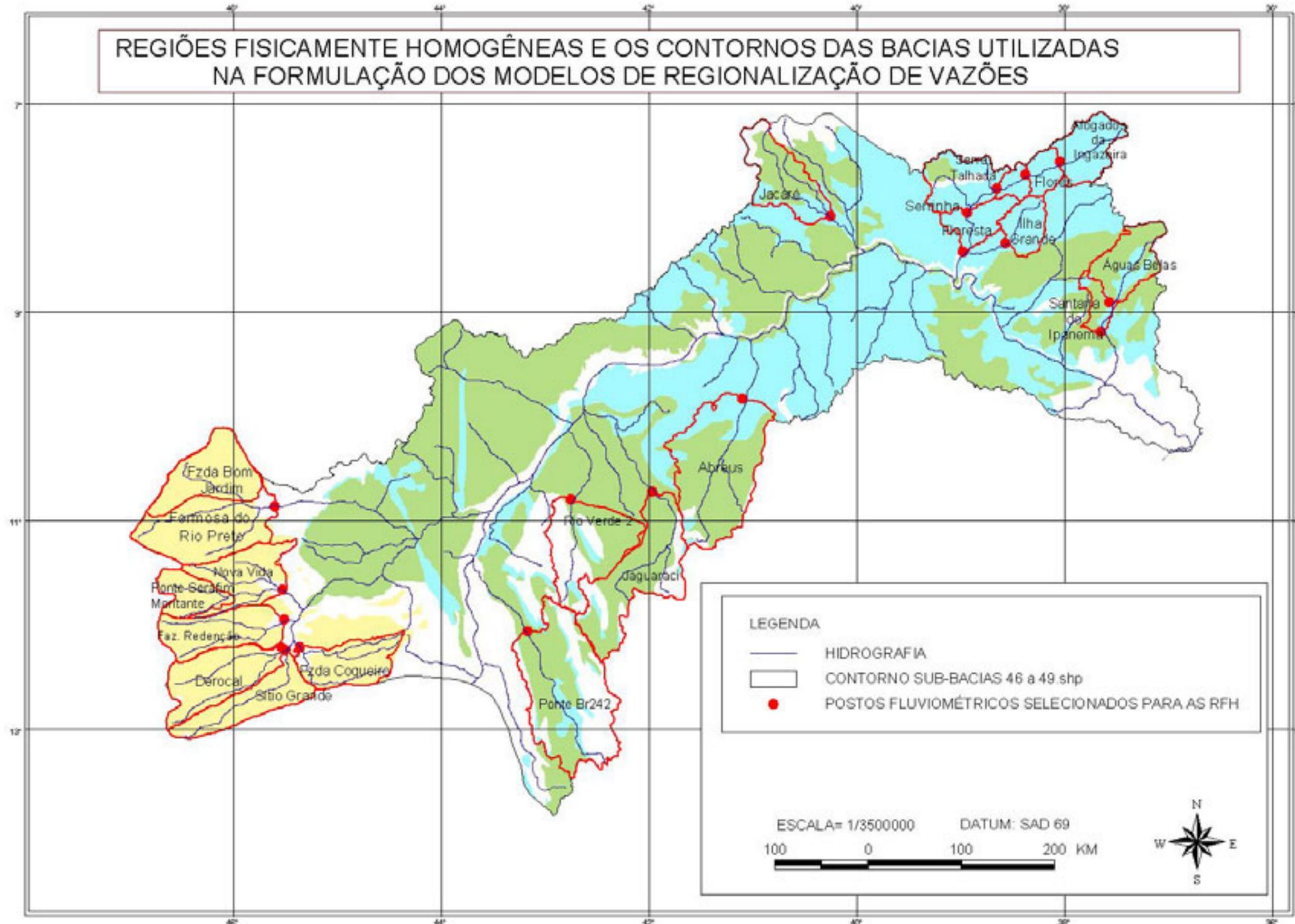


Figura 6.3: Regiões fisicamente homogêneas e os contornos das bacias utilizadas na formulação dos modelos de regionalização de vazões

Tabela 6.7: Resumo dos melhores resultados obtidos com modelos de regressão para a vazão mínima de 7 dias, máxima e média
- região fisicamente homogênea 1- RFH 1

Vazão Mínima- Qmin de 7 dias											
Regressão	Coeficientes das variáveis explicativas				Constante da equação	R ²	R ² a	EP(%)	CV(%)	%dr	G _L
	A	Cr	Ds	% solo A							
Potencial	-	0,1061	1,7195	-	0,0046	0,5853	0,4194	2,1602	24,6326	-340,8 a 53,884	5
Potencial	-	0,9061	0,9464	0,6201	0,0041	0,9974	0,9955	1,0705	2,1785	-8,532 a 9,3852	4
Exponencial		0,0068	0,0100	1,9869	-0,7078	0,9782	0,9619	1,2181	6,3095	-26,02 a 17,276	4
Vazão Máxima- Qmax											
Regressão	Coeficientes das variáveis explicativas			Constante da equação	R ²	R ² a	EP(%)	CV(%)	%dr	G _L	
	Cr	Ds	% solo B								
Exponencial	0,0033	0,0104	-	2,6649	0,8067	0,7294	1,3786	7,4342	-72,32 a 21,609	5	
Exponencial	0,0049	0,0077	-0,8212	2,8136	0,9542	0,9199	1,1909	4,0451	-28,63 a 15,122	4	
Vazão Média- Qmed											
Regressão	Coeficientes das variáveis explicativas			Constante da equação	R ²	R ² a	EP(%)	CV(%)	%dr	G _L	
	Cr	Ds	% solo A								
Exponencial	0,0023	0,0154	-	1,3660	0,5924	0,4294	2,0728	21,2890	-293,2 a 45,624	5	
Potencial	0,8491	0,8753	0,6002	0,0101	0,9877	0,9785	1,1520	4,1329	-10,19 a 20,571	4	
Exponencial	0,0064	0,0094	1,9234	-0,2254	0,9758	0,9577	1,2196	5,7971	-17,50 a 28,138	4	

Tabela 6.8: Resumo dos melhores resultados obtidos com modelos de regressão para a vazão máxima e média - região fisicamente homogênea 2- RFH 2

Vazão Máxima- Qmax									
Regressão	Coeficientes das variáveis explicativas		Constante da equação	R ²	R ² a	EP(%)	CV(%)	%dr	G _L
	A	Cr							
Potencial	1,1505	-	0,0145	0,8592	0,8240	1,3907	5,8025	-49,42 a 33,821	4
Potencial	-	1,3961	0,2300	0,9460	0,9325	1,2266	3,5932	-20,77 a 21,873	4
Vazão Média- Qmed									
Regressão	Coeficientes das variáveis explicativas		Constante da equação	R ²	R ² a	EP(%)	CV(%)	%dr	G _L
	A	Cr							
Potencial	1,5249	-	0,000014	0,8826	0,8532	1,4828	20,2135	-28,26 a 40,473	4
Potencial	-	1,8121	0,0007	0,9318	0,9148	1,3500	15,4018	-34,63 a 31,349	4

Tabela 6.9: Resumo dos melhores resultados obtidos com modelos de regressão para a vazão máxima e média - região fisicamente homogênea 3- RFH 3

Vazão Máxima- Qmax										
Regressão	Coeficientes das variáveis explicativas			Constante da equação	R ²	R ² a	EP(%)	CV(%)	%dr	G _L
	Dd	% solo A								
Potencial	3,0223	-		279,6869	0,6970	0,6212	2,3311	23,7571	-97,81 a 74,773	4
Exponencial	1,9167	-8,0480		3,5829	0,9666	0,9444	1,3833	9,1030	-40,99 a 19,322	3
Vazão Média- Qmed										
Regressão	Coeficientes das variáveis explicativas			Constante da equação	R ²	R ² a	EP(%)	CV(%)	%dr	G _L
	Dd	Ds	% solo D							
Potencial	2,3135	0,5231	-	0,4664	0,7606	0,6408	1,9574	101,374	-56,32 a 57,044	4
Exponencial	5,2487	0,0232	-11,92	-4,9422	0,9843	0,9686	1,2008	29,9597	-26,15 a 14,365	3

Analisando os resultados apresentados na Tabela 6.7, referentes ao ajuste das equações de regressão para vazão mínima de 7 dias na região fisicamente homogênea 1- RFH 1 observa-se que a equação de regionalização com comprimento do rio principal, desnível específico e % solo tipo A é a que apresenta melhores coeficientes de ajustamento.

$$Q_{\min} = 0,0041.Cr^{0,9061}.Ds^{0,9454}.\%soloA^{0,6201} \quad (6.12)$$

Uma segunda expressão é requerida quando a bacia em questão não apresentar solo tipo A. Como alternativa a equação do tipo exponencial com as mesmas variáveis explicativas poderá ser utilizada.

$$Q_{\min} = e^{(-0,7078+0,0068.Cr+0,0100.Ds.+1,9869.\%soloA)} \quad (6.13)$$

É importante lembrar que todos os rios para os quais foram ajustados modelos de regionalização da vazão mínima de 7 dias são perenes.

Para a vazão máxima nesta região o melhor modelo é o que utiliza o comprimento do rio principal, desnível específico e % de solo hidrológico B como variáveis explicativas:

$$Q_{\max} = e^{(2,8136+0,0077.Ds+0,0049.Cr-0,8212.\%soloB)} \quad (6.14)$$

Quanto à vazão média, o modelo com comprimento do rio principal, desnível específico e % solo tipo A é o que apresenta melhores coeficientes de ajustamento:

$$Q_{\text{med}} = 0,0101.Cr^{0,8491}.Ds^{0,8753}.\%soloA^{0,6002} \quad (6.15)$$

Para bacias inseridas nesta região e que não possuam solo tipo A, tem-se a opção de utilizar a equação do tipo exponencial, com as mesmas variáveis explicativas.

$$Q_{med} = e^{(-0,2254+0,0064.Cr+0,0094.Ds+1,9234.\%soloA)} \quad (6.16)$$

Os modelos de regionalização propostos para vazão mínima, máxima e média na RFH 1 poderão ser utilizados para estimativa em bacias cuja área de drenagem variem de 2600 a 13400 km².

Observa-se para esta região que os valores do comprimento do rio principal das bacias mostraram-se possíveis de ser utilizados nos modelos de regressão. A combinação deste com o desnível específico e as frações de solo segundo a classificação hidrológica acrescenta qualidade quanto aos ajustes para os modelos propostos.

Na Tabela 6.10 são apresentadas as vazões médias observadas e estimadas pelos modelos (6.12), (6.14) e (6.15), respectivamente para vazões mínimas de 7 dias, máximas e médias para a região fisicamente homogênea I.

Tabela 6.10: Vazões médias observadas e estimadas para a RFH I

Estação fluviométrica	Q _{mínima 7 dias}		Q _{máxima}		Q _{média}	
	Observada	Estimada	Observada	Estimad	Observada	Estimada
Fazenda Bom Jardim	28,23	25,58	52,98	68,14	31,84	34,43
Sítio Grande	28,40	27,69	73,96	75,38	34,54	37,25
Derocal	34,96	34,77	102,14	86,69	57,73	45,86
Fazenda Coqueiro	3,22	3,22	30,81	30,81	4,67	4,66
Formosa do Rio Preto	71,15	71,22	178,71	195,03	93,19	89,29
Nova Vida Montante	39,70	40,16	123,24	105,97	47,46	52,30
Ponte Serafim Montante	7,63	7,91	35,71	34,74	11,94	11,57
Fazenda Redenção	37,53	40,73	104,01	102,41	50,25	53,09

Analisando os resultados apresentados na Tabela 6.8, referentes ao ajuste das equações de regressão para vazão máxima e vazão média na região fisicamente homogênea 2- RFH 2, observa-se que os modelos de regionalização com comprimento do rio principal apresentam melhores coeficientes de ajuste do que a proposta com a área da bacia, sendo ambos do tipo potência. Verifica-se que os

coeficientes de variação dos dois modelos apresentaram-se acima dos limites estabelecidos.

$$Q_{\max} = 0,2300.Cr^{1,3961} \quad (6.17)$$

$$Q_{\text{med}} = 0,0007.Cr^{1,8121} \quad (6.18)$$

Os modelos seleccionados para estimativa de vazões máximas e médias na RFH 2 poderão ser utilizados em bacias que apresentem área de drenagem entre 2260 e 12300 km².

Na Tabela 6.11 são apresentadas as vazões médias observadas e estimadas pelos modelos (6.17) e (6.18), respectivamente para vazões máximas e médias, para a região fisicamente homogênea II. Pelo fato de que são todos rios temporários, as vazões mínimas com 7 dias de permanência são nulas.

Tabela 6.11: Vazões médias observadas e estimadas para a RFH II

Estação fluviométrica	Q _{máxima}		Q _{média}	
	Observada	Estimada	Observada	Estimada
Flores	334,61	261,42	8,77	6,02
Serra Talhada	480,71	394,18	13,08	10,26
Ilha Grande	105,19	106,77	1,40	1,88
Floresta	678,17	744,69	19,41	23,44
Serrinha	479,47	556,04	13,36	16,04
Afogados da Ingazeira	11,771	142,15	2,87	2,73

Analisando os resultados apresentados na Tabela 6.9, referentes ao ajuste das equações de regressão para vazão máxima na região fisicamente homogênea 3 – RFH 3, observa-se que a equação de regressão do tipo exponencial com a densidade de drenagem e o percentual de solo tipo A é a que apresenta melhores coeficientes de ajustamento, apesar do percentual de insignificância para a densidade de drenagem ser da ordem de 12% e o percentual de desvio relativo um pouco acima do intervalo pré-estabelecido anteriormente.

$$Q_{\max} = e^{(3,5829+1,9167.Dd-8,0480.\%soloA)} \quad (6.19)$$

Para a vazão média nesta região o modelo que apresenta melhores coeficientes é o que utiliza a densidade de drenagem, o desnível específico e o percentual solo tipo D:

$$Q_{med} = e^{(-4,9422+5,2487.Dd+0,0232.Ds-11,92.\%soloD)} \quad (6.20)$$

Os modelos de regionalização selecionados poderão estimar vazão máxima e média nesta região para bacias com área de drenagem variando de 4000 a 12600 km².

Nesta região verificou-se resultados não satisfatórios para o coeficiente de variação com os dados de alguns postos, explicável pelo tamanho da amostra.

Na Tabela 6.12 são apresentadas as vazões médias observadas e estimadas pelos modelos (6.19) e (6.20), respectivamente para vazões máximas e médias, para a região fisicamente homogênea III.

Tabela 6.12: Vazões médias observadas e estimadas para a RFH III

Posto fluviométrico	Q _{máxima}		Q _{média}	
	Observada	Estimada	Observada	Estimada
Ponte BR-242	-	-	7,49	6,41
Santana do Ipanema	144,40	121,29	3,68	3,32
Jaguaraci	8,83	12,45	0,60	0,57
Abreus	4,73	4,01	0,38	0,37
Jacaré	90,20	82,97	2,35	2,38
Rio Verde 2	48,16	38,85	1,81	1,99
Águas Belas	74,00	99,37	2,69	3,40

6.2 VERIFICAÇÃO DOS MODELOS DE REGIONALIZAÇÃO PROPOSTOS

Com a regionalização de vazões é possível a estimativa de vazões para bacias hidrográficas inseridas nas regiões homogêneas, desde que estas apresentem área de drenagem na faixa de variação deste parâmetro das bacias utilizadas para definição dos modelos.

Para verificação dos modelos adotados foram selecionados alguns postos fluviométricos pertencentes às regiões homogêneas definidas, cujas séries de vazões não foram utilizadas na geração dos modelos.

Com os critérios de seleção e a pequena quantidade de postos fluviométricos com séries de vazões disponibilizadas, poucos postos foram utilizados na verificação dos modelos propostos. A Tabela 6.13 apresenta o código do posto fluviométrico, nome do posto, período de observações, a área de drenagem e a região homogênea no qual se inserem.

Tabela 6.13: Código, nome, período de observações, área de drenagem e região homogênea dos postos utilizados na verificação dos modelos de regionalização.

Código	Nome do posto	Período de observações	Área (km ²)	Região pertencente
46460000	Penedo	1977 a 1999*	6150	RH I e RFH 1
46560000	Campão	1969 a 1973	3520	RH II e RFH 1
46585000	Fazenda Boa Fé	1962 a 1973	3463	RH II e RFH 1
46595000	Ponte Fortaleza-Brasília	1967 a 1973	8290	RH II e RFH 1
48070000	Lagoa do Boi	1977 a 2000	3546	RFH 2
48259000	Próximo a Curaçá II	1989 a 2000	3196	RFH 2

* exceto os anos de 1996 e 1997

Não foi possível separar postos para verificação em todas as regiões, para não comprometer o grau de liberdade dos modelos ajustados.

Considerando os modelos de regionalização adotados, foram estimadas vazões mínimas com 7 dias de permanência, máximas e médias nas regiões estudadas para os postos fluviométricos acima citados.

6.2.1 Regiões homogêneas segundo aspectos hidrológicos

Na Figura 6.4 são mostrados os postos fluviométricos usados para verificação dos modelos de regionalização, adotando os valores de vazões.

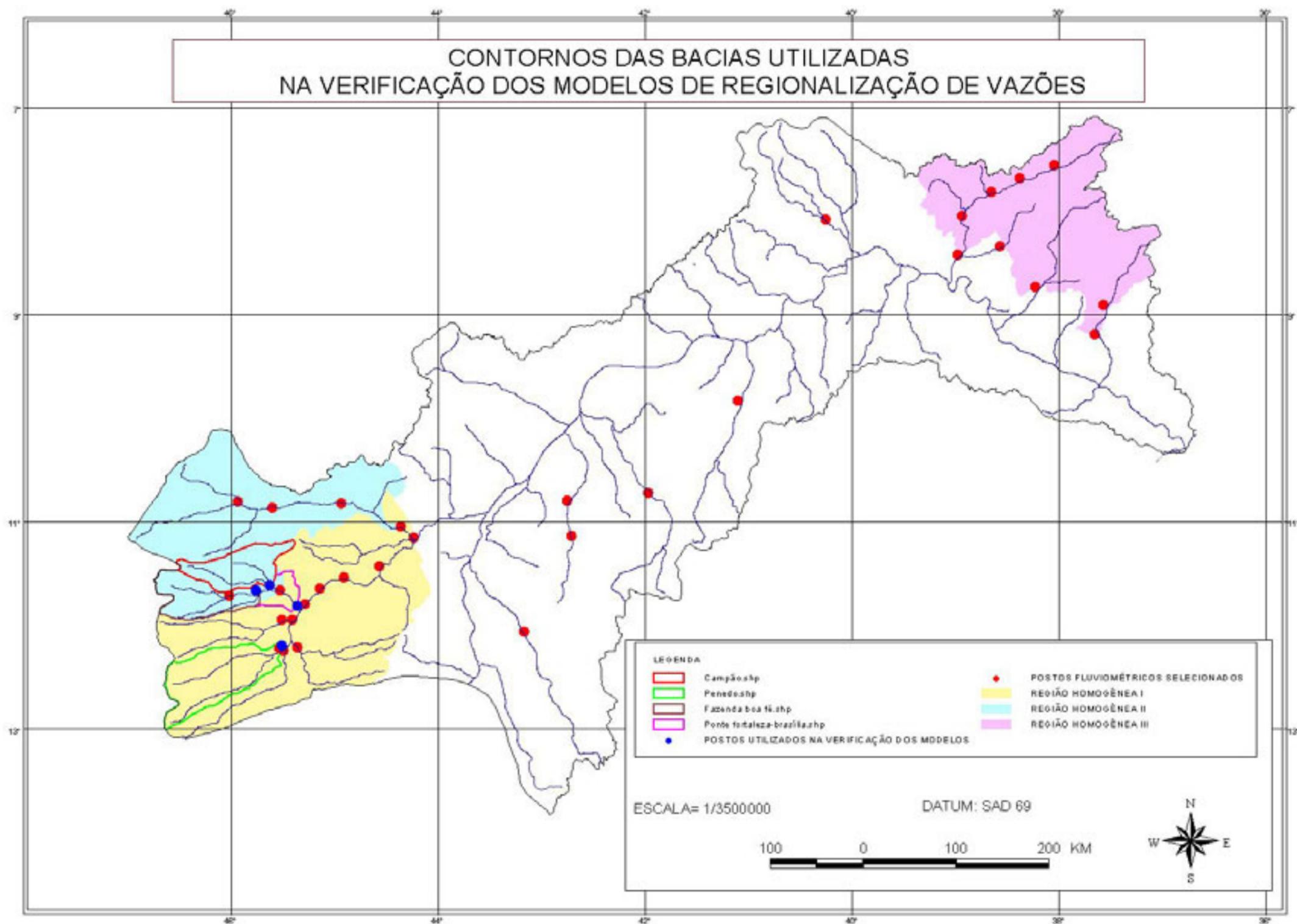


Figura 6.4: Contornos das bacias utilizadas na verificação dos modelos de regionalização de vazões para as regiões homogêneas definidas

Na Tabela 6.14 e 6.15 são apresentadas as vazões observadas, as estimadas pelos modelos de regionalização com os respectivos modelos de regressão adotados e os percentuais de desvio relativo para as bacias utilizadas na verificação.

Para as tabelas seguintes considere-se as seguintes abreviações:

$Q_{\min \text{ obs}}$, $Q_{\max \text{ obs}}$ e $Q_{\text{med obs}}$ = vazão mínima de 7 dias, máxima e média observada na série histórica do posto, respectivamente em m^3/s ;

$Q_{\min \text{ est}}$, $Q_{\max \text{ est}}$ e $Q_{\text{med est}}$ = vazão mínima de 7 dias, máxima e média estimada pelo modelo de regionalização, respectivamente em m^3/s .

Tabela 6.14: Vazões mínimas de 7 dias, máximas e médias de longo período para bacias inseridas na região homogênea 1- RH I: verificação do modelo

Modelo selecionado: $Q_{\min} = 0,0359.A^{0,8016} .\%soloA^{0,6920}$ Vazão mínima de 7 dias- região homogênea I				
Código	Nome do posto	$Q_{\min \text{ obs}}$	$Q_{\min \text{ est}}$	% dr
46460000	Penedo	42,57	43,42	-1,99
Modelo selecionado: $Q_{\max} = e^{(4,3058+0,000051 .A-1,2230.\%soloB)}$ Vazão máxima- região homogênea I				
Código	Nome do posto	$Q_{\min \text{ obs}}$	$Q_{\min \text{ est}}$	% dr
46460000	Penedo	95,83	101,44	-5,85
Modelo selecionado: $Q_{\text{med}} = 0,0431.A^{0,8186} .\%soloA^{0,6778}$ Vazão média- região homogênea I				
Código	Nome do posto	$Q_{\min \text{ obs}}$	$Q_{\min \text{ est}}$	% dr
46460000	Penedo	50,97	53,81	-5,57

Na Região Homogênea I- RH I por carência de séries históricas de postos fluviométricos utilizou-se apenas a série do posto 46455000 e para esta bacia os valores de vazões médias estimadas estão próximos dos observados, apresentando baixos valores de desvios relativos.

Tabela 6.15: Vazões mínimas de 7 dias, máximas e médias de longo período para bacias inseridas na região homogênea II- RH II: verificação do modelo

Modelo selecionado: $Q_{\min} = 0,0018.A^{0,6830}.Ds^{0,7825}$				
Vazão mínima de 7 dias- região homogênea II				
Código	Nome do posto	$Q_{\min \text{ obs}}$	$Q_{\min \text{ est}}$	% dr
4656000	Campão	15,43	18,56	20,30
46585000	Fazenda Boa Fé	14,25	12,41	-12,89
46595000	Ponte Fortaleza-Brasília	33,67	39,56	17,50
Modelo selecionado: $Q_{\max} = e^{(2,8449+0,0027.Cr+0,0095.Ds)}$				
Vazão máxima- região homogênea II				
Código	Nome do posto	$Q_{\min \text{ obs}}$	$Q_{\min \text{ est}}$	% dr
4656000	Campão	24,50	68,40	-179,18
46585000	Fazenda Boa Fé	53,56	43,37	19,03
46595000	Ponte Fortaleza-Brasília	87,83	102,30	-16,47

Modelo selecionado: $Q_{med} = 0,0043.A^{0,6948}.D_s^{0,6297}$				
Vazão média- região homogênea II				
Código	Nome do posto	$Q_{min\ obs}$	$Q_{min\ est}$	% dr
4656000	Campão	17,18	23,92	39,22
46585000	Fazenda Boa Fé	20,75	17,26	-16,80
46595000	Ponte Fortaleza-Brasília	44,62	49,80	11,61

Na Região Homogênea II- RH II os resultados do modelo, comparado com os dados dos postos Fazenda Boa Fé e Ponte Fortaleza-Brasília, apresentam valores de vazões médias estimadas próximas das observadas nas séries históricas, enquanto que para a estação Campão, também pertencente à RH II, por possuir uma pequena série de vazões observadas (apenas 5 anos) apresenta vazão máxima e média de longo período estimadas com desvios relativos maiores que 30% do valor da respectiva vazão observada.

6.2.2 Regiões fisicamente homogêneas

Da mesma forma que para as regiões homogêneas definidas a partir de critérios hidrológicos, também foram estimadas vazões mínimas, máximas e médias para as regiões fisicamente homogêneas para alguns postos fluviométricos localizados na região definida e que não foram utilizados na formulação dos modelos de regionalização.

Na Figura 6.5 encontram-se as regiões fisicamente homogêneas e os contornos das bacias utilizadas na verificação dos modelos de regionalização de vazões.

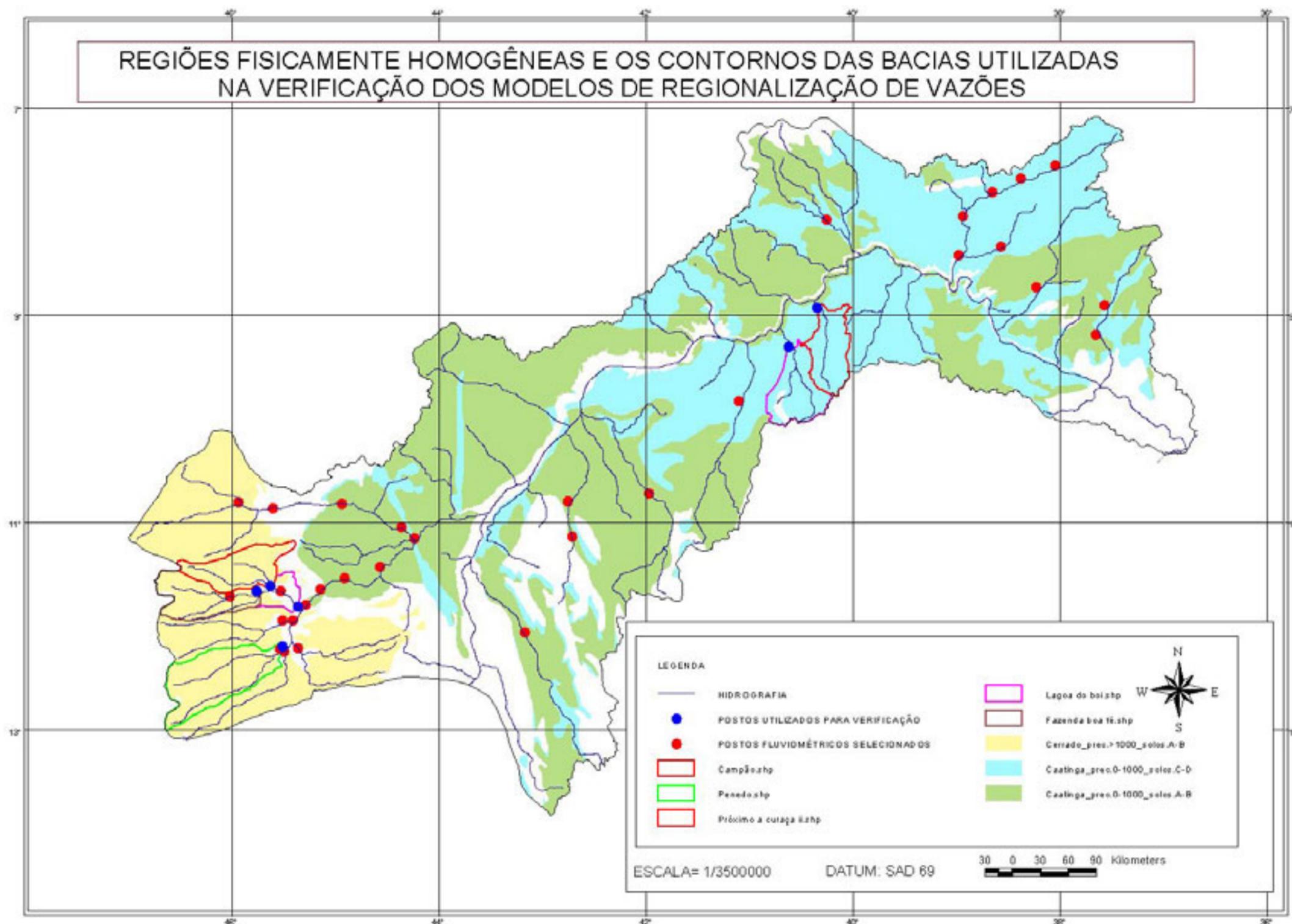


Figura 6.5: Regiões fisicamente homogêneas e os contornos das bacias utilizadas na verificação dos modelos de regionalização de vazões.

A Tabela 6.16 e a 6.17 mostram a verificação dos modelos selecionados com suas respectivas vazões estimadas e observadas e o percentual do desvio relativo para cada uma.

Tabela 6.16: Vazões mínimas de 7 dias, máximas e médias de longo período para bacias inseridas na região fisicamente homogênea 1- RFH 1: verificação do modelo

Modelo selecionado: $Q_{\min} = 0,0041 \cdot Cr^{0,9061} \cdot Ds^{0,9464} \cdot \%soloA^{0,6201}$				
Vazão mínima de 7 dias- região fisicamente homogênea 1				
Código	Nome do posto	$Q_{\min \text{ obs}} \text{ (m}^3\text{/s)}$	$Q_{\min \text{ est}} \text{ (m}^3\text{/s)}$	Desvio relativo (%)
46460000	Penedo	42,57	31,73	25,46
46560000	Campão	15,43	27,71	-79,56
46585000	Fazenda Boa Fé	14,25	15,49	-8,73
46595000	Ponte Fortaleza-Brasília	33,67	44,76	-32,92
Modelo selecionado: $Q_{\max} = e^{(2,8136+0,0077 \cdot Ds+0,0049 \cdot Cr-0,8212 \cdot \%soloB)}$				
Vazão máxima- região fisicamente homogênea 1				
Código	Nome do posto	$Q_{\max \text{ obs}} \text{ (m}^3\text{/s)}$	$Q_{\max \text{ est}} \text{ (m}^3\text{/s)}$	Desvio relativo (%)
46460000	Penedo	95,83	79,87	16,66
46560000	Campão	24,50	73,14	-198,54
46585000	Fazenda Boa Fé	53,56	47,91	10,54
46595000	Ponte Fortaleza-Brasília	87,83	118,03	-34,39

Modelo selecionado: $Q_{med} = 0,0101.Cr^{0,8491}.Ds^{0,8753}.%soloA^{0,6002}$				
Vazão média- região fisicamente homogênea 1				
Código	Nome do posto	$Q_{med\ obs}$ (m ³ /s)	$Q_{med\ est}$ (m ³ /s)	Desvio relativo (%)
46460000	Penedo	50,97	42,16	17,29
46560000	Campão	17,18	37,09	-115,87
46585000	Fazenda Boa Fé	20,75	21,66	-4,39
46595000	Ponte Fortaleza-Brasília	44,62	57,89	-29,74

Como pode ser observado houve ajuste razoável, na verificação, exceto para o posto fluviométrico 46560000 (Campão), o que se explica pelo fato de que a série histórica tem apenas 5 anos de observação.

Tabela 6.17: Vazões máximas e médias de longo período para bacias inseridas na região fisicamente homogênea 2- RFH 2: verificação do modelo

Modelo selecionado: $Q_{max} = 0,2300.Cr^{1,3961}$				
Vazão máxima- região fisicamente homogênea 2				
Código	Nome do posto	$Q_{max\ obs}$ (m ³ /s)	$Q_{max\ est}$ (m ³ /s)	Desvio relativo (%)
48070000	Lagoa do Boi	34,05	155,51	-356,72
48259000	Próximo a Curaçá II	177,36	161,96	8,69

Modelo selecionado: $Q_{med} = 0,0007.Cr^{1,8121}$				
Vazão média- região fisicamente homogênea 2				
Código	Nome do posto	$Q_{med\ obs} (m^3/s)$	$Q_{med\ est} (m^3/s)$	Desvio relativo (%)
48070000	Lagoa do Boi	0,83	3,30	-297,5
48259000	Próximo a Curaçá II	2,79	3,48	-24,65

Observando a Figura 6.5 verifica-se que a sub-bacia do posto 48259000 (Próximo a Curaçá II) está totalmente inserida na região fisicamente homogênea 2 enquanto que a bacia do posto 48070000 (Lagoa do Boi) encontra-se em grande parte inserida nesta região. A sub-bacia possui um percentual de sua área coberta por floresta, o que a diferencia do resto da região e, possivelmente, é a causa da diferença nas vazões observadas e estimadas.

Capítulo 7

CONCLUSÕES

A quantidade e qualidade das séries históricas utilizadas em estudos de regionalização são primordiais para se obter resultados satisfatórios. Para a amplitude da área estudada trabalhou-se com uma notada escassez de dados, o que faz com que qualquer processo de regionalização seja afetado nestas circunstâncias, seja pelo percentual de área regionalizada ou por não se obter bons resultados estatísticos com os modelos em algumas regiões.

Na tentativa de melhorar os ajustes dos modelos e na possibilidade de inclusão de bacias não consideradas buscou-se a introdução de parâmetros físicos que inferissem melhoria na diferenciação entre as regiões e na qualidade dos modelos representativos. Estes parâmetros foram o desnível específico e as frações de solos segundo a classificação hidrológica. Essas novas variáveis explicativas utilizadas nos modelos, trouxeram melhoria ao ajuste, reduzindo o erro para a estimativa de vazões mínimas, máximas e médias.

Por sua vez, a variável desnível foi substituída pelo desnível específico, sendo desta forma, representado o relevo das bacias hidrográficas e não a diferença de nível entre dois pontos do rio principal da bacia. Esse novo parâmetro também trouxe ganhos ao ajustamento

Da análise de considerável massa de dados (apesar da citada escassez, que se deve à amplitude da área em estudo e o período curto de observação em muitos postos) foi possível, por métodos estatísticos, realizar agrupamentos em regiões homogêneas.

No entanto, em se tratando de percentual de área regionalizada obteve-se apenas 27% do total da área estudada, deixando-se grande parte da região em estudo sem qualquer tipo de modelo para estimativa de vazões.

Face a este fato, buscou-se uma forma de regionalização baseada nas características físicas observadas na região.

Esta segunda metodologia, não apresentou, de uma forma geral, a mesma qualidade de ajuste que os modelos propostos na primeira, o que era de se esperar. Contudo, em função desta divisão, é permitida, com certa cautela, a extrapolação para sub-bacias desprovidas de informações que estejam contidas nas regiões fisicamente homogêneas, visando obter estimativas de vazões. Nesta segunda configuração, as três áreas estudadas, para as quais foi gerado um modelo de regionalização, correspondem a 80% da área em estudo.

A obtenção dos parâmetros envolvidos para uso dos modelos de regionalização não é trivial, dado que se requer toda uma base de informações cartográficas e temáticas para a quantificação das variáveis envolvidas. Há, entretanto, um amplo processo de geração de informações em todo o país: nos estados, nos órgãos da União, nos comitês, os planos de bacias hidrográficas têm possibilitado melhor conhecimento sobre as características físicas de muitas bacias hidrográficas brasileiras. Aliada à geração da base de dados e informações, a capacitação das entidades públicas e privadas no uso das técnicas de geoprocessamento e a ampla divulgação que se inicia, com os sistemas de informações sobre recursos hídricos, vai sendo aprimorada no país a geração e emprego desse tipo de modelo para a melhor avaliação e uso dos recursos hídricos.

Com a regionalização a partir do conhecimento do meio físico, também se verificou que bacias antes selecionadas para uma determinada região homogênea puderam ser agrupadas com outras espacialmente distantes mais com características físicas semelhantes. Esta possibilidade permitiu a formação de região fisicamente homogênea, propondo modelos de regionalização de vazões para região antes desprovida de informações.

Capítulo 8

RECOMENDAÇÕES

Algumas questões básicas surgem quando se pensa em recomendações para o uso dos resultados deste trabalho, para o refinamento dos processos utilizados no desenvolvimento e por fim para a continuidade dos estudos de aperfeiçoamento metodológico a respeito das técnicas de regionalização de vazões.

Como foi detectado neste texto, a quantidade de séries históricas de vazões disponíveis para a pesquisa foi bastante restrita, mesmo com o acesso a todos os dados da ANEEL/ANA. Dados do INMET, CODEVASF, DNOCS e entidades gestoras estaduais, podem existir e melhorar a base de dados para a análise. Da mesma forma, as variáveis propostas nesse trabalho, principalmente os tipos de solos, podem ser quantificados em escala maior (Por exemplo, o Estado de Pernambuco dispõe de mapas de solos feitos pela EMBRAPA na escala de 1:100.000).

No que se refere à metodologia, para nosso estudo, recomenda-se que a tipologia de vegetação e área ocupada façam parte das variáveis a serem selecionadas pelo modelo. Isso se explica face à influência da cobertura vegetal sobre a retenção do escoamento superficial direto e os mecanismos de recarga. Por razões similares, a geologia regional, contrastada e combinada com os mapas de solos, podem trazer informações relevantes à geração de modelos de regionalização.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACREMAN, M. C.; SINCLAR, C. D. Classification of drainage basins according to their physical characteristics; an application for flood frequency analysis in Scotland. **Journal of Hydrology**. 1986. v. 84. 365-380.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Bacia do rio São Francisco**. Disponível em: <http://www.ana.gov.br/Bacias/Sfrancisco/INDEXSF.htm> . Acesso em: agosto/2002.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **HidroWeb- Sistema de Informações Hidrológicas**. Disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br/hidroweb> . Acesso em: junho/ 2002.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **HidroWeb - Sistema de Informações Hidrológicas**. Disponível em: <http://hidroweb.aneel.gov.br/hidroweb> . Acesso em: setembro/ 2001.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Sistema de Informações Georreferenciadas de Energia e Hidrologia – HIDROGEO**. Brasília: ANEEL, versão 1.1, 2000, CD-ROM.
- ALBIZURI, Ricardo G. Estudo das enchentes dos rios Uruguai e Iguaçu regionalização por bacia. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, XIII, 1999, Belo Horizonte.
- ALVES, Lincoln; TIBÉRIO, M.; GOIS, Raimundo S. S.; BORGES, Gilliano V.L. Zonas hidrológicas homogêneas na região das bacias hidrográficas dos rios Jacu e Curimataú. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, XIII, 1999, Belo Horizonte.

- ANDRADE, Eunice M. de; COSTA, Raimundo N. T.; SOUZA, Ivam H.; AQUINO, Luiz C.; OLIVEIRA, Marleide S. Regionalização de bacias hidrográficas na região litorânea do estado do Ceará. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, XIV, 2001, Aracaju.
- ANDRADE, Eunice M. de; HAWKINS, Richard H. Aplicação da função de Andrews na avaliação de bacias em regiões áridas e semi-áridas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, RS, v. 5, n. 4, p. 17-24, out./dez. 2000.
- BRASIL. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA- EMBRAPA Solos. **Zoneamento Agroecológico do Nordeste do Brasil: Diagnóstico e Prognóstico**. Rio de Janeiro: EMBRAPA, n. 14, 2000. CD-ROM.
- BRASIL. SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE-SUDENE. **Plano Integrado de Recursos Hídricos do Nordeste-PLIRHINE/ Análise do Meio Físico e Regionalização**. SUDENE: Recife, 1978, v. 1.
- CAMPANA, Nestor A.; HAERTEL, Vitor; TUCCI, Carlos E. M. Estimativa de áreas impermeáveis através de sensoriamento remoto. **Revista Brasileira de Engenharia**. v. 10, n. 2, 1992.
- CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS S.A. – ELETROBRÁS. Serviços. Biblioteca virtual. Publicações. **Diretrizes para estudos e projetos de pequenas centrais hidrelétricas. Estudos básicos**. Disponível em: <http://www.eletronbras.gov.br/atuacao/recursos/diretrizes.asp>. Acesso em: agosto/2002.
- COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO DOS VALES DO SÃO FRANCISCO E DO PARNAÍBA - CODEVASF. **Os vales**. Vale do São Francisco. Disponível em: <http://www.codevasf.gov.br> . Acesso em: 10/08/2002.

- EID, Nabil J.; SOUZA, Newton M. Aplicação do geoprocessamento à quantificação do escoamento superficial em bacias rurais/ suburbanas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, XI, 1995, Recife.
- ESRI. Environmental Systems Research Institute. Using ArcView 3D Analyst. New York. EUA, 1996b.
- ESRI. Environmental Systems Research Institute. Using ArcView GIS. New York. EUA, 1996a.
- EUCLYDES, Humberto P. ; SOUZA, Elias F.; FERREIRA, Paulo A.; RUBERT, Og A. V.; SANTOS, Wellington L. RH 3.0 – Regionalização hidrológica Manual do Programa, 1999,149p.
- EUCLYDES, Humberto P.; FERREIRA, Paulo A.; RUBERT, Og A. V.; SANTOS, Ronaldo M. Regionalização hidrológica na bacia do Alto São Francisco a montante da barragem de Três Marias, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, RS v. 6, n. 2, p. 81-105, abr/jun. 2001.
- FERREIRA, Marcos C. Regionalização de pequenas bacias hidrográficas a partir de imagens orbitais e sistemas de informações geográficas. **Geociências**. v. 15, n. 1, 1996.
- FINZI, Cristiane M.; AMARAL, Iara R.; VERSIANI, Bruno R. Regionalização de vazões para as bacias hidrográficas dos rios Caririnha e Corrente (sub-bacia 45). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, XIV, 2001, Aracaju.
- GÓES, Valéria C. **Regionalização de Vazões no Distrito Federal**. 2001. 112f.. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília.

- KJELDSEN, T. R.; SMITHERS, J. C.; SCHULZE, R. E. Regional flood frequency analysis in the KwzZulu-Natal province, South Africa, using the index-flood method. **Journal of Hydrology**. 2002. v.255, p.194-221.
- KYRILLOS, Daniela S. **Sistema de Suporte ao Planejamento dos Recursos Hídricos. Estudo de Caso: Bacia do Rio São Francisco**. 2000. 140f.. Dissertação (Mestrado em tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- LEVINE, David M.; BERENSON, Mark L.; STENPHAN, David. **Estatística: Teoria e Aplicações**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000. 881p.
- MENDES, Carlos A. B.; CIRILO, José A. Modelo Numérico do Terreno. In: MENDES, Carlos A. B.; CIRILO, José A. **Geoprocessamento em Recursos Hídricos: Princípios, Integração e Aplicação**. Porto Alegre: ABRH, 2001. p.341-395.
- MÜLLER, Maurício; GARCIA, Karina S. Modelos digitais de terreno em escalas globais e sua utilização em recursos hídricos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, XIV, 2001, Aracaju.
- NATHAN, R. J.; McMAHON, T. A. Identification of homogeneous regions for the purposes of regionalisation. **Journal of Hydrology**. 1990. v. 121, p.217-238.
- NOUVELOT, J. F. **Planificação da Implantação de Bacias Representativas: Aplicação à Área da SUDENE**. SUDENE: Recife, 1974.
- OBREGON, Esaul; TUCCI, Carlos E. M.; GOLDEFUM, Joel A. Regionalização de vazões com base em séries estendidas: bacias afluentes à Lagoa Mirim, RS.

Revista Brasileira de Recursos Hídricos, RS, v. 4, n. 1, p. 57-75, jan./mar. 1999.

OLIVERA, Francisco. GIS Hydro 2000. **Developing a Hydrologic Model of the Guadalupe Basin**. Center for Research Water Resources. Disponível em: http://ficip.engr.utexas.edu/crwr/cd_consortium_2000/class/exercises/exercise_3.htm . Acesso em: setembro/2000.

PAIVA, João B. D.; PAIVA, Eloiza, M. C. D. **Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas**. 1. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2001. 625p.

PATTON, Peter C.; BAKER, Victor R. Morphometry and floods in small drainage basins subject to diverse hydrogeomorphic controls. **Water Resources Research**. Out/ 1976. v. 12, n. 5, 941-952.

PEDROLLO, Márcia C.; GERMANO, Andréa. Regionalização de vazões na bacia do Rio Tubarão. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, XIII, 1999, Belo Horizonte.

SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS DE PERNAMBUCO- SRH/PE. **Levantamento Preliminar de Disponibilidades Hídricas Versus Demandas na bacia do rio São Francisco**. SHR/PE: Recife, 2000.

TUCCI, Carlos E. M. **Regionalização de Vazões**. 1. ed. Porto Alegre: UFRGS/ANEEL, 2002. 256p.

TUCCI, Carlos E. M. Regionalização de Vazões. In: TUCCI, Carlos E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 1993. p.573-619.

VEIGA , Bruno V.; KRÜGER, Cláudio M. Estudo comparativo das estimativas de vazões com um modelo chuva-vazão e métodos de regionalização. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, XIII, 1999, Belo Horizonte.

VILLELA, Swami; MATTOS, Arthur. **Hidrologia Aplicada**. 1. ed. São Paulo: McGraw- Hill do Brasil, 1975.245 p.

WILTSHIRE, S. E. Identification of homogeneous regions for flood frequency analysis. **Journal of Hydrology**. 1985. v. 84, 287-302.

ZUCARELLI, Graciela V.; PARIS, Marta Carmen Del. Regionalización de curvas de permanencia de caudales en la cuenca del Plata (Argentina). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, XIII, 1999, Belo Horizonte.

USGS. United States Geological Survey. GTOPO30. Disponível em: <http://edcdaac.usgs.gov/gtopo30.html>. Acesso em: setembro/2000.

USGS. United States Geological Survey. HYDRO1K. Disponível em: <http://edcdaac.usgs.gov/gtopo30/hydro/index.html>. Acesso em: setembro/2000.