





**EDUARDO HENRIQUE MENDES DOS SANTOS**

**COMPORTAMENTO HÍDRICO NA BACIA  
HIDROGRÁFICA DO RIBEIRÃO JOÃO LEITE, GO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, da Universidade Federal de Goiás, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Agronomia, área de concentração: Solo e Água.

Orientador:

**Prof. Dr. Nori Paulo Griebeler**

Co-orientador:

**Prof. Dr. Luiz Fernando Coutinho  
de Oliveira**

Goiânia, GO - Brasil  
2009

Aos meus amigos.  
Colegas de curso.

À minha esposa, pela compreensão.

Aos meus filhos, motivo de tanta luta.

Com muito carinho e respeito, dedico.

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, por nossas vidas.

À Universidade Federal de Goiás, à Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos e ao Programa de Pós Graduação em Agronomia, pela oportunidade de realização deste curso.

Ao professor Dr. Nori Paulo Griebeler pelas orientações e amizade durante o curso.

Ao Professor Dr. Luiz Fernando Coutinho de Oliveira, pelas orientações e amizade.

Ao CEFET de Urutaí-GO, pela oportunidade que me foi concedida.

Ao colega de trabalho, Aníbal Filho, pelo incentivo e pelas viagens a estudo que partilhamos.

Aos funcionários da UFG – Pós-graduação que gentilmente nos deram apoio durante o curso, principalmente a do secretário da pós-graduação, Wellinton Barbosa Mota.

À minha família, minha esposa e meus dois filhos, Eduardo Junior e Leonardo, minhas preciosidades.

E a todas as pessoas que conviveram comigo nestes quatro anos de trabalho.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>8</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>9</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>11</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>12</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>15</b>
2.1 CICLO HIDROLÓGICO .....	15
2.2 INTERAÇÃO ENTRE USO DO SOLO E ESCOAMENTO .....	16
2.3 GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS .....	19
<b>2.3.1 Situação das demandas hídricas</b> .....	<b>19</b>
<b>2.3.2 Política nacional de recursos hídricos e a legislação Goiana</b> .....	<b>20</b>
2.4 SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS .....	21
<b>2.4.1 Ferramentas usuais</b> .....	<b>21</b>
<b>2.4.2 Técnicas de sensoriamento remoto</b> .....	<b>21</b>
2.5 MAPEAMENTO DA PRECIPITAÇÃO.....	24
<b>2.5.1 Espacialização da precipitação</b> .....	<b>25</b>
<b>2.5.2 Geoestatística</b> .....	<b>25</b>
<b>2.5.3 Interpolador geoestatístico</b> .....	<b>28</b>
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>30</b>
3.1 REGIÃO DE ESTUDO .....	30
3.2 CARACTERIZAÇÃO FISIAGRÁFICA .....	31
3.3 CARACTERIZAÇÃO HIDROLÓGICA .....	33
<b>3.3.1 Séries históricas</b> .....	<b>33</b>
<b>3.3.2 Análise da tendência do comportamento hidrológico</b> .....	<b>33</b>
<b>3.3.3 Coeficiente de deflúvio</b> .....	<b>34</b>
3.4 ESPACIALIZAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO .....	34
<b>3.4.1 Banco de dados</b> .....	<b>34</b>
<b>3.4.2 Espacialização dos dados</b> .....	<b>36</b>
<b>3.4.3 Modelagem dos semivariogramas</b> .....	<b>36</b>
<b>3.4.4 Validação cruzada</b> .....	<b>37</b>

<b>3.4.5</b>	<b>Krigagem .....</b>	<b>38</b>
3.5	CLASSIFICAÇÃO DO USO DO SOLO .....	39
3.6	ASSOCIAÇÃO ENTRE O USO DO SOLO E O REGIME FLUVIAL .....	41
3.7	ANÁLISE DE CRITÉRIOS DE OUTORGA .....	41
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>43</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO FISIOGRAFICA .....	43
4.2	CARACTERIZAÇÃO DO REGIME PLUVIAL.....	46
<b>4.2.1</b>	<b>Variabilidade interanual.....</b>	<b>48</b>
4.2.2.1	Análise exploratória dos dados.....	47
4.2.2.2	Semivariogramas .....	52
4.2.2.3	Mapeamento da precipitação .....	56
4.3	CARACTERIZAÇÃO DO REGIME FLUVIAL.....	62
<b>4.3.1</b>	<b>Vazões médias anuais .....</b>	<b>62</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Vazões máximas.....</b>	<b>65</b>
<b>4.3.3</b>	<b>Vazões mínimas .....</b>	<b>66</b>
<b>4.3.4</b>	<b>Vazão com permanência de 95% no tempo (Q<sub>95</sub>).....</b>	<b>67</b>
<b>4.3.5</b>	<b>Vazão mínima média de sete dias consecutivos (Q<sub>7</sub>) .....</b>	<b>69</b>
<b>4.3.6</b>	<b>Coefficiente de deflúvio .....</b>	<b>70</b>
4.4	INTERAÇÃO ENTRE O USO DO SOLO E O REGIME FLUVIAL .....	72
<b>4.4.1</b>	<b>Classificação da cobertura vegetal e variabilidade temporal.....</b>	<b>72</b>
<b>4.4.2</b>	<b>Interação entre o uso do solo e o regime fluvial.....</b>	<b>78</b>
4.4.2.1	Vazões médias .....	79
4.4.2.2	Vazões máximas .....	82
4.4.2.3	Vazões mínimas e de referência .....	83
4.5	IMPACTOS DA VAZÃO OUTORGÁVEL SOBRE A GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS .....	85
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>91</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>93</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Magnitude de algumas variáveis hidrológicas em diferentes usos do solo .....	19
<b>Tabela 2.</b> Bandas espectrais e respectivas faixas do sensor Landsat.....	23
<b>Tabela 3.</b> Diferentes associações para as bandas do sensor TM.....	23
<b>Tabela 4.</b> Informações básicas das estações pluviométricas utilizadas .....	35
<b>Tabela 5.</b> Parâmetros dos modelos de semivariograma exponencial, esférico e gaussiano ajustados por mínimos quadrados ponderados e erro médio obtido por validação cruzada.....	53
<b>Tabela 6.</b> Área ocupada por classe de uso do solo, em termos percentuais da área total, nos anos de 1979, 1989, 1997 e 2005 .....	77



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Ciclo hidrológico .....	15
<b>Figura 2.</b> Semivariograma ideal (1) e semivariograma típico (2) .....	27
<b>Figura 3.</b> Bacia hidrográfica do ribeirão João Leite, hidrografia e localização das sedes municipais.....	31
<b>Figura 4.</b> Distribuição espacial das estações pluviométricas empregadas no estudo da continuidade espacial da precipitação média mensal e anual na bacia do ribeirão João Leite.....	35
<b>Figura 5.</b> Composição RGB das imagens Landsat da bacia do ribeirão João Leite, nos anos de 1979, 1989, 1997 e 2005.....	40
<b>Figura 6.</b> Bacia hidrográfica, estação fluviométrica Captação João Leite e hidrografia....	43
<b>Figura 7.</b> Modelo digital de elevação da bacia hidrográfica do ribeirão João Leite, GO...	45
<b>Figura 8.</b> Mapa de declividade da bacia hidrográfica do ribeirão João Leite, classificado conforme sugerido por EMBRAPA (1979).....	46
<b>Figura 9.</b> Precipitação média anual na bacia do ribeirão João Leite no período de 1975 a 2005 .....	47
<b>Figura 10.</b> Gráficos de tendência e box plot obtidos para a precipitação média mensal e anual .....	52
<b>Figura 11.</b> Erro médio obtido por validação cruzada para os modelos de semivariograma exponencial, esférico e gaussiano na espacialização da precipitação média mensal e anual na bacia do ribeirão João Leite, GO .....	55
<b>Figura 12.</b> Modelos de semivariograma ajustados ao semivariograma experimental.....	58
<b>Figura 13.</b> Mapas de precipitação média mensal e anual obtidos por krigagem para a bacia hidrográfica do ribeirão João Leite, GO.....	57
<b>Figura 14.</b> Hidrograma de vazões médias mensais de longo termo para a estação fluviométrica Captação João Leite, GO .....	63
<b>Figura 15.</b> Hidrograma de vazões mensais e hietograma de precipitação média mensal de 1975 a 2005 na bacia do ribeirão João Leite, GO .....	64
<b>Figura 16.</b> Vazões médias anuais e linha de tendência.....	64
<b>Figura 17.</b> Vazões máximas diárias anuais e linha de tendência.....	65
<b>Figura 18.</b> Hidrograma de vazões diárias e hietograma de precipitação média diária no período de 01/04/1988 a 31/05/1988 na bacia do ribeirão João Leite, GO.....	66

<b>Figura 19.</b> Vazões mínimas diárias anuais e linha de tendência .....	67
<b>Figura 20.</b> Curva de permanência obtida a partir de dados diários do período de 1975 a 2005 no ribeirão João Leite, GO. ....	68
<b>Figura 21.</b> Vazões com permanência de 95% no tempo ( $Q_{95}$ ) e linha de tendência .....	69
<b>Figura 22.</b> Curvas de permanência para os anos de 1978 e 1993 na bacia do ribeirão João Leite, GO. ....	69
<b>Figura 23.</b> Vazões mínimas médias anuais de 7 dias consecutivos ( $Q_7$ ).....	70
<b>Figura 24.</b> Coeficiente de deflúvio anual e linha de tendência para o período de 1975 a 2005 na bacia do ribeirão João Leite, GO .....	71
<b>Figura 25.</b> Coeficiente de deflúvio mensal para a bacia do ribeirão João Leite, GO.....	72
<b>Figura 26.</b> Mapa de uso do solo da bacia do ribeirão João Leite para o ano de 1979.....	73
<b>Figura 27.</b> <i>Mapa de uso do solo da bacia do ribeirão João Leite para o ano de 1989 .....</i>	<i>74</i>
<b>Figura 28.</b> Mapa de uso do solo da bacia do ribeirão João Leite para o ano de 1997.....	75
<b>Figura 29.</b> Mapa de uso do solo da bacia do ribeirão João Leite para o ano de 2005 .....	76
<b>Figura 30.</b> Precipitação média anual e deflúvio anual na bacia do ribeirão João Leite, GO, em mm, de 1979 a 2005 e linhas de tendência .....	80
<b>Figura .</b> Ajuste da distribuição Log-normal 3 parâmetros às frequências observadas de vazão mínima anual de 7 dias consecutivos .....	85
<b>Figura 32.</b> Curvas de permanência mensais obtidas a partir de dados diários do período de 1975 a 2005 na bacia do ribeirão João Leite, GO .....	87
<b>Figura 33.</b> Valores mensais obtidos para a vazão de referência $Q_{90}$ , vazão outorgável mensal (90% de $Q_{90}$ ) e volume mensal disponibilizado pela vazão outorgável. ....	89
<b>Figura 34.</b> Valores mensais obtidos para a vazão de referência $Q_{95}$ , vazão outorgável mensal (50% de $Q_{95}$ ) e volume mensal disponibilizado pela vazão outorgável. ....	90

## RESUMO

SANTOS, E. H. M. **Comportamento hídrico na bacia hidrográfica do ribeirão João Leite, GO.** 2009. 98 p. Tese (Doutorado em Agronomia: Solo e Água) – Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2009.<sup>1</sup>

O comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica decorre principalmente da variabilidade dos processos climáticos e do uso do solo e desta maneira, pode ser afetado pela ação antrópica. A bacia hidrográfica do ribeirão João Leite constitui-se no principal manancial de abastecimento de Goiânia, além de prover água a múltiplos usos ao longo da bacia. Essa área passou ao longo das últimas décadas por intensas modificações no uso do solo, e recentemente, com a crescente pressão sobre os recursos hídricos, vêm sendo relatados conflitos entre usuários, decorrentes da relativa escassez quantitativa e qualitativa da água. Nesse contexto, esse estudo teve como objetivos: analisar a tendência das variáveis hidrológicas entre 1975 e 2005; testar os modelos de semivariograma esférico, exponencial e gaussiano, ajustados pelo método dos mínimos quadrados ponderados no mapeamento por krigagem da precipitação média mensal e anual; classificar o uso do solo entre 1979 e 2005; realizar a associação qualitativa e quantitativa das vazões com o uso do solo e a variabilidade climática e por fim, avaliar as disponibilidades hídricas produzidas pela associação de diferentes vazões de referência e critérios de outorga. Para isso, foram utilizadas imagens Landsat dos anos de 1979, 1989, 1997 e 2005, dados de vazão da estação fluviométrica Captação João Leite e de precipitação de 14 estações pluviométricas disponibilizadas pela Agência Nacional de Águas (ANA). Foi constatado bom desempenho das técnicas geoestatísticas no mapeamento da precipitação média mensal e anual, com destaque ao modelo exponencial que se sobressaiu na maioria dos eventos estudados. O uso do solo foi marcado pelo desmatamento de 17,8% da vegetação nativa, expansão das áreas de urbanização e agricultura em 6,6 e 15,2%, respectivamente, e pela expressiva área de pastagens, em torno de 40% ao longo do tempo. A tendência de redução observada para o escoamento pode ser explicada, em parte, pela redução do regime de chuvas, contudo, devido ao expressivo aumento da água captada no ribeirão João Leite e a ausência de registros históricos, houve dificuldade na associação qualitativa entre o escoamento e o uso do solo, contudo, na análise quantitativa, foram gerados modelos por regressão linear com coeficientes de determinação ( $R^2$ ) acima de 0,75. Ficou constatado que o estabelecimento de um valor único anual para a vazão de referência, independentemente dos critérios de outorgas, resulta em utilização irracional do manancial. A adoção de vazões de referência mensal mostrou-se uma alternativa altamente promissora para otimização da utilização dos recursos hídricos superficiais na bacia do ribeirão João Leite, e por consequência, para o estado de Goiás, disponibilizando um volume 40% maior que o disponibilizado pelo critério de outorga atualmente em vigor.

*Palavras-chave:* gestão de recursos hídricos, geoestatística, sensoriamento remoto.

---

<sup>1</sup> Orientador: Prof. Dr. Nori Paulo Griebeler. EA-UFG.

Co-Orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando Coutinho de Oliveira. UFLA.MG

## ABSTRACT

SANTOS, E. H. M. **Hydrological behavior in the João Leite watershed, GO.** 2009. 98 p. Thesis (Doctor in Agronomy: Soil and Water) – Agronomy and Food Engineering, Federal University of Goiás, Goiânia, 2009.<sup>1</sup>

The hydrological behavior of watersheds derives mainly from the processes of climate variability and land use, and thus, may be affected by human action. The João Leite river is the main source of water supply of Goiânia, in addition to providing water to multiple uses throughout the basin. In the last decades, this catchment have been pass for intensive changes in land use, and recently, with the increasing pressure on water resources, conflicts because the relative scarcity of water quantity and quality, have been reported among users. In this context, this study aimed to analyze the trend of hydrological variables between 1975 and 2005; to test the semivariograma model spherical, exponential and Gaussian, adjusted by the method of weighted least squares in the mapping by kriging of monthly and annual average precipitation; classify the land use between 1979 and 2005, establishing the qualitative and quantitative association of the flow rate with the land use and climate variability and finally, assess the available water produced by the combination of different flow rates of reference and criteria for award. For this, we used satellite images from the years of 1979, 1989, 1997 and 2005, data flow from the Captação João Leite gauging station and rainfall from 14 stations, provided by National Water Agency of Brazil. It was found a good performance of geostatistics techniques to map the average monthly and annual precipitation, with emphasis on exponential model that show the best fit. The land use was marked by 17.8% of the deforestation, expansion of the urbanization and agriculture at 6.6 and 15.2% respectively, and expressive area of grassland, about 40% over of time. The declining trend observed in the flow can be explained, in part, by the reduction of the rain rate, however, due to the significant increase in stream water collected at João Leite river and lack of historical records, there was difficulty in the qualitative association between flow rate and land use, however, quantitative analysis models show coefficients of determination ( $R^2$ ) above 0.75. It was noted that the establishment of a single value for the flow of reference, regardless in irrational use of water. The adoption of the monthly reference flow show highly promising alternative to optimize the use of surface water resources in the João Leite watershed, and consequently, to the Goiás state, providing 40% more water than that provided by the criterion of single value.

*Key words:* water resources management, geostatistics, remote sensing.

---

<sup>1</sup> Adviser: Prof. Dr. Nori Paulo Griebeler. EA-UFG.

Co-Adviser: Prof. Dr. Luiz Fernando Coutinho de Oliveira. UFLA.MG

## **1 INTRODUÇÃO**

A água é um recurso natural que apresenta os mais variados usos e é indispensável ao desenvolvimento humano. A manutenção deste recurso finito em padrões de quantidade e qualidade com o objetivo de atendimento à seus múltiplos usos representa um desafio para as sociedades. Dessa maneira, uma das maiores demandas ambientais atuais consiste na realização de estudos envolvendo o processo de formação do escoamento, fornecendo subsídios para a tomada de decisões por parte dos responsáveis pela gestão dos recursos hídricos.

O regime hidrológico de um rio é afetado pelo uso do solo, variabilidade climática, captações d'água, barragens, mudanças climáticas, entre outros. A interferência da vegetação sobre o ciclo hidrológico ocorre basicamente pela transpiração, interceptação, capacidade de infiltração de água no solo e profundidade do sistema radicular (Bruijnzeel, 1988), e desta maneira, modificações no uso do solo praticadas na bacia hidrográfica tendem a promover modificações no escoamento da bacia.

A forma como a modificação da paisagem vem sendo realizada pelo homem tem sido marcada por insucesso, resultando, na maioria das vezes, na degradação dos mananciais, seja pela aceleração dos processos erosivos, alteração das disponibilidades hídricas, ou mesmo pela contaminação por defensivos agrícolas e lançamento de efluentes urbanos e industriais.

Nesse sentido, estudos envolvendo o comportamento hidrológico de bacias hidrográficas e sua associação com a variabilidade climática e uso do solo constituem numa demanda recente e ainda pouco explorada em bacias hidrográficas brasileiras.

A bacia hidrográfica do ribeirão João Leite apresenta área de 766,8 km<sup>2</sup> e está localizada ao norte da capital do estado de Goiás. Os deflúvios superficiais ali produzidos são os principais responsáveis pelo abastecimento urbano da cidade de Goiânia, GO, além de suprirem demandas de irrigação, piscicultura, e de outras atividades ao longo da bacia. Nos últimos anos, a demanda por água na bacia hidrográfica do ribeirão João Leite têm superado sua disponibilidade hídrica, o que, conciliado a baixa qualidade da água presente em muitos períodos do ano, têm gerando conflitos entre usuários.

Nesse contexto, o objetivo desse estudo foi mapear a precipitação média mensal e anual utilizando técnicas geoestatísticas, classificar o uso do solo ao longo do tempo, modelar as vazões máxima, média, mínima e de referência em função de alterações no regime pluvial e uso do solo, e principalmente avaliar as disponibilidades hídricas produzidas pela associação de diferentes vazões de referência e critérios de outorga.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 CICLO HIDROLÓGICO

O ciclo hidrológico pode ser entendido como o fenômeno global de circulação da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, tendo como fonte básica de energia a radiação solar (Silveira, 1997).

Os principais processos inseridos no ciclo hidrológico podem ser divididos em verticais, como é o caso da condensação, precipitação, evapotranspiração, infiltração e percolação, e horizontais, como os escoamentos superficial e subsuperficial.

A compreensão da dinâmica que envolve os distintos processos do ciclo hidrológico é fundamental para o entendimento dos fundamentos que regem a formação do escoamento nas bacias hidrográficas. O ciclo hidrológico está apresentado, de forma simplificada, na Figura 1.

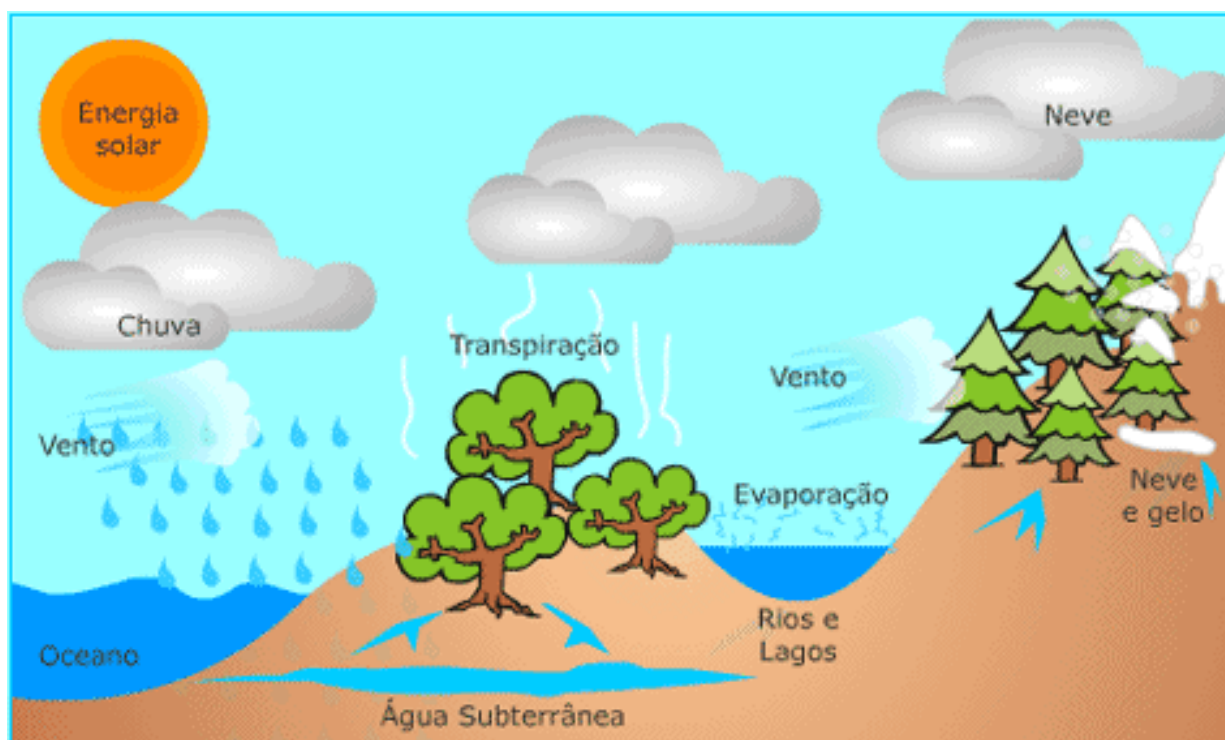


Figura 1. Ciclo hidrológico.

Pode-se começar a interpretação do ciclo hidrológico a partir da evaporação da água dos oceanos, que é transportada pela movimentação atmosférica aos continentes, e sob a presença de condições favoráveis precipita sobre a bacia hidrográfica.

A água precipitada pode sofrer evaporação direta ao ser interceptada pela cobertura vegetal, precipitar diretamente sobre espelhos d'água ou atingir a superfície do solo. A fração que atinge a superfície do solo pode ser dividida em duas parcelas básicas. A primeira representa a que se infiltra no solo, aumentando a umidade do perfil e podendo vir a reabastecer o aquífero. A segunda se origina quando ocorre precipitação sobre solo saturado, ou então, quando a taxa de precipitação supera a capacidade de infiltração do solo, originando o escoamento superficial direto.

Ocorre também um movimento de saída vertical de água da bacia hidrográfica, compreendido pela evaporação direta da água na superfície e transpiração das plantas, formando a evapotranspiração.

A vazão dos rios representa uma variável do ciclo hidrológico, e é resultado da contribuição dos escoamentos básico, subsuperficial e superficial. O escoamento básico representa a contribuição do aquífero livre, enquanto o subsuperficial representa o escoamento que se dá junto à camada superficial de solo, freqüentemente junto às raízes, e que é caracterizado por apresentar velocidades maiores que a do escoamento básico.

Partindo-se da constatação geral de que o fluxo é resultado da diferença entre precipitação e evaporação, pode-se afirmar que o fluxo na bacia hidrográfica é positivo, resultando nas vazões dos rios em direção aos oceanos. Já, nos oceanos a situação é inversa, pois a evaporação supera a precipitação, e o adicional evaporado é deslocado para os continentes pelos sistemas de circulação da atmosfera, reiniciando o ciclo (Tucci, 2002).

## 2.2 INTERAÇÃO ENTRE USO DO SOLO E ESCOAMENTO

Os primeiros estudos experimentais sobre os impactos hidrológicos resultantes de alterações no uso do solo ocorreram nos Estados Unidos por volta de 1910 (McCulloch & Robinson, 1993). Posteriormente, foram elaborados vários experimentos em diferentes partes do mundo e existem algumas publicações que reuniram de forma sistemática os resultados, destacando-se os de Hibbert (1967), Bosch & Hewlett (1982) e mais recentemente Bruijnzeel (1990) e Sahin & Hall (1996).

Segundo McCulloch & Robinson (1993), estudos experimentais em bacias hidrográficas visando avaliar os impactos de modificações no uso do solo podem ser



separados em três categorias principais: (1) estudos de correlação entre bacias de diferentes características de clima, cobertura vegetal e morfologia, que de acordo com os autores não propiciam estimativas confiáveis; (2) estudos em uma única bacia experimental onde se busca estabelecer previamente a relação entre climatologia e o comportamento hidrológico. Esse tipo de estudo esbarra na variabilidade climática entre os dois períodos, podendo ocorrer, por exemplo, um período seco e outro úmido, prejudicando a análise dos resultados; (3) utilização de pares de bacias hidrográficas com características de clima, vegetação e morfologia semelhantes. Nesse tipo de experimento, uma das bacias é submetida à alteração do uso do solo, enquanto a outra é mantida preservada, e desta maneira, pode-se estimar os impactos decorrentes de alterações no uso do solo pela comparação dos escoamentos após a alteração.

Bosch & Hewlett (1982) coletaram informações sobre 94 bacias experimentais, abrangendo experimentos de desflorestamento, reflorestamento e rebrota, empregando, em sua análise, dados anuais relativos ao ano de máxima alteração ocorrida durante os cinco primeiros anos após a alteração do uso do solo. Dentre as conclusões obtidas por esses autores se destacam: a retirada de cobertura vegetal florestal provoca aumento no deflúvio anual; o aumento da cobertura vegetal florestal reduz o deflúvio anual; alterações em 10% de cobertura de eucalipto ou coníferas acarreta 40 mm de alteração no deflúvio anual; alterações de 10% em vegetação arbustiva ou pastagem resulta em alteração de 10 mm no deflúvio.

Sahin & Hall (1996) utilizaram uma base de dados de 145 experimentos de campo tentando correlacionar as mudanças no uso do solo e vazão através de análises de regressão. Eles chegaram à conclusão de que, com desmatamento de 10% da área, a produção de água nas bacias monitoradas aumentou em 10 mm ano<sup>-1</sup>.

É importante, em estudos sobre os efeitos da modificação da cobertura vegetal sobre o escoamento, a retratação da vegetação presente na área antes da alteração. A substituição de vegetação rasteira por espécies florestais resulta em aumento da interceptação e evapotranspiração, este último, basicamente pela maior transpiração de florestas e também devido à grande profundidade de seu sistema radicular, que aumenta o perfil de solo explorado (Engel et al., 2005).

Resultados de 26 estudos conduzidos em 26 bacias experimentais, sintetizados por Farley et al. (2005), evidenciam que o reflorestamento de áreas anteriormente ocupadas por vegetação rasteira, diminui significativamente a vazão. Os resultados obtidos por esses

autores revelam que a substituição de pastagem e de vegetação arbustiva por espécies florestais resulta em 44% e 31% de redução no escoamento anual, respectivamente.

Contudo, experimentos envolvendo a alteração da vegetação de bacias hidrográficas são reservados a pequenas bacias, devido às dificuldades inerentes a modificações da vegetação em grandes áreas. Nesse contexto inserem-se os modelos hidrológicos chuva-vazão, com desenvolvimento a partir de 1950 e que podem ser aplicados a grandes bacias hidrográficas. Nesse procedimento são calibrados modelos matemáticos, visando reproduzir a formação da vazão na bacia hidrográfica, utilizando como variáveis de entrada dados de precipitação e evapotranspiração, além de informações relativas a vegetação e morfologia da bacia hidrográfica. Após a calibração, são alterados os parâmetros que representam a cobertura vegetal no modelo hidrológico, e desta maneira são estimados os impactos hidrológicos (Collischonn, 2001).

Collischonn (2001) empregou o modelo hidrológico MGB-IPH para a simulação de diferentes cenários de uso do solo sobre o comportamento hidrológico do rio Taquari-Antas. Dentre os resultados obtidos pelo autor destaca-se um incremento de escoamento estimado em 10mm para 10% de desmatamento.

Bacellar (2005) realizou uma síntese sobre a influência da vegetação sobre a produção do escoamento em bacias hidrográficas, chegando às seguintes conclusões:

- Grande parte da água precipitada volta para a atmosfera na forma de evapotranspiração, sobre tudo por transpiração das plantas;
- As árvores transpiram mais que a vegetação de menor porte, como gramíneas, arbustos e boa parte das culturas agrícolas;
- A vegetação incorpora grande quantidade de matéria orgânica ao solo, o que melhora a porosidade, favorecendo a infiltração;
- Embora a infiltração seja maior em áreas de florestas, a taxa de transpiração também é maior;
- A presença de floresta tende a causar redução das vazões médias anuais e do fluxo de base;
- O desmatamento causa o efeito contrário, mas quando é feito sem preceitos técnicos o fluxo de base também tende a diminuir devido ao decréscimo de infiltração resultado da compactação do solo;
- Os picos de cheia tendem a crescer com os desmatamentos;

- A floresta atua no sentido de conter a erosão hídrica e diminuir a carga de sedimentos nos rios.

Cheng et al. (2002) sintetizaram, com base em resultados experimentais apresentados na literatura, a ordem de grandeza da infiltração, evapotranspiração, umidade do solo, vazão média, escoamento superficial direto, vazões máximas e mínimas em diferentes usos do solo. Suas principais conclusões estão apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 1.** Magnitude de algumas variáveis hidrológicas em diferentes usos do solo.

Componente	Magnitudes relativas
Infiltração	Floresta > Gramíneas > Área desmatada > Área degradada
Evapotranspiração	Floresta > Gramíneas > Área desmatada
Umidade do Solo	Área desmatada > Gramínea > Floresta
Vazão média	Área degradada > Área Desmatada > Gramíneas > Floresta
Escoamento superficial	Área degradada > Área Desmatada > Gramíneas > Floresta
Vazões máximas	Área degradada > Área Desmatada > Gramíneas > Floresta
Vazões mínimas	Área Desmatada > Gramíneas > Floresta > Área degradada

Fonte: Cheng (2002).

## 2.3 GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

### 2.3.1 Situação das demandas hídricas

Embora o Brasil seja o país com maior disponibilidade hídrica per capita mundial, sua distribuição pelo território é heterogênea, existindo conflitos pelo seu uso em várias regiões (Lanna, 2001). Somando-se a isso, são frequentes os mananciais contaminados em decorrência de ações antrópicas, formando, em muitas ocasiões, um cenário de limitação qualitativa ao uso desse recurso.

A utilização da água na bacia hidrográfica engloba usos múltiplos, podendo haver conflitos entre os usuários devido a sua inadequada qualidade ou quantidade. Dessa maneira, fica evidente a necessidade de hierarquização de prioridades entre os usos, com o objetivo de minimizar os conflitos (Câmara, 2003).

De acordo com Lanna (1999), existem dois tipos de intervenção para compatibilização entre as demandas e as disponibilidades hídricas. O primeiro tipo de intervenção é a estrutural, na qual o regime hidrológico é modificado pela construção de reservatórios. O segundo, chamado de não-estrutural consiste nos diversos instrumentos de gestão, como por exemplo, a regulamentação do uso do solo, a outorga e a cobrança pelo uso da água.

No Brasil, a gestão de recursos hídricos através de intervenções não estruturais se iniciou a partir da década de 90 (Câmara, 2003). De acordo com Lanna (2001), a gestão de recursos hídricos conta com instrumentos regulatórios e econômicos. Os instrumentos regulatórios se baseiam basicamente nos controles quantitativo e qualitativo, enquanto os econômicos se baseiam na tarifação.

Dessa maneira, a gestão dos recursos hídricos deve propiciar o gerenciamento das demandas, pelo ponto de vista quantitativo e qualitativo, visando ao atendimento dos usos múltiplos. A gestão quantitativa se baseia em três instrumentos fundamentais, sendo a outorga de direito de uso, mercado de direito de uso e cobrança pelo uso da água. Já a gestão qualitativa abrange instrumentos de gestão regulatórios, como a outorga de lançamento de efluentes e o licenciamento ambiental; e econômicos, como a cobrança pelos lançamentos e o mercado de licenças (Câmara, 2003).

### **2.3.2 Política nacional de recursos hídricos e a legislação Goiânia**

A Lei 9.433 de 1997 instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, sendo um grande passo para o gerenciamento de tais recursos. Essa lei tem 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, 2002).

No Brasil as vazões de referência adotadas pelos órgãos gestores de recursos hídricos são a  $Q_{90}$ ,  $Q_{95}$  e a  $Q_{7,10}$ . A  $Q_{90}$  é a vazão de permanência garantida em 90% do tempo, definida a partir da curva de permanência. Nessa conjuntura, em 10% do tempo as vazões do curso d'água podem ser menores que a  $Q_{90}$ . A  $Q_{95}$ , também obtida a partir da curva de permanência, representa a vazão com garantia de ocorrência em 95% do tempo. O risco de desabastecimento de parte dos usos ou de necessidade de racionamento fica restrito a 5% do tempo, garantindo captação por quase todo o ano sem interrupção, a menos que ocorram condições de estiagens prolongadas. Já, a  $Q_{7,10}$  corresponde à vazão mínima com sete dias de duração e tempo de retorno de dez anos, ou seja, a cada dez anos, em média, há o risco de ocorrer sete dias seguidos com esta vazão mínima.

Em Goiás, a Resolução Nº. 11 de 2007, aprovada pelo Conselho Estadual de Recursos Hídricos, determina a adoção da  $Q_{95}$  como vazão de referência e a fração de 50%

desta como vazão outorgável (SEMARH, 2007). Contudo ao fixar a fração outorgável, fica estabelecida a vazão mínima que deve permanecer no leito do rio (vazão ecológica), visando garantir a reprodução e crescimento da biota aquática, que no presente caso corresponde aos 50% remanescente da vazão de referência.

## 2.4 SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

### 2.4.1 Ferramentas usuais

Os sistemas de informações geográficas (SIGs) foram definidos por Burrough (1986) como uma ferramenta para coleccionar, armazenar, recuperar, transformar e exibir dados espaciais referenciados ao mundo real. De acordo com Silva (1998) um SIG requer um ambiente digital, devendo existir um banco de dados integrado e os dados devem ser georreferenciados e com controle de erro.

De acordo com Petersen et al. (1991), os SIGs são amplamente utilizados em estudos envolvendo variabilidade espacial e temporal da vegetação, e também permitem a caracterização fisiográfica de bacias hidrográficas a partir do modelo digital de elevação.

No Brasil, o instituto de Pesquisas Espaciais (INPE) desenvolveu um *software* para manipular dados espaciais, intitulado Sistema para Processamento de Informações Georreferenciadas (SPRING). A partir de 1997, este programa passou a ser distribuído pela internet e se tornou uma ferramenta muito valiosa no tratamento de informações geoespaciais, como imagens geradas por sensores a bordo de satélites, mapas temáticos, mapas cadastrais, redes e modelos numéricos de terreno.

Silva et al. (2007) e Brito & Prudente (2005) utilizaram o SPRING para mapear o uso da terra e relataram que esse programa mostrou-se bastante eficaz na classificação do uso do solo. Segundo Destro & Campos (2006), o programa SPRING é preciso na elaboração de mapas de uso do solo e no cálculo de medidas, sendo este programa de fácil acesso.

### 2.4.2 Técnicas de sensoriamento remoto

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

Os sistemas sensores são classificados como ativos ou passivos. Os sistemas ativos são aqueles capazes de produzir sua própria energia eletromagnética para fins de imageamento. Já os sistemas passivos são aqueles que necessitam de uma fonte natural de energia eletromagnética, como o Sol, sendo este sistema de maior facilidade de processamento, quando comparados ao sistema ativo.

Os sistemas passivos são fortemente dependentes das condições atmosféricas, sendo influenciados pelas nuvens no processo de aquisição de dados. Podemos dar como exemplo os sistemas de satélites LANDSAT operado pela NASA ( Agência Espacial Norte Americana), SPOT operado pela (Agência Espacial Francesa), CBERS que pertence ao Programa Espacial Brasileiro e Agência Espacial Chinesa, e IKONOS operado pela (NASA).

A qualidade das imagens depende essencialmente de características dos sensores e assim, deve-se selecionar a imagem adequada ao estudo pretendido. Segundo Rocha (2000), as principais características dos sensores, que irão definir a qualidade da imagem são:

- Resolução espacial: é a capacidade do sensor detectar objetos a partir de uma determinada dimensão, sendo quanto menor o tamanho dos elementos detectados maior será a resolução espacial do sistema sensor;

- Resolução espectral: consiste na habilidade do sensor de registrar a radiação refletida e/ou emitida em diferentes faixas do espectro eletromagnético, ou seja, quanto maior for a resolução espectral, maior será numero de bandas espectrais que o sensor será capaz de adquirir;

- Resolução radiométrica: é a capacidade de discriminação entre diferentes intensidades de sinal ou número de níveis de cinza. Quanto maior for este tipo de resolução, maior será a sensibilidade do sensor em retratar pequenas diferenças de radiação, aumentando o poder de extração de informação da imagem;

- Resolução temporal: representa a frequência com que a área de interesse é revisitada ou re-imageada.

Em 1972 foi lançado o primeiro satélite LANDSAT e posteriormente, em 1986, o SPOT, apresentando melhorias na resolução espacial e temporal em relação ao LANDSAT MSS (Multispectral Scanner) (Coutinho, 1997).

A partir de 1984 a Agência Espacial Norte Americana (NASA) colocou em orbita o sensor TM (*Thematic Mapper*), com características semelhantes do sensor MSS,

apresentando no entanto, uma série de melhorias no que se diz respeito às resoluções espectral, espacial, temporal e radiométrica (INPE, 2004).

O sensor TM opera em sete bandas espectrais, sendo três no visível, três no infravermelho refletido e uma na região termal. A largura da faixa imageada é da ordem de 185 km, com resolução espacial de 30 m, área mínima de 900 m<sup>2</sup> e resolução temporal de 16 dias. Cabe ressaltar que a banda 6 possui resolução espacial de 120 m ( INPE, 2004).

A seleção das bandas espectrais é de fundamental importância para o sucesso do trabalho proposto. Na tabela 2 podem ser visualizadas as bandas espectrais do sensor LANDSAT TM e suas respectivas faixas espectrais.

**Tabela 2.** Bandas espectrais e respectivas faixas do sensor Landsat.

Bandas	Faixa espectral (µm)
1	0,45 a 0,52 µm - azul
2	0,52 a 0,60 µm - verde
3	0,63 a 0,69 µm - vermelho
4	0,76 a 0,90 µm - inflavermelho
5	1,55 a 1,75 µm - inflavermelho médio
6	10,4 a 12,5 µm - inflavermelho termal
7	2,08 a 2,35 µm - inflavermelho distante

Fonte: Inpe (2004).

Em função do objetivo do trabalho a ser executado, o foto interprete deverá selecionar a melhor composição RGB e selecionar qual banda será associada aos canais R, G e B. O INPE selecionou algumas composições mais recomendadas para a associação das bandas do sensor TM como está apresentado na Tabela 3.

**Tabela 3.** Diferentes associações para as bandas do sensor TM.

Associação (bandas TM)	Aplicabilidades
1, 2 e 3	Imagens em cor natural com 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 uso da terra.
2, 4 e 7	Mostra a vegetação em tons verdes e permite discriminar a umidade tanto na vegetação como no solo.

Fonte: Inpe (2004).

## 2.5 MAPEAMENTO DA PRECIPITAÇÃO

Entende-se por precipitação toda água proveniente do meio atmosférico que atinge a superfície terrestre, independentemente de sua forma (neblina, precipitação pluvial, granizo, saraiva, orvalho, geada ou neve). Em razão da capacidade de produzir escoamento superficial direto, a precipitação pluvial é tida como a forma de precipitação de maior importância em regiões tropicais e subtropicais (Bertoni & Tucci, 2001).

A precipitação é um importante componente do ciclo hidrológico, sendo o fenômeno responsável pela entrada de água na bacia hidrográfica, e seu comportamento é um dos principais responsáveis pela resposta hidrológica da bacia hidrográfica.

Embora a água presente na atmosfera seja o elemento básico para ocorrência da precipitação, são necessários outros fatores para desencadear esse processo, tais como mecanismos de resfriamento do ar, presença de núcleos higroscópicos e um mecanismo de crescimento de gotas.

Segundo Bertoni & Tucci (2001), as precipitações podem ser classificadas de acordo com as condições que produzem o movimento vertical do ar em:

- Precipitações frontais ou ciclônicas: estão associadas ao movimento de massas de ar de regiões de alta pressão para regiões de baixa pressão. Estas precipitações são de longa duração e apresentam de baixa a moderada intensidade, espalhando-se por grandes áreas, sendo importantes para o manejo de grandes bacias hidrográficas;

- Precipitações orográficas: resultam da ascensão mecânica de correntes de ar úmido sobre barreiras naturais, como montanhas. Esta precipitação é típica de regiões costeiras e apresenta intensidade baixa a moderada;

- Precipitações convectivas: são típicas de regiões tropicais. Sua formação se dá através do aquecimento diferenciado da superfície terrestre, provocando o aparecimento de camadas de ar com densidades diferentes, o que gera estratificação térmica da atmosfera em equilíbrio instável. Se esse equilíbrio, por qualquer motivo (vento, superaquecimento), for quebrado, provoca-se uma ascensão brusca e violenta do ar menos denso, capaz de atingir grandes altitudes. Essas precipitações caracterizam-se por elevadas intensidades e curtas durações, produzindo vazões críticas em pequenas bacias hidrográficas.

Segundo Bertoni & Tucci (2001), as grandezas que caracterizam uma chuva são a altura pluvial (espessura média da lâmina de água precipitada que recobriria a região atingida pela precipitação, admitindo-se que essa água não infiltrasse, não evaporasse, nem escoasse para fora dos limites da região, em mm), duração (é o intervalo de tempo durante



o qual a chuva ocorre, geralmente em minutos ou horas), intensidade (é a taxa de precipitação no tempo, geralmente expressa em  $\text{mm h}^{-1}$  ou  $\text{mm min}^{-1}$ ) e tempo de recorrência (é o número médio de anos durante o qual se espera que a precipitação analisada seja igualada ou superada).

### **2.5.1 Espacialização da precipitação**

A precipitação apresenta grande variabilidade temporal e espacial. A variabilidade espacial é influenciada principalmente pela localização geográfica, altitude, distância de fontes de umidade, temperatura, direção e intensidade dos ventos (Nicolau, 2002).

A criação de mapas a partir de dados coletados pontualmente nas Estações Pluviométricas é tradicionalmente realizada por métodos de interpolação espacial como do polígono de Thiessen e krigagem. A partir da reconstituição da distribuição espacial das chuvas, pode-se inferir sobre as condições médias de sua variabilidade espacial (Nicolau, 2002).

No processo de interpolação, a qualidade da estimativa dos dados é dependente da procedência dos dados que servirão de base, da representatividade das séries históricas e da distribuição espacial das Estações Pluviométricas (Reis et al., 2005).

A expansão da utilização dos SIGs tem permitido a caracterização espaço-temporal de variáveis ambientais, dentre as quais se incluem as agroclimáticas. O desenvolvimento de sistemas computacionais para aplicações gráficas vem, cada vez mais, influenciando as áreas de cartografia, mapeamento, análise de recursos naturais e planejamento urbano e regional (Reis et al., 2005).

### **2.5.2 Geoestatística**

Na análise de dados desenvolvida pela estatística clássica considera-se que as realizações das variáveis aleatórias são independentes entre si, desconsiderando assim a influência entre observações vizinhas.

Contudo, a precipitação e muitas outras variáveis climáticas apresentam uma certa estruturação nas variações vizinhas, o que caracteriza dependência espacial dos dados, e desta maneira, empregando-se a geoestatística têm-se melhorias na qualidade final dos mapas (Guimarães, 2001).

A geoestatística teve início na constatação feita por Krige (1951) em estudos sobre mineração na África do Sul, nos quais o autor concluiu que a variância dos dados possuía uma estruturação intimamente relacionada a distância de amostragem, (Vieira, 2000). O nome do método de interpolação utilizado na geoestatística (krigagem) origina-se daí, em homenagem a este pesquisador.

A geoestatística estuda o comportamento das chamadas variáveis regionalizadas e de acordo com Vieira (2000), fundamentalmente baseia-se nos seguintes pressupostos:

- Ergodicidade: é a esperança matemática referente à média de uma única realização dentro de um certo domínio;
- Estacionariedade: na região em que se pretende fazer estimativas, o fenômeno é descrito como homogêneo;
- Hipótese intrínseca: as diferenças entre os valores apresentam fraco incremento, isto é, as diferenças são localmente estacionárias.

O semivariograma constitui o alicerce para aplicação das técnicas geoestatísticas. Ele analisa o grau de dependência espacial entre amostras dentro de um campo experimental. Uma importante constatação a respeito dele está no fato de fornecer os parâmetros necessários ao interpolador geoestatístico, para estimativa de valores em locais não amostrados (Salviano, 1996).

A criação do semivariograma é a partir da função de semivariância e pode ser considerado como uma ferramenta de análise na determinação da dependência espacial (Guimarães, 2001), medindo a variabilidade das diferenças entre as realizações da variável aleatória de interesse, de maneira que, quanto menor a semivariância, menor a variação dessas diferenças (Gomes, 2005).

De acordo com Vieira (2000), o semivariograma é definido e estimado, respectivamente, por:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \cdot E(Z(x_i) - Z(x_{i+h}))^2 \quad (1)$$

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \cdot \sum_{i=1}^{N(h)} (Z(x_i) - Z(x_{i+h}))^2 \quad (2)$$

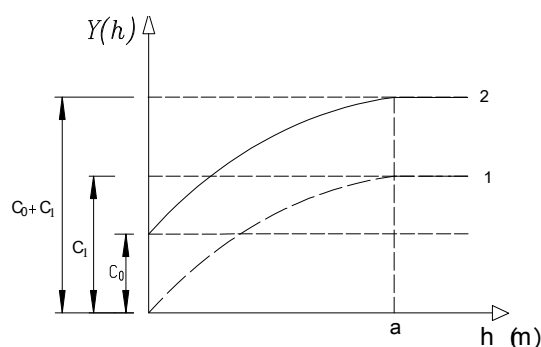
Em que  $\gamma(h)$  refere-se à semivariância,  $E$  refere-se à esperança matemática,  $Z(x_i)$  e  $Z(x_{i+h})$  referem-se às variáveis aleatórias medidas em  $i$  e  $i+h$ , respectivamente, e  $N(h)$ , ao número de pares de valores medidos, separados pela distância  $h$ .

Na análise geoestatística, a distribuição espacial das medidas é considerada, característica que permite estabelecer o alcance de correlação espacial entre amostras, o que pode ser utilizado no estabelecimento da distância entre os locais de coleta de dados (Vieira, 2000).

Quanto mais próximos estiverem os pontos amostrados, maior a semelhança entre eles e menor a semivariância. Assim, a semivariância aumenta com o aumento da distância entre os pontos amostrados, e teoricamente, até atingir um valor constante, denominado patamar ( $C_0+C_1$ ), e que corresponde às variações que não são justificadas pela semelhança de um ponto com outro. Essa distância na qual a semivariância se torna aproximadamente constante é chamada de alcance da dependência espacial ( $a$ ), constituindo o espaçamento máximo de amostragem para que se obtenha dependência espacial (Guimarães, 2001).

Quando a distância entre pontos coletados se aproxima de zero, freqüentemente a semivariância difere-se de zero. Como não há possibilidade de se fazer reamostragem exatamente sobre um ponto já amostrado, além da ocorrência de possíveis erros de amostragem e análise, freqüentemente há uma descontinuidade na origem do semivariograma, denominada efeito pepita ( $C_0$ ) (Vieira, 2000).

A diferença entre o patamar ( $C_0+C_1$ ) e o efeito pepita ( $C_0$ ) é denominada de variância estrutural ( $C_1$ ), sendo fundamental para caracterização da estrutura de dependência espacial. Na Figura 2 apresenta-se um esquema geral de semivariograma constando os principais elementos que o caracterizam.



**Figura 2.** Semivariograma ideal (1) e semivariograma típico (2) (Latuf, 2007).

Para a utilização do semivariograma as seguintes suposições básicas são requeridas: (1) as diferenças entre pares de valores de amostras são determinadas apenas pela orientação espacial relativa dessas amostras; (2) o interesse é focado apenas na média e na variância das diferenças, significando que esses dois parâmetros dependem unicamente da orientação (hipótese intrínseca); (3) por conveniência assume-se que os valores da área de interesse não apresentam tendência que possa afetar os resultados e assim a preocupação será apenas com a variância das diferenças entre valores das amostras.

Na análise de dados experimentais, para a elaboração do semivariograma, é necessária a construção do semivariograma experimental, que consiste de uma série de pontos discretos da semivariância em função da distância. A partir destes pontos discretos, uma função contínua deve ser ajustada (Vieira et al., 1983).

Ajustar um modelo teórico ao semivariograma experimental é uma das etapas mais importantes da teoria das variáveis regionalizadas, pois todos os cálculos de geoestatística dependem dos valores dos parâmetros obtidos para o modelo de semivariograma (Vieira et al., 1981).

Os principais modelos de semivariograma utilizados na geoestatística são o linear com patamar, esférico, exponencial, gaussiano e modelos sem patamar.

A fim de promover o ajuste do modelo ao semivariograma experimental são utilizados os métodos de ajuste, dentre os quais se destacam o método dos mínimos quadrados ponderados e o da máxima verossimilhança (Gomes, 2005).

### **2.5.3 Interpolador Geoestatístico**

Na análise geoestatística, além da obtenção de um modelo de dependência espacial, muitas vezes necessita-se predizer valores em pontos não amostrados, ou mesmo visualizar o comportamento da variável na região através de um mapa de isolinhas ou de superfície, o que pode ser obtido através de um método de interpolação, que no caso da geoestatística é chamado de krigagem (Silva Junior, 1984).

Segundo Ribeiro Junior (1995), esse interpolador pondera os vizinhos do ponto a ser estimado, obedecendo aos critérios de não tendenciosidade e mínima variância, cabendo destacar a existência de diversos tipos de krigagem (simples, ordinária, universal, indicadora, probabilística... etc.).

O interpolador geoestatístico considera uma “distância estatística” que expressa tanto a distância entre pontos como a estrutura de variabilidade, a qual é fornecida pela semivariância. Surge daí, a necessidade de se ter um semivariograma bem ajustado para realização da krigagem (Almeida & Ribeiro Jr., 1996).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 REGIÃO DE ESTUDO

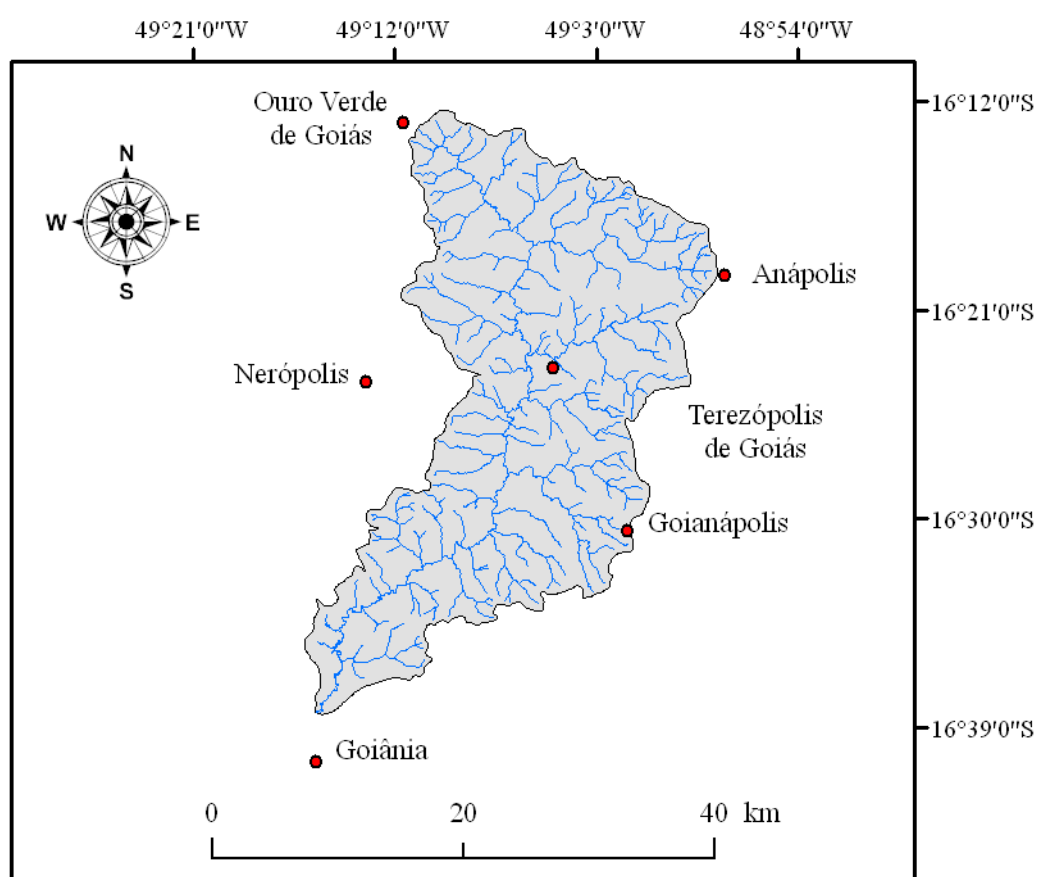
O presente estudo contempla a bacia hidrográfica do ribeirão João Leite com seção de controle na estação fluviométrica Captação João Leite de coordenadas 15°30'00'' latitude sul e 49°14'34'' longitude oeste, mantida pela Companhia de Recursos Minerais de Goiás (CPRM), e que drena uma área de 766,80 km<sup>2</sup>, entre as latitudes 16°13' e 16°39' Sul e longitudes 48°57' e 49°11' Oeste.

O clima característico da bacia é Aw segundo classificação de Koppen, quente e subúmido, prevalecendo inverno seco (Nimer, 1979). A vegetação predominante é o cerrado, ocorrendo também, Cerradão, mata de galeria próxima aos cursos d'água, Floresta Tropical Subcaducifólia e Caducifólia (Calil, 2003).

Segundo Oliveira (1996), na bacia ocorrem basicamente cinco classes de solos. Em pequenas áreas encontram-se os Plintossolos, Cambissolos e Gleissolos. Em terços inferiores de encostas em vales de declive suave ocorre o Argissolo, dando suporte à Floresta Tropical Subcaducifólia e Caducifólia e onde com freqüência ocorre a exploração agrícola irrigada de olerícolas e hortícolas, além de pastagens plantadas com uso de forrageiras, tais como os capins Jaraguá e Napier. Já nas partes inferiores das vertentes em relevos variando de suave ondulado a plano, estão presentes os Latossolos, onde é desenvolvida a produção de grãos e pastagens plantadas de capim *Brachiaria decumbens*.

O ribeirão João Leite tem sua nascente nas proximidades do município de Ouro Verde de Goiás e faz parte do complexo hidrográfico da bacia do rio Paraná. Após percorrer aproximadamente 85 km o ribeirão João Leite deságua no rio Meia Ponte, que por sua vez, se estende por 415 km até sua foz no rio Paranaíba. Na divisa entre os estados de Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e São Paulo o rio Paranaíba recebe afluência do rio Grande, formando o rio Paraná, que percorre cerca de 2.500 km, unindo-se com o rio Uruguai, na Argentina, originando o rio da Prata.

Na Figura 3 estão apresentadas as sedes dos principais municípios inseridos na bacia. Conforme se pode visualizar, ao sul está localizada a cidade de Goiânia, capital do estado, que tem no ribeirão João Leite um dos mananciais de abastecimento, suprindo cerca de 52% de sua população. No entanto, outros municípios de grande expressão no cenário goiano estão diretamente ligados à bacia em estudo, como é o caso, a leste, de Anápolis, evidenciando a necessidade de uma adequada retratação de seu comportamento hidrológico.



**Figura 3.** Bacia hidrográfica do ribeirão João Leite, hidrografia e localização das sedes municipais – Goiânia, 2009.

### 3.2 CARACTERIZAÇÃO FISIAGRÁFICA

Os arquivos básicos à caracterização fisiográfica da bacia do ribeirão João Leite foram as cartas topográficas digitalizadas do Departamento de Solos do estado de Goiás e Secretaria de Agricultura do Estado, na escala 1:100.000, contendo informações sobre altimetria e hidrografia, identificadas sob os códigos SE-22-X-B-I e SE-22-X-B-II.

A partir desse banco de dados, utilizando o programa de livre acesso SPRING foram levantadas as informações necessárias à caracterização fisiográfica da bacia do ribeirão João Leite, abrangendo a área da bacia, comprimento do talvegue, comprimento total dos cursos de água, modelo digital de elevação e mapa de declividades.

Para gerar o modelo digital de elevação foi utilizada metodologia descrita em SPRING (2005), através do método da triangulação, tendo sido mantido o tamanho de pixel em 30 m durante o processo e no arquivo de saída.

Tendo sido obtidas as informações básicas, procedeu-se o cálculo da densidade de drenagem (Dd), coeficiente de compacidade (C) e fator de forma (F), conforme expresso pelas equações de 3 a 5.

$$Dd = \frac{Lc}{A} \quad (3)$$

$$C = \frac{Pbh}{P_{circ}} \quad (4)$$

$$F = \frac{L}{L_{axial}} \quad (5)$$

Em que, Lc é o comprimento total de cursos d'água, em km, A é a área da bacia hidrográfica, em km<sup>2</sup>, P<sub>bh</sub> é o perímetro da bacia, em km, P<sub>circulo</sub> é o perímetro de uma circunferência com área igual a da bacia, em km, L é a largura média da bacia, em km e L<sub>axial</sub> é o comprimento axial, em km.

A densidade de drenagem é um importante indicativo geomorfológico da bacia hidrográfica. Quando ocorrem valores superiores a 13 km km<sup>-2</sup> caracteriza-se a densidade de drenagem da bacia como alta, entre 5 e 13 km km<sup>-2</sup> como média e menor que 5 km km<sup>-2</sup> como baixa.

O coeficiente de compacidade indica a tendência da bacia quanto à ocorrência de enchentes. Valores desse coeficiente entre 1 e 1,25 indicam alta propensão, entre 1,25 e 1,5 média propensão e maiores que 1,5 baixa propensão.

O fator de forma, por sua vez, indica a magnitude das enchentes quando estas ocorrerem, e valores entre 1 e 0,75 apontam a bacia como sujeita a grandes enchentes, entre 0,75 e 0,5 a medianas e menor que 0,5 a pequenas.



### 3.3 CARACTERIZAÇÃO HIDROLÓGICA

#### 3.3.1 Séries históricas

O monitoramento do regime fluvial na bacia do ribeirão João Leite restringe-se à estação fluviométrica Captação João Leite, operada pela CPRM-GO (Companhia Pesquisa de Recursos Hídricos e Minerais do Estado de Goiás) Tendo-se em vista que estão disponibilizados dados de vazão média diária dessa estação a partir de 1974, foi adotado o período de 1975 a 2005 para análise do comportamento hidrológico da bacia, totalizando 31 anos.

A partir da série histórica de vazões médias diárias do referido período, foram tabuladas séries de vazões média anual e mensal, máxima anual, mínima anual e mínima média de sete dias consecutivos ( $Q_7$ ). Também foram geradas séries históricas anuais das vazões com permanência de 90% e 95% no tempo,  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$ , respectivamente, obtidas das curvas de permanência anuais.

A geração das curvas de permanência seguiu metodologia descrita por Jacobs & Voguel (1998). Essa metodologia consiste em ordenar todos os dados de vazão em ordem decrescente e associar a cada valor uma frequência de excedência, utilizando uma posição de plotagem empírica ( $m/n+1$ ), sendo  $m$  a ordem do valor ordenado e  $n$  o número de valores da série.

Já para a análise do comportamento da precipitação, calculou-se a precipitação média diária na bacia no período de 1975 a 2005, utilizando informações de precipitação total diária de 14 estações pluviométricas localizadas no interior e arredores da bacia do João Leite, através dos polígonos de Thiessen, conforme descrito por Tucci (2005). De acordo com esse autor, a aplicação dessa técnica é decorrente de que, conhecida a área de influência de cada estação pluviométrica, há possibilidade de aplicar os fatores de ponderação a longas séries históricas, diferentemente de outras metodologias, que exigem a análise dos dados de cada dia, individualmente. Assim, foram obtidas séries históricas de precipitação média anual e mensal.

#### 3.3.2 Análise da tendência do comportamento hidrológico

A metodologia empregada na análise da tendência das variáveis hidrológicas precipitação e vazão foi a empregada por Pruski (2005), Pereira (2005), Sharma & Shakya (2006) e Latuf (2007). O método consiste em estimar equações de regressão linear simples

entre a variável hidrológica (considerada variável dependente) e o tempo (variável independente), o que permite a identificação da propensão de mudanças das variáveis estudadas ao longo do período analisado (Pereira, 2005).

Após o ajuste da linha de tendência, obteve-se a significância dos parâmetros da equação, conforme descrito por Pruski (2005). De acordo com esse autor, essa etapa visa avaliar a probabilidade da variação da variável dependente ser decorrente da alteração atribuída à variável independente.

### 3.3.3 Coeficiente de deflúvio

Denomina-se coeficiente de deflúvio a relação entre o deflúvio e a precipitação em determinado período de tempo. Esse coeficiente foi calculado sobre duas abordagens temporais, sendo em termos anuais e mensais. Sua obtenção foi realizada conforme descreve a equação 6.

$$Cd = \frac{V_{te}}{V_{tp}} \quad (6)$$

Em que, Cd é o coeficiente de deflúvio, adimensional,  $V_{te}$  é o volume escoado na seção de deságüe, em  $m^3$  e  $V_{tp}$  é o volume total precipitado, em  $m^3$ .

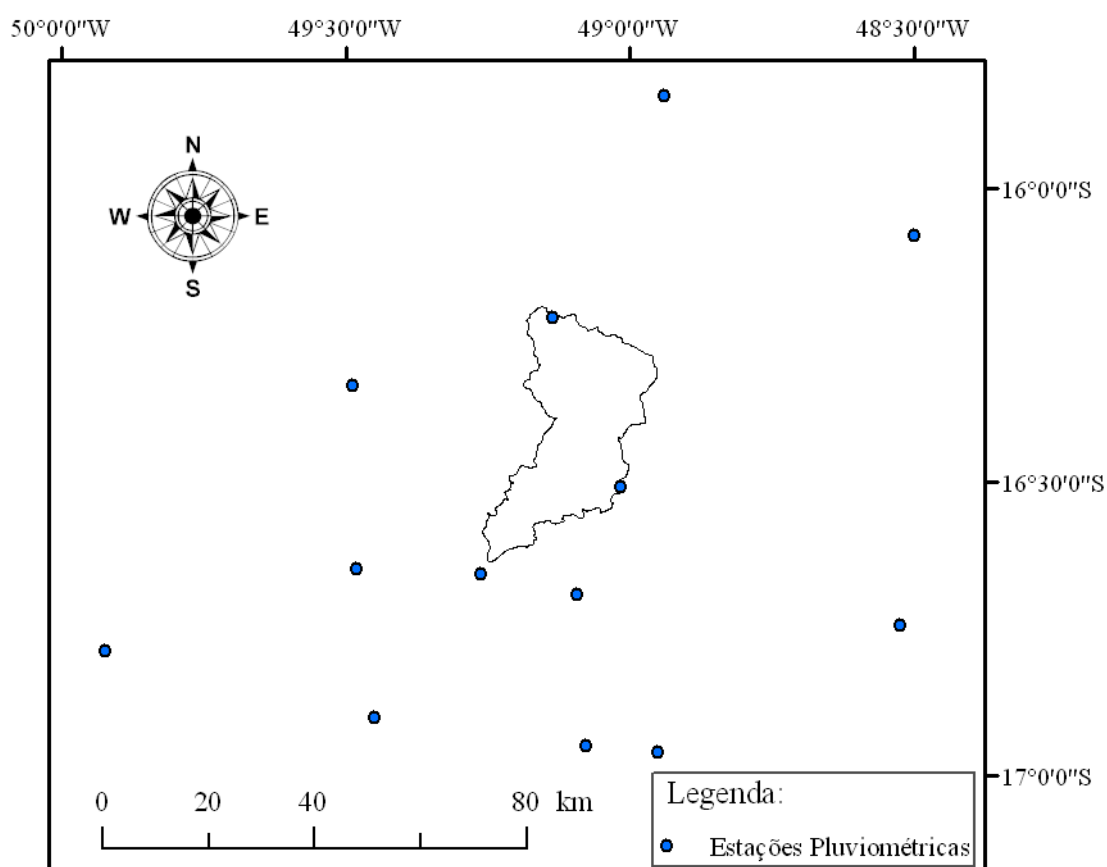
## 3.4 ESPACIALIZAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO

### 3.4.1 Banco de dados

O banco de dados utilizado nesse trabalho consiste de séries históricas de precipitação diária disponibilizadas pelo Sistema Nacional de Informações Hidrológicas coordenado pela Agência Nacional de Águas. Na Tabela 4 estão apresentadas as principais informações das 14 estações pluviométricas empregadas nesse estudo. A distribuição espacial das estações pluviométricas está apresentada na Figura 4. Conforme se pode notar, algumas das estações encontram-se relativamente afastadas do perímetro da bacia hidrográfica. A justificativa para essa adoção é a relativa escassez de informações pluviométricas na região, o que levou ao emprego de toda a informação disponível nas redondezas.

**Tabela 4.** Informações básicas das estações pluviométricas utilizadas com series históricas existentes nos dados da ANA. Goiânia. 2009

Código	Nome	Município	Latitude	Longitude
1649001	Aragoiânia	Aragoiânia	-16.9119	-49.4522
1648003	Bela Vista de Goiás	Bela Vista de Goiás	-16.9667	-48.9500
1649002	CCTA (EMGOPA)	Goiânia	-16.7011	-49.0947
1649003	Fazenda Bonita de Baixo	Hidrolândia	-16.9572	-49.0764
1649004	Goianápolis	Goianápolis	-16.5164	-49.0203
1649005	Goiânia - Agronomia	Goiânia	-16.6667	-49.2667
1649006	Inhumas	Inhumas	-16.3464	-49.4942
1549003	Jaraguá	Jaraguá	-15.7197	-49.3289
1649009	Ouro Verde de Goiás	Ouro Verde de Goiás	-16.2281	-49.1436
1649010	Palmeiras de Goiás	Palmeiras de Goiás	-16.8031	-49.9286
1548003	Pirenópolis	Pirenópolis	-15.8500	-48.9500
1648001	Ponte Anápolis - Brasília	Alexânia	-16.0833	-48.5083
1649012	Trindade	Trindade	-16.6594	-49.4864
1648002	Vianópolis	Vianópolis	-16.7464	-48.5247



**Figura 4.** Distribuição espacial das estações pluviométricas empregadas no estudo da continuidade espacial da precipitação média mensal e anual na bacia do ribeirão João Leite – Goiânia, 2009.

### **3.4.2 Espacialização dos dados**

Inicialmente, foram estruturadas séries históricas de precipitação total mensal e anual para cada estação pluviométrica, e a partir destas extraíram-se valores médios para posterior análise espacial e interpolação dos dados.

Devido à pequena disponibilidade de informações nas proximidades da bacia hidrográfica do ribeirão João Leite, não foi estabelecido um período fixo para a estruturação das séries históricas, e dessa maneira, foram empregados os dados existentes, em sua totalidade abrangendo o período de 1975 à 2005.

Na análise exploratória de dados e mapeamento da precipitação total média mensal e anual na bacia hidrográfica do ribeirão João Leite foi empregado o programa de livre acesso GeoR (Ribeiro Junior & Diggle, 2001).

Nessa etapa do trabalho, optou-se pela utilização da Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), com o objetivo de se obter a distância entre as estações pluviométricas em unidades métricas, ressaltando-se que o datum utilizado foi o South American 1969 (SAD69), Zona 22S.

Para checar a adequabilidade dos dados estudados às técnicas geoestatísticas realizou-se a análise exploratória de dados, conforme descrevem Ribeiro Junior & Diggle (2001). Nesse sentido foram levantados gráficos da tendência espacial dos dados e box plot. O primeiro com o objetivo de verificar a existência de tendenciosidade na massa de dados, o que, caso exista, inviabiliza a aplicação das técnicas geoestatísticas e o segundo com o objetivo de identificação e eliminação de valores discrepantes.

### **3.4.3 Modelagem dos semivariogramas**

Os modelos de semivariograma ajustados ao semivariograma experimental foram o exponencial, esférico e gaussiano, enfatizando-se, que para seu ajuste, foi empregado o método dos mínimos quadrados ponderados.

De acordo com Mello (2004), o método de ajuste dos mínimos quadrados ponderados é uma tentativa de ponderar a semivariância, uma vez que a ponderação pela variância das estimativas das semivariâncias não é conhecida, o que é obtido dividindo-se o erro quadrático médio pelo número de pares de pontos em cada distância no semivariograma.

O primeiro modelo de semivariograma ajustado foi o esférico. De acordo com Vieira (2000), nesse modelo são empregados os valores do efeito pepita ( $C_0$ ) e patamar ( $C_0+C_1$ ). O traçado desse modelo origina-se de uma reta que intercepta o eixo y em  $C_0$  e que seja tangente aos primeiros pontos próximos de  $h = 0$ , e que cruzará com o patamar à distância  $a' = (2/3)a$ .

Outra interessante característica do modelo esférico de semivariograma consiste no fato de que o mesmo é linear até aproximadamente  $(1/3)a$ , e o alcance será  $a = (3/2)a'$ .

O modelo esférico de semivariograma assume a seguinte forma matemática:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[ \frac{3}{2} \left( \frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right]; 0 < h < a \quad (7)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1; h \geq a \quad (8)$$

Em que,  $C_0$  é o efeito pepita,  $C_0 + C_1$  é o patamar,  $h$  é a distância entre pares de pontos e  $a$  é o alcance.

O segundo modelo testado foi o exponencial. De acordo com Vieira (2000), nesse modelo o patamar é atingido apenas assintoticamente, diferentemente do modelo esférico, no qual esse valor é atingido no valor do alcance. Cabe destacar, que o alcance é determinado visualmente com a distância.

O modelo exponencial assume a seguinte expressão matemática:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[ 1 - \exp\left(-3 \frac{h}{a}\right) \right]; 0 < h < a \quad (9)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1; h > a \quad (10)$$

O terceiro modelo de semivariograma ajustado foi o gaussiano. Segundo Vieira (2000), junto à origem esse modelo apresenta uma curva parabólica e a tangente nesse ponto é horizontal, indicando pequena variabilidade a curtas distâncias. O modelo gaussiano de semivariograma está apresentado na equação 11.

$$\gamma(h) = C \left( 1 - e^{\left(-h^2/a^2\right)} \right) \quad (11)$$

#### 3.4.4 Validação cruzada

A qualidade final dos mapas gerados por krigagem está diretamente relacionada aos parâmetros fornecidos pelo modelo de semivariograma. Para verificação

do modelo de semivariograma que se sobressaiu, dentre os três estudados, foi realizada a validação cruzada (Vieira et al, 1981).

De acordo com Vieira (2000), quando se realiza a estimativa de valores em locais não medidos, ocorre certo grau de incerteza sobre as hipóteses assumidas ou mesmo, sobre os parâmetros ajustados. Essa incerteza é devida ao erro de estimativa e nesse contexto, insere-se a validação cruzada, como uma avaliação do erro de interpolação produzido.

A técnica da validação cruzada consiste na estimativa, empregando os parâmetros oriundos do ajuste de cada modelo de semivariograma, dos pontos que foram realmente amostrados, podendo assim comparar o valor estimado ao observado. Dessa maneira, foi estimado o erro médio (EM) produzido por cada modelo de semivariograma, para cada evento em estudo, como descrito a seguir:

$$E_j = \left| \frac{Vobs_j - Vest_j}{Vobs_j} \right| \quad (12)$$

$$EM = \frac{\sum_{j=1}^n E_j}{n} \quad (13)$$

Em que,  $E_j$  é o erro de estimativa em cada ponto,  $Vobs_j$  é o valor observado em cada ponto  $j$ ,  $Vest_j$  é o valor estimado em cada ponto  $j$  e  $EM$  é o erro médio de estimativa.

### 3.4.5 Krigagem

O interpolador geoestatístico que consiste na obtenção de informações de dados para locais não amostrados necessita de um modelo de semivariograma a ser empregado na confecção dos mapas de precipitação média mensal e anual e irá corresponder ao que produzir o menor erro médio para cada evento estudado.

De acordo com Thompson (1992) o equacionamento que rege o interpolador geoestatístico é dado por:

$$[A]^{-1} \cdot [b] = [\lambda] \quad (14)$$

$$X_{\text{estimado}} = \sum_{j=1}^n \lambda_j \cdot X_j \quad (15)$$

Em que,  $[A]^{-1}$  é a matriz inversa de semivariância na vizinhança do ponto a ser estimado,  $[b]$  é a matriz de semivariância entre a vizinhança de krigagem e o ponto a ser interpolado e  $[\lambda]$  é a matriz de pesos de krigagem.

### 3.5 CLASSIFICAÇÃO DO USO DO SOLO

Visando descrever a variação temporal da cobertura vegetal na bacia hidrográfica do ribeirão João Leite, foram empregadas imagens do satélite LANDSAT dos anos de 1979, 1989, 1997 e 2005.

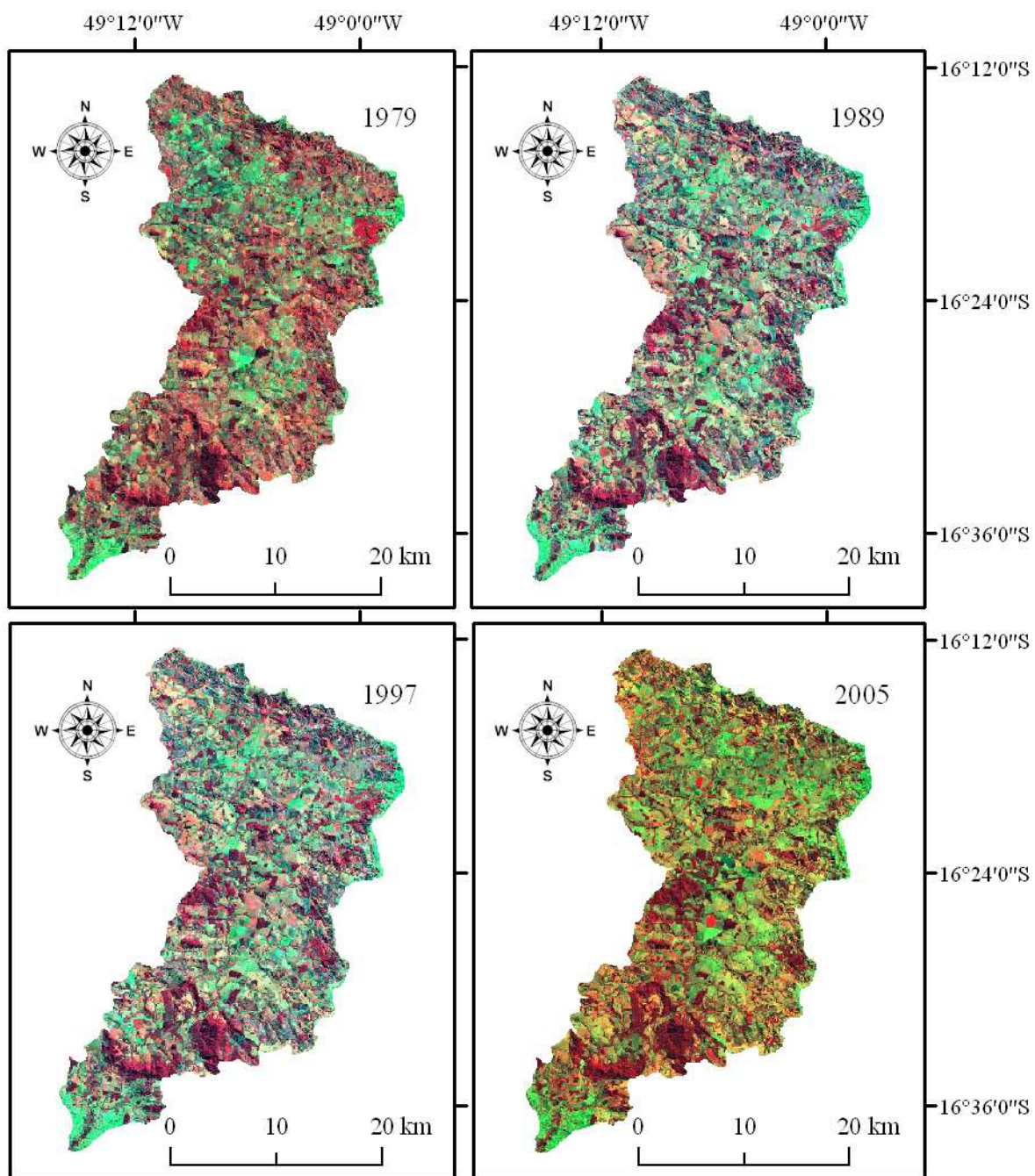
A imagem de 1979 foi obtida do Satélite LANDSAT 2, sensor MSS, Órbita ponto 238/71, com resolução espacial de 80 m e passagem em 05 de junho de 1979, tendo sido utilizadas as bandas 5 (0,6 a 0,7  $\mu\text{m}$  - visível), 6 (0,7-0,8  $\mu\text{m}$  - infravermelho) e 7 (0,8-1,1  $\mu\text{m}$  - infravermelho).

Para os outros anos utilizaram-se imagens do Satélite LANDSAT 5, sensor TM, Órbita ponto 222/71, com resolução de 30 m e as bandas 3 (0,63-0,69  $\mu\text{m}$  - visível), 4 (0,76-0,90  $\mu\text{m}$  - infravermelho) e 5 (1,55-1,75  $\mu\text{m}$  - infravermelho)

As imagens do ano de 1989, 1997 e 2005 são referentes a 05 de maio, 5 de junho e 05 de agosto. Na Figura 5 estão apresentadas as referidas imagens com a composição das bandas RGB (Red, Green e Blue).

A classificação do uso do solo na bacia do ribeirão João Leite foi realizada utilizando o software SPRING 4.2 (INPE, 2005). O pré-processamento das imagens seguiu metodologia descrita por Moreira (2005), contemplando o realce do histograma, filtragem, verificação da correção geométrica e segmentação.

Foi adotado o método de classificação supervisionada pixel a pixel da Máxima Verossimilhança (Maxver). A definição das classes de uso do solo presentes na bacia do ribeirão João Leite seguiu o Manual Técnico de Uso da Terra (IBGE, 2006). Foram estabelecidas as classes de uso do solo pastagem, vegetação nativa, urbanização, água, solo exposto e agricultura, tendo sido estabelecido um número mínimo de cem amostras por classe.



**Figura 5.** Composição RGB das imagens Landsat 2, bandas 5,6 e 7 para 1979 e Landsat 5 as bandas 3,4,e 5 para os anos de 1989, 1997 e 2005 para a bacia do ribeirão João Leite, GO.



### 3.6 ASSOCIAÇÃO ENTRE O USO DO SOLO E O REGIME FLUVIAL

A análise quantitativa da associação entre o uso do solo e as vazões foi realizada por meio do ajuste de equações por regressão linear simples, conforme descrito por Latuf (2007). Nesse sentido foram obtidas equações visando descrever o comportamento da vazão média anual, mínima anual, máxima anual,  $Q_{90}$ ,  $Q_{95}$  e  $Q_7$ , usando como variáveis explicativas as classes de uso do solo vegetação nativa, pastagem, agricultura, urbanização, solo exposto e água, além das precipitações média anual, média dos dois últimos anos, total do ano anterior, do mês mais chuvoso e do mês mais seco.

Para a escolha das variáveis explicativas, foi empregado o teste t de Student, sendo utilizadas na regressão, variáveis que se mostrassem significativas ao nível de 10% de probabilidade pelo teste. A verificação da qualidade do ajuste foi realizada pelo coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Nessa etapa do estudo foi utilizado o programa R de livre acesso (R Development Core Team, 2006).

### 3.7 ANÁLISE DE CRITÉRIOS DE OUTORGA

Com o objetivo de propor alternativas para otimizar a utilização dos recursos hídricos disponíveis na bacia hidrográfica do ribeirão João Leite, avaliou-se, quantitativamente, o volume de água disponibilizado por diferentes critérios de outorga. Nesse sentido foram quantificadas cinco diferentes vazões de referência, sendo:

- Vazão de referência com um valor de  $Q_{7,10}$ : Com base na série histórica de vazões médias mínimas de sete dias consecutivos ( $Q_7$ ), foi calculado o valor de  $Q_7$  associado a recorrência de dez anos ( $Q_{7,10}$ ), empregando a distribuição de probabilidades Log-normal 3 parâmetros, conforme descrito por Euclides (1992).

- Vazão de referência com um valor de  $Q_{90}$ : A partir da curva de permanência calculada com dados diários do período de 1975 a 2005, foi extraído o valor referente à permanência de 90% no tempo;

- Vazão de referência com um valor de  $Q_{95}$ : analogamente a  $Q_{90}$ , porém, tomando-se o valor correspondente à permanência de 95% no tempo;

- Vazão de referência com valores mensais de  $Q_{90}$ : Nessa situação foram calculadas curvas de permanência mensais. Destas curvas foram tomadas as vazões com permanência de 90% do tempo ( $Q_{90}$ ), propiciando doze vazões de referência;

- Vazão de referência com valores mensais de  $Q_{95}$ : Foi obtido de forma semelhante a  $Q_{90}$ , porém, tomando-se o valor correspondente à permanência de 95% no tempo;

De acordo com Câmara (2003), a utilização de vazões de referência mensais no estabelecimento da vazão máxima outorgável num curso d'água visa otimizar a utilização dos recursos hídricos. Contudo, esse autor destaca que, com a adoção de valores outorgáveis mensais, o processo de outorga se torna mais complexo no que concerne à operacionalização e fiscalização.

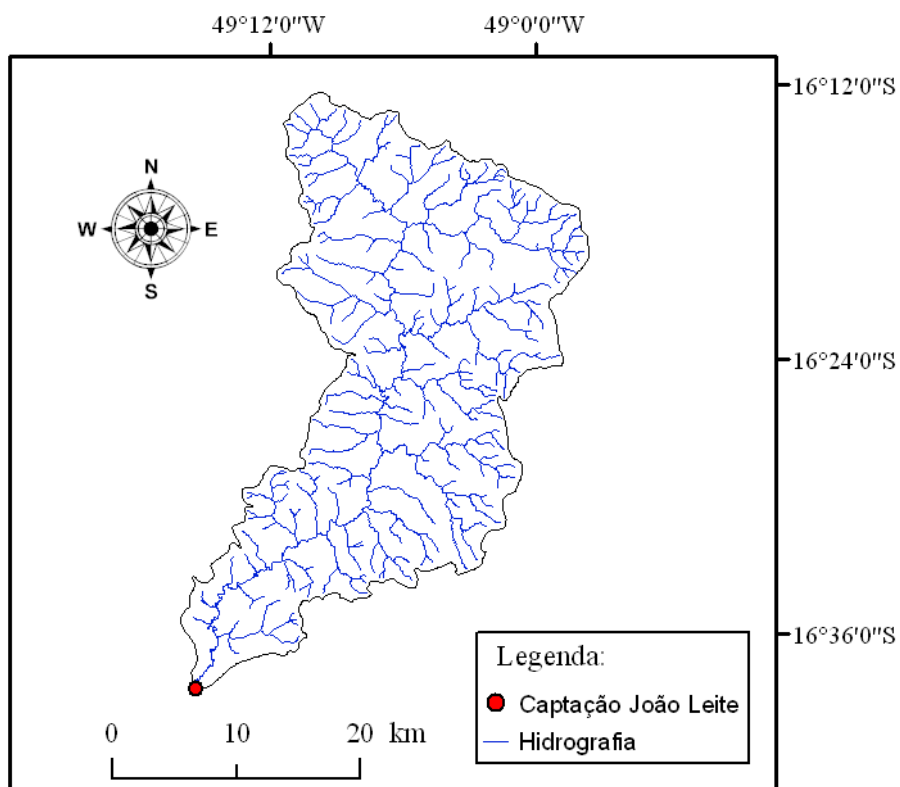
Com relação aos critérios de vazão máxima outorgável, foram avaliados os vigentes nos estados de Goiás (50% de  $Q_{95}$ ), Minas Gerais (30% de  $Q_{7,10}$ ) e Ceará (90% de  $Q_{90}$ ).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO FISIAGRÁFICA

A bacia hidrográfica do ribeirão João Leite delimitada a partir da estação fluviométrica Captação João Leite apresentou área de drenagem de 766,80 km<sup>2</sup>, inserindo-se, de acordo com a classificação proposta por Becker (1992), na meso escala espacial.

Na Figura 6 está apresentada a bacia hidrográfica em estudo, juntamente à sua hidrografia e a estação fluviométrica Captação João Leite.



**Figura 6.** Bacia hidrográfica, estação fluviométrica Captação João Leite e hidrografia. Goiânia, 2009.

O comprimento total de cursos d'água inseridos na bacia hidrográfica foi de 643,59 km, proporcionando uma densidade de drenagem de 0,84 km km<sup>-2</sup>.

A forma da bacia hidrográfica influencia o tempo de concentração e assim pode indicar a tendência à ocorrência de enchentes. Esta influência é quantificada através de índices, como o fator de forma e o coeficiente de compacidade.

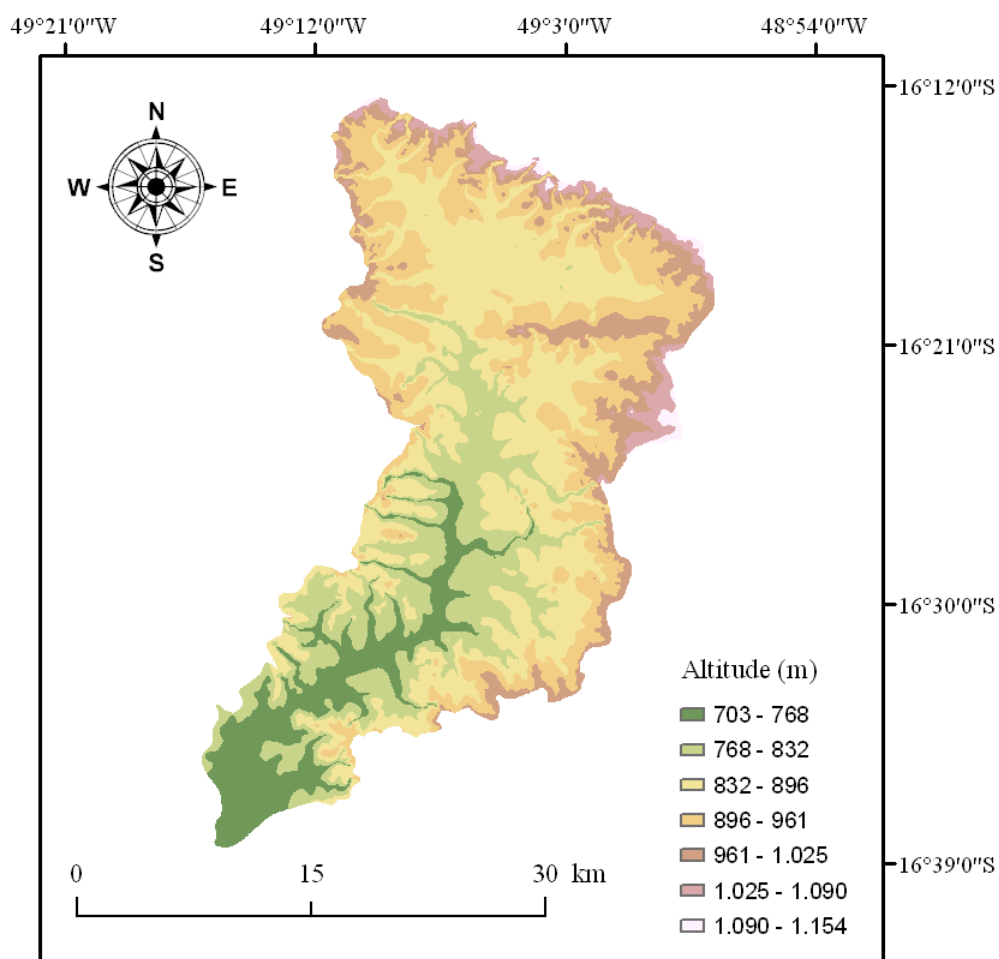
O coeficiente de compacidade fornece uma idéia sobre a dimensão das enchentes, uma vez que quanto mais próximo de um círculo, maior sua aptidão para proporcionar grandes cheias. Esse coeficiente foi quantificado em 1,7, significando que a bacia hidrográfica do ribeirão João Leite não é sujeita a grandes enchentes, o que é retratado por coeficientes superiores a 1,5. Esse resultado pode ser reforçado pela visualização do formato alongado da bacia hidrográfica, que distingui-se da forma circular, promovendo uma amortização da vazão de pico.

Já o fator de forma é indicativo da tendência da bacia à ocorrência de enchentes. O valor encontrado para esse fator na bacia do ribeirão João Leite foi de 0,26 e assim, a bacia ficou caracterizada como não sujeita a enchentes, visto que valores desse fator inferiores a 0,5 enquadram-se nessa classificação.

Dessa maneira, com base no fator de forma ficou evidenciado que a bacia hidrográfica do ribeirão João Leite não apresenta tendência à ocorrência de enchentes e, se estas ocorrerem, não serão de grande vulto, com base no coeficiente de compacidade.

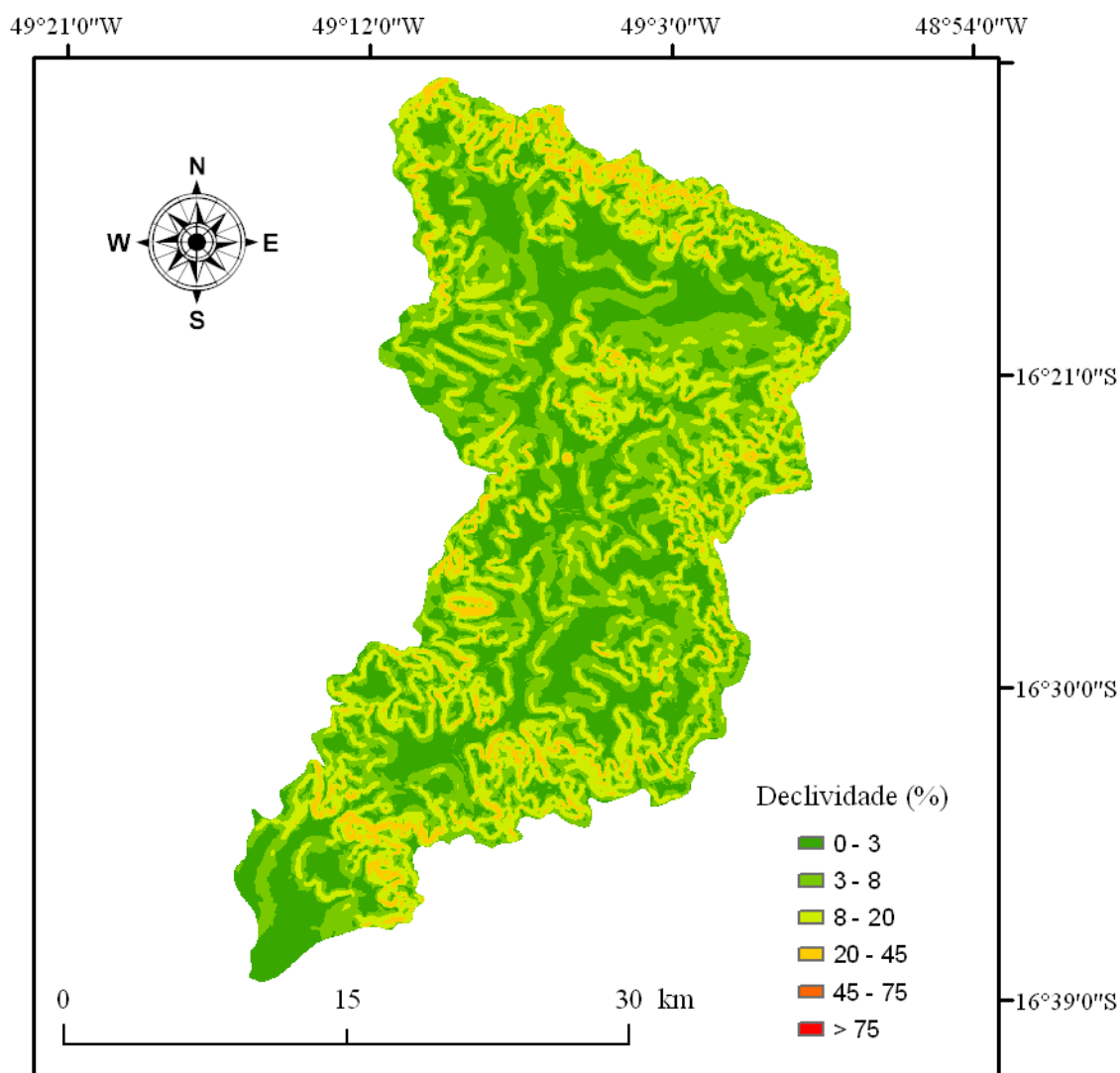
Na Figura 7 apresenta-se o modelo digital de elevação da bacia em estudo, obtido a partir dos dados altimétricos constantes nas Cartas Topográficas do IBGE SE-22-X-B-I e SE-22-X-B-II, constituídas por curvas de nível com equidistância de 20 metros e pontos cotados ao longo do território. Pode-se observar que na cabeceira da bacia hidrográfica ocorrem grandes elevações, atingindo cerca de 1.154 metros nos pontos mais elevados, e que sofrem redução gradual na direção de montante, alcançando uma cota mínima, próximo ao exutório da bacia, de aproximadamente 703 metros

Na Figura 8 está apresentado o mapa de declividades da bacia do ribeirão João Leite classificado como descrito em Embrapa (1979). Pode-se visualizar, de maneira geral, elevadas declividades presentes em toda a vertente da bacia hidrográfica, apresentando em muitos trechos segmentos com relevo fortemente ondulado (20 – 45%).



**Figura 7.** Modelo digital de elevação da bacia hidrográfica do ribeirão João Leite, GO. Goiânia, 2009.

No entanto, na medida em que se afasta das regiões de cabeceira, aproximando-se do vale do ribeirão João Leite, evidencia-se uma diminuição no gradiente de elevação, e novamente de acordo com a Figura 8, têm-se menores declividades, aproximando-se de relevos planos (0 – 3%) e suavemente ondulados (3 – 8%).

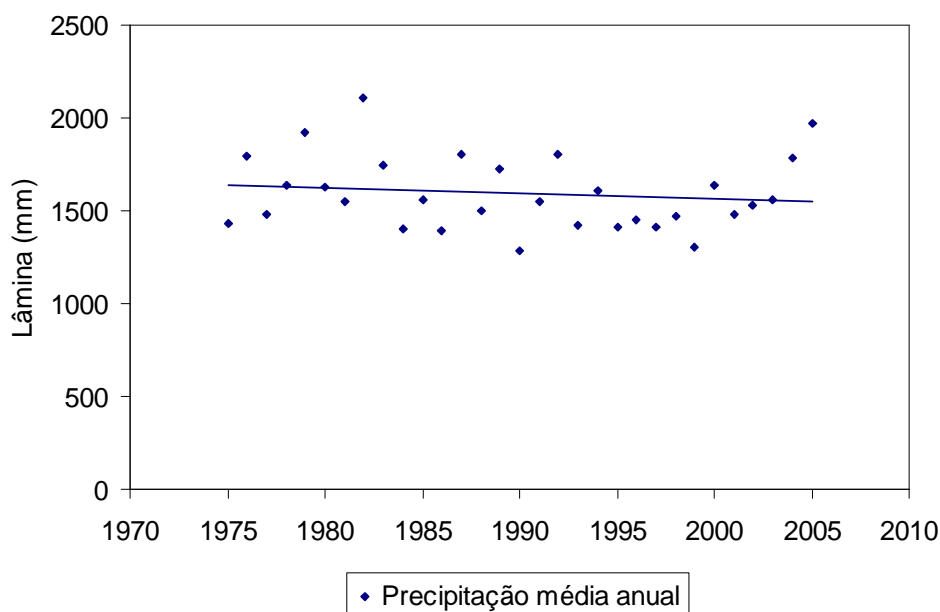


**Figura 8.** Mapa de declividade da bacia hidrográfica do ribeirão João Leite, classificado conforme sugerido pela Embrapa (1979).

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DO REGIME PLUVIAL

### 4.2.1 Variabilidade interanual

O regime de chuvas na bacia hidrográfica do ribeirão João Leite é marcado por um período bastante seco que se estende de abril a setembro, e outro chuvoso, que vai de outubro a março. Na Figura 9 está apresentada a série histórica de precipitação média anual na bacia.



**Figura 9.** Precipitação média anual na bacia do ribeirão João Leite no período de 1975 a 2005.

Conforme se pode observar na Figura 9, a precipitação média anual no período de 1975 a 2005 variou entre os valores extremos de 1288 e 2112 mm, referentes aos anos de 1990 e 1982, respectivamente. Uma interessante observação decorrente da visualização dessa figura refere-se à pequena variabilidade interanual do regime pluvial, que apresentou uma flutuação de valores ao redor do valor médio, que foi de 1593 mm.

Pode-se notar também, na Figura 9, a linha de tendência obtida por regressão linear simples, visando diagnosticar a propensão de mudança da precipitação média anual na bacia do ribeirão João Leite, conforme descrito por Pruski (2005). Pode-se observar, que essa linha encontra-se levemente inclinada à direita, indicando uma tendência de decaimento da precipitação média anual de  $2,97 \text{ mm ano}^{-1}$ , com significância de 69% obtida pelo teste F na análise de variância.

## 4.2.2 Mapeamento da precipitação média mensal e anual

### 4.2.2.1 Análise exploratória dos dados

Previamente à análise geoestatística foi realizada a análise exploratória de dados, visando checar o adequabilidade dos dados estudados às técnicas geoestatísticas. Estão apresentados, na Figura 10, os gráficos de tendência obtidos para a precipitação média mensal e anual na bacia hidrográfica do ribeirão João Leite, conjuntamente aos gráficos boxplot.

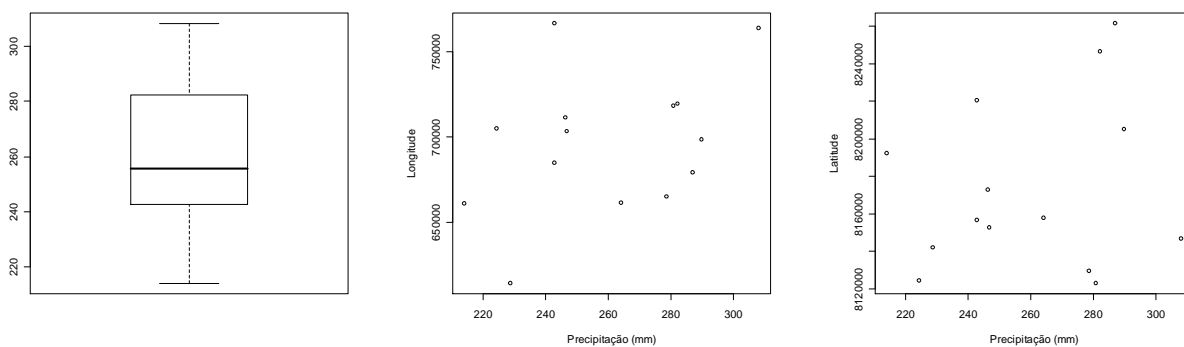
Pode ser observado, pela análise dos gráficos de tendência, distribuição satisfatória dos dados no espaço no sentido da longitude e da latitude, evidenciando não tendenciosidade dos mesmos, o que, de acordo com Gomes (2007), evidencia atendimento às pressuposições requeridas para aplicação das técnicas geoestatísticas.

O gráfico box plot, por sua vez, permite a identificação de valores discrepantes presentes no banco de dados, os quais, de acordo com Mello et al. (2008), podem afetar a variância aleatória, com implicação direta sobre a correlação espacial. Dessa maneira, quando identificados, os valores discrepantes foram removidos, para posterior aplicação das técnicas geoestatísticas como está ilustrado na Figura 10.

---

### Precipitação média mensal de Janeiro

---




---

### Precipitação média mensal de Fevereiro

---

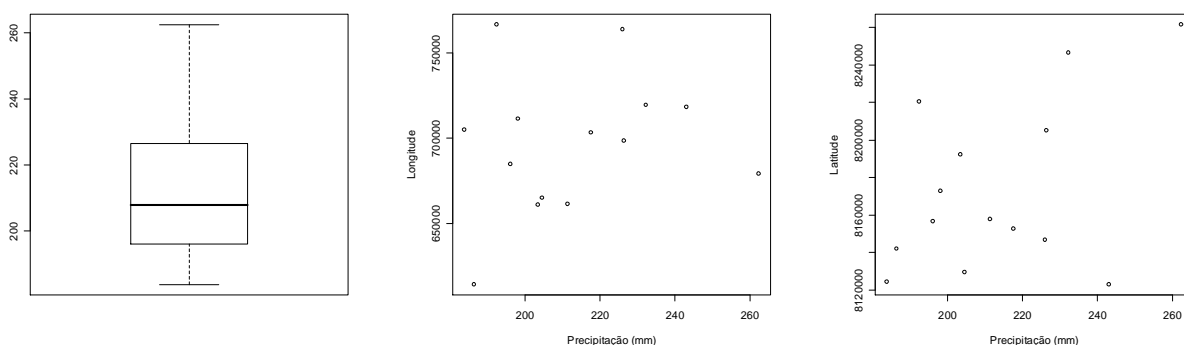
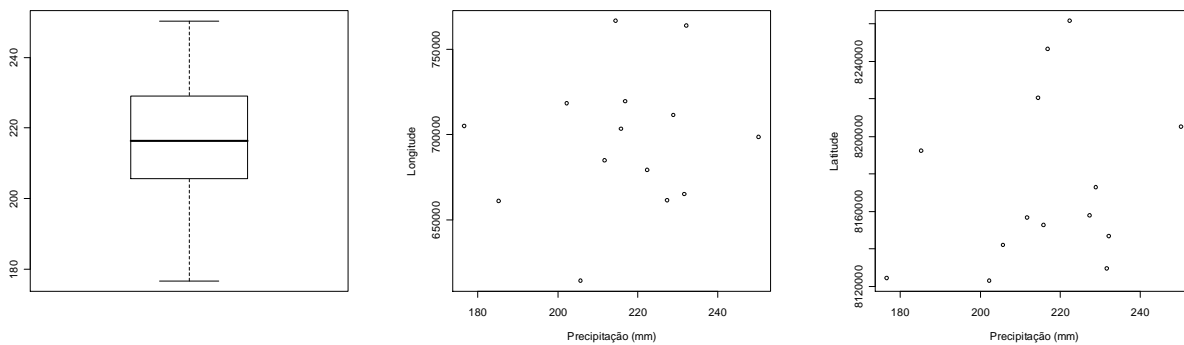


Figura 10. continua...

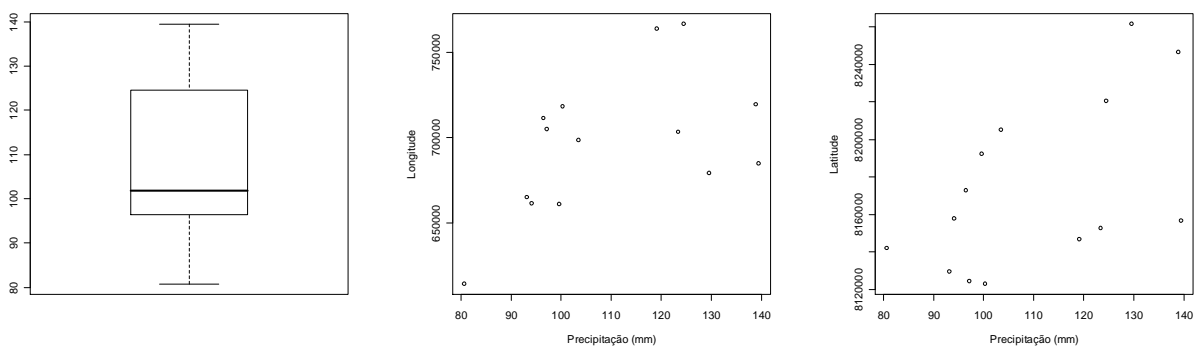


Continuação da Fig. 10.

### Precipitação média mensal de Março



### Precipitação média mensal de Abril



### Precipitação média mensal de Maio

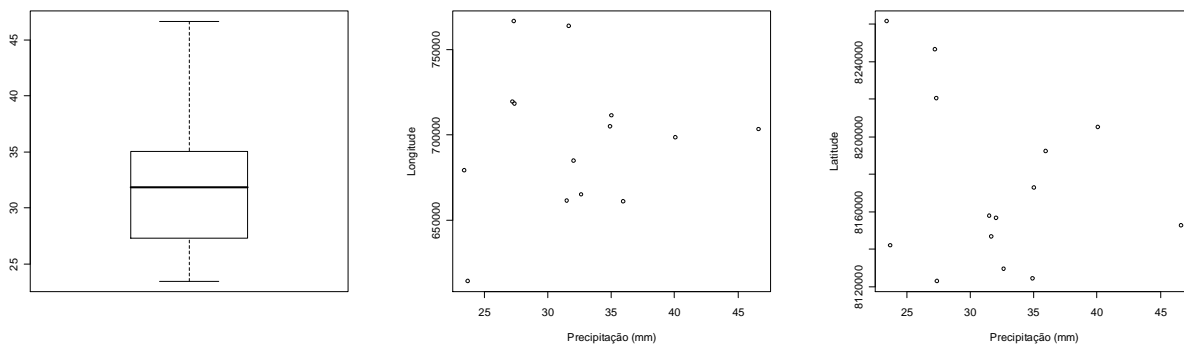
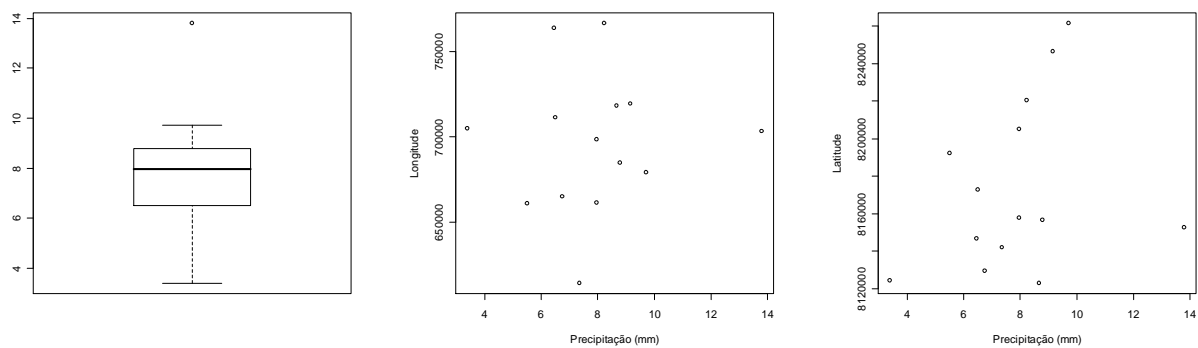


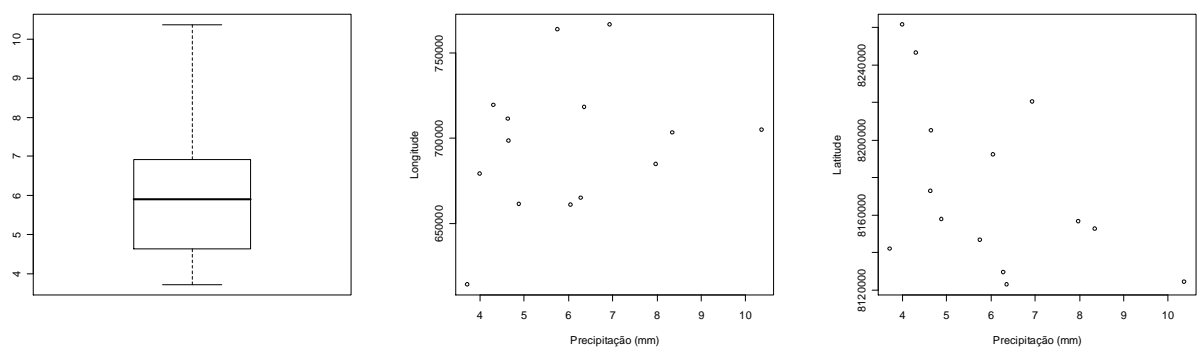
Figura 10. continua...

Continuação Figura 10.

### Precipitação média mensal de Junho



### Precipitação média mensal de Julho



### Precipitação média mensal de Agosto

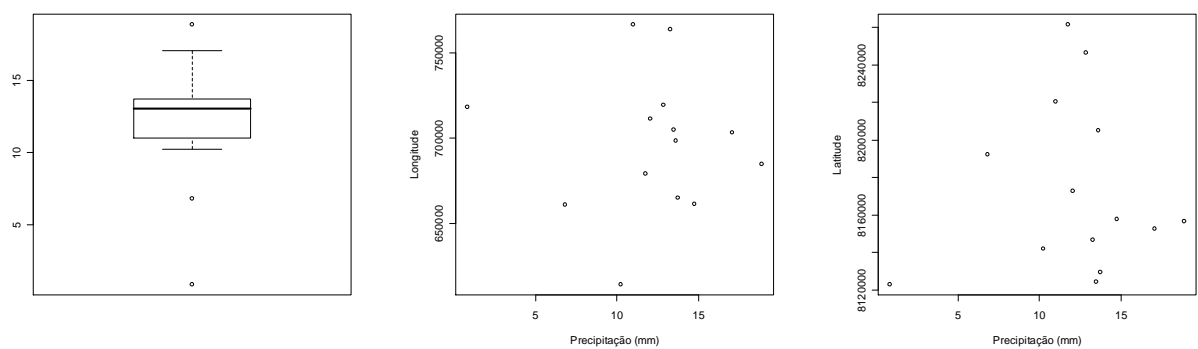
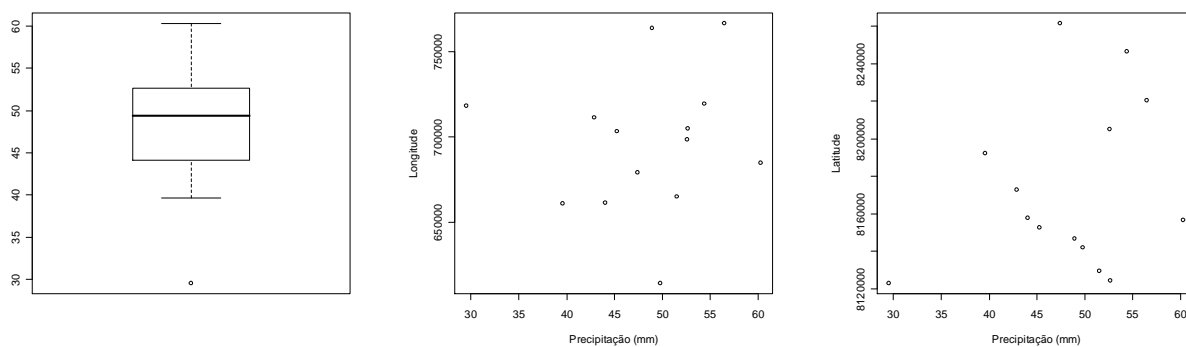


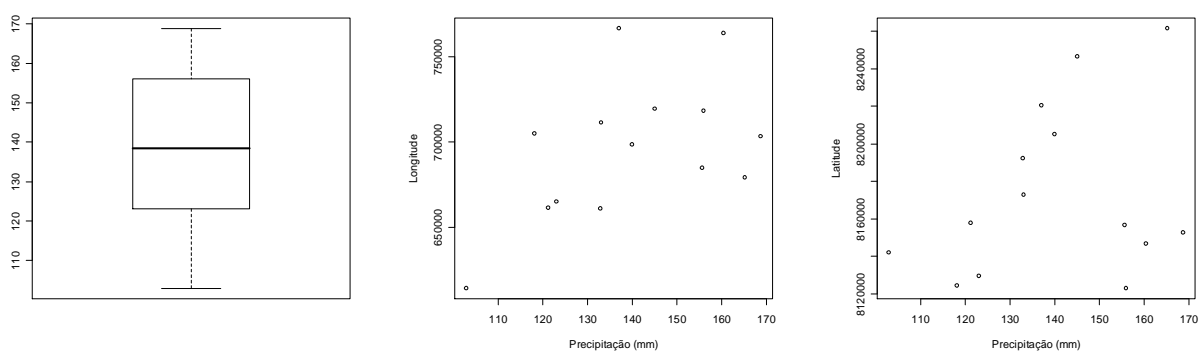
Figura 10. Continua...

Continuação da Figura 10.

## Precipitação média mensal de Setembro



## Precipitação média mensal de Outubro



## Precipitação média mensal de Novembro

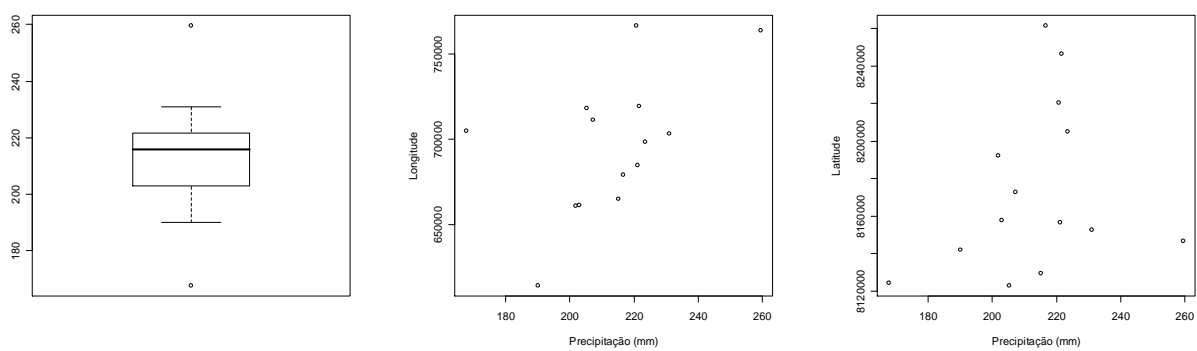
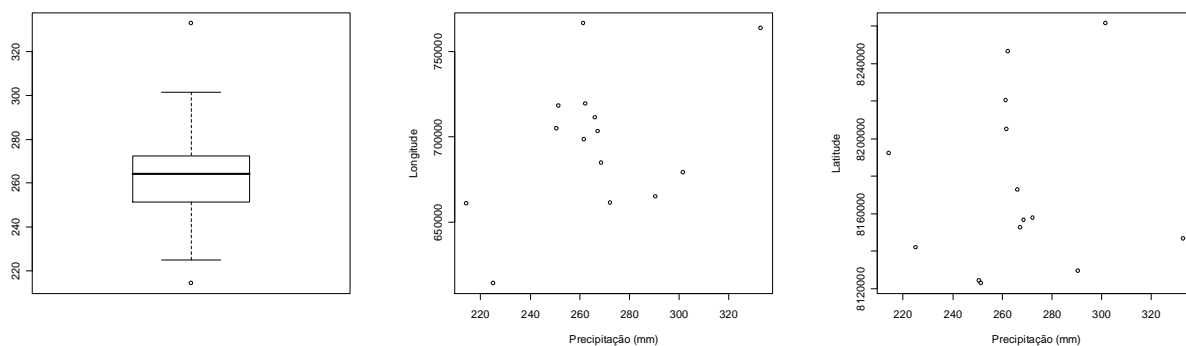


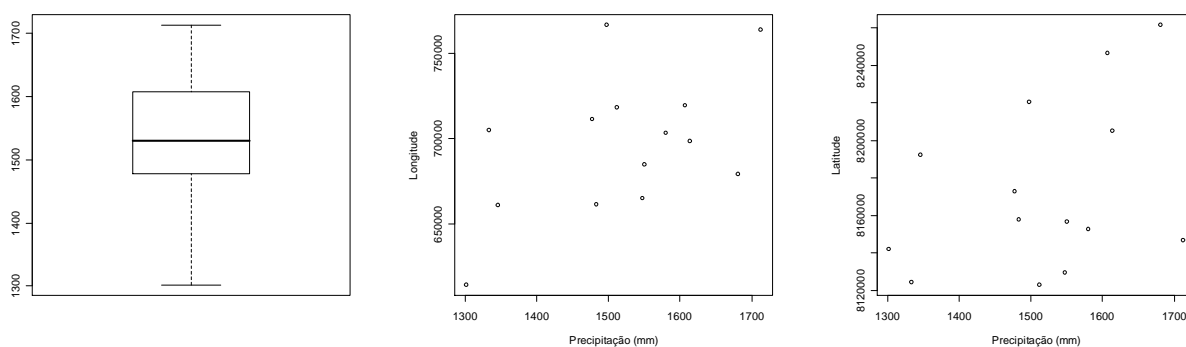
Figura 10. Continua...

Continuação da Figura 10.

### Precipitação média mensal de Dezembro



### Precipitação média Anual



**Figura 10.** Tendência e box plot obtidos para a precipitação média mensal e anual período analisado de 1975 a 2005.

#### 4.2.2.2 Semivariogramas

A verificação do ajuste dos modelos de semivariograma exponencial, esférico e gaussiano aos dados de precipitação média mensal e anual na bacia do ribeirão João Leite, foi realizada pelo erro médio obtido por validação cruzada.

Apresentam-se, na Tabela 5, os parâmetros dos modelos de semivariograma (efeito pepita, patamar e alcance) e erro médio, para os modelos de semivariograma esférico, exponencial e gaussiano ajustados pela técnica dos mínimos quadrados ponderados.

**Tabela 5.** Parâmetros dos modelos de semivariograma exponencial, esférico e gaussiano ajustados por mínimos quadrados ponderados e erro médio obtido por validação cruzada.

Precipitação média mensal de Janeiro				
Modelo	Efeito Pepita	Patamar	Alcance (km)	Erro Médio (%)
Exponencial	0,00	962,61	33.650,21	11,38
Esférico	0,00	901,42	73.284,21	11,39
Gaussiano	0,00	908,27	34.776,44	12,45
Precipitação média mensal de Fevereiro				
Exponencial	30,30	235,27	20.000,12	9,55
Esférico	67,58	151,38	49.950,00	9,26
Gaussiano	51,39	201,38	30.000,03	10,39
Precipitação média mensal de Março				
Exponencial	0,00	452,93	14.460,90	6,79
Esférico	0,00	455,22	48.351,37	6,97
Gaussiano	0,00	456,71	22.853,07	7,11
Precipitação média mensal de Abril				
Exponencial	22,36	298,33	25.000,00	11,93
Esférico	0,00	347,10	33.248,31	15,26
Gaussiano	0,00	347,85	15.090,98	15,28
Precipitação média mensal de Maio				
Exponencial	7,49	42,89	10.001,10	15,99
Esférico	18,49	42,59	29.999,96	16,35
Gaussiano	28,29	42,76	19.999,87	16,03
Precipitação média mensal de Junho				
Exponencial	1,16	3,38	50.000,00	25,67
Esférico	0,42	2,84	30.000,00	25,71
Gaussiano	2,31	2,95	50.000,00	24,92
Precipitação média mensal de Julho				
Exponencial	0,00	3,73	23.240,01	24,69
Esférico	1,46	3,71	83.503,86	24,36
Gaussiano	1,79	3,70	40.000,00	24,27
Precipitação média mensal de Agosto				
Exponencial *	-	-	-	-
Esférico	2,40	16,12	63.826,80	121,54
Gaussiano*	-	-	-	-
Precipitação média mensal de Setembro				
Exponencial *	-	-	-	-
Esférico	1,54	58,36	25.200,02	14,96
Gaussiano	3,87	60,01	24.999,36	18,25

Tabela 5. continua ...

Continuação da Tabela 5.

Precipitação média mensal de Outubro				
Modelo	Efeito Pepita	Patamar	Alcance (km)	Erro Médio (%)
Exponencial *	-	-	-	-
Esférico	0,87	202,70	34.999,98	13,14
Gaussiano *	-	-	-	-
Precipitação média mensal de Novembro				
Exponencial	0,00	407,79	12.843,82	7,64
Esférico	119,88	401,91	39.863,06	7,60
Gaussiano	271,35	408,69	29.991,84	7,73
Precipitação média mensal de Dezembro				
Exponencial	0,00	913,01	30.751,59	7,98
Esférico	0,00	861,41	69.567,63	8,49
Gaussiano	0,00	882,02	34.865,10	8,22
Precipitação média Anual				
Exponencial	1.781,36	15.838,63	36.342,30	7,65
Esférico	2.899,66	14.485,04	79.833,66	7,67
Gaussiano	5.850,36	14.854,46	44.708,37	7,72

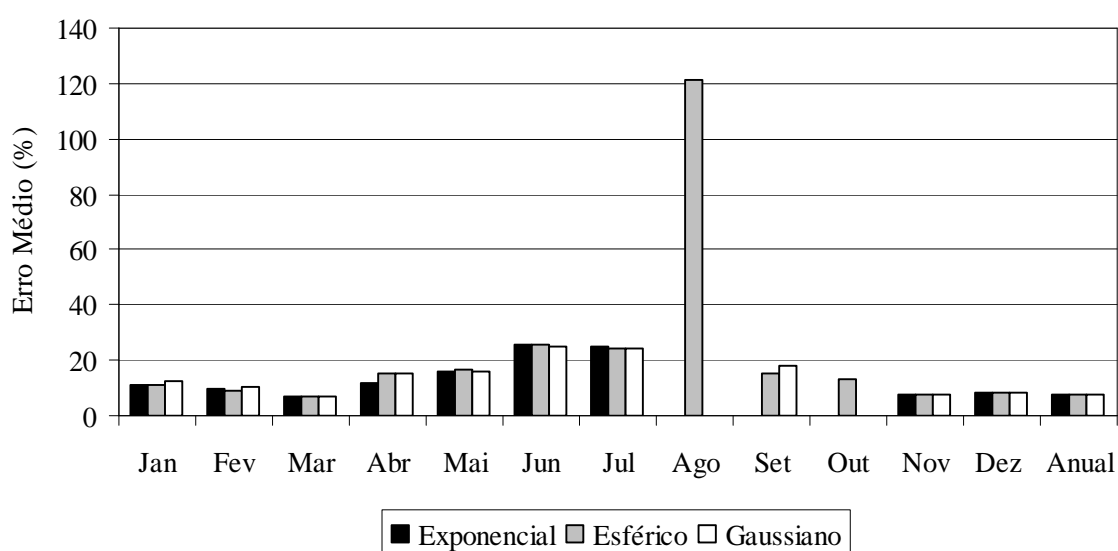
\* Efeito pepita puro

O conhecimento do alcance do semivariograma é fundamental para a interpretação dos resultados obtidos pelas técnicas geoestatísticas e, em termos práticos, representa a distância limite da dependência espacial. Estes variaram de aproximadamente 10 km a 83 km, permitindo a constatação de uma abrangente estrutura de dependência espacial da precipitação média mensal e anual na bacia hidrográfica do ribeirão João Leite, o que indica, de acordo com Mello et al. (2005), que o mapeamento por técnicas geoestatísticas podem propiciar bons resultados como de Carvalho & Assad (2005).

O erro médio geral obtido por validação cruzada, considerando os três modelos de semivariograma analisados, variou bastante como apresenta a Tabela 5. Foram encontrados menores erros médios nos meses de março, novembro, dezembro, fevereiro e janeiro, com valores de 6,79%; 7,60%; 7,65%; 7,98%; 9,26% e 11,38%, respectivamente. Em contrapartida, os maiores erros médios ocorreram nos meses de agosto, junho, julho, maio, setembro, outubro e abril, com valores de 121,54%; 24,92%; 24,27%; 15,99%; 14,96%; 13,14% e 11,93%.

A magnitude dos erros encontrados para a precipitação média mensal e anual na bacia do ribeirão João Leite enfatiza o elevado potencial da krigagem no mapeamento desta variável, uma vez que, em se tratando do mapeamento de dados climáticos são esperados erros elevados, em virtude da variabilidade natural que rege esta variável.

Pode-se constatar, que os maiores erros de interpolação foram obtidos para a estação seca do ano, o que pode ser reforçado pela visualização da Figura 11. Concomitantemente, nos meses de agosto a outubro foi notada dificuldade de ajuste de alguns modelos de semivariogramas, tendo sido encontrado efeito pepita puro em 5 situações, notadamente para o modelo exponencial em agosto, setembro e outubro; e para o modelo gaussiano em agosto e outubro. Essa ocorrência pode ser certamente atribuída aos baixos índices pluviométricos predominantes durante a estação seca na bacia do ribeirão João Leite, muitas vezes aproximando-se de zero, e assim, dificultando o estabelecimento da dependência espacial, conforme Carvalho et al (2005).



**Figura 11.** Erro médio obtido por validação cruzada para os modelos de semivariograma exponencial, esférico e gaussiano na espacialização da precipitação média mensal e anual na bacia do ribeirão João Leite, GO.

A interpretação do erro médio de ajuste calculado pela validação cruzada como pode ser verificado na Tabela 5 revelou menores erros produzidos pelo modelo exponencial nos meses de janeiro, março, abril, maio e anual; pelo modelo esférico nos meses de fevereiro, agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro; e pelo modelo gaussiano nos meses de junho e julho.

Dessa maneira, foi observado melhor desempenho do modelo exponencial de semivariograma em seis das treze situações estudadas, e dos modelos esférico e gaussiano em cinco e duas situações, respectivamente. Estes resultados estão em consonância com os obtidos por Carvalho & Assad (2005) e Mello et al. (2008), os quais avaliaram o

desempenho de diferentes modelos de semivariograma no mapeamento da precipitação nos estados de São Paulo e Minas Gerais, respectivamente.

Contudo, fica explícita a necessidade de estudo do ajuste de diferentes modelos de semivariogramas ao semivariograma experimental, visto que, embora o modelo exponencial tenha se sobressaído em maior número de eventos, não foi possível ajustá-lo aos dados dos meses de agosto, setembro e outubro, nos quais obteve-se ajustes pelo modelo esférico.

Estão apresentados, na Figura 12, os modelos de semivariogramas ajustados aos dados de precipitação média mensal e anual na bacia do ribeirão João Leite. Observa-se nessa figura, de forma geral, bom ajuste dos modelos teóricos ao semivariograma experimental, mostrando que podem ser obtidos resultados satisfatórios no mapeamento dos dados em estudo pelas técnicas geoestatísticas.

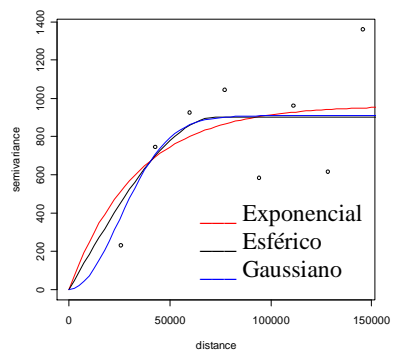
#### **4.2.2.3 Mapeamento da precipitação**

O mapeamento da precipitação foi conduzido utilizando o modelo de semivariograma que produziu o menor erro médio para cada evento em estudo. Na Figura 13 constam os mapas de precipitação média mensal e anual obtidos por krigagem para a bacia hidrográfica do ribeirão João Leite.

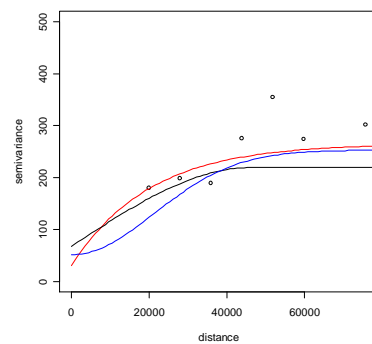
Os mapas estão na Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM) e datum South American 1969 (SAD69), zona 22 sul. As unidades constantes nas legendas representam a lâmina de precipitação média para cada período, em mm, sendo que, os menores valores adquirem a coloração vermelha seguindo para a coloração amarela com seu incremento.



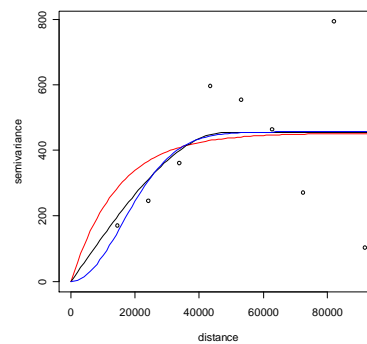
Janeiro



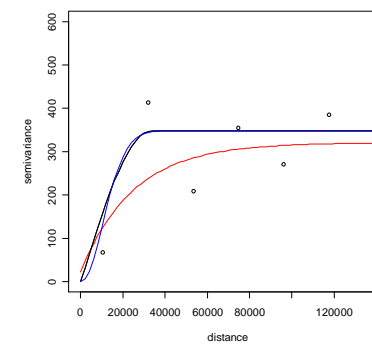
Fevereiro



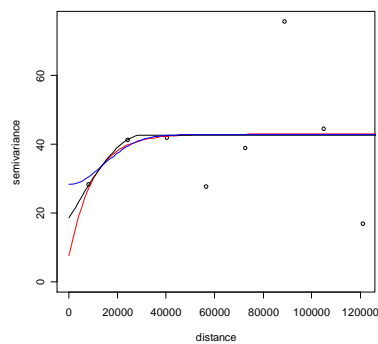
Março



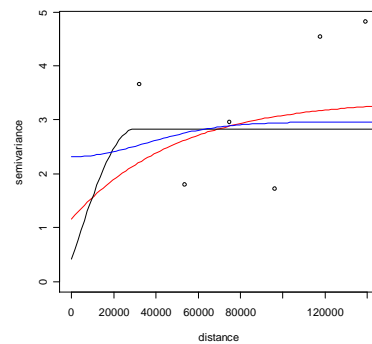
Abril



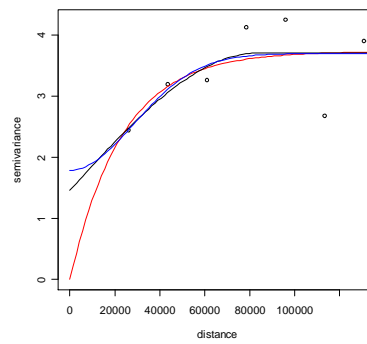
Maio



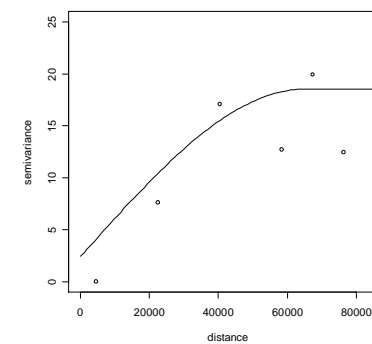
Junho



Julho

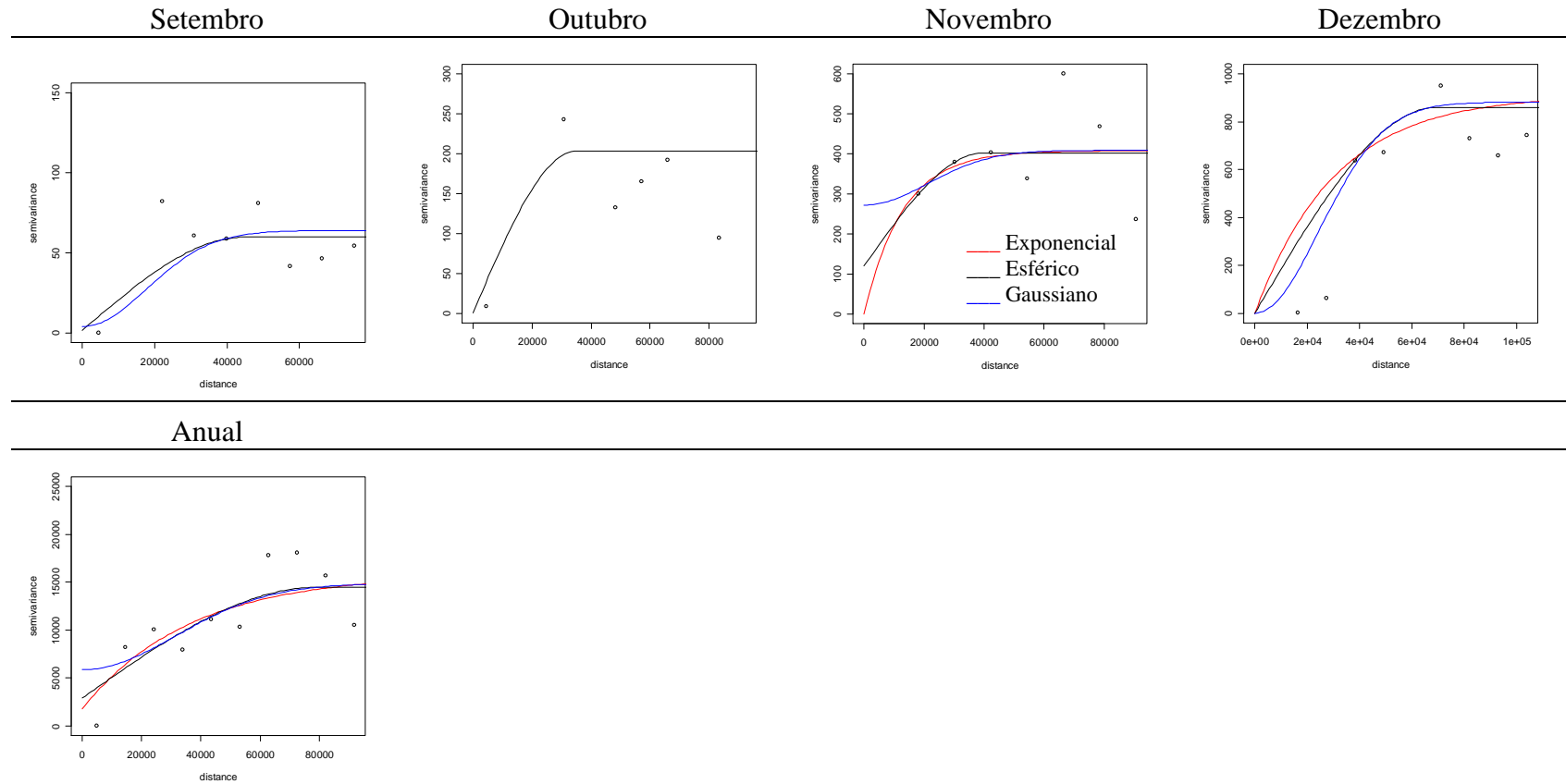


Agosto



Continua...

Continuação da Fig. 12



**Figura 12.** Modelos de semivariograma ajustados ao semivariograma experimental para o período de estudo 1975 à 2005 – Goiânia, 2009 .

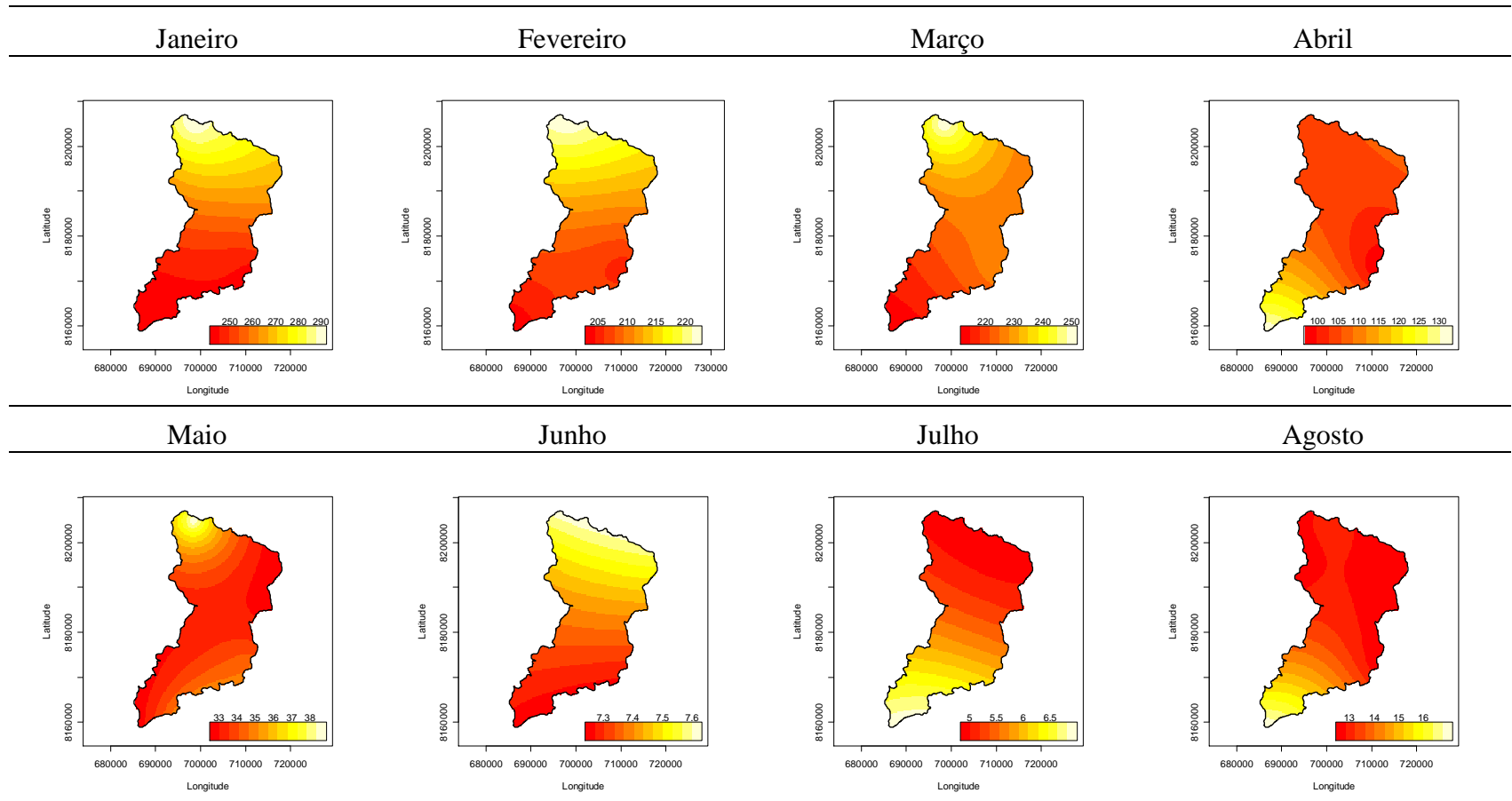
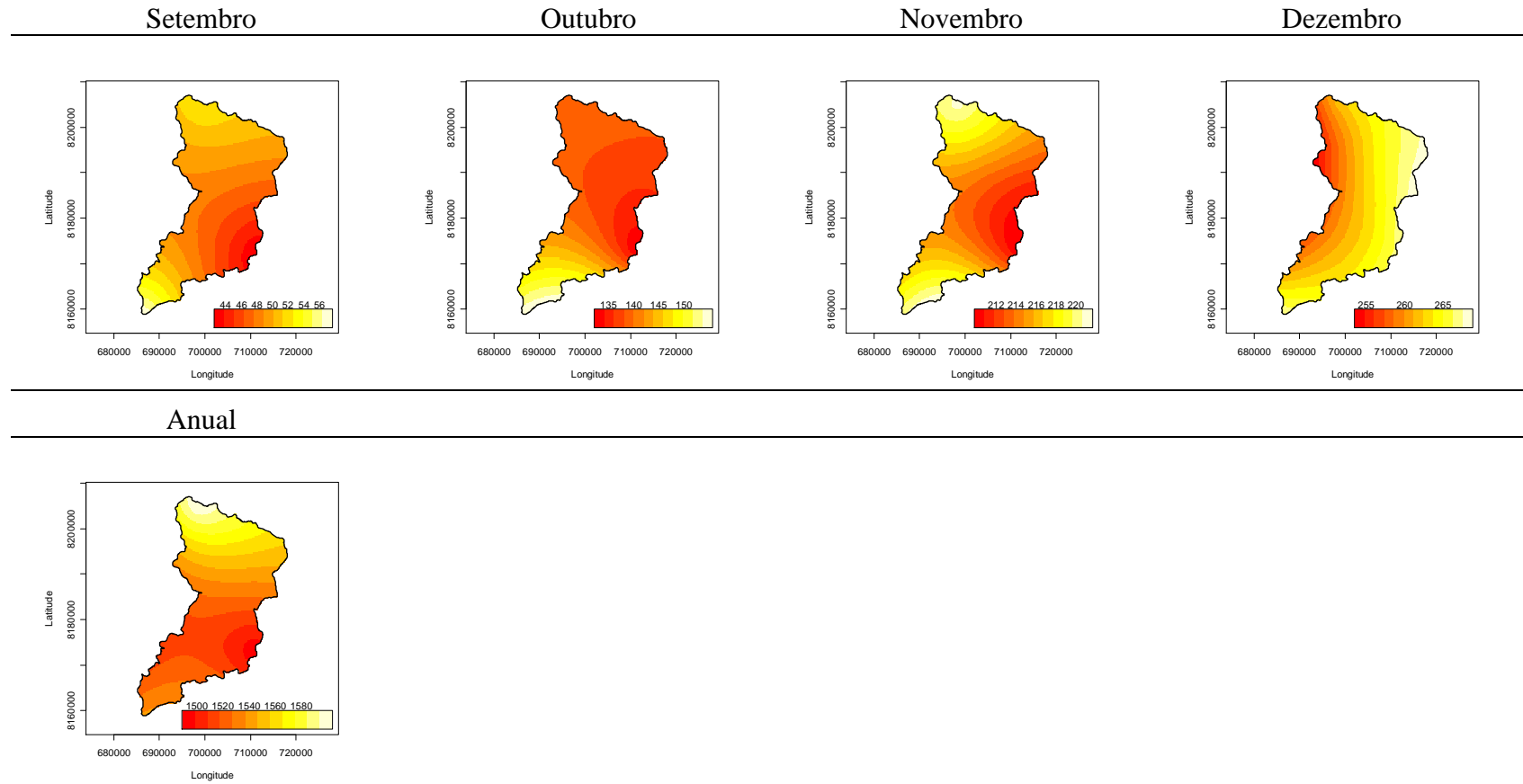


Fig. 13. Continua...

Continuação da Fig. 13.



**Figura 13.** Mapas de precipitação média mensal e anual obtidos por krigagem para a bacia hidrográfica do ribeirão João Leite, GO para o período estudado de 1975 à 2005, Goiânia, 2009.

Pode-se visualizar concentração das chuvas no período que se estende de outubro a março, nos quais as lâminas de precipitação tomaram valores totais médios mensais acima de 200 mm. O auge do período chuvoso, com médias mensais variando de 255 mm a 265 mm e de 250 mm e 290 mm ao longo da bacia, ocorreu em dezembro e janeiro, respectivamente, cabendo destacar que nesses meses foram registrados 17,46% e 17,04% da precipitação anual na bacia, respectivamente.

Nos demais meses do período que concentrou o maior percentual de chuvas na bacia do ribeirão João Leite (outubro, novembro, fevereiro e março) observaram-se percentuais de 9,18%; 13,98%; 13,98% e 14,16%, totalizando, conjuntamente a dezembro e janeiro, cerca de 85,8% da precipitação anual e, que em termos de lâmina representa cerca de 1308 mm.

A distribuição espacial das chuvas nos meses de maior precipitação seguiu um padrão de maiores lâminas precipitadas ao norte da bacia, próximo a estação pluviométrica de Ouro Verde de Goiás, tendo sido observadas, nos meses de janeiro, fevereiro e março, lâminas médias alcançando os 290mm, 220mm e 250 mm, respectivamente.

Já nos meses de outubro, novembro e dezembro, pode-se observar um padrão diferenciado na distribuição espacial da precipitação. Em outubro, a região que concentrou as maiores lâminas foi a sul, próximo a estação pluviométrica de Goiânia – Agronomia, enquanto que em novembro o mesmo se deu nos extremos norte e sul da bacia e em dezembro, a leste, influenciado pela estação pluviométrica de Goianápolis.

Pode-se verificar também, que a amplitude de variação da precipitação média mensal ao longo da bacia foi pequena, sendo de aproximadamente 40 mm no auge do período chuvoso e chegando a poucos milímetros durante os meses mais secos do ano. Este comportamento está certamente relacionado à pequena extensão da bacia, que ocupa área de 766,8 km<sup>2</sup>, e a grande abrangência da estrutura de variabilidade espacial apontada pela análise geoestatística.

Durante os meses de menor precipitação na bacia do João Leite, que se estenderam de abril a setembro, a precipitação média mensal variou de 0,39% a 7,22% da precipitação anual, em julho e abril, respectivamente. Fica evidenciado também, durante esse espaço de tempo, que contempla meio ano, um período bastante seco, no qual o total médio precipitado correspondeu a 14,20% da precipitação anual. Cabe destacar também, que nos meses de maio, junho, agosto e setembro a média precipitada mensalmente tomou percentuais de 2,11%; 0,52%; 0,80% e 3,16%, respectivamente.

Nos meses de abril, julho e agosto, a região que concentrou os maiores registros de chuva se deu ao sul da bacia, nas proximidades da estação pluviométrica Goiânia – Agronomia, com lâminas atingindo os 130 mm; 6,5 mm e 16 mm, respectivamente. Nos referidos meses, a porção norte da bacia hidrográfica concentrou as menores lâminas, nas proximidades da estação de Ouro Verde de Goiás, chegando a 100 mm; 5 mm e 13 mm, respectivamente.

Já nos meses de maio e junho, foi observado um padrão diferenciado na distribuição espacial das chuvas, em comparação aos demais meses do período seco, ocorrendo maiores índices ao norte, e que decresceram no sentido sul da bacia. Nesses meses, a precipitação média mensal variou de 33 mm a 38 mm e de 7,3 mm a 7,6 mm, respectivamente, caminhando ao auge do período seco, que se deu em julho, onde foram estimadas lâminas variando de 5 mm a 6,5 mm.

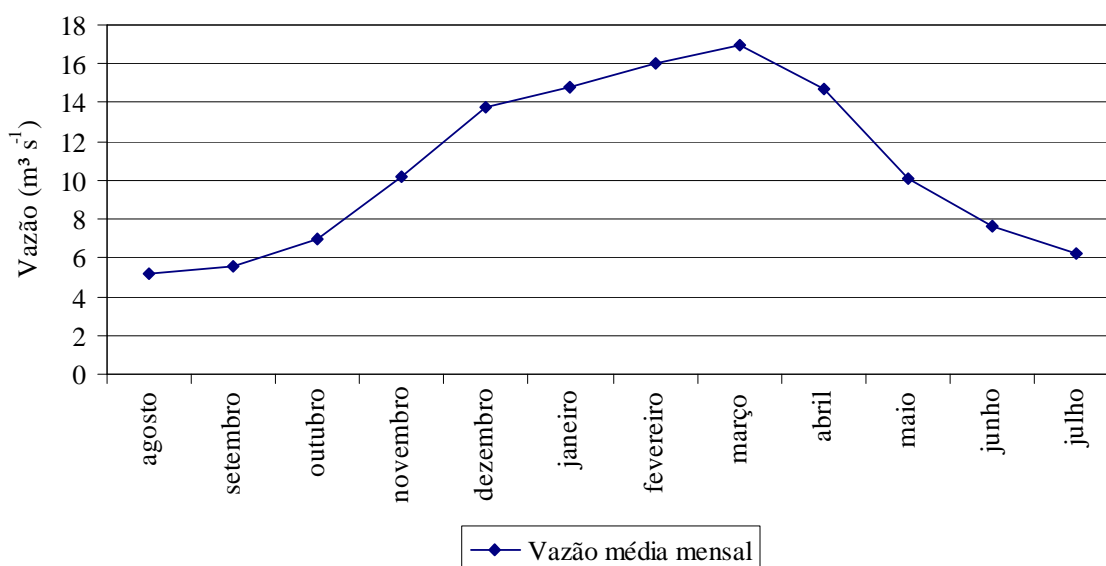
Contudo, em setembro, nos extremos norte e sul da bacia foram observadas maiores lâminas, chegando à cerca de 56 mm, reservando à faixa leste da bacia, nas proximidades da estação de Goianópolis, as menores lâminas, da ordem de 44 mm.

Visualizando-se o mapa de precipitação média anual nota-se uma faixa de menores precipitações médias anuais, da ordem de 1500 mm, na faixa central da bacia, próxima a estação de Goianópolis. Pode-se notar também um gradiente crescente nas direções norte e sul, onde são alcançadas lâminas de 1580 mm e 1520 mm, respectivamente. Cabe destacar que, novamente, foi encontrada uma pequena amplitude de variação das lâminas médias ao longo da bacia hidrográfica, que foi de 1500 mm a 1580 mm.

#### 4.3 CARACTERIZAÇÃO DO REGIME FLUVIAL

##### 4.3.1 Vazões médias anuais

O regime fluvial na bacia hidrográfica do ribeirão João Leite, acompanhando o pluvial, apresenta dois períodos característicos, sendo um de recessão, alcançando as vazões mínimas mensais entre os meses de agosto e setembro, e outro de ascensão, que atinge as maiores vazões médias mensais ao final do período chuvoso, em março, a partir de onde, inicia-se, a recessão do hidrograma. A Figura 14 ilustra essa situação.



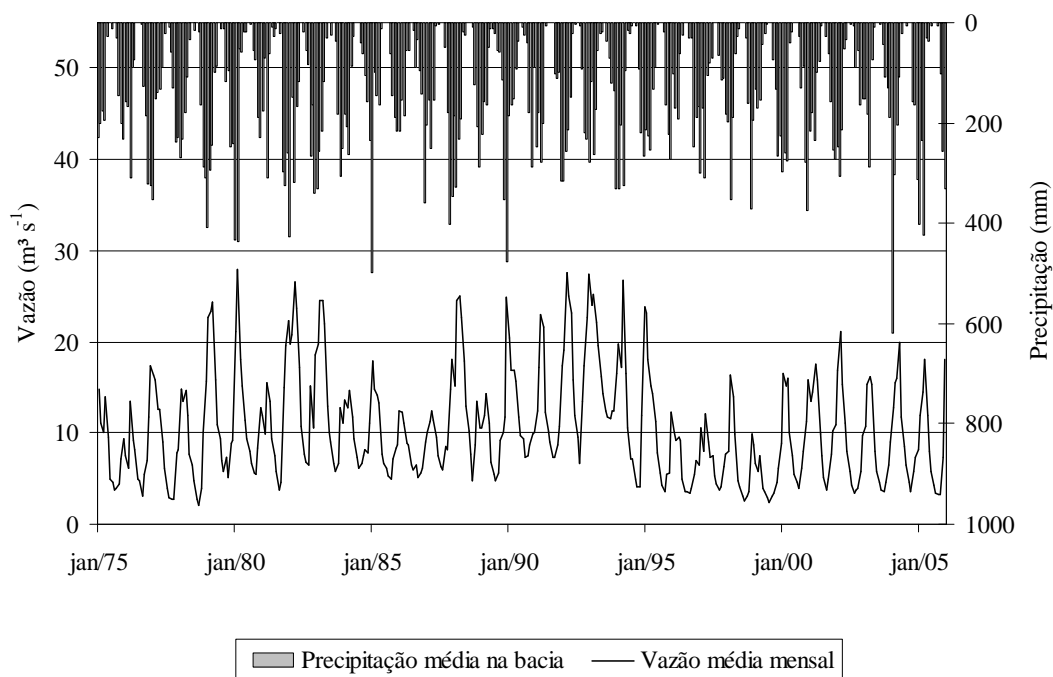
**Figura 14.** Hidrograma de vazões médias mensais de longo termo para a estação fluviométrica Captação João Leite, GO para o período de 1975 a 2005 – Goiânia, 2009.

A vazão média de longo termo na bacia hidrográfica do ribeirão João Leite, obtida a partir de dados diários do período compreendido entre 1975 e 2005 foi de  $10,67 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Em agosto a vazão média mensal de longo termo atingiu seu valor mínimo, que foi de  $5,16 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . A partir deste mês, foi observado o início da ascensão do hidrograma, passando a valores de  $10,14 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  e  $16,99 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , em novembro e março, respectivamente. Na sequência a março, com o final do período chuvoso, foi observado o início do trecho de recessão do hidrograma, com valores observados de  $14,68 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  e  $7,60 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , nos meses de abril e junho, respectivamente.

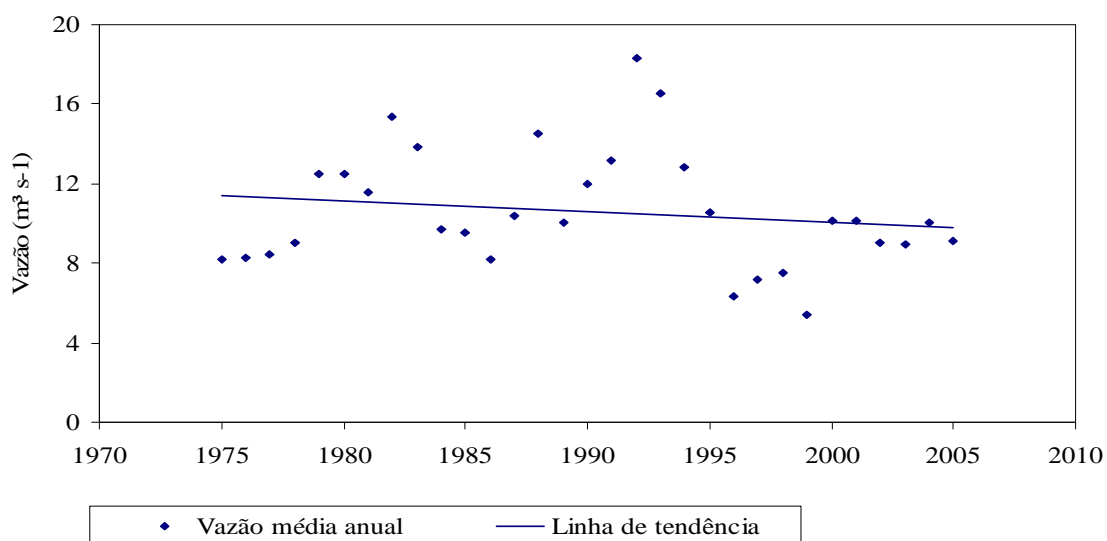
A situação enfatizada anteriormente pode ser melhor entendida pela visualização da Figura 15, que traz conjuntamente ao hidrograma de vazões médias mensais de 1975 a 2005, a precipitação média mensal na bacia hidrográfica do ribeirão João Leite. Interpretando essa figura é possível a associação do regime fluvial ao pluvial, reforçando os levantamentos anteriores, de ocorrência do final do trecho de recessão do hidrograma ao início do período chuvoso, atingindo os valores máximos ao final do período chuvoso.

Na Figura 16 estão apresentadas as vazões médias anuais e a linha de tendência traçada com o objetivo de identificar a tendência do comportamento dessa variável no tempo. Pode-se estimar uma tendência de decaimento anual da vazão média de  $0,08 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ,

o que representa, ao longo do período em análise, que é de 31 anos,  $2,48 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , com significância de 77,13%.



**Figura 15.** Hidrograma de vazões mensais e hietograma de precipitação média mensal de 1975 a 2005 na bacia do ribeirão João Leite, GO – Goiânia, 2009.



**Figura 16.** Vazões médias anuais e linha de tendência para o período de 1975 a 2005 – Goiânia, 2009.



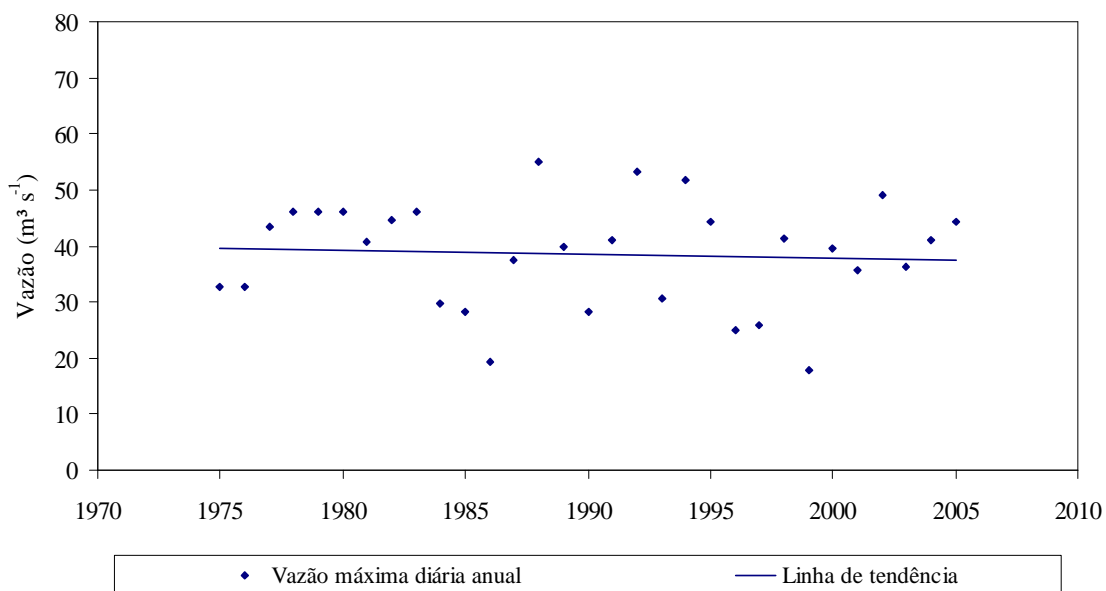
### 4.3.2 Vazões máximas

O conhecimento das vazões máximas é importante para a caracterização hidrológica da bacia hidrográfica, pois constituem dados básicos para estudos e dimensionamento de obras de controle e prevenção de cheias.

A vazão máxima de longo termo na bacia hidrográfica do ribeirão João Leite para o período compreendido entre 1975 e 2005 foi de  $39,14 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , aproximadamente quatro vezes superior a vazão média de longo termo, que foi de  $10,67 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ .

Na Figura 17 apresentam-se as vazões máximas diárias anuais. Pode se observar que essas vazões variaram de  $17,7 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  a  $55 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , nos anos de 1999 e 1988, respectivamente e apresentaram uma leve tendência de decaimento ao longo do tempo, em torno de  $0,07 \text{ m}^3\text{s}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , com significância de 46,4%.

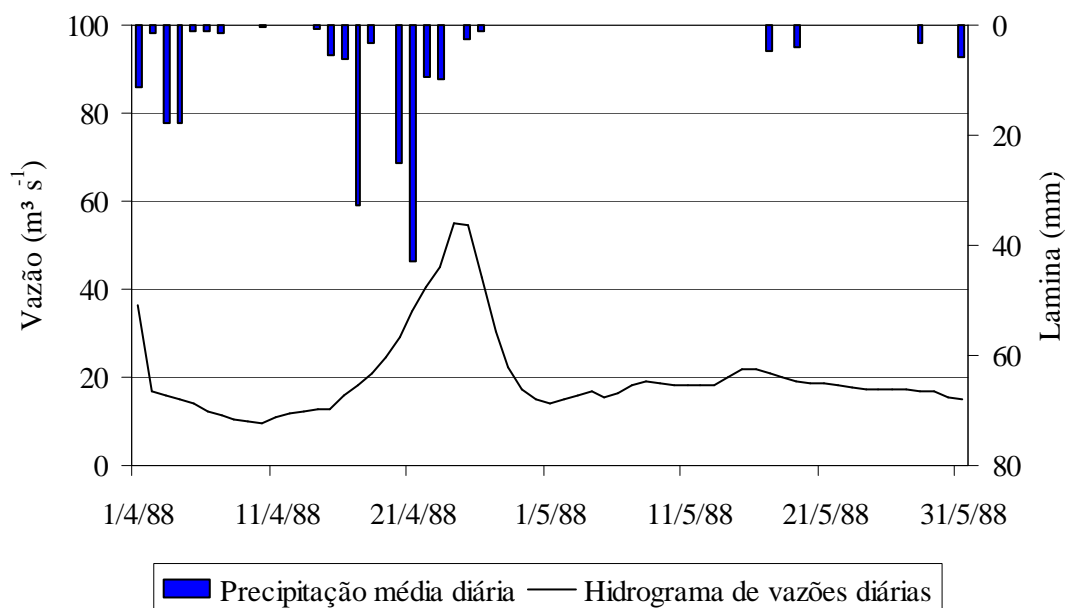
Avaliando-se a data da ocorrência das vazões máximas diárias anuais, nota-se que, 7 ocorreram no mês de dezembro, 8 em janeiro, 5 em fevereiro, 7 em março e 4 em abril. O fato dessas vazões se darem ao final do período chuvoso está relacionado ao aumento do teor de umidade no perfil do solo durante o início do período chuvoso, favorecendo as condições para formação do escoamento superficial direto.



**Figura 17.** Vazões máximas diárias anuais e linha de tendência para o período de 1975 a 2005 – Goiânia, 2009.

A análise da vazão máxima ocorrida na bacia do ribeirão João Leite durante o período em estudo, que foi de  $55 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , e que ocorreu em 24/04/1988, enfatiza a discussão

anterior. Observando-se a Figura 18, onde estão apresentados o hidrograma de vazões diárias e o hietograma de precipitações médias diárias na bacia, de 01/04 a 31/05/1988, visualiza-se a seqüência de eventos chuvosos que se estenderam de 20 a 23/04/1988, com lâminas médias diárias de 25 mm; 43 mm; 9 mm e 10 mm, respectivamente, e que resultaram em uma vazão de  $55 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  no dia 24/04.



**Figura 18.** Hidrograma de vazões diárias e hietograma de precipitação média diária no período de 01/04/1988 a 31/05/1988 na bacia do ribeirão João Leite, GO.

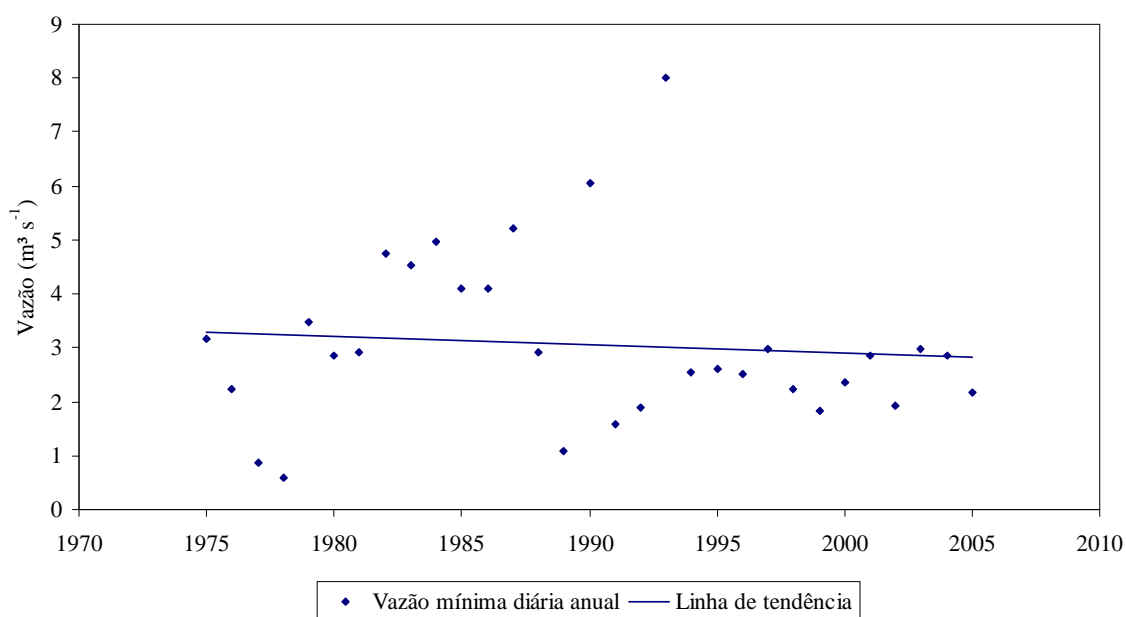
#### 4.3.3 Vazões mínimas

As vazões mínimas são amplamente utilizadas pela gestão de recursos hídricos, uma vez que as mesmas refletem as menores cotas dos rios ao longo do tempo. Na bacia hidrográfica do ribeirão João Leite a vazão mínima de longo termo para o período que se estendeu de 1975 a 2005 foi de  $3,07 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , o que representa aproximadamente um terço da vazão média de longo termo para o referido período.

Na Figura 19 estão apresentadas as vazões mínimas diárias anuais para o período de 1975 a 2005. Avaliando-se essas vazões, nota-se uma variação de  $0,6$  a  $8,01 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  para os anos de 1978 e 1993, respectivamente, e uma leve tendência de decaimento, de aproximadamente  $0,02 \text{ m}^3\text{s}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , com significância de 48%.

A ocorrência das vazões mínimas diárias anuais se deram, em número de uma vez, seis vezes, nove vezes, quatorze vezes e uma vez, nos meses de julho, agosto,

setembro, outubro e novembro, respectivamente, ficando evidenciado sua predominância ao final do período seco e início do período chuvoso, especificamente entre setembro e outubro. O fato de muitas ocorrências da vazão mínima diária anual no mês de outubro, que marca o início da estação chuvosa na bacia do ribeirão João Leite é devido ao rebaixamento do nível do lençol subterrâneo ao final do período seco, e também ao baixo teor de água no solo nessa época, determinando a retenção, pela camada superficial de solo, da lâmina precipitada nos primeiros eventos chuvosos.

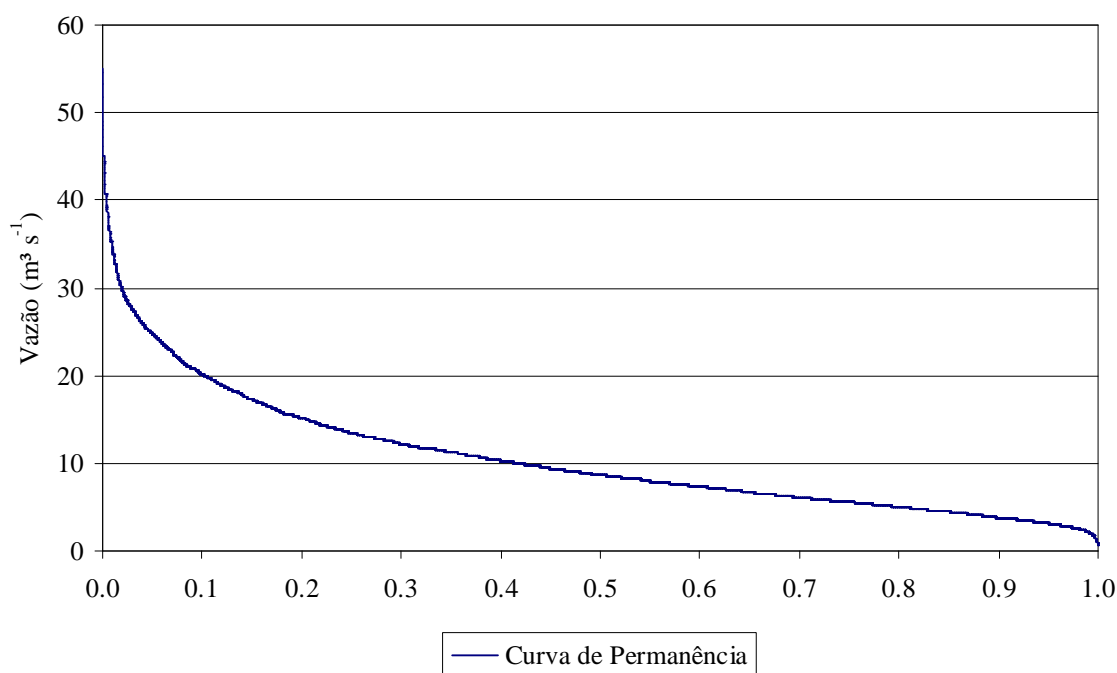


**Figura 19.** Vazões mínimas diárias anuais e linha de tendência para o período de 1975 a 2005, Goiânia, 2009.

#### 4.3.4 Vazão com permanência de 95% no tempo ( $Q_{95}$ )

A vazão associada à permanência de 95% ( $Q_{95}$ ) é adotada como vazão de referência para outorga no Estado de Goiás e desta maneira, sua avaliação é de fundamental importância à caracterização do regime fluvial da bacia hidrográfica do ribeirão João Leite.

A curva de permanência para o ribeirão João Leite, com seção de controle na Estação Fluviométrica Captação João Leite, obtida a partir de dados diários de 1975 a 2005, está apresentada na Figura 20. Desta curva, extraiu-se um valor de  $3,14 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  para  $Q_{95}$ , significando que em 95% do tempo ocorrem vazões iguais ou superiores a essa.

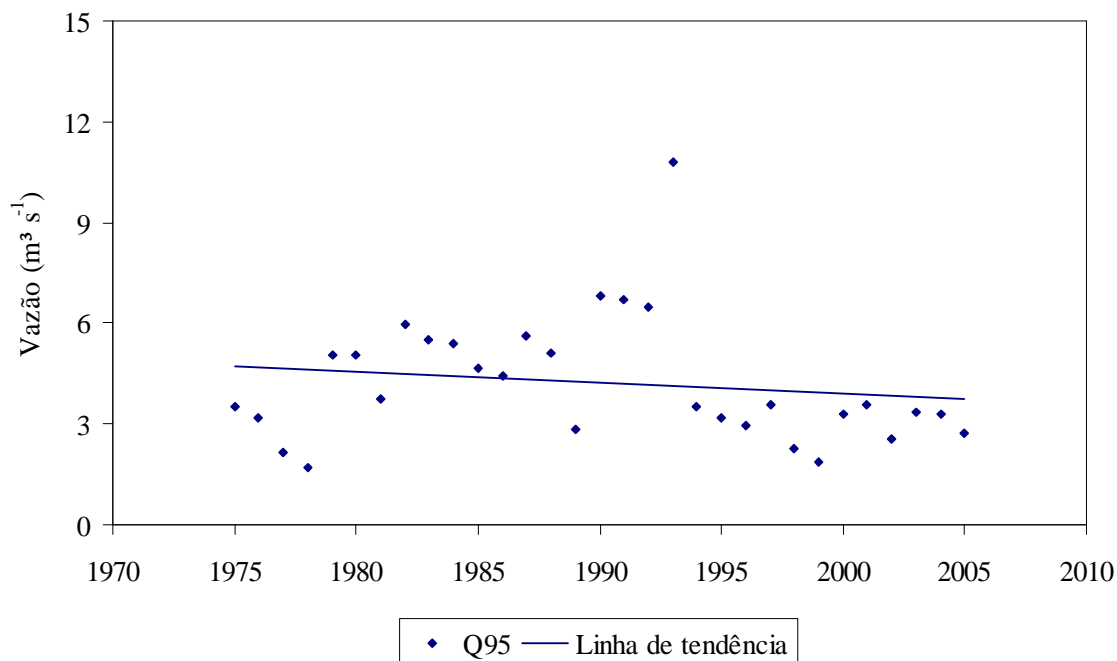


**Figura 20.** Curva de permanência obtida a partir de dados diários do período de 1975 a 2005 no ribeirão João Leite, GO. Goiânia, 2009.

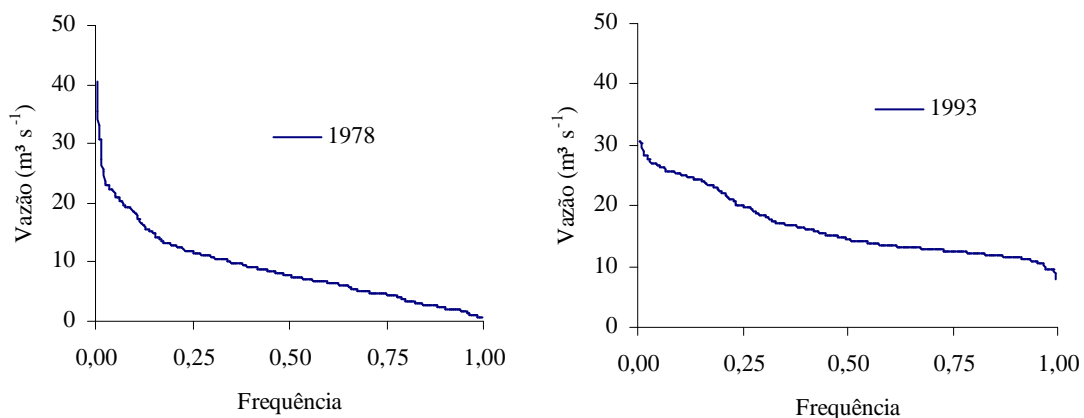
Na Figura 21 estão apresentados os valores de  $Q_{95}$  para cada ano, de 1975 a 2005, oriundos das curvas de permanência anuais. Os valores de  $Q_{95}$  variaram de  $1,7 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  a  $10,8 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , nos anos de 1978 e 1993, respectivamente, e analogamente às vazões mínimas anuais, apresentaram tendência de redução, com magnitude de  $0,03 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  ao ano, e significância de 60%.

A grande abrangência de valores que assume  $Q_{95}$  anualmente, evidência a necessidade de critérios mais consistentes para o estabelecimento da vazão de referência, tendo-se em vista, que o valor de  $Q_{95}$  calculado a partir da série histórica de dados, pode gerar uma vazão de referência elevada para um ano seco, ou insignificante para um ano bastante úmido. Essa situação é enfatizada pela Figura 22, que traz as curvas de permanência dos anos de 1978 e 1993.

Conforme referido anteriormente, em 1978 o valor obtido para  $Q_{95}$  foi de  $1,7 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Tomando-se dessa curva a vazão de  $3,14 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , que representa  $Q_{95}$  para a série histórica de dados, encontra-se uma frequência de 82%, denotando que, em anos secos pode ocorrer superutilização do manancial. Já, em 1993 a situação é inversa, uma vez que a vazão mínima desse ano foi de  $8 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , mostrando que, em 100% do tempo ocorreram vazões iguais ou superiores a essa, e indicando subutilização dos recursos hídricos disponíveis.



**Figura 21.** Vazões com permanência de 95% no tempo ( $Q_{95}$ ) e linha de tendência para o período de 1975 a 2005, Goiânia, 2009.

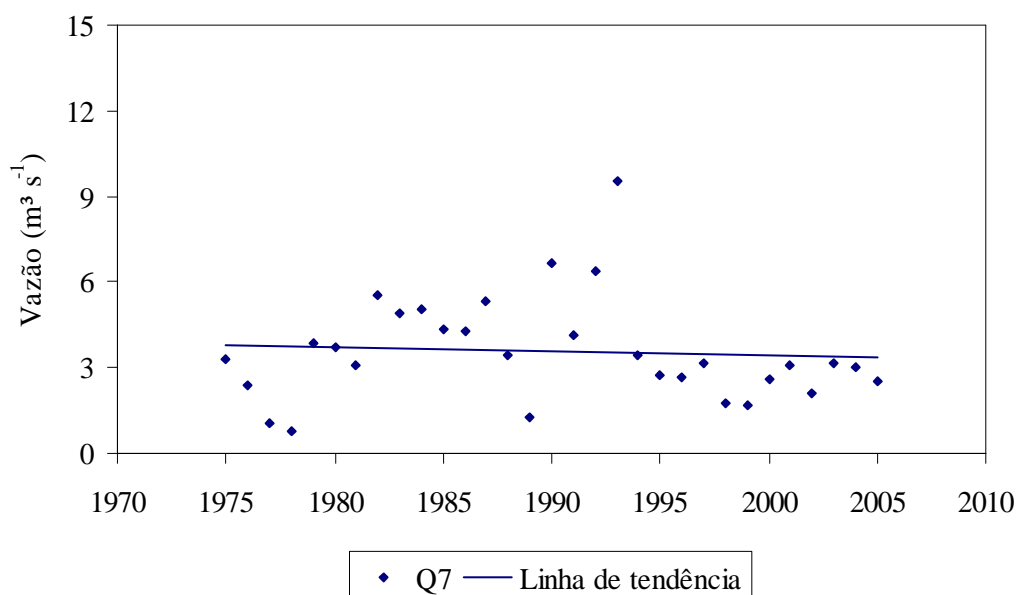


**Figura 22.** Curvas de permanência para os anos de 1978 e 1993 na bacia do ribeirão João Leite, GO.

#### 4.3.5 Vazão mínima média de sete dias consecutivos ( $Q_7$ )

A vazão mínima de sete dias consecutivos ( $Q_7$ ) associada a um tempo de retorno de 10 anos ( $Q_{7,10}$ ) é bastante utilizada pela gestão de recursos hídricos, sendo tida como vazão de referência nos Estados de Minas Gerais e Paraná.

Na Figura 23 estão contidos os valores de  $Q_7$  para o período de 1975 a 2005. Sua variação foi de  $0,75 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  a  $9,57 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  nos anos de 1978 e 1993, respectivamente, apresentando um valor médio de  $3,57 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . A linha de tendência traçada por regressão linear, mostrou que, seguindo a tendência das demais vazões avaliadas, a  $Q_7$  apresentou tendência de redução de  $0,02 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  ao ano, com significância de 48,7%.



**Figura 23.** Vazões mínimas médias anuais de 7 dias consecutivos ( $Q_7$ ), para o período de 1975 a 2005, Goiânia, 2009.

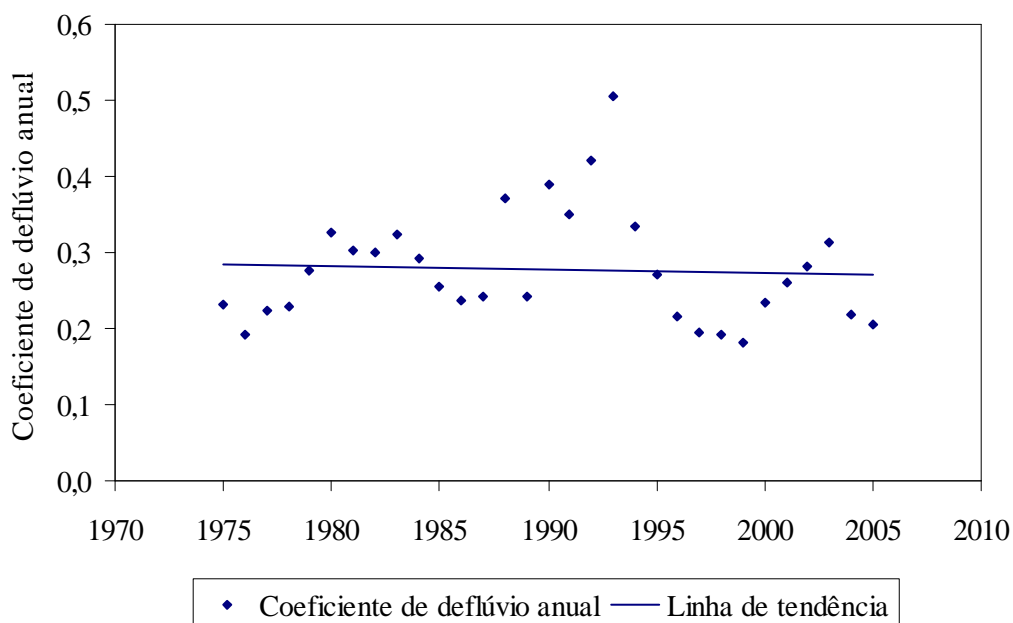
#### 4.3.6 Coeficiente de deflúvio

O coeficiente de deflúvio pode ser entendido como o percentual do total precipitado que atinge a seção de controle na forma de escoamento superficial, e que para o período em estudo apresentou valor médio de 28%, de maneira que, em média, 72% do total precipitado é convertido, basicamente, em evapotranspiração.

De acordo com Pereira (2004), pode-se atribuir à elevada parcela de evapotranspiração ao fato de que, em regiões tropicais, com frequência, ocorrem precipitações médias anuais inferiores a evapotranspiração potencial, propiciando um déficit de água no solo, resultando na retenção pelo solo, da maior parcela do total precipitado, e que posteriormente é explorada pelo sistema radicular das plantas.

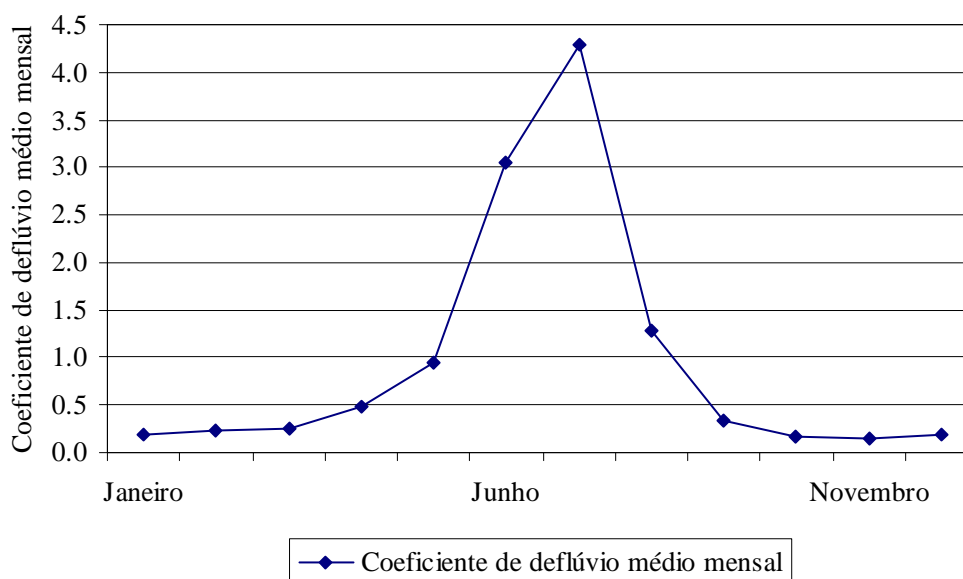
Na Figura 24 estão apresentados os coeficientes de deflúvio anuais obtidos para o período que se estende de 1975 a 2005. Pode-se observar que este coeficiente apresentou variação expressiva nesse período, com um valor mínimo de 0,18 em 1999, e

máximo de 0,51 em 1993. Ainda nesta figura está apresentada a linha de tendência do coeficiente de deflúvio, na qual pode-se observar tendência de decaimento, de  $0,005 \text{ mm ano}^{-1}$ , com significância de 97%.



**Figura 24.** Coeficiente de deflúvio anual e linha de tendência para o período de 1975 a 2005 na bacia do ribeirão João Leite, GO , Goiânia, 2009.

A análise do coeficiente de deflúvio realizada em termos mensais está apresentada na Figura 25. Constatou-se que, durante os meses do período chuvoso que se estendem de outubro a março, o coeficiente de deflúvio médio foi 0,2, com amplitude de variação compreendida entre 0,15 e 0,26 encontrada nos meses de novembro e março, respectivamente. Contudo, durante o período seco, foi observado uma elevação brusca do coeficiente de deflúvio, com valor médio de 1,73. Tendência de decaimento do coeficiente de deflúvio também foram encontradas por Pereira (2005) e Pruski (2005). A ocorrência de valores elevados durante o período seco, atingindo 3,06; 4,28 e 1,28 nos meses de junho, julho e agosto, respectivamente, pode ser atribuído a grande redução da precipitação nesse período ao tempo que o escoamento sofre uma redução menos brusca, visto que o escoamento base reduz-se gradativamente, culminando em maiores valores para esse coeficiente, conforme descreve a Figura 25.



**Figura 25.** Coeficiente de deflúvio mensal para a bacia do ribeirão João Leite, GO para o período de 1975 a 2005, Goiânia, 2009.

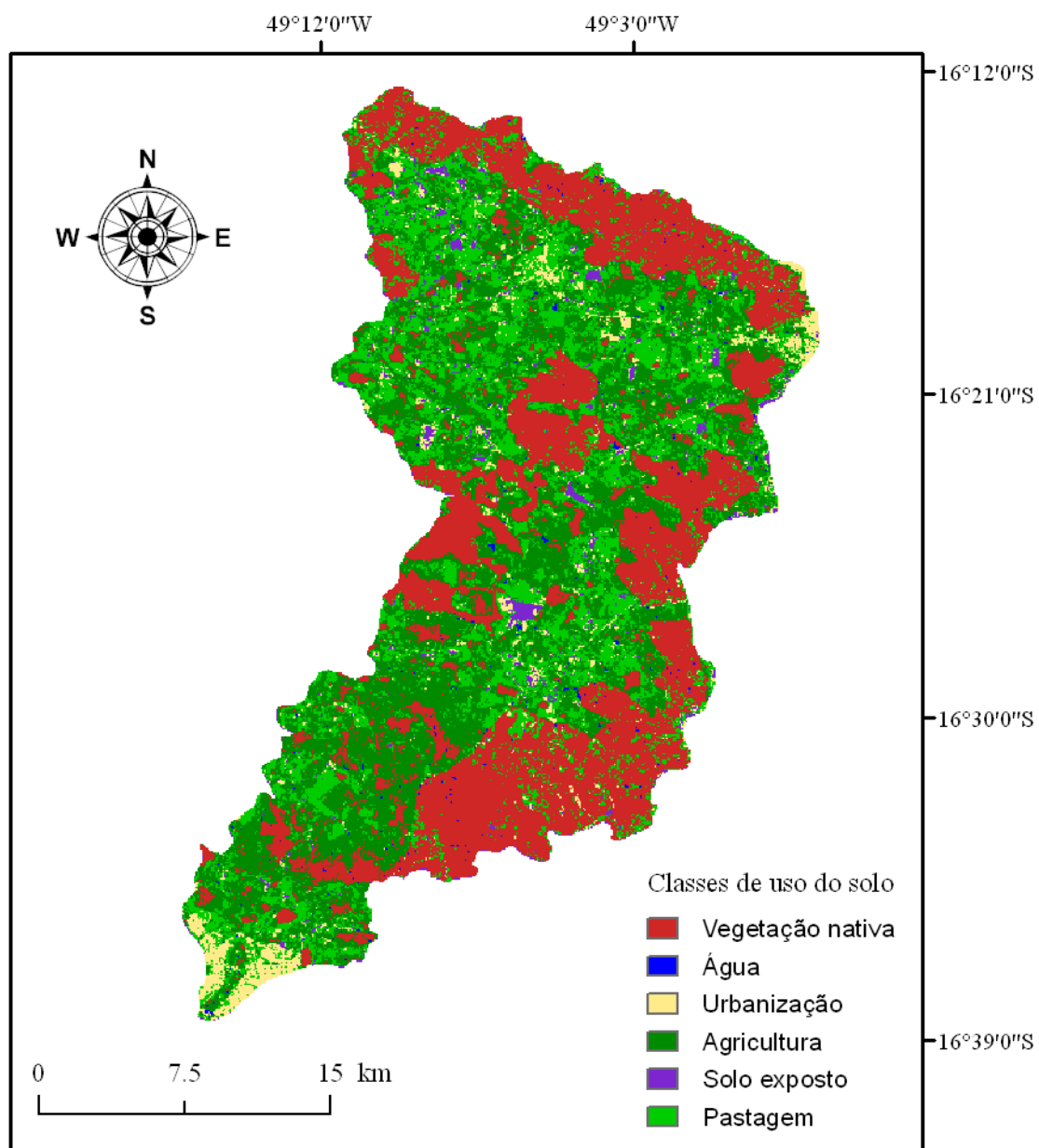
#### 4.4 INTERAÇÃO ENTRE O USO DO SOLO E O REGIME FLUVIAL

##### 4.4.1 Classificação da cobertura vegetal e variabilidade temporal

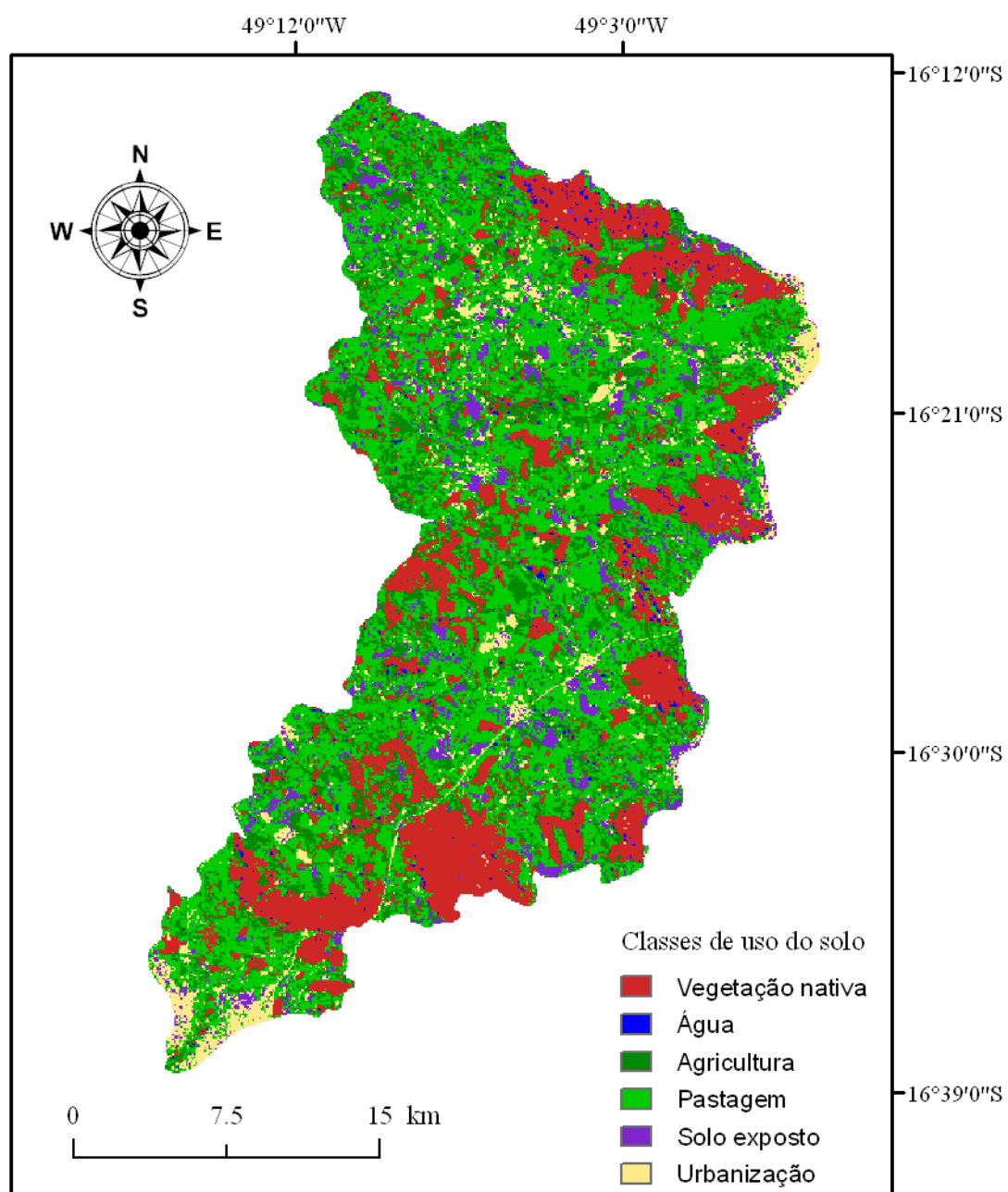
Visando retratar as alterações da cobertura vegetal na bacia do ribeirão João Leite, foram obtidos mapas de uso do solo para os anos de 1979, 1989, 1997 e 2005, empregando-se para isso imagens LANDSAT e o método de classificação supervisionada da máxima verossimilhança. Nas Figuras de 26 a 29 estão apresentados os mapas de uso do solo obtidos para a bacia hidrográfica do ribeirão João Leite.

As classes de uso do solo dominantes na bacia, empregadas na classificação foram agricultura, água, urbanização, vegetação nativa, pastagem e solo exposto. Na Tabela 6 constam os percentuais ocupados por cada classe de uso do solo nos distintos anos.

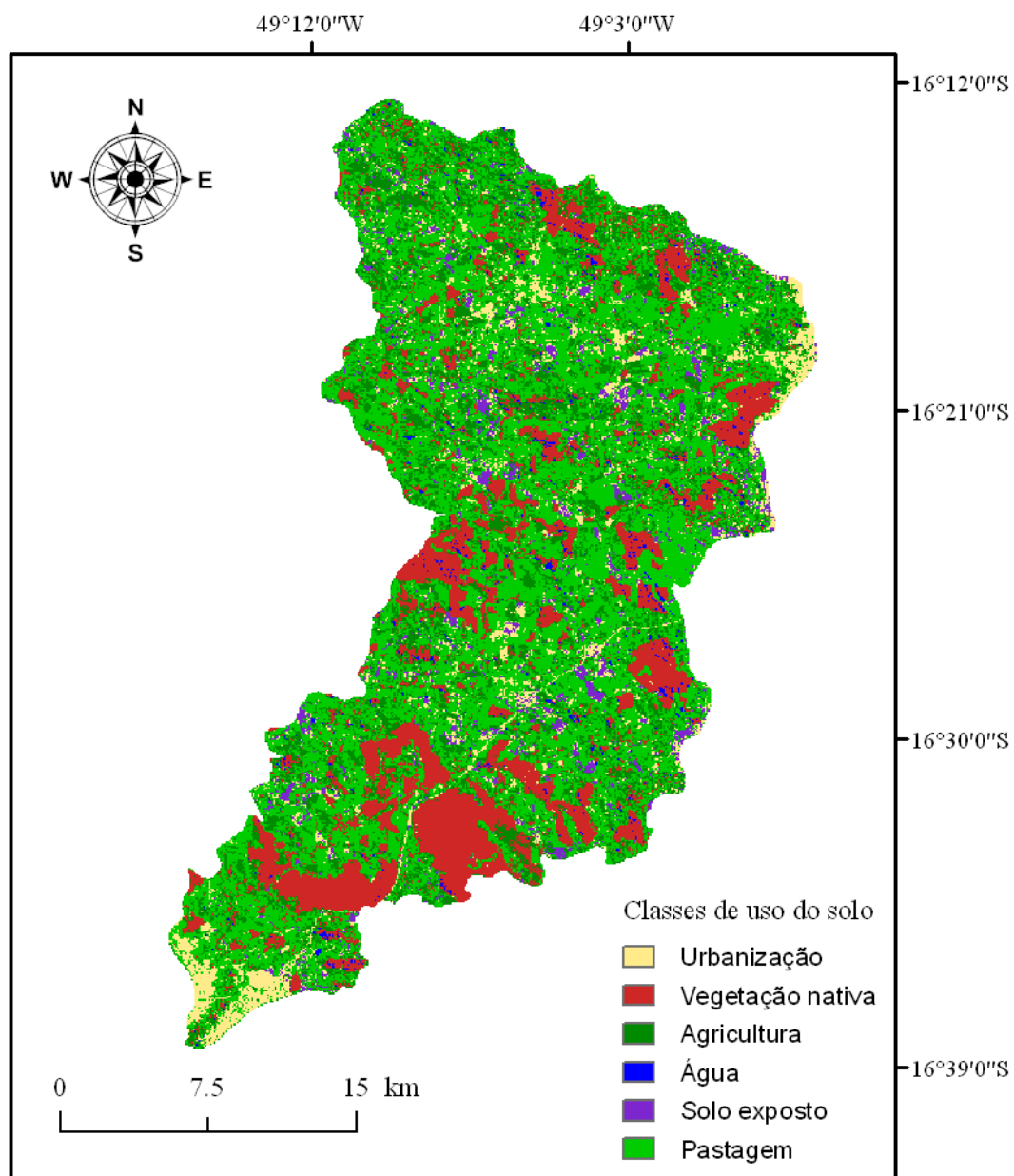




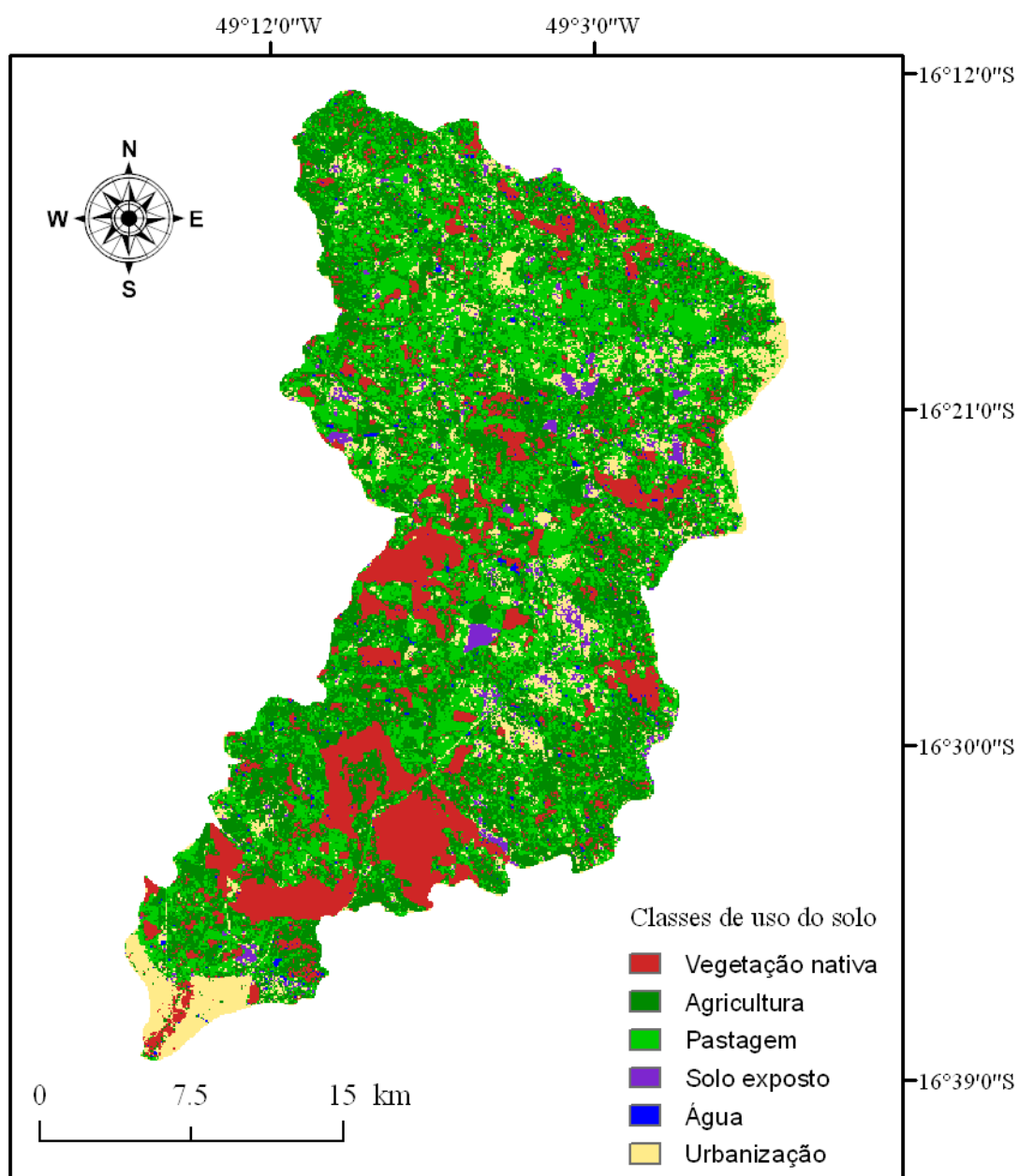
**Figura 26.** Mapa de uso do solo da bacia do ribeirão João Leite para Junho de 1979.



**Figura 27.** Mapa de uso do solo da bacia do ribeirão João Leite para Maio de 1989.



**Figura 28.** Mapa de uso do solo da bacia do ribeirão João Leite para Junho de 1997.



**Figura 29.** Mapa de uso do solo da bacia do ribeirão João Leite para Agosto de 2005.

**Tabela 6.** Área ocupada por classe de uso do solo, em termos percentuais da área total, nos anos de 1979, 1989, 1997 e 2005.

Classe de uso do solo	1979	1989	1997	2005
Vegetação Nativa	34,3	22,6	19,0	16,5
Água	0,4	0,8	1,3	0,8
Urbanização	4,2	6,1	7,0	10,8
Agricultura	18,4	19,3	26,4	33,6
Solo exposto	2,1	7,4	4,0	2,4
Pastagem	40,7	43,9	42,2	35,9

Observa-se que, em 1979, no qual foi dado início à avaliação do uso do solo na bacia do ribeirão João Leite, a área já se encontrava fortemente antropizada, o que pode ser afirmado com base na larga abrangência apresentada pelas classes de uso do solo agricultura e pastagem, que totalizaram 59,1% da bacia.

As áreas de pastagens, tipicamente ocupadas por forrageiras do tipo Capim Colonião, Napier e Jaraguá (Calil, 2003), representam a classe de uso do solo predominante na bacia do ribeirão João Leite, se mantendo em torno de 40% entre os anos de 1979 e 1997, e sofrendo uma leve retração em 2005, para 35,9%. De acordo com Afonso (2004), a principal atividade econômica exercida na bacia do João Leite é a agropecuária, justificando a elevada participação dessa classe na paisagem. Visualizando-se os mapas de uso do solo, constata-se a ocorrência de pastagens por praticamente toda a bacia hidrográfica, exceto em pequenas extensão ocupadas por vegetação nativa e urbanização, reforçando o diagnóstico inicial de tendência agropecuária.

A área ocupada por agricultura, seguindo o comportamento da classe pastagem, foi encontrada por praticamente toda a extensão da bacia. Em termos de área, entre os anos de 1979 e 1989, essa classe ocupou aproximadamente 19% da bacia, a partir de quando sofreu expansão, alcançando 26,4% em 1997 e 33,6% em 2005. Cultivam-se na bacia, basicamente, hortaliças, frutíferas e culturas anuais, e atribui-se a expansão dessa classe de uso do solo ao desenvolvimento do eixo Goiânia – Anápolis – Brasília, que em 2005 se aproximava dos 6 milhões de habitantes.

As principais áreas urbanas presentes, como se pode observar nos mapas de ocupação do solo, correspondem a uma fração da cidade de Goiânia, localizada ao extremo sul da bacia, e outra de Anápolis, localizada a nordeste. Em 1979, a classe de uso do solo urbanização representou uma pequena parcela da área total, com um equivalente a 4,2%. No entanto, verificou-se uma expansão contínua dessa classe, passando a 6,1% em 1989, 7,0% em 1997 e 10,8% em 2005.

Atualmente, encontra-se em construção na bacia do ribeirão João Leite um reservatório de acumulação d'água, que irá inundar cerca de 10,4 km<sup>2</sup>, com o objetivo de suprir a demanda hídrica da população de Goiânia. No entanto, a classe água, apresentou pequena variação durante o período analisado, o que é atribuído a pequena variação da área ocupada por espelhos d'água ao longo dos anos.

De acordo com Calil (2003), a vegetação nativa da bacia do ribeirão João Leite abrange Cerrado, Cerradão, vegetação ciliar composta por mata de galeria, Floresta Tropical Subcaducifólia e Caducifólia. Visualizando-se o mapa de uso do solo obtido para o ano de 1979, observam-se algumas áreas de mata conservadas na cabeceira da bacia, porção central e toda a vertente leste, totalizando 34,3% da área. Acompanhado o panorama brasileiro, a bacia do ribeirão João Leite passou por um processo intenso de desmatamento no período compreendido entre 1979 e 2005, no qual a área ocupada por vegetação nativa passou gradativamente de 262,9 para 173,1; 145,9 e 126,6 km<sup>2</sup> nos anos de 1979, 1989, 1997 e 2005, respectivamente.

Contudo, a análise do mapa de uso do solo do ano de 2005 mostrou que, ao longo da bacia restaram pequenos fragmentos de vegetação nativa, e conforme também constatado por Bonnet (2005), não são respeitados os 20% de reservas legais e 10% de áreas de preservação permanente previstos em lei, com exceção da área do Parque Ecológico de Preservação Ambiental e Florestal Altamiro de Moura Pacheco, fundado em 1992.

A sexta classe de uso do solo avaliada nesse estudo foi a de solo exposto, que é constituído principalmente por voçorocas, pastagens degradadas e terra arada. Pode-se perceber que essa classe apresentou pequena participação e variação na ocupação do solo da bacia do ribeirão João Leite, com um valor máximo de 7,4% em 1989 e mínimo de 2,1% em 1979.

#### **4.4.2 Interação entre o uso do solo e o regime fluvial**

A geração do escoamento superficial em uma bacia hidrográfica é decorrente de uma complexa interação que envolve vegetação, solos, clima e relevo. Alterações na distribuição temporal e espacial de variáveis do ciclo hidrológico como a precipitação e evapotranspiração podem resultar em alterações nas vazões das bacias hidrográficas. Nesse sentido, a variabilidade hidrológica, que consiste nas alterações que possam vir a ocorrer com as variáveis hidrológicas de entrada (precipitação e evapotranspiração) e saída (vazão)

estão relacionados a: (1) variabilidade natural dos processos climáticos; (2) modificação climática; (3) alterações no uso do solo (Tucci, 2002).

A vegetação, foco desse estudo, influi diretamente sobre alguns componentes do ciclo hidrológico, podendo-se destacar a taxa de evapotranspiração, interceptação, capacidade de infiltração de água no solo e o reservatório de água disponível para evapotranspiração, estreitamente relacionado à profundidade do sistema radicular (Bruijnzeel, 1988).

Dessa maneira, evidencia-se que, modificações no uso do solo praticadas na bacia hidrográfica do ribeirão João Leite ao longo do tempo, tendem a promover alterações nos componentes do ciclo hidrológico, culminando em modificações no escoamento da bacia. No entanto, as mudanças no escoamento advindas de alterações no uso do solo são dependentes dos tipos de vegetação do período pré e pós-alteração. Segundo constatações de Calder et al. (1993), Zhang et al. (2001) e Engel et al. (2005), quando a alteração abrange a substituição de vegetação rasteira por espécies florestais, os impactos no escoamento da bacia hidrográfica são mais intensos que, quando da substituição de uma espécie florestal por outra. Os autores atribuem esse efeito à maior evapotranspiração de espécies florestais em comparação à vegetação rasteira, além do aumento do reservatório de água disponível a evapotranspiração propiciado pela maior profundidade do sistema radicular.

De acordo com Bruinjnzeel (1990), os impactos sobre o escoamento superficial decorrentes da modificação da vegetação, de maneira geral, podem ser avaliados em termos de vazões mínimas, médias e máximas, sendo tratados na seqüência.

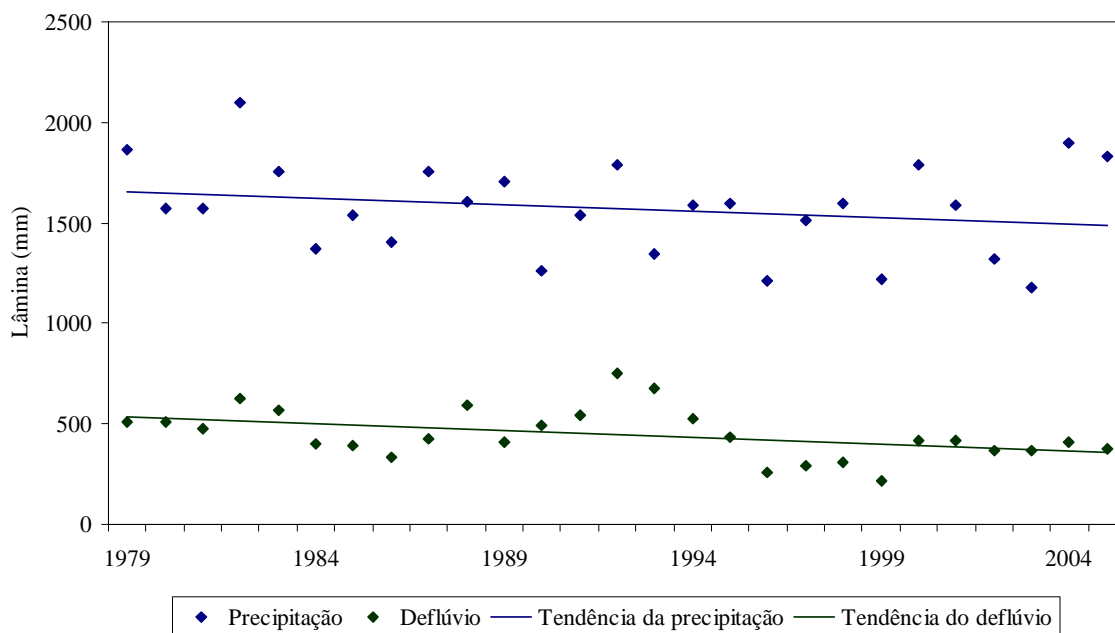
#### 4.4.2.1 Vazões médias

No período de 1979 a 2005, as vazões médias na bacia hidrográfica do ribeirão João Leite apresentaram valor de longo termo próximo a  $10,93 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Durante esse período, a precipitação média anual apresentou uma tendência de redução, da ordem de  $6,39 \text{ mm ano}^{-1}$ , com significância de 53,39%.

Refletindo a tendência de declínio apresentada pelo regime pluvial, o deflúvio médio anual apresentou comportamento semelhante, com magnitude próxima a  $6,78 \text{ mm ano}^{-1}$ , com significância de 96,65%.

Dessa maneira, fica evidenciado que a variabilidade climática explica, ao menos parcialmente as alterações da variável de saída do ciclo hidrológico na bacia do

ribeirão João Leite. Contudo, conforme ilustra a Figura 30, houve uma tendência de redução mais acentuada do escoamento, em comparação à precipitação, de  $0,38 \text{ mm ano}^{-1}$ . Embora, aparentemente essa redução seja pouco expressiva em termos de lâmina, quando a mesma é convertida em volume, assume um valor de  $291.384 \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$ , uma vez que a área de drenagem é de  $766,8 \text{ km}^2$ .



**Figura 30.** Precipitação média anual e deflúvio anual na bacia do ribeirão João Leite, GO, em mm, de 1979 à 2005 e linhas de tendência. Goiânia, 2009.

Conforme visto, a ocupação do solo na bacia hidrográfica do ribeirão João Leite passou por intensas modificações entre os anos de 1979 e 2005. A área inicialmente ocupada por vegetação nativa, que era da ordem de  $263 \text{ km}^2$  passou para  $127 \text{ km}^2$  em 2005. De acordo com Collischonn (2001), após o desmatamento de florestas naturais ocorre aumento da vazão média na bacia hidrográfica. Ainda de acordo com este autor, quando são implantadas culturas agrícolas em lugar à vegetação natural, os impactos podem ser diferenciados. No caso de culturas perenes, como café, a alteração no escoamento é amenizada em comparação a culturas anuais, especialmente quando não é utilizado o plantio direto.

A expansão da área de agricultura, que se deu basicamente sobre áreas anteriormente ocupadas por vegetação nativa e pastagens, em termos absolutos respondeu pela maior alteração na cobertura vegetal, e que foi de  $117 \text{ km}^2$ . Essas áreas foram ocupadas ao longo da bacia por culturas anuais e perenes, utilizando, basicamente, a



técnica de preparo convencional do solo, na qual, de maneira geral, têm-se redução da infiltrabilidade do solo, em função da perda de matéria orgânica e também, da compactação devido ao tráfego intenso de máquinas agrícolas utilizadas no preparo do solo, o que indica uma tendência de aumento das vazões médias.

As áreas urbanas inseridas na bacia hidrográfica do ribeirão João Leite aumentaram em 157%. Embora proporcionalmente pequena na bacia, a ocupação da classe urbanização teve um aumento de 51 km<sup>2</sup>. Do ponto de vista hidrológico, em áreas urbanas, devido à impermeabilização da superfície do solo, ocorre uma redução drástica da infiltração, propiciando o aumento do escoamento superficial direto, e assim, implicando, em aumento de vazões máximas e médias e por outro lado, reduzindo as vazões mínimas (Bruijnzeel, 1996).

Dessa maneira, ficou evidenciado que as alterações na cobertura vegetal da bacia do ribeirão João Leite no período de 1979 a 2005, tendem a proporcionar aumento do escoamento, em detrimento da redução da capacidade de infiltração e interceptação em algumas áreas, e em outras, das diferentes características fisiológicas da nova vegetação implantada.

É de conhecimento que os processos de formação do escoamento são essencialmente não-lineares, de maneira que, a tendência de redução do regime pluvial, embora certamente acarrete uma redução escoamento, as proporções envolvidas são de difícil detecção. Contudo, conforme visto inicialmente, a tendência de decaimento do regime fluvial foi superior a do regime pluvial, e as alterações da cobertura vegetal na bacia não explicam essa tendência. Dessa maneira, pode-se atribuir essa ocorrência ao expressivo aumento do número captações d'água ao longo do ribeirão João Leite, exercendo a retirada de um volume expressivo de água do ribeirão. Esse aumento é decorrente do acelerado crescimento urbano e industrial ocorrido nos entornos dos municípios de Goiânia e Anápolis nas últimas décadas, além do amplo desenvolvimento da agricultura irrigada por aspersão convencional e pivô central.

De acordo com UFG (2003), a demanda hídrica na bacia do João Leite se deve principalmente ao abastecimento urbano, chegando a 80,43% do total captado, sendo o restante destinado à irrigação 14,89%, piscicultura 2,88% e outras atividades 1,81%. Ainda de acordo com esse autor, a demanda hídrica atual é de 2,74 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>, o que resulta no impressionante volume anual captado de 8,64.10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>.

Com o intuito de modelar as modificações na vazão média, frente às alterações no regime pluvial e de ocupação do solo, foi empregada a regressão linear simples. As variáveis dependentes testadas corresponderam às seis classes de uso do solo, em termos do percentual da área da bacia ocupada em cada ano, a precipitação total anual (P), a precipitação total anual do ano anterior (Pant), a precipitação média dos dois últimos anos (P2) a precipitação do mês mais seco (Pms) e a precipitação do mês mais chuvoso (Pmc). A seleção das variáveis utilizadas foi realizada pelo teste t de Student, sendo descartadas as que se apresentassem não-significativas em nível de probabilidade máximo de 10%.

Apresentaram-se significativas ao nível de probabilidade de 10% pelo teste t de Student as variáveis vegetação nativa e P2. O modelo ajustado por regressão linear está apresentado na equação 16:

$$Q_m = -7,6935 + 0,0838 \cdot \text{VegNat} + 0,0098 \cdot P2 \quad (R^2 = 0,98) \quad (16)$$

e que:  $Q_m$  refere-se à vazão média anual, em  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ , VegNat a parcela da bacia ocupada por vegetação nativa, em %, e P2 é a precipitação média anual dos dois últimos anos, em mm.

#### 4.4.2.2 Vazões máximas

Acompanhando o comportamento das vazões médias, as vazões máximas diárias anuais na bacia do ribeirão João Leite apresentaram tendência de decaimento no período de 1979 a 2005, e que foi de  $0,11 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$  ao ano, com significância de 42,37%. Em termos de deflúvio diário a tendência de redução equivale a  $0,01 \text{ mm dia}^{-1}$ , magnitude pouco expressiva, tendo-se em vista a magnitude dos eventos críticos na bacia, que ultrapassam os  $6 \text{ mm dia}^{-1}$ .

Conforme visto, a principal alteração na cobertura vegetal na bacia do ribeirão João Leite consistiu no desmatamento da vegetação nativa, em virtude de, principalmente, implantação da agricultura. De acordo com Collischonn (2001), constam na literatura diversos estudos comparativos em pequenas bacias, abrangendo a comparação de vazões máximas em bacias florestadas e desmatadas, os quais indicam que, com o desmatamento, ocorre aumento nas vazões máximas. No entanto, de acordo com Tucci & Clarke (1997), o aumento ocorre sobre as vazões de pequeno e médio período de retorno, não influenciando significativamente as grandes cheias.

Conciliado a isso, de acordo com Bruijnzell (1996), a compreensão da influência das alterações da cobertura vegetal sobre o regime de vazões máximas é dificultada em função do armazenamento de água ao longo da calha de inundação do curso d'água.

Os resultados abordados pelos autores supracitados dão suporte às interpretações das alterações nas vazões máximas na bacia hidrográfica do ribeirão João Leite, onde o vulto das grandes cheias sofreu pequenas alterações em decorrência das alterações do uso do solo.

Contudo, a análise de variância entre as classes de uso do solo e precipitações com a vazão máxima anual mostrou resultados significativos ao nível de significância de 10% pelo teste t de Student para as variáveis vegetação nativa e precipitação total anual. O resultado da regressão linear está apresentado na equação 17:

$$Q_{\max} = -53,5118 + 0,0483 \cdot \text{Panual} + 0,3546 \cdot \text{VegNat} \quad (R^2 = 0,97) \quad (17)$$

E que:  $Q_{\max}$  é a vazão máxima anual estimada, em  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ , Panual é a precipitação total anual, em mm, e VegNat é a parcela da bacia hidrográfica ocupada por vegetação nativa, em %.

#### 4.4.2.3 Vazões mínimas e de referência

As vazões mínimas nos rios ocorrentes durante as estiagens refletem as condições de recarga do aquífero. Dessa forma, o regime de chuvas, as condições de infiltrabilidade do solo e as características fisiológicas da cobertura vegetal influem diretamente sobre elas.

A bacia hidrográfica do ribeirão João Leite passou por um intensivo processo de desmatamento no período de 1979 a 2005. Em florestas ocorre maior absorção da radiação solar, em comparação a outras coberturas vegetais, culminando em maior energia disponível para evapotranspiração. Outro fator a ser considerado é a interceptação, que é maior em áreas florestadas, incrementando a evaporação direta da água (Collischonn, 2001). Com relação a infiltrabilidade do solo após o desmatamento, devem ser observadas as técnicas de manejo adotadas na nova cobertura vegetal, podendo ocorrer alterações significativas na lâmina infiltrada (Bruijnzeel, 1996).

De acordo com Tucci (2002), ocorrem na literatura experimentos que obtiveram aumento ou diminuição das vazões mínimas após o desmatamento da bacia

hidrográfica, o que está intimamente relacionado às alterações na superfície do solo após o desmatamento. De acordo com esse autor, quando as condições de infiltração após o desmatamento são mantidas, e por consequência, a taxa de infiltração, ocorre um aumento da recarga, em detrimento da redução da evapotranspiração, aumentando as vazões mínimas. Por outro lado, se as condições de infiltração são prejudicadas, o escoamento superficial direto aumenta, reduzindo a recarga do aquífero e por consequência, as vazões mínimas.

As vazões mínimas durante o período de 1979 a 2005 apresentaram uma tendência de redução de  $0,07 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  ao ano, ou  $0,009 \text{ mm dia}^{-1}$ , com significância de 94,58%. Conforme visto, grande parte dessa tendência de redução pode ser explicada pela variabilidade do regime de chuvas no mesmo período, que apresentou tendência de decaimento de  $6,39 \text{ mm ano}^{-1}$ , com significância de 53,39%.

O uso do solo, pós-desmatamento na bacia do ribeirão João Leite, é marcado pela agricultura, prevalecendo em grande parte da bacia o preparo convencional do solo. Nessa técnica de cultivo prevalece a perda de matéria orgânica do solo e também, compactação, devido ao tráfego de máquinas agrícolas, indicando que, são esperadas reduções nas taxas de infiltração de água no solo, favorecendo a formação do escoamento superficial direto e assim, prejudicando as condições de recarga e, por conseguinte, das vazões mínimas.

Esse quadro, conjuntamente ao aumento da retirada de água do ribeirão João Leite visando atender ao aumento da demanda industrial, agrícola e urbana de água, justificam a tendência acentuada de redução das vazões mínimas na bacia.

A modelagem da vazão mínima e das vazões de referência frente à classificação do uso do solo e precipitações estão apresentadas nas equações de 18 a 21. Os modelos obtidos por regressão linear para a estimativa da vazão mínima anual e da vazão mínima média de sete dias consecutivos ( $Q_7$ ) empregaram como variáveis explicativas a vegetação nativa e a precipitação total anual do ano anterior, que mostraram-se significativas ao nível de 10% de probabilidade pelo teste t de Student. Já para os modelos obtidos para as vazões com 90% de permanência ( $Q_{90}$ ) e 95% ( $Q_{95}$ ), as variáveis explicativas que mostraram-se significativas ao nível de 10% de significância pelo teste t de Student foram a vegetação nativa e a agricultura.

$$Q_{\min} = 3,9152 - 0,2321 \cdot \text{VegNat} - 0,0051 \cdot \text{Pant} \quad (R^2 = 0,74) \quad (18)$$

$$Q_{95} = -1,6028 + 0,1609 \cdot \text{VegNat} + 0,0590 \cdot \text{Agr} \quad (R^2 = 0,84) \quad (19)$$

$$Q_{90} = -0,8577 + 0,1624 \cdot \text{VegNat} + 0,0490 \cdot \text{Agr} \quad (R^2 = 0,95) \quad (20)$$

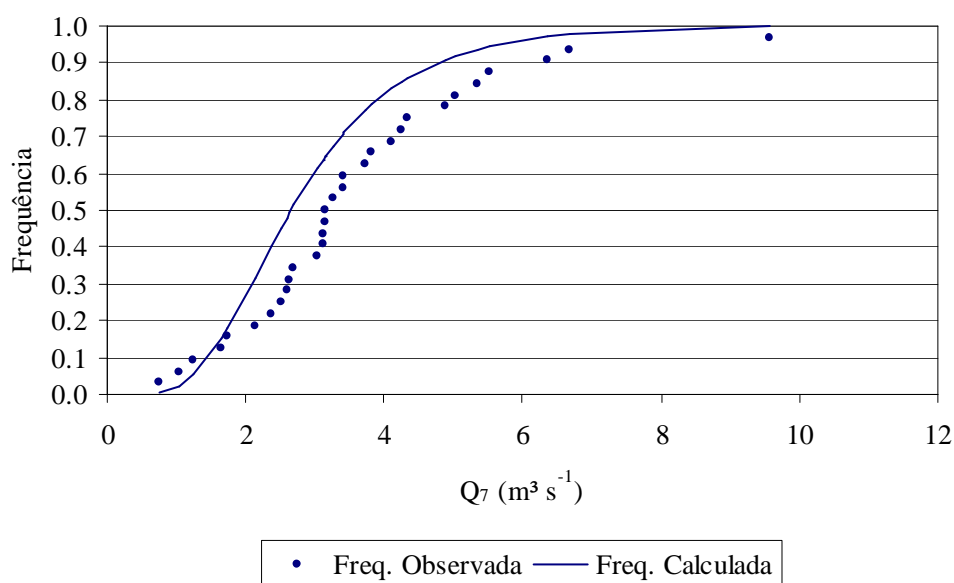
$$Q_7 = 6,5842 + 0,2330 \cdot \text{VegNat} - 0,0066 \cdot \text{Pant} \quad (R^2 = 0,99) \quad (21)$$

E que:  $Q_{\min}$  é a vazão mínima anual, em  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ,  $Q_{95}$  e  $Q_{90}$  são as vazões igualadas ou superadas em 95% e 90% do tempo, respectivamente, em  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ,  $Q_7$  é a vazão mínima média de sete dias consecutivos, em  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ , VegNat é a parcela da bacia ocupada por vegetação nativa, em %, Agr é a parcela da bacia ocupada por agricultura, em % e Pant é a precipitação total anual do ano anterior, em mm.

#### 4.5 IMPACTOS DA VAZÃO OUTORGÁVEL SOBRE A GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

Na Figura 31 está apresentado o ajuste da distribuição de probabilidades Log-normal 3 parâmetros às frequências observadas de  $Q_7$ , ressaltando-se que o modelo mostrou-se adequado ao nível de significância de 5% pelo teste Qui-quadrado.

O valor da vazão de referência  $Q_{7,10}$  foi de  $1,47 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , salientando uma vazão máxima outorgável pelo critério vigente em Minas Gerais, de  $0,44 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , o que representa um valor bastante restritivo. Dessa maneira fica estabelecida que a vazão mínima que deve permanecer no leito do rio, visando garantir a reprodução e crescimento da biota aquática (vazão ecológica) é dada pela fração residual da vazão de referência, (70% de  $Q_{7,10}$ ) e que tem valor de  $1,03 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ .



**Figura 31.** Ajuste da distribuição Log-normal com três parâmetros às frequências observadas de vazão mínima anual de sete dias consecutivos para o período de 1975 a 2005. Goiânia, 2009.

O valor da vazão de referência  $Q_{95}$  extraído da curva de permanência pelo critério de um valor único anual foi de  $3,14 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , indicando uma vazão máxima outorgável de  $1,57 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  pela legislação vigente no estado de Goiás e igualmente, uma vazão ecológica de  $1,57 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .

Já a vazão superada ou igualada em 90% do tempo ( $Q_{90}$ ) assumiu um valor de  $3,79 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  pelo critério de um valor único anual para a vazão de referência. Empregando o critério de vazão máxima outorgável no estado do Ceará, que é de 90% de  $Q_{90}$ , chega-se à maior vazão outorgável dentre os critérios de vazão única analisados, e que foi de  $3,41 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , e por outro lado, à menor vazão ecológica, que foi de  $0,38 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .

Nesse panorama, constata-se que, as vazões máximas outorgáveis obtidas por critérios de outorga vigentes em diferentes estados brasileiros produzem diferenças significativas nas vazões máximas outorgáveis, tendo implicações diretas sobre o desenvolvimento das atividades dependentes de recursos hídricos na bacia hidrográfica.

Conforme visto, o critério de outorga adotado pelo estado de Goiás (50% de  $Q_{95}$ ) forneceu uma vazão máxima outorgável intermediária para a bacia do ribeirão João Leite ( $1,57 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ), mostrando que, embora menos rigoroso que o critério adotado em Minas Gerais (30% de  $Q_{7,10}$ ), para o qual obteve-se a menor vazão outorgável ( $0,44 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ), o mesmo mostrou-se bastante rigoroso em comparação ao critério adotado no Ceará (90% de  $Q_{90}$ ), que gerou a maior vazão outorgável ( $3,41 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ). Contudo, pela perspectiva ambiental, as diferenças nas vazões de referência e critérios de outorga implicam em diferentes vazões ecológicas, mostrando que, a legislação em vigor em Goiás, resultou em um valor intermediário para essa vazão.

Uma opção para a racionalização da utilização da água disponível no rio ao longo do ano é a adoção de vazões de referência anuais, visando o melhor aproveitamento deste recurso em períodos de abundância e, restringindo seu uso, em épocas de escassez. Com esse objetivo, foram geradas curvas de permanência mensais para os 12 meses do ano, utilizando dados mensais de vazão diária do período de 1975 a 2005. Na Figura 32 estão apresentadas as curvas de permanência obtidas para o ribeirão João Leite para os meses de janeiro a dezembro.

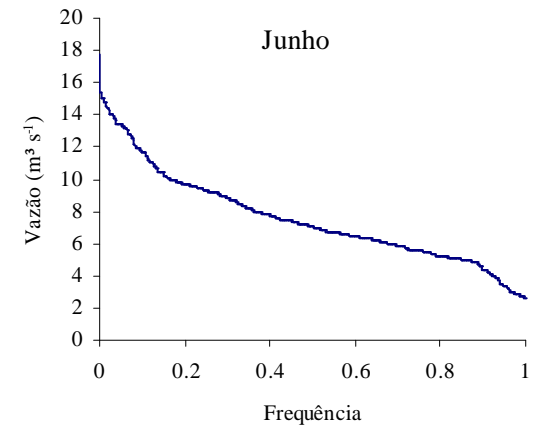
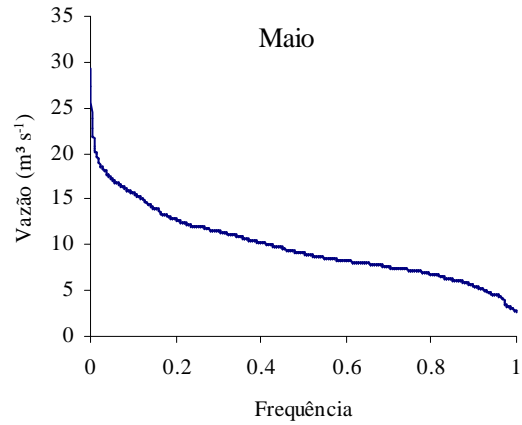
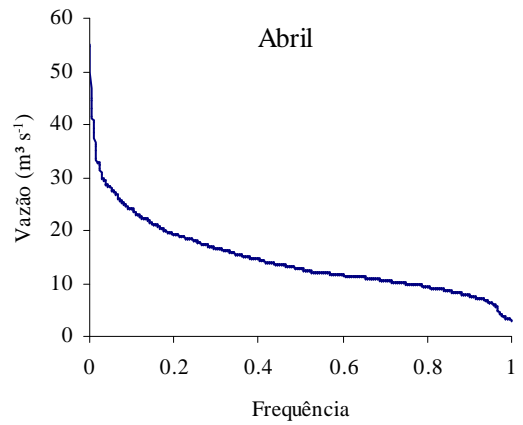
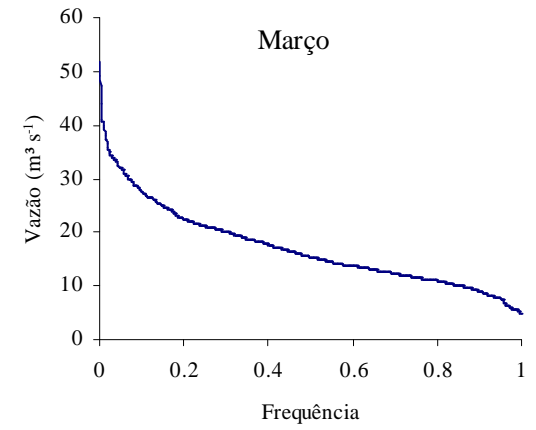
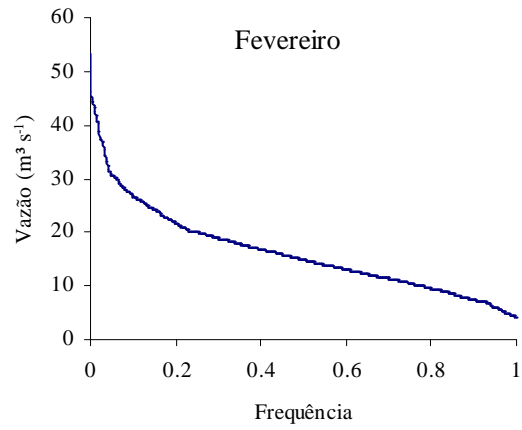
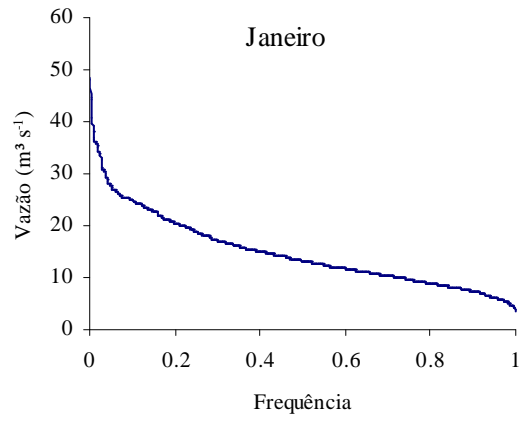
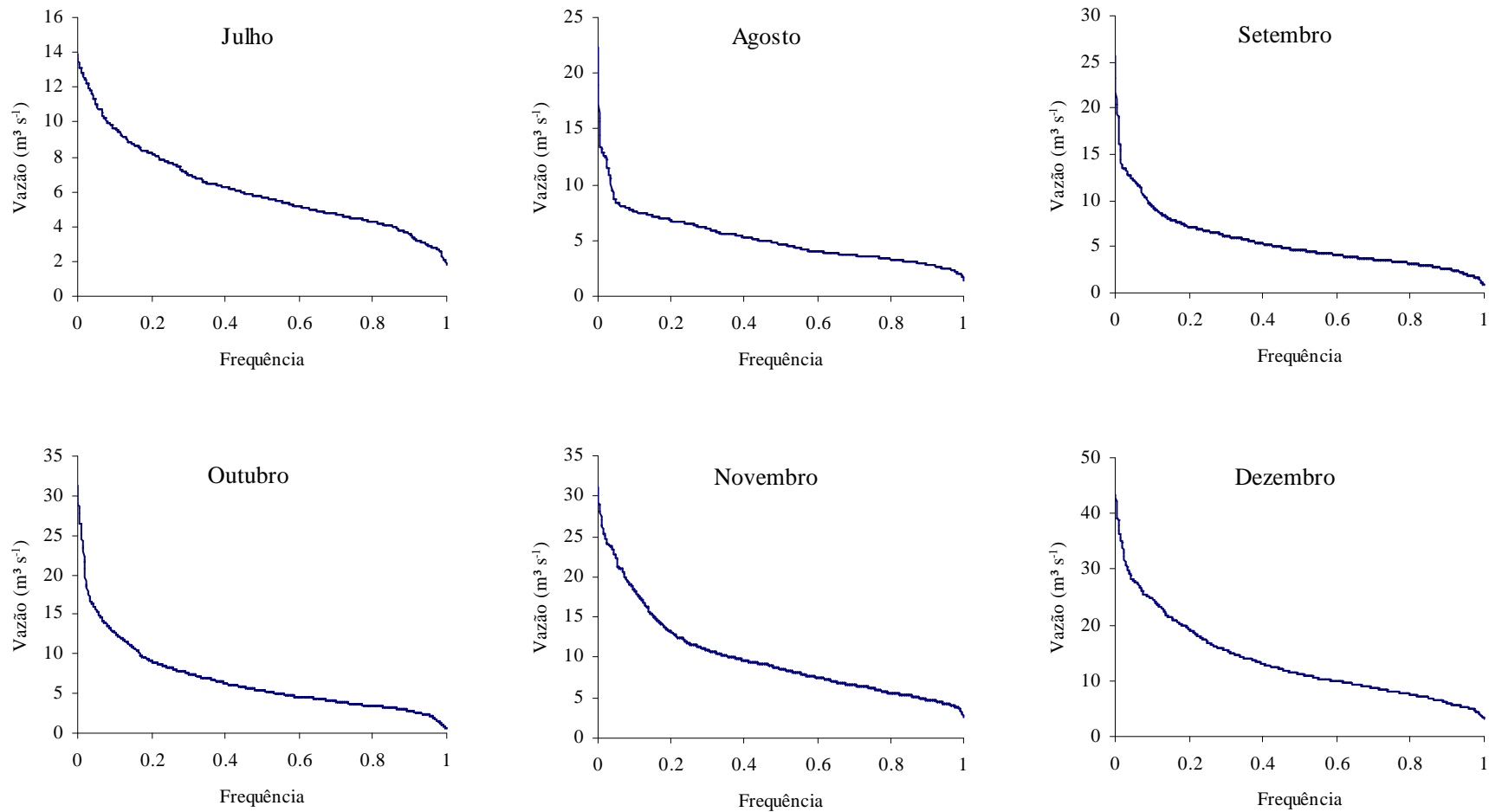


Fig. 32. Continua...

Continuação da Fig. 32

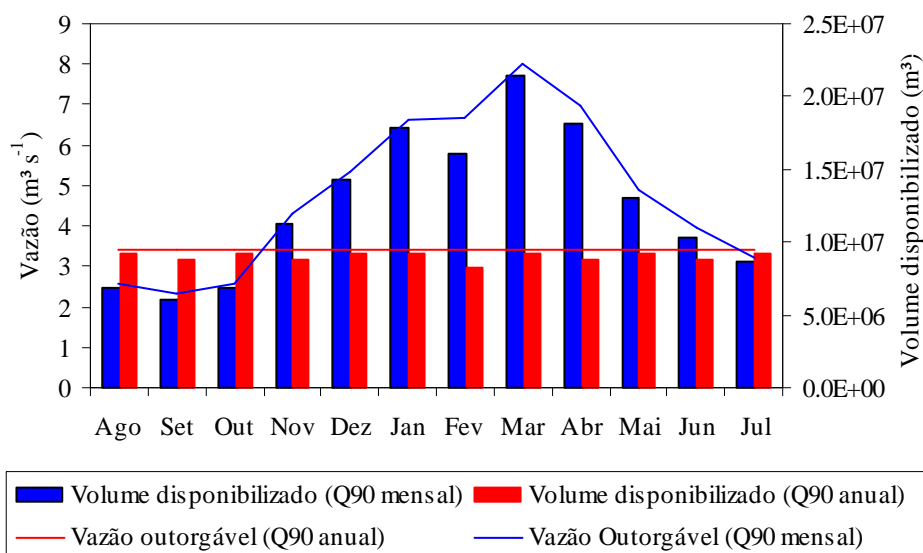


**Figura 32.** Curvas de permanência mensais obtidas a partir de dados diários do período de 1975 a 2005 na bacia do ribeirão João Leite, GO.

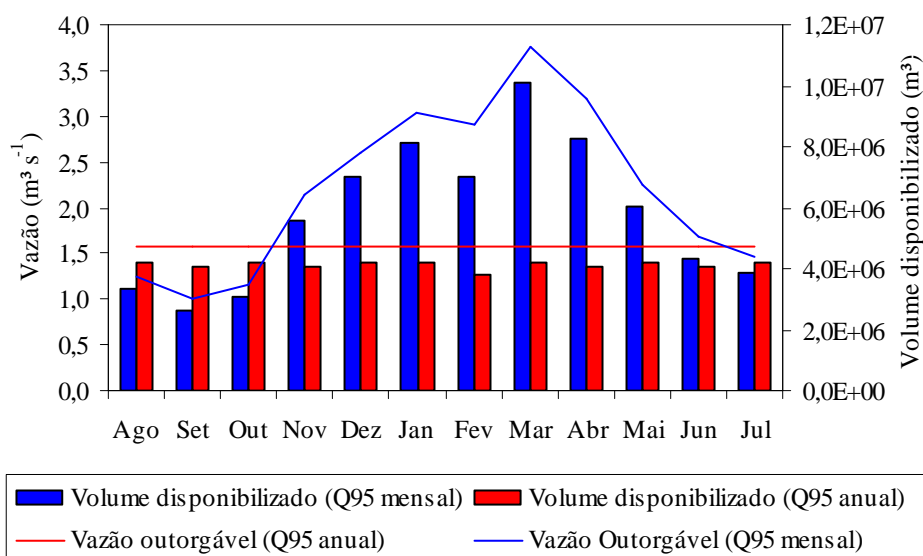


Conforme se pode visualizar nessas figuras, ocorre grande variação nas curvas de permanência com a passagem do período chuvoso para o de estiagem. Este comportamento pode ser melhor interpretado a partir das vazões de referência  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$ , extraídas das curvas de permanência mensais, apresentadas nas Figuras 33 e 34, respectivamente.

A vazão  $Q_{90}$  mensal apresentou valores variando de  $2,60 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  a  $8,90 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , nos meses de setembro e março, respectivamente. Com base nesses valores, a vazão máxima outorgável, levando-se em consideração o critério de outorga estabelecido no estado do Ceará, que é de 90% de  $Q_{90}$ , variou de  $2,34 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  a  $8,01 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .



**Figura 33.** Vazão de referência  $Q_{90}$ , vazão outorgável mensal (90% de  $Q_{90}$ ) e volume mensal disponibilizado pela vazão outorgável. Goiânia, 2009.



**Figura 34.** Vazão de referência  $Q_{95}$ , vazão outorgável mensal (50% de  $Q_{95}$ ) e volume mensal disponibilizado pela vazão outorgável. Goiânia, 2009.

Comparando-se as vazões máximas outorgáveis mensais à anual, geradas pelo critério de outorga vigente no estado do Ceará, constata-se que, nos meses de seca, a vazão adotada pelo critério único é excessiva, podendo vir a comprometer a vazão ecológica, enquanto que, nos meses de cheia, esse valor passa a ser pouco expressivo, implicando em sub-aproveitamento dos recursos hídricos da bacia, como pode se observar na Figura 33.

A avaliação dos volumes disponibilizados, também apresentados na Figura 33, reforça esse resultado, visto que, quando são consideradas as vazões de referência mensais no cálculo da vazão máxima outorgável é disponibilizado um volume de  $1,51 \cdot 10^8 \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$ , muito superior ao disponibilizado pela adoção de um valor único anual para a vazão de referência, que foi de  $1,08 \cdot 10^8 \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$ , ou seja, cerca de 40,18% a mais. Resultado semelhante foi encontrado para a vazão outorgável referente a 50% de  $Q_{95}$ , conforme pode-se observar na Figura 34, para a qual o volume disponibilizado a partir de valores mensais foi de  $6,94 \cdot 10^7 \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$ , 40,08% superior ao disponibilizado pelo critério anual.

Concordando com os resultados obtidos por esse estudo, Camara (2003), que avaliou os impactos de diferentes critérios de outorga no rio Gramame, localizado no estado da Paraíba concluiu que, a fixação de vazões de referência para outorga que acompanham a variabilidade hidrológica presente na bacia hidrográfica, como a vazão de referência mensal, propiciam a racionalização da utilização dos recursos hídricos, em comparação ao estabelecimento de um valor anual para a vazão de referência.

## 5 CONCLUSÕES

O modelo exponencial ajustado pelo método dos mínimos quadrados ponderados se sobressaiu perante os demais modelos testados, o que permite sugerir-lo como sendo o mais adequado na aplicação das técnicas geoestatísticas no mapeamento da precipitação média mensal e anual na bacia hidrográfica do ribeirão João Leite.

Pode-se constatar que a interpolação geoestatística (krigagem) obteve um bom desempenho na espacialização da precipitação média mensal e anual, com base no pequeno erro médio gerado pela validação cruzada.

O comportamento espacial da precipitação pluvial mostrou pequena variabilidade dos índices pluviométricos mensais ao longo da bacia hidrográfica, respondendo por cerca de 40 mm no auge do período chuvoso e chegando a poucos milímetros durante os meses mais secos do ano.

Por meio do coeficiente de deflúvio, pode-se estimar que em média 72% do total precipitado anualmente é convertido basicamente em evapotranspiração na bacia hidrográfica do ribeirão João Leite, visto que, este coeficiente apresentou um valor médio de 28%.

A análise temporal do uso do solo na bacia revelou que, no ano de 1979, no qual foi dado início à avaliação do uso do solo por esse estudo, a bacia já se encontrava fortemente antropizada, com as classes de uso do solo agricultura e pastagem abrangendo cerca de 59% da bacia.

Os modelos ajustados por regressão linear visado modelar as modificações nas vazões média, máxima, mínima,  $Q_7$ ,  $Q_{95}$  e  $Q_{90}$  frente às alterações no regime pluvial e de ocupação do solo, mostraram um bom ajuste, admitido com base nos valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

O estabelecimento de um valor único para a vazão de referência  $Q_{95}$  resulta em superutilização do manancial em anos secos, como 1978, e subutilização em anos chuvosos, como 1993, devendo ser buscados critérios mais flexíveis por parte dos responsáveis pela gestão dos recursos hídricos no estabelecimento da vazão de referência para outorga.

A adoção de vazões de referência estabelecidas mensalmente mostrou-se uma alternativa altamente promissora para otimização da utilização dos recursos hídricos superficiais na bacia do ribeirão João Leite, e por conseqüência, ao estado de Goiás. A avaliação dos volumes disponibilizados anualmente mostrou que, quando são consideradas as vazões máximas outorgáveis a partir da vazão de referência  $Q_{95}$  mensal o volume disponibilizado é de  $6,94.10^7 \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$ , muito superior ao disponibilizado pela adoção de um valor único anual para a vazão de referência  $Q_{95}$ , que foi de  $4,95.10^7 \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$ , ou seja, cerca de 40,08% a mais.

Apresenta-se como sugestões para futuros trabalhos, estudo visando usar valores de vazão mínima como critério de outorga, utilizando dados mensais da série histórica para estabelecimento da  $Q_{95}$ , possibilitando uso mais racional do recurso hídrico.

## 6 REFERÊNCIAS

AFONSO, A. A. Avaliação do potencial de risco de contaminação por agrotóxico das águas superficiais da microbacia do Ribeirão João Leite. IESA/UFG. 2004.

ALMEIDA, C. F. P.; RIBEIRO JÚNIOR, P. J. Estimativa da distribuição espacial de retenção de água em um solo utilizando krigagem indicatriz. Curitiba: UFPR, 1996. 37p.

BACELLAR, L. A. O papel das florestas no regime hidrológico de bacias hidrográficas. 2005. 39 p. Disponível em: <<http://www.degeo.ufop.br/geobr/geobr>> acesso em: 29 ago. 2008.

BECKER, A. Criteria for a hydrologically sound structuring of large scale land surface process models. In: O'KANE, J.P. Advances in theoretical hydrology: a tribute to James Dooge. Amsterdã: Elsevier, 1992. Cap.7, p. 97-111.

BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. Precipitação. In: TUCCI, C. E. M. (Org.) Hidrologia: ciência e aplicação. 2. ed. Porto Alegre: ABRH/Editora UFRGS, 2001. p.177-231.

BONNET, B. R. P. Relações entre qualidade de água e uso do solo em bacias hidrográficas no cerrado brasileiro: Aspectos físicos e sociais e proposição de diretrizes. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2004.

BOSCH, J.M.; HEWLETT, J. D., 1982. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. **Journal of Hydrology**, Amsterdam. v 55, 2-23

BRASIL. Lei Federal nº. 9.433, de oito de janeiro de 1997. Política Nacional de Recursos Hídricos, Brasília, p. 23 - 42, 2002.

BRITO, J. L. S.; PRUDENTE, T.D. Análise temporal do uso do solo e cobertura vegetal do município de Uberlândia-MG, utilizando imagens ETM+/LANDSAT 7. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia-MG. v. 17, n. 32, p. 37-46, jun. 2005.

BRUIJNZEEL, L.A. Hydrology of moist tropical forests and effects of conversion: a state of knowledge review. Amsterdam: UNESCO/IAHS, 1990. 224p.

BRUIJNZEEL, L.A. Predicting the hydrological impacts of land cover transformation in the humid tropics: the need for integrated research. In: GASH, J.H.C.; NOBRE, C.A.; ROBERTS, J.M.; VICTORIA, R.L. Amazonian deforestation and climate. Chichester, Inglaterra: J. Wiley, 1996. Cap.2.

BRUIJNZEEL, L.A. (De)forestation and dry season flow in the tropics: a closer look. **Journal of Tropical Forest**, Amsterdam, v.1, n.3, p.229-243, 1988.

BURROUGH, P. Principles of Geographical information Systems for Land Resources Assessment. Clarendon, Oxford, 1986, 193p.

CALDER, I.R. The Balquhidder catchment water balance and process experiment results in context: what do they reveal. **Journal of Hydrology**, Amsterdam v.145, p.467-477, 1993.

CALIL, P. de M. (Coord.). Levantamento de reconhecimento de alta intensidade dos solos, avaliação da aptidão agrícola e uso atual das terras da bacia de drenagem do córrego das Pedras e do ribeirão Jurubatuba no Estado de Goiás. Goiânia: Agência Rural SEMARH-GO, 2003. 134 p.

CAMARA, A. C. F. C. Análise da vazão máxima outorgável e da introdução simplificada da qualidade da água no processo de outorga da bacia do Rio Gramame (PB). Porto Alegre: UFRGS. 2003. 219p. Dissertação Mestrado.

CARVALHO, J. R. de; ASSAD, E. D. Análise espacial da precipitação pluviométrica no estado de São Paulo: Comparação de métodos de interpolação. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, SP. v. 25, n.2, p.377-384, 2005.

CHENG, J.D., Lin, L.L. e Lu, H. S. 2002. Influence of forests on water flows from headwater watersheds in Taiwan. **Forest Ecology and Management**, **165**: p. 11-28.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E.M.; CLARKE, R. T. Further evidence of changes in the hydrological regime of the River Paraguay: part of a wider phenomenon of climate change? **Journal of Hydrology**, Amsterdam v.245, p. 218-238. 2001.

COUTINHO, A.C. Segmentação e classificação de imagens Landsat- TM para mapeamento dos usos da terra na região de Campinas, S.P. São Paulo: USP, 1997.

DESTRO, G. F. G.; CAMPOS, S.; SIG-SPRING na caracterização do uso dos solos a partir de imagens de satélite CBERS. **Energia na Agricultura**. Botucatu, SP. v. 21, n. 4, p. 28-25, 2006.

ENGEL, V.; JOBBAGY, E.G.; STIEGLITZ, M.; WILLIAMS, M.; JACKSON, R.B. The hydrological consequences of eucalyptus afforestation in the Argentine Pampas. **Water Resources Research**, v.41, p.1-14, 2005.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Súmula da X reunião Técnica de Levantamento de Solos. Rio de Janeiro, 83p, 1979. (EMBRAPASNLCS. Micelânea, 1).

EUCLYDES, H. P. Regionalização de vazões máximas e mínimas para a bacia do rio Juatuba-MG. Viçosa: UFV, 1992. 66p. Dissertação Mestrado em engenharia agrícola.

FARLEY, K.A.; JOBBAGY, E.G.; JACKSON, R.B. Effects of afforestation on water yield: A global synthesis with implications for policy. **Global Change Biology**, v.11, n.10, p.1565-1576, 2005.

GOMES, N. M.; Variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo da sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela na Região do Alto Rio Grande, MG. 2005. 124p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

GOMES, Natalino Martins et al. Métodos de ajuste e modelos de semivariograma aplicados ao estudo da variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa. MG, 2007, vol. 31, n° 3.

GUIMARÃES, E. C. Geoestatística básica e aplicada. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2001. 47p.

HIBBERT, A.R. Forest treatment effects on water yield. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FOREST HYDROLOGY, 1967. Proceedings... New York: Pen State University/Pergamon, 1967. p.527-543.

INPE –Instituto de Pesquisas Espaciais –SPRING – Curso de classificação de imagens digitais. São José dos Campos: Inpe 2004.

JACOBS, J. M.; VOGUEL, R. M. Optimal allocation of water withdrawals in a river basin. **Journal of Water Resources Planning and Management**. v. 124, n.6, 1998.

KRIGE, D. G. A Statistical approach to some basic mine evaluation problems on the Witwatersrand. **Journal of South African Institution of Mining and Metallurgy**, Johannesburg, v. 52, p.119-139, 1951.

LANNA, A. E. L. Texto de Referência da Disciplina Gestão dos Recursos Hídricos: HIDP-78. Porto Alegre: Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas UFRGS, 1999.

LANNA, A. E. L. Texto de Referência da Disciplina Economia dos Recursos Hídricos: HIDP-04. Porto Alegre: Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas UFRGS, 2001.

LATUF, M. O. Mudanças no uso do solo e comportamento hidrológico nas bacias do rio Preto e ribeirão Entre Rios. Dissertação. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa.MG 2007.

Manual Técnico de Uso da Terra. Rio de Janeiro: IBGE, 2 ed.; n.7, 2006.

Manual do SPRING. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/spring/usuario/indice.htm>> Acesso em 12 de Janeiro de 2006.

McCULLOCH, J.S.G.; ROBINSON, M.; History of forest hydrology. **Journal of hydrology**, Amsterdam, v 150; 189-216p, 1993.

MELLO, C. R. de; VIOLA, M; R.; MELLO, J. M. de; SILVA, A. M. da. Continuidade espacial de chuvas intensas no estado de Minas Gerais. **Ciênc. agrotec.** [online]. 2008, v. 32, n. 2.

MELLO, J. M.; BATISTA, J. L. F.; RIBEIRO JUNIOR, P. J.; OLIVEIRA, M. S. Ajuste e seleção de modelos espaciais de semivariograma visando à estimativa volumétrica de *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 1, n. 1, p. 25-37, 2005.

MELLO, J. M. de. Geoestatística aplicada ao inventário florestal. 2004. 110p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

MOREIRA, R.A. Análise temporal do uso e ocupação do solo nos municípios do entorno do Parque nacional das Emas, com utilização de imagens Landsat M.S.S, Landsat 7 e CBERS. <<http://www.obt.inpe.br/cbers/cbers>> acesso em: 29 ago. 2008.

NICOLAU, M. R. R. C. Modelação e mapeamento da distribuição espacial de precipitação – uma aplicação a Portugal Continental. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia do Ambiente) – Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Lisboa.

NIMER, E. Climatologia do Brasil. Rio de Janeiro: IBGE, 1979, 422 p.

NOVO, E.M.I. de M. Sensoriamento Remoto: principais aplicações – São Paulo: Edgar Blücher, 3ª edição, 308p, 1999.

OLIVEIRA, V. A. Levantamento de reconhecimento com alta intensidade dos solos da Bacia do Rio João Leite. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 13., 1996, Águas de Lindóia. Anais... Águas de Lindóia (SP), 1996. 1 CD-ROM.

PEREIRA, S. B. Evaporação no lago de Sobradinho e disponibilidade hídrica no rio São Francisco. 2004. 95p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

PEREIRA, S.B.; PRUSKI, F.F.; NOVAES, L.F.; SILVA, D. D.da ; RAMOS, M. M. Análise do comportamento hidrológico do rio Verde Grande. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 13, n. 1, p. 55-60, 2005.

PETERSEN, G.W.; NIELSEN, G.A.; WILDING, L.P. Geographic information systems and remote sensing in land resources analysis and management. **Suelo y Planta**, v.1, p.531-543, 1991.

PRUSKI, F. F.; PEREIRA, S. B.; NOVAES, L. F.; SILVA, D. D.; RAMOS, M. M. Comportamento hidrológico na foz do rio São Francisco durante período de 1950 a 1999. Viçosa: Engenharia na Agricultura, v.13, n.2, p.118-123, 2005.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2006.

REIS, M. H.; GRIEBELER, N. P.; SARMENTO, P. H. L.; OLIVEIRA, L. F. C.; OLIVEIRA, J. M. Espacialização de dados de precipitação e avaliação de interpoladores



para projetos de drenagem agrícola no estado de Goiás e Distrito Federal. In: Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005.

RIBEIRO JR, P. J. Métodos geoestatísticos no estudo da variabilidade espacial dos parâmetros do solo, 1995, 99p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.

RIBEIRO JR, P. J.; DIGGLE, P. P. GeoR: a package for geostatistical analysis. R – News, Rochester, v. I, n. 2, p. 15 - 18, 2001.

ROCHA, C.H.B. Geoprocessamento: Tecnologia transdisciplinar. Juiz de Fora: Editora do autor, 2000.

SAHIN, M.J., HALL, M.J. -The effects of Afforestation and Deforestation on water yields. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, n. 1178, 239-309 p. 1996.

SALVIANO, A.A.C. Variabilidade de atributos de solo e de Crotalária juncea em solo degradado do município de Piracicaba-SP. 1996. 91p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.

SEMARH. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos. Superintendência de Gestão e Proteção Ambiental. Resolução nº 11 de 2007. Disponível em: < <http://www.semarh.goias.gov.br> > Acesso em: 15 Out. 2008.

SHARMA, R.H.; SHAKYA, N.M. Hydrological changes and its impacto in water resources of Bagmati watershed, Nepal. **Journal of Hydrology**, Amsterdam v. 11.051, 315-322 p. 2006.

SILVA JR, M. C. Composição florística, estrutura e parâmetros fitossociológicos do cerrado e sua relação com o solo na Estação Florestal de Experimentação de Paraopeba, MG. 1984. 130p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

SILVA, A.B. Sistemas de Informações Geo-referenciadas: Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). 1998, Campinas, SP.

SILVA, W. S.; VIEIRA, V. C. B.; Evolução Multitemporal do Uso e Cobertura do Solo no município de Urucuí - PI. In: Congresso de Pesquisa e Inovação da rede Norte Nordeste de Educação tecnológica, 2., 2007. João Pessoa. Anais eletrônicos... João Pessoa, 2007. Disponível em:<[http://www.redenet.edu.br/publicacoes/arquivos/20071221\\_104627GEOM-010.pdf](http://www.redenet.edu.br/publicacoes/arquivos/20071221_104627GEOM-010.pdf) > Acesso em: 30 mai. 2008.

SILVEIRA, A. L. L. Ciclo Hidrológico e a Bacia Hidrográfica. In TUCCI, C. E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. Porto Alegre: Edusp / ABRH, 1997, 35-51p.

**Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas.** SPRING. v.4.2. São José dos Campos: INPE/DPI, 2005.

Thompson, S.K. Sampling. 1.ed. New York: **A Wiley - Interscience Publication**, 1992. 343p.

TUCCI, C. E. M – Impactos da variabilidade climática e uso do solo sobre os recursos hídricos – ANA - Agência nacional de Águas- Maio, 2002.150 p.

TUCCI, C.E.M. Modelos hidrológicos. 2.ed. rev. Porto Alegre: UFRGS, 2005. 678 p.

TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T. Impacto das mudanças de cobertura vegetal no escoamento: Revisão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, RS, v.2, n.1, p.135-152. 1997.

UFG. Recomendações referentes de uma Base de dados técnicos como subsídio para outorga de direito de uso dos recursos hídricos superficiais na Bacia Hidrográfica do rio Meia Ponte – GO, Universidade Federal de Goiás, 2003. 192 p.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo: Tópicos em ciência do solo., **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, 2000. p. 1-54.

VIEIRA, S. R.; HATFIELD, T. L.; NIELSEN, D. R. & BIGGAR, J. W. Geoestatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, 51:1-75, 1983.

VIEIRA, S. R.; HATFIELD, T. L.; NIELSEN, D. R. & BIGGAR, J. W. Spatial variability of field-measured infiltration rate. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 45 : 1040 - 1048, 1981.

ZHANG, L.; DAWES, W.R.; WALKER, G.R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. **Water Resources Research**, v.37, n.3, p.701-708, 2001.