

MARCELO DE OLIVEIRA LATUF

**MUDANÇAS NO USO DO SOLO E COMPORTAMENTO HIDROLÓGICO NAS  
BACIAS DO RIO PRETO E RIBEIRÃO ENTRE RIBEIROS**

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

VIÇOSA  
MINAS GERAIS - BRASIL  
2007

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

T

L365m  
2007

Latuf, Marcelo de Oliveira, 1979-

Mudanças no uso do solo e comportamento hidrológico  
nas bacias do Rio Preto e Ribeirão Entre Ribeiros /  
Marcelo de Oliveira Latuf. – Viçosa, MG, 2007.  
xii,103 f. : il. col. ; 29cm.

Inclui apêndice.

Orientador: Mauro Aparecido Martinez.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de  
Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 80-84.

1. Solo - Uso - Preto, Rio, Bacia (MG, GO).
  2. Solo - Uso - Entre Ribeiros, Rio (MG).
  3. Solo -  
Uso - Sensoriamento remoto.
  4. Recursos hídricos -  
Desenvolvimento - Aspectos ambientais - Minas Gerais.
- I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

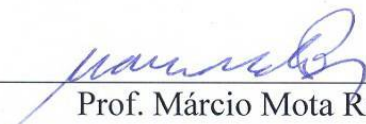
CDD 22.ed. 631.478151


MARCELO DE OLIVEIRA LATUF

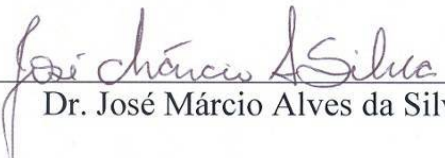
**MUDANÇAS NO USO DO SOLO E COMPORTAMENTO HIDROLÓGICO NAS  
BACIAS DO RIO PRETO E RIBEIRÃO ENTRE RIBEIROS**


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

APROVADA: 28 de Fevereiro de 2007.

  
Prof. Márcio Mota Ramos

  
Prof. Paulo Roberto Cecon

  
Dr. José Márcio Alves da Silva

  
Prof. Demetrius David da Silva  
(Co-orientador)

  
Prof. Mauro Aparecido Martinez  
(Orientador)

*“Os cientistas não são de forma alguma os capitães do navio da sociedade humana, mas estão na posição do homem no topo do mastro que vê mais longe do que o resto da tripulação”.*

*(H. Thirring)*

*Dedico este trabalho*

*À minha mãe Gislene, às minhas irmãs Glória e Gisele, ao meu sobrinho Pedro Henrique, a minha Tia Marlene e à minha namorada Vanessa por me ajudarem durante esta caminhada.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar saúde, humildade e discernimento, qualidades indispensáveis para conseguir caminhar na direção correta.

À Universidade Federal de Viçosa, por intermédio do Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização deste curso.

Ao CNPq pela concessão da bolsa de estudo.

À FAPEMIG pelo suporte financeiro na aquisição das imagens orbitais

Ao Professor Mauro Aparecido Martinez pela amizade, incentivo e conselhos, mas acima de tudo, pela confiança depositada em mim neste trabalho.

Ao Professor Fernando Falco Pruski, pela amizade, conselhos e pelas inúmeras vezes em que recorri a seu apoio.

Ao Professor Demetrius David da Silva pela amizade, confiança e conselhos transmitidos durante a realização deste trabalho.

Ao Professor Paulo Roberto Cecon pela disponibilidade na elucidação de dúvidas e pelos conselhos estatísticos fundamentais para a elaboração deste trabalho.

A minha namorada Vanessa pelo amparo nos momentos difíceis, pela sincera, harmoniosa e agradável companhia durante a realização deste trabalho, o meu muito obrigado! Te amo!

Aos meus grandes irmãos Lúcio Flávio, Mirlei Pereira, Fillipe Tamiozzo e Lucas Falcão pelo convívio sempre descontraído na república Beija-Flor e pelos bons momentos vividos!

Às amizades realizadas durante este trabalho, gostaria de agradecer pelo apoio e companheirismo a Renata, Celso, Luís Gustavo, Fernando, Sady, Felipe, João Batista, João Zonta, Claudinei, Eduardo, Chicão e a toda turma do Laboratório de Hidráulica,

dentre outros tantos, que me ajudaram a crescer como pessoa e como profissional e podem ter certeza, o que hoje eu sou, devo muito a vocês, valeu galera!

Às minhas amigas Carla e Paula pelo acolhimento na “Família”, mesmo recém chegado a Viçosa. Obrigado pelos vários momentos de emoção, principalmente em nossas viagens!

Aos professores, ex-professores e colegas do curso de Geografia da UFV e UFJF, pela amizade e pelas inúmeras discussões e reflexões, em especial a Lúcio Flávio, Mirlei Pereira, Eduardo Maia, André e Luciano.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola, pelo suporte e dedicação.

A todos os demais amigos, professores e funcionários que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, o meu sincero agradecimento.

## **BIOGRAFIA**

MARCELO DE OLIVEIRA LATUF, filho de Gercy Latuf e Gislene Maria de Oliveira Latuf, nascido em Juiz de Fora/ MG em 10 de janeiro de 1979.

Em fevereiro de 2004, concluiu o curso de graduação em Geografia pela Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF.

Em agosto de 2004 iniciou o curso de Mestrado em Engenharia Agrícola na área de Recursos Hídricos e Ambientais, na Universidade Federal de Viçosa - UFV, concluindo-o em 28 fevereiro de 2007.



## SUMÁRIO

|  |    |
|--|----|
| RESUMO.....  | ix |
| ABSTRACT.....  | xi |
| 1. INTRODUÇÃO.....   | 1  |
| 2. REVISÃO DE LITERATURA.....  | 4  |
| 2.1. Bacias do rio Preto e ribeirão Entre Ribeiros .....   | 4  |
| 2.2. Gestão de recursos hídricos .....   | 7  |
| 2.3. Sensoriamento remoto .....  | 11 |
| 2.3.1. Sensor Landsat.....   | 13 |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS .....  | 16 |
| 3.1. Uso do solo nas bacias do rio Preto e ribeirão Entre Ribeiros.....                          | 16 |
| 3.1.1. Processamento digital das imagens.....  | 19 |
| 3.1.1.1. Realce de histograma .....  | 22 |
| 3.1.1.2. Filtragem.....  | 22 |
| 3.1.1.3. Registro de imagens.....  | 24 |
| 3.1.1.4. Segmentação .....   | 25 |
| 3.1.1.5. Definição de amostras representativas.....  | 26 |
| 3.1.1.6. Classificação automática.....   | 28 |
| 3.1.1.7. Verificação da exatidão da classificação automática.....                                | 29 |
| 3.1.2. Monitoramento do uso do solo nas bacias .....   | 31 |
| 3.2. Análise do comportamento hidrológico nas bacias do rio Preto e ribeirão Entre Ribeiros..... | 31 |
| 3.2.1. Seleção do período de análise e preenchimento de falhas .....                             | 33 |
| 3.2.2. Análise de estacionariedade das séries .....  | 35 |
| 3.2.3. Vazões médias, máximas e mínimas .....  | 35 |
| 3.2.4. Análise de precipitações .....  | 35 |
| 3.2.5. Análise de tendências das variáveis hidrológicas.....                                     | 36 |
| 3.3. Estudo da associação entre vazões e uso do solo.....  | 36 |

|   |     |
|---|-----|
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....  | 41  |
| 4.1. Mudanças ocorridas no uso do solo.....   | 41  |
| 4.2. Análise do comportamento das variáveis hidrológicas.....                       | 53  |
| 4.3. Associações entre modificações no uso do solo e comportamento hidrológico..... | 59  |
| 4.3.1. Vazões máximas .....   | 59  |
| 4.3.2. Vazões mínimas .....   | 65  |
| 4.3.3. Vazões médias .....  | 74  |
| 5. CONCLUSÕES .....   | 79  |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....  | 80  |
| APÊNDICES .....   | 85  |
| APÊNDICE A.....   | 86  |
| APÊNDICE B .....  | 94  |
| APÊNDICE C .....  | 102 |

## RESUMO

LATUF, Marcelo de Oliveira. M.Sc, Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2007. **Mudanças no uso do solo e comportamento hidrológico nas bacias do rio Preto e ribeirão Entre Ribeiros.** Orientador: Mauro Aparecido Martinez. Co-orientadores: Demetrius David da Silva e Fernando Falco Pruski.

Discutir e propor soluções para os problemas relativos às bacias hidrográficas, visando à sustentabilidade do uso da água, nos meios urbano e rural, e suas relações com o desenvolvimento sustentável são objetivos que o planejamento e gestão dos recursos hídricos deverão assegurar às futuras gerações. As relações entre o uso do solo e recursos hídricos, entretanto, têm sido marcadas pelo insucesso, com prejuízos significativos para o ambiente, o que tem se transformado em perdas para toda coletividade. Assim, modificações no regime de vazões de uma bacia hidrográfica podem ser causadas por mudanças do uso do solo, pela variabilidade climática, pela construção de barragens ou pelo aumento da irrigação. A troca de uma cobertura por outra altera os componentes do ciclo hidrológico na bacia hidrográfica modificando necessariamente o regime de vazões. Neste contexto inserem-se as bacias hidrográficas do rio Preto e ribeirão Entre Ribeiros, afluentes do rio Paracatu, que drenam uma área de aproximadamente 14.149km<sup>2</sup>. Tendo em vista o complexo quadro de conflitos pelo uso da água existente nestas bacias, o presente trabalho teve como objetivos: realizar o monitoramento do uso do solo no período de 1985 a 2000; associar o comportamento hidrológico das vazões máximas, mínimas e médias observado nas bacias com as variações ocorridas no uso do solo das mesmas; e obter, por meio de ajuste de regressão linear múltipla, equações para estimativa das vazões máxima, mínima e média para as estações fluviométricas localizadas nestas bacias. Este estudo contou com a análise da série temporal de oito estações fluviométricas e onze estações pluviométricas, no período de 1985 a 2000, a fim de se obter a vazão máxima, média e mínimas (Q<sub>7</sub>, Q<sub>90</sub> e Q<sub>95</sub>) para cada ano do período selecionado, assim como, a precipitação média para cada área de drenagem de estações fluviométricas. Para o monitoramento do uso do solo nas

bacias foram utilizadas 27 imagens do sensor Landsat TM 5, das órbitas/ponto 221/71, 220/71 e 220/72, tendo sido tratadas através do software SPRING 4.2. Os dados foram analisados qualitativamente e quantitativamente. A análise qualitativa procurou avaliar, através de linhas de tendências, o comportamento da vazão, do uso do solo e da precipitação ao longo do período escolhido e a associação entre estas variáveis. Além da própria tendência observada foi obtida a significância das mesmas ao longo do tempo. Subsidiando esta análise foram elaborados diagramas de relações causais que auxiliam na associação entre os comportamentos das variáveis. A análise quantitativa dos dados foi realizada usando o procedimento estatístico de regressão linear múltipla, adotando como variável dependente as vazões e variáveis independentes a precipitação e as classes de uso. Foram ajustadas equações de regressão observando os seguintes parâmetros: coeficiente de determinação ( $R^2$ ) acima de 0,70, significância da equação, hipóteses dos coeficientes, assim como, os sinais dos coeficientes. Os resultados demonstraram que, na maioria dos casos, as áreas de cerrado diminuíram significativamente no período avaliado em virtude do aumento das áreas de cultivo, com uma significância média de 97,15%, sendo que o crescimento das áreas de mata ocorreu sobre áreas de pasto, significativamente a 90,76%. A análise qualitativa da associação entre vazão e variações do uso do solo para a vazão máxima, a precipitação do mês mais chuvoso (Pmc), assim como os usos do solo mata e pasto são mais explicativos. Para as vazões mínimas ( $Q_7$ ,  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$ ), as variáveis que associaram-se às mesmas foram a precipitação média anual (Pa), assim como os usos do solo cerrado e cultivo. Já para a vazão média as variáveis foram a precipitação média anual (Pa) e o uso do solo mata. Quanto à análise quantitativa dos dados, foi observada que para as vazões máximas obtiveram-se ajustes satisfatórios para quatro estações fluviométricas, seis para as vazões mínimas e três para vazões médias das oito estações em análise. Entretanto, não chegou-se a resultados de ajustes satisfatórios para as vazões específicas máximas, média e mínimas. As variáveis que apresentaram maiores significâncias foram precipitação do mês mais chuvoso (Pmc), mata e cultivo para as vazões máximas; precipitação do mês mais seco (Pms), cerrado, cultivo e mata para as vazões mínimas; e precipitação média anual (Pa), mata e cultivo para as vazões médias.

## ABSTRACT

LATUF, Marcelo de Oliveira. M.Sc, Universidade Federal de Viçosa, February, 2007.

**Land use change and hydrologic behavior analysis in the Preto river and Entre Ribeiros creek basins.** Adviser: Mauro Aparecido Martinez. Co-advisers: Demetrius David da Silva and Fernando Falco Pruski.

The water resources planning and management have the objective to discuss and propose solutions for the watersheds problems looking for the sustainable water use in the urban and rural areas. The relationships between the land use and water resources have been marked by the failure, with environment significant damages, what has transformed in losses for all collectivity. Thus, modifications on stream flows regime can be caused by land use changes, climatic variability, dams construction or irrigation increase. When the land cover is changed for another one, the hydrologic components cycle on watersheds could be modified, changing the stream flow regime. In this way, the Preto river and Entre Ribeiros creek watershed, tributaries of the Paracatu river, drain an area of 14,149km<sup>2</sup>, which 74.87% (10,621km<sup>2</sup>) are in the Minas Gerais State, 15.71% (2,212km<sup>2</sup>) in the Goiás State and 9.42% (1,316km<sup>2</sup>) in Federal District. Stand out that from 1970 to 2000 the major water consuming agent in the Paracatu river watershed was the irrigation, which had its high participation in 1996 to 93% of the all consumed stream flows. The present work had these objectives: to monitoring the land use change of these basins in the period from 1985 to 2000; to associate the hydrological behavior of the maximum, minimum and mean observed stream flows with the land use variations happened; and to obtain equations for estimate the maximum, minimum and mean stream flows for the fluviometrics stations. This study counted with the analysis of the temporal series of eight fluviometrics stations and eleven pluviometrics stations, in the period from 1985 to 2000, obtaining the maximum, mean, minimum stream flows ( $Q_7$ ,  $Q_{90}$  and  $Q_{95}$ ) for each year of the selected period, as well as, the average annual rainfall, rainiest month rainfall and driest month rainfall for each fluviometrics stations watershed. The land use change was monitored by 27

images of Landsat TM 5 sensor of the row/path 221/71, 220/71 and 220/72, which were treated by the software SPRING 4.2. The data analysis was done in two parts: qualitative and quantitative analysis. The qualitative data analysis tried to evaluate, through of trend lines, the stream flow, the different land uses and the rainfall behavior along to the chosen period and the association between these variables. It was also obtained the significance of the same ones along the time. Were elaborated diagrams of causal relationships, which they aid in the association among the variables behavior. The quantitative data analysis was accomplished by using the statistical procedures of multiple linear regressions adopting the stream flows as dependent variable and rainfall and the land use as independent variables. Thus, regression equations were adjusted observing the following parameters: determination coefficient ( $R^2$ ) above 0.70, equation significance, independent variables significance, as well as, the coefficients signs. The results showed that the savannah areas decreased significantly in this period mainly on cultivation areas with mean significance of 97.15% and the forest areas grew from pasture areas, significantly to 90.76%. As the qualitative analysis of the association between stream flow and land use variations for the maximum stream flow, the rainiest month rainfall, as well as, the land uses forest and pasture were more explanatory. For the minimum stream flows ( $Q_7$ ,  $Q_{90}$  and  $Q_{95}$ ) the variables that associate to the same ones were the diary annual mean rainfall, as well as, savannah and cultivation. For the mean stream flow the variables that associate to the same ones were the diary annual mean rainfall, as well as, forest. However, in the quantitative data analysis was observed that the equations for the maximum and mean specific stream flows did not present satisfactory adjustment, except for the minimum stream flows where it was obtained satisfactory  $R^2$ . However, accomplishing a separately analysis by fluviometrics stations it was obtained satisfactory  $R^2$  to four fluviometrics stations to maximum stream flows, six stations to the minimum stream flows  $Q_7$ ,  $Q_{90}$  and  $Q_{95}$  and three stations to the mean stream flows. The variables that presented larger significances were rainiest month rainfall, forest and cultivation for the maximum stream flows; driest month rainfall, savannah, cultivation and forest for the minimum stream flows; and diary annual mean rainfall, forest and cultivation for the mean stream flows.

## 1. INTRODUÇÃO

Uma das questões que envolvem a problemática ambiental mundial diz respeito às reservas de água doce, em quantidade e qualidade, capazes de suprir o consumo humano atual e futuro. Deste modo, discutir e propor soluções para os problemas relativos às bacias hidrográficas, visando o planejamento e a gestão dos recursos hídricos, o desenvolvimento sustentável nos meios urbano e rural, a segurança alimentar e a qualidade ambiental, são ações inerentes a toda sociedade.

Neste sentido, o planejamento da ocupação de uma bacia hidrográfica é necessário em uma sociedade com usos crescentes por água, tendo em vista os conflitos sobre a disponibilidade deste recurso para atender ao aumento da demanda em quantidade e qualidade.

Entretanto, a maioria das relações entre o uso do solo e recursos hídricos tem sido marcada pelo insucesso, com prejuízos significativos para o ambiente, o que tem se transformado em perdas para toda coletividade. A degradação dos rios tem sido um dos preços pagos pelo desenvolvimento urbano e rural descomprometido com o ambiente (MACHADO, 1998).

Desta forma, o mau uso do solo têm sido um dos principais fatores agravantes da aceleração de processos erosivos, bem como da perda de fertilidade dos solos agricultáveis, da poluição de corpos hídricos, do assoreamento de barragens, do aumento das frequências de vazões de enchente e no aumento dos custos de tratamento de água, dentre outros.

Assim, modificações no regime de vazões de uma bacia hidrográfica podem ser decorrentes de mudanças do tipo de uso do solo, da variabilidade climática, de construção de barragens ou de aumento da irrigação, dentre outros fatores. A troca de

uma cobertura por outra altera o comportamento hidrológico na bacia hidrográfica, tendendo a alterar o comportamento das vazões (COSTA *et al.*, 2003).

A análise do comportamento hidrológico decorrente de mudanças nas condições de usos do solo ou modificações destes é de grande importância para a gestão de recursos hídricos, sobretudo para a determinação de disponibilidades hídricas atuais e futuras.

Um grande complicador nos estudos relacionados às modificações do uso do solo em bacias hidrográficas é que a maioria dos modelos hidrológicos não possuem condições de simular modificações no uso do solo (TUCCI, 1998). Esta dificuldade está relacionada justamente ao fato de alguns parâmetros hidrológicos não serem estacionários, ou seja, a variabilidade temporal e espacial de seu comportamento é justificada, entre outros, pelas diferentes formas de uso do solo, que certamente acarretarão alterações na superfície, tendo impactos sobre comportamento hidrológico.

Deste modo, o conhecimento do comportamento espacial e temporal destes parâmetros é de suma importância para subsidiar a tomada de decisão na gestão de recursos hídricos, uma vez que permite quantificar a disponibilidade dos recursos hídricos no tempo e no espaço, ou seja, identificar áreas em que este recurso se encontra ou pode vir a se tornar escasso (RODRIGUEZ, 2004).

Neste contexto, inserem-se as bacias hidrográficas do rio Preto e ribeirão Entre Ribeiros, afluentes do rio Paracatu, que drenam uma área de aproximadamente 14.149km<sup>2</sup>, dos quais 74,87% (10.621km<sup>2</sup>) encontram-se no Estado de Minas Gerais, 15,71% (2.212km<sup>2</sup>) no Estado de Goiás e 9,42% (1.316km<sup>2</sup>) no Distrito Federal.

Mudanças no uso do solo ocorreram com maior amplitude, principalmente quando impulsionadas pelo avanço da fronteira agrícola, que foram incentivados desde a década de 1970, com o Plano de Desenvolvimento Integrado do Noroeste Mineiro, o PLANOROESTE.

De acordo com RODRIGUEZ (2004) o principal segmento consumidor de água na bacia do rio Paracatu foi a irrigação, que teve no ano de 1996, último ano de censo agropecuário, um consumo superior a 85% e 92% do total da vazão consumida na bacia do rio Preto e do ribeirão Entre Ribeiros, respectivamente.

Deste modo, como conseqüência da grande expansão da agricultura irrigada, sérios conflitos têm surgido em várias partes da bacia do Paracatu, principalmente nas



sub-bacias do ribeirão Entre Ribeiros e do rio Preto, concentrando 53% de toda a área irrigada da bacia do Paracatu (RODRIGUEZ, 2004).

Tendo em vista o complexo quadro de conflitos pelo uso da água existente nas bacias do rio Preto e ribeirão Entre Ribeiros, o presente trabalho teve como objetivos: avaliar as mudanças ocorridas no uso do solo no período de 1985 a 2000, analisar o comportamento das variáveis hidrológicas e associar as modificações no uso do solo ao comportamento hidrológico destas bacias.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Bacias do rio Preto e ribeirão Entre Ribeiros

A bacia do São Francisco, com área de 639.219 km<sup>2</sup>, abrange parte das regiões Sudeste e Nordeste, representando aproximadamente 7,5% do território brasileiro (CBHSF, 2006), com uma vazão média de longa duração na sua foz de aproximadamente 2.850 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, sendo 72% dessa vazão originária do Estado de Minas Gerais (ANA, 2005).

O rio São Francisco possui 2.700 km de extensão e nasce na Serra da Canastra em Minas Gerais, escoando no sentido sul-norte pela Bahia e Pernambuco, quando altera seu curso para leste, chegando ao Oceano Atlântico através da divisa entre os estados de Alagoas e Sergipe. A bacia envolve sete unidades da federação - Bahia, Minas Gerais, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Goiás e Distrito Federal, com 504 municípios (CBHSF, 2006).

O clima apresenta uma variabilidade associada à transição do úmido para o semi-árido, com temperaturas médias anuais variando de 18 a 27°C, baixo índice de nebulosidade e grande incidência de radiação solar. A pluviosidade apresenta média anual de 1.036 mm, sendo que os mais altos valores de precipitação, da ordem de 1.800 mm, ocorrem nas nascentes do Rio e os mais baixos, cerca de 350 mm, entre Santo Sé e Paulo Afonso, na Bahia (PEREIRA, 2004 e CBHSF, 2006).

Na bacia do São Francisco, a vazão de retirada (166 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>) é distribuída nos diferentes usos da seguinte forma: 69% para irrigação, 16% para abastecimento urbano, 4% para uso animal, 9% para abastecimento industrial e 2% para abastecimento rural. Por outro lado, a vazão consumida (105 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>) é assim distribuída: 86% para irrigação,

5% para abastecimento urbano, 5% para uso animal, 3% para abastecimento industrial e 1% para abastecimento rural (CBHSF, 2004).

A bacia possui 342.712 ha irrigados, onde cerca de 30% são referentes a projetos públicos. A distribuição da área irrigada entre as regiões fisiográficas é a seguinte: 13% no Alto São Francisco, 50% no Médio, 27% no Submédio, e 10% no Baixo. De acordo com a Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e Parnaíba (CODEVASF), o limite de aproveitamento de terras para irrigação seria de 800.000 hectares, sem a instalação de conflito dos usos múltiplos (CBHSF, 2004).

RAMOS e PRUSKI (2003) evidenciaram, em estudo pertinente à quantificação e análise da eficiência do uso da água pelo setor agrícola na bacia do São Francisco, a necessidade de otimização das estratégias de manejo da irrigação nessa bacia.

Além da irrigação, destaca-se também como importante atividade econômica da bacia a hidroeletricidade. Seu potencial hidrelétrico era de 26.320 MW, sendo que a implantação de vários projetos hidroelétricos no São Francisco acabou por alterar o comportamento hidrológico do rio (CODEVASF, 2003).

Uma importante sub-bacia do São Francisco é a do rio Paracatu, a qual se situa no Médio São Francisco e drena uma área de aproximadamente 45.600 km<sup>2</sup>, representando cerca de 7% da área de drenagem da bacia do São Francisco (CBHSF, 2006).

Da área de drenagem da bacia do Paracatu, cerca de 92% encontram-se no Estado de Minas Gerais, 5% em Goiás e 3% no Distrito Federal (FERREIRA e EUCLYDES, 1997). Suas principais sub-bacias são, pela margem direita, a do rio da Prata, com 3.750 km<sup>2</sup>; e a do rio do Sono, com 5.969 km<sup>2</sup>; e, pela margem esquerda, as bacias do rio Escuro, com 4.347 km<sup>2</sup>, a do ribeirão Entre Ribeiros, com 3.866,46 km<sup>2</sup>, e a do rio Preto, com 10.282,94 km<sup>2</sup> (ANA, 2005).

As vazões do rio Paracatu que afluem ao rio São Francisco são, em média, da ordem de 220 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> durante o período de estiagem e 800 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> durante a época chuvosa, representando percentuais de 40 e 38%, respectivamente, da vazão do rio São Francisco no posto fluviométrico de Cachoeira da Manteiga, situado a montante da seção de deságüe do Paracatu no São Francisco (BRASIL, 1996).

O principal segmento usuário de água na sub-bacia do Paracatu é a irrigação, que ocupa uma área de 37.150 ha e cuja vazão consumida representa 86,6% do total demandado na bacia, seguida pelo abastecimento animal com 10,7%, pelo

abastecimento urbano com 1,5% e rural com 1,2% (RODRIGUEZ, 2004). Evidencia-se que a maioria dos projetos de irrigação da bacia aplica água em excesso, reduzindo sua disponibilidade e contaminando os rios e o lençol freático (RAMOS e PRUSKI, 2003).

De acordo com Rodriguez (2004) a taxa média de crescimento da vazão consumida pela irrigação no período de 1970 a 1996 foi de  $0,19 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , sendo que para os demais consumos foram de  $0,0029 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  para o abastecimento urbano e  $0,010 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  para o abastecimento animal. O consumo médio pela irrigação em 1996 foi de 87% do consumo total, sendo a taxa de crescimento do consumo de água na bacia de  $0,21 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ .

Na Figura 1 visualiza-se o comportamento, ao longo do período de 1970 a 2000, da vazão consumida pelos diversos segmentos consumidores de água na bacia do Paracatu.

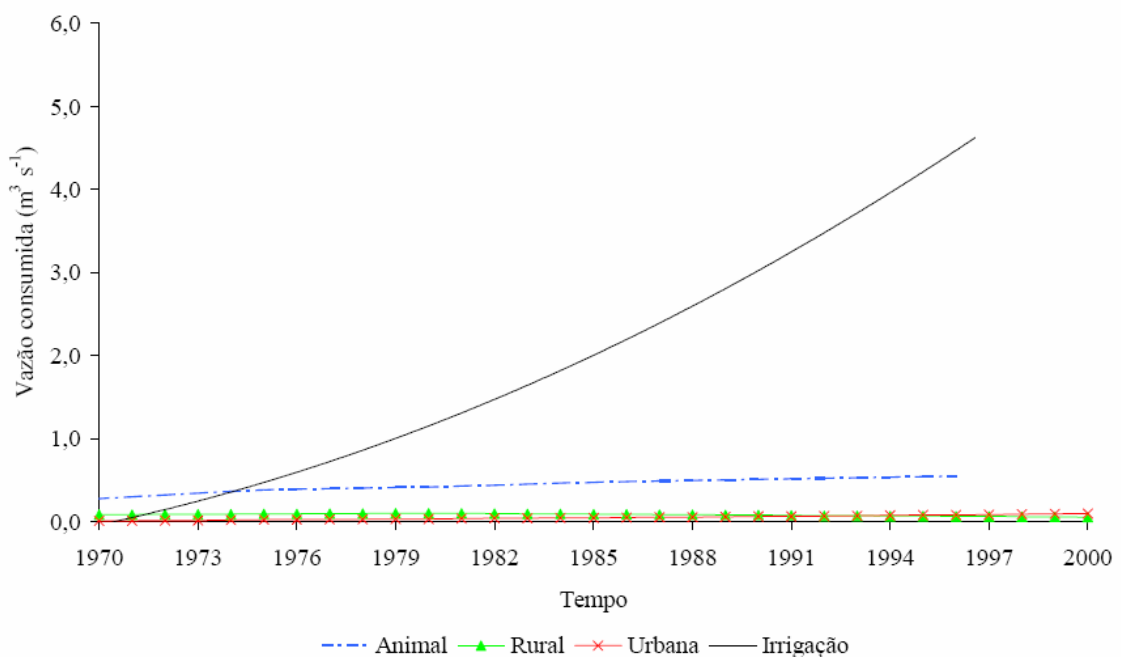


Figura 1. Usos da água na bacia do Paracatu (RODRIGUEZ, 2004).

As bacias do rio Preto e ribeirão Entre Ribeiros estão localizadas a noroeste da bacia do rio Paracatu e englobam nove municípios: Formosa/GO, Cabeceiras/GO, Cabeceira Grande/MG, Distrito Federal/DF, Unai/MG, Natalândia/MG, Dom Bosco/MG, Bonfinópolis de Minas/MG e Paracatu/MG.

Os principais usos dos recursos hídricos nas bacias do rio Preto e ribeirão Entre Ribeiros são para o atendimento das demandas de abastecimento urbano, dessedentação de animais e irrigação. No Quadro 1 são mostradas as variações das áreas irrigadas no

decorrer dos anos, obtidas através de dados do censo agropecuário dos municípios que compõem estas bacias.

Quadro 1 - Áreas irrigadas por município

| Municípios            | Área irrigada (ha) |       |       |       |        |
|-----------------------|--------------------|-------|-------|-------|--------|
|                       | 1970               | 1975  | 1980  | 1985  | 1996   |
| Formosa               | 39                 | 787   | 4.169 | 4.110 | 1.874  |
| Cabeceiras            | 0                  | 229   | 47    | 15    | 805    |
| Cabeceira Grande      | -                  | -     | -     | -     | -      |
| Distrito Federal      | 1.151              | 2.086 | 3.812 | 5.538 | 12.591 |
| Unaí                  | 111                | 116   | 624   | 6.073 | 16.851 |
| Natalândia            | -                  | -     | -     | -     | -      |
| Dom Bosco             | -                  | -     | -     | -     | -      |
| Bonfinópolis de Minas | 0                  | 2     | 0     | 217   | 1.937  |
| Paracatu              | 45                 | 412   | 744   | 2.802 | 14.496 |

Fonte: Censos agropecuários 1970, 1975, 1980, 1985 e 1996.

Os principais cultivos produzidos nas bacias do rio Preto e ribeirão Entre Ribeiros, segundo os censos agropecuários realizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística nos anos de 1970, 1975, 1980, 1985 e 1996, são: milho, soja, feijão, banana, pimentão e laranja.

Com o aumento da demanda por recursos hídricos, impulsionado principalmente pelo aumento da área irrigada e pelo crescimento populacional, as bacias do rio Preto e ribeirão Entre Ribeiros estão sob pressão para o atendimento destes usos (RODRIGUEZ, 2004), necessitando um sistema de gerenciamento integrado, visando o aumento da disponibilidade hídrica para os diversos fins, de modo a permitir um equilíbrio sócio-ambiental mais justo para a bacia do Paracatu.

## 2.2. Gestão de recursos hídricos

A maior parte dos problemas relacionados aos recursos hídricos tem como causas principais a sua má utilização e, destacadamente, a falta de planejamento e gestão (MACHADO, 1998).

A intensidade e variedade das demandas por recursos hídricos tornam cada vez mais evidente e necessário o seu gerenciamento, embora ainda prevaleça a falsa impressão de que esses recursos sejam ilimitados (MENDES, 1991). A utilização indevida dos recursos hídricos motivada, sobretudo pelo mito de sua inesgotabilidade, aliada à falta de planejamento e gestão adequada do uso do solo tem gerado graves problemas econômicos e ambientais (MACHADO, 1998).

O planejamento e gestão em recursos hídricos tem o objetivo de impedir e/ou minimizar seus efeitos negativos, como os da poluição resultante do lançamento de efluentes *in natura* nos corpos d'água, produção de sedimentos, erosão, assoreamento, conflitos entre usuários, dentre outros, para cuja recuperação são mobilizados mais esforços econômicos e sociais do que para sua prevenção (MENDES, 1991).

Os recursos hídricos são bens de relevante valor para a promoção do bem-estar de uma sociedade, sendo a água um bem de consumo final ou intermediário na quase totalidade das atividades humanas.

Para o gerenciamento adequado dos recursos hídricos é fundamental conhecer o comportamento hidrológico de bacias hidrográficas e seus regimes de variação de vazões e, principalmente, suas relações com os agentes econômicos e sócio-ambientais presentes ao longo de toda a área de contribuição da bacia.

Dentro de um contexto geral do gerenciamento de recursos hídricos, apresentam-se situações em que se torna necessário compatibilizar os volumes de água disponíveis com as necessidades específicas em um dado momento. Assim, o padrão qualitativo dos recursos hídricos, tanto quanto o quantitativo, deve ser objeto de consideração e de adequação das disponibilidades com as necessidades.

Para auxílio na gestão dos recursos hídricos, deve-se integrar a política de gestão da água com as políticas de ordenamento territorial, ambiental, econômico e social de cada estado pertencente à bacia, de modo a favorecer o desenvolvimento da região, bem como a promoção do bem-estar econômico e social sem, contudo, comprometer a sustentabilidade dos ecossistemas (CUNHA, 2002).

O gerenciamento de um recurso natural, econômico ou sociocultural consiste na articulação do conjunto de ações dos diferentes agentes sociais, econômicos ou socioculturais, objetivando compatibilizar o uso, o controle e a proteção deste recurso ambiental, disciplinando as respectivas ações antrópicas (FREITAS, 2000).

Neste contexto, o ordenamento territorial estabelece a compatibilização entre a oferta e a demanda de uso dos recursos ambientais, evitando conflitos e promovendo a articulação das ações.

Um grande avanço para o gerenciamento de recursos hídricos foi a Lei 9.433/97, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos e criou, no Brasil, o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, e tendo como preceitos básicos: a adoção da bacia hidrográfica como unidade de planejamento, a consideração dos

múltiplos usos da água, o reconhecimento da água como um bem finito, vulnerável e dotado de valor econômico e a necessidade da consideração da gestão descentralizada e participativa desse recurso (BRASIL, 1997).

Dentre os objetivos da Política Nacional de Recursos Hídricos, destaca-se o desenvolvimento sustentável, o qual visa assegurar à atual e às futuras gerações a disponibilidade da água em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos, bem como a utilização racional e integrada desses recursos (SETTI, 2000).

Sendo a água de um manancial o resultado da drenagem de sua bacia, sua disponibilidade e qualidade encontram-se sempre na dependência direta das ações que se realizam no solo dessa bacia (MACHADO, 1998).

Desta forma, o planejamento da ocupação de uma bacia hidrográfica é uma necessidade de uma sociedade com usos crescentes por água, tendo em vista os conflitos sobre a disponibilidade deste recurso para atender ao aumento da demanda em quantidade e qualidade.

A expressão uso do solo pode ser entendida como sendo a forma pela qual o espaço está sendo ocupado. O levantamento do uso do solo é de grande importância, na medida em que os efeitos do uso desordenado causam deterioração no ambiente. Geralmente, os processos de erosões intensas, inundações, assoreamentos de reservatórios e cursos d'água são conseqüências imediatas do mau uso deste solo (MACHADO, 1998; MOTA, 2003; COSTA *et al.*, 2003 e VON SPERLING, 2005).

Dentre as ações humanas que podem comprometer o balanço hídrico, destacam-se, em escala local e regional, o desmatamento, a mudança do uso do solo, os projetos de irrigação e a construção de barragens. Vale ressaltar, ainda, que formas desordenadas de uso do solo acabam por agravar os efeitos das secas ou enchentes que atingem a sociedade e suas atividades econômicas (REBOUÇAS *et al.* 1999).

Os impactos causados pela mudança do uso do solo certamente acarretarão alterações na superfície da bacia, tendo impactos expressivos sobre todo o processo hidrológico da bacia (TUCCI, 1998). Assim, pode-se relatar alterações na interceptação da chuva pela cobertura vegetal, através da retirada da cobertura natural, causando uma maior exposição do solo a estes eventos, trazendo maior probabilidade de encrostamento superficial e conseqüente diminuição da taxa de infiltração e aumento do escoamento superficial.

Por isso, os programas de gestão dos recursos hídricos têm dispensado especial importância ao planejamento do uso do solo, ou seja, têm dado ênfase às medidas de caráter preventivo, mais eficientes e menos onerosas (MOTA, 2003).

Bruijnzeel (1996) cita que praticamente todos os resultados existentes do estudo sobre a influência das modificações do uso do solo associados às alterações em vazões, referem-se a pequenas bacias, onde se têm um maior controle dos eventos e ações, bem como maiores homogeneidades pedo-geomorfológicas e climáticas.

A mesma idéia é compartilhada por Costa (2003) onde o efeito das mudanças do uso do solo em associações com a alteração no comportamento da vazão é de difícil obtenção, devido, sobretudo à alta diversidade espaço-temporal dos tipos de usos do solo, características vegetacionais, pedológicas e climatológicas para áreas com grandes extensões territoriais.

Entretanto, em algumas literaturas encontram-se experimentos que mostram a tentativa de associação entre mudanças ocorridas no uso do solo e alteração no comportamento de vazões para grandes bacias.

Sahin e Hall (1996) utilizaram uma base de dados de 145 experimentos de campo para realizar análises de regressão, com o objetivo de provar a relação entre mudanças de uso do solo e produção de água. Estes autores chegaram a conclusão que com a retirada da vegetação de floresta, a produção de água nas bacias monitoradas aumentou em  $10 \text{ mm ano}^{-1}$  com apenas o desflorestamento de 10% da área.

Costa *et al* (2003) chegaram à conclusão que nos últimos 50 anos, devido às grandes mudanças do uso do solo ocorridas na bacia do rio Tocantins, detectou-se efeitos no comportamento das vazões observadas. Neste sentido, Costa e Foley (1997) com o uso de modelos hidrológicos, tentaram avaliar a conversão de áreas florestas e cerrado para áreas de pasto e para uma condição sem cobertura. De acordo com estes mesmos autores, a completa retirada da floresta aumentaria em 16% a vazão média anual para a estação fluviométrica Porto Nacional, localizada a montante da cidade de Palmas/TO.

De acordo com Costa *et. al.* (2003) e Bruijnzeel (1990) com a substituição de cerrado ou floresta por pasto, diminui a interceptação da água da chuva, o que leva a aumentar o escoamento superficial e a diminuição da infiltração nestas áreas, causando uma diminuição das vazões mínimas e aumento das vazões máximas.



Neste sentido, com o solo mais exposto o mesmo ficará mais susceptível às ações da energia cinética associada a precipitações e, conseqüentemente, a capacidade de infiltração tenderá a ficar reduzida o que acarretará um aumento do escoamento superficial, com redução da alimentação do aquífero, aumentando, desta forma, as vazões máximas e médias e reduzindo as vazões mínimas.

Por outro lado, caso o solo permaneça protegido das ações de precipitações diretas no mesmo, o excedente de precipitação que não é evapotranspirado possui melhores condições de se infiltrar e o aquífero terá uma maior recarga, aumentando, neste sentido, as vazões mínimas e reduzindo as vazões máximas e médias (TUCCI, 1998).

### **2.3. Sensoriamento remoto**

O levantamento do uso do solo de uma determinada região é de interesse fundamental para a compreensão dos padrões de organização do espaço. Desse modo, existe a necessidade de atualização constante dos registros de uso do solo, para que suas tendências possam ser quantificadas, espacializadas e analisadas.

Neste contexto, o sensoriamento remoto constitui uma técnica de grande utilidade, pois permite, em curto espaço de tempo, a obtenção de uma grande quantidade de informações a respeito de registros de uso da terra. As técnicas de sensoriamento remoto e de cartografia digital a cada dia vêm sendo mais utilizadas por diversos setores da sociedade, podendo-se citar: institutos de pesquisas, universidades, empresas públicas e privadas, dentre outras.

O levantamento do uso do solo numa dada área é um aspecto de interesse fundamental para a compreensão dos padrões de organização territorial. Desse modo, existe a necessidade de atualização contínua dos registros de usos do solo para que se possam realizar posteriormente análises de tendências (ROSA, 1990).

Segundo Novo (1999), sensoriamento remoto pode ser definido como a aquisição de informação sobre um objeto a partir de medidas feitas por um sensor que não se encontra em contato físico direto com ele.

A utilização de imagens produzidas por sensores remotos para o mapeamento e monitoramento da superfície terrestre passou a ter fundamental importância nas últimas décadas, principalmente pelo desenvolvimento de técnicas e programas de computador que permitem a análise e manipulação digital destes produtos.

Os sistemas sensores são classificados como sendo ativos ou passivos. Os sistemas sensores ativos são aqueles que possuem a capacidade de geração de sua própria energia eletromagnética para fins de imageamento, ou seja, são sistemas que não dependem de fontes naturais de energia.

Estes sistemas possuem uma vantagem sobre os sistemas passivos, pois possuem a habilidade de imageamento noturno ou sob quaisquer condições meteorológicas. São exemplos destes sistemas os sensores radares JERS (*Japanese Earth Resources Satellite*, da agência espacial japonesa), Radarsat (agência espacial canadense), ERS (*European Remote Sensing Satellite*, da agência espacial européia) e IRS (agência espacial indiana).

Já os sistemas sensores passivos são aqueles que necessitam de uma fonte natural de energia eletromagnética, ou seja, são sistemas sensores que necessitam da presença do Sol como a principal fonte de energia. Este sistema possui ainda uma maior facilidade de processamento e classificação quando comparado ao sistema ativo.

Os sistemas passivos são fortemente dependentes das condições atmosféricas, sendo o processo de aquisição de dados influenciado pela presença de nuvens. São exemplos destes sistemas os sensores LANDSAT (agência espacial norte-americana), SPOT (agência espacial francesa), CBERS (programa espacial brasileiro e agência espacial chinesa) e IKONOS (agência espacial norte-americana).

Todos os sensores possuem certas características que os tornam mais ou menos eficientes para determinados objetivos ou estudos. Estas características são representadas pelas resoluções espacial, espectral, radiométrica, temporal e largura da faixa imageada.

A resolução espacial é a capacidade do sensor de detectar objetos a partir de uma determinada dimensão, ou seja, quanto maior a resolução de um sistema sensor, menor é o tamanho dos elementos que podem ser detectados separadamente (ROCHA, 2000).

Resolução espectral é a habilidade do sensor de registrar a radiação refletida e/ou emitida em diferentes regiões do espectro eletromagnético, ou seja, quanto maior for a resolução espectral, maior será o número de bandas espectrais que o sensor será capaz de adquirir (ROCHA, 2000).

Já a resolução radiométrica representa a capacidade de discriminação entre diferentes intensidades de sinal ou número de nível de cinza, ou seja, quanto maior for este tipo de resolução, maior será a sensibilidade do sensor em discriminar pequenas

diferenças de radiação, aumentando conseqüentemente o poder de extração de informação da imagem (ROCHA, 2000).

A resolução temporal representa a frequência com que a área de interesse é revisitada ou re-imageada, sendo a largura da faixa imageada expressa em  $\text{km}^2$  em que o sensor é capaz de imagear (ROCHA, 2000).

Dentre todos os sistemas sensores, o mais disseminado e difundido é o sensor do satélite Landsat, pois este já está em utilização desde a década de 1970 e possui uma ampla discussão quanto às técnicas de manipulação de suas imagens e padrões de correções.

### 2.3.1. Sensor Landsat

Iniciado em 1972 com o lançamento do primeiro satélite da série Landsat e reforçado com o lançamento, em 1986, do satélite Spot, apresentando melhorias na resolução espacial e temporal em relação ao Landsat MSS, o sensoriamento remoto por satélite assumiu uma importância extremamente grande nos trabalhos de análise e monitoramento ambiental no âmbito local, regional e global (COUTINHO, 1997).

A partir de 1984, a Nasa (Agência Espacial Norte-Americana) colocou em órbita o sensor TM (*Thematic Mapper*), com as mesmas características do MSS, apresentando, porém, uma série de melhorias no que diz respeito às resoluções espectral, espacial, temporal e radiométrica (MOREIRA, 2005).

O sensor TM opera em sete bandas espectrais, sendo três na região do visível, três na região do infravermelho refletido e uma na região termal. A largura da faixa imageada também é da ordem  $185 \times 185 \text{ km}$  e a sua resolução espacial de  $30 \times 30 \text{ m}$  com uma área mínima mapeável de  $900 \text{ m}^2$ , exceto para a banda 6 que possui a resolução espacial de  $120 \times 120 \text{ km}$  e com uma resolução temporal de 16 dias para a revisita (INPE, 2004). No Quadro 2 podem-se visualizar todas as bandas do sensor Landsat TM, com as respectivas faixas espectrais.

A escolha das bandas espectrais é outro fator muito importante para o sucesso de uma interpretação de imagens de satélite, sendo que a seleção das mesmas deverá ir ao encontro com os objetivos do estudo a ser realizado.

Quadro 2 - Bandas espectrais do sensor Landsat

| <b>Bandas</b> | <b>Faixa espectral (<math>\mu\text{m}</math>)</b>  |
|---------------|--|
| 1             | 0,45 a 0,52 $\mu\text{m}$ – azul                   |
| 2             | 0,52 a 0,60 $\mu\text{m}$ – verde                  |
| 3             | 0,63 a 0,69 $\mu\text{m}$ – vermelho               |
| 4             | 0,76 a 0,90 $\mu\text{m}$ – infravermelho próximo  |
| 5             | 1,55 a 1,75 $\mu\text{m}$ – infravermelho médio    |
| 6             | 10,4 a 12,5 $\mu\text{m}$ – infravermelho termal   |
| 7             | 2,08 a 2,35 $\mu\text{m}$ – infravermelho distante |

Fonte: Inpe (2006).

Após selecionadas as bandas para trabalho, o fotointérprete deverá então selecionar qual a melhor composição para o sistema RGB em função do objetivo do trabalho, ou seja, ele deverá escolher qual banda irá ser associada ao canal R, ao canal G e, conseqüentemente, ao canal B. Neste sentido, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) selecionou algumas composições mais recomendadas para a associação das bandas do sensor TM, que podem ser observadas no Quadro 3.

Com relação à utilização de dados do sensor TM, é recomendado ainda, a observação quanto ao nível de correção das imagens fornecidas. O sistema TM possui alguns tipos de correções padronizadas, que podem ser solicitadas no momento de aquisição. No Quadro 4 são apresentados os três principais níveis de correções para aquisição de imagens do sensor TM.

Vale ressaltar que, quanto maior o nível de correção, o custo da aquisição será mais elevado, entretanto, maior será também, a confiabilidade geométrica, radiométrica e atmosférica iniciais das imagens.

Quadro 3 - Aplicações para as diferentes associações das bandas do sensor TM

| <b>Associação (bandas TM)</b> | <b>Aplicabilidades</b>  |
|-------------------------------|---|
| 1, 2 e 3                      | Imagens em "cor natural", com boa penetração na água, realçando as correntes, a turbidez e os sedimentos. A vegetação aparece em tonalidades esverdeadas.                             |
| 2, 3 e 4                      | Define melhor os limites entre o solo e a água, ainda mantendo algum detalhe em águas pouco profundas, e mostrando as diferenças na vegetação que aparece em tonalidades de vermelho. |
| 3, 4 e 5                      | Mostra mais claramente os limites entre o solo e a água, com a vegetação mais discriminada, aparecendo em tonalidades de verde e rosa, indicado para mapeamento de usos da terra.     |

(continua)

| <b>Associação (bandas TM)</b> | <b>Aplicabilidades</b>   |
|-------------------------------|--|
| 2, 4 e 7                      | Mostra a vegetação em tons verdes e permite discriminar a umidade tanto na vegetação como no solo. |

Fonte: INPE (2006).

Entretanto, vale a ressalva que dependendo do objetivo do estudo, outras associações terão que ser testadas.

#### Quadro 4 - Níveis de correção das imagens Landsat TM

| <b>Níveis de correção</b> |   |
|---------------------------|---|
| Nível 0                   | Dados brutos com as bandas espectrais alinhadas espacialmente                     |
| Nível 1                   | Imagem com correção radiométrica sem associação com sistema de projeção           |
| Nível 1G                  | Imagem com correções radiométrica e geométrica associada a um sistema de projeção |

Fonte: INPE (2006).

Entretanto, após serem observadas essas características, o fotointérprete deverá selecionar quais as imagens a serem utilizadas no trabalho. Para isto ele deverá orientar-se através das órbitas/ponto do satélite. Estas órbitas/ponto dos diversos tipos de sensores remotos de base orbital podem ser adquiridas com seus respectivos representantes, sendo algumas fornecidas pela Divisão de Geração de Imagens (DGI/INPE), pelo site [www.dgi.inpe.br](http://www.dgi.inpe.br).

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1. Uso do solo nas bacias do rio Preto e ribeirão Entre Ribeiros**

O período de monitoramento do uso do solo nas bacias hidrográficas do rio Preto e ribeirão Entre Ribeiros foi de 1985 a 2000, sendo que a escolha do ano de 2000 deveu-se ao fato de que o mesmo representa o último ano em que todas as estações fluviométricas na bacia do Paracatu possuem dados consistidos de vazão em suas seções, segundo a base de dados da ANA (ANA, 2005). Já o principal fator para a escolha do ano de 1985 decorre das características do tipo de sensor, já que a partir desta data, o sensor Landsat 5 TM com a resolução espacial de 30 m entrou em operação e continua até hoje.

Neste estudo foram utilizadas 27 imagens, em três órbitas/ponto, do sensor Landsat 5 TM abrangendo os anos de 1985 a 2000, sendo as mesmas intercaladas bianualmente. Desta forma, o monitoramento do uso do solo nas bacias do rio Preto e ribeirão Entre Ribeiros contou com nove anos (1985, 87, 89, 91, 93, 95, 96, 98 e 2000).

Na seleção de quais órbitas/ponto recobriam a área de estudo foi solicitada uma listagem preliminar de imagens junto à DGI/INPE, <http://www.dgi.inpe.br>, conforme coordenadas geográficas limítrofes da área de estudo, para a realização da seleção das melhores datas de passagem do sensor sobre a área, considerando a menor cobertura de nuvens possível.

A partir deste critério pôde ser observado que as melhores datas das imagens eram correspondentes aos meses de estiagem (abril a agosto), devido à menor taxa de cobertura de nuvens na região. Na Figura 2 é apresentado o mapa que mostra a região de estudo, assim como o recobrimento das órbitas/ponto sobre a mesma.

A listagem das imagens selecionadas para a elaboração dos mapas de uso do solo, contendo informações sobre ano, órbita/ponto e data da passagem do sensor é apresentada no Quadro 5.

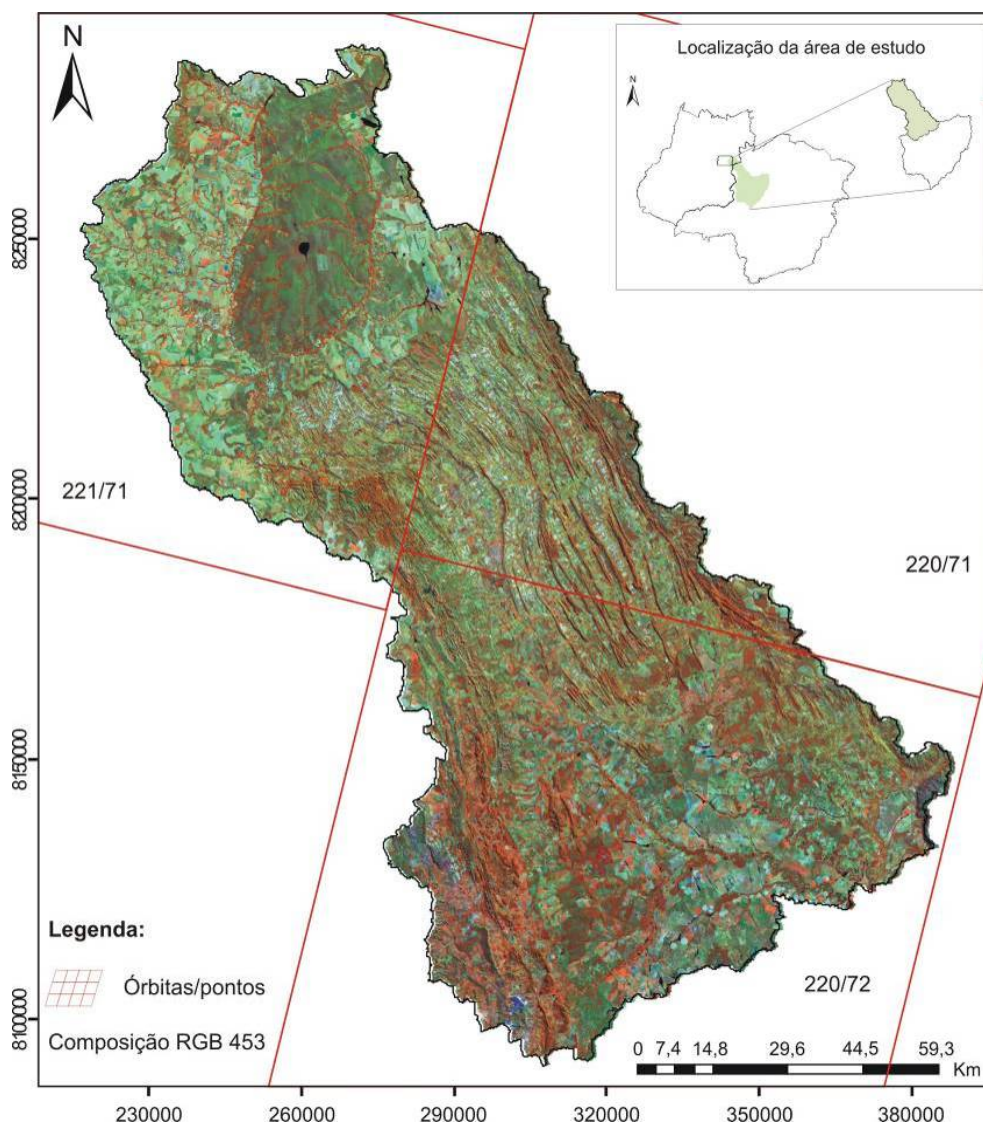


Figura 2. Cobertura do sensor Landsat 5 TM na área de estudo.

Quadro 5 - Listagem das imagens do sensor Landsat TM utilizadas

| <b>Ano</b> | <b>Órbita/ponto</b> | <b>Data de passagem</b> |
|------------|---------------------|-------------------------|
| 1985       | 220/71              | 09/07/1985              |
|            | 220/72              | 22/05/1985              |
|            | 221/71              | 27/04/1985              |
| 1987       | 220/71              | 15/07/1987              |
|            | 220/72              | 15/07/1987              |
|            | 221/71              | 20/06/1987              |
| 1989       | 220/71              | 20/07/1989              |
|            | 220/72              | 17/05/1989              |
|            | 221/71              | 08/05/1989              |

(Continua)

| <b>Ano</b> | <b>Órbita/ponto</b> | <b>Data de passagem</b> |
|------------|---------------------|-------------------------|
| 1991       | 220/71              | 23/05/1991              |
|            | 220/72              | 23/05/1991              |
|            | 221/71              | 02/08/1991              |
| 1993       | 220/71              | 28/05/1993              |
|            | 220/72              | 28/05/1993              |
|            | 221/71              | 20/06/1993              |
| 1995       | 220/71              | 03/06/1995              |
|            | 220/72              | 03/06/1995              |
|            | 221/71              | 10/06/1995              |
| 1996       | 220/71              | 04/05/1996              |
|            | 220/72              | 04/05/1996              |
|            | 221/71              | 27/05/1996              |
| 1998       | 220/71              | 13/07/1998              |
|            | 220/72              | 13/07/1998              |
|            | 221/71              | 02/06/1998              |
| 2000       | 220/71              | 26/03/2000              |
|            | 220/72              | 30/04/2000              |
|            | 221/71              | 05/06/2000              |

Fonte: Catálogo INPE (2006).

As imagens do sensor Landsat 5 TM foram adquiridas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), com o máximo de correções possíveis (Nível 1G), para que fosse minimizado o tempo de pré-processamento e/ou ajustes das mesmas.

Nestas correções, a DGI/INPE utiliza-se das efemérides do sensor (características de altitude, velocidade, posicionamento, dentre outras) para a realização das correções radiométricas, assim como, para as correções geométricas, com apoio de pontos de controle terrestres. No Quadro 6 visualiza-se as características das imagens selecionadas para este trabalho.

Quadro 6 - Informações sobre as imagens adquiridas

| <b>Característica</b> | <b>Especificação</b>            |
|-----------------------|---------------------------------|
| Resolução espacial    | 30m                             |
| Formato               | Geotiff                         |
| Bandas                | 3, 4 e 5                        |
| Datum horizontal      | Córrego Alegre (zona 23 S)      |
| Projeção              | UTM                             |
| Nível de correção     | 1 G (radiométrica e geométrica) |

Fonte: Catálogo INPE (2006).

Na Figura 3 é apresentado um exemplo das imagens do sensor Landsat 5 TM, na qual observa-se as três bandas selecionadas para o estudo: bandas 3, 4 e 5, assim como a composição escolhida para as imagens (R4, G5 e B3).



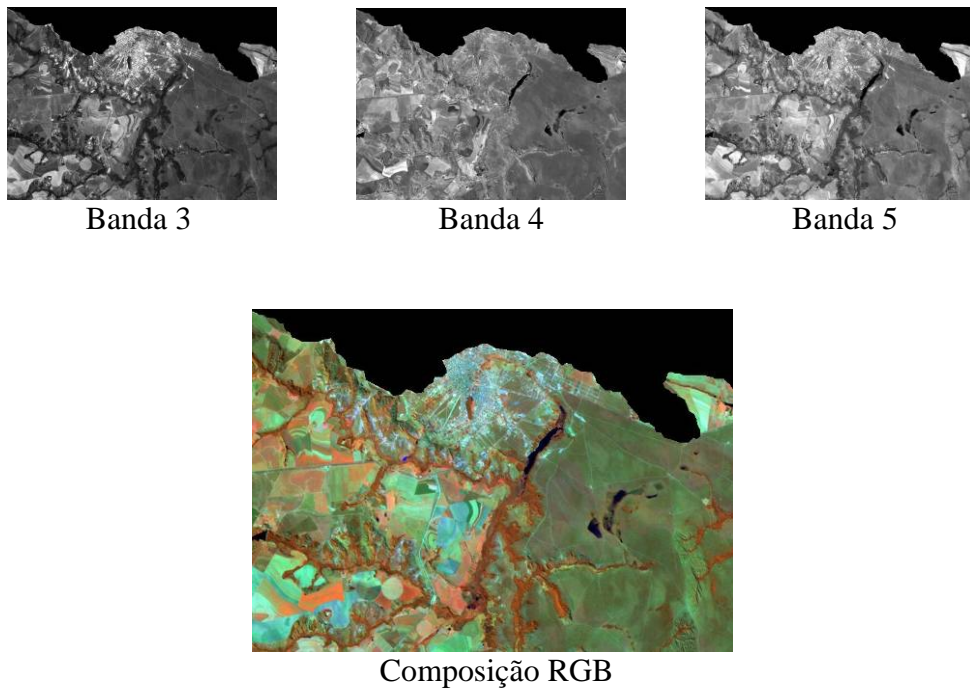


Figura 3. Bandas do sensor Landsat TM e sua composição R(4) G(5) B(3).

### 3.1.1. Processamento digital das imagens

As imagens passaram por procedimentos de processamento digital utilizando o Sistema de Informação Geográfica SPRING 4.2 (Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas), desenvolvido por INPE (2005), que compreende: realce de histograma, filtragem, verificação da correção geométrica ou registro de imagens, segmentação, definição de amostras, classificação digital e, finalmente, verificação da exatidão do mapa temático elaborado.

A etapa de processamento digital das imagens obtidas pelo sensor Landsat 5 TM para a elaboração dos mapas de uso do solo das diferentes épocas imageadas foi realizada conforme os passos apresentados na Figura 4.

As imagens passaram por uma fase de pré-processamento cujo objetivo foi melhorar a qualidade visual e geométrica das mesmas. É válido ressaltar que mesmo após as imagens já terem recebido um tratamento prévio para as correções radiométricas e geométricas foi verificada a qualidade da correção geométrica. Esta etapa foi constituída pelas tarefas de realce de histograma, filtragem, registro de imagens e segmentação.

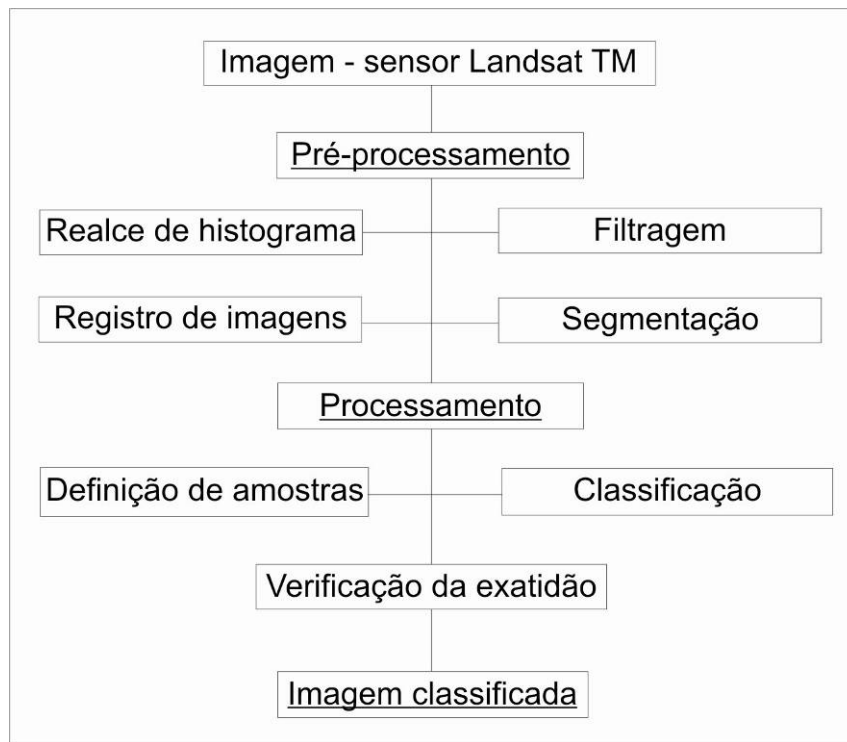


Figura 4. Organograma de processamento das imagens.

Após cumpridas todas estas etapas da fase de pré-processamento dos dados, foi dado início à segunda parte com a definição das amostras representativas das classes de uso do solo, classificação digital e verificação da exatidão dos mapas temáticos de uso do solo.

Tendo sido cumpridas as fases de pré-processamento e processamento dos dados advindos do sensor Landsat 5 TM, finalmente foi confeccionado o mapa temático contendo as seis classes temáticas: mata, cerrado, pastagem, cultivo, reservatórios e urbanização. Neste sentido, foram consideradas as classificações adotadas pelo Manual Técnico de Uso da Terra (IBGE, 2006), referente à classificação do uso do solo mais recente adotada para o território brasileiro.

De acordo com esta classificação considerou-se para este estudo as seguintes classificações:

Mata: compreende um conjunto de estruturas florestal e campestre, abrangendo desde florestas e campos originais (primários) e alterados até formações florestais espontâneas secundárias, arbustivas, herbáceas e/ou gramíneo-lenhosas, em diversos estágios sucessionais de desenvolvimento, distribuídos por diferentes ambientes e situações geográficas. Consideram-se como florestais as formações arbóreas, incluindo-se aí as áreas de Floresta Densa (estrutura florestal com cobertura superior contínua), de Floresta Aberta (estrutura florestal com diferentes graus de descontinuidade da

cobertura superior, conforme seu tipo – com cipó, bambu, palmeira ou sororoca), de Floresta Estacional (estrutura florestal com perda das folhas dos estratos superiores durante a estação desfavorável – seca e frio) além da Floresta Ombrófila Mista (estrutura florestal que compreende a área de distribuição natural da *Araucária angustifolia*, elemento marcante nos estratos superiores, que geralmente forma cobertura contínua).

Cerrado: vegetação xeromórfica preferencialmente de clima estacional, com aproximadamente 6 meses secos, não obstante poder ser encontrada também em clima ombrófilo em altitudes elevadas. É dividida em: Savana florestada (cerradão), Savana arborizada (campo-cerrado), Savana parque e Savana gramíneo-lenhosa (cerrado).

Pastagem: áreas destinadas ao pastoreio do gado, formadas mediante plantio de forragens perenes. Nessas áreas o solo está coberto por vegetação de gramíneas ou leguminosas.

Reservatórios: são represamentos artificiais d'água utilizados para irrigação, controle de enchentes, fornecimentos municipais de água, geração de energia elétrica, controle de enchentes, etc. Na maioria dos casos, os reservatórios servem para fins múltiplos e podem compreender todas as funções anteriormente citadas.

Cultivo: no sentido amplo, a terra agrícola pode ser definida como terra utilizada para a produção de alimentos, fibras e outras *commodities* do agronegócio. Inclui todas as terras cultivadas, caracterizadas pelo delineamento de áreas cultivadas ou em descanso, podendo também compreender áreas alagadas. Podem se constituir em zonas agrícolas heterogêneas ou representar extensas áreas de monoculturas. Encontram-se inseridas nesta categoria as lavouras temporárias, lavouras permanentes, pastagens plantadas e silvicultura.

Áreas Urbanizadas: compreendem áreas de uso intensivo, estruturadas por edificações e sistema viário, onde predominam as superfícies artificiais não-agrícolas. Estão incluídas nesta categoria as metrópoles, cidades, vilas, áreas de rodovias, serviços e transporte, energia, comunicações e terrenos associados, áreas ocupadas por indústrias, complexos industriais e comerciais e instituições que podem em alguns casos encontrar-se isolados das áreas urbanas. As áreas urbanizadas podem ser contínuas, onde as áreas não-lineares de vegetação são excepcionais, ou descontínuas, onde as áreas vegetadas ocupam superfícies mais significativas.

Realizadas todas estas etapas, as imagens foram exportadas para o SIG ArcGIS 9.0 (ESRI, 2004), no formato *Shapefile*, para fazer parte do banco de dados georreferenciado da bacia hidrográfica do rio Paracatu.

#### 3.1.1.1. Realce de histograma

De acordo com Moreira (2005), o realce é uma técnica utilizada para melhorar a percepção visual da imagem com o objetivo de ajudar o fotointérprete no momento de extração de informações das mesmas.

Dos vários tipos de realce existentes, foi adotado para este trabalho o realce linear, pois com a adoção deste tipo, foram obtidas melhores condições visuais nas imagens após sua aplicação. Neste sentido, este procedimento foi realizado em todas as imagens utilizadas para este estudo.

No Quadro 7 visualiza-se uma comparação realizada em um recorte de uma imagem sem a aplicação de nenhuma técnica de realce com uma imagem realçada.

#### 3.1.1.2. Filtragem

O processo de filtragem consiste na suavização e/ou agudização de determinadas características e/ou feições nas imagens no auxílio à interpretação das mesmas (MOREIRA, 2005). Para este procedimento foi adotado um filtro passa-baixa de dimensão 3 x 3 para a eliminação de ruídos (altas frequências). Este filtro foi passado nas imagens apenas uma única vez, caso contrário ele modificaria muito a imagem, perdendo a sua função.

Na Figura 5 é apresentado um recorte de imagem que recebeu um tratamento com o filtro passa-baixa 3 x 3. Nota-se que a imagem (a) possui alguns ruídos espalhados em toda a extensão do recorte, representado pelos pontos brancos, sendo que a imagem (b) já tratada não possui estes ruídos.

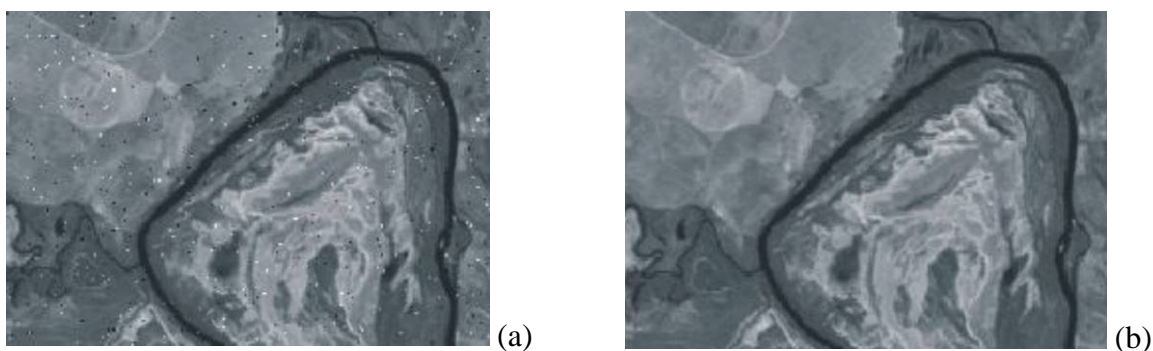


Figura 5. Processo de filtragem para eliminação de ruídos.

Quadro 7 - Comparação da eficiência do realce por histograma

| Bandas TM      |                | Histogramas     |                 |
|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| Sem realce (a) | Com realce (b) | Sem realce (a') | Com realce (b') |
|                |                |                 |                 |
| TM3            |                |                 |                 |
|                |                |                 |                 |
| TM4            |                |                 |                 |
|                |                |                 |                 |
| TM5            |                |                 |                 |

\* (a) Imagens sem realce e (b) imagens realçadas; (a') histograma da imagem sem realce e (b') histograma da imagem realçada

### 3.1.1.3. Registro de imagens

O processo de registro de imagens ou georreferenciamento é um passo fundamental para a análise de dados de sensores remotos. Este procedimento consiste em juntar duas ou mais imagens para formar uma imagem única em um determinado sistema de coordenadas e projeção.

Neste trabalho utilizou-se 3 órbitas/ponto para o total recobrimento da área de interesse, totalizando um conjunto de 27 imagens para a área da bacia ao longo dos 9 anos de monitoramento. O registro das imagens consistiu em associar pontos de uma base cartográfica previamente mapeada (neste caso preferiu-se adotar a base de dados do IBGE através de sua rede de drenagem), a locais de coincidência em localização na imagem, ou seja, a locais que fossem facilmente identificáveis na imagem.

Neste sentido, o sistema de coordenadas adotado para o registro de todas as imagens foi baseado nas informações do IBGE, ou seja, datum horizontal Córrego Alegre e projeção UTM zona 23 Sul.

Este processo foi realizado para cada órbita/ponto do ano de 1985. Neste processo foram selecionados aproximadamente de 40 a 50 pontos de controle para o processo de registro em uma função polinomial de 3°.

Após o primeiro conjunto de 3 órbitas/ponto ter sido registrado com sucesso, foi utilizado o software Regeemy 0.2.42, desenvolvido pela Divisão de Processamento de Imagens, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (FEDOROV *et al*, 2005), para o complemento do trabalho de registro das demais 24 imagens.

Este software permite associar, através de textura, forma e orientação, pontos coincidentes entre duas imagens diferentes. Devido a esta especificidade, a utilização do software agilizou o processo de registro das demais imagens, bastando para isso, identificar pontos coincidentes entre imagens ano após ano. É válido ressaltar que para esta tarefa o software Regeemy conseguiu facilmente identificar um número acima de 1000 pontos de controle para cada órbita/ponto.

Na Figura 6 visualiza-se um exemplo de seleção de pontos de controle nas órbitas/ponto.

Para cada imagem registrada por este processo transferiu-se tanto o sistema de coordenadas da imagem original, quanto as informações sobre o datum horizontal.

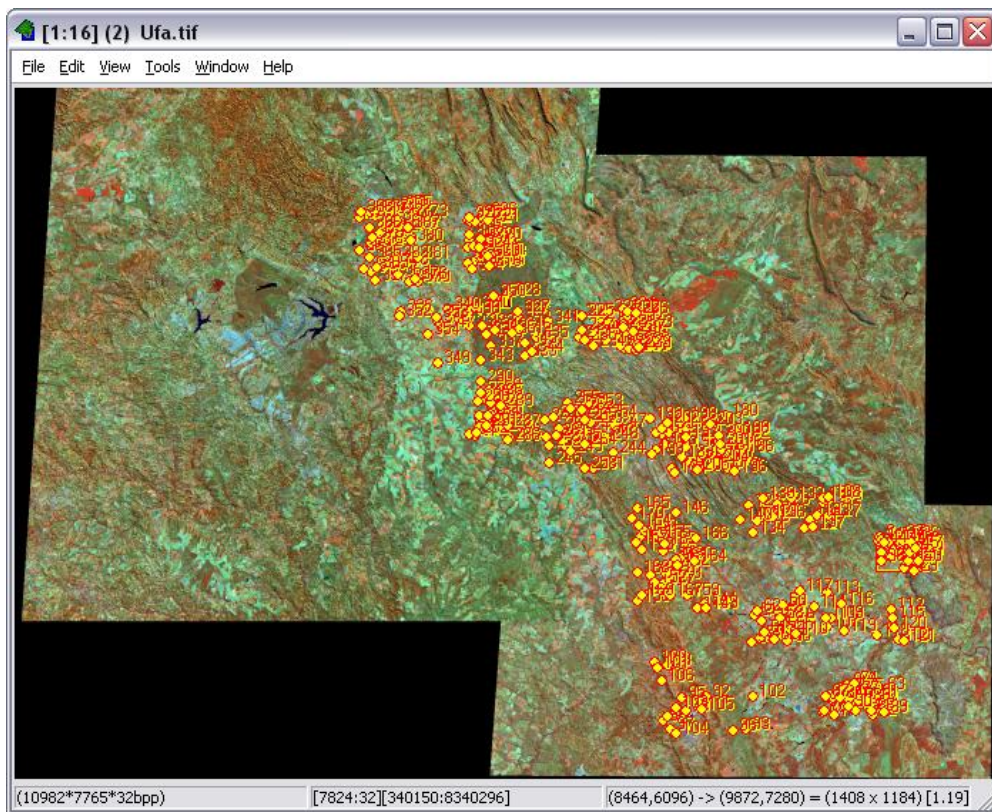


Figura 6. Seleção de pontos de controle no software Regeemy.

#### 3.1.1.4. Segmentação

O processo de segmentação de imagens é um dos mais importantes no que diz respeito à preparação das imagens para a classificação, pois consiste em agrupar regiões de iguais características, principalmente espectrais e texturais (MOREIRA, 2005).

Para este trabalho utilizou-se o segmentador instalado no Sistema de Informação Geográfica SPRING 4.2, capaz de identificar e segmentar áreas de iguais características a partir do método de crescimento de regiões.

Para a utilização deste método o fotointérprete deverá informar ao classificador um limiar de aceitação, assim como o tamanho (em pixels) de regiões mínimas. Foram testados diversos limiares e tamanhos de regiões, chegando a um desempenho satisfatório, tanto computacionalmente, quanto para a qualidade da classificação, com o limiar de 25 e tamanho de polígonos de 100 pixels.

Na Figura 7 é possível observar em um recorte de uma imagem como o segmentador dividiu a imagem em várias regiões. Definido os parâmetros para a realização da segmentação foi então aplicado ao restante das imagens.

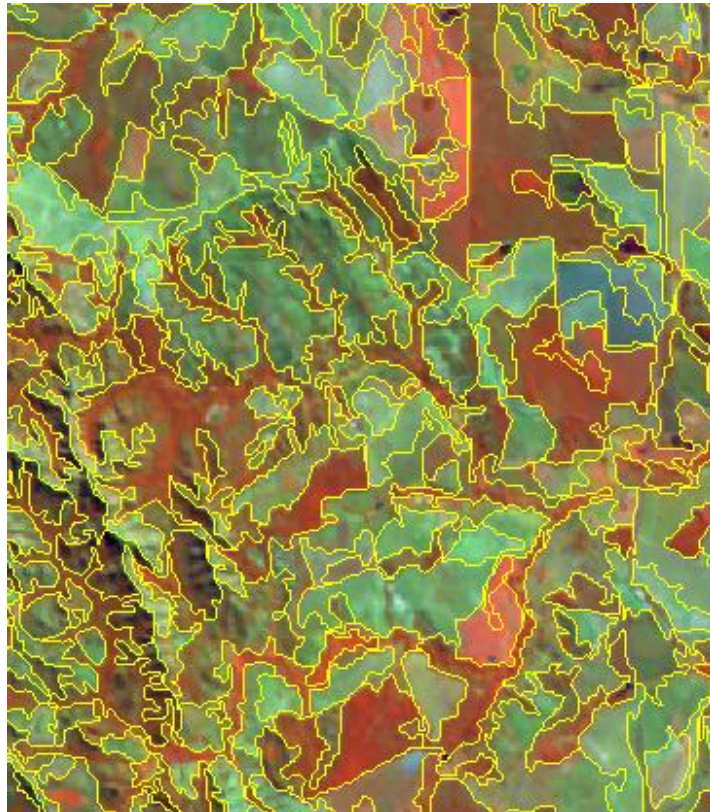


Figura 7. Imagem segmentada.

#### 3.1.1.5. Definição de amostras representativas

O processo de definição de amostras é crucial para o sucesso da classificação de imagens digitais (NOVO, 1999). Isto porque todas as informações sobre as diversas classes do mapa a ser gerado sairão das amostras definidas nesta etapa do trabalho, respeitando os limites de cada área previamente segmentada.

Primeiramente foram coletadas informações sobre documentos cartográficos já elaborados para a área de estudo. Neste sentido, foi utilizado um mapa de uso do solo, datado de 1994, elaborado para o Plano Diretor de Recursos Hídricos da bacia do rio Paracatu (BRASIL, 1996). Este mapa de uso do solo foi utilizado como suporte à decisão no momento de escolha das amostras.

Após a imagem ter sido segmentada, foi feita a seleção das amostras das diversas classes de uso do solo definindo padrões a partir do mapa-base, ou seja, com base no mapa de uso do solo do Plano Diretor da bacia foram selecionados diversos segmentos da imagem que coincidem com a classificação anterior.

Deste modo, foram selecionadas diversas regiões sobre a imagem segmentada de acordo com as classes temáticas de uso do solo definidas para este estudo, que são:



mata, cerrado, pastagem, reservatórios, cultivo e urbanização. Na Figura 8 observa-se a definição destas classes na imagem e na Figura 9, a checagem em campo das amostras.

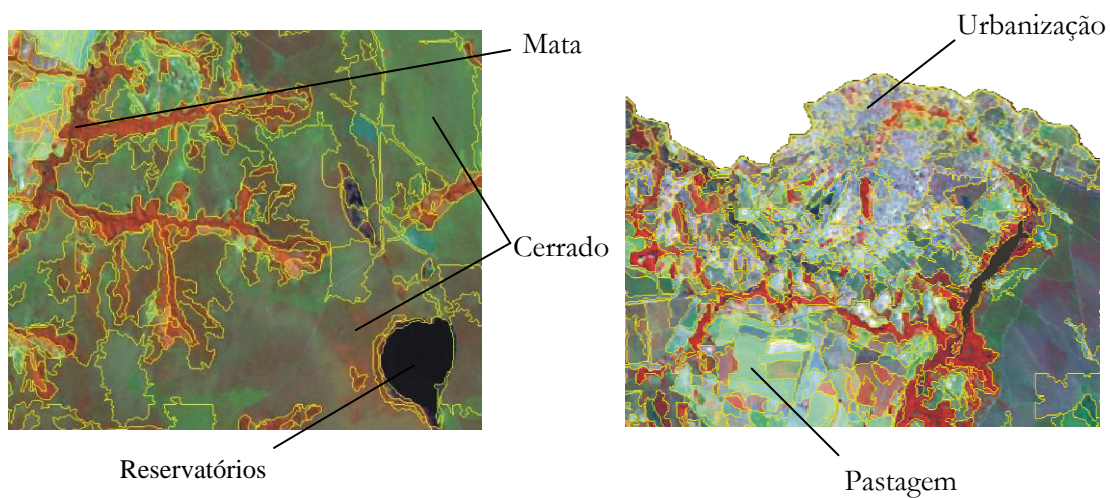


Figura 8. Amostras para cada classe temática.



Cerrado



Cerrado



Pastagem



Mata

Figura 9. Checagem das amostras em campo.

A coleta de amostras se divide em duas etapas: aquisição e teste. A coleta para aquisição é realizada para o treinamento do classificador, ou seja, estas regiões foram utilizadas para a classificação da imagem segmentada. Já a coleta para teste é realizada

para testar a eficiência da classificação da imagem. No Quadro 8 é apresentado o número de amostras de aquisição e teste realizados neste trabalho.

Quadro 8 - Número de amostras para aquisição e teste para cada classe temática

| Classe temática | Características de amostragem |         |       |
|-----------------|-------------------------------|---------|-------|
|                 | Aquisição                     | Teste * | Total |
| Mata            | 70                            | 14      | 84    |
| Cerrado         | 62                            | 13      | 75    |
| Reservatórios   | 34                            | 7       | 41    |
| Pastagem        | 42                            | 9       | 51    |
| Cultivos**      | -                             | -       | -     |
| Urbanização     | 20                            | 4       | 24    |
| Total           | 228                           | 47      | 275   |

\* 20% do número total de amostras de aquisição, segundo INPE (2004).

\*\* Não foi realizado coleta de amostras para esta classe temática

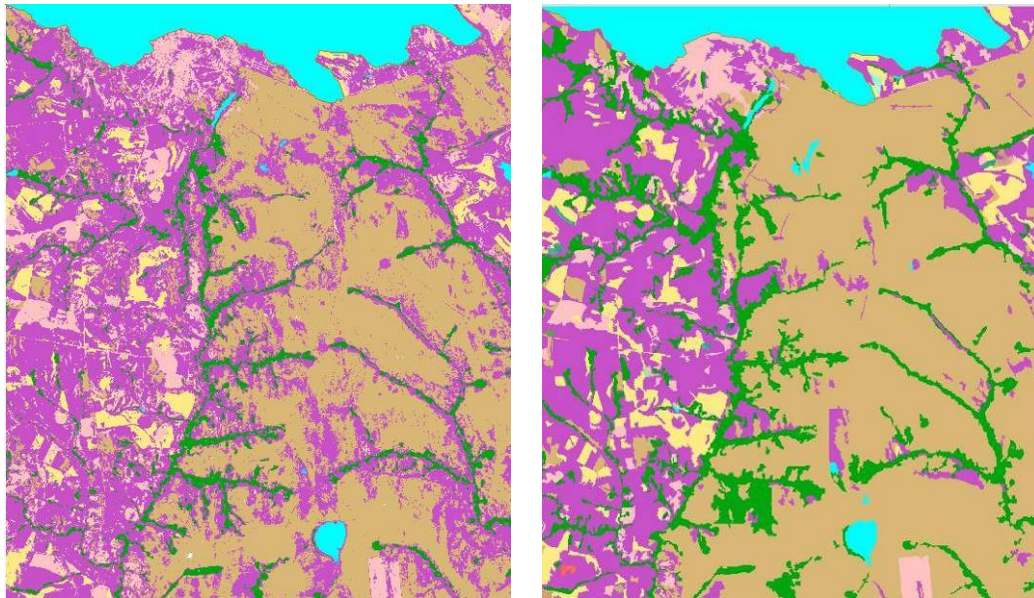
É importante ressaltar que para a classe temática cultivos, não foi realizado o processo de definição de amostras, seja de aquisição ou de teste. A escolha por não amostrar essa classe temática foi devido à grande variabilidade espectral dos diversos tipos de áreas agrícolas, assim como seus diversos estádios de crescimento, para não confundir o classificador.

### 3.1.1.6. Classificação automática

Esta etapa da metodologia é altamente dependente dos resultados de todas as outras etapas, ou seja, para uma boa classificação da imagem digital é necessário o cumprimento satisfatório das etapas anteriores. Para o treinamento do classificador, assim como para o teste de sua eficiência, foram utilizadas as amostras coletadas durante a etapa anterior.

Nesta etapa do trabalho, primeiramente testou-se a eficiência de dois tipos de classificadores: MAXVER e Bhattacharya, tendo como características de classificação pixel a pixel e por crescimento de regiões, respectivamente. A eficiência da classificação foi mensurada através da estatística Kappa (LANDIS e KOCH, 1977), sendo adotado para o restante do trabalho o classificador que melhor eficiência apresentasse.

Neste sentido, adotou-se o classificador Bhattacharya para a classificação de imagens neste trabalho. Na Figura 10 pode-se observar os mapas temáticos classificados segundo os classificadores anteriormente citados, sendo a imagem (a) classificada por MAXVER e a imagem (b) por Bhattacharya.



(a) - Kappa: 41% (bom)

(b) - Kappa: 73% (muito bom)

Figura 10. Imagens classificadas pixel a pixel (a) e por crescimento de regiões (b).

Para o restante das classificações foi adotado um limiar de 75% de aceitação para o classificador Bhattacharya. Assim, todas as vezes em que o classificador ficar em dúvida quanto à classificação de um determinado polígono, o mesmo realiza um teste de hipótese no qual testa-se a probabilidade de um polígono pertencer ou não a uma determinada classe temática.

Este limiar é o mais restritivo para este tipo de classificador (INPE, 2005), sendo necessária sua utilização principalmente devido à alta heterogeneidade espectral das áreas agrícolas, devido, sobretudo, a suas diferentes respostas espectrais causadas pelos diferentes cultivares e seus respectivos estádios de crescimento.

Desta maneira, apenas foram amostradas as demais classes temáticas (mata, cerrado, pastagem, reservatórios e urbanização), ficando como áreas não classificadas as áreas de cultivos, ou seja, estas áreas foram obtidas pela diferença entre o somatório dos outros tipos de uso do solo e a área de drenagem de cada estação fluviométrica.

#### 3.1.1.7. Verificação da exatidão da classificação automática

A verificação da exatidão dos mapas temáticos gerados a partir da classificação das imagens foi realizada através da estatística Kappa (LANDIS e KOCH, 1977), que é um dos métodos mais utilizados para avaliar a concordância entre a verdade terrestre e o mapa temático, sendo que a definição da exatidão dos mapeamentos foi classificada de acordo como visualiza-se por meio do Quadro 9.

Quadro 9 - Qualidade da classificação associada aos valores da estatística Kappa

| Valor de Kappa       | Qualidade do mapa temático |
|----------------------|----------------------------|
| $< 0,00$             | Péssimo                    |
| $0,00 < k \leq 0,20$ | Mau                        |
| $0,20 < k \leq 0,40$ | Razoável                   |
| $0,40 < k \leq 0,60$ | Bom                        |
| $0,60 < k \leq 0,80$ | Muito Bom                  |
| $0,80 < k \leq 1,00$ | Excelente                  |

Fonte: Landis e Koch (1977).

O SPRING 4.2 ainda não realiza automaticamente o cálculo do índice Kappa para os mapas gerados a partir de classificações automáticas, fornecendo apenas a matriz de erros da classificação, que contém as informações necessárias para o cálculo do índice Kappa.

Obtida a matriz de erros, a mesma foi exportada para o Microsoft Excel onde foi gerado o índice Kappa através da seguinte equação:

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r x_{i+} x_{+i}}{N^2 - \sum_{i=1}^r x_{i+} x_{+i}} \quad (1)$$

em que,

$r$  = número de linhas na tabela de classificação;

$x_{ii}$  = número de combinações ao longo da diagonal;

$x_{i+}$  = número total de observações na linha  $i$ ;

$x_{+i}$  = número total de observações na coluna  $i$ ;

$N$  é número total de células;

$+$  = representa o somatório de cada linha ou coluna.

Logo após verificada a exatidão de cada mapa temático, os mesmos foram exportados para o formato *shapefile* para que pudessem ser anexados à base de dados cartográficas da bacia do rio Paracatu, sendo utilizado o software CorelDraw<sup>®</sup> 12 para a elaboração dos *layouts* de impressão.

### 3.1.2. Monitoramento do uso do solo nas bacias

Após as classificações das imagens para extração das classes de uso do solo, por meio do sensor Landsat 5 TM, a cada dois anos no período de 1985 a 2000, foi então realizado o monitoramento do uso do solo para as bacias de drenagem das oito estações fluviométricas utilizando-se o software SPRING 4.2, ferramenta tabulação cruzada.

A área de estudo foi subdividida em oito sub-bacias correspondentes às áreas de drenagem de cada estação fluviométrica, com o intuito de analisar as alterações no uso do solo em cada uma delas separadamente. No Quadro 10 pode-se observar os dados de área e porcentagem de cada área de drenagem de estação fluviométrica.

Quadro 10 - Área de drenagem e porcentagem ocupadas por cada estação fluviométrica

| <b>Código</b> | <b>Estações fluviométricas</b> | <b>Área total (km<sup>2</sup>)</b> | <b>% na área da bacia</b> |
|---------------|--------------------------------|------------------------------------|---------------------------|
| 42435000      | Fazenda Barra da Égua*         | 1591                               | 41,15                     |
| 42440000      | Fazenda Poções*                | 550                                | 14,22                     |
| 42460000      | Fazenda Limeira                | 4164                               | 40,49                     |
| 42490000      | Unai                           | 5413                               | 52,64                     |
| 42540000      | Santo Antônio do Boqueirão     | 5963                               | 57,99                     |
| 42545500      | Fazenda Resfriado              | 679                                | 6,60                      |
| 42546000      | Fazenda Santa Cruz             | 550                                | 5,35                      |
| 42600000      | Porto dos Poções               | 9459                               | 91,99                     |

\* Estações fluviométricas localizadas na bacia do ribeirão Entre Ribeiros, sendo as restantes localizadas na bacia do rio Preto

Além da obtenção das áreas de cobertura de cada classe de uso do solo, estas informações foram utilizadas na confecção de linhas de tendências destas classes de usos, para cada área de drenagem de estação fluviométrica. Assim, ainda foram obtidas significâncias do comportamento destas tendências ao longo do tempo, com o intuito de mostrar o quanto estas variações foram significativas ou não.

### 3.2. Análise do comportamento hidrológico nas bacias do rio Preto e ribeirão Entre Ribeiros

Para a realização deste estudo foram analisados os dados de oito estações fluviométricas, assim como suas respectivas áreas de drenagem (Figura 11) e 11 estações pluviométricas (Figura 12) pertencentes à rede hidrometeorológica da Agência Nacional de Águas (ANA).

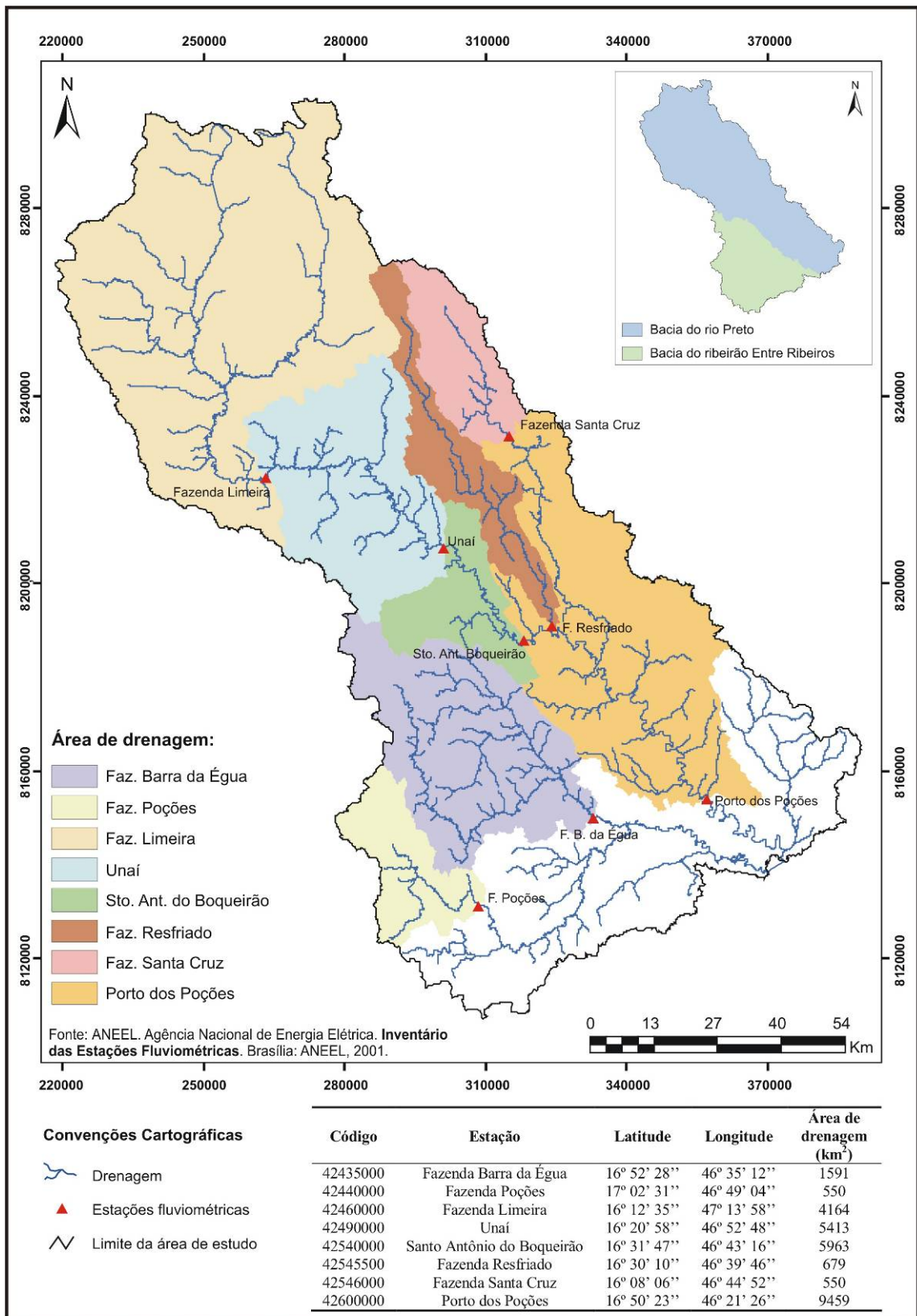


Figura 11. Localização das estações fluviométricas.

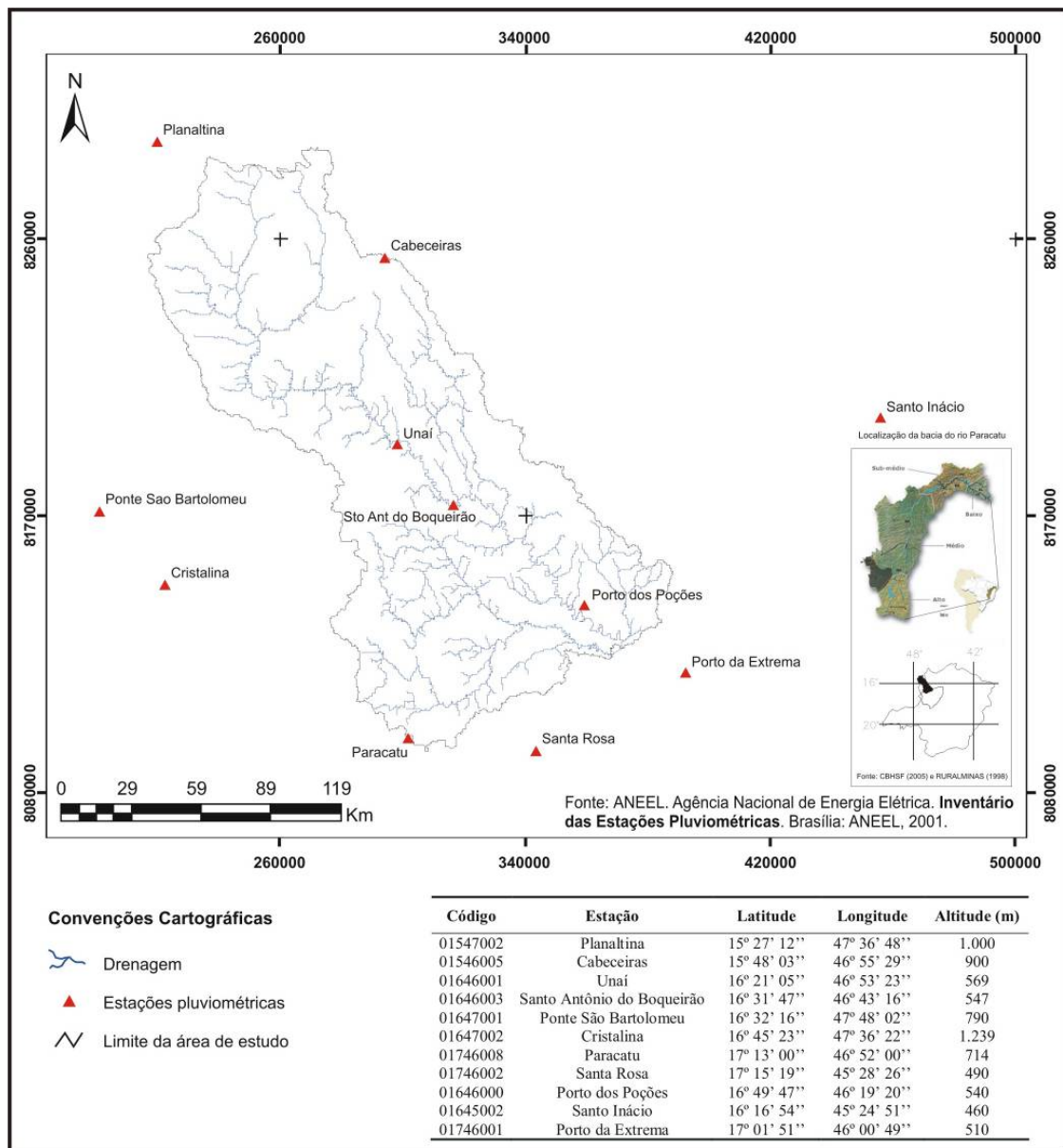


Figura 12. Localização das estações pluviométricas.

### 3.2.1. Seleção do período de análise e preenchimento de falhas

A aquisição dos dados de vazões e precipitações foi realizada pelo site HidroWeb da Agência Nacional de Águas (<http://hidroweb.ana.gov.br>).

O preenchimento de falhas das séries de vazões e de precipitações foi realizado por meio de correlações segundo critérios lineares, tendo nos coeficientes de correlação a base para a tomada de decisão.

Para o preenchimento de falhas nas séries de vazão, utilizou-se a regressão linear simples com base na equação:

$$Q_y = \beta_0 + \beta_1 Q_x \quad (2)$$

em que:

- $Q_y$  = vazão do posto em análise,  $m^3 s^{-1}$ ;  
 $Q_x$  = vazão do posto de apoio,  $m^3 s^{-1}$ ; e  
 $\beta_0, \beta_1$  = parâmetros ajustados na regressão pelo método dos mínimos quadrados, adimensional.

Para o preenchimento de falhas em séries pluviométricas, utilizou-se o método da ponderação regional com base em regressões lineares. Esse método consiste, segundo TUCCI (1997), em estabelecer regressões lineares entre o posto com dados a serem preenchidos,  $P_Y$ , e cada um dos postos vizinhos,  $P_{X1}, P_{X2}, \dots, P_{Xn}$ . De cada uma das regressões lineares efetuadas foi obtido o coeficiente de correlação ( $r$ ), sendo o preenchimento realizado com base na equação:

$$P_Y = \frac{r_{YX1} P_{X1} + r_{YX2} P_{X2} + \dots + r_{YXn} P_{Xn}}{(r_{YX1} + r_{YX2} + \dots + r_{YXn})} \quad (3)$$

em que:

- $P_Y$  = precipitação no posto em análise,  $mm \text{ mês}^{-1}$ ;  
 $P_{Xn}$  = precipitação no posto de apoio,  $mm \text{ mês}^{-1}$ ;  
 $r_{YXn}$  = coeficiente de correlação entre postos considerados, adimensional; e  
 $n$  = número total de postos de apoio considerados.

Para a aplicação deste método há a necessidade de que pelo menos três postos sirvam como postos de apoio e que possuam correlação aceitável (acima de 85%) com o posto em análise.

Quando não foi possível a utilização do método da ponderação regional com base em regressões lineares, utilizou-se o método da regressão linear simples.

Para a aplicação dos métodos adotou-se como critério mínimo a obtenção de coeficiente de determinação ( $R^2$ ) superior a 0,70 e a existência de pelo menos oito anos de eventos comuns entre as estações consideradas para o estabelecimento da regressão, conforme Pruski et. al. (2005).



### 3.2.2. Análise de estacionariedade das séries

A análise de estacionariedade das séries de vazões e precipitações foi realizada para verificar se as mesmas possuíam ou não mudanças significativas ao longo do período base escolhido.

Para isto, foi utilizado o software PSF (Projeto São Francisco), desenvolvido pelo Grupo de Pesquisas em Recursos Hídricos (GPRH) da Universidade Federal de Viçosa, em parceria com a Agência Nacional de Águas (ANA), Fundo Global para o Meio Ambiente (GEF), Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e Organização dos Estados Americanos (OEA).

Este software realiza testes de estacionariedade com base em dados estatísticos de homogeneidade de variâncias e desvio padrão, tanto para toda a série, quanto para partes da série. Neste estudo foi utilizado o nível de significância de 1%, sendo este o nível mais rigoroso, para a realização dos testes, disponibilizado por este software.

### 3.2.3. Vazões médias, máximas e mínimas

Para cada uma das oito estações fluviométricas estudadas, obteve-se, para cada ano da série de 1985 a 2000, a vazão média ( $Q_{med}$ ), a vazão máxima anual ( $Q_{max}$ ), a vazão mínima de sete dias de duração ( $Q_7$ ) e as vazões associadas às permanências de 90% e 95% do tempo.

As vazões associadas à permanência de 90% e 95% foram obtidas pelas curvas de permanência de cada estação fluviométrica com base em dados diários, retratando a parcela de tempo que determinada vazão é igualada ou superada durante o período analisado.

Todas estas vazões foram obtidas por meio dos softwares PSF (Projeto São Francisco) e Hidro 1.0.9 (ANA, 2005).

### 3.2.4. Análise de precipitações

Neste trabalho foram utilizados os seguintes tipos de precipitações: precipitação média anual ( $P_a$ ), precipitação do mês mais chuvoso ( $P_{mc}$ ) e precipitação do mês mais seco ( $P_{ms}$ ), no período de 1985 a 2000, para cada área de drenagem das estações fluviométricas utilizadas neste estudo.

Já para o cálculo das precipitações médias nas áreas de drenagem das estações fluviométricas foi utilizado o método do polígono de Thiessen.

Nesta etapa foi utilizado o software Thiessen para a obtenção destes dados, no qual são necessários, como dados de entrada, o limite da bacia, bem como as coordenadas geográficas das estações pluviométricas, com suas respectivas precipitações.

### 3.2.5. Análise de tendências das variáveis hidrológicas

As análises de tendências das variáveis hidrológicas (vazões e precipitações) foram estimadas por meio da equação de regressão linear simples entre variável hidrológica e tempo, assumindo como variável dependente a variável hidrológica e como variável independente o tempo, tendo sido já utilizados por Pruski *et al.* (2005) e Sharma e Shakya (2006).

Assim, estimou-se o quanto ao longo dos anos, no período de 1985 a 2000, as vazões máximas ( $Q_{max}$ ), médias ( $Q_{med}$ ) e mínimas ( $Q_7$ ,  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$ ) diminuíram ou aumentaram nestas seções fluviométricas.

Para a realização desta etapa do trabalho utilizou-se a regressão linear simples com base na equação 2.

### 3.3. Estudo da associação entre vazões e uso do solo

O estudo da associação entre vazões e uso do solo foi realizado através de análises qualitativa e quantitativa dos dados das oito estações fluviométricas.

A análise qualitativa visou associar, por meio de análise de tendências de comportamentos das variáveis de vazões, precipitações e uso do solo, a influência existente do uso do solo no comportamento das vazões.

Nesta etapa foram utilizadas séries temporais de vazões, precipitações e uso do solo em cada bacia de drenagem das oito estações fluviométricas. Para tal, foram feitos gráficos das séries temporais no período compreendido entre 1985 a 2000 e adicionadas suas linhas de tendências usando o software Microsoft Excel<sup>®</sup>. Além das tendências observadas através do comportamento das variáveis ao longo do tempo, foram obtidas as significâncias das mesmas para mostrar o quanto estas variações foram expressivas.

Por outro lado, a análise quantitativa visou obter um ajuste por meio de equações de regressão múltipla, entre as variáveis para que se pudesse explicar os comportamentos das vazões, a partir de dados de precipitações e usos do solo.

Nesta etapa, os dados foram tratados utilizando o procedimento estatístico de regressão linear múltipla, adotando como variável dependente as vazões e para as

variáveis independentes a precipitação e as classes de uso do solo. Para esta etapa do trabalho foi utilizado o software SAEG 9.0.

Neste sentido, foram ajustadas equações de regressões observando os seguintes critérios: coeficiente de determinação ( $R^2$ ) acima de 0,70, significância da equação pela ANOVA da regressão, hipótese dos coeficientes, assim como, os sinais dos coeficientes. Estas análises foram realizadas para as vazões máximas ( $Q_{max}$ ), médias ( $Q_{med}$ ) e mínimas ( $Q_7$ ,  $Q_{90}$ ,  $Q_{95}$ ) das oito estações fluviométricas.

Apoiando estas análises foram elaborados diagramas que representassem as relações causais entre as modificações entre uso do solo e comportamentos hidrológicos. Nas Figuras 13, 14 e 15 visualizam-se os diagramas de relações causais elaborados como resposta esperada ao comportamento hidrológico das vazões, em função das modificações no uso do solo e precipitação.

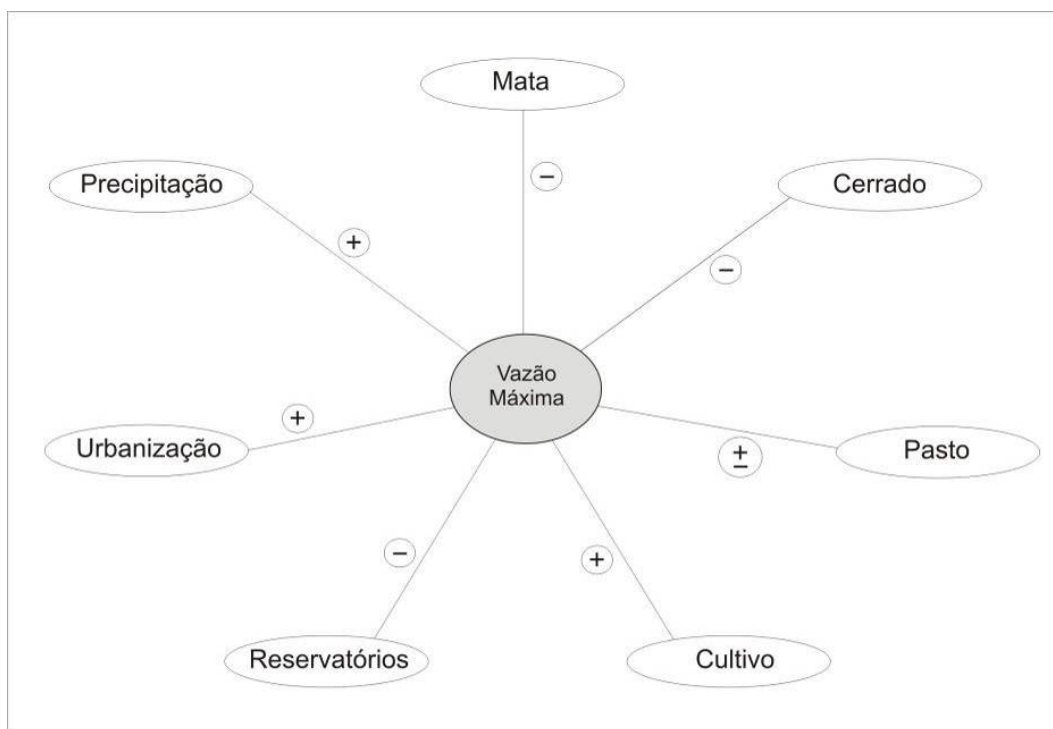


Figura 13. Relações causais esperadas para a vazão máxima e classes de usos do solos mapeadas e precipitação.

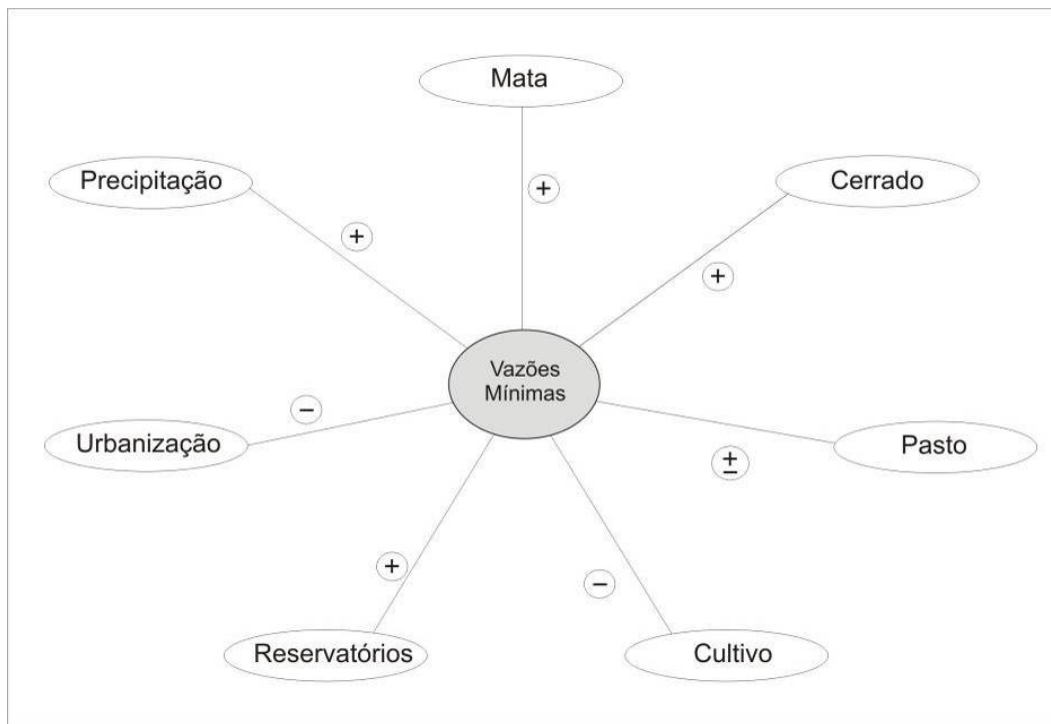


Figura 14. Relações causais esperadas para a vazão mínima e classes de usos do solos mapeadas e precipitação.

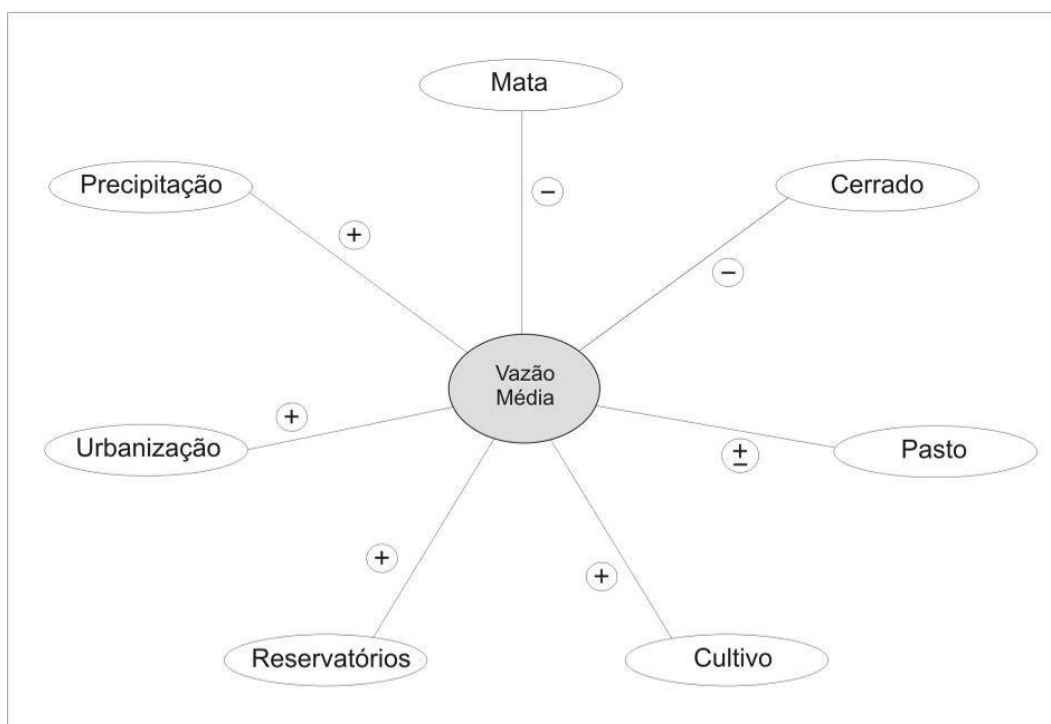


Figura 15. Relações causais esperadas para a vazão média e classes de usos do solos mapeadas e precipitação.

Com o aumento das áreas de cobertura de mata nas bacias, é de se esperar uma redução das vazões máximas, devido ao aumento da interceptação pela cobertura vegetal e ao aumento da rugosidade na superfície do solo, dentre outros fatores, causando o aumento na infiltração e redução do escoamento superficial, resultando numa associação negativa entre vazão máxima e mata. No caso da vazão mínima o aumento da infiltração resulta numa associação positiva entre vazão mínima e mata, ou seja, com o aumento de mata espera-se um aumento das vazões mínimas. Finalmente, sinal negativo para a associação entre vazão média e mata, pois com o aumento de mata espera-se um aumento da evapotranspiração com conseqüente redução no abastecimento das águas subterrâneas e superficiais (TUCCI, 2003).

A resposta esperada para a classe cerrado quando relacionada com vazões máximas é que se tenha uma redução destas vazões com seu aumento, devido à recomposição vegetal natural da área de estudo, adotando assim o sinal negativo. Com o aumento das áreas de cerrado espera-se um aumento nas vazões mínimas, desta forma adotou-se o sinal positivo e, finalmente, sinal negativo para a associação entre vazão média e cerrado, pois com o aumento de cerrado espera-se uma redução nos valores da vazão média, devido ao aumento do consumo de água por evapotranspiração.

Para o uso do solo pastagem, seu aumento e conseqüente resposta às variações hidrológicas na bacia, depende da forma como o manejo está sendo conduzido. Neste sentido, adotou-se um sinal de mais ou menos para as relações entre pastagem e as diversas vazões.

Com relação ao uso do solo cultivo, espera-se uma resposta com sinal positivo para a associação com a vazão máxima, devido a este aumento estar relacionado com uma menor proteção da superfície do solo às ações de precipitações, possibilitando o aumento, desta forma, do encrostamento superficial e conseqüente aumento do escoamento. Ao contrário, para as vazões mínimas espera-se uma resposta com sinal negativo. E finalmente, para a vazão média um sinal positivo.

A classe de uso do solo reservatórios possui uma associação esperada com a vazão máxima de sinal negativo, ou seja, com o aumento das áreas de reservatórios espera-se uma tendência de redução das vazões máximas. Sendo o contrário verdadeiro, quando observa-se as associações com as vazões mínimas e médias, onde o aumento de reservatórios tende a aumentar a oferta de água em períodos mais secos e de regularizar sua oferta, respectivamente.

Já a classe de uso do solo urbanização possui uma associação esperada com a vazão máxima de sinal positivo, ou seja, com o aumento das áreas de urbanização espera-se uma tendência de aumento das vazões máximas, devido à alta taxa de impermeabilização do solo (TUCCI, 2003). Para as vazões mínimas a associação esperada é de redução das mesmas, adotando-se desta forma, o sinal negativo, devido à menor infiltração de água no solo e conseqüente deficiência na realimentação dos aquíferos. Já para as vazões médias adotou-se o sinal positivo, devido ao aumento de escoamento superficial e redução da evapotranspiração nestas áreas, onde as precipitações são convertidas em escoamento de forma mais rápida, devido à impermeabilização existente no uso do solo urbano (MOTA, 2003).

Na associação da variável precipitação às vazões máxima, mínimas e média, foi adotado o sinal positivo, pois com o aumento da precipitação há a tendência de aumento das vazões.